

# Simulation von Integrierten Aktoren für Elektrostatische Self-Assembly

## Simulation of Integrated Actuators for Electrostatic Self-Assembly

Dipl.-Ing Martin Stucki; Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz, Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik, 30823 Garbsen, Deutschland, stucki@match.uni-hannover.de

### Kurzfassung

Die Montage ist ein Kostentreiber in der Produktion, insbesondere wenn die Anforderungen an die Präzision steigen. Ein Ansatz für die kostengünstige Feinpositionierung von planaren Bauteilen ist die elektrostatische Self-Assembly, bei dem Aktoren in die Bauteile integriert werden. In diesem Artikel werden die Grundlagen des Designs solcher Systeme thematisiert, da diese ausschlaggebend für die resultierenden Positionierkräfte sind. Zum Feststellen der Zusammenhänge werden Simulationen für einzelne Elektrodenpaare durchgeführt, wobei die Geometrien Kreis, Quadrat, Rechteck, Sechseck und Dreieck miteinander verglichen werden. Die Auswertung erfolgt mit der simulierten Maximalkraft und der Kraftverteilung innerhalb der xy-Ebene. In Hinblick auf die Prozessgrößen Präzision und maximalen Wirkbereich werden die Ergebnisse interpretiert und Rückschlüsse auf die sinnvolle Gestaltung von Self-Assembly Systemen gezogen. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf weitere Forschungen zu elektrostatischen Self-Assembly Systemen.

### Abstract

Assembly is a high-cost process in production, especially when the precision requirements are high. One approach for cost-effective fine positioning of planar components is electrostatic self-assembly. Therefore, actuators are integrated into the components. This paper deals with the fundamental design principles of such systems, because they are significantly influencing the alignment force. This paper presents simulations of individual electrode pairs, comparing the geometries circle, square, rectangle, hexagon and triangle. The evaluation shows the results of the simulated maximum force and the force distribution within the xy-plane. Aiming for high precision and a wide range of force distribution, conclusions are made about the appropriate design of self-assembly systems. In conclusion, there is an outlook on additional research into electrostatic self-assembly systems.

## 1 Einleitung

In der Präzisionsmontage steigen die Kosten rapide an, wenn eine hohe Montagegenauigkeit gefordert wird ( $<15\mu\text{m}$ ). Dabei kommen spezialisierte Roboter mit hoher Wiederholgenauigkeit zum Einsatz, jedoch sind diese Anlagen kostenintensiv und in Relation zu anderen Fertigungssystemen sehr langsam. Eine Möglichkeit der präzisen Positionierung ist die Integration von Mikroaktoren in die Baugruppen, welche in einem geringen Wirkungsbereich hohe Genauigkeiten erreichen. Dafür ist zunächst eine Vorpositionierung notwendig, für die standardisierten Robotertechnik eingesetzt werden kann, sofern die Positioniergenauigkeit im Wirkbereich der integrierten Aktoren liegt. Dabei wird zwischen leitfähigen Strukturen auf Substrat und Bauteil ein elektrisches Feld aufgebaut. Dabei treten Anziehungskräfte auf, die eine Relativbewegung hervorrufen. Die Funktionsweise wird in Kapitel 2 eingehender erläutert. Das Konzept wurde in den 1990er Jahren erstmals für Mikrobauteile (MEMS) vorgestellt und unter dem Stichwort „elektrostatische Self-Assembly“ veröffentlicht. Zwischen 2005 und 2015 wurde es durch eine Forschergruppe des IMTEK der Universität Freiburg erforscht [1]. Das am IMTEK verfolgte Konzept war für die separate

Ausrichtung kleiner Bauteile ( $< 5 \text{ mm}$ ) ausgelegt [2]. Am Institut für Montagetechnik wurden die elektrostatische Self-Assembly für einen batchfähigen Prozess adaptiert. Dabei wurden Glasbauteile mit einer Größe von 125 mm im Submikrometerbereich positioniert [3-4].

Zahlreiche Prozessparameter, wie die angelegte Spannung, beeinflussen die erreichbare Genauigkeit und das Systemverhalten. Ebenso ausschlaggebend ist das Strukturdesign der leitfähigen Strukturen – das Strukturdesign. Es hat viele Freiheiten, die im Kapitel 2.2. genauer beschrieben werden. Unter anderem umfasst es die geometrische Gestaltung der zum Aufbau des elektrischen Feldes genutzten Flächen (Elektrodenpads). Für eine Vielzahl dieser Freiheiten sind die Einflüsse auf das Gesamtsystem noch unzureichend erforscht, deswegen soll in diesem Beitrag erläutert werden, welchen Einfluss die Geometrie dieser Flächen auf die auftretenden Kräfte in einem Self-Assembly System hat. Auf Basis der Ergebnisse kann eine Interpretation in Hinblick auf ein zielgerichtetes Strukturdesign stattfinden. Dafür werden für mehrere Geometrien von Elektrodenpads Simulationen mit der Software ANSYS Electronics Desktop (2020b) durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse der Simulation sind im Kapitel 3 aufgeführt. Die Ergebnisse sollen als Basis für die Auslegung von elektrostatischen Self-Assembly System dienen.

## 2 Elektrostatische Self-Assembly

Bei der Technik werden zwei planare Bauteile durch elektrostatische Anziehung präzise zueinander ausgerichtet, wobei nur eine Komponente (das Substrat) aktiv mit einer Spannung versorgt wird. Auf dem Substrat und dem Bauteil werden elektrisch leitfähige Strukturen aufgebracht, beispielsweise durch Lithographieprozesse. Diese Strukturen bestehen aus Leiterbahnen und aktiven Flächen, welche im Folgenden Elektrodenpads genannt werden. Zwischen dem Substrat und Bauteil wird ein flüssiges Medium aufgetragen, welches als Isolator und Dielektrikum dient [1]. Zwei gegenüberliegende Elektrodenpads bilden ein Elektrodenpaar, wie es in Bild 1 skizziert ist. Durch eine am Substrat angelegte Spannung laden sich die Elektrodenpads am Substrat mit unterschiedlicher Polarität auf. Aufgrund der Coulombkraft kommt es auch im Bauteil zu einer Ladungsverschiebung mit umgekehrter Polarität. Die gegensätzlich geladenen Elektrodenpads bilden einen Plattenkondensator und ziehen sich durch die elektrostatische Kraft gegenseitig an. Diese Kraft wirkt in transversaler (z) und lateraler Richtung (x-y). Die Ausrichtungskraft  $F_{al}$  ist das Ergebnis der Querkräfte, die zu einer Bewegung in der x-y-Ebene führt. Die Strukturen auf den Komponenten erzeugen bei Spannung die Ausrichtekraft und dienen somit als elektrostatische Mikroaktoren, die in die Bauteile integriert sind. Damit sind keine zusätzlichen externen Handhabungsgeräte für die Positionierung mehr notwendig. Aus dieser Eigenschaft leitet sich der Begriff Self-Assembly ab.

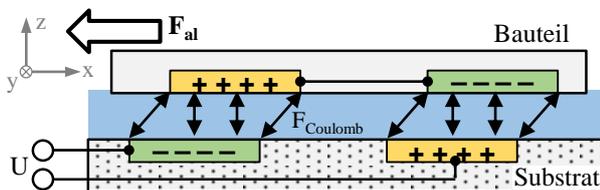


Bild 1 Konzept elektrostatischer Self-Assembly

### 2.1 Einflussgrößen

Die Self-Assembly Technik wird zur Ausrichtung von Bauteilen verwendet. Daraus leiten sich zwei wichtige Kriterien zur Prozessbeurteilung ab; die Geschwindigkeit und die Positioniergenauigkeit. Diese Größen können durch einstellbare Prozessparameter beeinflusst werden. Die wichtigste Größe ist die angelegte Spannung  $U$ , denn sie steht in direktem Verhältnis mit der Ladungsmenge und somit auch mit den auftretenden Kräften zwischen einem Elektrodenpaar [5]. Jedoch ist die Höhe der Spannung limitiert, vor allem durch die Durchschlagfestigkeit des Trennmediums. DALIN und WILDE entdeckten, dass die Ausrichtung mit Wechselstrom besser funktioniert als mit Gleichstrom und vermuteten, dass dies auf Hafteffekte zwischen den Komponenten zurückzuführen ist [6]. Daraus ergibt sich, dass auch die Modulation der Spannung Einfluss auf den Prozess hat, was in einigen Untersuchungen bereits nachgewiesen wurde [4]. Weitere Parameter sind die Viskosität und Dielektrizität des Trennmediums sowie

die elektrische Leitfähigkeit der Strukturen [7]. Diese lassen sich nur bedingt beeinflussen, weil die Anzahl der verfügbaren Materialien begrenzt ist.

Das Design der Self-Assembly Strukturen hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die im System wirkenden Kräfte. Dieses bietet eine hohe Gestaltungsfreiheit und ist vor allem durch die Ebene begrenzt. Die Freiheiten bestehen unter anderem in der geometrischen Ausgestaltung der Elektrodenpads. Die Geometrie der Pads bestimmt, wie die Ausrichtekraft bei einer Veränderung der Bauteilposition wirkt. Dabei ergeben sich zwei Zielgrößen für die Ausrichtekraft: Zum einen soll eine möglichst hohe Maximalkraft erreicht werden, damit Reibungen im System überwunden werden können und der Prozess schnell und stabil abläuft. Zum anderen soll der Kraft-Wirkbereich eines Elektrodenpads möglichst groß sein, um die Anforderungen an die Vorpositionierung zu reduzieren, was günstigere Prozesse ermöglicht. Die Zusammenhänge, wie sich die Kraft im Wirkbereich eines Elektrodenpads verändert, sind bisher noch nicht ausreichend erforscht und deswegen Gegenstand dieses Artikels.

### 2.2 Strukturdesign

Das Strukturdesign ist der erste und wichtigste Schritt bei der Gestaltung eines elektrostatischen Self-Assembly Prozesses. Dieser lässt sich in drei Schritte unterteilen: Der Auslegung der geometrischen Gestaltung der Elektrodenpads, der Anordnung der Pads und der Verschaltung [3]. Bild 2 veranschaulicht die unterschiedlichen Freiheiten in dieser Designphase.

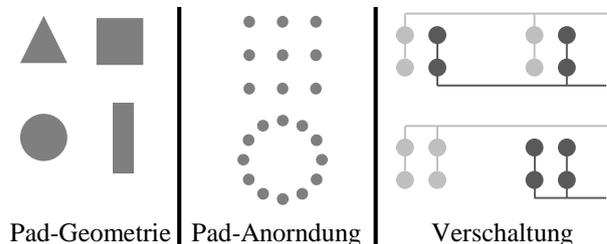


Bild 2 Schritte des Strukturdesigns

Es ist möglich, die Strukturen entweder für Einzelelemente auszulegen, beispielsweise für bereits vereinzelte Computerchips. Alternativ können komplette Substrate (Wafer) aus der Mikroproduktion zuerst ausgerichtet, fixiert und dann vereinzelt werden. Dies eignet sich unter anderem für Systeme, die aus optischen und elektrischen Baugruppen bestehen, welche auf Wafern oder Glas gefertigt werden. Die Funktionalität der elektrostatischen Self-Assembly für Glassubstrate mit  $>120$  mm Kantenlänge wurde bereits nachgewiesen [3].

Bei Strukturdesign muss die Vereinbarkeit des Self-Assembly Prozesses mit der Montage im Vordergrund stehen. Das heißt, dass auf Substrat und Bauteil die Self-Assembly Strukturen um die eigentlichen Komponenten herum angeordnet werden müssen und Leiterbahnen die Funktion nicht beeinflussen. Bei der Ausrichtung von Wafern bietet sich dafür eine Positionierung der Strukturen am Rand des

Wafers an, sodass die Fläche für Mikrochips oder andere Komponenten genutzt werden kann. Bild 3 zeigt eine ringförmig angeordnete Self-Assembly Struktur mit kreisförmigen Elektrodenpads, die alternierend geschaltet sind. Durch die Anordnung der Pads bleibt mittig eine freie Fläche für die auszurichtende Komponente frei, die in diesem Beispiel idealerweise quadratisch ist.

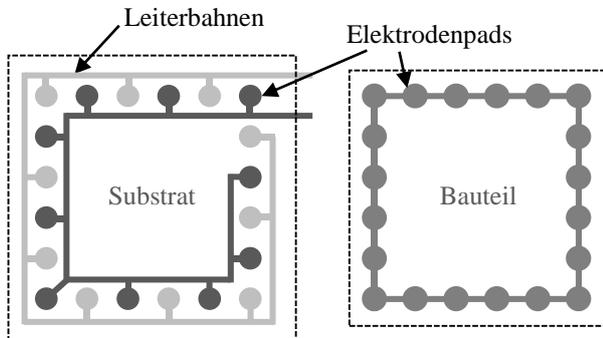


Bild 3 Exemplarisches Strukturdesign

### 3 Simulation von Elektrodenpads in ANSYS

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, wirkt sich die Geometrie der Elektrodenpads auf die Ausrichtekraft aus. Um die Zusammenhänge zu verstehen, werden in diesem Beitrag fünf unterschiedliche Pad-Geometrien simuliert: Quadrat, Rechteck, Kreis, Sechseck (gleichseitig) und Dreieck (gleichseitig). Um die Vergleichbarkeit untereinander herzustellen, wurden die Maße so gewählt, dass die aktive Fläche konstant  $1 \text{ mm}^2$  beträgt. Die geometrischen Maße sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Simulation wurden die Elektrodenpads mit ANSYS Electronics Desktop (2020b) modelliert. Übliche Struktur厚ken in der Lithographie betragen  $100 \text{ nm}$ , können also als ideal flach angenommen werden. Beim Versuch diese Geometrie in der Simulationsumgebung umzusetzen, kam es vermehrt zu Rechenfehlern, was auf den Meshing-Algorithmus zurückzuführen ist, der in diesen geringen Dimensionen unzureichende Netze generiert. Aufgrund dessen wurde die Dicke der Elektrodenpads in der Simulation auf  $0,1 \text{ mm}$  festgelegt.

Tabelle 1 Maße und Fläche der Pad-Geometrie

Geometrie	Maße	Fläche
Quadrat	$a = 1 \text{ mm}$	$1 \text{ mm}^2$
Rechteck	$a = 1,5625 \text{ mm}; b = 0,64 \text{ mm}$	$1 \text{ mm}^2$
Kreis	$r = \sqrt{\frac{1}{\pi}} \text{ mm}$	$1 \text{ mm}^2$
Sechseck	$S1 \dots S6 = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3}}} \text{ mm}$	$1 \text{ mm}^2$
Dreieck	$S1 \dots S3 = \sqrt{\frac{4}{\sqrt{3}}} \text{ mm}$	$1 \text{ mm}^2$

In der Simulation werden zwei der Elektrodenpads mit einem transversalen Abstand ( $z$ ) von  $80 \text{ }\mu\text{m}$  platziert. Dieser Wert basiert auf Messungen von zuvor veröffentlichten Messungen am realen Self-Assembly System [3]. Das Material der leitenden Strukturen ist Chrom; als Medium zwischen

den Elektroden wird Luft angenommen. Da die errechnete Kraft mit der Dielektrizität linear skaliert, ist eine vergleichende Auswertung davon unabhängig. Die beiden Elektrodenpads werden mit einer Spannungsdifferenz von  $300 \text{ V}$  belegt. In der Simulation wird eines der Elektrodenpads in einem Raster von  $50 \text{ }\mu\text{m}$  innerhalb der  $xy$ -Ebenen verschoben. Für jeden Punkt wird dabei die Kraft simuliert, die auf das Zentrum des Elektrodenpads wirkt. Daraus ergibt sich ein Kraftvektorfeld für jede der Pad-Geometrien. Zur besseren Vergleichbarkeit, und weil die absolut ermittelten Kräfte von dem Medium abhängen, werden hier die Ergebnisse normiert dargestellt. Die Normierungsbasis ist  $6,48 \text{ }\mu\text{N}$  und ergibt sich aus der maximal errechneten Kraft, die bei der Verschiebung entlang einer Achse für das Quadrat erreicht wird ( $\Delta x = 800 \text{ }\mu\text{m}$ ). Das Quadrat wird als Referenz gewählt, da die Flächenberechnung am einfachsten nachzuvollziehen und die Geometrie zu beiden Achsen symmetrisch ist.

#### 3.1 Bewegung auf einer Linearachse

Zunächst wird die Bewegung entlang der beiden Hauptachsen  $x$  und  $y$  betrachtet. Das Quadrat und Kreis sind entlang dieser Achsen symmetrisch. Die Lage der Geometrie Dreieck, Sechseck und Rechteck zum verwendeten Koordinatensystem sind in Bild 4 dargestellt.

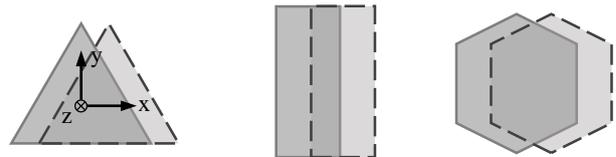
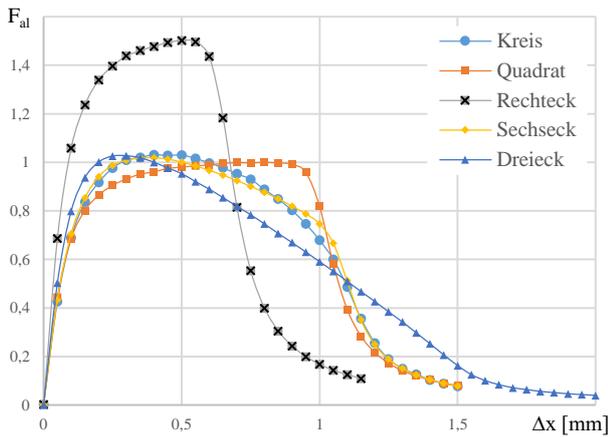


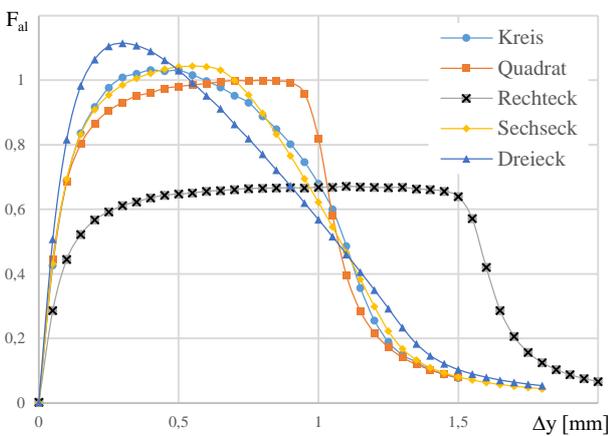
Bild 4 Lage der Geometrien zum Koordinatensystem

Die Kraftverläufe haben bei allen Geometrien zwei gemeinsame Merkmale. Bei einer vollständigen Überdeckung (Position  $[0 | 0]$ ) besteht keine Kraft in der  $xy$ -Ebene. Die Simulation gibt hier einen errechneten Wert im Bereich der Rundungsfehler  $10^{-3} \text{ }\mu\text{N}$  aus. Mit einer Verschiebung entlang steigt die Ausrichtekraft  $F_{ai}$  an und erreicht ein Maximum. Bei einer weiteren Verschiebung verringert sich die Kraft wieder und nähert sich asymptotisch dem Nullwert an. Die Verläufe unterscheiden sich stark zwischen den Strukturen. Bild 5 und Bild 6 zeigen Diagramme der simulierten Kräfte bei einer Bewegung entlang der Achsen. Aufgrund der beidseitigen Symmetrie sind die Kraftverläufe für Kreis und Quadrat entlang der  $x$ - und  $y$ -Achse identisch.

Unterschiede zwischen den Geometrien bestehen zum einen in der Steigung der Kraftverläufe, zum anderen in der gleichmäßigen Kraftverteilung über die Bewegung und in der Maximal erreichten Kraft. Mit Ausnahme des Rechtecks weisen alle Geometrien eine ähnliche Maximalkraft auf und variieren im Bereich  $+3\%$  ( $x$ -Achse) und  $+13\%$  ( $y$ -Achse). Der Hauptunterschied besteht in der Verteilung der Kraft, also in der Positionsabweichung  $\Delta P$ , an welcher diese Maximalkraft erreicht wird.



**Bild 5** Abstand-Kraft-Diagramm x-Richtung



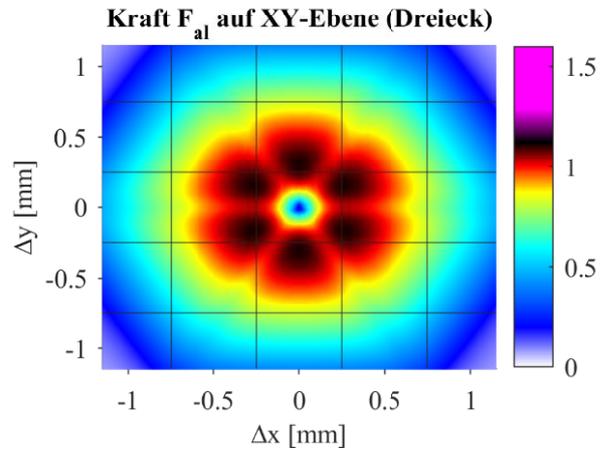
**Bild 6** Abstand-Kraft-Diagramm y-Richtung

Größere Abweichungen zeigen sich beim Rechteck gegenüber den anderen Strukturen. Bei der Bewegung in x-Richtung erreicht die rechteckige Struktur eine mit dem Faktor 1,5 höhere Kräfte als die Referenzgeometrie (Quadrat). Das Kraftmaximum beim Quadrat liegt bei  $\Delta x = 0,8$  mm vor, beim Rechteck bei  $\Delta x = 0,5$  mm. Betrachtet man die Flächenüberschneidung der beiden Strukturen an diesen Punkten, lässt sich eine Korrelation feststellen. Die Änderung der Fläche beträgt Geometriehöhe multipliziert mit  $\Delta x$ . Entsprechend ergibt sich bei den Geometrien das Maximum bei einer Überschneidung von 20% (Quadrat) und 22% (Rechteck).

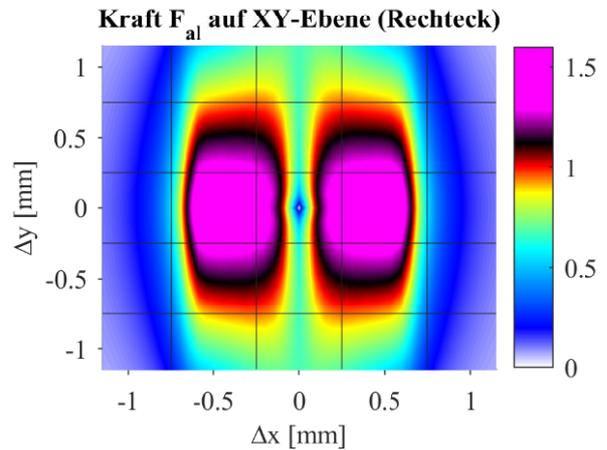
### 3.2 Kraftfelder der asymmetrischen Geometrien

Für das Dreieck, Rechteck und Sechseck sind auf den Bildern 7 bis 9 die simulierten Kräfte über die XY-Ebene aufgetragen. Das Dreieck zeigt eine sechseckige Kraftverteilung in der Ebene, entsprechend der Symmetrieachsen. Entlang der winkelteilenden Achsen werden im Bereich 0,2 – 0,3 mm höhere Kräfte erreicht, als entlang anderen Achsen. Im Vergleich zum Sechseck ist die Kraftverteilung zentrierter, das heißt, dass bei geringer Positionsänderung größere Kräfte auftreten. Das Sechseck hingegen hat dafür eine konstantere Kraftverteilung im gesamten Wirkungsbereich. Dabei zeigt sich auch beim Sechseck die asymmetrische Struktur, vornehmlich jedoch im Nahfeld.

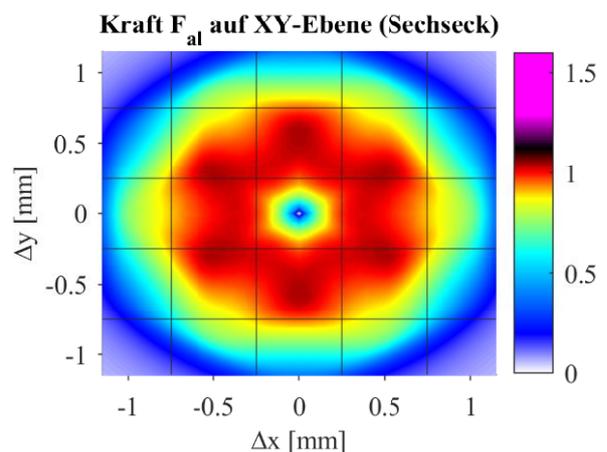
Das Rechteck hat eine stark inhomogene Kraftverteilung. Entlang der x-Achse werden deutlich höhere Kräfte erreicht, als entlang der y-Achse, was die Daten aus den Bildern 5 und 6 ebenso widerspiegeln.



**Bild 7** Kraftverteilung Dreieck



**Bild 8** Kraftverteilung Rechteck



**Bild 9** Kraftverteilung Sechseck

## 4 Interpretation für die Auslegung von Self-Assembly Strukturen

Die Kurvenverläufe zeigen, dass die Kraft davon abhängt, in welchem Maße eine Flächenänderung bei der Bewegung stattfindet. Eindeutig wird dies durch die richtungsabhängigen Kraftverläufe von Rechteck und Dreieck. Das Rechteck weist in der Bewegung über die x-Achse eine 1,56-fache Flächenänderung auf, als das Quadrat, was ebenfalls dem Faktor der Maximalkraft entspricht (Faktor 1,5). In y-Richtung beträgt der Faktor 0,64 und korreliert ebenfalls mit der Maximalkraft für das Rechteck (Faktor 0,67). An dieser Stelle ist also eine Vergleichbarkeit für die beiden Rechtecke gegeben und die Katenlänge ist der ausschlaggebende Faktor, über welche die Bewegung stattfindet.

Um Rückschlüsse aus den Ergebnissen für die Auslegung von Self-Assembly Strukturen zu ziehen, werden die Zielgrößen aus Kapitel 2.1 als Evaluationsbasis genommen. Für eine präzise Ausrichtung im Mikrometerbereich ist es relevant, dass möglichst hohe Kräfte auch im Bereich der Soll-Position erreicht werden (also bei kleinen Auslenkungen). Dem entgegen steht die Zielgröße, möglichst große Bewegungen auszuführen. Dafür ist ein möglichst gleichmäßiges und vor allem weit gefasster Wirkbereich notwendig.

Die Simulationen belegen, dass über die Geometrie der Elektrodenpads auf die Kraftverteilung Einfluss genommen werden kann. Jedoch sind die Zielgrößen Maximalkraft und Wirkbereich nur gegenläufig erreichbar, wenn die aktive Fläche konstant gehalten wird. Die im elektrischen Feld gespeicherte Energie ist bei allen Geometrien gleich groß, weil die angelegte Spannung und Elektrodenoberfläche identisch ist. Sie entspricht dabei der Arbeit, die aufgewendet wird, um die Ladungen voneinander zu trennen. In Bild 5 und 6 ist diese Arbeit als Fläche unter den Graphen zu interpretieren. Die Wahl der Geometrie kann also nicht die Gesamtenergie beeinflussen, sondern nur das Verhältnis von Kraft zur Positionsabweichung, repräsentiert in der Steigung der Kraft-Weg-Kurve. Somit ist es möglich der Bewegung in der Ebene eine Vorzugsrichtung zu geben.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden Simulation von Elektrodenpads für integrierte Aktoren bei der elektrostatischen Self-Assembly durchgeführt und die Ergebnisse vorgestellt. Die Vergleichbarkeit wurde dabei durch die Wahl einer einheitlichen Spannung und Oberfläche gewährleistet (vergleiche Tabelle 1). Die höchsten Kräfte erreichte in der Simulation eine rechteckige Geometrie, die über ihre längere Seite bewegt wird. Gleichzeitig erreicht diese Geometrie deutlich geringere Kräfte, bei der Bewegung über ihre kurze Seite. Die Simulationen der anderen Geometrien (Dreieck, Sechseck, Kreis und Quadrat) zeigen, dass die Maximalkraft von der Flächenänderung abhängt, die bei einer Bewegung stattfindet. Somit sind auch die Kraftverläufe innerhalb der xy-Ebene inhomogen, wobei die Zielgrößen Maximalkraft und Wirkbereich gegenläufig sind.

Durch die Wahl der Geometrie der Elektrodenpads kann beim Strukturdesign Einfluss auf die Vorzugsrichtung des Systems genommen werden. Um diesen Sachverhalt genauer zu untersuchen, werden in kommenden Forschungen Simulationen von mehreren Elektrodenpads vorgenommen. Dabei ergeben sich größere Freiheiten in der Gestaltung von elektrostatischen Self-Assembly Systemen, wie der Abstand der Elektroden zueinander sowie die Verschaltung untereinander. In den Simulationen soll nicht nur eine Vorzugsrichtung berechnet werden, sondern es wird auch die Beeinflussung der Kraftfelder von zwei aneinandergrenzenden Elektroden berücksichtigt. Durch die Interpretation der Ergebnisse lassen sich Rückschlüsse vom Design auf die Kraftwirkung ziehen und somit in künftigen Entwicklungsschritten elektrostatische Self-Assembly Systeme effizienter gestalten.

## 6 Literatur und Danksagung

Diese Forschung wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder innerhalb des Exzellenzclusters PhoenixD (EXC 2122, Projekt-ID 390833453).

- [1] Tondorf, M., Wilde, J., 2015. *Elektrostatische und fluidische Self-Assembly-Prozesse für die präzise Montage von Mikrosystemen*: Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, Freiburg. doi:10.2314/GBV:832344648
- [2] Dalin, J.; Wilde, J.; Zulfiqar, A.; Lazarou, P.; Synodinos, A.; Aspragathos, N., 2010. *Electrostatic attraction and surface-tension-driven forces for accurate self-assembly of microparts*. In: *Microelectronic Engineering* 87-2.P 159-162.
- [3] Stucki, M; Schumann, C. Raatz, A; *Electrostatic Self-Assembly Technique for Parallel Precision Alignment of Optical Devices*. Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021), <https://doi.org/10.15488/11255>
- [4] Stucki, M; Schumann, C. Raatz, A; *Alignment Process for Glass Substrates Using Electrostatic Self-Assembly*. WGP Jahreskongress 2021 (2022), Springer International Publishing, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78424-9\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78424-9_50)
- [5] Dalin, J.; Wilde, J.; Synodinos, Aris; Lazarou, Panagiotis; Aspragathos, Nikos (2008): *Concept for Fluidic Self-Assembly of Micro-Parts Using Electrostatic Forces*. In: 4M Conference 2008, Cardiff UK.
- [6] Dalin, J., Wilde, J.: *Self-assembly of micro-parts using electrostatic forces and surface tension*. In: 59th Electronic Components and Technology Conference, (2009)
- [7] Tondorf, M.; Gan, Y.; Mouselimis, K.; Wilde, J. (2014): *Elektrostatisch-fluidische Selbstassemblierung für die hochgenaue Mikro-Montage von MEMS*. In: *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten DVS Berichte*, S. 46-51.