

Hydrogel-basierte Sensorschalter mit Schalthysterese

N. Gulnizkij¹, C. Bellmann^{1,2}, G. Gerlach¹

¹Institut für Festkörperelektronik, Mommsenstraße 15, 01169 Dresden, Deutschland

²jetzt FERCHAU Engineering GmbH

Nikolai.Gulnizkij@tu-dresden.de

Zusammenfassung

Hydrogel-basierte Sensorschalter können zur Inline-Überwachung der Luftfeuchte in Gebäuden, Containern, der Lebensmittelindustrie, etc. eingesetzt werden. Der wesentliche Unterschied leistungsloser Feuchtesensoren zu gängigen Feuchtesensoren ist, dass für den Sensorbetrieb selbst keine Betriebsspannung benötigt wird. Auf diese Weise ermöglichen solche Sensorschalter eine deutliche Vereinfachung des Aufbaus. Das Prinzip basiert darauf, dass das Schalten des Mikroschalters beim Überschreiten eines Schwellwertes durch die Luftfeuchte selbst ausgelöst wird, so dass dafür keine elektrische Energie benötigt wird. Dies erfolgt durch eine Bimorphplatte mit einer Hydrogelschicht, die durch Änderungen der Luftfeuchtigkeit quillt bzw. entquillt. Um ein sicheres Schalten zu gewährleisten, muss die mechanische Struktur eine Schalthysterese aufweisen. Dabei kann die Hysterese durch ein belastungsabhängiges Ausbeulen einer verspannten Struktur hervorgerufen werden. In diesem Beitrag soll ein solcher Hydrogel-basierter Sensorschalter für Feuchte vorgestellt werden.

Keywords: Hydrogel, Hysterese, Mikroschalter, leistungslos, Bimorph-Effekt

Motivation

Die wachsende informationstechnische Vernetzung in der industriellen Produktion führt zu einer zunehmenden Nachfrage nach Sensorsystemen, die die Messwerterfassung, die Signalaufbereitung und die Signalverarbeitung vereinen. Solche Sensorsysteme erzielen in der Sensor- und Messtechnikindustrie in den vergangenen Jahrzehnten ein überdurchschnittliches Wachstum von über 6% pro Jahr [1]. Dabei sind die wichtigsten Messgrößen die Temperatur und die Feuchtigkeit. Allerdings werden 70% aller Sensoren in der Prozesskontrolle und mehr als 90% in der Gebäudeüberwachung als Schwellwertschalter eingesetzt. In [2] wurde ein neuartiger Ansatz für einen leistungslosen Feuchteschwellwertschalter vorgeschlagen, der auf dem BIZEPS-Prinzip (binary zero-power sensor) basiert [3][4]. Bei diesem Prinzip wird die Energie direkt aus der Messgröße entnommen. Im hier verwendeten Beispiel wird dazu das feuchteabhängige Quellen eines Hydrogels genutzt, das Teil einer Bimorph-Biegeplatte ist. Aufbauend auf den herangegangenen Ergebnissen soll ein

Sensorschalter mit einer Schalthysterese realisiert werden.

Aufbau und Funktionsweise

Abb. 1 zeigt den Aufbau des hier präsentierten Feuchteschwellwertschalters. Der Mikroschalter ist eine Siliziumstruktur (Dicke 500 µm) mit einer Aussparung in der Mitte der Struktur (Biegeplatte 20 µm). In der Mitte der Biegeplatte befindet sich ein biegesteifes Zentrum, das bei Kontakt mit einem elektrischen Mikrokontakt einen Stromkreis schließt. Das biegesteife Zentrum verursacht eine lokale Versteifung der Biegeplatte, die eine gute Kontaktierung beim Schließen des Mikrokontakts sicherstellt. Das Hydrogel wird strukturiert auf der Biegeplatte aufgebracht [7] und führt zu einer Vorauslenkung der Biegeplatte. Die Auslenkungsrichtung wird von der Form der Strukturierung des Hydrogels auf der Biegeplatte bestimmt. Bei Änderung der Luftfeuchte reagiert das Hydrogel mit einer Volumenänderung, die zu einer Auslenkung der Biegeplatte führt und damit mechanische Arbeit an der Biegeplatte leistet.

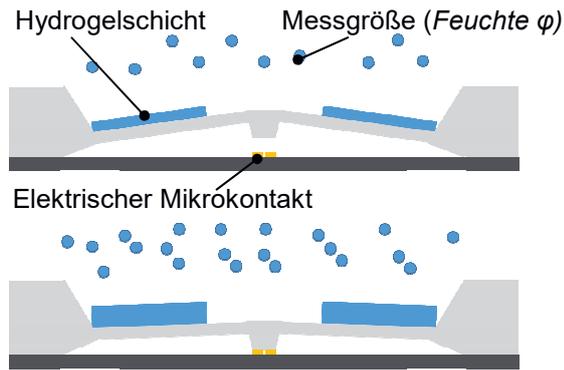


Abb. 1: Feuchteschwellwertschalter nach dem BIZEPS-Prinzip, bestehend aus Bimorph-Biegeplatte mit Hydrogelschicht und Mikrokontakt. a) geöffnet, b) geschlossen

Herstellung des Sensorschalters

Das Hydrogel besteht aus Polyvinylalkohol (PVA) und Polyacrylsäure (PAS) und wird aus einer Polymerlösung aus 15 Gew. % PVA und 7,5 Gew. % PAS hergestellt [5]. Die Vernetzung der Polymerlösung erfolgt dabei thermisch [6].

Abb. 2 zeigt den der Herstellungsprozess zur Strukturierung des Hydrogels auf der Biegeplatte. Dazu wird ein Silikonstempel verwendet, dessen Form den späteren hydrogelfreien Teil der Biegeplatte definiert.

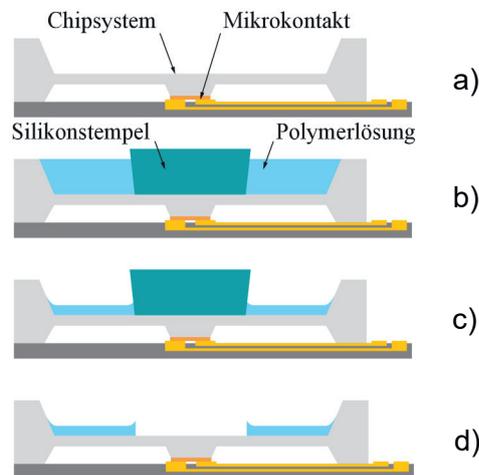


Abb. 2: Stempeltechnik zur Strukturierung der Hydrogelschicht auf der Biegeplatte: a) Siliziumstruktur, b) Aufbringen des Silikonstempels auf Biegeplatte und Auffüllen der Kavität mit der Polymerlösung, c) nach Verdampfen des Lösungsmittels Polymermischung ohne Lösungsmittel, d) strukturierte Hydrogelschicht nach Entfernen des Stempels

Die Polymerlösung wird dabei in die Kavität der Siliziumstruktur gefüllt und nach Entweichen des Lösungsmittels vernetzt.

Gestaltung der Bimorphplatte

Größe und Richtung der Auslenkung der Biegeplatte hängen von der Form der Hydrogelstruktur ab. Ist die Hydrogelschicht unstrukturiert, können die In-Plane-Kräfte durch das feuchteabhängige Quellen der Hydrogelschicht von der Einspannung aufgenommen werden, sodass es zu keiner Quellung kommt (Abb. 3a). Erst nach Überschreiten der Knickkraftgrenze würde es zum Auslenken in eine der beiden Richtungen kommen. Ist der mittlere Teil der Biegeplatte beschichtet, führt dies zu einer Auslenkung w nach oben (Abb. 3b). Da gemäß Abb. 1 das Schließen des Schalters durch eine Bewegung des biegesteifen Zentrums nach unten erfolgen soll, muss das Hydrogel die Biegeplatte im äußeren Bereich bedecken (Abb. 3c).

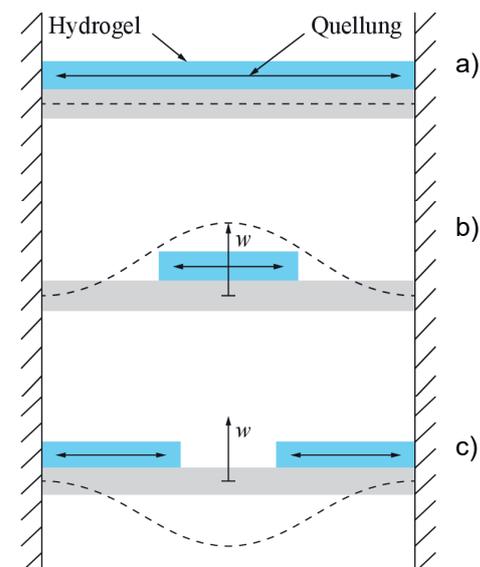
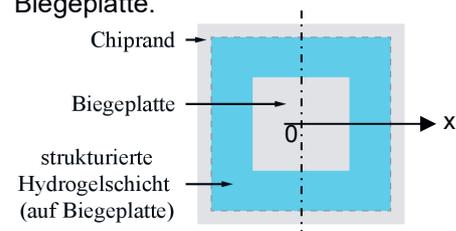


Abb. 3: Abhängigkeit der Auslenkung von der Form der Bedeckung mit dem quellenden Hydrogel. blau: Hydrogel, grau: Biegeplatte

Abb. 4 zeigt noch einmal den Einfluss der Hydrogelstruktur auf die Auslenkung der Biegeplatte.



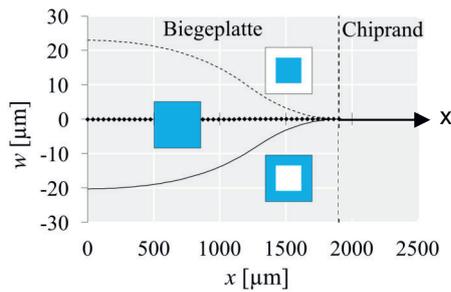


Abb. 4: Auslenkung der Biegeplatte für die in Abb. 3 dargestellten Varianten; Dicke h_{BP} der Biegeplatte $20 \mu\text{m}$; Dicke h_H der Hydrogelschicht $20 \mu\text{m}$; Plattenbreite $2l$ $3800 \mu\text{m}$; Breite $2b$ $2000 \mu\text{m}$ der beschichteten $10,4 \text{ mm}^2$ bzw. unbeschichteten Fläche $4,0 \text{ mm}^2$.

In Abb. 6 sind schematisch die Bimorphbiegeplatte und ihre Biegelinien dargestellt. Die Ergebnisse aus dem Messung mit dem 3D-Profilometer zeigen im Verlauf der Biegelinien eine eindeutige Abhängigkeit der Auslenkungsmaxima in Abhängigkeit der Länge der unbeschichteten Mitte ($2b$) zur Gesamtlänge ($2l$) der Biegeplatte.

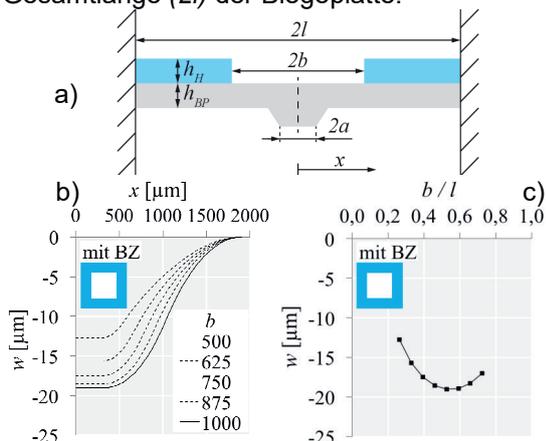


Abb. 5: Auslenkung einer Biegeplatte mit biegesteifem Zentrum in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad b/l : a) Geometrie, b) Biegelinie, c) Einfluss des Bedeckungsgrads auf die max. Auslenkung in Plattenmitte.

Wie bereits oben ausgeführt wurde, ist die Auslenkung der Biegeplatte mit biegesteifem Zentrum vom Bedeckungsgrad mit Hydrogel abhängig. Zur Berechnung wurde die Biegeplatte als Biegestab modelliert, wo die bedeckten und unbedeckten Teile jeweils als Biegestäbe mit entsprechender unterschiedlicher Steifigkeit betrachtet wurde [8]. Es zeigt sich, dass die Auslenkung an der Kontaktstelle, d.h. im Bereich des biegesteifen Zentrums, maximal wird, wenn der

Bedeckungsgrad etwa 50 % beträgt. Dabei wird ein Hub von etwa $18 \mu\text{m}$ erzeugt.

Auslenkung

Die Auslenkung der Bimorphbiegeplatte wurde optisch mit einem Profilometer (μScan von NanoFocus) untersucht (Abb. 6).

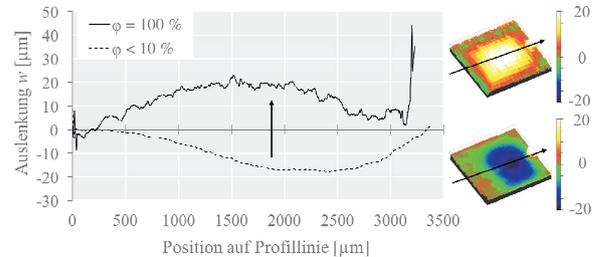


Abb. 6: a) Messung der Quellung einer quadratischen Bimorphbiegeplatte gemäß Abb. 5a. $h_{BP} = 20 \mu\text{m}$; $h_H = 20 \mu\text{m}$; $2l = 3800 \mu\text{m}$; $2b = 2000 \mu\text{m}$

Die Sensitivität des Sensorschalters wurde in einer Feuchtekammer, die speziell für die Anwendung im 3D-Profilometer gebaut wurde, vorgenommen. Die Feuchte in der Kammer wurde durch ein Bubble-System erzeugt und mit einem Feuchtesensor (HYTELOG USB, B+B Sensors) überwacht. Es zeigt sich, dass bei trockenen Hydrogel ($\phi < 10 \%$ r.F.) bereits eine Vorauslenkung vorhanden ist, die sich aus der Herstellung, durch eingeprägte Eigenspannung, ergibt. Beim Wechsel zu 100 % r.F. tritt ein Hub von ca. $40 \mu\text{m}$ ein, der für die Auslenkung völlig ausreichend ist. Die Untersuchung der Zeitabhängigkeit des Verhaltens des Sensorschalters bei kontinuierlicher Änderung der Feuchte ist in Abb. 7 gezeigt. Dabei sind die Feuchteänderung und die Auslenkung der Bimorphbiegeplatte Zeitaufgelöst dargestellt.

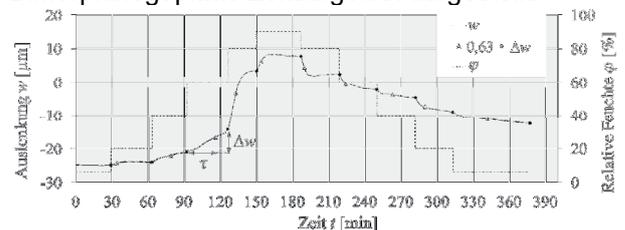


Abb. 7: Zeitabhängige Verformung der Biegeplatte nach Feuchtesprüngen zwischen 10 % und 90 % r.F.. Abmessung wie in Abb. 6.

Der Sensorschalter zeigt beim kontinuierlichen Anstieg der Feuchte eine kontinuierliche Auslenkung der Biegeplatte. Erst oberhalb von 60 % r.F. bilden sich diskrete Auslenkungsplateaus aus.

Dieses Verhalten wird durch eine starke Quellung des Hydrogels eines bestimmten Feuchtwertes erzeugt. In Abb. 8 wird dieses Verhalten detailliert dargestellt, wobei sich eine deutliche Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Feuchteänderung zeigt [8] [9].

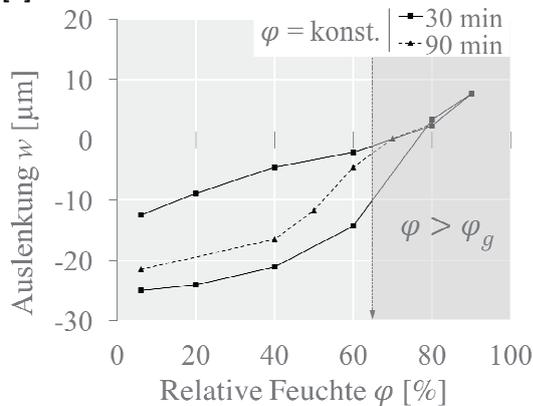


Abb. 8: Zeitlicher Einfluss von Feuchtesprüngen (30 bzw. 90 min) auf die Auslenkung der Biegeplatte. Abmessung in Abb. 6.

Dieses Verhalten kann auf das Quellverhalten des Hydrogels zurückgeführt werden. Beim Quellen lagern sich vermehrt Wassermoleküle zwischen den Polymeren des Polymersystems an und verursachen damit ein Aufquellen. Diese kann auf die vermehrte Kettenbewegung der Polymere zurückgeführt werden und analog zur Glasübergangstemperatur betrachtet und als Glasübergangsfuchte φ_g bezeichnet werden. Unterhalb von φ_g tritt eine Hysterese zwischen Adsorption (Eindringen der Wassermoleküle in das Hydrogel) und Desorption (Austreten der Wassermoleküle aus dem Hydrogel) auf. Der Verlauf der Desorption liegt dabei stets oberhalb der Adsorption. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus den Abb. 7 und Abb. 8 überein. Bei einer kurzen Messdauer tritt eine Hysterese zwischen den Messwerten der Adsorption und der Desorption auf.

Schalthysterese

Um ein sicheres Schließen des elektrischen Mikrokontakts zu erreichen und damit ein Oszillieren zwischen dem An- und Auszustand zu verhindern, muss der Sensor eine Schalthysterese aufweisen. Zur Vermeidung von lokalen elektrischen Feldstärkespitzen und damit verbundenen Lichtbögen, muss zudem der Schaltvorgang schnell erfolgen. Damit ist die kontinuierlich veränderliche Auslenkung, wie sie in Abb. 7 und Abb. 8 genutzt wurde, ungeeignet. Einen Ausweg bietet eine durchschlagende Platte mit Schnappeffekt

(Abb. 9). Der schnelle Schaltvorgang tritt bei Erreichen des Schwellwerts φ_{Schalt} ein. Mit der Durchschlagkennlinie ergibt sich auch die Schalthysterese φ_H .

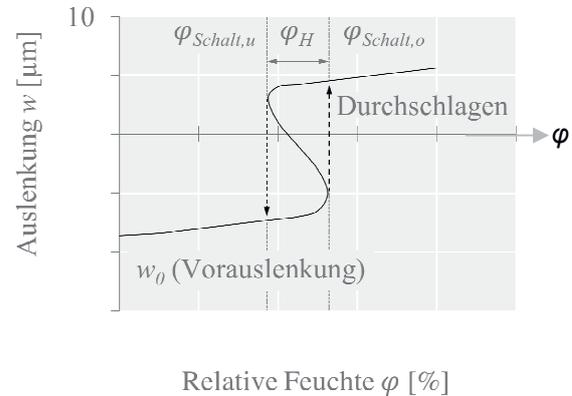


Abb. 9: Auslenkungshysterese einer Biegeplatte mit Schnappeffekt in Abhängigkeit von der relativen Feuchte.

Dieses Hystereseverhalten kann realisiert werden, wenn die Biegeplatte in entgegengesetzter Richtung vorausgelenkt ist und unter Druckspannung steht (Abb. 10). Das wird erreicht, indem auf die Siliziumdruckplatte partiell eine Siliziumdioxidschicht abgeschieden wird. Da die Abscheidung bei hohen Temperaturen von ca. 300 °C erfolgt und SiO_2 einen deutlich kleineren Längenausdehnungskoeffizienten als Si besitzt, stellt sich die Druckspannung in axialer Richtung der Platte direkt beim Abkühlen auf Raumtemperatur ein. Die Quellung des Hydrogels infolge steigender Luftfeuchte führt nur zu einer geringfügigen Verringerung der Vorauslenkung in Richtung des Schaltkontakts. Erst beim Überschreiten einer Schwellkraft wird die Auswölbung schnappartig ausgelenkt.

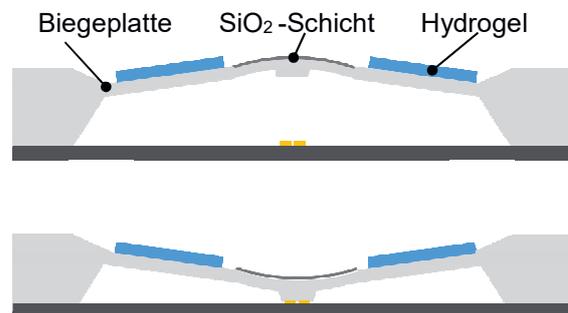


Abb. 10: Aufbau eines Sensorschalters mit Schalthysterese. a) geöffnet, b) geschlossen

Die SiO_2 -Schicht wurde mittels PE-CVD (Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition) aufgebracht (Plasmalab^{80Plus},

Oxford Plasma Technology). Abb. 11 zeigt die gewünschte Vorauslenkung gemäß Abb. 10. Sie beträgt für eine 30 μm dicke Siliziumplatte mit 750 nm SiO_2 bei einer Bedeckungsrate von 50 % etwa 5 μm .

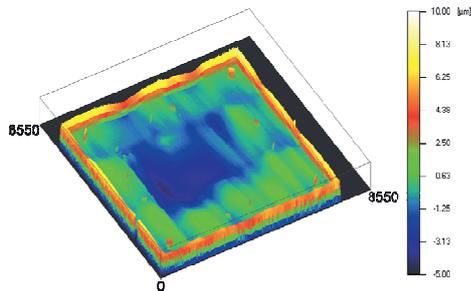


Abb. 11: Auslenkung einer 30 μm dicke quadratischen Siliziumplatte (Kantenlänge 4,8 mm), die in der Mitte quadratisch mit einer 750 nm dicken SiO_2 -Schicht bedeckt ist (3x3 mm).

In Abb. 11 ist ein Ergebnis aus der Messung eines 3D-Profilometers an einer Silizium-Biegeplatte mit Eigenspannungen gezeigt.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass eine feuchtesensitive Hydrogelschicht mittels des Bimorpheffekts eine Biegeplatte reversibel deformiert. Die Einstellung der Deformationsrichtung der Biegeplatte erfolgt durch geeignete Strukturierung des Hydrogels auf der Biegeplatte. Die Strukturierung der Hydrogelschicht erfolgt dabei mit einem Stempelverfahren. Für einen guten, ebenen Schaltkontakt wird ein biegesteifes Zentrum in der Mitte der Biegeplatte verwendet, das hinreichend steif ist.

Die Hydrogelschicht durchläuft in Abhängigkeit von der relativen Feuchte den Glasübergang, wodurch die Dehnung vom Hydrogel erhöht und dessen Ansprechzeit reduziert wird. Um ein schnelles und zuverlässiges Schalten zu erreichen, ist eine Schalthysterese notwendig, die ein plötzliches Durchschlagen der Biegeplatte bei einer bestimmten Schaltfeuchte ermöglicht. Dies wird durch eine Vorauslenkung, der Biegeplatte in Gegenrichtung und Druckspannung in der Platte realisiert. Es wurde gezeigt, dass sich ein solcher Zustand durch die Abscheidung von strukturierten Siliziumdioxidschichten auf Siliziumbiegeplatte erreichen lässt.

Literaturnachweis

- [1] AMA: *Brancheninformation: Quartalsumfrage 2016*, (<http://www.ama-sensorik.de/verband/brancheninformationen/quartalsumfragen-2016>). – (zuletzt abgerufen am 20/10/2017)
- [2] 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, (2012)
- [3] T. Frank, A. Steinke, G. Gerlach, *Binary Zero-Power Sensors: an alternative solution for power-free energy-autonomous sensor systems*, *Microsystem Technologies* 18(7-8) (2012), 1225-1231; doi: 10.1007/s00542-012-1547-4
- [4] I. W. Rangelow, G. Gerlach, H. Bartuch, A. Steinke, R. Roeder: *Micromechanical sensors: switch for threshold-related switching of electrical contacts*, Patentschrift: WO 2009077446 A1 25/06/2009
- [5] A. Richter, *Quellfähige Polymernetzwerke als Aktor-Sensor-Systeme für die Fluidtechnik*, Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, 2002
- [6] K. F., Arndt, A. Richter, S. Ludwig, J. Zimmermann, J. Kessler, D. Kuckling, H. J. Adler, *Poly (vinyl alcohol)/poly (acrylic acid) hydrogels, FT-IR spectroscopic characterization of crosslinking reaction and work at transition point*, *Acta Polymerica* 50(11-12) 1999, 383–390. doi: 10.1002/(SICI)1521-4044(19991201)50:11/12<383::AID-APOL383>3.0.CO;2-Z
- [7] C. Bellmann, *Leistungslose Feuchteschwellwertschalter*, Dissertation, TU Dresden, 2016
- [8] S. Oswald, N. Rudolph, *Polymer Rheology*, Carl Hanser Verlag, 2015, 16–143
- [9] D. Caccavo, S. Cascone, G. Lamberti, A. Angela, A. D. Sezer, *Smart Drug Delivery System*, *InTech*, 2016, 237–303

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des Promotionsprojektes im Rahmen des GRK 1865 „Hydrogel-basierte Mikrosysteme“.