

Optimierung der Geometrie eines BIZEPS-Mikroschwellwertschalters zur Messung der relativen Feuchte

C. Bellmann¹, R. Sarwar², A. Steinke³, T. Frank³, H. F. Schlaak² und G. Gerlach¹

¹Technische Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik; D-01069 Dresden

²Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, D 64283 Darmstadt

³CIS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH, Erfurt

Abstract

Zur Überwachung der relativen Luftfeuchtigkeit wird ein neuartiger Ansatz für einen leistungslosen feuchtesensitiven Mikroschalter verfolgt. Dieser basiert auf der BIZEPS-Plattform (Binary Zero-Power Sensor) und ermöglicht eine Reduzierung der Systemkomplexität. Die Energie zum mechanischen Schalten wird aus der Messgröße, der relativen Luftfeuchtigkeit, direkt gewonnen. Das Verhalten des Schalters wird durch die feuchtesensitive Volumenquellung einer Polymerschicht als sensitives Element erreicht, welche in Folge eine mechanisch verformbare Siliziumplatte mit biegesteifem Zentrum auslenkt und somit einen elektrischen Kontakt schließt. Für den vorgestellten Mikroschalter wird eine Hydrogelmischung aus 15wt% Polyvinylalkohol (PVA) und 7,5wt% Polyacrylsäure (PAS) verwendet. Die notwendigen geometrischen Abmessungen des biegesteifen Zentrums für eine große Verformung der Biegeplatte wurden mittels analytischen Berechnungen und mit FEM-Simulationen bestimmt. Für eine 20 µm dünne flexible Siliziumplatte mit einer Abmessung von 3800 x 3800 µm² ergibt sich eine Breite von weniger als 500 µm und eine Dicke von ca. 100 µm.

Keywords: binärer Schwellwertsensor, leistungslos, relative Luftfeuchtigkeit, Hydrogel, PVA/PAS

Motivation

Die zunehmende Nachfrage nach Sensoren für die Prozesskontrolle, für die Automobilindustrie, für Haushaltsgeräte und für viele andere Anwendungsgebiete hat in den vergangenen Jahren zu einem durchschnittlichen Wachstum der Sensor- und Messtechnikindustrie von 8% pro Jahr geführt. Bemerkenswert dabei ist, dass 70% aller Sensoren in der Prozesskontrolle und mehr als 90% der Sensoren in der Gebäudeüberwachung als Schwellwertschalter zur Kontrolle von Grenzwerten eingesetzt werden. Dies erfordert Sensoren, welche zwischen zwei definierten Zuständen schalten. In [1] wurde dazu ein neuartiger Ansatz für einen leistungslosen feuchtesensitiven Mikroschalter, basierend auf der BIZEPS-Plattform (Binary Zero-Power Sensor) [2] zur Überwachung der Luftfeuchtigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Systemkomplexität, vorgestellt. Die Anpassung des biegesteifen Zentrums hinsichtlich einer großen Verformbarkeit der Biegeplatte ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Aufbau und Funktionsweise

Die Energie zum mechanischen Schalten wird direkt aus der Messgröße der relativen Luftfeuchtigkeit gewonnen. Der hier betrachtete Feuchteschalter nutzt dafür die

feuchtesensitive Volumenquellung einer Polymerschicht, bestehend aus einer Hydrogelmischung aus 15wt% Polyvinylalkohol (PVA) und 7,5wt% Polyacrylsäure (PAS). In Folge der Quellung wird eine verformbare Siliziumplatte mit biegesteifem Zentrum ausgelenkt und ein elektrischer Kontakt geschlossen (Abb. 1a). Die geringe Anzahl an Systemkomponenten wird mit der Abb. 1b verdeutlicht.

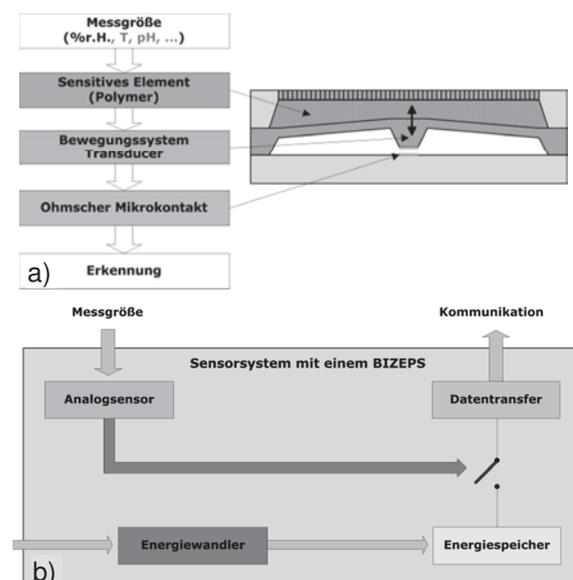


Abb. 1: BIZEPS-Plattform a) prinzipieller Aufbau und b) Systemkonzept

Für die Messfunktion werden weder eine externe Energiequelle noch eine elektronische Auswerteeinheit benötigt. Der zu schließende elektrische Mikrokontakt besteht aus Goldnanodrähten. Er benötigt eine annähernd planare Fläche. Gemäß dem Konzeptaufbau muss diese durch das sich verformende Bewegungssystem bereitgestellt werden. Erreichen lässt sich dies durch das biegesteife Zentrum. In Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen steigt damit jedoch die Steifigkeit der Biegeplatte erheblich an, während die Verformbarkeit abnimmt. Deshalb wurde mit analytischen Berechnungen und FEM-Simulationen ein geeigneter Parametersatz für die Abmessungen des biegesteifen Zentrums ermittelt, wobei die Kontaktkraft F senkrecht zur Fläche wirken muss. Praktisch wird diese Kraft durch die Anteile der verschiedenen Quellungsmechanismen in der Polymerschicht, die sich direkt im Kontakt mit der Biegeplatte befindet, verursacht.

Analytische Berechnung

Zunächst wurde die Biegeplatte in ein geeignetes Modell überführt. Da hier eine qualitative Betrachtung im Vordergrund stand, wurde die Biegeplatte als Balken mit zwei Bereichen unterschiedlicher Flächenträgheitsmomente I_1 sowie I_2 vereinfacht (Abb. 2). Damit verringerte sich der Berechnungsaufwand der zu lösenden analytischen Gleichungen gegenüber einem Plattenmodell erheblich.

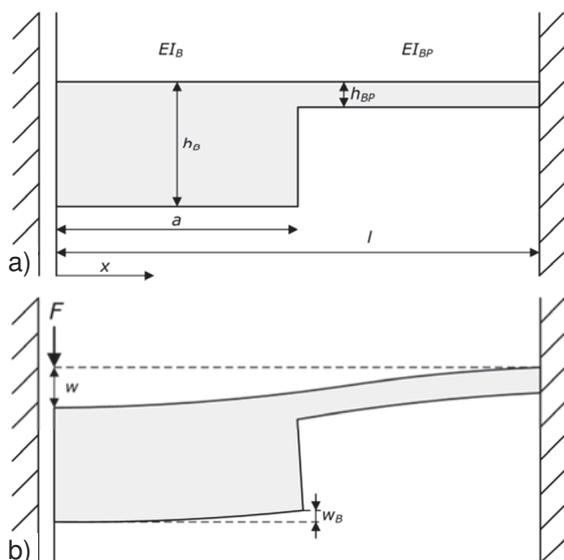


Abb. 2: Modell einer Biegeplatte mit biegesteifem Zentrum als Biegebalken mit zwei Bereichen unterschiedlicher Flächenträgheitsmomente, a) im Ausgangszustand, b) ausgelenkt

Der Bereich $0 \leq x < a$ entspricht dabei dem biegesteifen Zentrum und besitzt die

Biegesteifigkeit EI_1 , die Dicke h_1 und die Länge a . Dagegen entspricht der Bereich $a \leq x < l$ dem flexiblen Anteil der Biegeplatte mit der Biegesteifigkeit EI_2 , der Dicke h_2 und der Länge $l - a$. Die linke Seite des Balkenmodells erhält aufgrund der Symmetrie eine reibungsfreie Lagerung. Auf der rechten Seite befindet sich dagegen eine fixierte Lagerung, welche den Kontakt der Biegeplatte mit dem Volumen des Chips beschreibt. Die Randbedingungen, die sich aus den Lagern ergeben, sind in der Tab. 1 aufgeführt. Die Querkraft Q ist dabei eine Schnittgröße am Balken und entspricht der Kraft, die quer zum Balken in Folge des Schnittes angreift [5].

Tab. 1: Randbedingungen der Lager [3]

Lager		
Auslenkung w	$\neq 0$	0
Verdrehung w'	0	0
Drehmoment M	$\neq 0$	$\neq 0$
Querkraft Q	0	$\neq 0$

Für jeden Teilbereich mit bereichsweise konstanter Biegesteifigkeit muss die Differentialgleichung vierter Ordnung für die Biegelinie aufgestellt werden (Tab. 2) [3] [4]. Für die zwei Bereiche ergeben sich damit insgesamt acht Gleichungen mit acht Integrationskonstanten.

Tab. 2: Allgemeine Ansatz der Biegegleichung bei Kraftereinwirkung

Biegesteifes Zentrum: $0 \leq x < a$
$EI_1 \cdot w_1^{IV} = 0$
$EI_1 \cdot w_1^{III} = -Q = C_1$
$EI_1 \cdot w_1^{II} = -M = C_1 \cdot x + C_2$
$EI_1 \cdot w_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot x^2 + C_2 \cdot x + C_3$
$EI_1 \cdot w_1 = \frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot x^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot x + C_4$
Biegeplatte: $a \leq x < l$
$EI_2 \cdot w_2^{IV} = 0$
$EI_2 \cdot w_2^{III} = -Q = C_5$
$EI_2 \cdot w_2^{II} = -M = C_5 \cdot x + C_6$
$EI_2 \cdot w_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_5 \cdot x^2 + C_6 \cdot x + C_7$
$EI_2 \cdot w_2 = \frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot x^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot x^2 + C_7 \cdot x + C_8$

Mit Hilfe der Randbedingungen der Lager (Tab. 1) sowie der Übergangsbedingungen zwischen den beiden Teilbereichen bei $x = a$ (Tab. 3) lassen sich diese dann vollständig bestimmen (Tab. 4). Die Verläufe der Biegelinien sind über die Gleichungen der Tab. 5 beschrieben.

Tab. 3. Rand- und Übergangsbedingungen für das Modell von Abb. 2

Randbedingungen	Übergangsbedingungen
$Q_1(0) = -F$	$Q_1(a) = Q_2(a)$
$w'_1(0) = 0$	$M_1(a) = M_2(a)$
$w'_2(l) = 0$	$w'_1(a) = w'_2(a)$
$w_2(l) = 0$	$w_1(a) = w_2(a)$

Tab. 4. Flächenträgheitsmomente und Koeffizienten der Biegegleichung gemäß der Tab. 2 und 3

$C_1 = C_5 = F$	$C_2 = C_6 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot G$
$C_3 = 0$	$C_6 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot G$
$C_4 = \left[\frac{F \cdot a^2}{12} \cdot \left(\frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \cdot (2a + 3G) \right] + \left[\frac{F \cdot l^2}{12} \cdot \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \cdot \left(4l + 3G - 6a \cdot \left(1 + \frac{G}{l} \right) \right) \right]$	
$C_7 = -\frac{1}{2} \cdot F \cdot (l^2 + l \cdot G)$	$C_8 = \frac{F \cdot l^2}{12} \cdot (4l + 3G)$
$G = \frac{\left(\frac{a^2 - l^2}{EI_2} - \frac{a^2}{EI_1} \right)}{\left(\frac{a}{EI_1} + \frac{l - a}{EI_2} \right)}$	
$I_{y1} = \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h_1^3$	$I_{y2} = \frac{1}{12} \cdot b_2 \cdot h_2^3$

Tab. 5. Verlauf der Auslenkung $w(x)$ entlang des Balkens

Biegesteifes Zentrum: $0 \leq x < a$
$w_1(x) = \frac{1}{EI_1} \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot C_1 \cdot x^3 + \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot x^2 + C_3 \cdot x + C_4 \right)$
Biegeplatte: $a \leq x < l$
$w_2(x) = \frac{1}{EI_2} \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot C_5 \cdot x^3 + \frac{1}{2} \cdot C_6 \cdot x^2 + C_7 \cdot x + C_8 \right)$

Tab. 6: Material- und Geometrieparameter

$F = 0,001 \text{ N}$	$E = 169 \text{ GPa}$
Tiefe $b = 100 \text{ }\mu\text{m}$	$l = x_{BP} = 1900 \text{ }\mu\text{m}$
$h_1 = h_B = 0 \dots 370 \text{ }\mu\text{m}$	$h_2 = h_{BP} = 20 \text{ }\mu\text{m}$
$a = x_B = 25 \dots 1000 \text{ }\mu\text{m}$	

Tab. 7: Einheiten der verwendeten Größen

$[C_1] = [C_5] = N$	$[I] = \mu\text{m}^4$
$[C_2] = [C_6] = N \cdot \mu\text{m}$	$[F] = N$
$[C_3] = [C_7] = N \cdot \mu\text{m}^2$	$[a, l, b, h_B] = \mu\text{m}$
$[C_4] = [C_8] = N \cdot \mu\text{m}^3$	$[E] = \text{GPa}$
$[G] = \mu\text{m}$	

Für die Analyse des Einflusses der Breite und der Höhe des biegesteifen Zentrums auf die Gesamtauslenkung der Biegeplatte wurden die Werte aus der Tab. 6 in die Gleichungen der Biegelinie von Tab. 5, unter Beachtung der Einheiten (

Tab. 7), eingesetzt. Es ergeben sich die in der Abb. 3 dargestellten Verläufe.

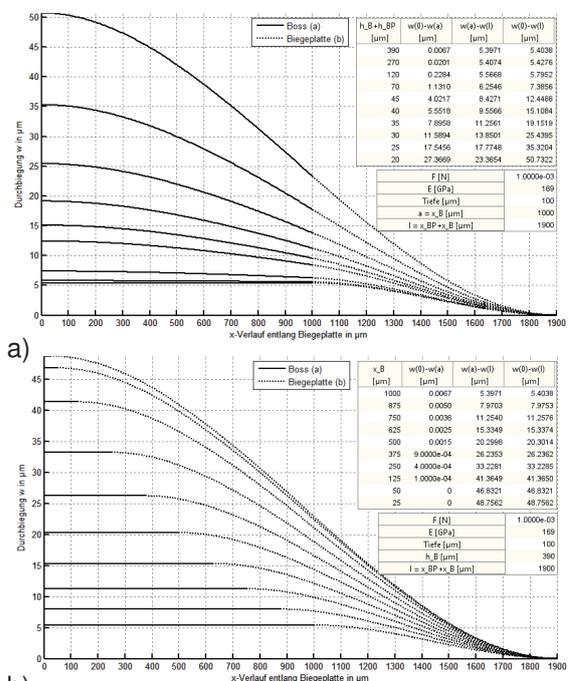


Abb. 3: Biegelinie des Sensors von Abb. 2 in Abhängigkeit a) von der Höhe und b) von der Breite des biegesteifen Zentrums

Aus der Abb. 3 wird ersichtlich, dass sich die maximale Verformung mit kleiner werdenden Abmessungen des biegesteifen Zentrums vergrößert. Für den Fall eines 390 μm dicken biegesteifen Zentrums (h_B+h_{BP}) erhöht sich die Verformung bereits um den Faktor 4 bei Halbierung seiner Seitenlänge (Abb. 3b). Gleichzeitig verringert sich die Durchbiegung in der Mitte auf weniger als ein Drittel. Werden die geometrischen Abmessungen zueinander ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich eine allgemeinere Darstellung (Abb. 4). Dabei zeigt sich, dass die Höhe h_B des biegesteifen Zentrums bis auf das Fünffache der Dicke der Biegeplatte h_{BP} reduziert werden kann. Erst bei kleineren Werten ist die Bedingung

$w_B \ll 1 \mu\text{m}$ nicht mehr erfüllt. Die Verformung w wird dann nicht mehr nur vom flexiblen Abschnitt der Biegeplatte bestimmt, sondern auch durch die Deformation des biege“steifen“ Zentrums. Gemäß der Abb. 5 entspricht eine Verformung des biegesteifen Zentrums von $1 \mu\text{m}$ weniger als 1% der maximalen Verformung. Die geometrischen Verhältnisse a/l , welche diese praktisch relevante Bedingung erfüllen sind in der Abb. 4 und der Abb. 5 grau hervorgehoben.

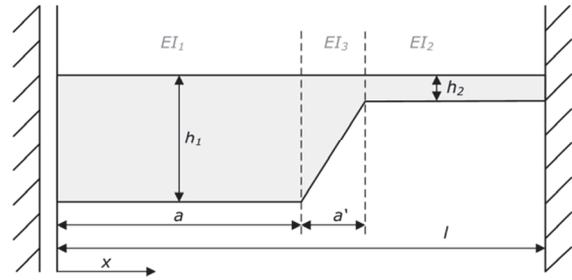


Abb. 6: Balkenmodell mit Ätzflanke

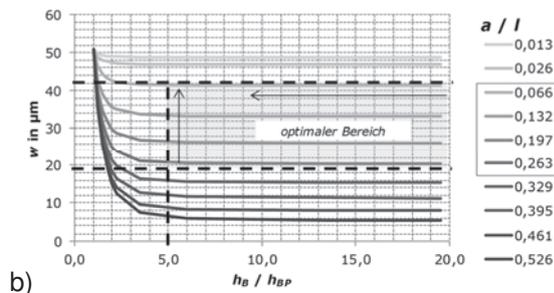
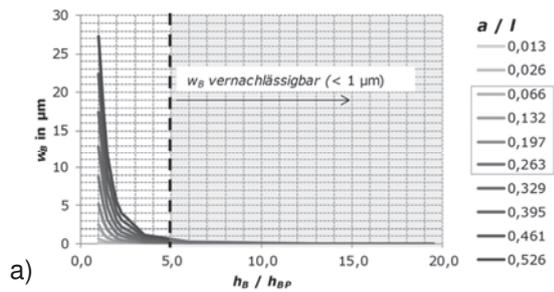


Abb. 4: Analytisch berechnete maximale Auslenkung für Biegeplatten mit biegesteifem Zentrum a) biegesteifes Zentrum w_B , b) Biegeplatte mit biegesteifem Zentrum w für $a = 25 \dots 500 \mu\text{m}$, $h_B = 20 \dots 390 \mu\text{m}$, $l = 1900 \mu\text{m}$ und $h_{BP} = 20 \mu\text{m}$

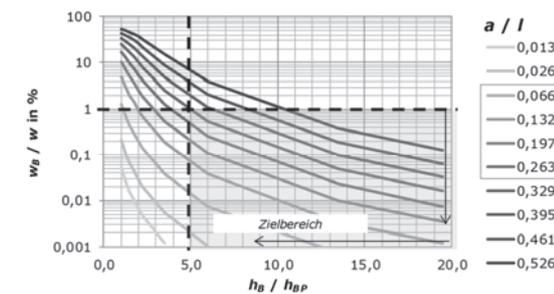


Abb. 5: Einfluss der Dicke h_B des biegesteifen Zentrums auf seine Durchbiegung w_B ($a = 25 \dots 500 \mu\text{m}$, $h_B = 20 \dots 390 \mu\text{m}$, $l = 1900 \mu\text{m}$ und $h_{BP} = 20 \mu\text{m}$)

FEM-Simulation

Das zweidimensionale Balkenmodell von Abb. 2a vernachlässigt die herstellungsbedingte KOH-Ätzflanke mit einem Winkel von $74,75^\circ$ am biegesteifen Zentrum. Deren Einfluss wurde mit einem FEM-Modell untersucht (Abb. 6), wobei zur Simulation das Programmpaket ANSYS verwendet wurde.

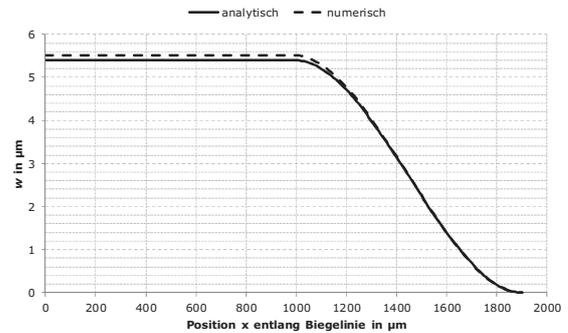


Abb. 7: Vergleich der analytisch und numerisch berechneten Verformung von Biegeplatten mit biegesteifem Zentrum anhand des Verlaufs der Biegelinie für $a = 500 \mu\text{m}$, $h_B = 390 \mu\text{m}$, $l = 1900 \mu\text{m}$ und $h_{BP} = 20 \mu\text{m}$

Abb. 7 vergleicht zunächst die Biegelinien des analytischen Balkenmodells von Abb. 2a, mit denen der FEM-Analyse. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung, wobei die größten Abweichungen Δw mit ca. 2% im Bereich des biegesteifen Zentrums auftreten.

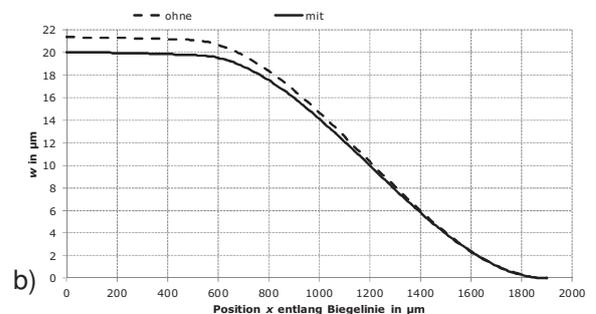
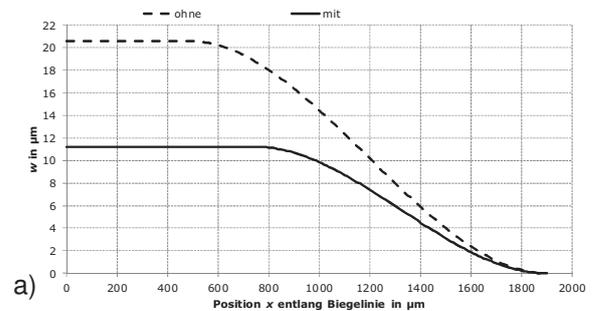


Abb. 8: Vergleich der Durchbiegung von Biegeplatten mit biegesteifem Zentrum ($a = 500 \mu\text{m}$) ohne und mit Berücksichtigung des Ätzwinkels a) $h_B = 390 \mu\text{m}$, b) $h_B = 70 \mu\text{m}$

Die Ätzflanke bewirkt eine nicht zu vernachlässigende Versteifung der Biegeplatte. So tritt mit der Ätzflanke für ein biegesteifes Zentrum der Höhe h_B+h_{BP} von $390\ \mu\text{m}$ und einer Breite a von $500\ \mu\text{m}$ eine um 83% geringere Verformung der Biegeplatte auf (Abb. 8a). Diese zusätzliche Versteifung infolge der Ätzflanke, verringert sich mit kleineren h_B erheblich (Abb. 8b). Für h_B+h_{BP} $70\ \mu\text{m}$ beträgt die Abweichung nur noch ca. 7%.

Zusammenfassung

Für den neuartigen Ansatz eines leistungslosen feuchtesensitiven Mikroschalters wurde das Verhalten des Schalters infolge der feuchtesensitiven Volumenquellung einer Polymerschicht untersucht, die als sensitives Element wirkt. Diese Quellung lenkt eine mechanisch verformbare Siliziumplatte mit biegesteifem Zentrum aus und schließt einen elektrischen Kontakt mit Goldnanodrähten. Die Optimierung des biegesteifen Zentrums hinsichtlich einer großen Verformung wurde mit analytischen und numerischen Berechnungen durchgeführt. Dazu wurden vereinfachte Balkenmodelle verwendet. Ausgehend von den dargestellten Ergebnissen zeigte sich, dass es für eine $20\ \mu\text{m}$ dicke Biegeplatte mit einer Abmessung von $3800 \times 3800\ \mu\text{m}^2$ zweckmäßig ist, das biegesteife Zentrum mit einer Breite von weniger als $500\ \mu\text{m}$ und einer Höhe von mehr als $100\ \mu\text{m}$ zu wählen, um hinreichend große Verformungen für den Schaltvorgang zu erreichen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes "SEMIS" unter dem Kennzeichen 16SV5512 gefördert.

Literatur

- [1] C. Bellmann, R. Sarwar, A. Steinke, T. Frank, H. F. Schlaak, G. Gerlach: Development of a humidity micro switch based on humidity-sensitive polymers, 23rd Micromechanics and Microsystems Europe Workshop (MME), Ilmenau, Germany, 09.-12.09.2012
- [2] WO2009077446A1 (25.06.2009), Technische Universität Ilmenau
- [3] Gross, D; Ehlers, W.; Wriggers, P.: Formeln und Aufgaben zur Technischen Mechanik 2 – Elastostatik, Hydrostatik, Springer, 9. Auflage, 2009, S.56ff, ISBN: 978-3-642-03087-1
- [4] Gross, D; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W.-A.: Technische Mechanik 2 – Elastostatik, Springer, 10. Auflage, 2009, S.89ff, ISBN: 978-3-642-00564-0
- [5] Gross, D; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W.-A.: Technische Mechanik 1 – Statik, Springer, 11. Auflage, 2011, S.170ff, ISBN: 978-3-642-13805-8