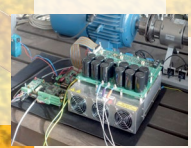
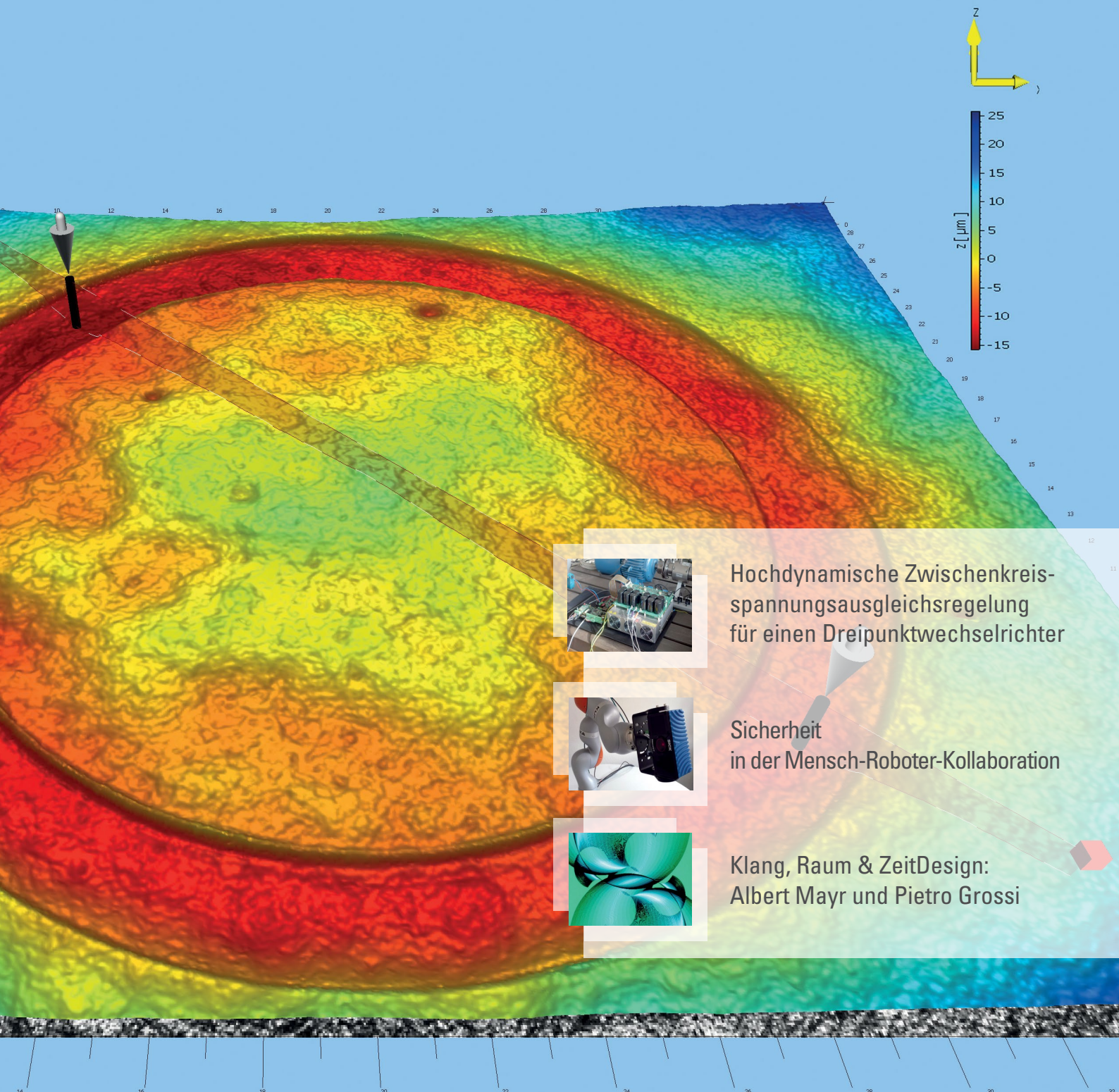


# forschung im fokus

Ausgabe Nr. 21 / 2018



Hochdynamische Zwischenkreis-  
spannungsausgleichsregelung  
für einen Dreipunktwechselrichter



Sicherheit  
in der Mensch-Roboter-Kollaboration



Klang, Raum & ZeitDesign:  
Albert Mayr und Pietro Grossi

# Gedruckte Elektronik für das Internet der Dinge

Gabriel Cadilha Marques M.Eng., Lukas Zimmermann M.Sc., Alexander Scholz M.Sc.,  
Prof. Dr. rer. nat. Jasmin Aghassi-Hagmann

Der Begriff „Internet der Dinge“ beschreibt, dass nicht nur die Menschen über das Internet kommunizieren, sondern auch die Dinge selbst, namentlich Maschinen, „smarte“ Produkte und cyber-physikalische Systeme in Zukunft mit dem Internet und damit auch untereinander und mit den Menschen verbunden sind. Die gedruckte Elektronik kann hierbei einen entscheidenden Beitrag liefern, da sie ein Werkzeug ist, um die Rohdaten auf physikalischer Ebene zu gewinnen.

*The internet of things alludes to the idea that not only human beings are connected and communicate via the internet but also things itself, meaning smart products, machines and cyber-physical systems will be interconnected. Printed electronics plays an enabling role in this respect. Printed devices, circuits and sensors could detect, sense and process the raw data collected by the smart products and machines. In this report we give an introduction into a printed electrolyte-gated transistor technology along with some examples from single logic devices, digital circuits and security applications making use of Physical Unclonable Functions.*

Der Begriff „Internet der Dinge“ veranschaulicht, was in zunehmendem Maß Teil unserer digitalisierten Gesellschaft wird. Nicht nur Menschen kommunizieren, tauschen Daten aus und steuern über das Internet die Dinge, sondern die Dinge selbst, namentlich Maschinen, smarte Produkte und cyber-physikalische Systeme sind mit dem Internet und damit auch untereinander und mit den Menschen verbunden. Parameter werden ausgetauscht, Interaktionen und Steuerung zwischen Maschinen sowie zwischen Mensch und Maschine werden drahtlos übertragen. Hierbei spielt die physikalische Datenerfassung auf der untersten Ebene eine entscheidende Rolle, denn diese konstituieren die Rohdaten, auf denen aller weiterer Austausch beruht. Und genau hier kann die gedruckte Elektronik einen entscheidenden Beitrag liefern. Der folgende Beitrag soll einen Überblick über die Technologie, basierend auf anorganischen Materialien, die elektronischen Bauelemente sowie Systemanwendungen im Bereich Sicherheit geben.

## Technologie

Die gedruckte Elektronik erfreut sich auf dem Gebiet des „Internet der Dinge“ größerer Beliebtheit, da die verwendeten Schaltungen direkt am Einsatzort gedruckt werden könnten. Es spielt dabei keine Rolle, ob die gedruckten Schaltungen auf einen festen Hintergrund wie

Glas oder einen flexiblen Hintergrund wie Papier oder Folien gedruckt werden. Durch den Druckprozess lässt sich ebenfalls die Herstellungszeit und die damit verbundenen Herstellungskosten im Vergleich zur konventionellen Siliziumtechnologie reduzieren.

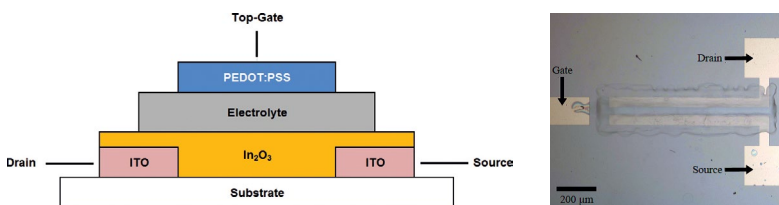
Das Interesse an anorganischen Metalloxiden als Ausgangsmaterialien für gedruckte Systeme steigt dabei stetig, da Oxide sowohl als Leiter, Nichtleiter und Halbleiter vorkommen. In einem Feldeffekttransistor können z.B. die elektrisch leitenden Elektroden aus Indiumzinnoxid (ITO) bestehen. Aufgrund der hohen intrinsischen Ladungsträgerbeweglichkeit in Indiumoxid ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ist dieses Material besonders als Halbleiter für den Kanal geeignet. Um den Kanal elektrisch von der Gate-Elektrode zu isolieren, wird häufig Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) verwendet. Aber auch Feststoffelektrolyte können hier zum Einsatz kommen.

Um die für die Schaltungen benötigten Versorgungsspannungen zu reduzieren, kann anstatt eines Dielektrikums (z.B. Aluminiumoxid) ein Elektrolyt als Gate-Isolator eingesetzt werden. Die niedrigen Versorgungsspannungen ( $\leq 1\text{ V}$ ) sind das Resultat der hohen Gate-Kapazität ( $\approx 4\ \mu\text{F}/\text{cm}^2$ ), die vom Elektrolyten bereitgestellt wird. Beim Anlegen einer Spannung an der Gate-Elektrode bildet sich im Elektrolyten eine Helmholtz-Doppelschicht aus, die der Grund für die hohe Gate-Kapazität ist [1].

In dem hier vorgestellten Transistor werden die Vorteile der hohen Ladungsträgerbeweglichkeit, aus dem Indiumoxid-Kanal und der niedrigen Versorgungsspannung stammend, resultierend aus dem Einsatz eines Elektrolyten als Gate-Isolator kombiniert.

Dafür wird zwischen Indiumzinnoxid-basierten Drain- und Source-Elektroden der „Indium-Precursor“ mit Inkjetdrucker abgeschieden. Anschließend wird das Substrat bei 400 °C für zwei Stunden nachbehandelt, damit sich der Indium-Precursor in Indiumoxid umwandelt. Im darauffolgenden Schritt wird der Elektrolyt ebenfalls mit dem Inkjetdrucker über den Kanal gedruckt. Abschließend wird noch ein leitfähiges Polymer (PEDOT:PSS) über den Elektrolyten aufgebracht, das die Gate-Elektrode bildet (Abbildung 1) [2,3].

Abb. 1: links, schematische Darstellung eines Transistors mit Indium-Oxid Kanal und Elektrolyten als Gate-Isolator; rechts, Foto eines gedruckten Transistors basierend auf den links gezeigten Materialien



Der in Abbildung 1 vorgestellte Transistor kann dazu verwendet werden, logische Schaltelemente (Inverter, NAND-Gatter, NOR-Gatter, ...) zu realisieren. Ringoszillatorstrukturen (Abbildung 2) zeigen Frequenzen zwischen 250 Hz und 350 Hz bei Versorgungsspannungen von 0.6 V bis 2 V. [3] Die höchste in unserer Gruppe gemessene Frequenz betrug 1 kHz und kann durch eine optimierte Transistorgeometrie erreicht werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, gedruckte Schaltungen bei geringen Versorgungsspannungen zuverlässig zu betreiben, was auf dem Gebiet des „Internet der Dinge“ sehr vorteilhaft ist, um die Laufzeit der durch Batterien/Akkus betriebenen Anwendungen zu erhöhen.

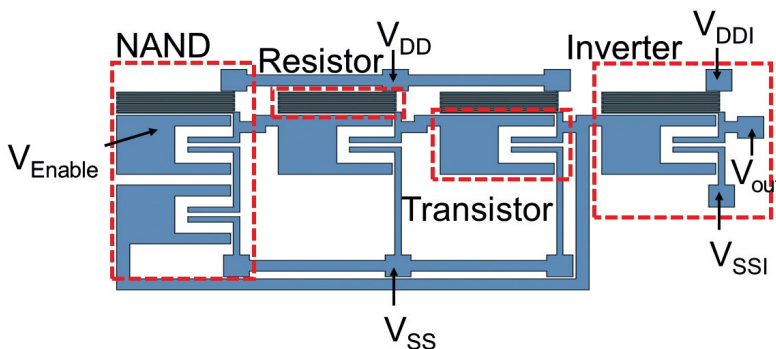


Abb. 2: Layout eines dreistufigen Ringoszillators in gedruckter Elektronik (Transistor-Resistor Logik)

Auf Basis der entwickelten Standardlogikelemente können nun komplexere Logikschaltungen sowie Analogschaltungen für gedruckte Sensoranwendungen entworfen und entwickelt werden. Auch hybride Systeme, bestehend aus einer Kombination aus gedruckten und Silizium-basierten-Bauelementen sind denkbar. Diese und weitere Themen im Entwurfs- und Designverfahren sind aktuelle Forschungsschwerpunkte der Gruppe Aghasi-Hagmann sowie des vom KIT und der Hochschule Offenburg betriebenen Promotionskolleg MERAGEM mit den Kollegen Bessler, Mackensen und Sikora.

Eine weitere interessante Anwendung der druckbaren Elektronik sind Sicherheitsanwendungen. Hierbei wird ein oft diskutierter Nachteil der gedruckten Elektronik im Vergleich zur konventionellen Halbleiterelektronik, nämlich die starken Variationen aufgrund der groben Druckauflösung sowie die Variationen durch die verwendeten Materialien und Tinten, zum Vorteil genutzt. Gedruckte Elektronik bietet die Möglichkeit, gerade diese intrinsischen Variationen auszunutzen, um beispielsweise günstige, einmalig verwertbare Smartlabels zur Authentifikation, auf Basis von Physical Unclonable Functions (PUFs) zu generieren [4]. Physical Unclonable Functions sind hardwarebasierte Einwegfunktionen, die eindeutige Bitsequenzen auf Basis unkontrollierbarer Produktionsschwankungen erzeugen, ähnlich einem eindeutigen digitalen Fingerabdruck [5]. Diese durch das System vorgegebenen intrinsischen Parameter sind nicht vorherzusehen. Aus diesem Grund eignen sich diese Systeme zur Generierung eindeutig zuordenbarer digitaler Sicherheitsschlüssel. Zum Auslesen wird die PUF-Schaltung mit einem bestimmten Stimulus (Challenge), meist in Form einer digitalen Bitsequenz, beaufschlagt, worauf diese mit einer Antwortbitfolge (Response) antwortet.

Je nach Komplexität einer PUF-Schaltung können höhere Bitbreiten für Challenges und Responses erreicht werden, was zu einem größeren Adressraum führt. Abhängig von der maximalen Anzahl von Challenge-Response-Pairs (CRPs) wird zwischen Weak- und Strong-PUFs unterschieden. Weak-PUFs bieten nur eine kleine Anzahl von CRPs, weshalb in vielen Fällen zusätzliche softwarebasierte Verschleierungstechniken (Hashing, Key Obfuscation etc.) eingesetzt werden, um das interne Verhalten der PUF-Schaltung für den äußeren Betrachter zu verschleiern.

Hauptsächlich werden PUFs in kryptografischen Anwendungen sowie zur Authentifikation und Identifikation von Hardwarebausteinen eingesetzt. Dabei definiert die Zielapplikation die Anforderungen an eine PUF-Schaltung. Um die Performanz verschiedener PUFs vergleichen zu können, existieren verschiedene Sicherheitsmetriken. Diese Metriken quantifizieren u. a. das Streuungsmaß der Responsebits (Uniqueness) sowie die Stabilität der Ausgangsbitsequenzen unter Einwirkung wechselnder Umgebungseinflüsse (Reliability) [6]. Eine Realisierung einer 1-Bit-PUF sowie ein Design-Vorschlag für eine „Multi-Bit-PUF“ wurde bereits im MERAGEM Promotionskolleg erzielt [7]. Derzeit wird an einer neuen Architektur der PUF sowie einer Silizium-basierten Ausleseelektronik sowie Ansteuerungselektronik für eine Multi-Bit-PUF geforscht, das ein hybrides System darstellt [8]. Gedruckte PUFs könnten so neue Anwendungsgebiete im Bereich Smart Labeling erschließen. In Kombination mit einem gedruckten, drahtlosen Kommunikationsinterface (wie beispielsweise passiven NFC-Chips) könnten so langfristig Barcodes durch solche Smartlabels ersetzt werden. Die Vorteile dieser gedruckten Tags bestehen darin, dass diese, ähnlich wie Barcodes heute, auf die Produktverpackung aufgedruckt werden können. Beim Kassieren/

Authentifizieren/Identifizieren muss jedoch keine Sichtlinie zum Produkt mehr bestehen.

Um reale gedruckte PUFs realisieren zu können und deren Möglichkeiten zu bewerten, wurde ein Silizium-basiertes Testsystem zum automatisierten Auslesen und zur Bewertung einer neu entwickelten gedruckten PUF entworfen (siehe Abbildung 3). Ein eigens dafür entwickeltes Softwaretool ermöglicht die Emulation der PUF-Auswerteelektronik auf Basis von Simulationsdaten. Dabei können die PUF-Challenges frei konfiguriert und beliebig viele PUF-Instanzen automatisiert ausgewertet werden. Gleichmaßen soll das Softwaretool die reale Hardware-PUF mit Challenge-Response-Protokoll ansteuern und die Sicherheitsmetriken automatisiert berechnen.

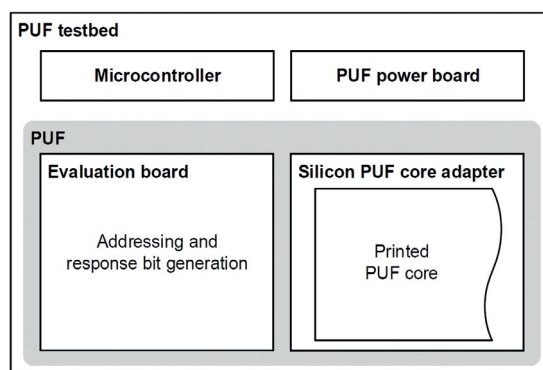


Abb. 3:  
PUF testbed architecture

## AUTOREN



**Gabriel Cadilha Marques M.Eng.**  
Doktorand, KIT  
gabriel.marques@kit.edu



**Lukas Zimmermann M.Sc.**  
Doktorand MERAGEM  
lukas.zimmermann@hs-offenburg.de



**Alexander Scholz M.Sc.**  
Doktorand MERAGEM  
alexander.scholz@hs-offenburg.de



**Prof. Dr. rer. nat.**  
**Jasmin Aghassi-Hagmann**  
jasmin.aghassi-hagmann@hs-offenburg.de

## Referenzen/References:

- [1] S. K. Garlapati et al., "Electrolyte-Gated, High Mobility Inorganic Oxide Transistors from Printed Metal Halides", ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5 (22), 11498-11502, DOI: 10.1021/am403131j
- [2] G. C. Marques et al., "Electrolyte-Gated FETs Based on Oxide Semiconductors: Fabrication and Modeling", IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64 (1), 279-285, DOI: 10.1109/TED.2016.2621777
- [3] G. C. Marques et al., "Digital power and performance analysis of inkjet printed ring oscillators based on electrolyte-gated oxide electronics", Applied Physics Letters, 2017, 111 (10), 102103, DOI: 10.1063/1.4991919
- [4] Zhang, Xi, Tong Ge, and Joseph S. Chang. "Fully-additive printed electronics: Transistor model, process variation and fundamental circuit designs." Organic Electronics 26 (2015): 371-379
- [5] Hori, Yohei, et al. "Quantitative and statistical performance evaluation of arbiter physical unclonable functions on FPGAs." Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig), 2010 International Conference on. IEEE, 2010
- [6] Bhargava, Mudit. Reliable, Secure, Efficient Physical Unclonable Functions. Diss. Carnegie Mellon University, 2013
- [7] A. T. Erozan, M. S. Golanbari, R. Bishnoi, J. Aghassi-Hagmann, and M. B. Tahoori, "Design and Evaluation of Physical Unclonable Function for Inorganic Printed Electronics", in proceedings of the International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), 2018, USA
- [8] L. Zimmermann, A. Scholz, A. Sikora, and Jasmin Aghassi-Hagmann, "A Hybrid Embedded System Environment for Automated Readout and Evaluation of a Printed Physical Unclonable Function", International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunication, 2018