

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

**Elektrostatische und fluidische Self-Assembly-Prozesse für die präzise Montage von Mikrosystemen**

der Forschungsstelle(n)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, IMTEK - Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik,  
Georges-Köhler-Allee 103, 79110 Freiburg im Breisgau

Das IGF-Vorhaben 17.456 N der Forschungsvereinigung Schweißen wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Albert-Ludwigs-Universität  
Institut für Mikrosystemtechnik  
Aufbau- und Verbindungstechnik  
Georges-Köhler-Allee 103  
D-79110 Freiburg i. Br.

Prof Dr.-Ing. Jürgen Wilde

Freiburg, 10.02.2015

Ort, Datum

Dipl.-Phys. Marcel Tondorf

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

„Self-Assembly“: Zusammenfassung

**Thema: Elektrostatische und fluidische Self-Assembly-Prozesse für die präzise Montage von Mikrosystemen.**

Im Rahmen des Projektes wurde der elektrostatische Self-Assembly-Prozess charakterisiert und optimiert. Dazu wurden Proben und Versuchsträger aus Borosilikatglas mit spiralförmig angeordneten Elektrodenstrukturen aus Aluminium prozessiert, montiert und bezüglich ihrer Positioniergenauigkeit nach der Montage analysiert. Zur Montage wurden die Bauteile auf einem niederviskosen UV-Klebstofffilm manuell vorpositioniert, elektrostatisch ausgerichtet und anschließend durch Härtung des Klebstoffs mechanisch fixiert. Um die notwendigen Parameter für eine erfolgreiche und wiederholbare Positionierung zu ermitteln und einzugrenzen erfolgten die Versuche unter Variation wichtiger Einflussgrößen, wie Ausrichtungsspannung, Elektrodengeometrie, Temperatur, Menge und Viskosität des verwendeten Klebstoffs. Die Messung des Ausrichtungsfehlers der Bauteile nach Montage sowie der resultierenden Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat erfolgte an diversen Messgeräten wie z.B. einem konfokalen Mikroskop. Weiterhin wurden Videoaufnahmen des Ausrichtungsprozesses aufgezeichnet und ausgewertet, um anhand der resultierenden mittleren Ausrichtungsgeschwindigkeit die Ausrichtungskraft beim Prozess zu berechnen. Zusätzlich wurde der Einfluss durch die UV-Härtung der Klebstoffe auf die resultierende Verschiebung der Bauteile in vertikaler und lateraler Richtung mit Hilfe der Grauwertkorrelation untersucht.

Im Laufe des Projekts wurde gezeigt, dass mit dem elektrostatischen Self-Assembly-Prozess Bauteile aus Borosilikatglas bereits ab einer elektrischen Spannung von 35 V mit einer Genauigkeit von  $< 2 \mu\text{m}$  positioniert werden können. Auch Bauteile aus Silicium konnten erfolgreich mit einer Genauigkeit  $< 4 \mu\text{m}$  positioniert werden. Der Prozess wird durch eine geeignete Wahl eines niederviskosen Klebstoffs und einem passenden Design der Bauteile ermöglicht. Es ist eine minimale laterale Ausrichtungskraft von  $4\mu\text{N}$  notwendig um Bauteile erfolgreich zu positionieren.

Für eine eindrucksvolle Vorführung des entwickelten Self-Assembly Prozesses bitte folgende Videos in einem Internet-Browser aufrufen:

Deutsche Version: [http://youtu.be/5mr1\\_oPvX9s](http://youtu.be/5mr1_oPvX9s) (Dauer 1:25)

English version: <http://youtu.be/SlqNgOIHfvg> (Duration 1:18)

## Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema .....	1
2	Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	1
3	Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse .....	1
3.1	Forschungsziel .....	1
3.2	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels .....	1
3.3	Forschungsergebnisse .....	2
3.3.1	AP 1: Justage- und Teststrukturen .....	2
3.3.2	AP 2: Prüfstand zur elektrostatischen Positionierung .....	6
3.3.3	AP 3: Versuche zur elektrostatischen Positionierung .....	9
3.3.4	AP 4: In situ Härteprozess .....	27
3.3.5	AP 5: Prozessapplikation .....	31
3.3.6	AP 6: Prozesshandbuch .....	33
3.4	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse .....	36
3.5	Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU .....	36
3.6	Angaben über gewerbliche Schutzrechte .....	36
3.7	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags .....	37
4	Plan zum Ergebnistransfer .....	38
5	Erläuterungen der Verwendung der Zuwendung .....	40
6	Zusammenfassung .....	42
7	Literatur .....	44

# 1 Forschungsthema

Elektrostatische und fluidische Self-Assembly-Prozesse für die präzise Montage von Mikrosystemen.

## 2 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

Kleben ist eine Schlüsseltechnologie zur Montage und Kontaktierung in der Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik. Dabei kommt im Wesentlichen der folgende Prozessablauf zur Anwendung:

Klebstoffapplikation => Positionierung der Teile => Aushärtung

In vielen Anwendungen der Mikrosystemtechnik ist eine Positioniergenauigkeit im Mikrometerbereich notwendig, wie bei mikrooptischen, mikromechanischen und Hochfrequenzbauelementen. In einzelnen Fällen, wie bei der optischen Faserklebung, werden bereits adaptive Klebprozesse angewendet: Dabei wird eine physikalische Größe, z.B. die Dämpfung gemessen und als Gütekriterium bei einem geregelten Justierprozess verwendet. Ein hoch genaues System stellt dabei die Position der Teile so lange nach, bis die optimale Lage erreicht ist. Anschließend müssen die Bauteile noch fixiert werden; in der Regel geschieht dies durch Kleben.

Die Bestückung und Positionierung im Mikrometerbereich mit Hilfe von Positioniergeräten ist sehr aufwändig und die zugehörigen Maschinen sind sehr kapitalintensiv. Aus diesen Gründen sind in den letzten Jahren immer wieder Versuche zum Self-Assembly von Bauteilen unternommen worden. Die Forschungsstelle hat im Rahmen eines Vorhabens zur Mikro-Nanointegration neue Verfahren der fluidischen und elektrostatischen Selbst-positionierung erprobt. Dabei ergab sich, dass eine Selbstpositionierung von Bauelementen durch Benetzungskräfte möglich ist, wenn die Klebstellen hydrophil-hydrophob strukturiert werden. Zugleich wurde die Machbarkeit eines grundsätzlich neuen Verfahrens, die Positionierung von Bauteilen durch elektrostatische Kräfte gezeigt.

Obwohl in der industriellen Aufbau- und Verbindungstechnik Kleben eines der wichtigsten und vielseitigsten Verfahren der Montagetechnik darstellt, gibt es bislang kaum industrielle Anwendungen, die eine Selbstjustierung von Bauteilen, basierend auf physikalischen Prinzipien wie Oberflächenspannung oder elektrostatischen Kräfte zwischen den Füge teilen beim Klebprozess systematisch nutzen.

## 3 Forschungsziel / Lösungsweg / Ergebnisse

### 3.1 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines neuen Fertigungsprozesses, in dem Bauelemente der Mikrosystemtechnik durch eine elektrostatisch gesteuerte Selbstjustierung positioniert und anschließend in situ durch einen strahlungshärtenden Klebstoff fixiert werden. Teilziele waren

- Strukturen zur fluidischen Selbstorganisation und elektrostatischen Steuerung und
- ein Prozess zur Fixierung der vorjustierten Bauteile durch lokale Aushärtung von Klebstoffen mit Hilfe von Licht oder Strahlung.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde vollständig erreicht.

### 3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Aufbauend auf dem Stand der Technik und den Vorarbeiten der Forschungsstelle wurde ein methodischer Ansatz für die Erreichung der angestrebten Forschungsergebnisse aufgezeigt. Dabei werden für die Erreichung des Forschungsziels Arbeitspakete definiert, es wird der für deren Bearbeitung benötigte Zeitraum festgelegt und der Bearbeitungsaufwand abgeschätzt. Die Ergebniskontrolle und die Übergabe der Ergebnisse der Arbeitspunkte erfolgen an Meilensteinen (MS). Der Zeitaufwand für die Bearbeitung ist in den folgenden Abschnitten in Personenmonaten (PM) angegeben.

Das vorliegende Vorhaben wurde unter intensiver Nutzung der experimentellen und theoretischen Arbeitsmöglichkeiten am Institut für Mikrosystemtechnik durchgeführt. Wesentliche Teilaspekte der Untersuchung waren dabei:

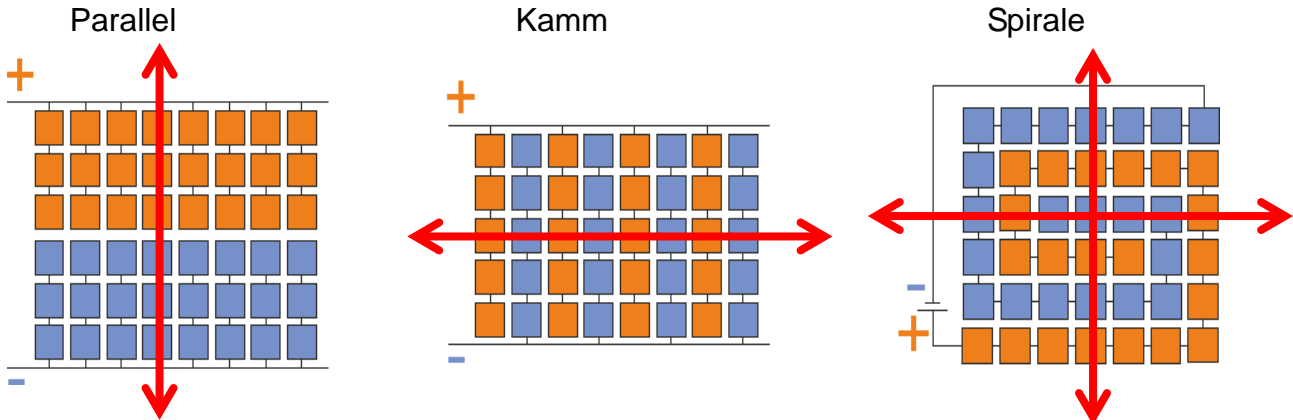
- Aufbau einer Arbeitsstation zum Self-Assembly
- Justagestrukturen auf Substraten und den Bauteilen
- Füge-technische Prozessuntersuchungen
- Festlegung von Einflussgrößen und deren Grenzen
- Prozessmodellierungen und Beschreibungen

Am Institut für Mikrosystemtechnik ist hohe Kompetenz zur Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen, insbesondere mit Polymeren, vorhanden. Darüber hinaus liegt große Erfahrung bei der Herstellung von Strukturen für mikrosystemtechnische Applikationen und das Kleben in der MST vor. Hierdurch waren die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens und die Gewinnung gesicherter Erkenntnisse gegeben. Ein Prozesshandbuch fasst diese Erkenntnisse zusammen und liefert alle notwendigen Parameter für ein erfolgreiches Self-Assembly.

### 3.3 Forschungsergebnisse

#### 3.3.1 AP 1: Justage- und Teststrukturen

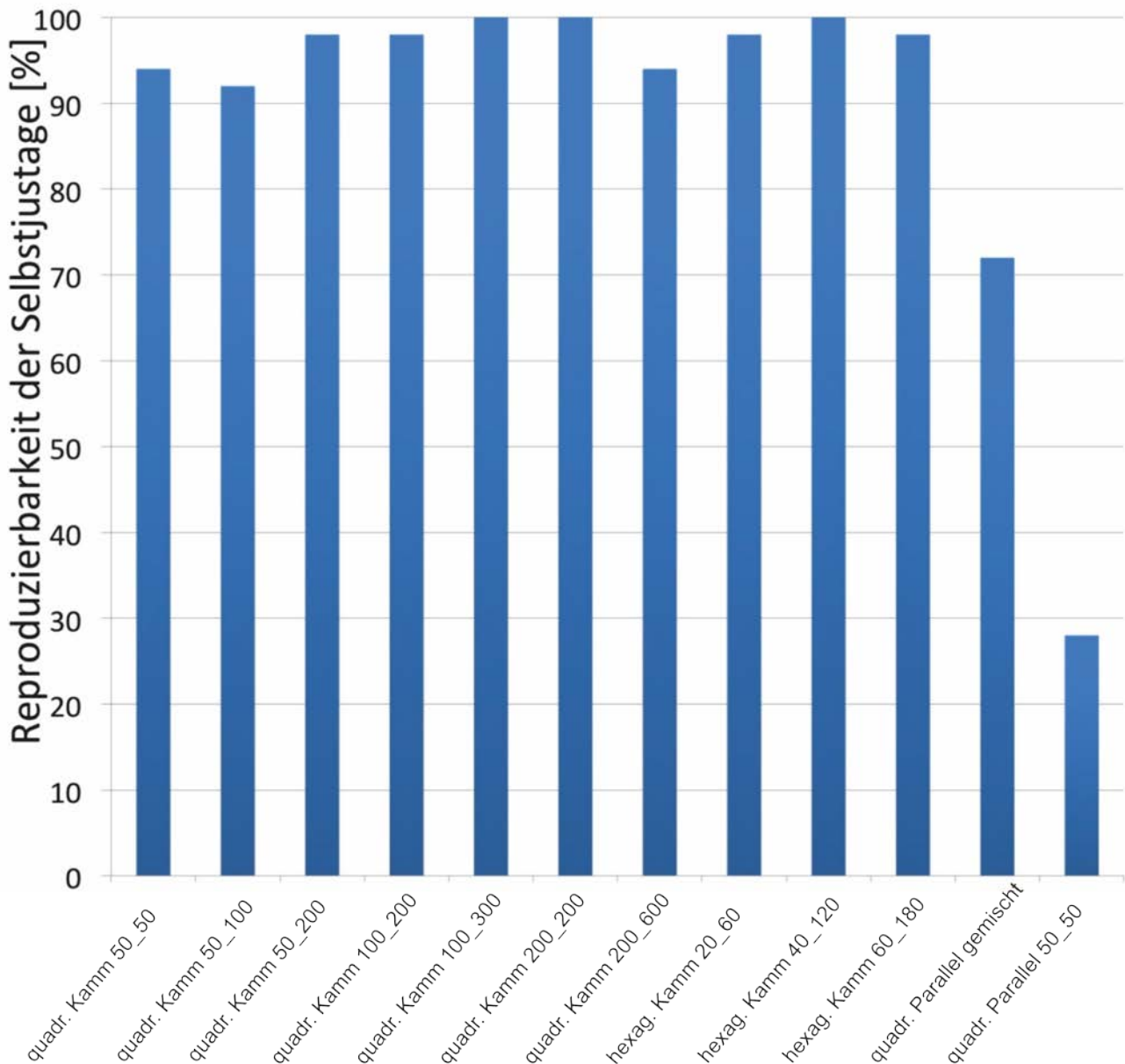
Erster wesentlicher Teilschritt war das Layout und die Herstellung von Justierungsstrukturen, mit denen Lage und Bewegungsgeschwindigkeit der zu positionierenden Bauelemente optimal eingestellt werden können. Während für eine einachsige Positionierung Paare von Strukturen ausreichen, erfordert eine zweiachsige Positionierung eine höhere Anzahl von Strukturen. Es wurden drei Generationen von Proben untersucht:



Die für die Versuche benötigten Proben wurden im Reinraum des IMTEK hergestellt. Hierzu wurden verschiedenen Masken entwickelt und hergestellt, welche die Strukturen auf Glas-Substrat übertragen. Als Trägermaterial wurde bevorzugt Pyrex gewählt, da dieses Material durchsichtig ist und optische Messungen mit Mikroskopen möglich sind. Dies spart Zeit und erhöht die Präzision der Messungen. Nachdem der Prozess auf Pyrex ausreichend charakterisiert war, wurden weitere Teststrukturen auf Silizium prozessiert und erneut vermessen werden, siehe AP 5.

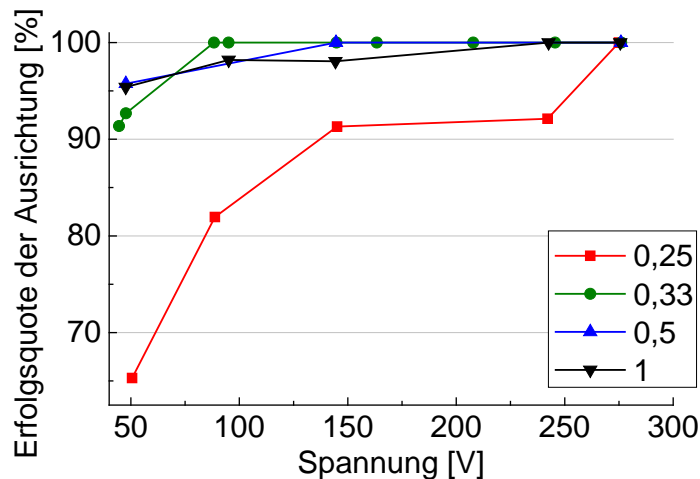
In einer Versuchsreihe wurde geprüft, ob Justagestrukturen sich überhaupt ausrichten. Dazu wurden 12 verschiedene Strukturen vom Typ **Parallel** und **Kamm** untersucht. Variiert wurden die Parameter Form der Kontaktierungspads, Abstand und Größe der Pads sowie die Verschaltung der Pads (parallel- oder kammartig). In

Abbildung 1 sind die Resultate der 100 wiederholten Ausrichtungsversuche zu erkennen. Kamm-Strukturen liefern dabei die zuverlässigsten Reproduzierbarkeiten. In mehr als 91 % der Fälle gelingt eine Positionierung, bei den geeignetsten Strukturen sind dies sogar 100 %.



**Abbildung 1:** Erfolgsrate zur elektrostatischen Selbstpositionierung für unterschiedliche Designs der Strukturen. In der x-Achse sind folgende Informationen zu finden: „Format“ „strukturform“ „Kantenlänge“ \_ „Abstand“. Kammstrukturen sind am besten für die Versuche geeignet.

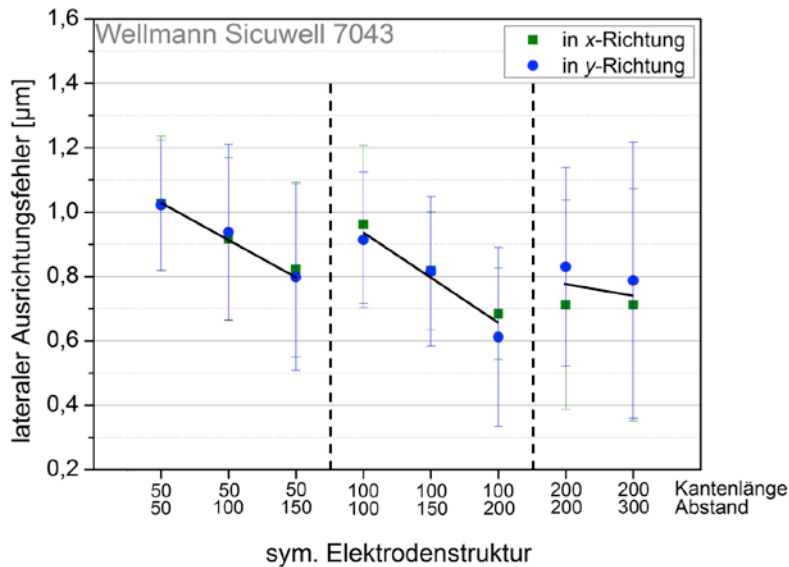
Betrachtet man den Quotienten aus Länge zu Abstand kann man eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Designs aus parallel- und kammartigen Strukturen erhalten. In Abbildung 2 ist dieser Quotient dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei hohen Spannungen > 275 V alle Bauteile immer korrekt ausgerichtet werden. Bei niedrigen Spannungen < 275 V ist die richtige Wahl der Geometrie entscheidend. Kleine Quotienten – also schmale Pads mit großen Abständen dazwischen - bedeuten, dass die Kräfte zur Positionierung zu gering sind und eine Ausrichtung nicht immer erfolgreich ist. Kleine Quotienten sind somit zu vermeiden.



**Abbildung 2:** Quotient aus Pad-Länge und –Abstand für verschiedene Struktur-Designs.

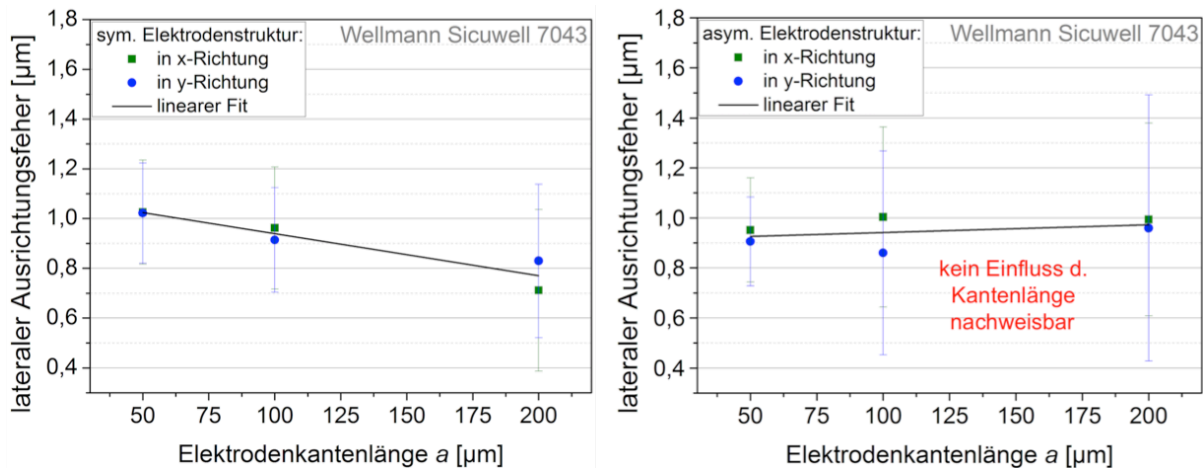
Um den Einfluss der Elektrodengeometrie auf die laterale Ausrichtungsgenauigkeit beim Self-Assembly-Prozess zu analysieren, wurden Montagen mit acht symmetrischen Spiralstrukturen und drei asymmetrischen spiralförmigen Elektrodenstrukturen durchgeführt. Die Ausrichtung der Bauteile erfolgte mit fünf definierten Spannungen von jeweils 35 V, 70 V, 120 V, 180 V, und 250 V. Für alle Montagen wurde der Klebstoff Sicutwell 7043 der Marke Wellmann verwendet. Die symmetrischen Elektrodenstrukturen variieren in der Kantenlänge der einzelnen Elektrodenpads und ihrem Abstand zueinander. Die asymmetrischen Elektrodenstrukturen variieren nur in der Kantenlänge der Elektrodenpads und dienen zur Untersuchung, ob und welchen Einfluss ein asymmetrisches, elektrisches Feld auf die Ausrichtungsgenauigkeit der Bauteile ausübt. Insgesamt wurden jeweils drei Montagen pro Elektrodenstruktur und Ausrichtungsspannung durchgeführt und die Bauteile nach Montage bezüglich ihres lateralen Ausrichtungsfehlers am konfokalen Mikroskop untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt. Um den Einfluss der Elektrodengeometrie deutlich zu machen, wurde hierzu der laterale Ausrichtungsfehler pro Elektrodenstruktur aus Montagen mit allen fünf Spannungen pro Elektrodenstruktur gemittelt.

In Abbildung 3 ist der laterale Ausrichtungsfehler, jeweils in  $x$ - und  $y$ -Richtung, in Abhängigkeit der symmetrischen Elektrodenstrukturen dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Ausrichtungsfehler mit zunehmender Kantenlänge der Elektrodenpads einen durchschnittlich geringeren Wert aufweist. Diese Abnahme erfolgt bei Verdopplung der Kantenlänge (von 50  $\mu\text{m}$  auf 100  $\mu\text{m}$  und von 100  $\mu\text{m}$  auf 200  $\mu\text{m}$ ) linear um jeweils durchschnittlich ca. 0,1  $\mu\text{m}$ . Ebenfalls ist dem Graphen deutlich zu entnehmen, dass mit zunehmendem Elektrodenabstand bei gleichbleibender Kantenlänge die Bauteile genauer ausgerichtet werden konnten. Diese Abnahme des lateralen Ausrichtungsfehlers erfolgt für Strukturen mit 50  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  Kantenlänge mit durchschnittlich ca. 0,1  $\mu\text{m}$  pro Abstandserhöhung. Für Elektrodenstrukturen mit 200  $\mu\text{m}$  Kantenlänge konnte ein Zusammenhang zwischen dem lateralen Ausrichtungsfehler und dem Elektrodenabstand nicht eindeutig bestimmt werden.



**Abbildung 3:** Lateraler Ausrichtungsfehler der Bauteile nach Montage in Abhängigkeit symmetrischer Elektrodenstruktur, jeweils in x- und y-Richtung.

In Abbildung 4 ist zusätzlich der laterale Ausrichtungsfehler, jeweils in x- und y-Richtung, für die symmetrischen (links) und asymmetrischen (rechts) Elektrodenstrukturen mit einem Abstand- zu Kantenlängen-Verhältnis von  $w/a = 1$  dargestellt. Bei Montagen mit symmetrischen Elektrodenstrukturen beträgt der laterale Ausrichtungsfehler von Bauteilen mit einer Elektrodenkantenlänge  $a = 50 \mu\text{m}$  durchschnittlich ca.  $(1,0 \pm 0,2) \mu\text{m}$ . Mit größerer Kantenlänge nimmt auch der laterale Ausrichtungsfehler der Bauteile linear ab. Bauteile nach Montagen mit einer Elektrodenkantenlänge von  $a = 200 \mu\text{m}$  weisen demnach einen durchschnittlichen lateralen Ausrichtungsfehler von ca.  $(0,8 \pm 0,3) \mu\text{m}$  auf. Bei Montagen mit asymmetrischen Elektrodenstrukturen konnte dieser Zusammenhang nicht bestätigt werden. Hierbei schwankt der laterale Ausrichtungsfehler um einen durchschnittlichen Wert von ca.  $(0,95 \pm 0,5) \mu\text{m}$  und ist damit unabhängig von der Elektrodenkantenlänge.



**Abbildung 4:** Lateraler Ausrichtungsfehler der Bauteile nach Montage in Abhängigkeit der Elektrodenkantenlänge  $a$  für symmetrischen (links) und asymmetrischen (rechts) Elektrodenstrukturen.

Der lineare Zusammenhang zwischen der Elektrodenkantenlänge von symmetrischen Elektrodenstrukturen und dem resultierenden Ausrichtungsfehler der Bauteile in lateraler Richtung entspricht dem theoretischen Modell aus. Hierbei ist die Kantenlänge  $a$  der Elektrode proportional zur Ausrichtungskraft  $F_x$  in lateraler Richtung. Damit wirkt auf das Bauteil eine höhere Kraft in lateraler Richtung, wodurch eine genauere Positionierung des Bauteils wahrscheinlicher wird. Untersuchungen der Montagen mit asymmetrischen Elektrodenstrukturen konnten diese Theorie jedoch nicht bestätigen. Bei diesen Strukturen führte eine Vergrößerung der Elektrodenkantenlänge zu keiner Verbesserung der Ausrichtungsgenauigkeit. Die Streuung der Messwerte und der laterale Ausrichtungsfehler waren im Vergleich zu den Montagen mit symmetrischen Elektrodenstrukturen

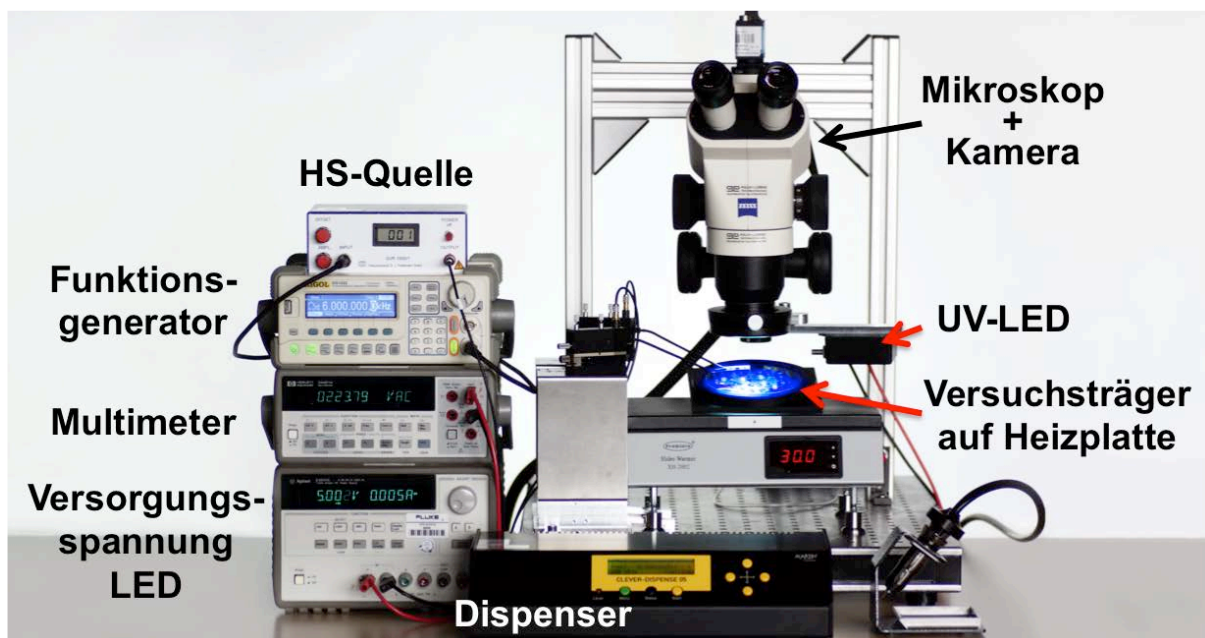


deutlich größer. Es lässt sich daher die Vermutung schließen, dass das generierte elektrische Feld der asymmetrischen Elektrodenstrukturen einen negativen Einfluss auf die elektrostatische Ausrichtung der Bauteile hat. Die erhöhte Streuung der Messwerte zeigt, dass eine steuerbare Ausrichtung beim Self-Assembly-Prozess mit asymmetrischen Elektrodenstrukturen erschwert wird und daher symmetrische Elektrodenstrukturen zu bevorzugen sind.

Die Ergebnisse haben weiterhin gezeigt, dass durch eine Erhöhung des Abstandes zwischen den einzelnen Elektroden die Bauteile im Durchschnitt genauer ausgerichtet werden konnten. Dies lässt vermuten, dass die generierten elektrischen Felder, der einzelnen Substratelektroden sich gegenseitig stören, wenn sich die Elektroden geometrisch zu nah aneinander befinden. Mit größerem Elektrodenabstand kann vermutlich dieser Störeinfluss reduziert werden, wodurch die Bauteile mit einer höheren Genauigkeit ausgerichtet werden können. Bei Montagen mit Elektrodenstrukturen von 200  $\mu\text{m}$  Kantenlänge führte eine Erhöhung des Elektrodenabstandes um 100  $\mu\text{m}$  nicht immer zur Verbesserung der Ausrichtungsgenauigkeit von Bauteilen. Vermutlich ist eine Erhöhung des Elektrodenabstands um 100  $\mu\text{m}$  bei diesen relativ großen Elektrodenpads zu gering, um einen messbaren Einfluss zu verursachen. Bei Abständen von insgesamt 400  $\mu\text{m}$  und 600  $\mu\text{m}$  wäre dieser Einfluss wahrscheinlich deutlich sichtbarer, ist aber wegen Platzmangel auf der Bauteil-Oberfläche nicht realisierbar.

### 3.3.2 AP 2: Prüfstand zur elektrostatischen Positionierung

Als experimentelle Plattform wurde ein Testsystem aufgebaut, mit dem der Gesamtprozess der Positionierung und Fixierung erprobt werden konnte. Das System basiert auf einer Arbeitsstation, bei der die Substrathalterung bei moderater Temperatur geregelt werden kann. Der als Dielektrikum und viskose Lagerung dienende Klebstoff wird dispensiert und das Bauteil wird fluidisch und elektrostatisch vorpositioniert. Anschließend wird der UV-härtende Klebstoff belichtet und damit ausgehärtet. Der Versuchsaufbau bietet eine effektive Möglichkeit Bauteile in kurzer Zeit grob zu positionieren, elektrostatisch auszurichten und in-situ zu fixieren. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt und besteht aus den nachfolgenden Komponenten:



**Abbildung 5:** Lateraler Ausrichtungsfehler der Bauteile nach Montage in Abhängigkeit der Elektrodenkantenlänge  $a$  für symmetrischen (links) und asymmetrischen (rechts) Elektrodenstrukturen.

#### Dispenser

Der digitale Dispenser (Clever-Dispense-05 der Firma Martin) berechnet anhand von hinterlegten Klebstoffeigenschaften, wie Viskosität, den Druckimpuls für ein exaktes Volumen nach der Zeit-Druck Methode und erlaubt dadurch eine wiederholbare Applikation genau definierter Klebstoffmenge im Submikroliter-Bereich. Zur Dispensierung aller Klebstoffe wurden Dosiernadeln mit 0,33 mm Innendurchmesser und 5  $\text{cm}^3$  Kartuschen verwendet. Die Kartuschen bestehen aus schwar-

zem Kunststoff zum Schutz des Klebstoffs vor vorzeitiger Härtung durch Umgebungslicht während der Montage und bei Lagerung.

### *UV-LED*

Zur Fixierung der Bauteile nach elektrostatischer Ausrichtung erfolgte die Aushärtung der Klebstoffe mittels UV-Strahlung. Hierzu wurde während der Projektlaufzeit eine neuartige UV-LED entwickelt, bestehend aus einer LED NCSU033B von Nichia und einem Diffusor Aufsatz (Abbildung 6). Diese hat laut Hersteller ein Emissionsmaximum bei 365 nm Wellenlänge und eine Maximalleistung von 3 W. Das Intensitätsspektrum dieser LED zeigt ein Intensitätsmaximum bei 367 nm, gemessen mit einem Spektrometer. Die LED wurde zur Härtung aller Klebstoffe mit 5 V Versorgungsspannung und einer Stromstärke von 550 mA, unterhalb ihrer Maximalleistung, betrieben.



**Abbildung 6:** UV-LED mit Diffusor Aufsatz.

### *Stereomikroskop*

Das Stereomikroskop (Stemi 2000C der Firma Zeiss) wurde zusammen mit der Kamera UI 325xCP-M der Firma IDS betrieben und im Rahmen des Projektes neu angeschafft. Die Kombination diente als Hilfe bei der manuellen Positionierung der Bauteile auf den Klebstoff während der Montage und zur Aufzeichnung des Self-Assembly-Prozesses für spätere Analysen. Zur genaueren Analyse der Ausrichtungsgeschwindigkeit von Bauteilen während der Montage wurde die Hochgeschwindigkeitskamera DMK 23UP031 Monochrom der Firma The Imaging Source (Abbildung 7) mit maximal 132 fps in Kombination mit dem Stereomikroskop verwendet.

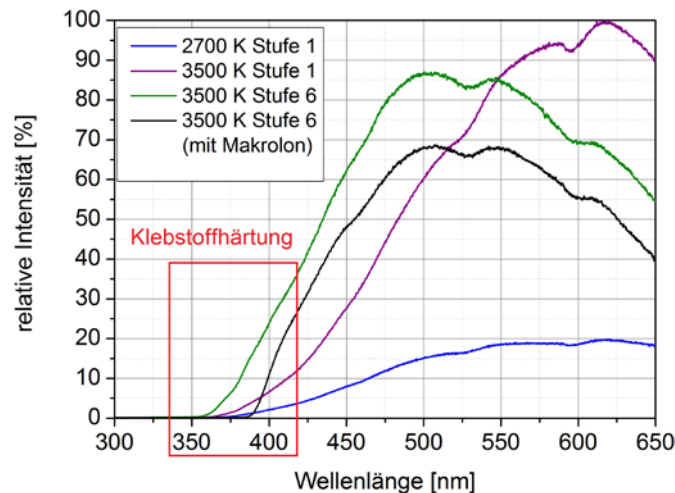


**Abbildung 7:** Hochgeschwindigkeitskamera DMK 23UP031 der Firma „The Imaging Source“.

### *Mikroskop-Beleuchtung*

Als Mikroskop-Beleuchtung wurde die Kaltlichtquelle vom Typ KL-1500 LCD der Firma Zeiss mit einer Spaltringleuchte verwendet. Die Ringleuchte war eine Leihgabe und erzeugt eine kreisförmige, gegen das Zentrum gerichtete, Ausleuchtung der Proben. Dadurch werden die Proben nicht direkt bestrahlt und eine vorzeitige Klebstoffhärtung reduziert. Bei den verwendeten, UV-härtenden Klebstoffen erfolgte die Härtungsinitiierung hauptsächlich im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 420 nm. Im Rahmen des Projekts Self-Assembly wurde unter Verwendung des Spektrometers HR2000+ der Firma Ocean Optics in Kombination mit einem CCD Detektor ILX511B der Marke SONY das Spektrum der Kaltlichtquelle gemessen (Abbildung 8). Das aufgenommene Intensitätsspektrum weist im Wellenlängenbereich 350-420 nm bei minimaler (2700 K) und maximaler Farbtemperatur (3500 K) eine vergleichsweise geringe Intensität auf. Zusätzlich ist die Intensität über eine mechanische Blende regulierbar. Hierbei ist die maximale Öffnung der Blende bei Stufe 6 und die minimale Öffnung bei Stufe 1. Bei einer Kombination aus 2700 K Farbtemperatur und Stufe 1 der Blendenöffnung ist die Intensität der Belichtung am geringsten. Um die Intensität bis zu einer Wellenlänge von ca. 380 nm komplett zu filtern, wurde ein Kunststoffblättchen aus Makrolon vor

den Strahlenleiter in die Kaltlichtquelle verbaut. Bei allen verwendeten Modi konnte keine Klebstoffhärtung durch die Kaltlichtquelle festgestellt werden.



**Abbildung 8:** Intensitätsspektrum der Kaltlichtquelle vom Typ KL-1500 LCD von Zeiss bei minimaler (2700 K) und maximaler Farbtemperatur (3500 K) und mit Filter aus Makrolon.

### Heizplatte

Die Heizplatte (XH-2002 der Firma Premiere) wurde im Rahmen des Projektes angeschafft und erzeugte eine konstante Temperatur von  $\pm 0,1$  °C am Substratwafer während der Montage unabhängig der Temperaturschwankungen im Labor, bedingt durch Tages-, Jahreszeit oder Abwärme der Geräte. Sie wurde außerdem für die Versuche mit höheren Temperaturen verwendet. Die Kalibrierung der Heizplatte erfolgte mit einem Platin-Messwiderstand (Pt-1000) auf der Wafer Chuck-Oberfläche. Vor den Versuchsreihen wurde überprüft, ob der Substratwafer die eingestellte Temperatur erreicht und ggf. wurde an der Anzeige der Heizplatte die Abweichung korrigiert. Die Heizplatte kann eine Maximaltemperatur von 100 °C erreichen.

### Hochspannungsquelle (HS-Quelle)

Die Hochspannungsquelle (HV-SVR1000-1 der Firma piezosystem Jena GmbH) wurde im Rahmen des Projektes angeschafft und hat eine maximale Ausgangsspannung von 1000 V und wurde zur Generierung der Ausrichtungsspannung benötigt. Um die Elektrodenstrukturen nicht zu beschädigen und aus Sicherheitsgründen für den Anwender wurden Montagen mit maximal 350 V durchgeführt. Die elektrische Kontaktierung der Elektrodenstrukturen erfolgte mit Kontaktspitzen über die Kontaktpads auf dem Substratwafer.

### Funktionsgenerator

Der Funktionsgenerator (DG1022 der Firma Ringo!) stand am Institut bereits zur Verfügung und diente zur Erzeugung einer Wechselspannung durch Überlagerung des generierten Sinussignals mit der Spannung aus der HS-Quelle. Es wurden Montagen mit 50 bis 10 kHz durchgeführt.

### Multimeter

Die zur Ausrichtung der Bauteile erzeugte Spannung wurde mit dem Multimeter (34401A der Firma Hewlett Packard) an den Kontaktspitzen gemessen und kontrolliert. Bei Bedarf konnte die Spannung über die HS Quelle und den Funktionsgenerator angepasst werden. Das Gerät war ebenfalls bereits vorhanden.

### 3.3.3 AP 3: Versuche zur elektrostatischen Positionierung

Das Arbeitspaket 3 war mit seinen zahlreichen Variationsmöglichkeiten das umfangreichste. Auf den nächsten Seiten werden folgende Einflussgrößen näher untersucht:

- Manuelle Vorpositionierung
- Ausrichtungsspannung
- Klebstoffmenge
- Temperatur
- Viskosität
- Ausrichtungsgeschwindigkeit
- Montagen mit SU8-Becken

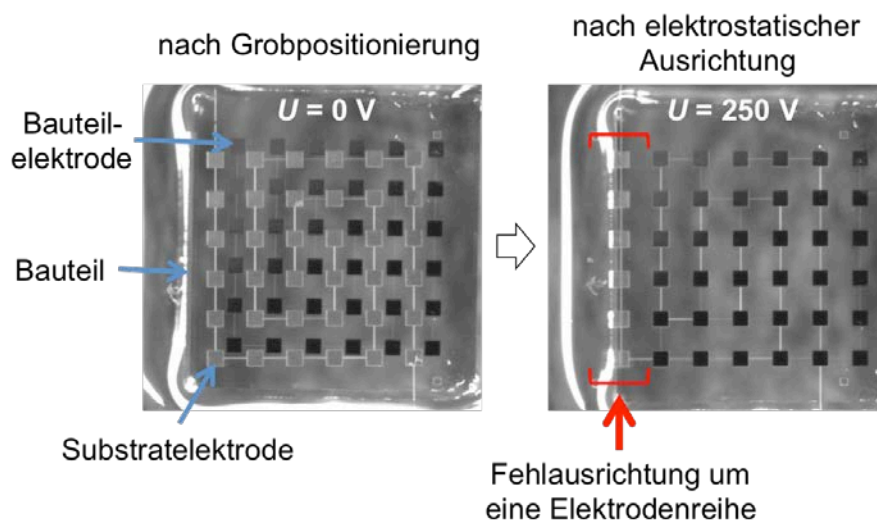
#### Manuelle Vorpositionierung

In den folgenden Abschnitten werden die Einflüsse der manuellen Positionierung der Bauteile auf ihre elektrostatische Ausrichtungsfähigkeit dargestellt. Diese Erkenntnisse wurden dazu genutzt, um die Bauteile mit möglichst identischer Ausgangssituation für weitere Versuche manuell zu positionieren. Dadurch soll der Einfluss der manuellen Positionierung bei Variation anderer Einflussgrößen wie Spannung oder Klebstoffmenge auf die resultierende Positioniergenauigkeit der Bauteile nach Montage minimiert werden.

#### Haupteinflüsse auf die elektrostatische Ausrichtungsfähigkeit

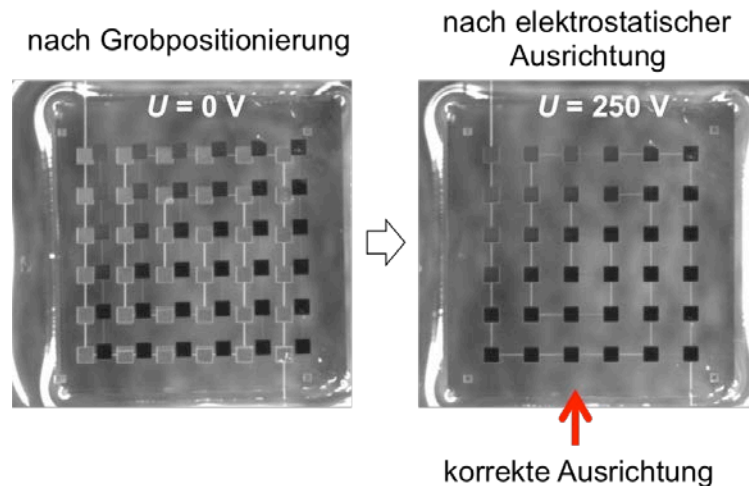
Zu Beginn jeder Montage wurden die Bauteile auf einen zuvor applizierten Klebstofftropfen manuell positioniert. Der Einfluss dieser „Grobpositionierung“ auf die anschließende Ausrichtung der Bauteile wird anhand nachfolgender Beispiele veranschaulicht und diskutiert.

In Abbildung 9 links ist ein Bauteil mit  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  Elektrodenpads, die sich im Abstand von  $300 \mu\text{m}$  zueinander befinden, nach der manuellen Positionierung dargestellt. Die Bauteilelektroden befinden sich in der Nähe der Zielelektroden auf der Substratseite. Im oberen Bereich der Elektrodenstruktur sind die Bauteilelektroden jedoch näher an den rechten Nachbarlektroden, als an den linken Zielelektroden des Substrats. Nach anschließender, elektrostatischer Ausrichtung ist das Bauteil nicht korrekt ausgerichtet (Abbildung 9 rechts). Das Bauteil befindet sich bezüglich seiner Zielposition um eine Elektrodenreihe nach rechts versetzt. Dadurch ergibt sich zwangsläufig ein Ausrichtungsfehler von ca.  $500 \mu\text{m}$  in dieser Richtung.



**Abbildung 9:** Fehlausrichtung des Bauteils nach ungenauer, manueller Positionierung; Bauteil nach Grobpositionierung (links); Bauteil nach elektrostatischer Ausrichtung um eine Elektrodenreihe fehlausgerichtet (rechts).

Dasselbe Bauteil wurde erneut platziert. Diesmal sind die Bauteilelektroden näher an den Zielelektroden, als an den Nachbarlektroden des Substrats (Abbildung 10 links). Nach der elektrostatischen Ausrichtung des Bauteils befinden sich die Bauteilelektroden direkt über den Zielelektroden des Substrats (Abbildung 10 rechts). Das Bauteil ist damit erfolgreich ausgerichtet und kann im nachfolgenden Schritt fixiert werden.



**Abbildung 10:** Erfolgreiche Ausrichtung des Bauteils; Bauteil nach manueller Positionierung (links); Bauteil nach elektrostatischer Ausrichtung korrekt ausgerichtet (rechts).

Die zwei Beispiele zeigen, dass die korrekte Ausrichtung des Bauteiles von seiner Lage nach der manuellen Positionierung abhängt. Durch das manuelle Platzieren des Bauteils auf den Klebstofffilm ist es nicht eindeutig, welche Lage seine Elektroden bezüglich der Substratelektroden haben werden. Diese Fehlpositionierung der Bauteilelektroden gegenüber den Substratelektroden wird hauptsächlich von drei Faktoren beeinflusst:

- Manueller Positionierungsfehler beim Platzieren des Bauteils durch Bediener
- Fluidische Eigenschaften des Klebstoffs (Viskosität, Kapillarkraft)
- Geschwindigkeit und Richtung des Bauteils beim Platzieren

Selbst wenn der manuelle Positionierungsfehler minimiert wird, haben die Bauteile direkt nach ihrer Platzierung ausreichend kinetische Energie, um auf dem Klebstofffilm außer Reichweite der Zielelektroden wegzuschwimmen. Im Folgenden wird gezeigt welchen maximalen Positionierungsfehler die Bauteilelektroden nach der Grobpositionierung haben dürfen, um anschließend erfolgreich elektrostatisch positioniert werden zu können.

### *Bestimmung der Toleranzgrenzen*

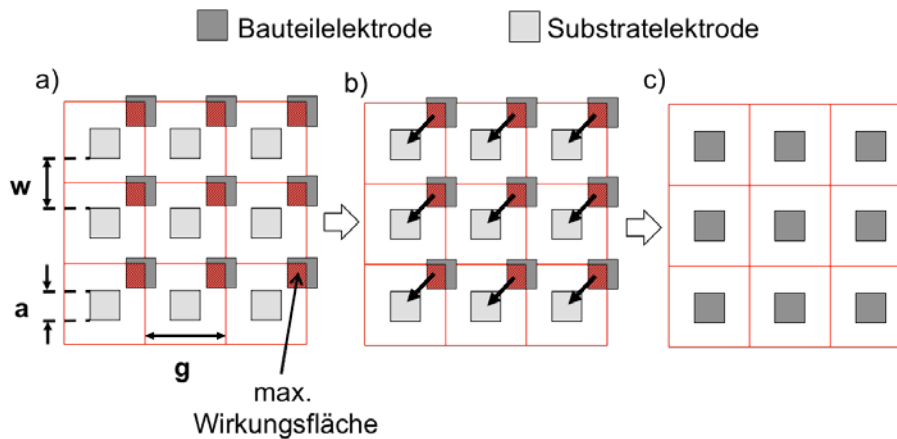
Eine erfolgreiche elektrostatische Positionierung der Bauteile erfordert eine bestimmte Lage der Bauteilelektroden bezüglich ihrer jeweiligen Zielelektroden auf dem Substrat nach der Grobpositionierung. In folgenden Beispielen wird die maximale Abweichung (Toleranzgrenze), die das Bauteil nach der Grobpositionierung haben darf, in Bezug auf die Geometrie seiner Elektrodenstruktur veranschaulicht.

Durch das Anlegen einer Ausrichtungsspannung an die Substratelektroden wird an jeder einzelnen quadratischen Elektrode ein elektrostatisches Feld generiert, das eine Wechselwirkung mit den Bauteilelektroden in unmittelbarer Umgebung bewirkt. Es wird angenommen, dass das generierte Feld in x- und y-Richtungen gleich stark sei und bis zur Hälfte des Abstandes  $w$  zwischen den einzelnen Elektroden reicht. Damit wirkt das Feld idealerweise im Bereich der rotumrandeten Quadrate mit Kantenlänge  $g$  (Abbildung 11a). Die Kantenlänge  $g$  ist von der Geometrie der jeweiligen Elektrodenstruktur abhängig und bildet sich aus der Summe der Kantenlänge  $a$  der Elektrode und ihrem Abstand  $w$  zur benachbarten Elektroden zu.

$$g = a + w$$

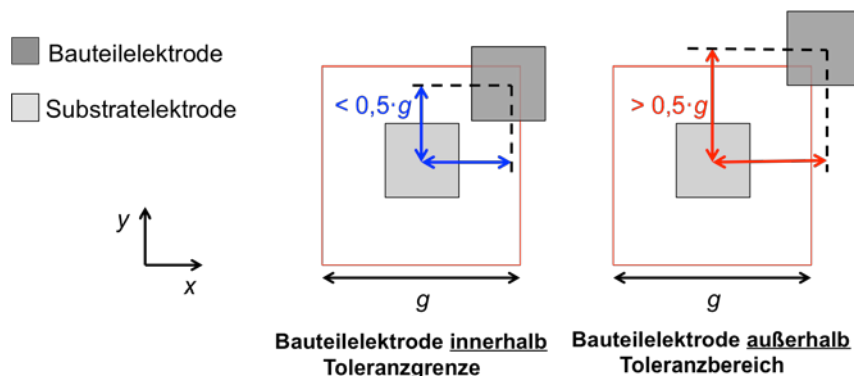
Befindet sich eine Bauteilelektrode innerhalb dieser Felder, so wird auf diese, abhängig von ihrem Flächenanteil im jeweiligen Feld, eine elektrostatische Anziehungskraft ausgeübt. Die Stärke dieser Kraft steigt mit zunehmendem Elektrodenflächenanteil, der sich in diesem Feld befindet. Die Bauteilelektrode wird sich daher in Richtung derjenigen Substratelektrode bewegen, dessen Kraftfeld die größte Überlappung mit der Bauteilelektrode (maximale Wirkungsfläche) bildet. In Abbildung 11 ist diese maximale Wirkungsfläche rotstraffiert dargestellt. Die Summe aller Wirkungsflächen gibt Aufschluss darüber in welche Richtung das Bauteil sich bewegen wird. In Abbildung 11b befindet sich die maximale Überlappungsfläche im Feld der Zielelektrode. Deshalb tendieren alle

Bauteilelektroden dazu, sich in diesem Beispiel Richtung links-unten zur Zielelektrode zu bewegen. Dadurch wird sich auch das Bauteil in diese Richtung elektrostatisch ausrichten (Abbildung 11c).



**Abbildung 11:** Schematische Darstellung der Bewegungsrichtung von Bauteilelektroden während des elektrostatischen Self-Assembly.

Damit sich der größere Flächenanteil der Bauteilelektroden nach manueller Positionierung im Feld seiner Zielelektrode befindet, muss sich das Zentrum der Bauteilelektrode im Abstand von  $< 0,5 \cdot g$  vom Zentrum der Zielelektrode, jeweils in  $x$ - und  $y$ -Richtung, befinden (Abbildung 12). Für die Elektrodenstruktur mit den kleinsten Elektroden und Abständen ( $a = 50 \mu\text{m}$  und  $w = 50 \mu\text{m}$ ) ergibt sich dadurch eine maximale Toleranzgrenze für die manuelle Positionierung von  $< 100 \mu\text{m}$ . Für die Struktur mit den größten Elektroden und Abständen ( $a = 200 \mu\text{m}$  und  $w = 300 \mu\text{m}$ ) ist diese maximale Toleranzgrenze mit  $< 600 \mu\text{m}$  sechsmal höher.

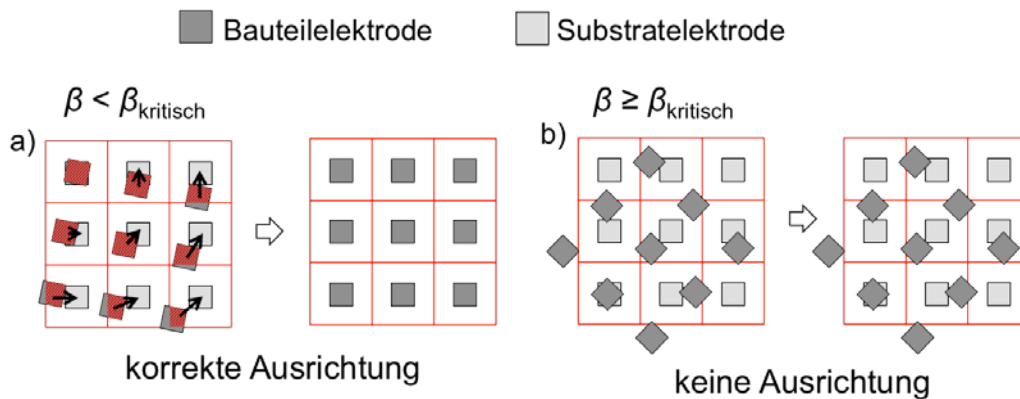


**Abbildung 12:** Schematische Darstellung der notwendigen Toleranzgrenze bei manueller Positionierung für eine anschließend erfolgreiche elektrostatische Ausrichtung der Bauteile. Bauteilelektrode innerhalb der Toleranzgrenze (links); Bauteilelektrode außerhalb der Toleranzgrenze (rechts).

Dieser Zusammenhang zeigt, dass Bauteile mit größeren Elektroden und Abständen mehr Raum für eine erfolgreiche Grobpositionierung bieten. Eine beliebige Skalierung dieser Größen könnte sich jedoch in Realität unter folgenden Umständen negativ auf die spätere elektrostatische Ausrichtung auswirken. Mit größer werdendem Abstand  $w$  bei konstant bleibender Kantenlänge  $a$  erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die benachbarten Felder zu weit weg voneinander sind. Dadurch wirkt auf die Bauteilelektrode ein zu schwaches elektrostatisches Feld, wodurch diese sich nicht ausrichten lassen.

Das oben genannte Beispiel bezieht sich auf den einfachsten Fall mit Bauteilelektroden, die sich parallel zu den Substratelektroden befinden. In der Regel liegt das Bauteil nach der manuellen Positionierung verdreht und damit sind die Elektrodenkanten zueinander nicht mehr parallel. In Abbildung 13 sind zwei solcher Situationen schematisch dargestellt. Die Verdrehung bewirkt, dass die überlappenden Bauteilelektrodenflächen mit den jeweiligen Zielfelder der Substratelektroden nun unterschiedlich groß oder überhaupt nicht vorhanden sind. Die Summe der Kräfte, die auf die Elektrodenfläche wirken entscheidet auch hier in welche Richtung sich das Bauteil bei elektrostatischer Ausrichtung bewegen wird. Ist die Verdrehung klein genug ( $\beta < \beta_{\text{kritisch}}$ ), so ist die Summe der Bauteilelektrodenflächen im elektrostatischen Feld der Substratzielelektroden größer, als im Feld benachbarter Substratelektroden (Abbildung 13a). Dadurch werden sich die Bauteilelektroden während der elektrostatischen Ausrichtung in Richtung ihrer jeweiligen Zielelektrode auf der Sub-

stratseite bewegen und das Bauteil entsprechend erfolgreich ausrichten. Ist die Verdrehung zu groß ( $\beta \geq \beta_{\text{kritisch}}$ ), so ist die Summe der Bauteilelektrodenflächen im elektrostatischen Feld der benachbarter Substratelektroden größer, als im Feld der Zielelektroden (Abbildung 13b). Das Bauteil richtet sich somit nicht aus.

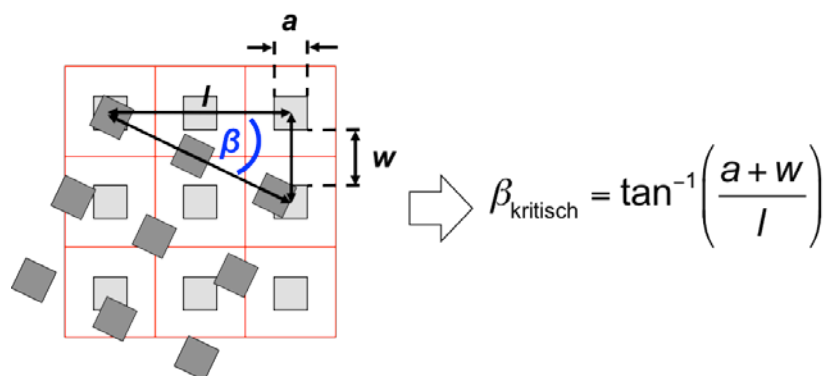


**Abbildung 13:** Elektrostatische Ausrichtung der Bauteile nach Verdrehung durch manuelle Positionierung; bei Verdrehung  $< \beta_{\text{kritisch}}$  erfolgt eine korrekte Ausrichtung (a); bei Verdrehung  $\geq \beta_{\text{kritisch}}$  erfolgt keine Ausrichtung (b).

Damit die Summe an Überlappungsflächen im Feld der Zielelektrode größer ist, als im Feld benachbarter Substratelektroden, darf das Bauteil nur soweit verdreht sein, bis die äußere Bauteilelektrode um eine Reihe bezüglich ihrer Zielsubstratelektrode verschoben ist. Diese Situation ist in Abbildung 14 dargestellt. Eine erfolgreiche Ausrichtung erfolgt somit, wenn der Verdrehungswinkel der Bauteilelektroden bezüglich der Substratelektroden kleiner  $\beta_{\text{kritisch}}$  ist. Für  $\beta_{\text{kritisch}}$  gilt aus trigonometrischer Beziehung zwischen den Abständen  $l$  und  $a + w$ :

$$\beta_{\text{kritisch}} = \tan^{-1}\left(\frac{a+w}{l}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{a+w}{(n-1) \cdot (a+w)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{n-1}\right) \quad (4.2)$$

Hierbei ist  $l$  der Abstand zwischen den äußeren Elektrodenpadzentren und  $n$  die Anzahl an Elektrodenpads in einer Reihe. Die maximal erlaubte Verdrehung hängt damit von der Anzahl  $n$  an Elektrodenpads einer Elektrodenstruktur ab. Mit einer geringeren Anzahl an Elektrodenpads pro Struktur ist eine maximal erlaubte Verdrehung für eine anschließend erfolgreiche, elektrostatische Ausrichtung des Bauteils höher. Für die verwendeten Strukturen ergibt sich dadurch eine erlaubte Verdrehung zwischen  $\beta_{\text{kritisch}} = 1,97^\circ$  (mit  $a = 50 \mu\text{m}$ ;  $w = 50 \mu\text{m}$ ;  $n = 30$ ) und  $\beta_{\text{kritisch}} = 11,31^\circ$  (mit  $a = 200$ ;  $w = 300 \mu\text{m}$ ;  $n = 6$ ).



**Abbildung 14:** Trigonometrischer Zusammenhang des maximal erlaubten Verdrehungswinkel  $\beta_{\text{kritisch}}$  für eine anschließende erfolgreiche elektrostatische Ausrichtung des Bauteils.

Die aufgestellte Hypothese wurde anhand von Videoaufnahmen am Stereomikroskop während der Montage der Bauteile analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Hierbei ist die experimentell ermittelte Verdrehung der Bauteile, bei denen eine erfolgreiche Ausrichtung anschließend möglich war, im Vergleich zur theoretisch berechneten mit Gleichung (4.3) gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der maximal erlaubte Verdrehungswinkel für Strukturen mit einer höheren Anzahl an Elektrodenpads pro Reihe steigt. Dieser Anstieg verhält sich ähnlich dem theoretischen. Die gemessenen Werte fallen für alle Strukturen kleiner aus, als die berechneten. Die höchste,

relative Abweichung mit ca. 24 % findet für den kleinsten erlaubten Verdrehungswinkel bei der Struktur mit 30 Elektrodenpads pro Reihe statt. Die kleinste, relative Abweichung von ca. 7,8 % wurde bei dem größten, erlaubten Verdrehungswinkel festgestellt. Die Abweichung zwischen dem gemessenen und dem theoretischen Verdrehungswinkel resultiert hauptsächlich aus zwei Gründen. Für die Messungen war es nicht möglich den theoretisch errechneten Verdrehungswinkel der Bauteile in Realität exakt nachzustellen. Außerdem konnten die Verdrehungswinkel anhand der Aufnahmen am Bildschirm mit einer Genauigkeit von maximal  $0,5^\circ$  ausgewertet werden, sodass für sehr kleine Winkel der relative Messfehler steigt, dieser bei größeren Winkeln vernachlässigt werden kann.

**Tabelle 1:** Berechneter und gemessener maximaler Verdrehungswinkel  $\beta_{\text{kritisch}}$  bei manueller Positionierung für eine anschließend erfolgreiche, elektrostatische Ausrichtung der Bauteile mit unterschiedlichen Elektrodenstrukturen.

Elektrodenstruktur	Anzahl n Elektrodenpads pro Reihe	max. Verdrehungswinkel $\beta_{\text{kritisch}}$ [°] (berechnet)	max. Verdrehungswinkel $\beta_{\text{kritisch}}$ [°] (gemessen)	relative Abweichung
50_50	30	1,97	1,5	24 %
100_100	14	4,40	4,0	9 %
100_200	10	6,34	5,5	13,2 %
200_300	6	11,31	10,5	7,2 %

Die dargestellten Toleranzgrenzen für die manuelle Positionierung, bei denen eine anschließende erfolgreiche Ausrichtung der Bauteile noch möglich ist, zeigen, dass die manuelle Positionierung der Bauteile einen entscheidenden Einfluss darauf hat, ob der Self-Assembly-Prozess erfolgreich durchgeführt werden kann. Diese Toleranzgrenze ist von der Geometrie der Elektrodenstruktur abhängig. Sie nimmt mit größerer Kantenlänge der Elektrodenpads und größerem Abstand zwischen den einzelnen Elektroden zu. Bauteile mit weniger Elektrodenpads haben ebenfalls eine höhere Toleranzgrenze bezüglich des maximal möglichen Verdrehungswinkels. Befindet sich die Lage des Bauteils nach der manuellen Positionierung innerhalb dieser Toleranzgrenzen, bedeutet es nicht zwangsläufig, dass eine elektrostatische Ausrichtung der Bauteile in jedem Fall durchführbar ist. Die Einhaltung der Toleranzgrenzen bei der manuellen Positionierung ist also eine notwendige aber keine hinreichende Bedingung für die elektrostatische Ausrichtung der Bauteile.

### Ausrichtungsspannung

Im Folgenden wird der Einfluss der angelegten Spannung zur präzisen Positionierung von Mikroteilen näher untersucht.

#### Allgemeine Voraussetzung für die Versuchsreihen

Zur Charakterisierung des Self-Assembly-Prozesses wurde der Einfluss der Ausrichtungsspannung auf die Positioniergenauigkeit und Lage der Bauteile nach Montage analysiert. Dazu wurden Montagen mit Bauteilen aus Pyrex mit unterschiedlicher Elektrodengeometrie und unter Variation der Ausrichtungsspannung durchgeführt. Hierbei wurden die Bauteile mit jeweils fünf festgelegten Spannungswerten von 35 V, 70 V, 120 V, 180 V und 250 V ausgerichtet. Als Klebstoff wurde ausschließlich der Sicuwell 7043 der Firma Wellmann verwendet. Die Fixierung der Bauteile erfolgte mit der UV-LED mit Diffusor bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 365 \text{ nm}$ . Zur Auswertung wurden jeweils drei Bauteile pro Elektrodenstruktur und Spannungswert montiert und am konfokalen Mikroskop LSM PASCAL 5 der Firma Zeiss vermessen.

#### Messunsicherheiten

Zur Bestimmung der Messunsicherheit bei Messungen mit dem konfokalen Mikroskop LSM PASCAL 5 der Firma Zeiss wurde ein Bauteil nach Montage zehn Mal hintereinander bezüglich seines lateralen Ausrichtungsfehlers und der Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat vermessen. Die Messungen sollen Aufschluss über den zufälligen Messfehler ergeben, der bei jeder Messung durch Benutzer und Mikroskop entsteht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Standardabweichung bei Messungen der Klebstoffschichtdicke kleiner ist als bei Messungen zur Bestimmung des lateralen Positionierungsfehlers, obwohl der



durchschnittliche Messwert für die Klebstoffschichtdicke fast sieben Mal höher ist. Grund hierfür ist, dass zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit des Bauteils die Grenzen zwischen den Kanten der Messstrukturen manuell, durch den Benutzer gesetzt werden müssen. Hieraus resultiert neben dem Messfehler durch das Mikroskop ein zusätzlicher Messfehler seitens des Benutzers. Zur Bestimmung der Klebstoffschichtdicke ist eine exakte Positionierung dieser Grenzen nicht erforderlich. Dadurch resultiert dieser Fehler hauptsächlich aufgrund von Messabweichungen, die bedingt durch die Auflösung des konfokalen Mikroskops zustande kommen.

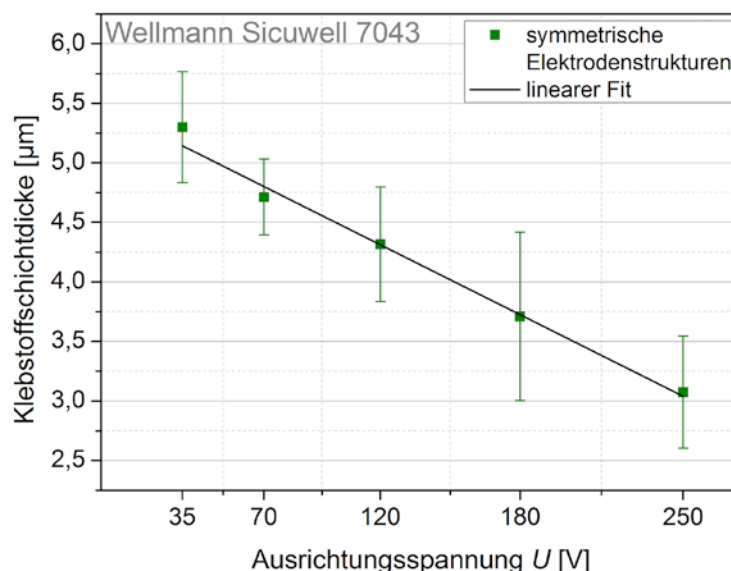
**Tabelle 2:** Messergebnisse nach zehnmaliger Vermessung eines Bauteils nach der Montage am konfokalen Mikroskop bezüglich seines lateralen Fehlers und der Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat.

	Lateraler Positionierungsfehler	Klebstoffschichtdicke
<b>Mittelwert</b>	1,08 $\mu\text{m}$	6,8 $\mu\text{m}$
<b>Standardabweichung</b>	0,17 $\mu\text{m}$	0,10 $\mu\text{m}$
<b>Standardabweichung normiert auf Mittelwert</b>	15,7 %	1,4 %

### Klebstoffschichtdicke

Zur Charakterisierung der Bauteillage nach Montage wurden Messungen bezüglich der Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 15 für Bauteile mit symmetrischen Elektrodenstrukturen und in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung dargestellt. Die Resultate für Bauteile mit asymmetrischen Elektrodenstrukturen verhalten sich analog zu diesen und werden daher hier nicht explizit aufgezeigt.

Die Ergebnisse für Bauteile mit symmetrischer Elektrodenstruktur aus Abbildung 15 zeigen, einen linearen Zusammenhang zwischen der resultierenden Klebstoffschichtdicke und Ausrichtungsspannung während der Montage. Die Klebstoffschichtdicke hat bei Montagen mit der kleinsten gewählten Spannung von 35 V einen Maximalwert von durchschnittlich  $(5,3 \pm 0,5) \mu\text{m}$ . Dieser nimmt mit zunehmenden Spannungen linear ab. Die minimale Klebstoffschichtdicke von durchschnittlich  $(3,1 \pm 0,5) \mu\text{m}$  wurde bei Bauteilen, die mit einer Spannung von 250 V ausgerichtet wurden, gemessen. Damit ergibt sich eine Abnahme von ca.  $1 \mu\text{m}$  pro 100 V im Bereich zwischen 35 V und 250 V.



**Abbildung 15:** Resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat nach Montage in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$ .

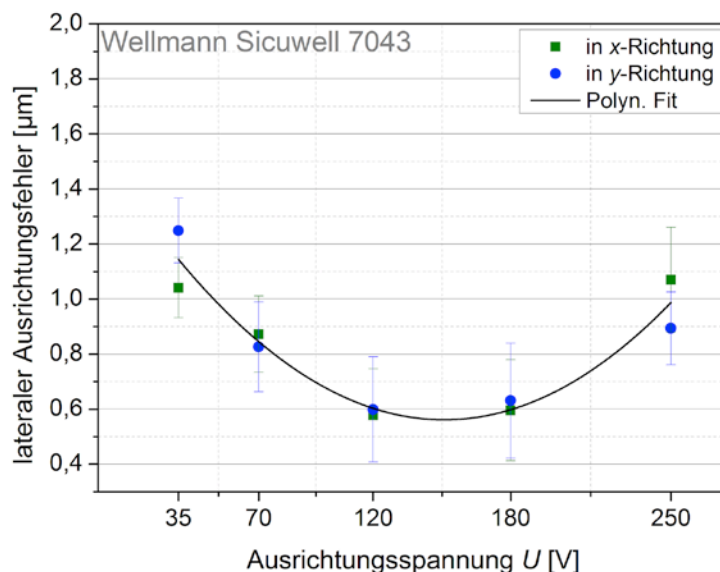
Der lineare Zusammenhang resultiert aus der theoretischen Grundlage, dass die vertikale Kraft, die auf die geladenen Elektroden wirkt, proportional zum Quotienten aus Ausrichtungsspannung und Elektrodenabstand ( $U/d$ ) ist. Wird die Ausrichtungsspannung erhöht, so wirkt eine dementsprechend höhere vertikale Kraft auf die Elektroden des Bauteils und das Bauteil wird stärker vom

Substrat angezogen. Da das Bauteil beweglich gelagert ist, nimmt der Abstand zwischen Bauteil und Substrat und damit die resultierende Klebstoffschichtdicke mit zunehmender Spannung linear ab.

### Lateraler Ausrichtungsfehler

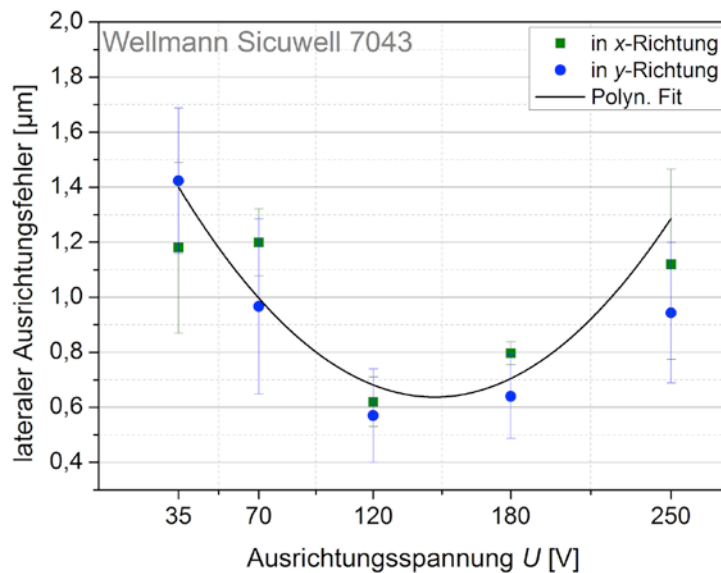
Zur Bestimmung des lateralen Ausrichtungsfehlers wurde die Fehlausrichtung des Bauteils jeweils in  $x$ - und  $y$ -Richtung gemessen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 51 und 52 dargestellt. Hierbei zeigt die Abbildung 16 den jeweiligen durchschnittlichen Ausrichtungsfehler für Bauteile mit symmetrischer und die Abbildung 17 mit asymmetrischer Elektrodenstruktur.

Für Bauteile mit symmetrischer Elektrodenstruktur bei Montagen mit 35 V Ausrichtungsspannung weist der durchschnittliche laterale Ausrichtungsfehler einen Wert von  $(1,05 \pm 0,1) \mu\text{m}$  in  $x$ -Richtung und  $(1,25 \pm 0,1) \mu\text{m}$  in  $y$ -Richtung auf. Der Ausrichtungsfehler fällt zunächst sowohl in  $x$ -Richtung, als auch in  $y$ -Richtung ausgehend von 35 V mit höherer Ausrichtungsspannung bis 120 V auf einen Wert von  $(0,6 \pm 0,2) \mu\text{m}$ . Der Spannungsschritt von 120 V auf 180 V bewirkt keine genauere Ausrichtung der Bauteile. Das Minimum des Ausrichtungsfehlers wurde durch einen polynominellen Fit bei ca. 150 V bestimmt. Mit anschließend zunehmender Spannung auf 250 V erhöht sich der Ausrichtungsfehler auf  $(1,1 \pm 0,2) \mu\text{m}$  in  $x$ -Richtung und  $(0,9 \pm 0,15) \mu\text{m}$  in  $y$ -Richtung. Im Bereich des minimalen Ausrichtungsfehlers bei 120 und 180 V weisen die Messwerte in  $x$ - und  $y$ -Richtung nahezu keinen Unterschied auf. Mit größer werdendem Ausrichtungsfehler wird ihr Unterschied deutlicher. Die Abweichung beläuft sich bei jeweils 35 und 250 V auf ca.  $0,2 \mu\text{m}$ . Umgekehrt verhält es sich mit der Standardabweichung. Bei höheren Ausrichtungsfehlern ist diese mit ca.  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  nur halb so groß, als bei den kleinsten Ausrichtungsfehlern mit einer Standardabweichung von ca.  $\pm 0,2 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 16:** Lateraler Ausrichtungsfehler für Bauteile mit symmetrischer Elektrodenstruktur in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$ .

Bauteile mit asymmetrischer Elektrodenstruktur weisen nach Montage einen qualitativ ähnlichen spannungsabhängigen Verlauf ihres lateralen Ausrichtungsfehlers auf (Abbildung 17), wie Bauteile mit symmetrischen Elektrodenstrukturen. Ausgehend von 35 V Ausrichtungsspannung nimmt der Ausrichtungsfehler mit einem Wert von  $(1,4 \pm 0,3) \mu\text{m}$  in  $y$ -Richtung bis 120 V linear ab  $(0,6 \pm 0,15) \mu\text{m}$  und steigt anschließend bis 250 V auf einen Wert von  $(0,95 \pm 0,25) \mu\text{m}$  wieder an. Der Ausrichtungsfehler in  $x$ -Richtung verhält sich, bis auf Montagen mit 70 V Ausrichtungsspannung, qualitativ analog zum Fehler in  $y$ -Richtung. Diese Diskrepanz ist vermutlich auf einen Montagefehler durch Oberflächenkontamination oder zufälligen Messfehler zurückzuführen. Der polynominelle Fit aus den Werten für den Ausrichtungsfehler in  $x$ - und  $y$ -Richtung zeigt, dass sich das Minimum bei ca. 150 V befindet und bestätigt die Ergebnisse aus Abbildung 16 bezüglich des lateralen Ausrichtungsfehlers mit symmetrischen Elektrodenstrukturen. Die Unterschiede zwischen den Ausrichtungsfehlern in  $x$ - und  $y$ -Richtung sind jeweils untereinander, im Vergleich zu Bauteilen mit symmetrischen Elektrodenstrukturen, um Faktor zwei höher.



**Abbildung 17:** Lateraler Ausrichtungsfehler für Bauteile mit asymmetrischer Elektrodenstruktur in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$ .

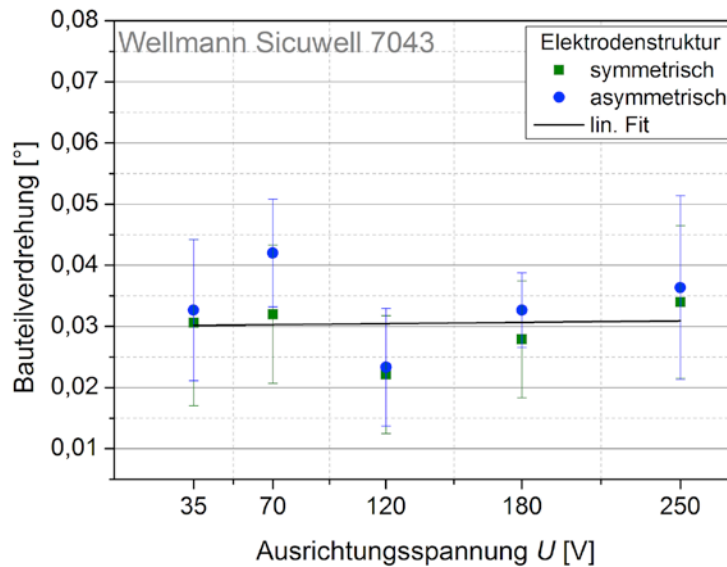
Die Versuche bezüglich der lateralen Ausrichtungsgenauigkeit in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung zeigen, dass sowohl bei Bauteilen mit symmetrischen, als auch bei Bauteilen mit asymmetrischen Elektrodenstrukturen die Ausrichtung der Bauteile, ausgehend von der kleinsten verwendeten Spannung von 35 V, mit zunehmender Spannung bis 120 V genauer erfolgt. Eine anschließend weitere Erhöhung der Ausrichtungsspannung führt jedoch zu höherer Fehlausrichtung der Bauteile. Aus der Sichtweise der Theorie ist die laterale Ausrichtungskraft proportional zu  $U^2$ . Demnach müsste sich das Bauteil bei höheren Spannungen genauer ausrichten lassen, da die resultierende Ausrichtungskraft, welche das Bauteil bewegt, ebenfalls erhöht wird. Anhand der gemessenen Ausrichtungsgeschwindigkeit wurde tatsächlich gezeigt, dass die Ausrichtungskraft proportional zu  $U^2$  ist. Es lässt sich daher schlussfolgern, dass ab einer bestimmten kritischen Spannung  $U_{\text{krit}}$  zusätzliche Einflüsse entstehen können, die eine negative Auswirkung auf die Positioniergenauigkeit haben. Dieser ist jedoch noch nicht verstanden und muss weiter untersucht werden. Aus den Messungen der Klebstoffschichtdicke nach Montage in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung ist ersichtlich, dass die Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat, bei Montagen mit höheren Spannungen linear abnimmt. Dies zeigt, dass die elektrostatische Anziehungskraft tatsächlich größer wird. Mit kleiner werdendem Abstand zwischen Bauteil und Substrat erhöht sich jedoch ebenso die Kapillarkraft. Es ist deshalb vorstellbar, dass der Einfluss der Kapillarkraft ab einem bestimmten Abstand so stark ist, dass dieser durch die elektrostatische Ausrichtungskraft nicht mehr kompensiert werden kann und dadurch Positionierungsfehler begünstigt werden. Dieses Phänomen zeigt sich vor allem, wenn man das Bauteil zunächst auf den Klebstofffilm platziert und anschließend auf seine Oberfläche einen leichten, mechanischen Druck in vertikaler Richtung ausübt. Dadurch wird das Bauteil leicht gegen das Substrat gedrückt, bleibt haften und kann anschließend nicht mehr elektrostatisch ausgerichtet werden.

### Verdrehung der Bauteile

Aus den Messwerten zur lateralen Positioniergenauigkeit von Bauteilen, wurde die Verdrehung der Bauteile nach ihrer Montage bezüglich ihrer Sollposition berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Hierbei ist die Bauteilverdrehung in Grad über die jeweilige Ausrichtungsspannung, sowohl für symmetrische, als auch für asymmetrische Elektrodenstrukturen aufgetragen.

In Abbildung 18 ist zu erkennen, dass die absolute Verdrehung der Bauteile nach Montage bezüglich ihrer Sollposition im Bereich zwischen  $(0,023 \pm 0,01)^\circ$  für Montagen mit 120 V und  $(0,042 \pm 0,01)^\circ$  für Montagen mit 70 V liegt. Die minimalste Verdrehung der Bauteile konnte bei Montagen mit 120 V sowohl für asymmetrische, als auch für symmetrische Elektrodenstrukturen festgestellt werden. Bauteile mit asymmetrischen Elektrodenstrukturen weisen eine durchschnittlich um ca. 14 % höhere Verdrehung auf, als Bauteile mit symmetrischer Elektrodenstruktur. Hierbei findet die maximale Abweichung von ca.  $0,1^\circ$  bei Montagen mit 70 V statt. Insgesamt betrach-

tet verhält sich die Verdrehung der Bauteile nach ihrer Montage konstant (linearer Fit) und beläuft sich auf einen durchschnittlichen Wert von ca.  $0,03^\circ \pm 0,02^\circ$ .

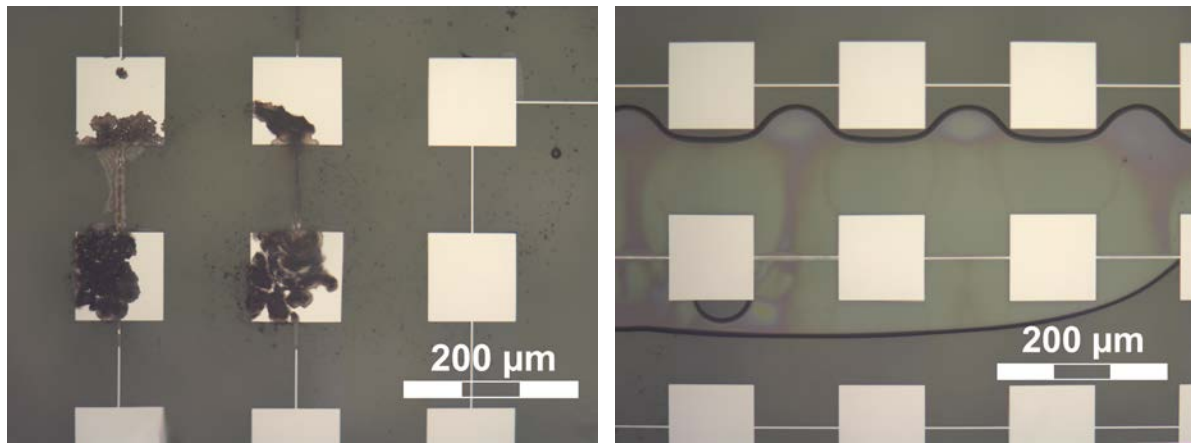


**Abbildung 18:** Bauteilverdrehung nach Montage für symmetrische und asymmetrische Elektrodenstrukturen in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$ .

Die Ergebnisse zur Bauteilverdrehung nach Montage zeigen deutlich, dass die Bauteile nach Montage nicht nur in  $x$ - oder  $y$ -Richtung verschoben sind, sondern in der Regel auch verdreht. Diese Verdrehung ist bei Montagen mit symmetrischen und asymmetrischen Elektrodenstrukturen nahezu identisch. Tendenziell bewegt sich die durchschnittliche Bauteilverdrehung um einen Wert von  $0,03^\circ \pm 0,02^\circ$ . Lediglich die Verdrehung der asymmetrischen Elektrodenstruktur hat beim Spannungswert von 70 V die größte Abweichung. Vermutlich haben hier andere Faktoren wie Oberflächenkontamination zur erhöhten Verdrehung beigetragen. Die Abweichungen zu einem niedrigeren Wert bei Montagen mit 120 V Ausrichtungsspannung lässt sich damit begründen, dass Montagen mit dieser Spannung eine geringere Abweichung in lateraler Richtung aufweisen und somit auch die Verknüpfung der beiden Variablen über den Drehungswinkel ein Minimum besitzen.

### Überspannung

Zur Charakterisierung des Self-Assembly-Prozesses musste gewährleistet werden, dass die Montagen wiederholbar sind, um ein reproduzierbares Ergebnis zu erhalten. Bei Montagen ab 300 V Ausrichtungsspannung konnte dies jedoch nicht mehr gewährleistet werden. Bei Ausrichtungsspannungen dieser Größenordnung (Überspannung) kann ein Elektrodenbrand durch Kurzschluss oder Erwärmung (Abbildung 19 links) und Luftblaseneinschluss zwischen Substrat und Bauteil (Abbildung 19 rechts) auftreten. Beide Phänomene entstehen aufgrund des zu hohen, generierten elektrischen Feldes, sodass im Falle der Erwärmung, die Aluminiumschicht der Elektroden und Leiterbahnen sich an lokalen Stellen des Bauteils vom Pyrex-Substrat lösen und verbrannt werden. Lufteinschlüsse im Klebstofffilm zwischen Bauteil und Substrat können durch die hohe, generierte Anziehungskraft die auf das Bauteil wirkt, nicht mehr entweichen. Beobachtungen haben gezeigt, dass die Entstehung beider Phänomene zusätzlich begünstigt wird, je weniger Klebstoff bei Montage appliziert wird.



**Abbildung 19:** Auswirkungen von Überspannung beim Self-Assembly-Prozess: Elektrodenbrand durch Erwärmung der Bauteilelektroden (links); Lufteinschlüsse zwischen Bauteil und Substrat können nicht entweichen (rechts).

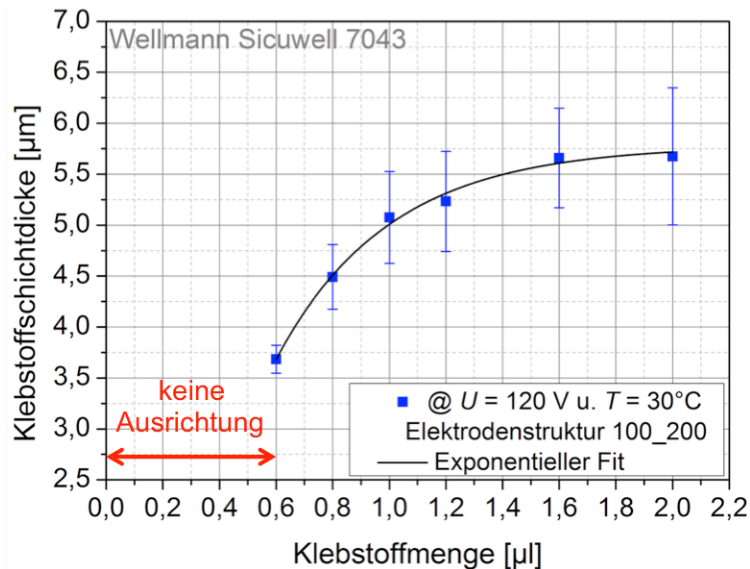
### *Klebstoffmenge*

Um den Einfluss der verwendeten Klebstoffmenge auf die resultierende Klebstoffschichtdicke und Positioniergenauigkeit der Bauteile beim Self-Assembly-Prozess zu analysieren, wurden Montagen bei konstanter Ausrichtungsspannung von  $U = 120 \text{ V}$  und mit Bauteilen gleicher Elektrodenstruktur (100\_200) unter Variation der dispensierten Klebstoffmenge durchgeführt. Die Variation der Klebstoffmenge fand hierbei im Intervall zwischen  $0,6 \mu\text{l}$  und  $2,0 \mu\text{l}$  statt. Als Klebstoff wurde ausschließlich Sicutwell 7034 von Wellmann verwendet. Da sich der Klebstoff nach Applikation auf die Substratelektroden in kurzer Zeit ungehindert ausbreitet, wurde die Zeitspanne zwischen Klebstoffdispensierung und Bauteilplatzierung auf 15 Sekunden festgesetzt, um diesen zeitlichen Einfluss zu minimieren.

#### *4.5.1 Klebstoffschichtdicke*

Die Abbildung 20 zeigt die resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat nach Montage in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge. Hierbei beträgt das kleinste, verwendete Klebstoffvolumen von  $0,6 \mu\text{l}$ . Montagen mit einer niedrigeren Klebstoffmenge bewirkten keine erfolgreiche Ausrichtung der Bauteile. Bei der kleinsten Klebstoffmenge von  $0,6 \mu\text{l}$  ist die resultierende Klebstoffschicht durchschnittlich  $(3,7 \pm 0,15) \mu\text{m}$  dick. Mit zunehmender Klebstoffmenge nimmt die Klebstoffschichtdicke ebenfalls kontinuierlich zu, bis sie bei einer Klebstoffmenge von  $1,6 \mu\text{l}$  eine Sättigung von durchschnittlich  $(5,7 \pm 0,5) \mu\text{m}$  erreicht. Eine weitere Erhöhung des Klebstoffvolumens auf insgesamt  $2,0 \mu\text{l}$  führt weder zu einer erkennbaren Abnahme noch Zunahme der Klebstoffschichtdicke.

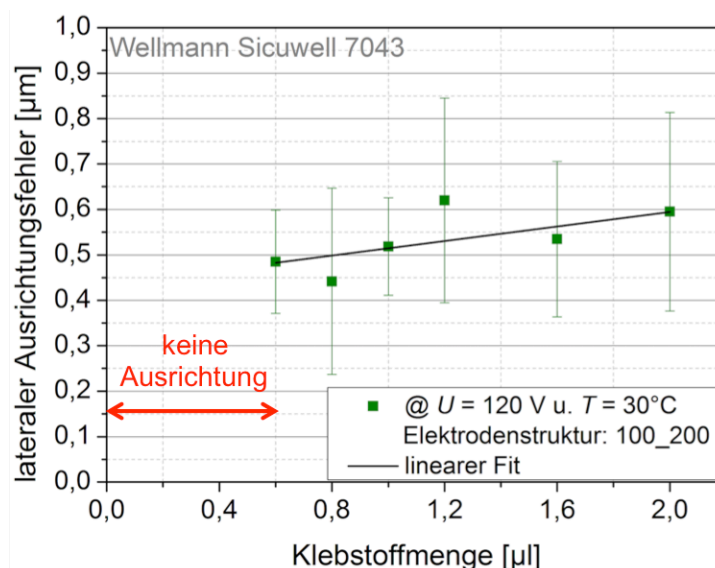
Das Ergebnis zeigt, dass die Menge des applizierten Klebstoffs die resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Substrat und Bauteil beeinflusst. Der Anstieg ähnelt hierbei einer Wurzelfunktion. Da sich dem Klebstoff bei Ausbreitung keine mechanische Barriere in Flussrichtung entgegen stellt, kann sich dieser, abhängig seiner fluidischen Eigenschaften, beliebig weit ausbreiten. Dadurch führt eine Erhöhung der Klebstoffmenge zwangsläufig zu einer nichtlinearen Zunahme der Klebstoffschichtdicke. Ab einer bestimmten Klebstoffmenge erfolgt kaum noch eine Zunahme, da der dispensierte Klebstofftropfen zusätzliches Volumen nicht mehr aufnehmen kann. Das überschüssige Klebstoffvolumen wird daher zu den Bauteilseiten gedrückt und es stellt sich eine nahezu konstante Schichtdicke ein. Bei dem verwendeten Klebstoff, Sicutwell 7043 der Firma Wellmann, trifft dies bei einer Klebstoffmenge von ca.  $1,6 \mu\text{l}$  ein. Klebstoffmengen von weniger als  $0,6 \mu\text{l}$  reichten nicht aus, um die gesamte Bauteiloberfläche zu benetzen. Das Gleitlager zwischen Bauteil und Substrat konnte sich deshalb nicht richtig ausbilden. Zusätzlich wirkt eine höhere Kapillarkraft zwischen Bauteil und Substrat, sodass die elektrostatische Kraft nicht mehr ausreicht, um das Bauteil erfolgreich zu bewegen und präzise auszurichten.



**Abbildung 20:** Resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge für Montagen mit der Elektrodenstruktur 100\_200.

### Lateraler Ausrichtungsfehler

Die Abbildung 21 zeigt den lateralen Ausrichtungsfehler von Bauteilen nach Montage in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge. Der laterale Ausrichtungsfehler bewegt sich hierbei im Bereich von durchschnittlich 0,45  $\mu\text{m}$  und 0,65  $\mu\text{m}$ . Für Montagen mit einer Klebstoffmenge von 1,2 bis 2,0  $\mu\text{l}$  ist der laterale Ausrichtungsfehler um durchschnittlich 0,1  $\mu\text{m}$  höher, als für Montagen mit einer Klebstoffmenge von 0,6  $\mu\text{l}$  bis einschließlich 1,0  $\mu\text{l}$ . Tendenziell nimmt der laterale Ausrichtungsfehler mit höherem Klebstoffvolumen zu (Fit). Diese Zunahme beläuft sich auf ca. 0,07  $\mu\text{m}$  pro 1  $\mu\text{l}$  dispensierter Klebstoffmenge und ist damit sehr gering. Aufgrund der relativ hohen Standardabweichung von 0,3 bis 0,5  $\mu\text{m}$ , kann hier jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass dieser Anstieg durch die erhöhte Klebstoffmenge bewirkt wurde, sondern ist eher auf zufällige Messfehler zurückzuführen. Der laterale Ausrichtungsfehler weist daher keinen ersichtlichen Zusammenhang in Bezug auf die dispensierte Klebstoffmenge auf. Aus theoretischer Sichtweise, müsste sich jedoch durch den erhöhten Elektrodenabstand die laterale Kraft verringern und einen lateralen Ausrichtungsfehler der Bauteile begünstigen. Demnach reicht die generierte, laterale Kraft immer noch aus, um die Bauteile bei gleichbleibender Genauigkeit auszurichten, sodass der Einfluss durch den erhöhten Elektrodenabstand, um maximal 2  $\mu\text{m}$ , vernachlässigbar erscheint.

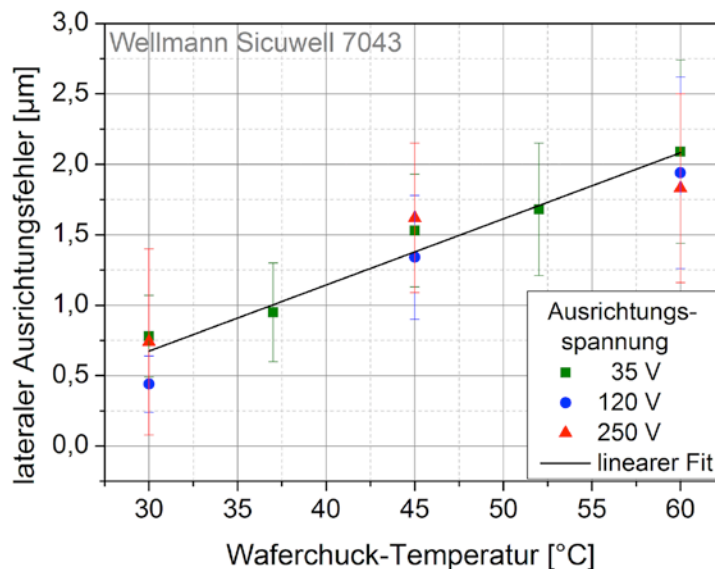


**Abbildung 21:** Lateraler Ausrichtungsfehler der Bauteile in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge für Montagen mit der Elektrodenstruktur 100\_200.

### Temperatur

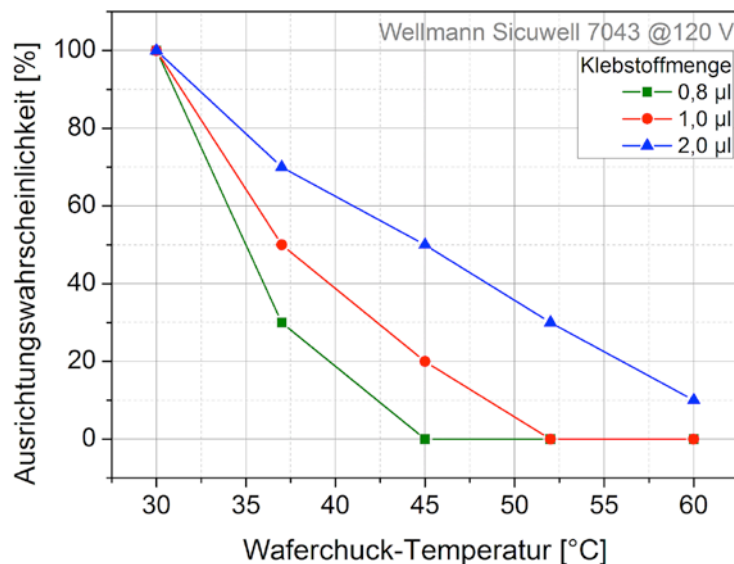
Zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf den Self-Assembly-Prozess, wurden Montagen von Bauteilen aus Pyrex unter Variation von Temperatur und Ausrichtungsspannung durchgeführt und anschließend, bezüglich ihres lateralen Ausrichtungsfehlers, analysiert. Die Versuche wurden ausschließlich mit gleicher symmetrischen Elektrodenstruktur von jeweils 100 µm Kantenlänge, die im Abstand von 200 µm zueinander angeordnet sind (Elektrodenstruktur 100\_200) durchgeführt. Die Montagen fanden für Ausrichtungsspannungen mit 35 V, 120 V und 250 V bei Temperaturen von 30 °C, 45 °C und 60 °C statt. Zusätzlich wurden Montagen mit 35 V Ausrichtungsspannung bei Temperaturen von 37 °C und 52 °C durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen Temperatur und Ausrichtungsfehler zu verdeutlichen. Zur Auswertung wurden jeweils drei Bauteile beim jeweiligen Temperatur- und Spannungswert erfolgreich montiert und analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt. Der Temperaturwert bezieht sich hierbei auf die Waferchuck-Oberfläche unmittelbar unterhalb des Substratwafers.

Die Ergebnisse zum lateralen Ausrichtungsfehler der Bauteile nach Montage unter Variation der Montagetemperatur zeigen für alle drei Ausrichtungsspannungen einen linearen Zusammenhang. Hierbei steigt der laterale Ausrichtungsfehler mit zunehmender Temperatur kontinuierlich an. Die Bauteile haben bei niedrigster Montagetemperatur von 30 °C einen lateralen Ausrichtungsfehler von durchschnittlich  $(0,65 \pm 0,4)$  µm. Bei maximaler Montagetemperatur von 60 °C liegt dieser Fehler bei durchschnittlich  $(2,0 \pm 0,7)$  µm. Dies ist eine Erhöhung um ca. 308 % bezogen auf den durchschnittlichen Ausrichtungsfehler bei 30 °C. Damit beläuft sich die Steigung des lateralen Ausrichtungsfehlers auf ca. 0,45 µm pro 10 °C für alle drei untersuchten Spannungen im Mittel.



**Abbildung 22:** Lateraler Ausrichtungsfehler von Bauteilen nach Montage in Abhängigkeit der Montagetemperatur und Ausrichtungsspannung.

Das Ergebnis zum Temperatureinfluss beim Self-Assembly-Prozess aus Abbildung 22 zeigt, dass die Bauteile sich mit zunehmender Montagetemperatur schlechter ausrichten lassen. Hierbei findet die Zunahme des Ausrichtungsfehlers bei allen drei Spannungen in gleichen Größenordnungen statt. Hinzu kommt jedoch eine weitere Problematik, die diese Messung nicht zeigen kann. Durch die erhöhte Montagetemperatur konnten die Bauteile größtenteils nicht ausgerichtet werden. Die Abbildung 23 soll hier den Einfluss der Montagetemperatur auf die Ausrichtung der Bauteile qualitativ aufzeigen. Dazu ist die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Ausrichtung der Bauteile in Abhängigkeit von drei festgelegten Montagetemperaturen (30 °C, 45 °C und 60 °C) und der dispensierten Klebstoffmenge aufgetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass bei 30 °C in der Regel alle Montagen mit einer Klebstoffmenge von 0,8 µl bis 2,0 µl erfolgreich durchgeführt werden konnten. Sobald die Temperatur um ca. 7 °C stieg, konnten bei dispensierter Klebstoffmenge von 0,8 µl bereits nur 30 % der Bauteile überhaupt elektrostatisch ausgerichtet werden. Bei einer Montagetemperatur von 45 °C konnten bei gleicher Klebstoffmenge keine Bauteile mehr ausgerichtet werden. Erst nach Erhöhung der Klebstoffmenge waren Montagen wieder möglich. Bei der Maximaltemperatur von 60 °C und einer Klebstoffmenge von 2,0 µl konnten nur 10 % der Bauteile ausgerichtet werden. Die Montagen konnten nur durchgeführt werden, wenn die Bauteile direkt nach der ihrem Platzieren ausgerichtet wurden.



**Abbildung 23:** Ausrichtungswahrscheinlichkeit der Bauteile während der Montage in Abhängigkeit der Montagetemperatur und dispensierten Klebstoffmengen.

Die Versuche mit Temperaturvariationen zeigen, dass die Temperaturerhöhung einen starken Einfluss auf die Ausrichtungsfähigkeit der Bauteile hat. Vermutlich wurde durch die Temperaturerhöhung die Oberflächenspannung des Klebstoffs so stark herabgesetzt, dass das Gleitlager sich zwischen Bauteil und Substrat nicht mehr richtig ausbilden konnte. Dadurch ist das Bauteil in den Klebstoff abgesunken. Für eine anschließende Bewegung in lateraler Richtung, müsste somit die zusätzliche Klebstoffmasse in Bewegungsrichtung vor dem Bauteil mitgeschoben werden. Dies macht eine Bewegung des Bauteils unmöglich. Deshalb konnte die elektrostatische Ausrichtung von Bauteilen unter erhöhtem Temperatureinfluss nur durchgeführt werden, wenn diese unmittelbar direkt nach der Klebstoffapplikation platziert und ausgerichtet wurden, noch bevor eine Veränderung der Eigenschaften des Klebstoffs stattfinden konnte.

### Viskosität

In diesem Versuch wird der Einfluss von Viskosität des verwendeten Klebstoffs auf den lateralen Ausrichtungsfehler der Bauteile und auf die resultierende Klebstoffschichtdicke untersucht. Hierbei wurden Montagen mit vier UV-härtenden Klebstoffen von unterschiedlicher Viskosität (Tabelle 3) und unter Spannungsvariation bei einer konstanten Waferchuck-Temperatur von 30 °C durchgeführt. Für die Montagen wurden Bauteile aus Pyrex mit immer gleicher Elektrodenstruktur (100\_200) verwendet. Dadurch soll ein Einfluss seitens der Elektrodengeometrie ausgeschlossen werden. Für die Auswertung konnten nur Montagen mit den Klebstoffen Sicuwell 7043 von Wellmann und Polytec 2101 berücksichtigt werden. Bei Montagen mit dem Klebstoff der Marke Polytec vom Typ 2108 konnten die Bauteile mit Spannungen von über 350 V nicht ausgerichtet werden. Montagen mit dem Klebstoff der Marke Loctite vom Typ 3311 führten nur in Einzelfällen und bei Spannungen von über 250 V zu einer Ausrichtung der Bauteile. Hierbei lag die laterale Positioniergenauigkeit nach Montage höher als 30 µm, sodass eine Analyse der Messstrukturen am konfokalen Mikroskop nicht erfolgen konnte.

**Tabelle 3:** UV-härtende Klebstoffe für die Messung des Einflusses der Viskosität beim Self-Assembly-Prozess.

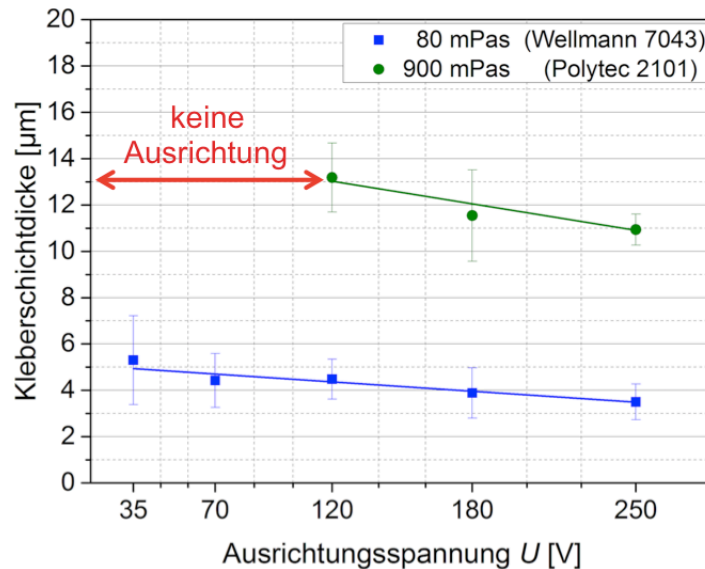
Klebstoffbezeichnung (Marke / Typ)	Wellman Sicuwell 7043	Polytec 2108	Loctite 3311	Polytec 2101
Viskosität @ 23 °C [mPas]	80	200	300	900

### Klebstoffschichtdicke

Die Abbildung 24 zeigt die resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung von zwei untersuchten Klebstoffen mit unterschiedlicher Viskosität. Es ist deutlich erkennbar, dass der Klebstoff mit der höheren Viskosität (Polytec 2101) eine höhere Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat aufweist, als der Klebstoff mit der



niedrigeren Viskosität (Wellmann). Montagen mit einer Ausrichtungsspannung von 120 V weisen mit dem Klebstoff von Polytec eine durchschnittliche Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat von  $(13,2 \pm 1,6)$   $\mu\text{m}$  auf. Bei gleichem Spannungswert ist die Klebstoffschichtdicke nach Montagen mit dem Klebstoff von Wellmann mit  $(4,5 \pm 1,0)$   $\mu\text{m}$  um etwa ein Drittel geringer. Bei beiden Klebstoffen sinkt der Wert für die Schichtdicke mit steigender Ausrichtungsspannung. Die Abnahme der Schichtdicke beläuft sich bei dem höherviskosen Klebstoff von Polytec auf ca. 1,2  $\mu\text{m}$  pro 100 V und beim Klebstoff von Wellmann auf ca. 0,9  $\mu\text{m}$  pro 100 V im Mittel.

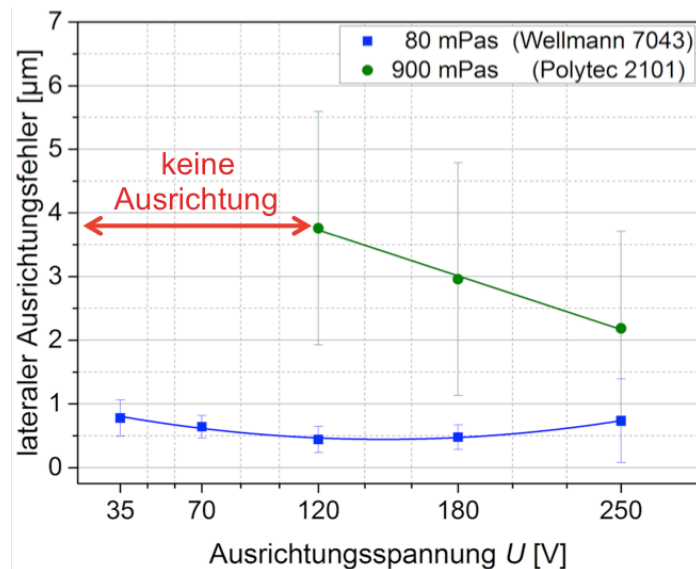


**Abbildung 24:** Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat nach Montage in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$  und zweier Klebstoffe mit verschiedener Viskosität.

### Lateraler Ausrichtungsfehler

In Abbildung 25 ist der laterale Ausrichtungsfehler der Bauteile nach Montage mit zwei Klebstoffen unterschiedlicher Viskosität und in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung dargestellt. Bei den Klebstoffen handelt es sich, um den Polytec 2101 und den Sicutwell 7043 von Wellmann. Die Ergebnisse von Montagen mit dem Klebstoff der Marke Wellmann wurden bereits in Kapitel 4.5.2 vorgestellt und dienen hier lediglich zum Vergleich.

In Abbildung 25 ist erkennbar, dass Montagen mit dem Klebstoff höherer Viskosität erst ab 120 V Ausrichtungsspannung erfolgen konnten. Mit Spannungen von 35 V und 70 V war eine elektrostatische Ausrichtung der Bauteile noch nicht möglich, weil die generierten elektrostatischen Ausrichtungskräfte zu schwach waren, um das Bauteil zu bewegen. Der laterale Ausrichtungsfehler bei Montagen mit dem Klebstoff von Polytec vom Typ 2101 hat durchschnittlich den höchsten Wert von  $(3,75 \pm 1,25)$   $\mu\text{m}$  bei einer Ausrichtungsspannung von 120 V. Dieser Ausrichtungsfehler nimmt mit höherer Ausrichtungsspannung nahezu linear ab. Bei Montagen mit 250 V beträgt der Fehler durchschnittlich  $(2,2 \pm 1,55)$   $\mu\text{m}$ . Damit ergibt sich im Bereich von 120 bis 250 V eine Abnahme des lateralen Ausrichtungsfehlers von ca. 1,2  $\mu\text{m}$  pro 100 V. Der laterale Ausrichtungsfehler für Montagen mit dem Klebstoff Sicutwell 7043 der Marke Wellmann liegt im Bereich von durchschnittlich ca. 0,6  $\mu\text{m}$  und zeigt bei den Spannungsvariationen eine maximale Abweichung von ca.  $\pm 0,25$   $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 25:** Lateraler Ausrichtungsfehler von Bauteilen nach Montage in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$  und zweier Klebstoffe mit verschiedener Viskosität.

Die Versuche mit Klebstoffen unterschiedlicher Viskosität zeigen, dass zur elektrostatischen Ausrichtung der Bauteile nicht nur die Viskosität des Klebstoffs, sondern auch seine chemische Zusammensetzung entscheidend ist. So war es möglich Montagen mit dem Klebstoff von Polytec 2101, der eine Viskosität von 900 mPas aufweist, noch erfolgreich durchzuführen. Jedoch war es nicht möglich die Bauteile unter Verwendung der Klebstoffe Polytec 2108 und Loctite 3311, die eine Viskosität von jeweils 200 und 300 mPas aufweisen, elektrostatisch auszurichten. Seitens des Herstellers Polytec wurde mitgeteilt, dass der Klebstoff vom Typ 2108 möglicherweise Elektrolyte als Inhaltsstoffe besitzt, sodass das generierte elektrische Feld sich vielleicht deshalb nicht richtig aufbauen kann und eine Ausrichtung daher unmöglich macht. Genauere Hinweise auf die Inhaltsstoffe des Klebstoffs konnten seitens des Herstellers nicht erfolgen. Ein weiterer Grund, welcher hier wahrscheinlicher erscheint ist, dass bei den beiden Klebstoffen womöglich die Oberflächenspannung nicht ausgereicht hat, um das Bauteil richtig zu lagern. Dadurch konnte sich das Gleitlager, welches für eine Ausrichtung notwendig ist, nicht korrekt ausbilden. Die Bauteile erfahren dadurch eine zu hohe Reibungskraft und können sich schlecht bis gar nicht elektrostatisch ausrichten lassen.

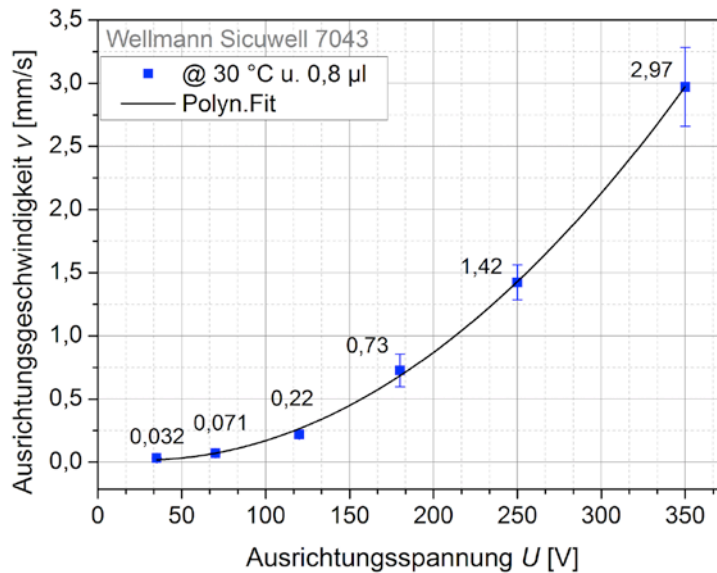
Bauteile, die sich bei Montagen mit den zwei Klebstoffen Sicutec 7043 von Wellmann und Polytec 2101 ausrichten ließen, weisen beim höherviskoserem Klebstoff einen höheren Ausrichtungsfehler auf und konnten erst bei höheren Spannungen (ab 120 V) ausgerichtet werden. Dies war zu erwarten, da nach (2.23) durch die höhere Viskosität eine höhere Ausrichtungskraft erforderlich ist, um das Bauteil in lateraler Richtung zu bewegen. Ebenso verhält es sich mit der resultierenden Klebstoffschichtdicke zwischen Substrat und Bauteil. Diese ist bei Montagen mit dem höherviskoserem Klebstoff höher ausgefallen, da der Klebstoff, durch die höhere Viskosität, sich langsamer ausbreitet. Dadurch ist bei einer bestimmten Montagezeit eine größere Menge an Klebstoff im Bereich der Substratelektroden vorhanden, als beim niederviskoserem Klebstoff der Marke Wellmann. Jedoch kann hier kein direkter Zusammenhang zwischen der Viskosität des Klebstoffs und dem Ausrichtungsfehler oder der Klebstoffschichtdicke geschlossen werden, da in beiden Fällen die Messwerte durch die UV-Härtung beeinflusst werden. Dieser Einfluss ist beim Ausrichtungsfehler mit  $(1,75 \pm 0,8) \mu\text{m}$  unkontrollierbar, weil der Härtingsverzögerung sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung auftreten kann. Dies erklärt auch die hohen Standardabweichungen der Messwerte für den lateralen Ausrichtungsfehler bei Versuchen mit dem Klebstoff Polytec 2101. Bei der Klebstoffschichtdicke wirkt der Härtingschumpf wie ein Offset nur in eine Richtung (nämlich die  $z$ -Richtung) und ist im Prinzip, bis auf seinen Standardfehler, kontrollierbar.

### *Ausrichtungsgeschwindigkeit*

Die Ausrichtungsgeschwindigkeit soll den Einfluss der lateralen Krafteinwirkung auf die Bauteile veranschaulichen. Für diese Messung wurde die elektrostatische Ausrichtung der Bauteile aus Pyrex unter Variation der Ausrichtungsspannung aufgezeichnet und analysiert. Die Versuche werden ausschließlich mit gleicher Elektrodenstruktur (100\_200) und gleicher applizierter Klebstoff-

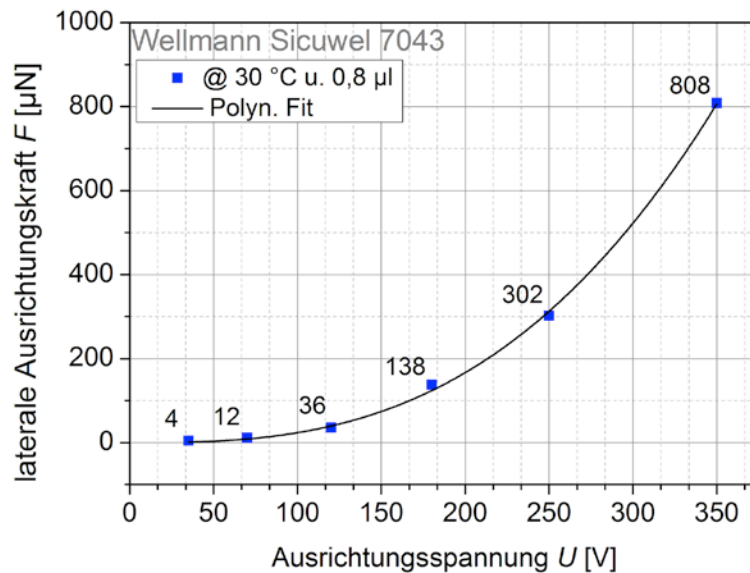
menge von  $0,8 \mu\text{l}$  bei einer konstanten Waferchuck-Temperatur von  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt. Für die Aufzeichnung der Montage wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera in Kombination mit dem Stereomikroskop von Zeiss verwendet. Die Aufnahmen wurden mit 120 fps bei einer Auflösung von  $720 \times 480$  Pixel aufgezeichnet. Zur Bestimmung der mittleren Ausrichtungsgeschwindigkeit wurden die Aufnahmen mit Hilfe der Software VirtualDub betrachtet und die Zeitspanne  $t$ , die die Bauteile gebraucht hatten um sich auszurichten anhand der Frames ermittelt. Die Wegstrecke  $s$ , die die Bauteile bei ihrer Ausrichtung zurücklegten, wurde ebenfalls anhand der Aufnahmen durch manuelles Abmessen am Bildschirm bestimmt. Anhand von  $s$  und  $t$  wurde die mittlere Geschwindigkeit mit  $s/t$  berechnet. Insgesamt wurden sieben erfolgreiche Ausrichtungen der Bauteile pro Spannung untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 dargestellt. Hierbei ist die mittlere Ausrichtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung dargestellt.

In Abbildung 26 ist deutlich zu erkennen, dass die mittlere Geschwindigkeit bei elektrostatischer Ausrichtung der Bauteile, mit zunehmender Ausrichtungsspannung, quadratisch ansteigt. Bei der kleinsten Spannung von  $35 \text{ V}$  konnten die Bauteile mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von  $0,032 \text{ mm/s}$  ausgerichtet werden. Vergleicht man diesen Wert mit der Geschwindigkeit von  $1,42 \text{ mm/s}$  bei Montagen mit  $250 \text{ V}$ , so ergibt sich ein Anstieg um das 44-fache. Ein Bauteil legt demnach eine Wegstrecke von  $100 \mu\text{m}$  innerhalb von durchschnittlich  $3,13$  Sekunden mit  $35 \text{ V}$  und  $0,07$  Sekunden mit  $250 \text{ V}$  Ausrichtungsspannung zurück.



**Abbildung 26:** Mittlere Ausrichtungsgeschwindigkeit der Bauteile in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$ .

Anhand der nun bekannten Messgrößen für die mittlere Geschwindigkeit  $v$  und die Klebstoffschichtdicke  $h$  bei der jeweiliger Ausrichtungsspannung  $U$  wird die Ausrichtungskraft  $F$  berechnet. Für die Berechnung wurde die Bauteilfläche mit  $A = 3,5 \times 3,5 \text{ mm}^2$  und die Viskosität des Klebstoffs bei  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  mit  $\eta = 60 \text{ mPas}$  (laut Hersteller) gewählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 27 dargestellt und zeigt, dass die Ausrichtungskraft  $F$ , die das Bauteil bewegt, sich proportional zum Quadrat der angelegten Spannung verhält. Die Messung bestätigt damit die theoretische Annahme für die elektrostatische Ausrichtungskraft in lateraler Richtung beim Self-Assembly-Prozess. Diese Kraft, die das Bauteil bewegt, beträgt ca.  $4 \mu\text{N}$  bei Montagen mit einer Ausrichtungsspannung von  $35 \text{ V}$ . Bei Montagen mit  $350 \text{ V}$  steigt diese um das 202-fache auf einen Wert von  $F = 808 \mu\text{N}$  an.

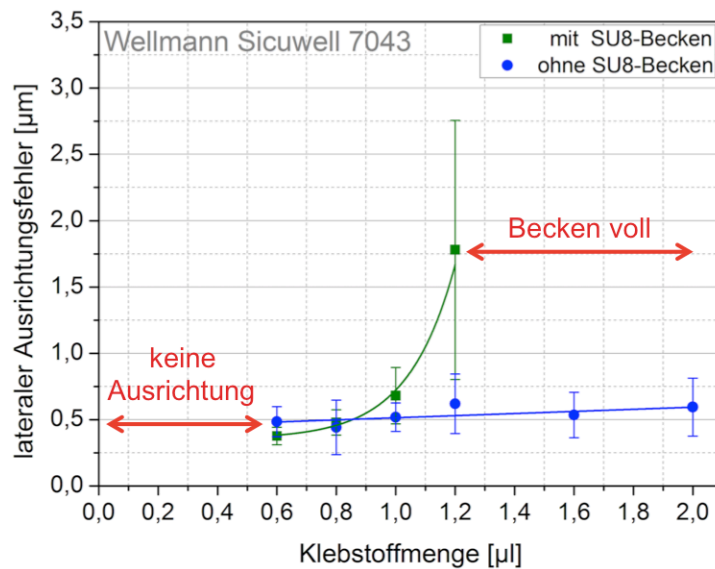


**Abbildung 27:** Laterale Ausrichtungskraft der Bauteile in Abhängigkeit der Ausrichtungsspannung  $U$ .

Aus den Ergebnissen zur Montagegeschwindigkeit und der resultierenden lateralen Ausrichtungskraft ist ersichtlich, dass bereits kleine Kräfte im einstelligen  $\mu\text{N}$ -Bereich ausreichen, um die Bauteile erfolgreich zu positionieren. Bei höheren Spannungen wirkt diese Kraft dementsprechend stärker. Es ist deshalb vorstellbar, dass mit dem Self-Assembly-Prozess deutlich größere und schwerere Bauteile ausgerichtet werden können, als solche, die in dieser Arbeit verwendet wurden. Einzelne Versuche bezüglich des maximalen Transportgewichts haben gezeigt, dass die Bauteile, mit einer ca. 100-fachen Beschwerung ihres Eigengewichts immer noch erfolgreich ausgerichtet werden konnten.

### Montagen mit SU8-Becken

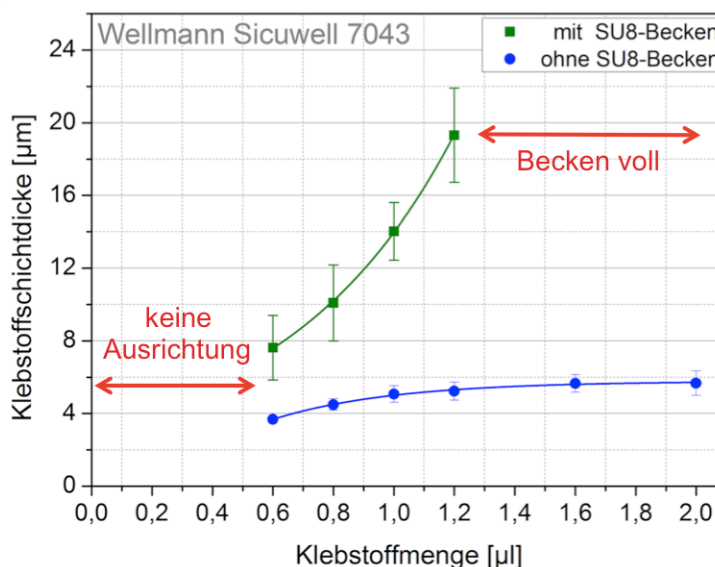
Um zu verhindern, dass der Klebstoff sich nach Applikation auf die Substratelektrode ungehindert ausbreiten kann, wurden mechanische Barrieren mit quadratischer Form aus SU8-Lack um die Substratelektrodenstruktur herum prozessiert. Zur Untersuchung des Einflusses der SU8-Becken, wurden Montagen mit Bauteilen aus Pyrex bei konstanter Spannung von 120 V und unter Variation der dispensierten Klebstoffmenge an SU8-Becken mit einer Kantenlänge von 4,1 mm durchgeführt. Bei Becken mit kleinerer Breite (3,7 mm) konnten die Bauteile zwar positioniert, aber nicht ausgerichtet werden. Bei Becken mit größerer Breite (4,5 mm) hatten die Bauteile zu viel Raum zu den Rändern des Beckens, sodass nach Platzierung eine Nachkorrektur erforderlich war, um das Bauteil innerhalb der Toleranzgrenzen der Grobpositionierung zu bewegen. Insgesamt wurden drei Bauteile pro dispensierter Klebstoffmenge ausgerichtet und am konfokalen Mikroskop bezüglich ihres lateralen Ausrichtungsfehlers und der Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat analysiert. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 65 und 66 dargestellt. Hierbei sind zum Vergleich die Graphen für Montagen ohne SU8-Becken mit abgebildet.



**Abbildung 28:** Lateraler Ausrichtungsfehler in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge bei Montagen mit und ohne SU8-Becken.

Die Abbildung 28 stellt den lateralen Ausrichtungsfehler der Bauteile sowohl für Montagen mit als auch ohne SU8-Becken in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge dar. Es ist zu erkennen, dass sich der laterale Ausrichtungsfehler bei Montagen sowohl mit, als auch ohne Becken bis zu einer applizierten Klebstoffmenge von 1,0 µl ähnlich verhält. Der laterale Ausrichtungsfehler weist in diesem Bereich einen durchschnittlichen Wert von ca.  $(0,5 \pm 0,25)$  µm auf. Bei Montagen mit SU8-Becken ab einer Klebstoffmenge von 1,2 µl erhöht sich der laterale Ausrichtungsfehler schlagartig um durchschnittlich 1,1 µm auf einen Wert von  $(1,8 \pm 0,95)$  µm im Mittel. Montagen mit einer Klebstoffmenge von mehr als 1,2 µl wurden nicht durchgeführt, da hier bereits das Becken vollgefüllt war und eine weitere Hinzugabe dieses zum Überlaufen gebracht hätte. Dadurch wäre der Sinn des SU8-Beckens nicht mehr erfüllt gewesen.

Die Abbildung 29 stellt die Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat, sowohl für Montagen mit, als auch ohne SU8-Becken in Abhängigkeit der dispensierten Klebstoffmenge dar. Hierbei weisen Montagen mit SU8-Becken eine höhere Klebstoffschichtdicke auf, als Montagen ohne. Mit einer größeren Menge an Klebstoff nimmt die Schichtdicke fast linear zu. Diese Zunahme beläuft sich durchschnittlich auf ca. 3,8 µm pro 0,2 µl an. Die Standardabweichung dieser Messwerte ist mit durchschnittlich ca. 4 µm bei Montagen mit SU8-Becken vier-mal höher, als bei Montagen ohne ein solches Becken.



**Abbildung 29:** Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat in Abhängigkeit der dispensierten klebstoffmenge bei Montagen mit und ohne SU8-Becken.

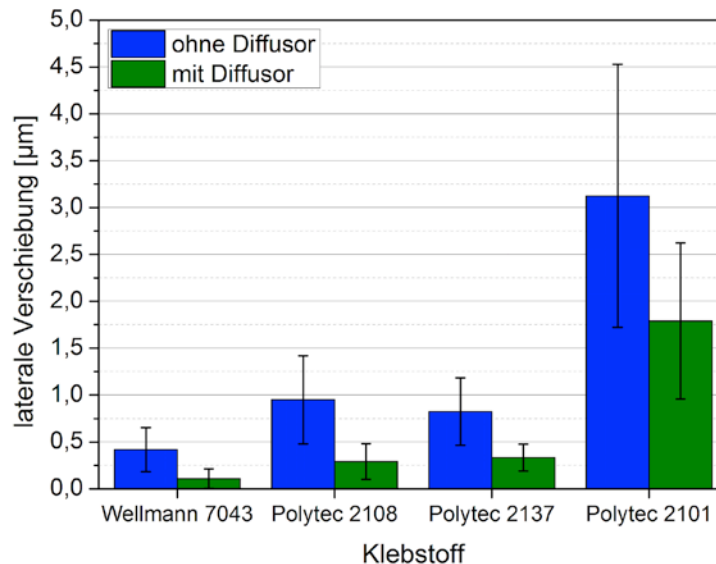
Die Montagen mit SU8-Becken zeigen, dass bei einer passenden Beckengröße, Bauteile direkt nach dem Platzieren im Toleranzbereich der Grobpositionierung liegen und anschließend direkt ausgerichtet werden können. Dadurch musste das Bauteil in der Regel nicht zusätzlich manuell nachjustiert werden. Die Beckengröße darf hierbei nicht zu klein sein, da die Kapillarkräfte zwischen Beckenrand und Bauteilkante zu groß werden und eine elektrostatische Ausrichtung erschweren bzw. unmöglich machen. Ist das Becken hingegen zu groß gewählt, entsteht zwischen der Bauteilkante und dem Beckenrand ein zu großer Spalt. Dadurch hat das Bauteil zu viel Platz und bewegt sich nach dem Platzieren aus dem Toleranzbereich für einer erfolgreiche Positionierung. Als passende Beckengröße während der Versuche hat sich das Becken mit 4,1 mm Kantenlänge erwiesen. Wird die Klebstoffmenge zu hoch gewählt, so läuft das Becken über und die laterale Ausrichtungsgenauigkeit sinkt rapide ab. Aufgrund der mechanischen Grenzen für den Klebstoff, kann dieser nicht wegfließen. Dadurch steigt mit höherer Klebstoffmenge die resultierende Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat linear an. Durch die erhöhte Standardabweichung der Messwerte für die Klebstoffschichtdicke, ist die Montage mit SU8-Becken in dieser Hinsicht weniger kontrollierbar.

### **3.3.4 AP 4: In situ Härteprozess**

Die Messung zur Verschiebung der Bauteile nach UV-Härtung ohne Spannungseinfluss wurde mit vier verschiedenen Klebstoffen am ARAMIS System der Firma GOM mbH durchgeführt. Die Bestrahlung der Bauteile fand hierbei senkrecht unter dem Bauteil statt. Zum Einsatz kam die eigens hierfür entwickelte UV-LED mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 365 \text{ nm}$ , jeweils mit und ohne Diffusor Aufsatz. Die Bestrahlungsdauer betrug für alle Klebstoffe ca. 20 Sekunden. Die Verschiebung wurde sowohl in lateraler Richtung ( $x$ - und  $y$ -Verschiebung) als auch in vertikaler Richtung ( $z$ -Verschiebung) detektiert. Für diesen Versuch wurde die Verschiebung von jeweils drei Bauteilen pro Klebstoff und Belichtungsart (mit und ohne Diffusor) gemessen und ausgewertet. Zusätzlich wurde der Einfluss der Belichtungsrichtung auf die vertikale Verschiebung der Bauteile nach der UV-Härtung mit dem Klebstoff Sicutwell 7043 der Marke Wellmann untersucht. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

#### ***Laterale Verschiebung***

Zur Bestimmung der lateralen Verschiebung von Bauteilen nach Härtung wurden jeweils die Betragswerte der gemessenen Verschiebungen des Bauteils in  $x$ - und  $y$ -Richtung gemittelt. Hierbei wurden jeweils drei Messungen pro Klebstoff und Belichtungstyp durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass bei allen Klebstoffen das Bauteil nach der Härtung zwangsläufig in laterale Richtung verschoben wird. Für eine Härtung mit Diffusor fällt diese Verschiebung bei allen Klebstoffen geringer aus, als für eine Härtung ohne Diffusor. Die höchste durchschnittliche Verschiebung wurde beim Klebstoff Polytec 2101 gemessen. Diese beträgt durchschnittlich  $(3,3 \pm 2,2) \mu\text{m}$  (ohne Diffusor) bzw.  $(1,7 \pm 0,9) \mu\text{m}$  (mit Diffusor). Für die Klebstoffe Wellmann Sicutwell 7043, Polytec 2108 und Polytec 2137 liegt die laterale Verschiebung der Bauteile mit Belichtung ohne Diffusor bei durchschnittlich unter  $1 \mu\text{m}$ . Hierbei verhalten sich die Klebstoffe Polytec 2108 und der dualhärtende Klebstoff Polytec 2137 DC sowohl bei Härtung mit als auch ohne Diffusor ähnlich. Von allen vier untersuchten Klebstoffen weist der Sicutwell 7043 der Marke Wellmann bei Härtung mit und ohne Diffusor die geringste laterale Verschiebung von Bauteilen auf. Für die Härtung ohne Diffusor beläuft sich dieser Wert auf durchschnittlich  $(0,4 \pm 0,3) \mu\text{m}$ . Unter Verwendung eines Diffusors entstand eine laterale Verschiebung von  $(0,1 \pm 0,1) \mu\text{m}$ .



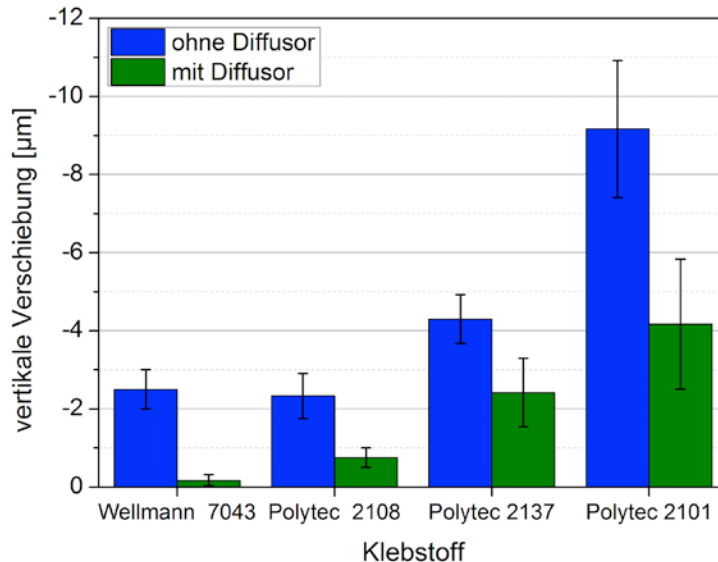
**Abbildung 30:** Laterale Verschiebung der Bauteile nach UV-Härtung mit und ohne Diffusor für vier verschiedene Klebstoffe ohne elektrostatische Ausrichtung ( $U = 0 \text{ V}$ ).

Die Ergebnisse zur lateralen Verschiebung von Bauteilen nach UV-Härtung aus Abbildung 30 zeigen deutlich, dass die Verschiebung der Bauteile durch die Verwendung eines Diffusors reduziert werden kann. Diese Reduktion beläuft sich hierbei zwischen ca. 25 % (Wellmann) und 56 % (Polytec 2101). Die Härtung des Polytec 2101 hat die höchste gemessene laterale Verschiebung an Bauteilen bewirkt. Dieser Klebstoff ist damit im Vergleich zu den anderen Klebstoffen am wenigsten geeignet für den Self-Assembly-Prozess. Die resultierende laterale Verschiebung durch die UV-Härtung ist hier unkontrollierbar. Sie wird sich mit dem lateralen Positionierungsfehler der Bauteile überlagern und schließlich eine genaue Ausrichtung der Bauteile unmöglich machen. Am geeignetsten erscheint hier der Klebstoff Sicuwell 7043 der Marke Wellmann. Er weist bei den Messungen die geringste Verschiebung auf. Für eine Härtung mit Diffusor war kaum eine Verschiebung festzustellen. Die entstandene Verschiebung von durchschnittlich  $0,1 \mu\text{m}$  ist die Folge von Rauschen während der Messung. Das ARAMIS-System von GOM mbH hat bei der Detektion der lateralen Verschiebung im Vergleich zur vertikalen Verschiebung des Bauteils deutlich weniger Rauschen aufgezeichnet, sodass Verschiebungen unter  $1 \mu\text{m}$  überhaupt analysiert werden konnten. Für Verschiebungen unter  $0,5 \mu\text{m}$  war keine korrekte Auswertung möglich, da das Rauschen hier deutlich präsenter und noch dazu um ein vielfaches höher als der Messwert selbst war. Für die Klebstoffe Polytec 2108 und 2137, deren Messwerte ebenfalls unter  $0,5 \mu\text{m}$  liegen, war daher eine genaue Verschiebung des Bauteils in diesem Messbereich nicht detektierbar. Es ist davon auszugehen, dass nach Härtung mit beiden Klebstoffen eine ähnliche laterale Verschiebung der Bauteile auftritt, wie mit dem Klebstoff der Firma Wellmann. Damit wären die Klebstoffe von Polytec, ausgenommen der des Typs 2101, neben dem Klebstoff Sicuwell 7043 von Wellmann ebenfalls für den Self-Assembly-Prozess geeignet.

### Vertikale Verschiebung

In Abbildung 31 ist die durchschnittliche Verschiebung der Bauteile nach UV-Härtung in vertikaler Richtung dargestellt. Hierbei sind die Klebstoffe bezüglich ihrer Viskosität bei Raumtemperatur angeordnet. Links befindet sich der Klebstoff mit der niedrigsten Viskosität ( $80 \text{ mPas}$ ) und rechts der Klebstoff mit der höchsten Viskosität ( $900 \text{ mPas}$ ). Die gemessenen Verschiebungen in vertikaler Richtung haben für alle Klebstoffe einen negativen Wert. Dies bedeutet, dass die Klebstoffe sich bei Härtung zusammenziehen und folglich schrumpfen (Härtungsschrumpf). Zunächst wird die entstandene Verschiebung für eine Belichtung ohne Diffusor betrachtet. Hierbei zeigen Härtungsvorgänge mit den Klebstoffen vom Typ Sicuwell 7043 der Marke Wellmann und Typ 2108 der Marke Polytec mit  $(2,5 \pm 0,5) \mu\text{m}$  und  $(2,3 \pm 0,5) \mu\text{m}$  die durchschnittlich geringste Verschiebung von Bauteilen in vertikaler Richtung. Die größte Verschiebung der Bauteile von  $(9,2 \pm 1,8) \mu\text{m}$  im Mittel fand unter Verwendung des Polytec 2101 statt. Zwischen den genannten Extrema befindet sich der dualhärtende Klebstoff Polytec 2137 DC (dualhärtend bedeutet, dass eine Härtung mit UV-Licht und Wärme möglich ist) mit einer Verschiebung von durchschnittlich  $(4,3 \pm 1,7) \mu\text{m}$ . Alle Härtungsvorgänge bei Bestrahlung mit Diffusor weisen im Vergleich zur Bestrahlung ohne Diffusor

eine stets geringere Verschiebung der Bauteile auf. Die hierbei entstandene höchste Verschiebung der Bauteile von durchschnittlich  $(4,2 \pm 1,6) \mu\text{m}$  fand unter Verwendung des Klebstoffs Polytec 2101 statt. Die geringste Verschiebung der Bauteile von ca.  $(0,2 \pm 0,2) \mu\text{m}$  konnte mit dem Klebstoff von Wellmann 7043 bestimmt werden. Die durchschnittliche Verschiebung der Bauteile für die Klebstoffe Polytec 2137 DC und Polytec 2108 liegt jeweils mit  $(2,4 \pm 1,0) \mu\text{m}$  und  $(0,75 \pm 0,25) \mu\text{m}$  zwischen den oben genannten Werten für Wellmann 7043 und Polytec 2101. Alle Bauteile waren nach Härtung mechanisch fest mit ihrem Fügepartner (Glasträger) verbunden und konnten durch externe Krafteinwirkung auf das Bauteil mit der Pinzette nicht mehr bewegt oder gelöst werden.



**Abbildung 31:** Vertikale Verschiebung der Bauteile nach UV-Härtung mit und ohne Diffusor für vier verschiedene Klebstoffe ohne elektrostatische Ausrichtung ( $U = 0 \text{ V}$ ).

Die Ergebnisse aus Abbildung 31 zur Verschiebung der Bauteile in vertikaler Richtung durch die UV-Härtung zeigen, dass die Klebstoffe jeweils einen unterschiedlichen Härtungsschrumpf besitzen. Die Klebstoffe mit einer niedrigeren Viskosität (Wellmann und Polytec 2108) weisen demnach einen geringeren Verzug des Bauteils nach Härtung auf, als die zwei Klebstoffe mit höherer Viskosität (Polytec 2101 und 2137). Die Viskosität bei Klebstoffen wird durch ihre chemische Zusammensetzung beeinflusst. Diese ist in der Regel, aus betrieblichem Geheimnis, dem Verbraucher nicht bekannt. Lediglich die chemische Basis wird auf den Datenblättern angegeben. Daher kann hier nur eine quantitative Analyse des Härtungsschrumpfes der Klebstoffe erfolgen. Die Härtung mit Polytec 2101 wies hierbei die höchste Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung auf. Dieser Klebstoff ist, laut Datenblatt, für die Härtung bei Wellenlängen zwischen 380 und 420 nm konzipiert. Die Härtung fand jedoch unter Verwendung einer UV-LED mit einem Intensitätsmaximum von ca. 367 nm statt. Welche genauen Einflüsse eine energiereichere Strahlung auf diesen Klebstoff, speziell auf die darin enthaltenen Fotoinitiatoren, hat, bleibt nach Rücksprache mit dem betroffenen Hersteller unbekannt. Es könnte jedoch sein, dass die energiereichere Strahlung dazu beigetragen hat, dass der resultierende Schrumpf nach der Klebstoffhärtung höher ausfällt.

Die Klebstoffe von Wellmann Sicuwell 7043 und Polytec 2108 haben bei Bestrahlung ohne Diffusor eine nahezu identische Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung zur Folge. Lediglich bei Bestrahlung mit Diffusor zeigt der Klebstoff von Wellmann Sicuwell 7043 nahezu keine Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung. Insgesamt betrachtet zeigen die Ergebnisse zur Verschiebung der Bauteile in vertikaler Richtung eindeutig, dass durch Bestrahlung mit Diffusor Aufsatz, im Vergleich zu den Messungen ohne Diffusor Aufsatz, die Verschiebung der Bauteile nach Klebstoffhärtung reduziert werden kann. Der Diffusor Aufsatz hat hier bewirkt, dass die Klebstoffschicht gleichmäßiger ausgestrahlt werden konnte. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit die Fotoinitiatoren im Klebstoff gleichzeitig anzuregen. Kombiniert mit der verringerten Intensität der UV-Strahlung konnte durch Verwendung des Diffusors der Härtevorgang in der Klebstoffschicht langsamer und gleichmäßiger ablaufen. Dies führte zu einer homogeneren Härtung des Klebstoffs und zur Reduzierung seines härtungsbedingten Schrumpfes. Diese Reduzierung bewegt sich gegenüber der Bestrahlung ohne Diffusor zwischen ca. 45 % für den Polytec 2137 und 92 % für den Wellmann Sicuwell 7043 Klebstoff. Je nach Anwendung kann somit die Lage des Bauteils durch die Härtung beeinflusst werden.



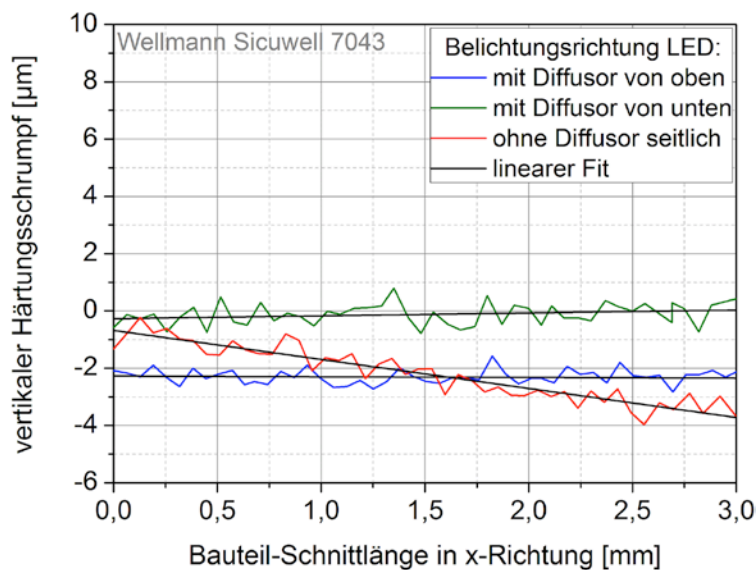
Die Härtung des Klebstoffs Sicuwel 7043 der Marke Wellmann mit Diffusor zeigt nur eine minimale Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung. Beim Self-Assembly-Prozess ist das ein entscheidendes Kriterium, wenn man erreichen will, dass die Bauteile nach Fixierung ihre Position bezüglich ihrer elektrostatischen Ausrichtung so minimal, wie nur möglich, verändern. So ist es möglich, die Genauigkeit einer elektrostatischen Ausrichtung auf die Bauteile nach Fixierung unabhängig der Härtung zu analysieren. Deshalb wurden weitere Versuche zur Charakterisierung hauptsächlich mit diesem Klebstoff durchgeführt.

### *Einfluss der Belichtungsrichtung*

Zur Charakterisierung des Self-Assembly-Prozesses wurden Klebungen überwiegend mit dem Klebstoff Sicuwel der Marke Wellmann durchgeführt. Dieser weist die geringste laterale und vertikale Verschiebung der Bauteile durch Härtung auf. Die folgende Messung soll zeigen, wie sich die Belichtungsrichtung auf die Verschiebung des Bauteils auswirkt. Hierzu wurden die Bauteile jeweils aus drei Richtungen bestrahlt:

- 1) LED senkrecht unter dem Bauteil
- 2) LED senkrecht über dem Bauteil
- 3) LED seitlich über dem Bauteil

Bei der seitlichen Bestrahlung des Bauteils war der LED-Strahl auf die linke Bauteilkante in einem Winkel von ca.  $45^\circ$  zur horizontalen Ebene gerichtet. Außerdem wurde die seitliche Belichtung, im Vergleich zur oberen und unteren Belichtungsmethode, ohne Diffusor durchgeführt. Bei Belichtung von unten wird durch den Glasträger bestrahlt. Dies soll die Situation während des Self-Assembly-Prozesses mit Bauteilen aus Pyrex simulieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 32 dargestellt. Hierbei ist die Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung über seine gemessene Schnittlänge in x-Richtung für die drei genannten Belichtungsrichtungen aufgetragen. Jede der drei Kurven repräsentiert jeweils eine Messung mit der entsprechenden Belichtungsrichtung. Alle weiteren Messungen verliefen analog zu diesen.



**Abbildung 32:** Vertikaler Härtungsschrumpf über die Bauteil-Schnittlänge mit Belichtung der Bauteile von oben diffus (blau), von unten diffus (grün) und von der Seite direkt (rot).

Das Ergebnis aus Abbildung 32 zeigt, dass eine Härtung des Klebstoffs mit Belichtung von unten durch den Glasträger keine erkennbare Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung bewirkt (grün). Erfolgt hingegen eine Bestrahlung des Bauteils von oben, so verschiebt sich dieses nach Härtung gleichmäßig um ca.  $2\ \mu\text{m}$  (blau) in negative z-Richtung. Eine Bestrahlung des Bauteils ohne Diffusor und von der Seite führte ebenfalls zu einer vertikalen Verschiebung des Bauteils von durchschnittlich ca.  $2\ \mu\text{m}$  (rot). Diese Verschiebung ist jedoch nicht mehr gleichmäßig über die Schnittlänge des Bauteils, sodass eine Verkipfung des Bauteils um ca.  $0,082^\circ$  entsteht.

Die Messung zeigt hier deutlich, dass es einen Unterschied macht, ob das Bauteil ohne Diffusor von der Seite, mit Diffusor von oben oder von unten belichtet wird. Bei Belichtung mit Diffusor kann die Klebstoffschicht gleichmäßig bestrahlt werden. Erfolgt die Bestrahlung hierbei von oben, so

kann das UV-Licht die präparierte Siliziumoberfläche des Bauteils nicht durchdringen und trifft zuerst den Klebstoff, der sich um das Bauteil befindet. Die Polymerisation wird deshalb wahrscheinlich zuerst im Klebstoffrand initiiert und erfolgt anschließend zunehmend in Richtung Bauteilmitte bis der Klebstoff zwischen Bauteil und Glasträger vollständig gehärtet ist. Dies bewirkt, dass das Bauteil in vertikale Richtung verschoben wird. Die Verschiebung ist gleichmäßig, da die Bestrahlung der Klebstoffränder durch den Einsatz des Diffusors homogen verläuft, sodass die Startreaktionen im Klebstoffrand gleichzeitig beginnen und die Polymerisation gleichmäßig zur Bauteilmitte verläuft. Erfolgt die Bestrahlung von unten durch den Glasträger, so wird die komplette Klebstofffläche ausgeleuchtet. Die Startreaktion erfolgt überall in der Klebstoffschicht gleichzeitig, sodass die Härtung im gesamten Bereich der Bauteilfläche homogen erfolgen kann. Dadurch wird die Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung entscheidend minimiert. Bei seitlicher Belichtung ohne Diffusor trifft die Strahlung lokal im Bereich der linken Bauteilkante auf den Klebstoff auf. Die Polymerisation wird demnach an dieser Stelle zuerst initiiert und bildet sich anschließend in der restlichen Klebstoffschicht aus. Dadurch neigt das Bauteil zu einer Schiefelage nach der Härtung. Diese Verkippung des Bauteils ist nicht kontrollierbar und daher ein Nachteil für den Self-Assembly-Prozess. Für die Montage der Bauteile erfolgt daher die Belichtung von oben mit Diffusor. Die Verschiebung bei Bauteilen aus Pyrex müsste sich daher ähnlich verhalten wie in der obigen Messung bei Bestrahlung von senkrecht und von unten.

### 3.3.5 AP 5: Prozessapplikation

Bevor reale Bauteile erprobt werden konnten, mussten Versuche mit einem anderen Trägermaterial erfolgen, insbesondere leitfähigen Substanzen wie z.B. Silizium. Hierbei sind einige Probleme entstanden, die weitergehende Untersuchungen mit realen Bauteilen erschwert haben. Zunächst wurden Proben hergestellt, bei denen die Kontaktpads aus Aluminium direkt auf den Si-Wafer prozessiert wurden. Der Self-Assembly Prozess war nun nicht mehr möglich, da durch das elektrisch leitfähige Aluminium ein Kurzschluss auf der Substratseite entstand. Abhilfe schaffte ein zusätzlicher Prozessschritt, um mit Hilfe einer Passivierungsschicht aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  den Kurzschluss zu verhindern. Ein weiteres Problem stellte die sehr aufwändige Charakterisierung mittels Schliffbilder dar. Ein komfortabler Weg wie über ein Mikroskop war hier nicht mehr möglich. Daher wurden nur wenige Proben eingehend charakterisiert, für eine statistisch zuverlässige Aussage müssten noch weitere Proben untersucht werden.

Die Versuche zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit bei Montagen mit Silizium wurden mit drei unterschiedlichen Bauteil-Substrat Kombinationen durchgeführt. Hierbei wurden Kombinationen aus Pyrex-Bauteil auf Si-Substrat, Si-Bauteil auf Pyrex-Substrat und Si-Bauteil auf Si-Substrat untersucht. Die Montagen erfolgten ausschließlich mit symmetrischen Elektrodenstrukturen (Pad-Kantenlänge 100  $\mu\text{m}$ , Pad-Abstand 200  $\mu\text{m}$ ) und mit konstanten Parametern für die Ausrichtungsspannung (120 V), Klebstoffmenge (1,2  $\mu\text{l}$ ) und Temperatur (30 °C). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst und in den weiteren Abschnitten erläutert.

**Tabelle 4:** Lateraler Ausrichtungsfehler nach Montagen mit Silizium und Pyrex Kombinationen mit symmetrischer Elektrodenstruktur vom Typ 100\_200.

Bauteil (B) / Substrat (S) Kombination	Pyrex (B) auf Si (S)	Si (B) auf Pyrex (S)	Si (B) auf Si (S)
lateraler Ausrichtungsfehler [ $\mu\text{m}$ ]	0,7 ± 0,25	< 3 $\mu\text{m}$	< 5 $\mu\text{m}^*$

\*Einzelmessung

### Pyrex-Bauteil und Si-Substrat

Bei einer Kombination aus Pyrex-Bauteil und Si-Substrat wurde der laterale Ausrichtungsfehler anhand der mitprozessierten Messstrukturen am konfokalen Mikroskop bestimmt. Der laterale Ausrichtungsfehler von vier vermessenen Proben weist hierbei einen Wert von durchschnittlich (0,7 ± 0,25)  $\mu\text{m}$  auf und bewegt sich damit in der Größenordnung von Montagen mit einer Kombination aus Bauteil und Substrat aus Pyrex. Durch die Verwendung eines Substrats aus

Silizium an Stelle von Pyrex konnte demnach kein signifikanter Unterschied bezüglich der lateralen Ausrichtung der Bauteile festgestellt werden.

### Si-Bauteil und Pyrex-Substrat

Bei einer Kombination aus Si-Bauteil und Pyrex-Substrat ist eine Untersuchung der Messtrukturen am konfokalen Mikroskop aufgrund der nichtgegebenen Transparenz des Si-Bauteils für den Laserstrahl nicht möglich. Erfolgt der Scan an der Unterseite des Pyrex-Substrats, so wird nur das größere Messpad des Substrats abgebildet, das sich darunter befindende Messpad des Bauteils wird nicht erfasst. Zur Bestimmung des lateralen Fehlers wird daher der Versatz zwischen den Leiterbahnen der Bauteil- und Substratelektroden, jeweils in x- und y-Richtung, am Lichtmikroskop und am konfokalen Mikroskop untersucht. Bei vier erfolgreich durchgeführten Montagen konnte anhand der Messungen kein Versatz zwischen den Leiterbahnen festgestellt werden. Der laterale Ausrichtungsfehler wird daher kleiner als die Leiterbahnbreite von  $3\ \mu\text{m}$  geschätzt. In Abbildung 33 ist ein solches Si-Bauteil auf einem Pyrex-Substrat nach erfolgreicher Montage dargestellt. Hierbei ist weder in x-, noch in y-Richtung ein Versatz zwischen den Elektrodenstrukturen des Bauteils und des Substrats sichtbar. Während der Montagen wurde beobachtet, dass einige Si-Bauteile nicht korrekt positioniert werden können. Es wird vermutet, dass die elektrische Leitfähigkeit des Siliziums einen negativen Einfluss auf das generierte elektrische Feld nimmt und diese stört. Dadurch wirken schwächere und ungerichtete elektrostatische Kräfte, die nicht ausreichen um das Bauteil zu bewegen und korrekt auszurichten.

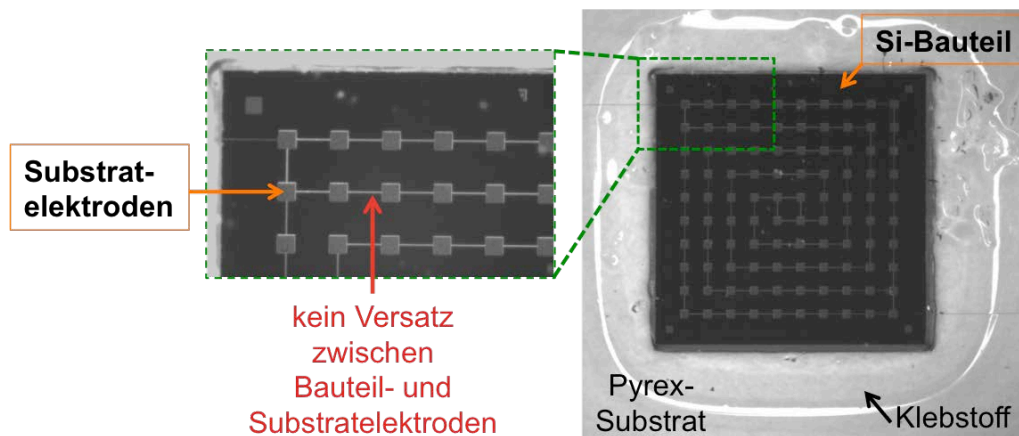


Abbildung 33: Erfolgreiche Montage von Si-Bauteil auf Pyrex-Substrat.

### Si-Bauteil und Si-Substrat

Bei einer Kombination aus Si-Bauteil und Si-Substrat wurde der laterale Ausrichtungsfehler anhand einer materialographischen Präparation untersucht. Hierzu wurde ein Querschliff im Bereich der Elektroden angefertigt und der laterale Ausrichtungsfehler durch die Messung des Versatzes zwischen den Bauteil- und Substratelektroden am Lichtmikroskop bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 34 dargestellt. Hierbei weist der Versatz für ein Elektrodenpaar ca.  $4,1\ \mu\text{m}$  auf.

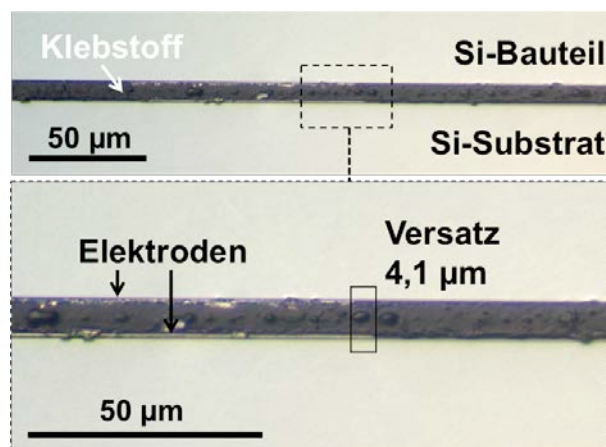


Abbildung 34: Querschliff einer Montage mit Si-Bauteil auf Si-Substrat im Bereich der Elektroden.

Die Klebstoffschicht zwischen Bauteil und Substrat weist auf der linken Seite eine Dicke von ca.  $12\ \mu\text{m}$  (Abbildung 35) und der rechten Seite eine Dicke von ca.  $5,6\ \mu\text{m}$  (Abbildung 36) auf. Sowohl die Klebstoffschichtdicke als auch der laterale Ausrichtungsfehler ist bei dieser Montage mit Silizium höher als für Montagen mit Pyrex. Aus diesen Unterschieden lässt sich schlussfolgern, dass die elektrostatischen Ausrichtungskräfte für Bauteile aus Silizium schwächer sind, als für selbige aus Pyrex. Vermutlich bewirkt hier das elektrisch leitfähigere Silizium eine Störung bei der Ausbildung des elektrischen Feldes. In Folge dessen sind die Ausrichtungskräfte sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung schwächer ausgeprägt und ein präzises Self-Assembly wird erschwert.

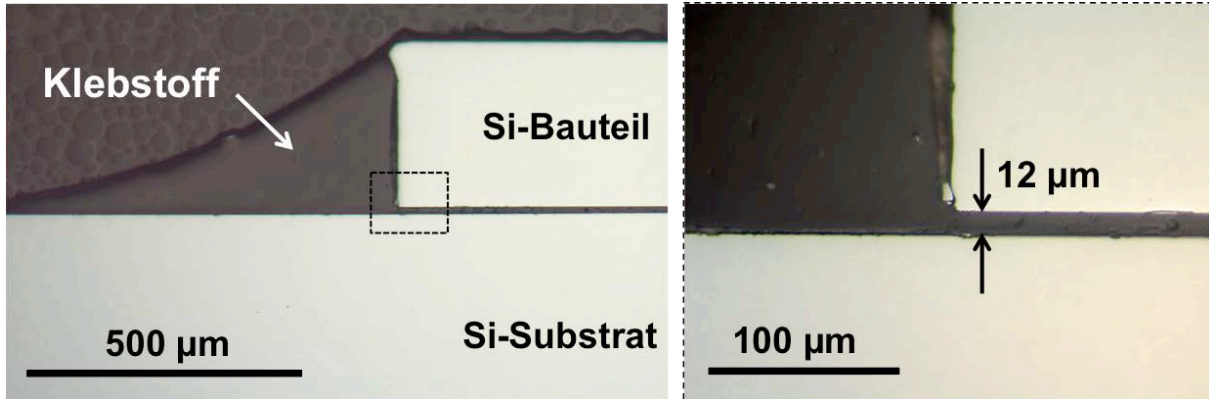


Abbildung 35: Klebstoffschichtdicke zwischen Si-Bauteil und Si-Substrat im Bereich der linken Bauteilseite.

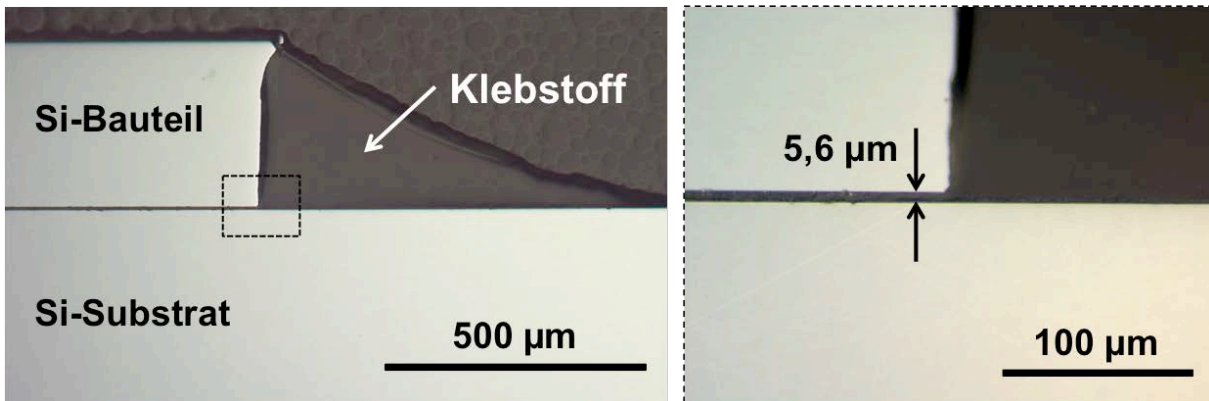


Abbildung 36: Klebstoffschichtdicke zwischen Si-Bauteil und Si-Substrat im Bereich der rechten Bauteilseite.

### 3.3.6 AP 6: Prozesshandbuch

Ein Prozesshandbuch wurde angefertigt. In diesem finden sich eine Übersicht aller untersuchter Parameter und Einflussgrößen sowie ihre Auswirkungen auf den Prozess. In nachfolgender Tabelle 5 ist ein Überblick zu erkennen. Nachfolgende Tabelle 6 enthält durch die Experimente ermittelte Grenzwerte verschiedener Parameter, die für ein erfolgreiches Self-Assembly nicht über- oder unterschritten werden dürfen sowie die beeinflussten Prozessschritte und weiteren Parameter.

**Tabelle 5:** Einflussgrößen und ihre Wirkungsweise auf den Self-Assembly-Prozess.

<b>Einflussgröße</b>	<b>Auswirkung auf den Prozess</b>	<b>Wirkungsweise</b>
<b>Elektrodengeometrie</b>		
Pad-Kantenlänge $a$	Manuelle Vorpositionierung	$a \uparrow \rightarrow$ höhere Toleranzgrenze für manuelle Vorpositionierung
	Lateraler Ausrichtungsfehler	$a \uparrow \rightarrow$ lin. Zunahme der lateralen Ausrichtungskraft $\rightarrow$ lin. Abnahme des lateralen Ausrichtungsfehlers
Pad-Abstand $w$	Manuelle Vorpositionierung	$w \uparrow \rightarrow$ höhere Toleranzgrenze für manuelle Vorpositionierung
	Lateraler Ausrichtungsfehler	$w \uparrow \rightarrow$ Reduzierung des Störeinflusses der generierten elektrischen Felder benachbarter Elektrodenpads $\rightarrow$ lin. Abnahme des lateralen Ausrichtungsfehlers
Elektrodenanordnung	Lateraler Ausrichtungsfehler	Sym. Elektrodenanordnung $\rightarrow$ homogenere Ausbildung des elektrischen Feldes $\rightarrow$ Reduzierung des lat. Ausrichtungsfehlers
<b>Elektrik</b>		
Ausrichtungsspannung $U < U_{krit.} \approx 120 \text{ V}$	Lateraler Ausrichtungsfehler	$U \uparrow \rightarrow$ Zunahme der elektrostatischen Ausrichtungskraft in lateraler Richtung $\rightarrow$ Abnahme des lateralen Ausrichtungsfehlers
Ausrichtungsspannung $U > U_{krit.} \approx 120 \text{ V}$	Lateraler Ausrichtungsfehler	$U \uparrow \rightarrow$ lineare Zunahme der elektrostatischen Ausrichtungskraft in vertikaler Richtung $\rightarrow$ höherer Einfluss der Kapillarkräfte zw. Bauteil und Substrat $\rightarrow$ Zunahme des lat. Ausrichtungsfehlers
Ausrichtungsspannung $U$	Klebstoffschichtdicke zw. Bauteil und Substrat	$U \uparrow \rightarrow$ lineare Zunahme der vertikalen Ausrichtungskraft $\rightarrow$ lineare Abnahme des Abstandes zwischen den Bauteil- und Substratelektroden
	Ausrichtungsgeschwindigkeit	$U \uparrow \rightarrow$ quadratische Zunahme der lateralen Ausrichtungskraft $\rightarrow$ quadratische Zunahme der mittleren Ausrichtungsgeschwindigkeit
Überspannung $U_{max} > 300 \text{ V}$	elektrischer Kurzschluss	Beschädigung der Elektroden durch elektrischen Kurzschluss
	Luftblaseneinschluss	Das Entweichen eingeschlossener Luftblasen in der Klebstoffschicht zwischen Bauteil und Substrat wird verhindert
<b>Klebstoff</b>		
Viskosität $\eta$	Lateraler Ausrichtungsfehler	$\eta \uparrow \rightarrow$ erforderliche laterale Kraft für präzise elektrostatische Ausrichtung höher $\rightarrow$ Zunahme des lateralen Ausrichtungsfehlers
Volumen $V$	Lateraler Ausrichtungsfehler	$V \uparrow \rightarrow$ lateraler Ausrichtungsfehler konstant
	Klebstoffschichtdicke zw. Bauteil und Substrat	$V \uparrow \rightarrow$ nicht lineare Ausbreitung des Klebstoffs nach Applikation auf dem Substrat $\rightarrow$ exponentielle Zunahme der Klebstoffschichtdicke zwischen Bauteil und Substrat nach Montage (Abhilfe: SU8-Becken)
Temperatur $T$	Lateraler Ausrichtungsfehler	$T \uparrow \rightarrow$ höherer lateraler Ausrichtungsfehler nach der Montage
	Ausrichtungswahrscheinlichkeit	$T \uparrow \rightarrow$ Abnahme der Ausrichtungswahrscheinlichkeit
Kontamination	elektrostatische Ausrichtungsfähigkeit	Verunreinigung $\rightarrow$ höhere Reibung zwischen Bauteil und Substrat $\rightarrow$ keine oder nur eine unpräzise elektrostatische Ausrichtung
Alterung	elektrostatische Ausrichtungsfähigkeit	Alterung $\rightarrow \eta \downarrow \rightarrow$ keine oder sehr unpräzise elektrostatische Ausrichtung
<b>UV-Härtung</b>		
Ausleuchtung (Diffusor)	Bauteilverschiebung nach Härtung	Diffusoraufsatzes vor LED $\rightarrow$ homogene Ausleuchtung der Klebstoffschicht $\rightarrow$ Reduzierung der Verschiebung von Bauteilen in lateraler und vertikaler Richtung nach Härtung
Bestrahlungsrichtung	Bauteilverschiebung nach Härtung	Senkrechte Bestrahlung reduziert eine ungleichmäßige Verschiebung des Bauteils in vertikaler Richtung nach Härtung
<b>SU8-Becken</b>		
mit Becken	Klebstoffausbreitung	Klebstoffausbreitung kontrollierbar
passende Beckengröße $b$	Manuelle Vorpositionierung	Bauteil nach manueller Positionierung auf den Klebstofffilm direkt innerhalb d. Toleranzgrenze für elektrostatische Ausrichtung

**Tabelle 6:** Prozessparameter für eine erfolgreiche Montage mit dem Self-Assembly-Prozess. Die römischen Ziffern in Spalte drei beziehen sich auf die zugehörigen Prozessschritte: I = Dispensierung Klebstoff, II = Grobpositionierung, III = Feinjustierung, IV = Fixierung durch UV-Härtung.

Parameter-Bezeichnung	Grenzwert	Beeinflussung
<b>Probe</b>		
Pad-Kantenlänge <b>a</b>	100 - 200 $\mu\text{m}$	II, III, <b>w, b, d, x</b>
Pad-Abstand <b>w</b>	$2*a - 3*a$	II, III, <b>b, d, x</b>
Elektrodenanzahl	3 x 3	II, III, <b>F, d, x</b>
Elektrodenanordnung	symmetrische Spirale	III, <b>x</b>
Beckengröße <b>b</b>	4,1 mm	I, II, III, <b>d, x</b>
Beckenhöhe <b>h</b>	45 $\mu\text{m}$	I, II, III, <b>V, x</b>
<b>Elektronik</b>		
Ausrichtungsspannung <b>U</b>	35 - 250 V	III, <b>v, F, d, x</b>
Frequenz <b>f</b>	50 Hz - 6 kHz	III, <b>x</b>
Stromstärke <b>I<sub>Strom</sub></b>	< 20 mA	III, <b>x</b>
<b>Klebstoff</b>		
Viskosität <b><math>\eta</math></b>	80 - 900 mPas	I, II, III, <b>x</b>
dispensiertes Volumen <b>V</b>	0,6 - 2 $\mu\text{l}$	I, II, III, IV, <b>d, h, x</b>
Alterung	siehe MHD	I, III, IV, <b>t, x</b>
<b>Umgebung</b>		
Temperatur <b>T</b>	30 °C	I, II, III, <b><math>\eta, d, x</math></b>
Kontamination	Staubfrei	I, II, III, <b>x</b>
Tischlage <b><math>\varphi</math></b>	0°	I, II, III, <b>x</b>
<b>UV-Härtung</b>		
Wellenlänge <b><math>\lambda</math></b>	365 nm	IV, <b>x, Festigkeit</b>
Intensität <b>I</b>	> 100 mW/cm <sup>2</sup>	IV, <b>t, x, Festigkeit</b>
Bestrahlungsart	flächig diffus	IV, <b>t, I, d, x, Festigkeit</b>
Bestrahlungsrichtung <b><math>\vartheta</math></b>	senkrecht	IV, <b>t, I, d, x, Festigkeit</b>
Bestrahlungsdauer <b>t</b>	> 10 s	IV, <b>d, x, Festigkeit</b>
<b>Ergebnisparameter</b>		
Laterale Ausrichtungsfehler <b>x</b>	< 2 $\mu\text{m}$	-
Schichtdicke <b>d</b>	3 $\mu\text{m}$ < <b>d</b> < 6 $\mu\text{m}$	-
Ausrichtungskraft <b>F</b>	> 4 $\mu\text{N}$	-
Schlag- und Bruchfestigkeit	Abh. von Härtung	-

### 3.4 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Speziell KMU können die erwarteten Ergebnisse wirtschaftlich nutzen, da ihnen ein wirtschaftlicher Fertigungsprozess für die Präzisionsmontage ohne die Verwendung kapital-intensiver Gerätschaften zur Verfügung steht.

Der Prozess stellt gegenüber der noch vielfach eingesetzten Handmontage eine wesentliche Verbesserung dar, da er nun primär von physikalischen Gegebenheiten und weniger von der Fertigkeit der Arbeitskraft beeinflusst wird. Damit können die Unternehmen hoch genaue Mikrosysteme zu beschränkten Kosten herstellen. Es wird erwartet, dass der Kapitaleinsatz für Investitionen gegenüber hochgenauen Bestückungs-Vollautomaten deutlich reduziert wird. Aufgrund der potentiellen Möglichkeit zur Lageregelung sind verringerter Ausschuss und reduzierte Kosten für Fehlerbeseitigung und Nacharbeit im Vergleich zur manuell unterstützten Montage zu erwarten.

### 3.5 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU

Die Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse kann in den Fachgebieten „Elektrotechnik“, „Mess-, Regel-, Automatisierungstechnik“ sowie bei „Werkstoffen, Materialien“ sowie im Fachgebiet „Produktion“ erfolgen.

Die erwarteten Ergebnisse des Vorhabens sind besonders für die Wirtschaftszweige „Elektrotechnik“, „Maschinenbau“, „Fahrzeugbau“ und „Energietechnik“ von Relevanz, für welche insbesondere Sensoren, Messtechnik, Hybride und Mikrosysteme integriert werden.

In der Sensorik kommen zwei wesentliche Technologien für Bare Chips zur Anwendung, die Montage von zugekauften Sensoren in Sensorgehäusen und der Aufbau intelligenter Mehrchipsysteme in Chip-and-Wire-Technologie. In Deutschland gibt es ca. 700 industrielle Hersteller von Messsystemen, die 18 - 20 Mrd. € pa mit Sensorprodukten umsetzen (AMA Fachverband Sensorik). In der Sensorik werden bei einem Umsatzwachstum in Deutschland von ca. 8-12 % ca. 4.000-8.000 neue Arbeitsplätze pro Jahr geschaffen. Die exportorientierte Sensorbranche ist etwa zur Hälfte durch KMU dominiert. Die Automatisierungstechnik umfasst einen Markt von ca. 28 Mrd. € in Deutschland und ca. 68 Mrd. € in der EU (ZVEI).

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen einen signifikanten Beitrag dazu leisten, die Wettbewerbsfähigkeit von KMU zu steigern. Bei elektronisch-optischen Mikrosystemen, HF-Systemen und Sensorsystemen, wo hohe Anforderungen an Präzision oder an Stückzahl gestellt werden, hat Selbstjustierung ein großes Einsatzpotential.

Die Hersteller von Mikrosystemen, etc., welche das Verfahren nutzen, werden in der Lage sein, hoch integrierte Systeme mit hoher Positioniergenauigkeit zu montieren. Dabei ergeben sich wirtschaftliche Vorteile, weil der Gesamtprozess so angelegt ist, dass großer Kapitaleinsatz vermieden wird. Gegenüber der manuellen Montage, welche bereits durch die Optik in ihrer Genauigkeit begrenzt ist, werden große technische Vorteile erzielt. Durch die auch kostengünstige Montage-Lösung können neue Einsatzfelder erschlossen werden. Dies erhöht die Marktchancen der umsetzenden Unternehmen. Durch das Vorhaben werden die neuen Ansätze für die Fertigungstechnik auch KMU zugänglich gemacht, welche die

### 3.6 Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden bislang keine gewerblichen Schutzrechte beantragt.

### 3.7 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Antrags

Zielsetzungen im Antrag	Ergebnisse
Erstellung eines passenden Layouts für Teststrukturen sowie deren Herstellung. Ziel ist es die Lage und Bewegungsgeschwindigkeit der zu positionierenden Bauelemente optimal einzustellen. Die Proben sollen im Reinraum des IMTEK hergestellt werden.	Es wurden verschiedene Designs der Justagestrukturen entwickelt, hergestellt und getestet. Das zielführendste Layout war dabei eine symmetrische Anordnung von Pads mit möglichst großem Abstand zwischen einzelnen Pads sowie spiralförmiger Verschaltung.
Es soll ein Testsystem aufgebaut werden, bei dem der Gesamtprozess bestehend aus Grobpositionierung, Klebstoffapplikation, Feinjustage und Fixierung erprobt werden kann. Hierzu ist es notwendig, den Arbeitsplatz zu konzipieren, aufzubauen und ständig zu optimieren. Außerdem muss der Arbeitsplatz eine Möglichkeit zum Härten von UV-Klebstoffen bieten.	Der Versuchsaufbau wurde im Laufe des Projektes geplant und schrittweise aufgebaut und optimiert. Dazu wurden neue Gerätschaften angeschafft: Dispenser, Stereomikroskop, passende Kamera, Hochspannungsquelle, Temperaturplatte und diverse Zubehörteile wie Halterungen etc. Es wurde eine spezielle UV-LED entwickelt, die eine konstante und gleichmäßige Härtung der Klebstoffe ermöglicht.
In den Versuchen zur elektrostatischen Positionierung sollen wichtige Parameter sowohl optisch als auch elektrisch überwacht und analysiert werden, um Zusammenhänge und Grenzen des Prozesses zu erkennen und zu definieren.	Es wurden alle wesentlichen Einflussparameter ständig überwacht und protokolliert. Zusammenhänge konnten erkannt werden und Grenzen des Prozesses wurden aufgezeigt. Theoretische Überlegungen wurden experimentell bestätigt.
Die Einrichtung zur Belichtung soll direkt in den Waferprober integriert werden. Hierbei sollen UV-Lampen sowie spezielle Beleuchtungen erprobt werden. Wesentliches Kriterium ist die Vermeidung von Dejustagen beim Phasenübergang der Härtung.	Es wurde eine spezielle UV-LED mit einer passenden Wellenlänge von 365 nm (Klebstoffabhängig!) entwickelt. Die LED wurde in den Messaufbau integriert, eine Dejustage konnte zum Ende der Projektlaufzeit vermieden werden, in dem ein Diffusor verwendet wurde.
Es sollten repräsentative Bauelemente der Mikrosystemtechnik am IMTEK erprobt werden. In Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des PbA werden Siliziumbauelemente verwendet, um die Machbarkeit des Prozesses zu untersuchen und Probleme zu erkennen.	Siliziumbauelemente lassen sich nur mit größerem Aufwand positionieren, da die wirkenden elektrischen Feldkräfte abgeschwächt bzw. verändert werden. Die Charakterisierung dieser Bauteile ist aufgrund ihrer Undurchsichtigkeit erschwert und deutlich zeitaufwändiger.
In einem Prozesshandbuch sollen Regeln für die industrielle Umsetzung des Gesamtprozesses zusammengefasst werden. Das Handbuch fasst die quantitativen und qualitativen Einflussgrößen und ihre Wirkungen zusammen und beschreibt die wesentlichen Designregeln.	Das Prozesshandbuch wurde auf Basis eines großen Datensatzes erstellt. Es konnten alle Einflussgrößen und ihr Wirkung definiert werden. Auch entscheidende Designregeln sind darin definiert, sodass das Handbuch für die Industrie wertvolle Informationen zum erfolgreichen Einsatz des Self-Assembly Prozesses liefert.



## 4 Plan zum Ergebnistransfer

Die von den Forschungsstellen im laufenden Projekt und nach Abschluss des Projekts geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer umfassen im Einzelnen die nachstehend aufgeführten Schritte:

	Zeitpunkt	Maßnahme	Ziel / Bemerkung
während der geplanten Laufzeit von 24 Monaten	Ab Projektstart fortlaufend	Interaktion mit PbA	Ergebnispräsentation und Diskussion der durchgeführten und geplanten Arbeiten
	10/2012, 5/2013, 1/2014, 12/2014	Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Fortschrittsbericht, Diskussionen, Festlegungen, Abstimmung, ggf. steuernde Maßnahmen
	12/2012,04/2013, 12/2013,04/2014, 11/2014	Ergebnispräsentation und Beratung des FA10 Mikroverbindungstechnik im DVS	Fortschrittsbericht, Diskussionen, Festlegungen, Abstimmung, ggf. steuernde Maßnahmen
	10/2013	Publikation im Rahmen des MST Kongress 2013 in Aachen (Paper)	Weiterbildung & Information der Fachwelt
	01/2014	Publikation „Microsystems Technology in Germany 2014“ Jahrbuch MST 2014 (Paper)	Weiterbildung & Information der Fachwelt
	2/2014	Bericht auf Fachtagung von DVS und GMM: EBL 2014 (Elektronische Baugruppe und Leiterplatte)	Ergebnispräsentationen zum Thema gegenüber Fachwelt
	11/2014	Publikation im Rahmen des Meetings der ASPE 2014 in Boston (Poster + Paper)	Weiterbildung & Information der Fachwelt
	12/2014	Publikation Jubiläumsband Prof. Lang (Fraunhofer IZM)	Weiterbildung & Information der Fachwelt
nach Abschluss des Vorhabens	3/2015	Abschluss- und Forschungsbericht, Papier und elektronisch: TIB Hannover, Freiburger Dokumentenserver	Zusammenstellung und vertiefte Darstellung der Forschungsergebnisse
	Bis 06/2015	Veröffentlichung in Fachzeitschrift (PLUS oder ggf. Adhäsion)	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung des Einsatzes des Prozesse

Der vorliegende Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurde eingehalten und umgesetzt. Einzelne Termine haben sich aufgrund des verschobenen Bewilligungszeitraumes geändert, wurden allerdings dennoch wahrgenommen. Maßnahmen die nach Projektabschluss erfolgen sollen, sind in Planung und werden umgesetzt. Folgende Transfermaßnahmen wurden bereits durchgeführt:

### Maßnahme 1: Unterstützung des PbA

Die Ergebnisse aus dem Projekt wurden an Einzelmitglieder des PbA elektronisch übermittelt und telefonisch besprochen. Vor allem wurden Untersuchungen an diversen Klebstoffen einzelner PBA Firmen durchgeführt und die Ergebnisse ausführlich dargelegt. Auf diesem stetigen Austausch an Informationen, sowohl von den Forschungsstellen zu den Unternehmen als auch von den Unternehmen zu den Forschungsstellen, aufbauend, konnte und wurde der Verlauf des Projekts auf individuelle Wünsche und Fragestellungen der Unternehmen hin orientiert.

### Maßnahme 2: Beratung des projektbegleitenden Ausschusses

Es wurde am 10. Dezember 2012 am IMTEK in Freiburg eine PbA-Sitzung durchgeführt, an der fünf Teilnehmer anwesend waren. Eine weitere PbA-Sitzung, an der fünf Teilnehmer mitgewirkt haben, fand am 16.05.2013 in Maxdorf bei der Firma Wellmann Technologies GmbH statt. Weiter wurde ein PbA-Treffen am 30.01.2013 mit neuem Projektleiter bei der Firma arteos GmbH in Seligenstadt durchgeführt mit insgesamt acht teilnehmenden Personen. Ein letztes abschließendes PbA-Treffen fand am 15.12.2014 erneut am IMTEK in Freiburg mit sechs Teilnehmern statt. Der PbA zeigte sich stets mit dem Verlauf der durchgeführten Arbeiten einverstanden. Die Treffen wurden für ausführliche Diskussionen zum Thema genutzt. Dabei wurden die jeweils weiteren geplanten Schritte im Projekt eng mit den Unternehmen abgestimmt.

### **Maßnahme 3: Ergebnispräsentation und Beratung des DVS FA 10**

Die Darstellung der Ergebnisse im Fachausschuss Mikroverbindungstechnik der FV des DVS fand im Rahmen von FA10-Treffen am 05.12.2012, 09.04.2013, 04.12.2013, 09.04.2014 und am 26.11.2014 statt.

### **Maßnahme 4: Berichte auf Fachtagungen und Publikationen**

Im Rahmen des MST Kongress 2013 und dem zugehörigen Jahrbuch „Microsystems Technology in Germany 2014“ wurden zwei Publikationen in Form von Papern veröffentlicht und der Fachwelt präsentiert.

Im Rahmen der Fachtagung EBL 2014 (Elektronische Baugruppen und Leiterplatten Messe) vom DVS und GMM wurde am 11.02.2014 ein 25-minütiger Fachvortrag mit dem Titel „Self-Assembly – Elektrostatische und fluidische Self-Assembly Prozesse für die präzise Montage von Mikrosystemen“ gehalten sowie das zugehörige Paper veröffentlicht.

Auf der Konferenz ASPE vom 09-14.11.2014 in Boston wurde das im Projekt erarbeitete Modell zur Selbstpositionierung von Bauteilen der internationalen Fachwissenschaft zur wissenschaftlichen Diskussion vorgestellt, hierzu wurde sowohl ein Paper als auch ein Poster präsentiert..

Zum 60jährigen Jubiläum von Prof. Klaus-Dieter Lang wurde ein Beitrag veröffentlicht im Jubiläumsband „Microelectronic packaging in the 21st century“ des Fraunhofer IZM, verfasst von Rolf Aschenbrenner und Martin Schneider-Ramelow.

### **Maßnahme ab 6 Monate nach Abschluss des Vorhabens**

Die nach Abschluss des Projekts vorgesehenen Transfermaßnahmen werden planmäßig durchgeführt. Geplant ist eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift PLUS bis zum 30.06.2015. Bis zum 28.02.2015 ist die Herausgabe eines Forschungsberichts über den Freiburger Dokumentenserver (<http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/9931/>) und der Instituts-Homepage ([www.imtek.de/avt](http://www.imtek.de/avt)) geplant. Sie stehen dann dauerhaft zum Download bereit.

## 5 Erläuterungen der Verwendung der Zuwendung

Alle Arbeiten waren notwendig und sie wurden in Abstimmung zwischen den Projektpartnern durchgeführt. Die Arbeiten entsprechen inhaltlich denen im Arbeitsplan vorgesehenen. Sie gewährleisten daher die planmäßige Bearbeitung des Projekts.

### *Durchgeführte Arbeiten und eingesetzte Mittel*

#### AP1 Justage- und Teststrukturen

- Durchgeführte Arbeiten:
  - Festlegung der Situation in PBA-Firmen mit Umfrage
  - Topologische Optimierung von Strukturen mit der Finite-Elemente-Simulation
  - Entwicklung und Vergleich verschiedener Layouts für Teststrukturen
  - Herstellung von Justageproben im Reinraum des IMTEK
- Dazu benötigt und eingesetzt:
  - wissenschaftlich-technisches Personal HPA A: 3 MM
  - Wissenschaftliche Hilfskraft 3 MM
  - Leistungen Dritter:
    - Reinraum IMTEK Fertigung von Proben 10303,90 €

#### AP2 Prüfstand zur elektrostatischen Positionierung

- Durchgeführte Arbeiten:
  - Entwicklung eines Konzepts zur elektrostatischen Positionierung von MEMS
  - Integration und Aufbau eines Messplatzes
  - Neubeschaffung div. Gerätschaften zur Optimierung des Messaufbaus
- Dazu benötigt und eingesetzt:
  - wissenschaftlich-technisches Personal HPA A: 5 MM
  - Wissenschaftliche Hilfskraft 6 MM

#### AP3 Versuche zur elektrostatischen Positionierung

- Durchgeführte Arbeiten:
  - Definition von Einflussgrößen für den Prozess
  - Untersuchung der Abweichung bei der Positionierung
  - Berechnung von Kräften
- Dazu benötigt und eingesetzt:
  - wissenschaftlich-technisches Personal HPA A: 5 MM
  - Wissenschaftliche Hilfskraft 6 MM

#### AP4 In situ Härteprozess

- Durchgeführte Arbeiten:
  - Entwicklung einer LED-Beleuchtungseinheit
  - Untersuchung des Klebspalts

- Einfluss der Beleuchtungsart und –richtung auf die Positioniergenauigkeit
- Dazu benötigt und eingesetzt:
  - wissenschaftlich-technisches Personal HPA A: 5 MM
  - Wissenschaftliche Hilfskraft 6 MM

#### AP5 Prozessapplikation

- Durchgeführte Arbeiten:
  - Versuche mit Bauteilen aus Silizium
  - Überlegungen zur elektrischen Kontaktierbarkeit während des Self-Assembly
- Dazu benötigt und eingesetzt:
  - wissenschaftlich-technisches Personal HPA A: 3 MM
  - Wissenschaftliche Hilfskraft 3 MM

#### AP6 Prozesshandbuch

- Durchgeführte Arbeiten:
  - Erstellung eines Anforderungskatalogs für das elektrostatische Self-Assembly
  - Zusammenfassung der quantitativen und qualitativen Einflussgrößen
  - Wirkung unterschiedlicher Parameter aufeinander
- Dazu benötigt und eingesetzt:
  - wissenschaftlich-technisches Personal HPA A: 3 MM

## 6 Zusammenfassung

Mit dem elektrostatischen Self-Assembly-Prozess können Bauteile aus Borosilikatglas bereits ab einer elektrischen Spannung von 35 V mit einer Genauigkeit von  $< 2 \mu\text{m}$  positioniert werden. Dies wird durch eine geeignete Wahl des niederviskosen Klebstoffs Sicutwell 7043 der Firma Wellmann und spiralförmig angeordneter Elektrodenstrukturen ermöglicht. Montagen mit höherer Spannung bis 180 V konnten die Positioniergenauigkeit von Bauteilen auf bis zu  $< 1 \mu\text{m}$  weiter steigern. Eine weitere Spannungserhöhung auf insgesamt 250 V führte jedoch zu keiner genaueren Ausrichtung, sondern zu einer Abnahme der Positioniergenauigkeit, sodass hier ein erhöhter Einfluss der Kapillarkraft zwischen Bauteil und Substrat als Ursache vermutet wird.

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Ausrichtungsvorgangs haben ergeben, dass die mittlere Ausrichtungsgeschwindigkeit der Bauteile mit steigender Spannung quadratisch zunimmt. Die hieraus berechnete laterale Ausrichtungskraft bewegt sich im Bereich von ca.  $4 \mu\text{N}$  bis  $800 \mu\text{N}$  für Montagen mit Ausrichtungsspannungen zwischen 35 V und 350 V.

Mit steigender Spannung erfolgt ebenfalls eine lineare Abnahme der resultierenden Klebstoffschichtdicken zwischen Bauteil und Substrat. Dies bestätigt den theoretischen Zusammenhang, dass die elektrostatische Anziehungskraft, die auf die Elektroden wirkt, umgekehrt proportional zum Elektrodenabstand ist. Eine Erhöhung der dispensierten Klebstoffmenge führte ebenfalls zu höheren Klebstoffschichtdicken. Diese Zunahme ist jedoch nicht linear, sodass ab einer bestimmten Klebstoffmenge eine weitere Hinzugabe zu keiner messbaren Erhöhung der Klebstoffschichtdicke führt. Eine höhere Applikation der Klebstoffmenge übt keinen messbaren Einfluss auf die Positioniergenauigkeit der Bauteile aus.

Mit Hilfe von SU8-Becken um die Elektrodenstruktur auf der Substratseite konnte eine unkontrollierbare Ausbreitung des Klebstoffs erfolgreich unterbunden werden, solange die dispensierte Klebstoffmenge unter einem bestimmten Maximalvolumen lag und das Becken nicht überlief. Eine höhere Klebstoffmenge führte hierbei zu einer linearen Zunahme der resultierenden Klebstoffschichtdicken zwischen Bauteil und Substrat. Wurden Montagen mit dispensierten Klebstoffmengen unter dem Maximalvolumen durchgeführt, so war die laterale Ausrichtungsgenauigkeit vergleichbar mit den Montagen ohne SU8-Becken. Nach überschreiten des Maximalvolumens weist der laterale Ausrichtungsfehler eine deutliche Erhöhung mit starken Schwankungen auf. Dadurch wird eine Ausrichtung der Bauteile unkontrollierbar. Unter Verwendung einer quadratischen Beckengröße von 4,1 mm Kantenlänge befinden sich die Bauteile nach ihrem manuellen Platzieren direkt innerhalb der Toleranzgrenze für eine erfolgreiche, elektrostatische Ausrichtung. Dadurch bleibt eine manuelle Nachkorrektur erspart.

Die Elektrodengeometrie nimmt Einfluss auf die manuelle Grobpositionierung und auf die elektrostatische Feinpositionierung der Bauteile. Mit jeweils größerer Elektrodenkante und größerem Abstand zwischen den Elektroden haben die Bauteile nach ihrem Platzieren auf den Klebstofffilm eine höhere Wahrscheinlichkeit sich innerhalb der Toleranzgrenzen für eine erfolgreiche, elektrostatische Ausrichtung zu befinden. Bei elektrostatischer Ausrichtung der Bauteile nimmt die Positioniergenauigkeit mit größerer Elektrodenkantenlänge und größerem Abstand zwischen den Elektroden linear zu. Ein Zusammenhang zwischen der Elektrodengeometrie und der Positioniergenauigkeit konnte bei Montagen mit den asymmetrischen Elektrodenstrukturen nicht festgestellt werden. Diese weisen durchschnittlich höhere laterale Ausrichtungsfehler, als Montagen mit symmetrischen Elektrodenstrukturen auf. Es lassen sich daher Rückschlüsse ziehen, dass die Ausbildung eines asymmetrischen, elektrischen Feldes die elektrostatische Ausrichtung und damit die Positioniergenauigkeit der Bauteile benachteiligt.

Die Wahl des Klebstoffs ist beim Self-Assembly-Prozess ein entscheidendes Kriterium, ob und wie genau eine Ausrichtung der Bauteile vorgenommen werden kann. Der Klebstoff muss ein Gleitlager zwischen Bauteil und Substrat schaffen, um die Reibungskräfte zu minimieren, damit das Bauteil überhaupt durch die schwachen, elektrostatischen Kräfte ausgerichtet werden kann. Hierbei spielt die Viskosität eine wichtige Rolle. Mit höherer Viskosität nimmt die Kraft, die notwendig ist um das Bauteil präzise auszurichten, zu. Dadurch konnten Montagen mit einem Klebstoff höherer

Viskosität erst ab höheren Ausrichtungsspannungen durchgeführt werden. Die höhere Viskosität des Klebstoffs hat auch einen größeren lateralen Ausrichtungsfehler von Bauteilen zur Folge. Allein ein niederviskoser Klebstoff ist jedoch keine hinreichende Bedingung für eine erfolgreiche Ausrichtung. Trotz niedriger Viskosität konnte die elektrostatische Ausrichtung der Bauteile mit einigen Klebstoffen nicht erfolgen. Eine Vermutung für die Inkompatibilität dieser Klebstoffe ist, dass Inhaltsstoffe der Kleber eine korrekte Ausbildung des elektrischen Feldes unterbinden und damit eine Ausrichtung verhindert wird. Ein weiterer Grund könnte sein, dass ihre Oberflächenspannung nicht dazu ausgereicht hat, um das Bauteil auf der Klebstoffoberfläche zu lagern, sodass sich das notwendige Gleitlager für eine Bauteilbewegung nicht ausbilden konnte.

Ein weiterer entscheidender Einfluss auf den resultierenden, lateralen Ausrichtungsfehler der Bauteile nach Montage ist der Kleberschrumpf bei UV-Härtung. Dieser führt dazu, dass Bauteile nach der Klebstoffhärtung in vertikaler und lateraler Richtung verschoben werden. Diese Verschiebung der Bauteile tritt in der Größenordnung vom lateralen Ausrichtungsfehler durch die Elektrostatik auf und kann letztlich eine präzise Ausrichtung der Bauteile verhindern. Die Verschiebung ist abhängig vom verwendeten Klebstoff, von der Belichtungsart und der Belichtungsrichtung. Eine Belichtung mit Diffusor Aufsatz vor der UV-LED konnte die Verschiebung der Bauteile durch die Klebstoffhärtung sowohl in vertikaler als auch in lateraler Richtung erheblich reduzieren.

Montagen mit Bauteilen aus Silizium weisen in Kombination mit einem Substrat aus Pyrex einen lateralen Ausrichtungsfehler von  $< 3 \mu\text{m}$  und in Kombination mit einem Substrat aus Silizium einen Fehler von  $< 5 \mu\text{m}$  auf. Beide Werte sind höher, als bei Montagen mit Bauteilen aus Pyrex. Es wird vermutet, dass die elektrische Leitfähigkeit des Siliziums einen negativen Einfluss auf die Ausbildung des elektrostatischen Feldes zur Folge hat und dadurch die Positioniergenauigkeit benachteiligt.

Die Charakterisierung des Self-Assembly-Prozesses beläuft sich in dieser Arbeit hauptsächlich anhand von Montagen mit gleich großen Bauteilen aus Borosilikatglas. Eine Übertragung der Elektroden auf reale Bauteile, wie z.B. Dünnschichttransistoren oder OLEDs, und ihre anschließende Ausrichtung sollte zwar problemlos möglich sein, muss aber noch getestet werden. Weiterhin muss die Ausrichtungsfähigkeit kleinerer Bauteile getestet werden, um die minimale Bauteilgröße zu ermitteln mit der ein Self-Assembly-Prozess erfolgreich durchführbar ist. Es ist vorstellbar, dass bei kleineren Bauteilflächen höhere Kapillarkräfte auf das Bauteil wirken und damit eine erfolgreiche Ausrichtung erschweren.

Ein aus industrieller Sichtweise interessanter Aspekt ist die elektrische Kontaktierung der Bauteile parallel zu ihrer Ausrichtung. Dadurch ist es möglich die Bauteile direkt nach ihrer Ausrichtung elektrisch anzusteuern bzw. zu betreiben. Eine externe, elektrische Kontaktierung, z.B. durch Drahtbonden, wäre somit nicht notwendig. Dies würde die Produktionszeiten verkürzen, die Kosten senken und mehr Platz für weitere Bauteile schaffen.

Weiterhin müssen die gewonnenen Erkenntnisse über die Grenzen und Wirkungsweise der Ausrichtungskräfte auf den Prozess dazu genutzt werden, um den Self-Assembly-Prozess zu modellieren und zu optimieren. Dennoch ist die Selbstpositionierung von Bauteilen mit den in dieser Arbeit vorgestellten Parametern möglich und einsatzbereit.

Für eine eindrucksvolle Vorführung des entwickelten Self-Assembly Prozesses bitte folgende Videos in einem Internet-Browser aufrufen:

Deutsche Version: [http://youtu.be/5mr1\\_oPvX9s](http://youtu.be/5mr1_oPvX9s) (Dauer 1:25)

English version: <http://youtu.be/SlqNgOIHfvg> (Duration 1:18)

## 7 Literatur

- [1] A. Winkleman, B. D. Gates, L.S. McCarty, G. M. Whitesides GM. Directed self-assembly of spherical particles on patterned electrodes by an applied electric field. Technical Paper in Advanced Materials, Bd. 17 (2005) Nr. 12, S. 1507-1511.
- [2] J. Wilde, J. Dalin, J. Ruhe, M. Biesalski, P. Samyn, Klebprozesse mit Nanopads fur die Mikro-Nano-Integration – Akronym: Nanopad. Abschlussbericht BMBF-Forschungsvorhaben:16SV3552, PT-VDI/VDE
- [3] B.A. Parviz, D. Ryan, G. M. Whitesides, Using self-assembly for the fabrication of nano-scale electronic and photonic devices, IEEE Trans. Advanced Packaging, Bd. 26 (2003) Nr.3, S. 233-241.
- [4] C.D. Nordquist et.al. An electro-fluidic assembly technique for integration of III-V devices onto silicon, IEEE Int. Symp. on Compound Semiconductors 2000, S. 137-142.
- [5] U. Srinivasan, M. A. Helmbrecht, C. Rembe, R. S. Muller, R. T. Howe, Fluidic self-assembly of micromirrors onto microactuators using capillary forces. IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Bd. 8 (2002) Nr. 1, S. 4-11.
- [6] U. Srinivasan, D. Liepmann, R. T. Howe, Microstructure to substrate self-assembly using capillary forces, IEEE J. Microelectromechanical Systems, Bd. 10 (2001) Nr. 1, S. 17-24.
- [7] T. D. Clark, R. Ferrigno, J. Tien, K. E. Paul, G. M. Whitesides, Template-directed self-assembly of 10-micron-sized hexagonal plates, J. American Chemical Soc. 124, 2002, S. 5419- 5426.
- [8] Jiandong Fang, Kerwin Wang, Karl F. Bohringer, Self-Assembly of PZT actuators for micro pumps with high process repeatability, ASME/IEEE J. Microelectromechanical Systems 15 (4), August 2006, S. 871-878.
- [9] H. O. Jacobs, A. R. Tao, A. Schwarz, D. H. Gracias, G. M. Whiteside, Fabrication of a cylindrical display by patterned assembly, Science 296 (2002) S. 323-325.
- [10] T. D. Clark, et al., Self-Assembly of 10 um-sized objects into ordered three-dimensional arrays, J. American Chemical Society 123, 2001, S. 7677-7682.
- [11] K. Bohringer, M. Cohn, K. Goldberg, R. Howe, A. Pisano, Parallel microassembly with electrostatic force fields, In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Leuven, Belgium, Mai, 1998.
- [12] C. D. Nordquist, P. A. Smith, T. S. Mayer, An electro-fluidic assembly technique for integration of III-V devices onto silicon, Compound Semiconductors, 2000 IEEE International Symposium on, S. 137-142.
- [13] T. S. Mayer, T. N. Jackson, C. D. Nordquist, Electro-fluidic assembly process for integration of electronic devices onto a substrate, US Patent 6 687 987 B2, 10 February, 2004.
- [14] John S. Smith, High density, low parasitic direct integration, Electron Devices Meeting, 2000, IEDM Technical Digest. International, S. 201-204.
- [15] J. Fang, Self-Assembly techniques for massively parallel packaging of MEMS devices, Dissertation, Seattle, 2006.
- [16] J. Fang, K. F. Bohringer, Vertical and horizontal parallel mounting of micro components on a substrate with high surface coverage, IEEE MEMS Conf., Istanbul, 22-26 January, 2006.
- [17] K. F. Bohringer, Engineered self-assembly from nano to milli scales, 4M Network of Excellence Conference: Multi-Material Micro Manufacture, Cardiff, September 2008. S. 28-31.
- [18] V. S., Q. Zhou, H. N. Koivo, Hybrid microhandling: a unified view of robotic handling and self-assembly, J. Micro-Nano Mech. 4, 2008, S. 5–16.
- [19] J. Lienemann, A. Greiner, J. G. Korvink, X. Xiong, Y. Hanein, K. F. Bohringer, Modelling, simulation and experimentation of a promising new packaging technology – parallel fluidic self-assembly of micro devices, Sensors Update 13, Wiley-VCH Verlag, 2004, S. 3-43.
- [20] P. Samyn, J. Ruhe , M. Biesalski, Polymerizable biomimetic vesicles with controlled local presentation of adhesive functional DOPA groups. Langmuir, 2010, S. 8573-8581.
- [21] J. Dalin, J. Wilde, P. Lazarou und N. Aspragathos, Self-Assembly of dies through electrostatic attraction: modelling of alignment forces and kinematics, Journal of Micro-Nano Mechatronics, Vol. 6, 2011, Nr. 1-2, S. 23-31
- [22] J. Dalin, J. Wilde, A. Zulfiqar, P. Lazarou, A. Synodinos, N. Aspragathos, Electrostatic attraction and surface-tension-driven forces for accurate self-assembly of parts, Microelectronic Engineering, Vol. 87, Issue 2, February 2010, S. 159 – 162
- [23] J. Dalin, J. Wilde, Self-assembly of micro-parts using electrostatic forces and surface tension, 59th ECTC, San Diego, California, USA, 26 May - 29 May 2009, S. 1517 – 1524
- [24] T. Wohner, Selbstjustierung von Bauteilen, Bachelorarbeit, Universitat Freiburg, 2009