



Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I: Kurzbericht

Verbundname: Erforschung passiver Funk-Sensorsysteme zur energieautarken Erschütterungs- und Vibrationsüberwachung

Akronym: ForMikro - UpFUSE

Teilvorhaben: Entwicklung nanoionischer Speicher und Kopplung mit piezoelektrischen MEMS

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Chemnitz, Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien

Förderkennzeichen: 16ES1062K

Laufzeit des Vorhabens: 1.10.2019 – 31.05.2024

Berichterstatter: Falk Schaller, Chris Stöckel, Sven Zimmermann

Projektleiter: Dr. Sven Zimmermann (Projektkoordinator)
Technische Universität Chemnitz, Zentrum für Mikrotechnologien

Tel.: +49 (0) 371 531-33671
e-mail: sven.zimmermann@zfm.tu-chemnitz.de

Datum: 20.12.2024

1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe der TU Chemnitz (TUC) bestand im Rahmen des Förderprojektes in der Entwicklung neuartiger nanoionischer Speicher und die Kombination dieser mit einem piezoelektrischen Wandler zur energieautarken Erschütterungs- und Vibrationsdetektion. Bei den nanoionischen Speichern handelt es sich um so genannte Memristoren. Diese verändern ihren Innenwiderstand in Abhängigkeit von der Intensität und der Zeitdauer einer Schreibspannung, welche an ihre Elektroden angelegt wird. Durch Polaritätswechsel der angelegten Spannung können die Memristoren zurückgesetzt werden, wofür jedoch deutlich höhere Ströme als zu ihrem Beschreiben erforderlich sind. Das Auslesen der Speicher erfolgt über eine Widerstandsmessung, wofür eine Lese-Spannung benötigt wird, die unter dem Schwellwert für das Beschreiben liegen sollte. Die Aufgabe bestand darin, Memristoren zu fertigen, welche in ihren elektrischen Parametern, Schreibspannung, Memristanz, Rücksetzspannung und Innenwiderstand, sowohl zur maximal möglichen Energiemenge, die der Piezowandler liefert, als auch zu verschiedenen Drahtloschnittstellen zum Auslesen und Zurücksetzen kompatibel sind. Letztere wurden im Rahmen des Projektes von den Projektpartnern Fraunhofer ENAS und Universität Paderborn (UPB) entwickelt. Darüber hinaus bestand eine weitere Aufgabe in der Fertigung der piezoelektrischen MEMS, welche vom Projektpartner Fraunhofer ENAS entworfen wurden, in den Reinräumen der TU Chemnitz. Schließlich mussten die MEMS und die nanoionischen Speicher über eine geeignete Koppelschaltung miteinander verbunden werden. Dazu mussten verschiedene Schaltungskonzepte, z.B. Brückenschaltung nach Graetz oder Ladungspumpe nach Villard-Greinacher, aufgebaut und getestet werden. Zusammen mit den Projektpartnern UPB und Fraunhofer ENAS sollten die aufgebauten energieautarken Vibrationssensoren in eine Plattform zum drahtlosen Auslesen und Zurücksetzen integriert und im Feldversuch bei den Industriepartnern getestet werden.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Sensorische RFID-Tags für die Überwachung von Gebäuden und Industrieanlagen oder für den Einsatz im Logistikbereich sind schon seit längerer Zeit intensiv in der Entwicklung und haben teilweise bereits Industriereife erlangt. Am gebräuchlichsten sind dabei die aktiven Tags, welche mittels einer integrierten Energiequelle, Batterie oder Akku, versorgt werden und ständig mit dem Reader kommunizieren. Die dadurch notwendigen turnusmäßigen Wartungshandlungen, Batteriewechsel oder Aufladen der Akkus, sind jedoch aufwändig und damit teuer. Darüber hinaus generieren verbrauchte Batterien, welche häufig toxische Substanzen enthalten, starke ökologische Probleme. Bedingt durch den rasant steigenden Bedarf an mobiler Sensorik, vor allem durch neuere Entwicklungen in den Bereichen Industrie 4.0, Digitalisierung und Robotik, wurde zunehmend der Wunsch nach energieautarken Sensoren, die ohne Batterien oder sequentielle Ladezyklen funktionieren, drängend. Erste Ansätze verwendeten Energie-Harvesting-Konzepte oder große Kondensatoren, welche bei Kontakt zum Reader geladen wurden, um die Standzeit der integrierten Energiespeicher zu erhöhen. In Kombination mit sehr sparsamer Elektronik konnten hier bereits einige Wochen überbrückt werden, ohne dass eine Wartungshandlung notwendig war. Sind die Speicher jedoch leer bevor eine Energiequelle zur Verfügung steht, droht irreversibler Datenverlust oder ein Ausfall der Sensoren. Die großen Fortschritte in der Materialforschung im letzten Jahrzehnt gestatteten die Entwicklung völlig neuer nichtflüchtiger Speicherkonzepte, welche vorwiegend auf materialinhärenten Effekten basieren. Im Rahmen des Vorhabens sollte erstmalig ein neues nanoionisches Speicherkonzept, der Memristor verwendet werden, um die Energie eines piezoelektrischen Messwandlers für inertielle Ereignisse in Form einer Widerstandsänderung integrierend zu speichern. Dafür soll außer der Messgröße selbst, keine weitere Hilfsenergie für die Messung und Speicherung benötigt werden.

3 Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Projektes wurde sich auf eine erste Konfiguration der angestrebten Sensorplattform verständigt. Dies beinhaltete auch die grundlegende Spezifikation des piezoelektrischen MEMS hinsichtlich Frequenzbereich und Schwingungsamplitude. Aus diesen Spezifikationen leiteten sich wiederum elektrische Anforderungen an die nanoionischen Speicher ab.

Zu Beginn der praktischen Arbeiten wurde sich auf die Optimierung der Herstellungstechnologie der Memristoren konzentriert, um ein Beschreiben dieser durch die piezoelektrischen MEMS sowie ein Auslesen und Zurücksetzen mittels der zu entwickelnden Drahtlosschnittstellen zu ermöglichen. Im Projektzeitraum wurde im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik eine Abscheideanlage mit aktiver Reaktivgasregelung und in-situ Hochtemperaturbehandlung angeschafft, welche für die Arbeiten im Projekt intensiv genutzt wurde. Bereits kurz nach dem Start der Präparationen kam es zur Komplettschließung der Reinräume der TU Chemnitz aufgrund der Covid19-Pandemie für einen Zeitraum von 3 Monaten. In dieser Zeit waren keine Präparationen oder Messungen möglich. Anschließend befand sich der Reinraum in einem reduzierten Betrieb mit 10 % der üblichen Belegschaft, bis dieser nach einem halben Jahr in einen 25 %-Betrieb überführt wurde. Der Normalbetrieb bei vollständiger Belegschaft wurde erst ca. 1 Jahr nach dem Ausbruch der Pandemie wieder freigegeben. Diese Umstände machten eine Verlängerung des Vorhabens um 8 Monate notwendig, welche im Mai 2023 bewilligt wurde. Insgesamt lief das Vorhaben somit bis zum 31.05.2024. Durch die Verlängerung konnten alle vorgesehenen Arbeitspakete bearbeitet und das Vorhaben mit der Erfüllung aller Meilensteine abgeschlossen werden.

4 Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden zahlreiche Konzepte analoger nanoionischer Speicher unter Verwendung verschiedener memristiver Materialien und Elektrodenkonfigurationen aufgebaut und charakterisiert. Dabei wurden multiple Erfahrungen mit diesen Bauteilen gesammelt und der Einfluss von Prozessparametern auf das elektrische Verhalten untersucht. Auch gelang es, neue Testkonzepte für diese Bauteile zu entwickeln, um diese in adäquaten Zeiten in ihrem transienten Verhalten charakterisieren zu können. Große Aufmerksamkeit wurde schließlich auf die Eliminierung des unerwünschten Selbstrücksetzens der Memristoren über lange Zeiträume gelegt.

Die Fertigung der piezoelektrischen MEMS mit Wandlerkaskaden von bis zu 20 Einzelelementen wurde entsprechend der Entwürfe des Fraunhofer ENAS erfolgreich umgesetzt. Mit diesen MEMS konnten Ausgangsspannungen von bis zu 1,5 V bei 1 g Beschleunigung erzielt werden. Unter Verwendung verschiedener Koppelschaltungen, von denen sich schließlich eine zweistufige Ladungspumpe nach dem Villard-Greinacher-Prinzip als Effizienteste herausstellte, konnte schließlich erstmalig gezeigt werden, dass es möglich ist, einen nanoionischen Speicher mit einem piezoelektrischen MEMS zu beschreiben, ohne dass dafür zusätzliche Hilfsenergie erforderlich ist. Diese Anordnung wurde schließlich um eine Drahtlosschnittstelle zum Auslesen und Zurücksetzen der inhärenten Speicher, entworfen von den Projektpartnern UPB und ENAS, ergänzt. Am Ende stand ein funktionaler Demonstrator, welcher im Laborversuch und am Motorenprüfstand der MFS-Vathauer Antriebstechnik GmbH getestet wurde, zur Verfügung.

5 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Zusammenarbeit der Projektpartner an den verschiedenen Institutionen wurde durch zweiwöchige Meetings zum Austausch von Ergebnissen und Anforderungen umgesetzt. Darüber hinaus gab es bilaterale Absprachen zwischen den Projektbearbeitern zur Diskussion von Detailthemen. Innerhalb der Projektlaufzeit wurden vier große Projekttreffen durchgeführt, auf denen sich die Partner in Präsenz trafen und die Projektergebnisse und Fortschritte diskutierten. An diesen Projekttreffen nahmen auch die meisten der insgesamt neun Industriepartner teil, um sich über den Fortschritt des Projektes und die gewonnenen Ergebnisse zu informieren. Dabei kam es zu zahlreichen Diskussionen, welche vordergründig die Überführung der Technologie in die praktische Anwendung betrafen.

Mit Vertretern der Firmen „NXP Semiconductors Germany GmbH“, „Schaeffler Technologies AG“, „DEHN SE + Co KG“, „microsensys GmbH - RFID in motion“, „tagltron GmbH“, „Ulrich Rotte Anlagenbau und Fördertechnik GmbH“, „EDC Electronic Design Chemnitz GmbH“, „MSF-Vathauer Antriebstechnik GmbH & Co. KG“ und „Venjakob Maschinenbau GmbH & CO. KG“ wurden mehrere Workshops durchgeführt, um die Arbeiten im Projekt besser auf deren Anforderungen zuschneiden zu können. Die Firmen DEHN und microsensys traten am 26.10.2021 schließlich dem Konsortium als assoziierte Partner bei.



Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II: Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

Verbundname:	Erforschung passiver Funk-Sensorsysteme zur energieautarken Erschütterungs- und Vibrationsüberwachung
Akronym:	ForMikro - UpFUSE
Teilvorhaben:	Entwicklung nanoionischer Speicher und Kopplung mit piezoelektrischen MEMS
Zuwendungsempfänger:	Technische Universität Chemnitz, Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien
Förderkennzeichen:	16ES1062K
Laufzeit des Vorhabens:	1.10.2019 – 31.05.2024
Berichtersteller:	Falk Schaller, Chris Stöckel, Sven Zimmermann
Projektleiter:	Dr. Sven Zimmermann (Projektkoordinator) Technische Universität Chemnitz, Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien
	Tel.: +49 (0) 371 531-33671 e-mail: sven.zimmermann@zfm.tu-chemnitz.de
Datum:	20.12.2024

1 Aufgabenstellung

Die fortschreitende Digitalisierung in nahezu allen Lebensbereichen hat in den letzten Jahren die Zahl an intelligenten Sensoren, die Wandlung, Datenverarbeitung und -speicherung, sowie Kommunikationsschnittstellen in einem System kombinieren, stark ansteigen lassen. Wurden im Jahr 2010 noch 6 Milliarden dieser Systeme pro Jahr verkauft, stieg deren Zahl bis zum Jahre 2020 auf ca. 30 Milliarden verkaufte Einheiten an. Hochrechnungen zufolge könnten es bis zum Jahre 2030 über 100 Milliarden intelligente Sensoren sein, die jährlich neu zum Einsatz gebracht werden. Diese Entwicklung wird in absehbarer Zeit ein gewaltiges Energie- und Ressourcenproblem generieren. Auf der einen Seite müssen systeminterne Akkumulatoren in kurzen Intervallen nachgeladen werden. Auf der anderen Seite bestehen Batterien aus wertvollen Rohstoffen und erzeugen am Ende ihrer Lebensdauer umweltgefährdende Abfälle.

An diesen Punkt setzt das Vorhaben ForMikro-UpFUSE an, indem es die Entwicklung einer Sensorplattform adressiert, welche inertielle Ereignisse, Erschütterungen und Vibrationen, über sehr lange Zeiträume erfassen, verarbeiten und speichern kann. Die Sensorplattform benötigt dafür keinerlei zusätzliche Hilfsenergie, es werden ebenfalls keine Energie-Harvesting-Konzepte eingesetzt. Möglich wird dies, indem der Wandler zwischen mechanischer und elektrischer Größe bereits ausreichend Energie erzeugt, um die Messdaten zu verarbeiten und zu speichern. In Abbildung 1 ist das Grundprinzip dieser Sensorplattform illustriert.

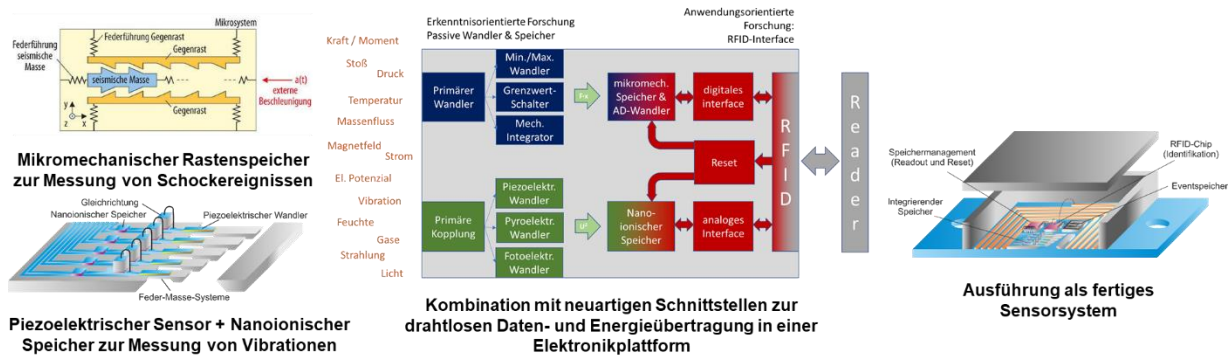


Abbildung 1: Schema der vorgeschlagenen Sensorplattform

Im Vorhaben wurden prinzipiell zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Beim mechanischen Konzept verursacht ein einwirkendes Erschütterungsereignis das Auslenken einer seismischen Masse, welche anschließend in laterale Sperrklinken einrastet und nicht in seine Ursprungsposition zurückkehren kann. Durch eine Kaskade dieser Sperrklinken kann die einwirkende Erschütterung in ihrer Intensität quantifiziert werden. Das Auslesen erfolgt über einen mechanischen AD-Wandler, welcher mikrotechnologisch an der seismischen Masse befestigt ist. Mittels elektrostatischer Kammantriebe können die Sperrklinken zurückgezogen werden, wodurch die seismische Masse in seine Ausgangslage zurückkehren kann. Der Sensor wird auf diese Weise zurückgesetzt. Das mechanische Konzept sollte weitestgehend beim Projektpartner RUB entwickelt und technologisch umgesetzt werden.

Die Aufgabe der Technischen Universität Chemnitz bestand in der Umsetzung des zweiten Konzeptes der energieautarken Sensorik, dem nanoionischen Ansatz. Die Wandlung erfolgt bei diesem Ansatz mittels eines piezoelektrischen MEMS, das bei Einwirken von Vibrationen in der Resonanzfrequenz des MEMS ein elektrisches Sinussignal erzeugt. Als Material für die Wandler wurde Aluminiumnitrid, AlN, verwendet. Der Entwurf des MEMS wurde am Fraunhofer ENAS durchgeführt, die Fertigung der Struktur erfolgte in den Reinräumen der TU Chemnitz. Das piezoelektrische MEMS ist energieliefernd, wodurch sich die Möglichkeit bietet, die generierten Daten in einem nachgelagerten nanoionischen Speicher zu verarbeiten und zu speichern. Bei dieser Art der nichtflüchtigen Speicher handelt es sich um einen so genannten Memristor, ein zweipoliges passives Bauelement, dessen Innenwiderstand sich in Abhängigkeit von Zeitdauer und Intensität der angelegten Spannung verringert oder erhöht, je nach Polarität. Die Entwicklung des nanoionischen Speichers, dessen technologische Umsetzung und die Adaption auf die Anforderungen des piezoelektrischen MEMS wurde im Projekt von der TU Chemnitz umgesetzt. Darüber hinaus

bestand die Aufgabe in der Entwicklung einer geeigneten Koppelschaltung zwischen MEMS und Memristor, um das Sinussignal des Wandlers in eine Gleichspannung mit genügend hohem Betrag zu transformieren, welche genügt, um den Memristor zu beschreiben. Der Memristor kann mit einer Gleichspannung ausgelesen werden, welche unterhalb seiner Setzschwelle liegt und ihn dadurch nicht verändert. Das Zurücksetzen kann mittels einer höheren Spannung entgegengesetzter Polarität vorgenommen werden. Die dafür notwendigen Kommunikationsschnittstellen auf RFID- und NFC-Basis sollten von den Projektpartnern Fraunhofer ENAS und Universität Paderborn entwickelt werden.

2 Wesentliche Ergebnisse des Projektes

2.1 Organisation des Projektes und Zusammenarbeit der Partner

Eine Übersicht aller am Projekt beteiligten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen ist in Tabelle 1 dargestellt. Am Projektbeginn wurden von sechs Industrievertretern Letter of Intent (LOI) bereitgestellt, welche ihr Interesse am geplanten Vorhaben zum Ausdruck brachten. Im weiteren Projektverlauf kamen mit den Firmen DEHN und Venjakob weitere interessierte Partner zum Industriebeirat hinzu. Die Firmen DEHN und microsensys traten schließlich dem Konsortium als assoziierte Partner ohne eigene Projektförderung bei.

Tabelle 1: Liste der beteiligten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen

Partner	Bereich	Funktion im Projekt
TU Chemnitz  TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ	Forschungseinrichtung	Projektkoordinator
Ruhr Universität Bochum 	Forschungseinrichtung	Konsortialpartner
Universität Paderborn 	Forschungseinrichtung	Konsortialpartner
Fraunhofer ENAS 	Forschungseinrichtung	Konsortialpartner
NXP Semiconductors Germany GmbH 	Führender Systemanbieter RFID-Identifikationslösungen	Industriebeirat, Bereitstellung eines LOI
EDC Electronic Design Chemnitz GmbH 	Systementwickler ASIC- und Elektronikdesign	Industriebeirat, Bereitstellung eines LOI

microsensys GmbH - RFID in motion 	Systemanbieter RFID-Sensorlösungen	Industriebeirat, Bereitstellung eines LOI, später dem Konsortium als assoziierter Partner beigetreten
tagltron GmbH 	Systemanbieter RFID im Logistikbereich	Industriebeirat, Bereitstellung eines LOI
MSF-Vathauer Antriebstechnik GmbH & Co. KG 	Endanwender Antriebstechnik	Industriebeirat, Bereitstellung eines LOI
Schaeffler Technologies AG & Co. KG 	Endanwender Lagertechnik / Maschinenbau	Industriebeirat
Ulrich Rotte Anlagenbau und Fördertechnik GmbH 	Endanwender Fabrikautomatisierung	Industriebeirat, Bereitstellung eines LOI
DEHN SE + Co KG 	Endanwender Sicherheitstechnik	Industriebeirat, später dem Konsortium als assoziierter Partner beigetreten
Venjakob Maschinenbau GmbH & CO. KG 	Endanwender Lackiertechnik	Industriebeirat

Das Projektkonsortium aus den beteiligten Forschungseinrichtungen traf sich 14-tägig zu einem Abstimmungsmeeting, wo aktuelle Ergebnisse besprochen und die nächsten Schritte geplant wurden. Diese Treffen fanden in der Regel online statt. Darüber hinaus gab es innerhalb des Konsortiums zahlreiche bilaterale Absprachen, welche vor allem an den Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Projektthemen meist wöchentlich durchgeführt wurden.

Den gesamten Projektablauf aus der organisatorischen Perspektive zeigt die Grafik in Abbildung 2. Das Projekt wurde am 1.10.2019 gestartet und lief offiziell bis zum 31.05.2024. Als einen der größten Rückschläge im Projektzeitraum kann die COVID19-Pandemie bezeichnet werden. An deren Beginn wurden die Reinräume der TU Chemnitz für 3 Monate vollständig geschlossen, was zu einer teilweisen Handlungsunfähigkeit großer Teile des Konsortiums führte. Danach wurden die Reinräume stufenweise wieder geöffnet, wobei anfänglich ein Betrieb mit 10 % später 25 % der vollständigen Reinraumbelastung genehmigt wurde. Aufgrund zahlreicher liegen gebliebener Projekt- und Auftragsarbeiten gestaltete sich die weitere Projektbearbeitung als schleppend und die Präparationen hatten lange Durchlaufzeiten. Erst nach einem Jahr wurde ein Normalbetrieb des Reinraumes für Geimpfte und Genesene vom Rektorat der TU Chemnitz gestattet, wodurch der Reinraum wieder auf seine Ausgangskapazität hochgefahren werden konnte. Dies machte schließlich eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 8 Monate erforderlich, um die Ausfälle aufzuarbeiten und die Meilensteine im Projekt zu erreichen.

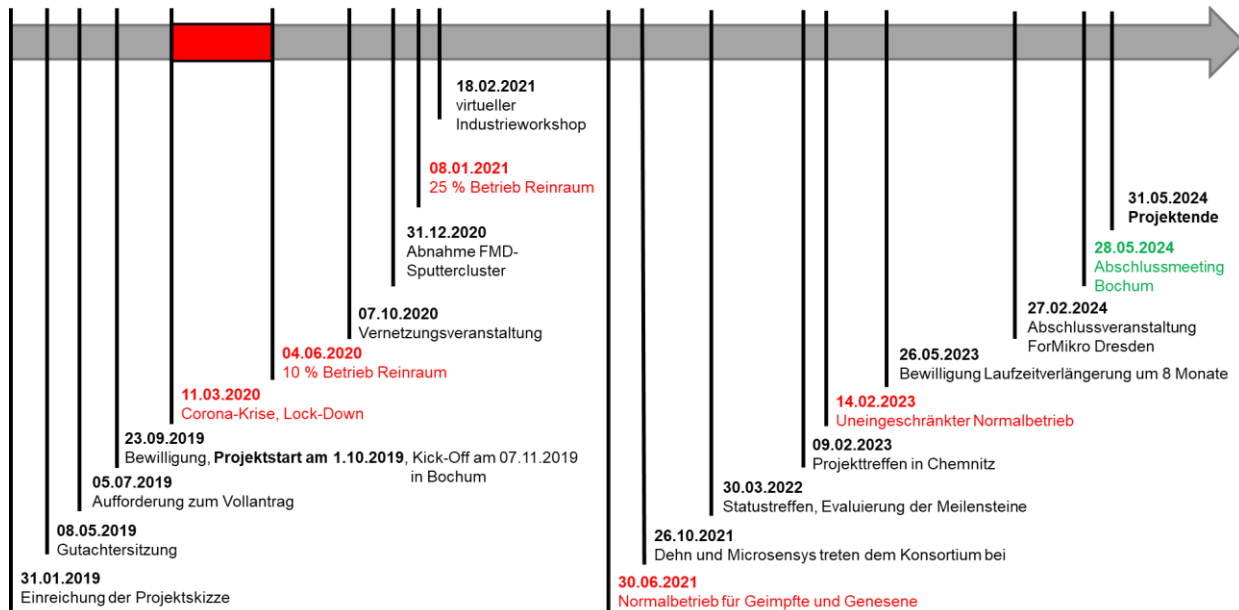


Abbildung 2: Ablauf des Projektes aus organisatorischer Sicht

Im Projekt wurden insgesamt sieben Projekttreffen abgehalten, wovon drei, vom Projektträger organisiert, die gesamten ForMikro-Projekte betrafen und die restlichen im Konsortium mit den Industrievertretern abgehalten wurden. Hierbei wurden Anforderungen an das System aus Industriesicht definiert, die Tests der Sensoren in den Anwendungsszenarien vorbereitet und Anknüpfungspunkte für weitere Kooperationen nach Ende des Projektes diskutiert. Sieben der insgesamt neun Industriepartner begleiteten das Konsortium über die gesamte Laufzeit des Projektes, vier davon nahmen am Abschlussmeeting am 28.05.2024 in Bochum teil.

2.2 AP 1: Definition der Anforderungen

Unter Berücksichtigung der Erfordernisse der angedachten Anwendungsszenarien und beziehungsweise auf die Anmerkungen und Hinweise des Industriebeirates wurden Anforderungen an die aufzubauende Sensorplattform abgeleitet. Diese Anforderungen wurden für das erste Demonstratorsystem folgendermaßen formuliert:

Subsystem Wake-Up-System (WUPS):

- Definition der Messsignale im Bereich: $100 \text{ Hz} < f < 10.000 \text{ kHz}$, $0,1\text{g} < a < 10\text{g}$
- Systemgröße: max. $15 \times 15 \text{ mm}^2$
- Optimierung des Systems für den resonanten Betrieb mit einer definierten Schadfrequenz
- Layout: erster Waferdurchlauf mit 8 Designvariationen (WUPS1100, WUPS1200, WUPS2000, WUPS3000 mit 2 Frequenzbereichen pro Design)
- Fertigung von 8 Wafern im ersten Run

Subsystem Nanoionischer Speicher:

- Definition der Messsignale im Bereich: $100 \text{ Hz} < f < 10.000 \text{ kHz}$
- Eingangsgrößen: $0,2 \text{ V} < U < 3 \text{ V}$
- Innenwiderstand: $R \geq 10 \text{ M}\Omega$
- Chipgröße: $3 \times 6 \text{ mm}^2$
- Relative Memristanz: $0,1 - 1 \text{ \%}/\text{min}$
- Schwellenspannung: $\geq 0,5 \text{ V}$

Um den kombinierten Betrieb des nanoionischen Speichers mit dem piezoelektrischen MEMS realisieren zu können, mussten zwei wesentliche Anforderungen an den Speicher erfüllt sein. Auf der einen Seite sollte die Spannungsschwelle, welche zum Beschreiben des Memristors überschritten werden muss, möglichst gering sein, da vor allem im Bereich verschiedener Schadfrequenzen keine hohen Schwingungsamplituden und somit auch keine hohen Ausgangsspannungen des MEMS zu erwarten sind. Auf der anderen Seite sollte der Speicher einen möglichst hohen Innenwiderstand haben, da der piezoelektrische Wandler zwar mobile Ladungsträger generieren jedoch keine hohen Ströme treiben kann. Auf der Basis dieser Anforderungen wurden die Speicher entwickelt.

2.3 AP 2: Nanoionisches Konzept

2.3.1 Optimierte nanoionische Speicher (AP 2.1)

Die Anforderungen, welche hinsichtlich der elektrischen Spezifika an die Memristoren gestellt wurden, schränkten die Materialauswahl für die memristive Schicht ein. Die angestrebte Speicherung analoger Messwerte fokussierte die Arbeiten auf die Valenzwechselsysteme, VCM, zu deren bekanntesten Vertretern das rutil Titanoxid gehörte. Dabei handelt es sich um eine spezielle Phase des TiO_2 -Kristalls, welcher über offene Brückensauerstoffbindungen verfügt. Die Aktivierungsenergie, welche für die Bewegung von Sauerstoffionen entlang dieser freien Bindungen benötigt wird, ist sehr gering, was bedeutet, dass das Bauteil bereits bei sehr niedrigen Spannungen mit einer Widerstandsänderung reagiert [7]. In Abbildung 3 sind die **Memristoren der ersten Generation** dargestellt, welche im Projekt ForMikro-UpFUSE Anwendung fanden. Diese Memristoren bestanden aus den Schichtstapel $\text{Pt}/\text{Ti}_4\text{O}_7/\text{TiO}_2/\text{Pt}$. Die memristive Schicht war insgesamt 50 nm dick. Im elektrischen Verhalten lässt sich erkennen, dass die Bauteile bei Anlegen einer Schreibspannung von 1 V mit einem nahezu linearen Abfall ihres Innenwiderstandes reagierten. Auch nach 4 Tagen konnte keinerlei Sättigungseffekt beobachtet werden, womit diese Memristoren für einen angestrebten Langzeiteinsatz geeignet schienen. Auf der rechten Seite ist das elektrische Verhalten gezeigt, wenn die Spannungsschwelle zum Beschreiben unterschritten wird, in diesem Falle 100 mV, welche zum simultanen Auslesen über einen längeren Zeitraum verwendet wurden. Die Memristoren zeigen unmittelbar nach dem Unterschreiten der Schreibspannung einen rasanten Relaxationseffekt infolge dessen der Innenwiderstand wieder zu steigen beginnt. Dieses Verhalten wird durch die Reintegration von Sauerstoff in die memristive Schicht [8] verursacht und widerstreitet der angestrebten Anwendung als integrierender Langzeitspeicher. Der Effekt, welcher das Projektteam die gesamte Laufzeit hindurch begleiten sollte, wurde von diesem mangels geeigneter Nomenklatur aus der Literatur als „Fall-Back“-Effekt bezeichnet. Es ist erkennbar, dass der Fall-Back-Effekt einer Sättigung entgegenstrebt, der initiale Innenwiderstand wird mittels dieser passiven Art des Zurücksetzens nicht erreicht.

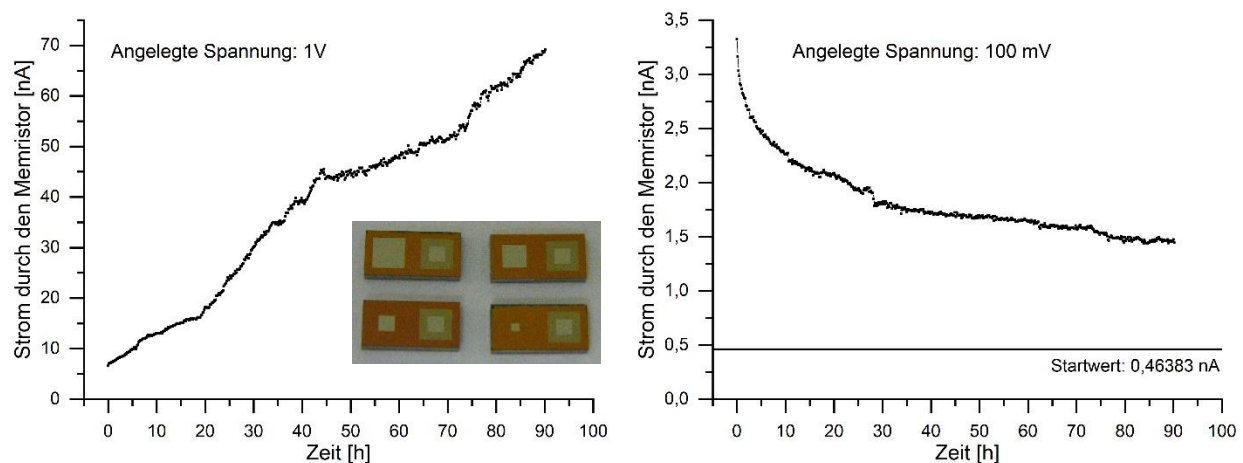


Abbildung 3: Elektrisches Verhalten der Memristoren über vier Tage, (links) Setzen mit einer Spannung von 1 V, (rechts) Auslesen mit einer Spannung von 0,1 V

Aufbauend auf den Ergebnissen, welche an den Memristoren der ersten Generation gemessen wurden, sind neue Memristoren mit optimiertem Schichtsystem angefertigt worden. Querschnitte, die den konstruktiven Aufbau dieser **Memristoren der zweiten Generation** zeigen, sind in Abbildung 4 gezeigt. Durch das Design der Schichtstapel entsteht ein Metall-Halbleiter-Übergang zwischen der memristiven TiO_x -Schicht und der Deckelektrode. Durch diese „Schottky-Diode“ kann der Stromfluss über den nanoionischen Speicher skalierbar begrenzt werden. Durch die Definition der Schichtdicke des TiO_x und der Deckelektrodenfläche kann der Sperrstrom über das Bauteil so gewählt werden, dass ein Optimum zwischen den konträren Anforderungen der maximalen Piezo-MEMS-Ströme und der minimal benötigten Stromstärke für die Auslese-Elektronik gefunden werden kann.

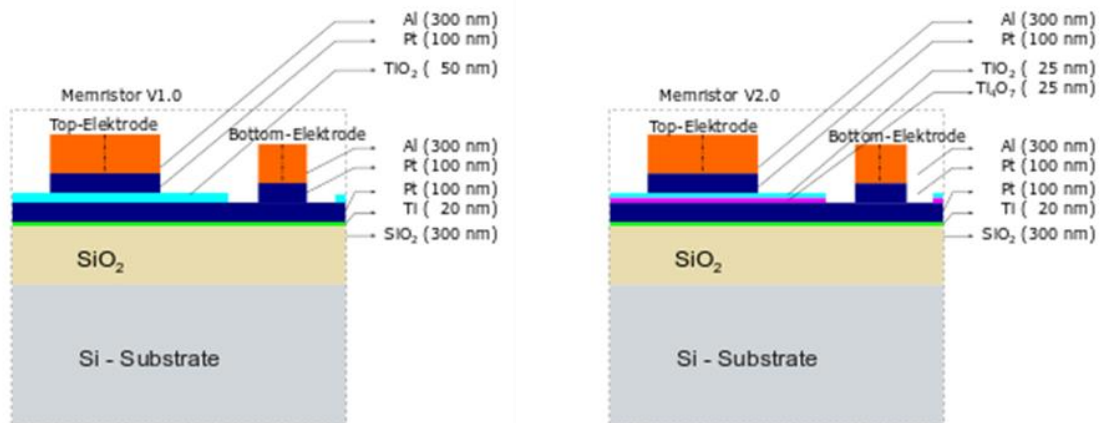


Abbildung 4: Verschiedene Schichtsysteme der TiO_x -Memristoren, links) unter Verwendung einer Einzelschicht aus rutilem TiO_2 , rechts) mit einer gradierten Schicht aus Ti_4O_7 und TiO_2

Für die Optimierung der memristiven Schichtsysteme wurde im Rahmen der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland, FMD, eine spezielle Abscheidungsanlage für Metalloxide am Fraunhofer ENAS angeschafft, welche der TU Chemnitz vollumfänglich zugänglich ist. Die memristive TiO_2 -Schicht im linken Teil der Grafik wurde mit einem konstanten Reaktivgasfluss abgeschieden. Für die nanoionischen Speicher im rechten Teil von Abbildung 4 kam ein anderes Rezept mittels aktiver Reaktivgasregelung zum Einsatz. Durch die Strukturierung der TiO_x -Schichten wurde ein Bereich der Pt-Bodenelektrode ausgespart. Anschließend wurden die Platin-Deckelektrode und eine weitere Aluminium-Deckschicht abgeschieden. Die Pt-Deckelektrode ist für die Ausbildung einer Schottky-Barriere notwendig und die darüber liegende 300 nm Al-Schicht ermöglicht ein nachgelagertes Drahtboden.

In Abbildung 5 sind XRD-Messungen zu den nanoionischen Speicherzellen aus Abbildung 4 links dargestellt. Die Röntgendiffraktometrie (XRD) ist eine Methode zur Untersuchung von Zusammensetzung und Struktur von kristallinen Stoffen. Im Diffraktogramm können mittels der Intensität von Peaks über den Beugungswinkel Rückschlüsse auf die Gitterparameter des Kristallsystems gezogen und geschlussfolgert werden, welches Titanoxid für die memristive Schicht angenommen werden kann. Im Rahmen der Optimierung der nanoionischen Speicher wurden verschiedene Herstellungsvarianten umgesetzt und anschließend analysiert.

Direkt nach der Abscheidung wurde in der XRD-Untersuchung ein für rutiles TiO_2 signifikanter Peak bei $27,4^\circ$ für die Millerschen Indizes (hkl) „(110)“ und auch die Wiederkehrende bei $56,6^\circ$ mit „(220)“ gefunden. Der höchste Peak im oberen Diffraktogramm deutet allerdings bei $68,2^\circ$ mit „(142)“ auf Ti_4O_7 hin. Dieser Peak weist die höchste Intensität auf, was darauf schließen lässt, dass es sich um eine Misch-Titanoxid-Schicht aus TiO_2 und Ti_4O_7 handelt. Durch eine Temperung nach dem Abscheiden mit einer Temperatur von 800°C und einer Zeitdauer von 40 Minuten, konnte eine Reduzierung des Peaks bei $68,2^\circ$ beobachtet werden und eine Zunahme der Intensität der Peaks bei $27,4^\circ$, $54,3^\circ$ und $56,6^\circ$.

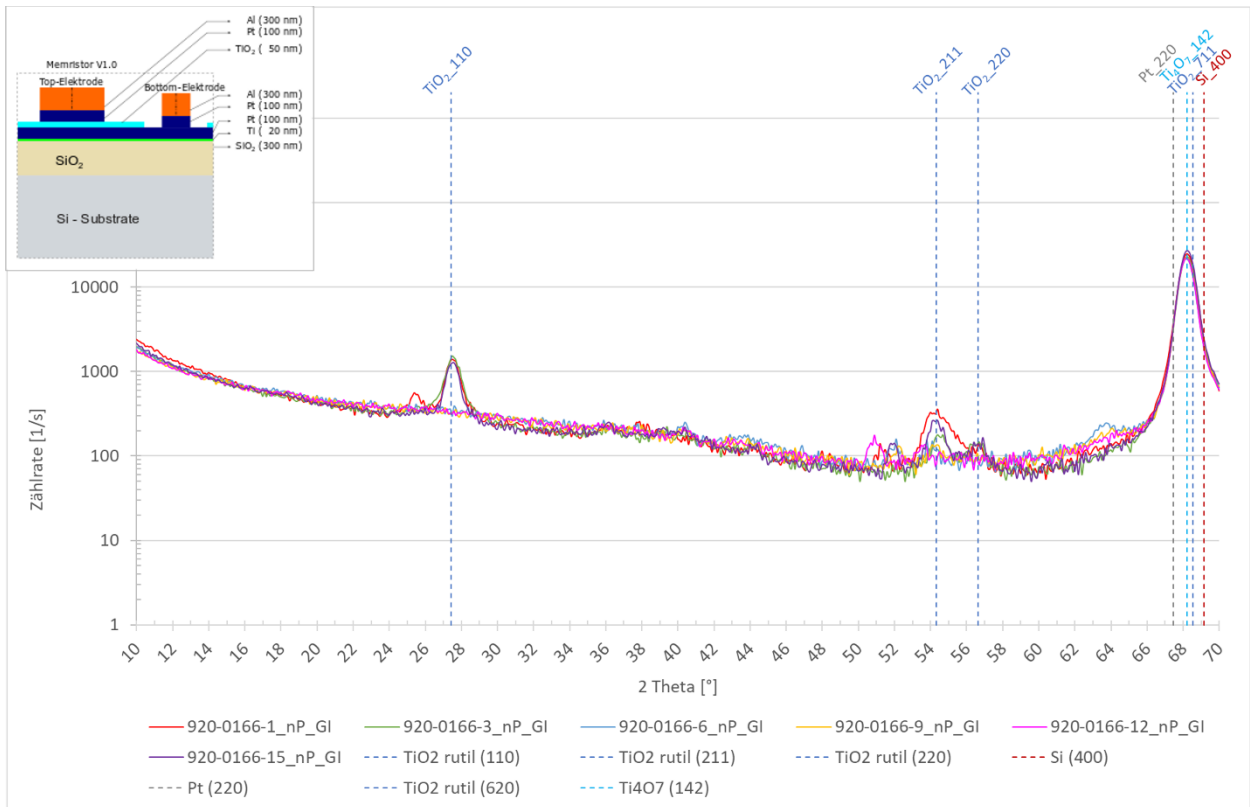


Abbildung 5: XRD-Messungen von sechs verschiedenen Wafern mit memristiven TiO_x-Schichten, hergestellt über eine PVD-Abscheidung mit konstantem Reaktivgasfluss

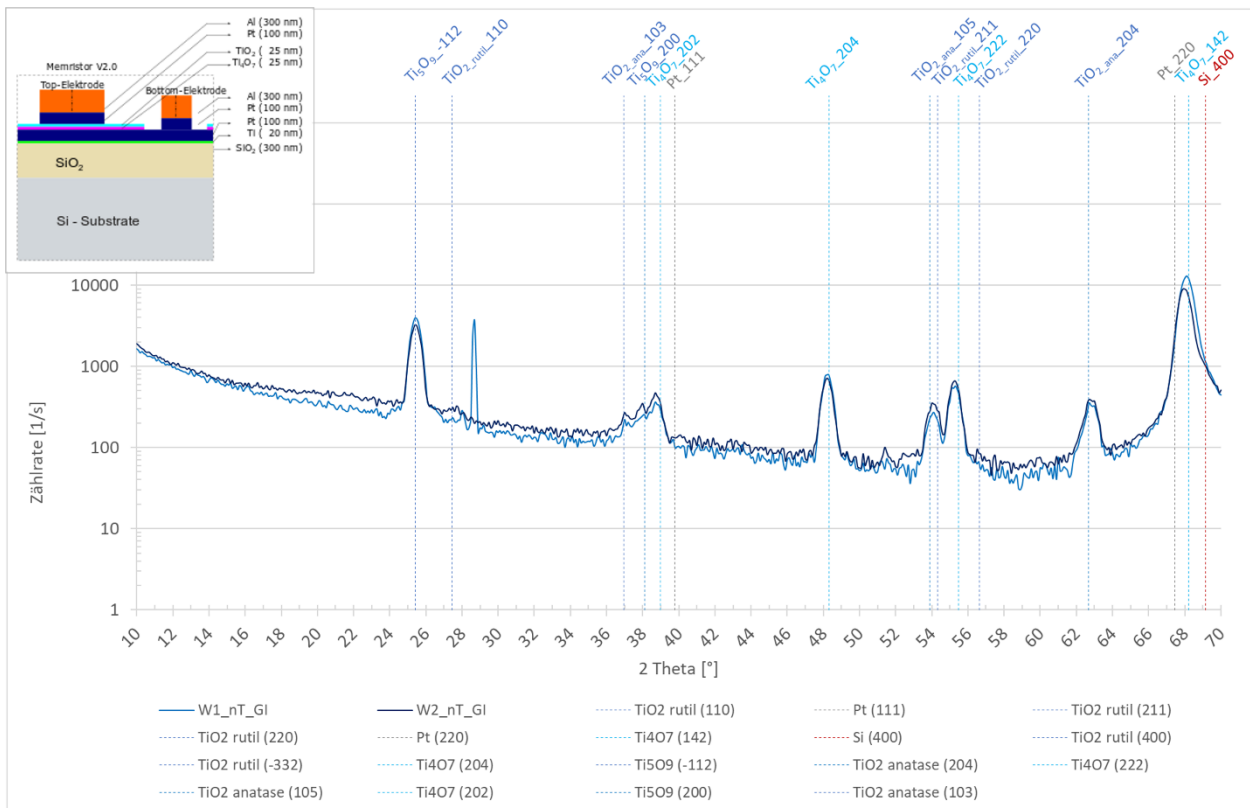


Abbildung 6: XRD – Messungen von zwei verschiedenen Wafern mit memristiven TiO_x-Schichten, hergestellt über eine PVD-Abscheidung mit aktiver Reaktivgasregelung

Daraus lässt sich ableiten, dass sich durch das anschließende Tempern Sauerstoff in die Kristallschicht eingelagert hat und Teile des Ti_4O_7 in TiO_2 umgewandelt wurden. Jedoch reichte das Tempern nicht aus, um den Peak bei $68,2^\circ$ vollständig abzubauen. Aus diesem Grund wurde in einem nächsten Schritt, während des Tempervorgang Sauerstoff in den Prozessraum eingeleitet. Die verbesserten elektrischen Eigenschaften der Chips deuten auf eine homogenere rutilen TiO_2 -Schicht hin.

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt zwei XRD-Mesungen zum Memristoraufbau in Abbildung 4 rechts. Bei dieser Variante ist ein Vier-Schicht-System mit einer kombinierten Schicht aus Ti_4O_7 und rutilen TiO_2 untersucht worden. Es zeigen sich mehrere Peaks, die auf verschiedene Titanoxide hinweisen, vordergründig jedoch Ti_4O_7 und Ti_5O_9 . Darüber hinaus sind Peaks von anatasem TiO_2 sichtbar. Die Peaks von rutilen TiO_2 sind sehr gering. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das vorliegende Schichtsystem aus Ti_4O_7 , Ti_5O_9 und Ti_5O_9 besteht. Die elektrischen Eigenschaften dieser Chips zeigten ebenfalls ein memristives Verhalten, jedoch kam es beim Anlegen einer Spannung zunächst zu einer Verringerung des Stromflusses, bevor der Stromfluss konstant anstieg. Reziprok betrachtet stieg der Wert des Innenwiderstandes zunächst in Form einer Sättigungskurve an und reduzierte sich anschließend stetig. Diese Art Einschwingvorgang erstreckte sich über ca. 2 bis 3 Minuten. Durch diese Trägheit wurde die Variante Memristor in Abbildung 4 rechts für die weiteren Arbeitspakete im Projekt nicht weiterverfolgt.

Der Einfluss der Elektrodengröße wurde an gesägten Einzelchips mit unterschiedlichen Elektroden-Geometrien untersucht. Dabei wurde der Stromfluss über acht verschiedene Größen der Deck-Elektrode gemessen. In Abbildung 7 ist ein Einzelchip mit 8 unterschiedlich großen Elektroden-Geometrien (Mem1 bis Mem8) dargestellt.

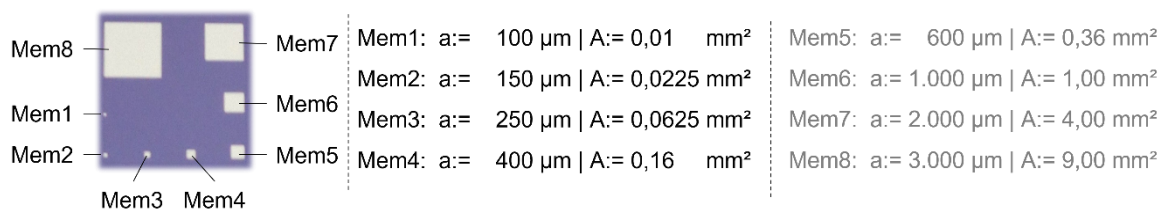


Abbildung 7: Einzelchip mit acht unterschiedlichen Elektroden-Geometrien, deren Abmessungen und Flächeninhalten

Im rechten Teil der Abbildung 7 sind die Kantenlängen der quadratischen Deckelektroden sowie deren Flächeninhalte aufgezeigt, wobei die Flächen der Elektroden Mem5 bis Mem8 aufgrund ihrer Größe im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet werden sollen. Die Abbildung 8 zeigt exemplarisch zwei Grafen mit den Stromverläufen für Mem1 und Mem4. In den Einzelgrafen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Stromschleife 1,3,5,7 und 10 dargestellt. Während dieser Charakterisierung wurde über dem jeweiligen memristiven Bauelement die Spannung von 0 bis 3 V in 50 mV Schritten für 0,1 s sukzessive erhöht und anschließend mit der gleichen Schrittweite und Zeiteinstellung von 3 V zurück zu 0 reduziert. Dieser Zyklus wurde zehnmal in Folge für jedes einzelne memristive Bauelement wiederholt.

Werden die Stromwerte bei 3,0 V von Abbildung 8 a) und b) miteinander verglichen, zeigt sich ein stetiger leicht nichtlinearer Anstieg über die zehn Wiederholungen. Betrachtet man die Stromwerte der verschiedenen Geometrien und vergleicht diese mit dem jeweilig gleichen Spannungswert, lässt sich eine erkennbare Flächenabhängigkeit feststellen. Abhängig von den Beschleunigungswerten der Vibrationsquelle ergeben sich Ausgangsspannungen des piezoelektrischen Wandlers zwischen 1 V und 2 V. In diesem Bereich liegen die elektrischen Ströme der unterschiedlichen Elektroden-Geometrien zwischen < 10 nA und < 100 nA. Die Kopplung mit dem piezoelektrischen Wandler zu einem energieautarken Sensor erscheint in Hinblick auf diese Werte sehr aussichtsreich. Die im Rahmen des Projektes als Memristanz bezeichnete, zeitliche Änderung des Widerstandes des nanoionischen Speichers zeigt ein approximiert lineares Verhalten. Damit kann der Innenwiderstand direkt in ein Zeit-Spannungs-Produkt umgerechnet werden, was einer Art Dosis der einwirkenden Vibrationen im ausgewählten Frequenzbereich entspricht.

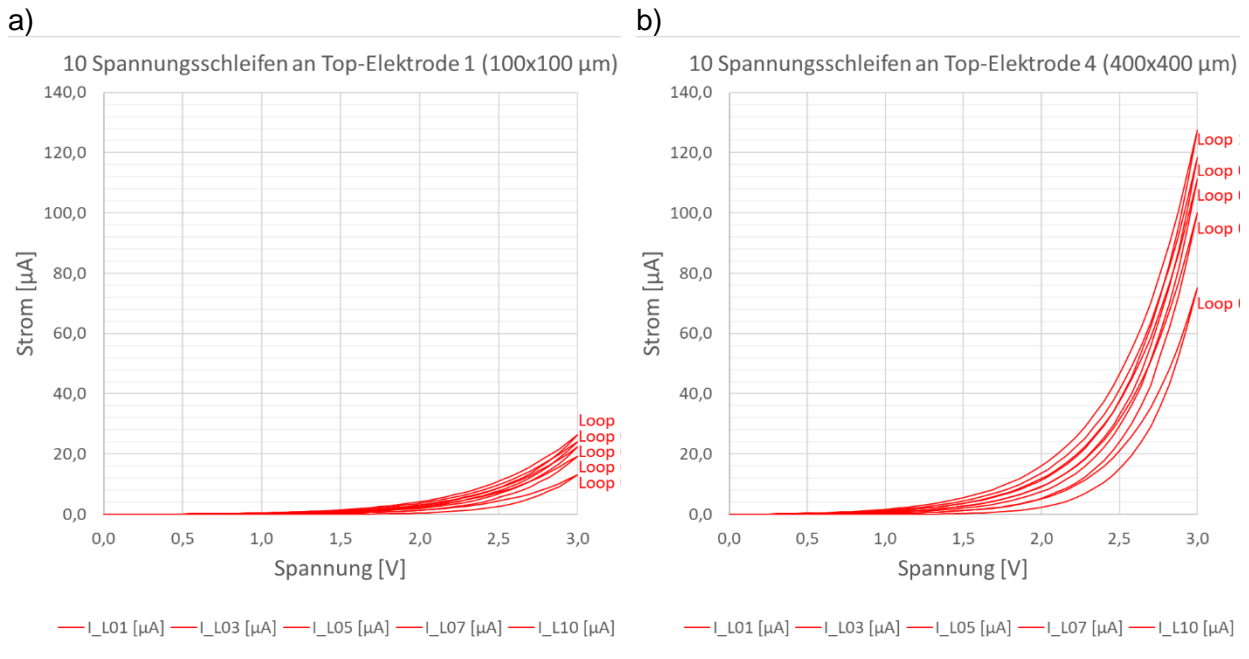


Abbildung 8: Zehn wiederholende positive IU-Kennlinien an Elektroden-Geometrien a) Mem1, und b) Mem4

Nach den vielversprechenden Strom-Spannungs-Messungen wurde auch das Langzeitverhalten der Memristoren untersucht. Abbildung 9 stellt eine arithmetische Mittelwertkurve der Innenwiderstände von 30 baugleichen Memristoren dar.

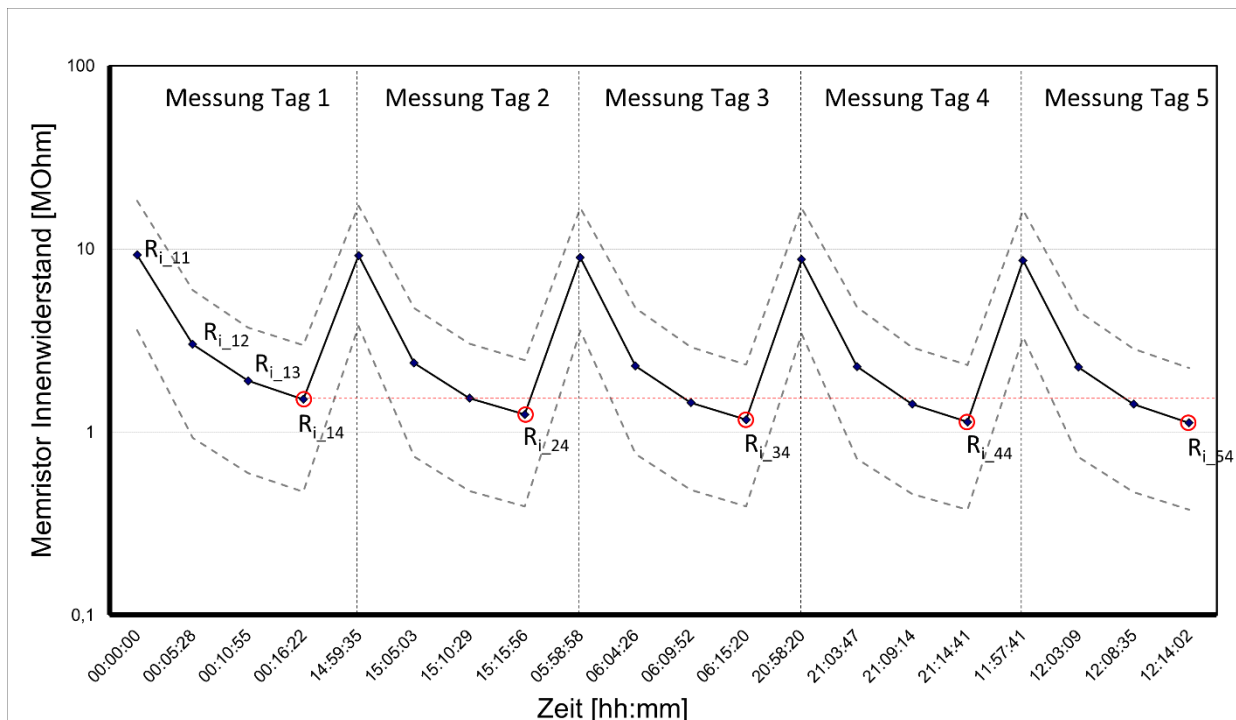


Abbildung 9: Mittelwertkurve der Innenwiderstände von 30 nanoionischen Speichern bei 100 mV Auslesespannung über fünf Messtage mit jeweils drei Schreib-Zyklen (je 5 min bei 1,5 V) und einem Verweilzyklus (ca. 15 h bei 0 V)

Diese Memristoren wurden dabei über 5 Tage mit dem gleichen täglichen Messrezept untersucht. Das Messrezept dauerte 24h und bestand aus drei aufeinanderfolgenden Schreibzyklen mit 1,5 V Spannung für 5 Minuten und einem anschließenden spannungsfrei geschaltetem Verweilzyklus von ca. 15 h. Vor und nach jeden Schreibzyklus wurde der Innenwiderstand bei 0,1 V ausgelesen und ist als Mittelwertkurve in Abbildung 9 dargestellt. Das bedeutet der Wert des mittleren Innenwiderstands $R_{i,11}$ zeigt den Ausgangswert vor dem ersten Schreibzyklus. Danach wurden die Memristoren für 5 Minuten mit 1,5 V gesetzt und im Anschluss daran mit einer Spannung von

0,1 V ausgelesen, was $R_{i,12}$ entspricht. Nach zwei weiteren Schreibzyklen mit 1,5 V für jeweils 5 Minuten ergab sich der mittlere Innenwiderstandswert $R_{i,14}$ bei der Auslesespannung von 0,1 V. Im Anschluss an den letzten Messwert am ersten Tag der Messreihe verblieb die Probe spannungsfrei für 15 h auf dem Waferprober. Zu Beginn von Tag zwei wurde das Messrezept neu gestartet und der erste mittlere Messwert des Innenwiderstandes zeigt einen ähnlich hohen Wert wie zu Beginn am Messtag 1. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der Innenwiderstand der Memristoren wieder zum Anfangswert zurückdriftet. Nach erneuten drei Schreibzyklen mit 1,5 V für 5 Minuten ergab sich der Wert $R_{i,24}$. Dieser Wert zeigt eine erneute Reduktion des mittleren Innenwiderstand der Memristoren im Vergleich zu den Ergebnissen vom ersten Tag der Messreihe. Vergleicht man die jeweils letzten Werte des mittleren Innenwiderstands von $R_{i,14}$ bis $R_{i,54}$ miteinander, lässt sich an jedem folgenden Tag der Messreihe eine stetige Reduktion des Innenwiderstandes erkennen. Des Weiteren wird der Schwankungsbereich der Innenwiderstandswerte über die 30 Memristoren anhand von grau gestrichelten Kurven gezeigt.

In Abbildung 10 wird die oben genannte abfallende Tendenz des mittleren Innenwiderstandes der

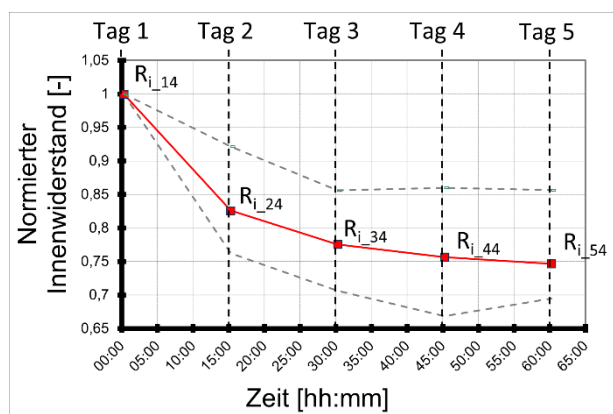


Abbildung 10: Mittelwertkurve der Innenwiderstände von 30 nanoionischen Speichern nach jeweils drei Schreibzyklen normiert auf den ersten Tag der Messreihe

30 gemessenen Memristoren nach jedem neuen Messzyklus trotz unerwünschten Rücksetzverhalten aufgezeigt. Bei dieser Abbildung wurden die Werte $R_{i,24}$ bis $R_{i,54}$ auf den Widerstandwert von $R_{i,14}$ normiert. Somit lässt sich die Reduktion der mittleren Memristanz leichter quantifizieren und vergleichen. Es lässt sich eine deutlich nichtlineare Reduktion erkennen. Die stärkste Reduktion zeigt sich vom ersten auf den zweiten Tag der Messreihe. Dabei reduziert sich der mittlere Innenwiderstand um rund 17 %. Die Reduktion des mittlere Innenwiderstands von $R_{i,24}$ auf $R_{i,34}$ beträgt 5% und zu $R_{i,44}$ 2 %. Am fünften Tag der Messreihe wurde lediglich eine Reduktion um 1 % von $R_{i,44}$ auf $R_{i,54}$ gemessen, wodurch sich eine Art Sättigungsverhalten zeigt. Für das Verständnis

der Ergebnisse ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die Schreibzyklen mit einer konstanten Spannung von 1,5 V über 5 Minuten erfolgten. Es kann davon ausgegangen werden, dass bezogen auf die in Aussicht gestellten Anwendungen bei Schadsignalen an Maschinen keine solch langfristigen konstanten Signale auftreten. Es ist eher von einem gepulsten Signalverlauf auszugehen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Zeitspanne für das Monitoring über einen längeren Zeitraum erstrecken wird. Dennoch zeigt die Untersuchung, dass die Änderung am nanoionischen Speicher keinen linearen Verlauf aufweist, wodurch eine Quantifizierung der Häufigkeit von Schadereignissen erschwert wird.

In den bisherigen Untersuchungen wird augenscheinlich, dass es bei den nanoionischen Speichern der zweiten Generation auch zu einem unerwünschten Abfall des Innenwiderstandes kommt, sobald die Spannung zum Setzen des Bauteils unterschritten wird. Obwohl dieser parasitäre Rücksetzeffekt keine Rückkehr zu Startwert bewirkt, macht das die Umrechnung in einen zeitintegralen Vibrationswert sehr aufwändig. Die weiteren Arbeiten sollen sich u.a. darauf konzentrieren, diesen Effekt zu eliminieren. Dies soll vor allem mittels einer optimierten Abscheidetechnologie und eines optimierten Layouts der Memristoren erreicht werden.

Abbildung 11 a) zeigt eine Gegenüberstellung des Layouts der Memristoren der zweiten Generation mit den neu entworfenen **Memristoren der dritten Generation**. Diese wurden in einem so genannten Crossbar-Design entwickelt, um neben den Einzelelementen auch hochdichte Speicherarrays mit bis zu 100 Zellen zu fertigen. Bei Crossbar-Arrays werden um 90° zueinander gedreht angeordnete parallele Streifenleitungen als Bodenelektroden und Deckelektroden verwendet. Die memristive Schicht befindet sich dazwischen. An jedem Kreuzungspunkt entsteht ein Memristor, dessen Kantenlänge durch die Breite der Streifenleitungen definiert ist.

Die ersten Crossbar-Layouts wurden mit Kantenlängen des Kreuzungspunktes von $20\ \mu\text{m}$ entwickelt, siehe Abbildung 11 b). Die kleinste Speicherzelle der zweiten Generation ist mit $100\ \mu\text{m}$ Kantenlänge und einer Fläche von $10.000\ \mu\text{m}^2$ im Gegensatz zu den Memristoren der **Generation 3.1** mit $400\ \mu\text{m}^2$ um 25-mal größer. Daraus ergeben sich für die 3.1 Memristoren 1-2 Größenordnungen kleinere Stromwerte. Dies ist zwar gut für deren Energiebilanz, stellt jedoch höhere Anforderungen an die Messtechnik. Für die Anwendungsszenarien der Industriepartner sind die nanoionischen Speicherzellen der Generation 3.1 inklusive der Pads für das Drahtbonden mit einer Gesamtabmessung von $0,8\ \text{mm} \times 1,5\ \text{mm}$ zwar ausreichend klein, jedoch aufgrund der festen Größe zu unflexibel in den Stromwerten. Aus diesem Grund wurde ein neues Layout entwickelt, das acht unterschiedlich große nanoionische Speicherzellen als Crossbar-Memristoren beinhaltet, siehe Abbildung 11 c). Diese nanoionischen Bauteile wurden als **Generation 3.2** bezeichnet. Die Kantenlängen der Kreuzungspunkte variieren von $600\ \text{nm}$ bis zu $1.000\ \mu\text{m}$. Damit können Stromwerte vom Pikoampere- bis in den Milliampere-Bereich konfiguriert werden. In Abbildung 11 d) sind Fotos eines präparierten Wafers mit nanoionischen Speichern der zweiten Generation abgebildet sowie der Kontaktierungsprozess am Waferprober zur elektrischen Charakterisierung und eine drahtgebundene nanoionische Speicherzelle auf einer Platine des UpFUSE-Demonstrators zu sehen.

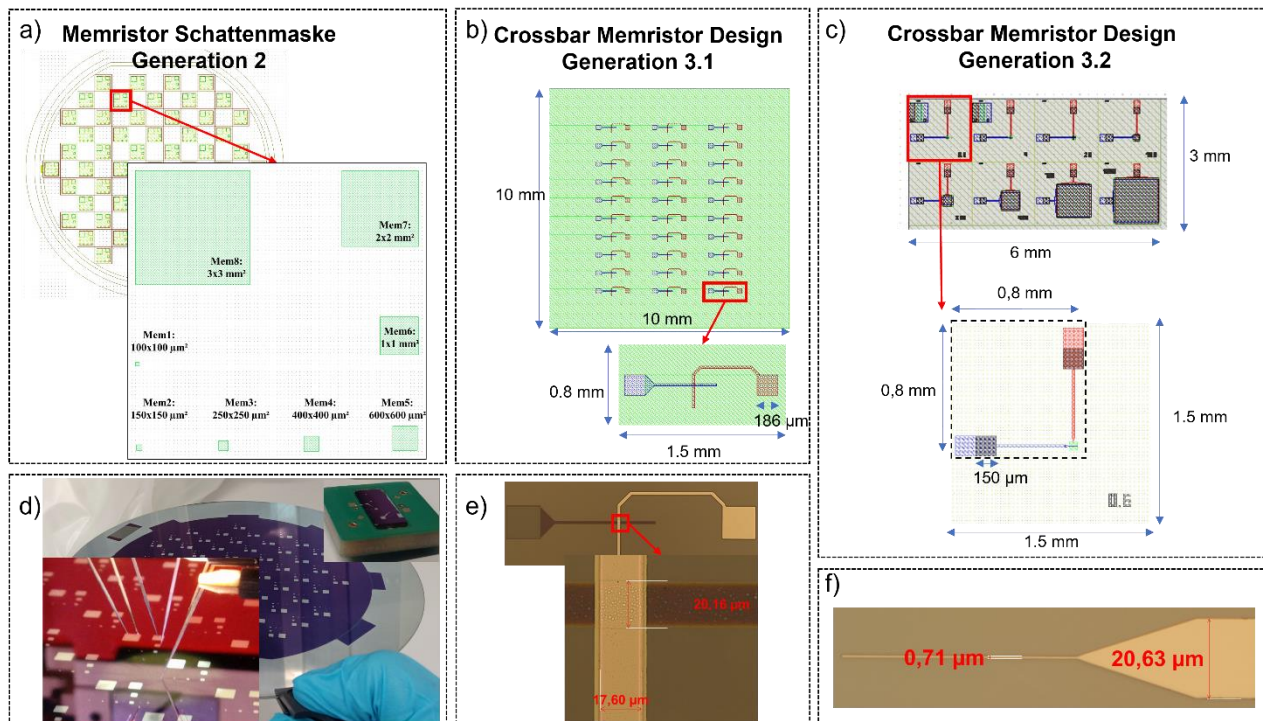


Abbildung 11: a) Layout der nanoionischen Speicherzellen der zweiten Generation zur Optimierung der elektrischen Eigenschaften, b) Layout der nanoionischen Speicherzellen der Generation 3.1 als Crossbar-Memristor mit einer Speicherzellen-Fläche von $20 \times 20\ \mu\text{m}^2$, c) Layout der nanoionischen Speicherzellen der Generation 3.2 als Crossbar-Memristor mit unterschiedlich großen Speicherzellen mit minimal $600 \times 600\ \text{nm}^2$, d) Fotos hergestellter nanoionischer Speicherzellen der Generation 2, e) Mikroskop-Aufnahmen hergestellter nanoionischer Speicherzellen der Generation 3.1, f) Mikroskop-Aufnahmen hergestellter nanoionischer Speicherzellen der Generation 3.2

Abbildung 11 e) zeigt eine Mikroskop-Aufnahme einer nanoionischen Speicherzelle der Generation 3.1 und einer vergrößerten Aufnahme des Crosspoints mit einer geplanten Kantenlänge von $20\ \mu\text{m}$. Dabei variiert die gemessene Kantenlänge der Bodenelektrode um lediglich $0,16\ \mu\text{m}$ und die der Deckelektrode um $2,4\ \mu\text{m}$. Beide Abweichungen liegen in einem vertretbaren Bereich.

In Abbildung 11 f) ist eine Mikroskop-Aufnahme der Bodenelektrode einer nanoionischen Speicherzelle der Generation 3.2 mit einer geplanten Kantenlänge von $600\ \text{nm}$ gezeigt. Die gemessene Kantenlänge der Bodenelektrode weist mit $710\ \text{nm}$ eine Abweichung von $110\ \text{nm}$ auf. Diese Abweichungen sind die höchsten aller acht unterschiedlich großen Memristoren, bewegen sich aber auch an den technologischen Auflösungsgrenzen der benötigten Prozesse. Dennoch sind es sehr zufriedenstellende Ergebnisse.

Neben dem Layout wurden zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften der Memristoren auch verschiedene Materialalternativen für die memristiven Layer getestet und mit dem TiO_2 verglichen. In Abbildung 12 sind zehn Strom-Spannungs-Hysteresekurven von drei unterschiedlichen nanoionischen Speicherzellen gegenübergestellt. In Abbildung 12 a) ist das elektrische Verhalten einer TiO_2 -MSM-Struktur während der Abscheidung dargestellt.

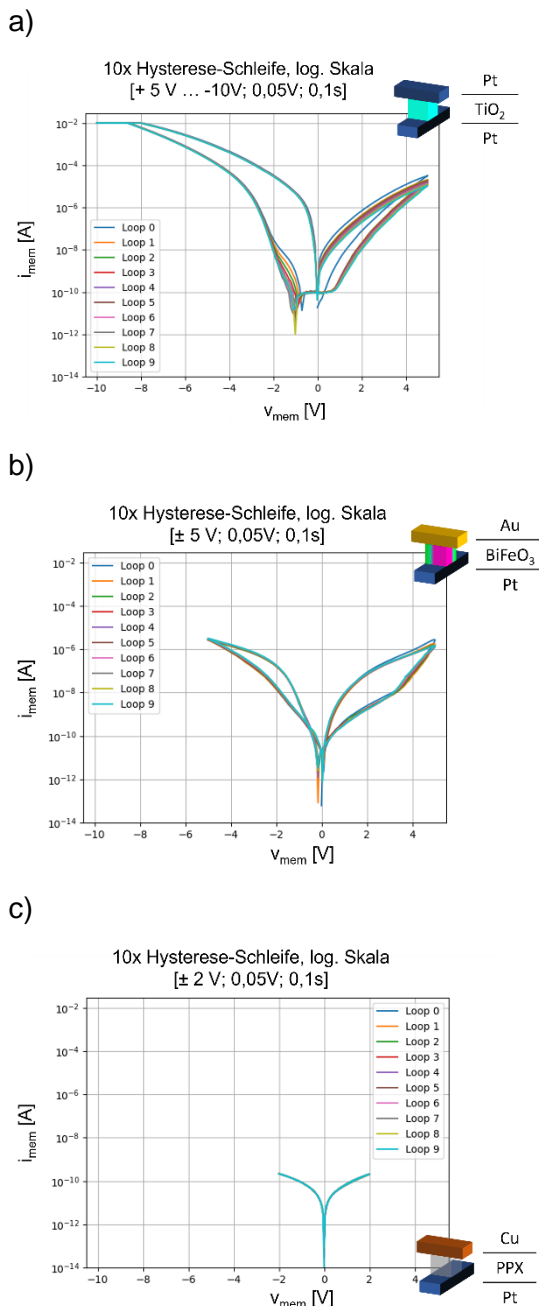


Abbildung 12: Gegenüberstellung von 10 gemessenen I-U-Hystereseschleifen zwischen positiver Setz- und negativer Rücksetzspannung von nanoionischen Speichern mit a) rutilem Titandioxid zwischen zwei Platin-Elektroden, b) Bismut-Eisen-Oxid mit Gold-Platin-Elektroden und c) ParyleneC mit Kupfer-Platin-Elektroden

Die memristive Schicht liegt dabei zwischen zwei Pt-Elektroden. Bisher lässt sich für alle erprobten TiO_2 Speicherzellen feststellen, dass die erste Hysteresekurve stets eine etwas kleinere Fläche aufweist als die folgenden Kurven. Dies lässt eine Art Initialisierungsvorgang vermuten. Dieses Verhalten wiederholt sich im gleichen Verhältnis auch für nachfolgende Hysteresemessungen. Die Hysteresekurven sind stabil, müssen jedoch unsymmetrisch zwischen dem SET-Prozess und dem RESET-Prozess betrieben werden. Die benötigte RESET-Spannung hat dabei den doppelten Wert der SET-Spannung und weist einen um eine Größenordnung höheren Rücksetz-Strom auf. Diese elektrischen Parameter sind stark von der Kristallstruktur abhängig, wodurch davon auszugehen ist, dass TiO_2 Speicherzellen mit anderer Abscheidungskonfiguration abweichendes elektrisches Verhalten aufweisen werden.

Die Abbildung 12 b) zeigt ebenfalls zehn Hysteresekurven einer Bismut-Eisen-Oxid (BFO oder BiFeO_3) Speicherzelle mit einer Pt-Bodenelektrode und einer Au-Deckelektrode. Im Vergleich zur TiO_2 Speicherzelle kann die BFO-Zelle mit dem gleichen Spannungswert für den SET- und RESET-Prozess betrieben werden. Im Unterschied zum TiO_2 zeigt die Hysteresekurve von BFO in dieser Konfiguration bei Spannungen unter 1 V jedoch ein sehr viel kleineres Verhältnis zwischen HRS- und LRS-Niveau. Daraus folgt die Notwendigkeit, die BFO Speicherzellen mit höheren Lesespannungen zu betreiben. Die BFO Speicherzellen weisen im Vergleich zum TiO_2 eine geringere Abweichung zwischen der ersten und den folgenden neuen Hysteresekurven auf, dennoch sind auch diese in nachfolgenden Schreibzyklen reproduzierbar und gleichbleibend existent.

In Abbildung 12 c) sind ebenfalls zehn Hysteresekurven einer 60 nm dicken ParyleneC-Speicherzelle dargestellt. Das Schaltverhalten dieses nanoionischen Speichers basiert anstatt auf dem VCM-Effekt der beiden zuvor beschriebenen Speicherzellen auf dem ECM-Effekt. Der elektrochemische Metallisierungseffekt (ECM) benötigt eine elektrochemisch aktive Elektrode (hier Kupfer Cu) und eine inerte Elektrode (hier Platin Pt). Die zehn Hysteresekurven liegen dabei ohne Abweichungen übereinander und weisen im Vergleich zu den beiden anderen Speicherzellentypen sehr geringe Unterschiede zwischen HRS und LRS auf. Diese liegen jedoch mehr als zwei Größenordnungen unter denen der anderen Speicherzellentypen und weisen

Ströme im Pikoampere-Bereich auf. Die SET- und RESET-Spannung liegt bei 2 V, wodurch sich Schaltleistungen unter 10 pW ergeben. Die Schaltleistungen der BFO-Speicherzellen liegen im Mikrowatt-Bereich und die der zuvor beschriebenen TiO_2 Speicherzelle im Mikrowatt-Bereich für den SET-Prozess und Milliwatt-Bereich für den RESET-Prozess auf.

In Abbildung 13 ist der Schichtaufbau der ParyleneC-Speicherzelle dargestellt. Nach der Barriere- und Haftschrift wurde eine Pt-Bodenelektrode über einen PVD-Prozess abgeschieden, um im Anschluss mittels CVD die memristive ParyleneC-Schicht aufzubringen. Im Anschluss wurde mit einer Schattenmaske die Cu-Deckelektrode abgeschieden und mit einer Ti-Schicht vor unerwünschter Oxidation geschützt. Im letzten Schritt wurde eine Al-Schicht als Kontaktschicht abgeschieden. Im unteren Bild der Abbildung 13 sieht man die Draufsicht eines Retikels der Schattenmaske mit acht verschiedenen großen Speicherzellen M1 bis M8. Auf einem Wafer sind 60 dieser Retikel verteilt. Die Flächen M7 und M8 sind zu groß, um sich als Speicherzellen zu eignen. Die beiden Flächen weisen nach der Präparation häufig Kurzschlüsse auf und besitzen dadurch einen elektrischen gut leitfähigen Kontakt zur Bodenelektrode. Sollte auf einem Retikel eine dieser Flächen keinen Kurzschluss aufweisen, wird ein elektrischer Durchbruch mit dem Testsystem während der elektrischen Charakterisierung herbeigeführt. Somit können beide Flächen M7 und M8 als Bodenelektrode der Speicherzellen M1 bis M6 genutzt werden. Die Messungen der ParyleneC-Speicherzellen wurden an einer Struktur der Größe M3 mit den Kantenlängen $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ durchgeführt. Abbildung 13 zeigt das die tatsächliche Größe der dargestellten Struktur eine Kantenlänge von $265 \mu\text{m}$ aufweist. Diese Abweichung von ca. $15 \mu\text{m}$ können auf die Technologie unter Verwendung einer Schattenmaske zurückgeführt werden. Generell gilt für die Messungen an den Speicherzellen der zweiten Generation, je kleiner die Fläche des nanoionischen Speichers desto kleiner die gemessenen Ströme bzw. desto größer ist der elektrische Widerstandswert.

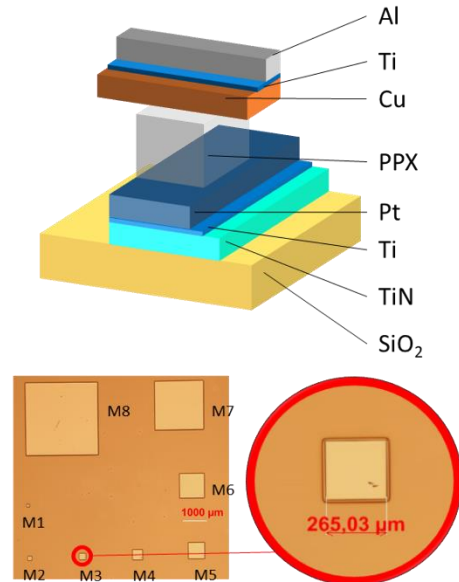


Abbildung 13: Schema des Schichtaufbaus eines nanoionischen Speichers mit ParyleneC sowie eines Fotos eines hergestellten Chips mit 8 Speicherzellen

Im Gegensatz zu den formierungsfreien Speicherzellentypen mit TiO_2 und BFO handelt es sich bei ParyleneC um einen nanoionischen Speicher der vor der Inbetriebnahme als Speicherzelle elektrisch formiert werden muss, d.h. vor der Elektroformierung weist die ParyleneC-basierte MSM-Struktur ein kapazitives Verhalten auf. Der Schritt der elektrischen Formierung hängt stark vom gewählten Begrenzungsstrom ab. Abbildung 14 zeigt im linken Bereich die Formierungskennlinie mit einem Begrenzungsstrom von 1 mA und rechts eine logarithmisch skalierte I-U-Hysteresekennlinie nach der Formierung. Während dieses Prozesses wird zunächst ein Begrenzungsstrom definiert und die Spannung kontinuierlich erhöht, bis es zu einem Durchbruch kommt und der Stromwert den Wert des Begrenzungsstromes erreicht. Die Schwierigkeit liegt darin, den Begrenzungsstrom so zu definieren, dass der entstehende Durchbruch reversibel zwischen Kathode und Anode entsteht und mithilfe eines RESET-Prozesses vom LRS- wieder in das HRS-Niveau schaltbar ist. Der Graph der elektrischen Formierung zeigt zwei sprunghafte Anstiege des Stromes im Mikroampere- und Milliampere-Bereich. Derartige sprunghafte Anstiege deuten auf ein Filamentwachstum hin. Der erste sprunghafte Anstieg im Mikroampere-Bereich reichte jedoch nicht aus, um den Begrenzungsstrom zu erreichen. Die rechte Teil-Abbildung zeigt eine vollständige Hysteresekurve mit einem HRS-Niveau zu Beginn des SET-Prozesses (blau) und einem Schalten in das LRS-Niveau (orange) und ein erneutes Zurückschalten vom LRS- (orange) in das HRS-Niveau (grün) während des RESET-Prozesses. Diese Hysteresekurve ist etwas verrauschter und typisch für einen ECM basierten Schaltmechanismus.

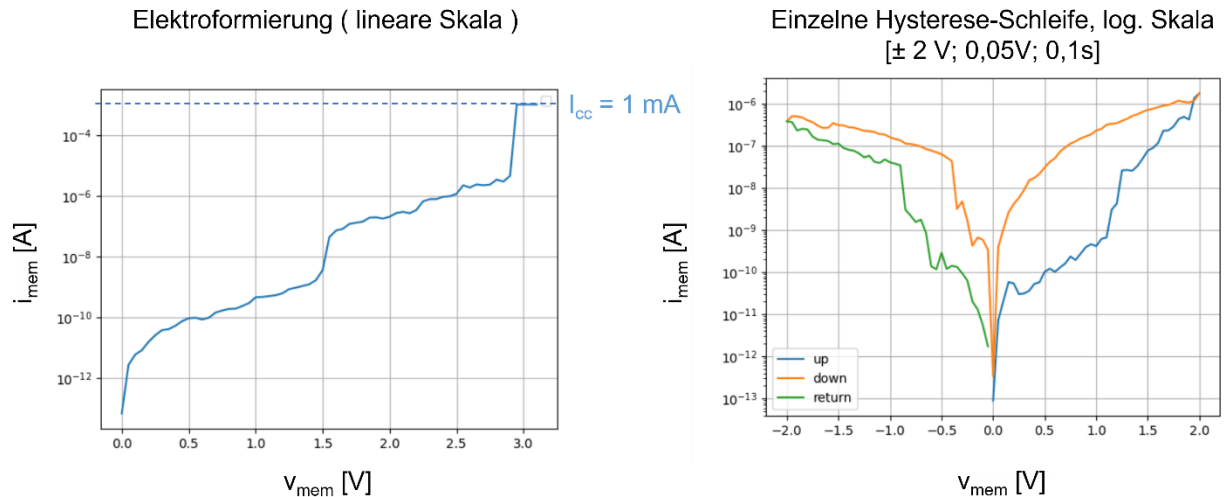


Abbildung 14: Elektroformierung des ParyleneC-Memristors mit einem Begrenzungsstrom von 1 mA (links) und einer I-U-Hysterese-Schleife mit SET- und RESET-Prozess in logarithmischer Skala (rechts)

Aufgrund der zwei sprunghaften Stromanstiege während der Formierung wurde versucht, die Dichte der ParyleneC-Schicht mittels eines zusätzlichen Temperprozesses mit 300°C für 30 Minuten zu erhöhen. Infolgedessen wurde ebenfalls der Begrenzungsstrom reduziert. Durch die dichtere kristallische Struktur wurde ein höheres elektrisches Feld für die Formierung benötigt, wodurch der Begrenzungsstrom von 1 μA erst bei 24 V erreicht wurde, siehe Abbildung 15 linke Grafik. In der rechten Grafik ist die Hystereseurve zu sehen. Um das elektrische Verhalten der ParyleneC-basierten Speicherzelle genauer zu beschreiben, wurde die Hystereseurve in einer linearen Skala dargestellt. Die Hysterese ist in diesem Fall kaum noch erkennbar und ein Schalten zwischen HRS und LRS ist nicht messbar. Die Hystereseurve lag jedoch auch nach zehn Zyklen im Bereich von wenigen Pikoampere, wodurch sehr geringe Energiebedarfe für das Schalten notwendig wären. In weiteren Untersuchungen über die Projektlaufzeit hinaus soll versucht werden, mit diesen geringen Schaltleistungen den ballistischen Ladungstransport der Cu-Atome bzw. Cu-Ionen durch die ParyleneC-basierte Schicht zu ermöglichen.

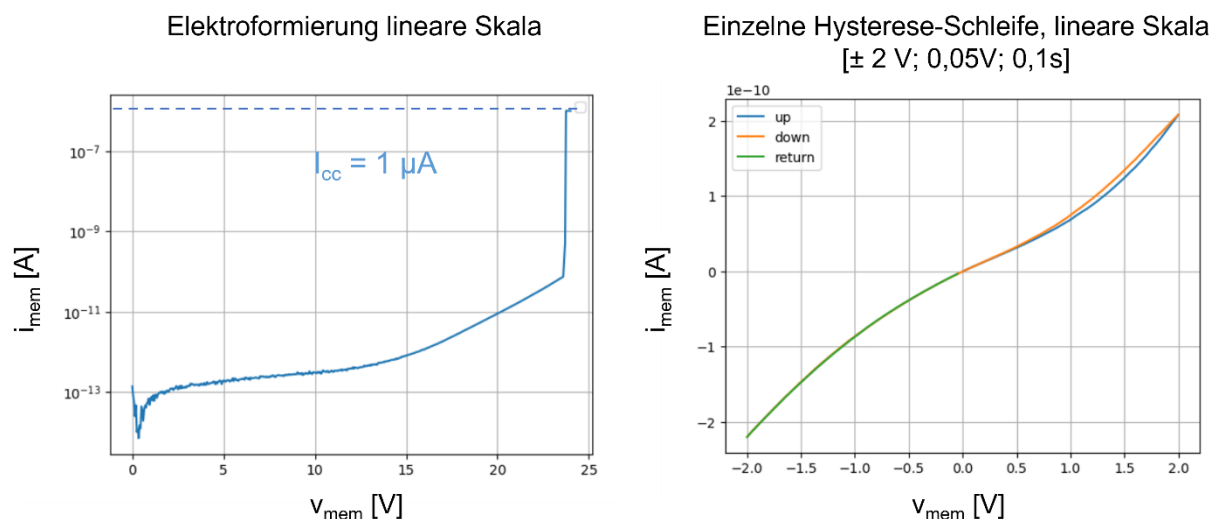


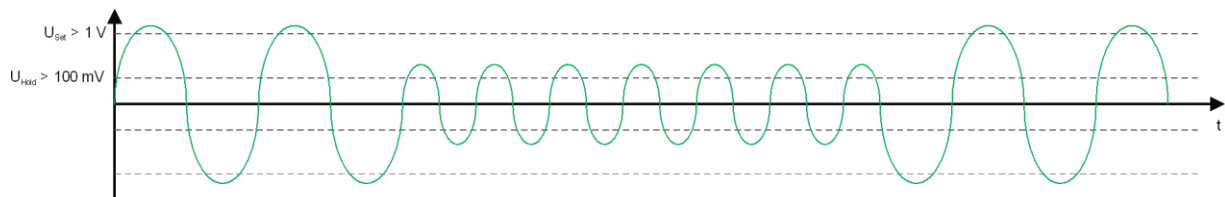
Abbildung 15: Elektroformierung des ParyleneC-Memristors mit einem Begrenzungsstrom von 1 μA (links) und einer I-U-Hysterese-Schleife mit SET- und RESET-Prozess in linearer Skala (rechts)

Die verschiedenen Untersuchungen, welche im Rahmen des Projektes an den nanoionischen Speichern durchgeführt wurden, konnten den unerwünschten Rücksetzeffekt, Fall Back, zwar deutlich minimieren jedoch nicht vollständig beseitigen. Bei der Nutzung dieser Speicher müssen in Hinblick auf die Funktionalität dadurch bestimmte Abstriche gemacht werden. In Abbildung 16

sind die Möglichkeiten und Grenzen energieautarker Sensorsysteme unter Verwendung der entwickelten nanoionischen Speicher diskutiert worden.

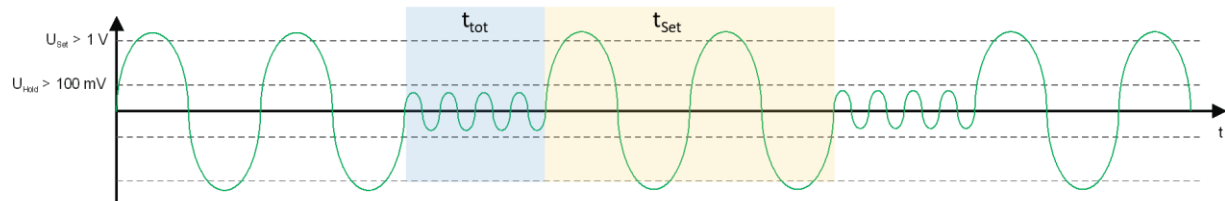
Betriebsart 1

- $U > U_{\text{Hold}}$



Betriebsart 2

- $U < U_{\text{Hold}}$
- $t_{\text{tot}} < t_{\text{Set}}$



Betriebsart 3

- $U < U_{\text{Hold}}$
- $t_{\text{tot}} > t_{\text{Set}}$

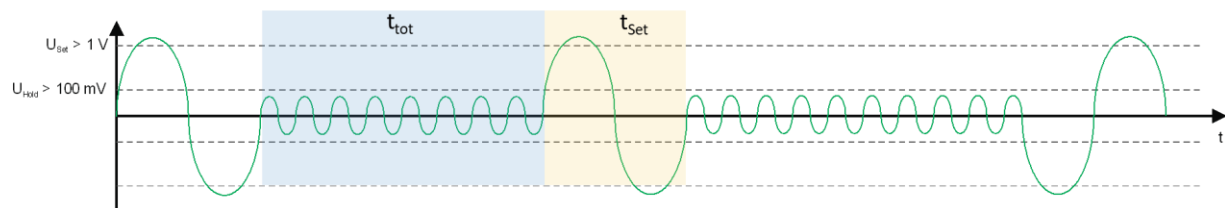


Abbildung 16: Die verschiedenen Betriebsarten des nanoionischen Speichers und Ihre Bedeutung für das energieautarke Sensorsystem

Es stellte sich heraus, dass die Speicher eine bestimmte Haltespannung U_{Hold} benötigen, um den gesetzten Wert ihres Innenwiderstandes konstant zu halten. Der Betrag dieser Spannung wurde in zahlreichen Optimierungen auf ≥ 100 mV reduziert. Wird diese Spannung an den Elektroden der Memristoren unterschritten, beginnt ein zeitkontinuierlicher Datenverlust, das bedeutet der Innenwiderstand beginnt zu steigen bis nach einer bestimmten Zeitspanne t_{tot} nahezu der Ausgangswert wieder erreicht wird. Übersteigt das Anregungssignal stets die Haltespannung, Betriebsart 1, funktioniert das Sensorsystem in seiner angedachten Weise, es wird ein Zeitintegral über Frequenz und Amplitude der Erregerschwingung gebildet. Wird die Haltespannung kurzzeitig unterschritten, wobei jedoch noch nicht die Setzeit t_{Set} erreicht wird, Betriebsart 2, ist mit einem teilweisen Datenverlust im Sensorsystem zu rechnen. Diese Betriebsart ist gerade noch zulässig, wenn nur mit kurzen und/oder einer geringen Zahl an Unterbrechungen der Anregerschwingung zu rechnen ist. Wird die Haltespannung häufiger unterschritten oder sind dieser Unterbrechungen von langer Dauer, Betriebsart 3, ist mit einem vollständigen Datenverlust im Sensorsystem zu rechnen. In einem solchen Anwendungsfall kann das Sensorsystem in seiner gegenwärtigen Konfiguration nicht eingesetzt werden. Die Arbeiten nach Projektabschluss müssen sich auch weiterhin auf die Optimierung der nanoionischen Speicher fokussieren. Dadurch kann ein höhere Datensicherheit gewährleistet werden, was letztlich auch die Anwendungsbandbreite der Sensorsysteme deutlich erhöht.

2.3.2 Optimierte piezoelektrische MEMS (AP 2.2)

Der Entwurf der piezoelektrischen MEMS unter Berücksichtigung der in Arbeitspaket 1 definierten Anforderungen war Teil der Arbeitspakete des Fraunhofer ENAS. An dieser Stelle soll auf deren Abschlussbericht verwiesen werden. Die Fertigung der MEMS erfolgte in den Reinräumen der

TU Chemnitz, wobei die etablierte AlN-Technologie [6] verwendet wurde, siehe Abbildung 17. Der Ausgangspunkt dafür ist ein SOI-Substrat. Zur Fertigung der piezoelektrischen Wandler wird auf der Vorderseite auf einer Isolationsschicht aus Siliziumoxid und -nitrid eine Pt-Elektrode abgeschieden und strukturiert. Danach wird das AlN aufgebracht und ebenfalls nasschemisch strukturiert. Anschließend erfolgen die Abscheidung und Strukturierung der oberen Elektrode aus Aluminium. Die Herstellung der mikromechanischen Struktur erfolgt von der Rückseite unter Verwendung einer kombinierten Lack-Hartmasken-Technologie. Damit können die Dicken der Federbänder und der beweglichen sternförmigen Masse im Zentrum der Struktur, getrennt voneinander eingestellt werden.

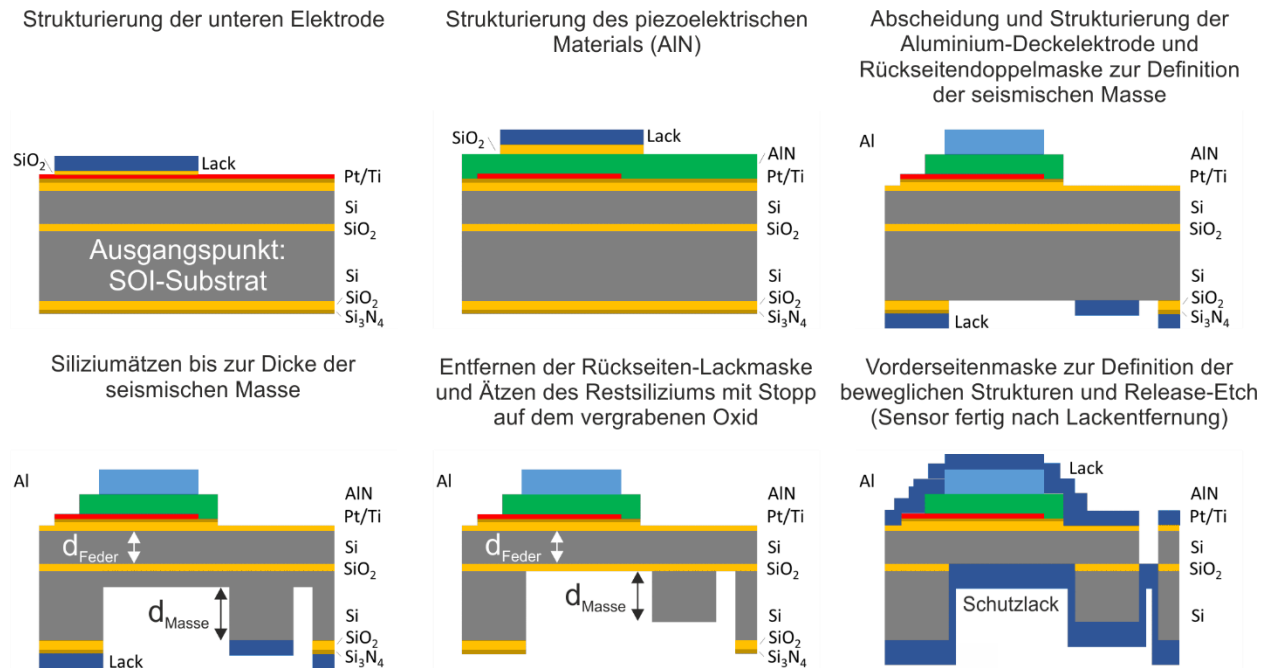


Abbildung 17: Technologieauflauf zur Fertigung der piezoelektrischen MEMS (WUPS)

Der fertige Chip hat eine Kantenlänge von $15 \times 15 \text{ mm}^2$. Abbildung 18 zeigt die prozessierten piezoelektrischen MEMS auf Waferlevel.

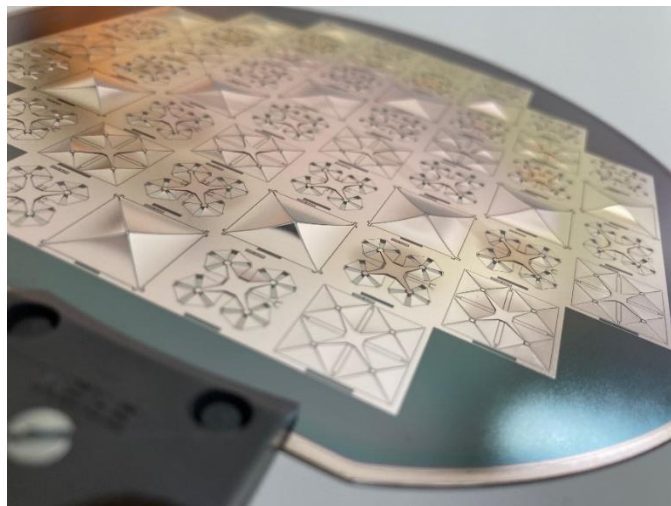


Abbildung 18: Prozessierter Wafer mit Wake-Up-MEMS (WUPS)

Das Silizium des Handle-Wafers wird großflächig entfernt, was dazu führt, dass der Wafer mechanisch instabil wird. Ein kritisches Moment der Fertigung stellt die Vereinzelung dar. Diese erfolgt zum Beispiel über einen Sägeprozess. Da beim Sägen ein Kühl- und Schmiermittel genutzt wird, erfolgte der Schutz des Wafers mittels einer Folie. Diese Folie lässt sich thermisch oder über eine UV-Belichtung nach dem Sägen vom Wafer lösen. Dieser Prozess des Ablösens geht

je nach Technologie mit einer mechanischen Kräfteinwirkung einher, die nach Möglichkeit minimiert werden muss. Noch besser sind Prozesse, bei denen keine externe mechanische Kraft auf den Wafer einwirkt, wie beispielsweise das so genannte „Stealth Dicing“ oder eine Vereinzelung über eine DRIE. Schließlich konnten die MEMS erfolgreich gesägt werden, die Charakterisierung erfolgte am Fraunhofer ENAS.

Aufgrund des thermischen Stresses bei der Herstellung der WUPS kam es zu Federbrüchen bei einzelnen Strukturelementen. Daher wurde im weiteren Verlauf des Projektes ein Redesign der Federn (AP ENAS), ein optimierter Prozessablauf und ein zweiter Technologiedurchlauf durchgeführt. Die Fotolacke, die den thermischen Stress bei der Prozessierung induziert hatten, wurden ersetzt, bzw. in ihren Eigenschaften modifiziert. Aufgrund dieser Modifikationen am Prozessablauf konnte eine höhere Ausbeute auf dem Wafer sowie die Verringerung der Anzahl der Ausfälle beim Vereinzeln der Chips erreicht werden. In Abbildung 19 sind Aufnahmen mit dem Mikroskop nach dem tiefen Siliziumätzen der piezoelektrische MEMS nach dem Redesign dargestellt. Des Weiteren wurde der intrinsische Stress vermieden und die Plasma-Ätzprozesse auf der aktiven Ebene homogenisiert.

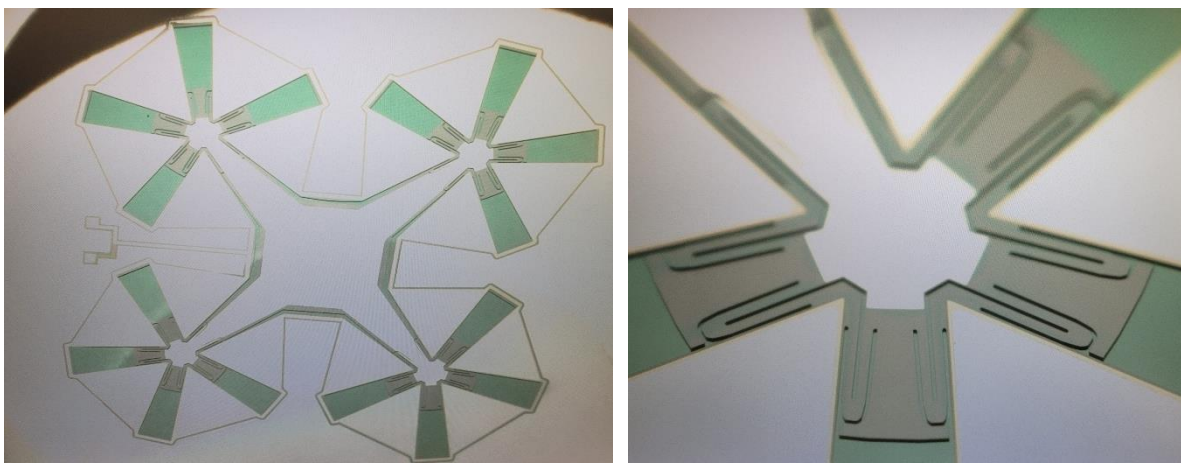


Abbildung 19: Aufnahmen mit schwenkbarem Mikroskop nach dem tiefen Siliziumätzen des Device-Wafers für die WUPS der zweiten Generation.

2.3.3 Heterointegration von piezo-MEMS und nanoionischem Speicher (AP 2.3)

Nach der Fertigung der mikrotechnologischen Komponenten bestand eine wesentliche Aufgabe darin, diese zu einer Sensorschaltung zur energieautarken Vibrationsmessung zu kombinieren.

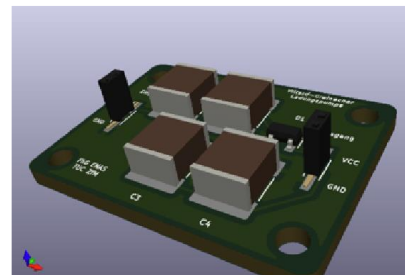
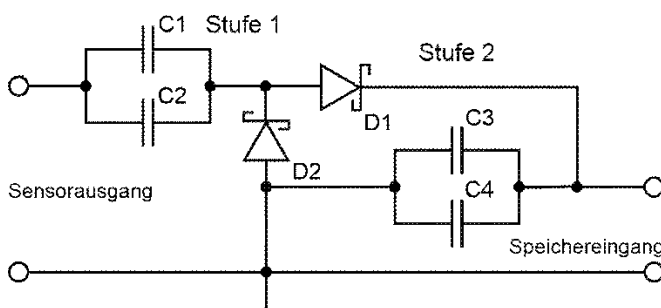


Abbildung 20: Koppelschaltung zur Verbindung des piezo-MEMS mit dem nanoionischen Speicher, (links) Schaltplan einer 2-stufigen Ladungspumpe, (rechts) Schema der Platine

Dazu war es vor allem notwendig, das Sinussignal der piezoelektrischen Wandler in eine Gleichspannung zum Beschreiben der Memristoren zu konvertieren. Darüber hinaus sollte der Spannungspegel angehoben werden, um eine gewisse Sicherheit zu erlangen, dass die Setzschwelle des Speicherbausteins überschritten wird. Nachdem zahlreiche Schaltungen getestet wurden, wurde sich schließlich für eine passive Ladungspumpe nach dem Villard-Greinacher-Prinzip entschieden, siehe Abbildung 20.



Abbildung 21: PCBs mit einem Villard-Greinacher-Gleichrichter in unterschiedlichen Ausführungen

Um die Bauelemente für die Ladungspumpe auszuwählen, wurden umfangreiche Simulationen mit verfügbaren Bauelementemodellen der Hersteller im PSpice durchgeführt. Ziel war es, eine Diode mit maximaler Ausgangsspannung und geringstem Eingangsstrom zu finden, um bei minimaler Last am piezoelektrischen Wandler die höchstmögliche Ausgangsspannung zu erzielen. Nach Abschluss der Schaltungssimulationen sowie zusätzlichen elektrischen Messungen an einem Signalgenerator wies die Schottky-Diode BAT54 die höchste Ausgangsspannung sowie den höchsten Eingangsstrom auf. Infolgedessen wurden mehrere Schaltungen auf Platine mit dem genannten Diodentyp von unterschiedlichen Herstellern sowie verschiedenen Kondensatorarten aufgebaut, siehe Abbildung 21. Es wurden unterschiedliche SMD-Folienkondensatoren und SMD-Keramik-Vielschichtkondensatoren mit einer Summenkapazität von 200 nF verwendet. Zum einen kamen PPS-Film Chip-Kondensatoren (ECHU1H104GX9) von Panasonic Corporation AG zum Einsatz. Ebenfalls wurden die SMD-Folienkondensatoren aus metallisiertem Polyester (PET) (SMDTD03100KA00KP00) des Herstellers WIMA GmbH & Co. KG untersucht. Die dritte Kondensatorvariante bildet der SMD-Keramik-Vielschicht-Kondensator (CC1206KRX7R9BB104) von Yageo Corporation.

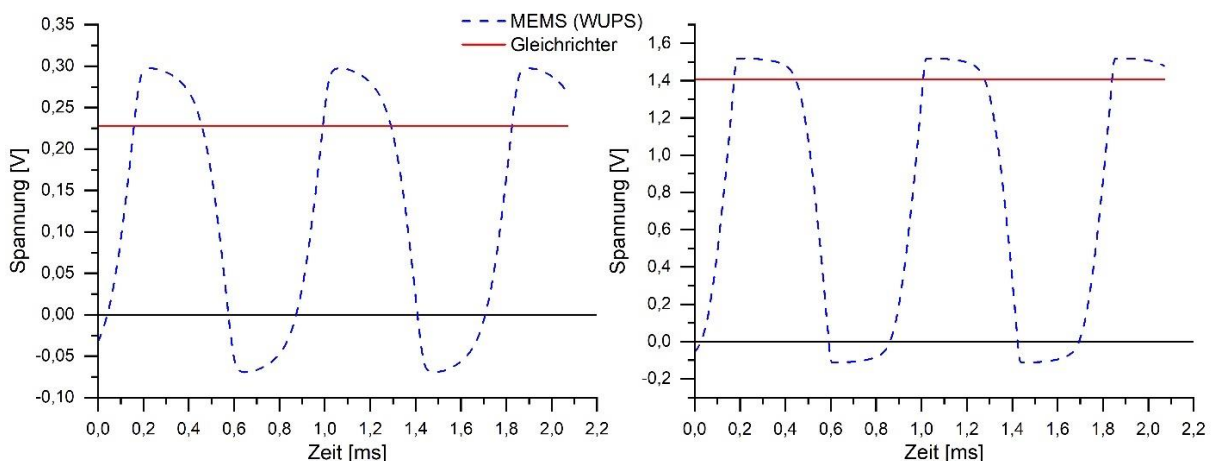


Abbildung 22: Eingangs- und Ausgangsspannung nach dem Gleichrichter (rote Linie) mit einer mechanischen Anregung der piezoelektrischen MEMS (blaue Linie) von 1 g (links) und 5 g in (rechts)

Abbildung 22 zeigt eine Simulation der Ausgangssignale des piezoelektrischen MEMS und der daran angeschlossenen Villard-Greinacher-Schaltung. Das MEMS liefert bei einer Erreger-schwingung von 1 g eine Spannung von ca. 300 mV und bei 5 g eine Spannung von ca. 1,5 V. Es zeigte sich, dass der gewünschte Gleichrichtereffekt mittels der Ladungspumpe erreicht werden kann, die angestrebte Spannungserhöhung konnte simulativ jedoch nicht nachgewiesen werden. Bei einer 1 g Beschleunigung beträgt die Ausgangsspannung 0,23 V, was zum Setzen der nano-ionischen Speicher nicht ausreicht. Wird eine Eingangserregung von 5 g verwendet, liefert die

Ladungspumpe 1,4 V. Diese Spannung sollte zum Setzen der nanoionischen Speicher ausreichen. Nach Abschluss der Arbeiten an der Koppelstufe wurden die Komponenten piezoelektrisches MEMS, Ladungspumpe und nanoionischer Speicher zu einem Gesamtsystem kombiniert und auf dem Vibrationsmessplatz getestet.

2.3.4 Test und Charakterisierung der energieautarken Vibrationssensoren (AP 2.4)

Memristoren verfügen über ein komplexes Zeitverhalten, welches nur unter sehr großem zeitlichem Aufwand mit ausreichender Präzision charakterisiert werden kann. Vor allem zur Messung der Ausdauer (Endurance) und der Langzeitstabilität der gespeicherten Muster (Retention) sind aufwändige Messreihen erforderlich, welche nicht selten aus 1000 und mehr Einzelzyklen bestehen. Die Messungen auf dem Waferprober sind aufgrund der Verfügbarkeit des Gerätes nur an wenigen Strukturen möglich und das Messsystem ist aufgrund seiner Quellenauslegung in der Flexibilität der Messsignale beschränkt. Schnell wurde die Notwendigkeit einer kompakten Messlösung erkennbar, welche Langzeitmessungen und gleichzeitig nahezu unbegrenzt programmierbare Eingangsmuster gestattet. Vom Projektpartner Fraunhofer ENAS wurde eigens für diesen Zweck eine kompakte Messhardware geschaffen, welche mittels eines USB-Ports frei programmierbare Spannungsverläufe für den Memristor gestattet und in Abbildung 23 (links) dargestellt ist. In Abbildung 23 (rechts) wurde ein Memristor mit einer alternierenden Lese-Schreib-Pulsfolge angesteuert und der Stromfluss durch das Bauteil gemessen. Es zeigt sich eine erkennbare Widerstandsverringering des Memristors während der Schreibzyklen. In dazwischenliegenden Lesezyklen hat sich der Memristor die Zahl der Schreibpulse „gemerkt“, wobei der sukzessive verringerte Innenwiderstand als Nachweisgröße diente.

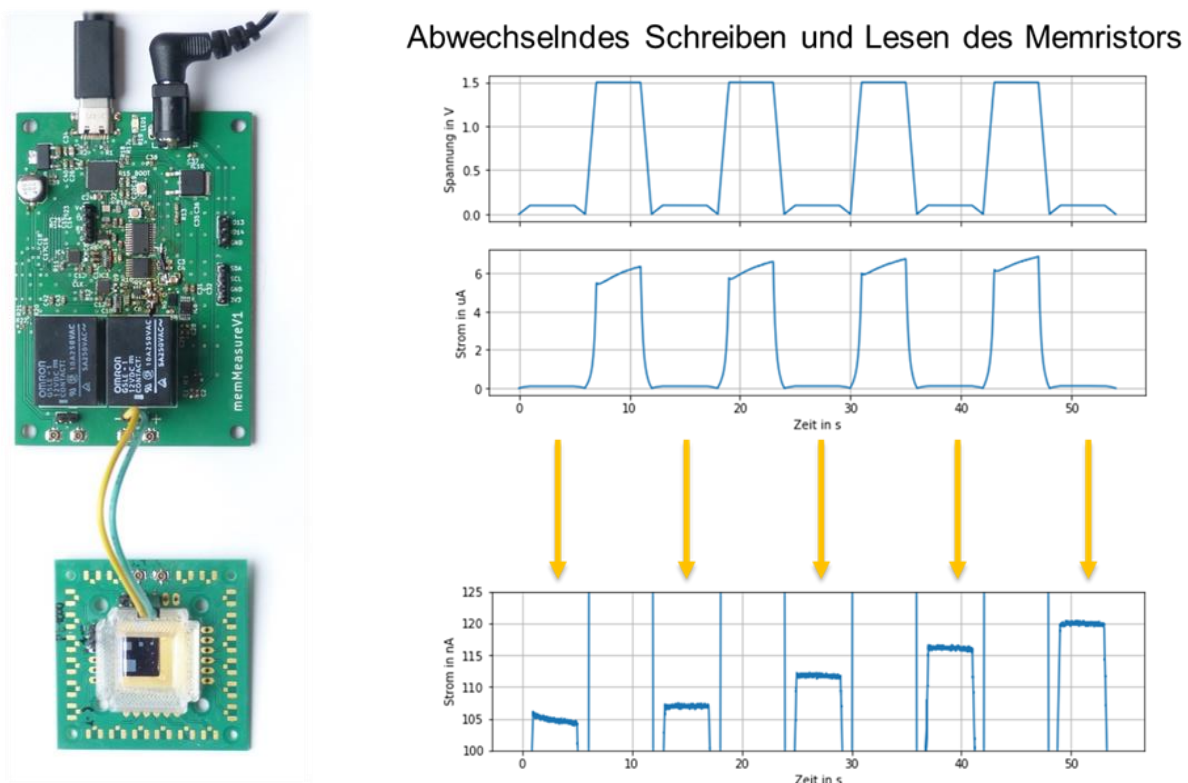


Abbildung 23: (links) ein spezielles zur Charakterisierung der Memristoren konzipiertes Testboard, (rechts) Reaktion des Memristors auf sequentielle Pulsfolgen

Um die Memristoren im angestrebten Anwendungsfall gekoppelt mit einem piezoelektrischen Wandler charakterisieren zu können, wurde der in Abbildung 24 gezeigte Versuchsaufbau angefertigt.

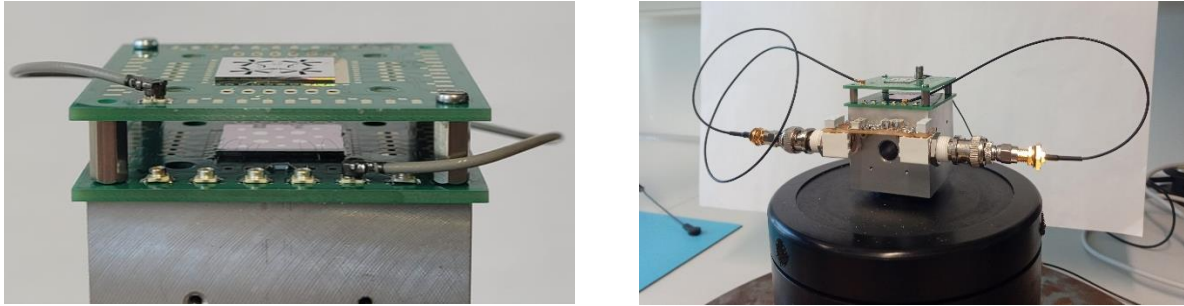


Abbildung 24: Demonstrator-Aufbau (links) Sandwichstruktur, bestehend aus den Adapterplatten für das MEMS und die nanoionischen Speicher, (rechts) Labordemonstrator auf dem Vibrationsmessstand

Sowohl das MEMS als auch der nanoionische Speicher wurden zum Systemtest auf eigens dafür designte Adapterplatten geklebt und mittels Drahtbonds mit diesen verbunden, siehe Abbildung 25. Anschließend wurden diese Platinen in einer Sandwichanordnung, Abbildung 24 (links), auf dem Vibrationsmessplatz montiert, Abbildung 24 (rechts). Die elektrische Verbindung zwischen beiden Komponenten erfolgte über Koaxialkabel. Die Villard-Greinacher-Schaltung wurde in diesem ersten Laborversuch auf einer Universalplatine aufgebaut und elektrisch zwischen MEMS und Memristor geschaltet. Sie wurde ebenfalls auf dem Vibrationsteststand montiert.

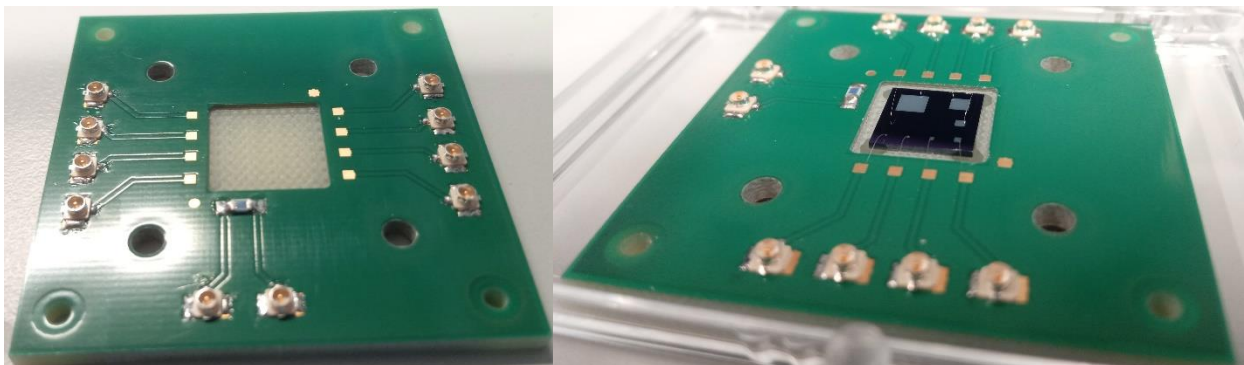


Abbildung 25: (rechts) Adapter-PCB für die Memristor-Chips der zweiten Generation, (links) Adapter-PCB mit Drahtgebundenen Memristor-Chip

Die Grafik in Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse einer Versuchsreihe, welche mittels des dargestellten Versuchsaufbaus durchgeführt wurde. Zu Beginn der Messungen wurde der Memristor 5 min mit 100 mV ausgelesen. Bei dieser geringen Spannung kann sichergestellt werden, dass der Memristor durch den Lesevorgang nicht verändert wird. Anschließend wurde der Vibrationsaktor für 40 min zugeschaltet und auf 1 g eingestellt. Der Memristor wurde dabei simultan mit 100 mV ausgelesen. Nach dem Setzen wurde der Vibrationsaktor deaktiviert und ein weiterer Messvorgang für 5 min mit 100 mV durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Innenwiderstand des Memristors durch die vom MEMS gelieferte Spannung auf ca. 90 % seines Ausgangswertes abgefallen ist. Der Memristor wurde durch das MEMS beschrieben. Der Lesevorgang wurde nach einer Wartezeit von 18 Stunden erneut durchgeführt, wobei der Memristor zwischenzeitlich stromlos war. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Memristor seinen Speicherwert über 18 Stunden gehalten hat. Die Funktionalität der angestrebten energieautarken Vibrationssensoren wurde mittels dieser Ergebnisse eindeutig nachgewiesen.

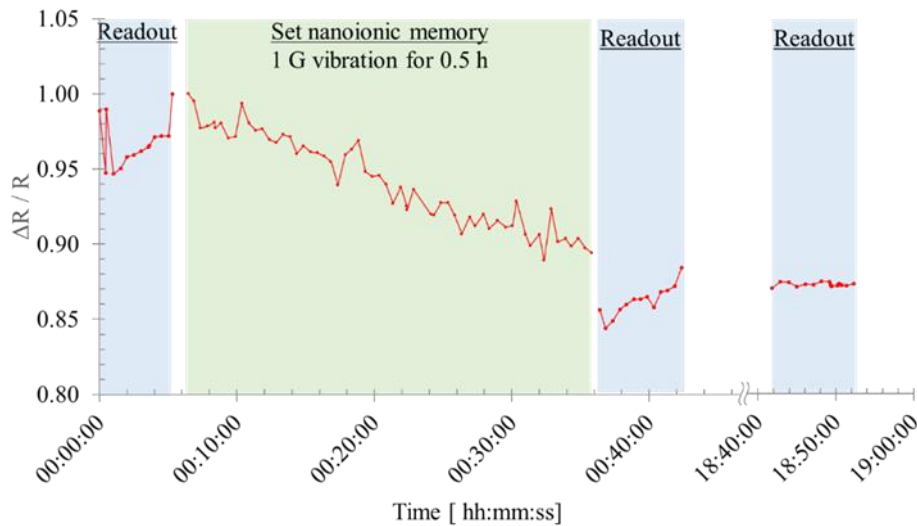


Abbildung 26: Messergebnisse vom Demonstratoraufbau mit Wake-Up MEMS, passiven Villard-Greinacher-Gleichrichter und einem nanoionischen Speicher

2.4 AP 3 Mechanisches Konzept

Die Arbeiten zum mechanischen Konzept wurden an der Ruhr Universität Bochum durchgeführt. Hier soll auf deren Berichtsteil verwiesen werden.

2.5 AP 4 Drahtlose Sensorauswertung

Die Arbeiten zur drahtlosen Sensorauswertung wurden an der Universität Paderborn durchgeführt. Hier soll auf deren Berichtsteil verwiesen werden.

2.6 AP 5 Drahtlose Energieübertragung

Die Arbeiten zur drahtlosen Energieübertragung wurden an der Universität Paderborn und dem Institutsteil Paderborn des Fraunhofer ENAS durchgeführt. Hier soll auf deren Berichtsteile verwiesen werden.

2.7 AP 6 Aufbau des Sensorsystems

2.7.1 Sensorkomponenten für ausgewählte Demonstratorsysteme (AP 6.1)

Um funktionale Memristoren für den Aufbau der Demonstratorsysteme bereitzustellen, wurden vordergründig Memristoren der zweiten Generation genutzt. Darüber hinaus wurde ein neues Layout für den nanoionischen Speicher in Form eines Crossbar-Memristors in acht unterschiedlichen Größen von 600 nm² bis 1.000 μm² entworfen, siehe Abbildung 27 a) und b). Die Abbildung 27 a) zeigt die bis dato präparierten Bodenelektroden der nanoionischen Speicherzellen in Generation 3.2 und gibt die Kantenlänge des Kreuzungspunktes an. In der Abbildung 27 b) ist das Layout zu sehen. Die grüne Fläche zeigt den Kreuzungspunkt und damit auch den Bereich der memristiven Fläche an, der um 90° gedreht von einer Deckelektrode gekreuzt abgedeckt wird. Die Kontakt-Pads für den späteren Drahtbond-Prozess sind blau dargestellt.

Die Abbildungen 27 c) und d) zeigen Mikroskop-Aufnahmen der zwei kleinsten Flächen der nanoionischen Speicherzelle mit einer geplanten Kantenlänge von 4 μm und 600 nm. In den Abbildungen 27 e) und f) sind Bereiche der Bodenelektrode mit zwei REM-Aufnahmen vergrößert dargestellt, wobei sich geringe Abweichungen zu den geplanten Kantenlängen ergaben. Das Design wurde innerhalb der Laufzeitverlängerung des Projektes ForMikro-UpFuse erfolgreich umgesetzt.

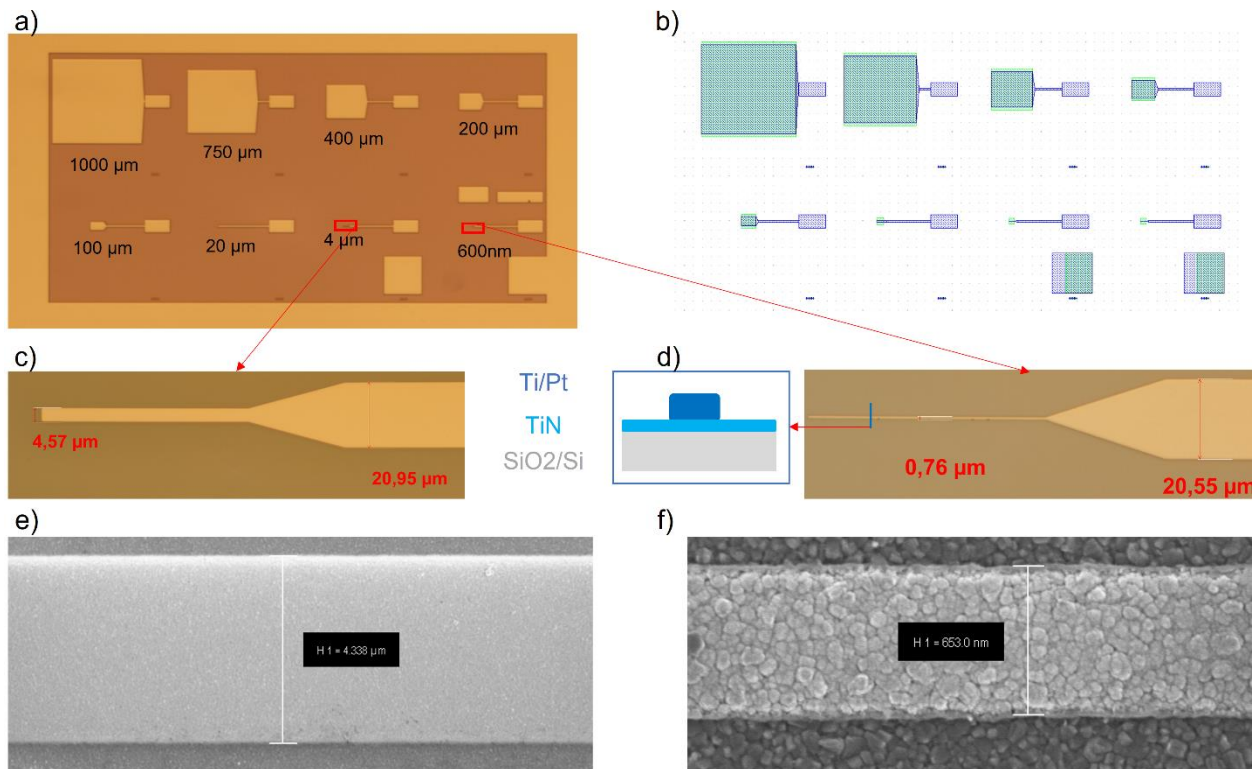


Abbildung 27: a) Mikroskop-Aufnahme der Bodenelektrodenschicht von acht unterschiedlich großen nanoionischen Speicherzellen der Generation 3.2, b) Layout der nanoionischen Speicherzellen von Generation 3.2 ohne Deckelektrode, Mikroskop-Aufnahme der Bodenelektrode einer nanoionischen Speicherzelle mit geplanter Kantenlänge c) von 4 μm und d) von 600 nm, Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Bodenelektrode mit geplanter Kantenlänge e) von 4 μm und f) von 600 nm

2.7.2 Integration der Demonstratorsysteme (AP 6.2)

In Arbeitspaket 6.1 wurde von den Kollegen aus Paderborn ein Demonstratorboard entwickelt, um auf einer kleinen Gesamtfläche sowohl den piezoelektrischen MEMS als auch den nanoionischen Speicher zu integrieren. Dieses Demonstratorboard beinhaltet darüber hinaus die Auswerteelektronik sowie die RFID-Schnittstelle und ist in Abbildung 28 dargestellt. Der Innenwiderstand der Memristoren kann mittels dieser Platine drahtlos ausgelesen werden, die Datenübertragung erfolgt über eine Standard RFID-Schnittstelle, welche bei 13,56 MHz arbeitet. Sowohl die Schnittstelle als auch die AD- und DA-Wandler des Boards werden aus dem Nahfeld des RFID-Reader mit elektrischer Energie versorgt, befindet sich kein Lesegerät in Reichweite sind diese Komponenten inaktiv und es arbeiten nur der piezoelektrische Wandler, die Villard-Greinacher-Schaltung und die Memristoren. Der Schaltplan des Demonstratorboards kann im Berichtsteil der Universität Paderborn eingesehen werden.

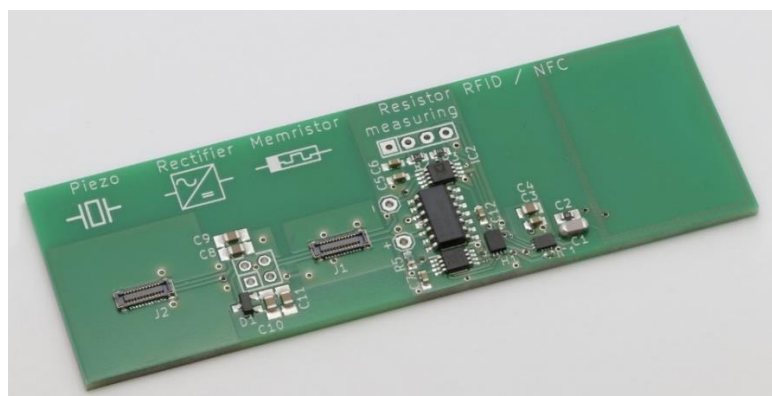


Abbildung 28: Platine mit Steckkontakten für die piezoelektrischen MEMS und die nanoionischen Speicher, Auswerteelektronik und RFID-Schnittstelle

Die nanoionischen Speicher und die piezoelektrischen MEMS können mittels Steckverbindern auf das Board aufgesteckt werden, um multiple Konfigurationen dieser Bauelemente zu testen. Seitens des nanoionischen Speichers wurden zwei Board designt. Einerseits ein Adapterboard, siehe Abbildung 29 a), um die verschiedenen Memristoren mit unterschiedlichen Größen und damit unterschiedlichen Stromstärken eines Chips zu untersuchen.

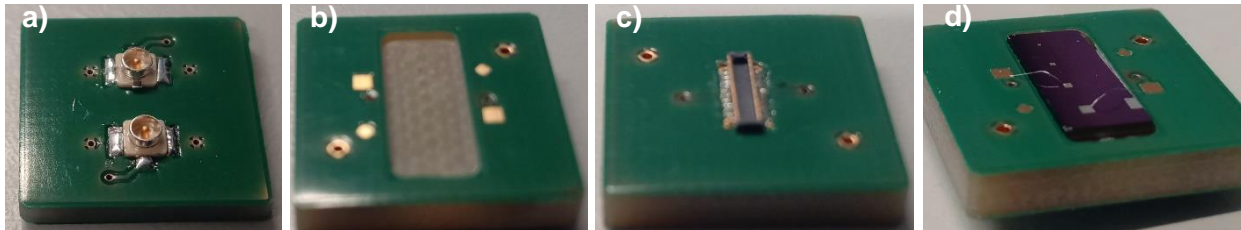


Abbildung 29: a) Rückseite der Adapter-PCB für nanoionische Speicher-Chips, b) Vorderseite des PCB-Trägers für vereinzelte nanoionische Speicher mit Rückelektrode, c) Rückseite mit Kontakt-Steckverbinder, d) Vorderseite des PCB-Trägers mit Draht-gebundenen nanoionischen Speicher

Dadurch können bei den verschiedenen Memristorvarianten, die am besten geeigneten nanoionischen Speichergrößen während einer anwendungsnahen Untersuchung identifiziert werden. Andererseits wurde ein Board für den geeigneten nanoionischen Speicher designt und in Abbildung 29 b) unbestückt und in d) mit einem TiO_x -Memristor M4 bestückt dargestellt.

Die Abbildung 30 zeigt das Demonstratorboard mit einem piezoelektrischem MEMS und einen nanoionischen Speicher mit der Memristorgröße M6. Bei diesem Board handelt es sich um den bislang kleinsten Demonstrator, welcher im Rahmen des Projektes UpFUSE gefertigt wurde. Seine Gesamtgröße beträgt 85 mm x 25 mm.

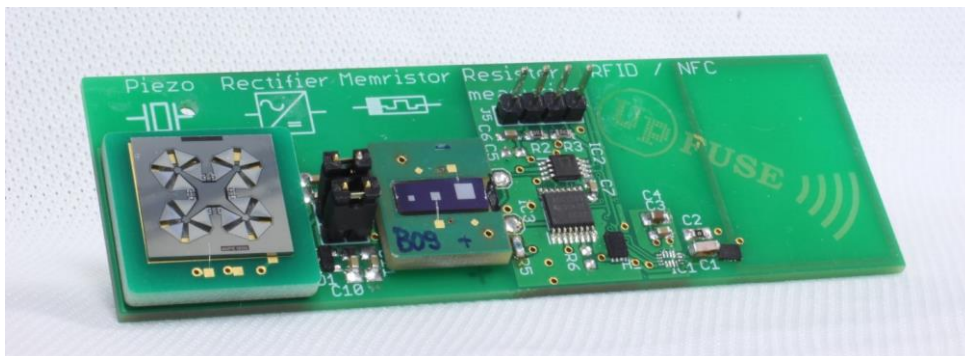


Abbildung 30: Demonstratorsystem mit piezoelektrischem MEMS und nanoionischen Speicher

2.8 AP 7 Designrichtlinien für passive Sensoren

Für die entwickelten Memristoren wurde ein phänomenologisches Modell entworfen, um diese im LTspice simulieren zu können. In Abbildung 31 (links) ist dieses Modell dargestellt. Es basiert im Wesentlichen auf zwei Schottky-Dioden, welche den Kontakt zwischen der memristiven Schicht und dem Elektrodensystem abbilden und der memristiven Schicht selbst, welche durch einen veränderlichen Widerstand abgebildet wird. In das Modell dieses Widerstandes wurde das komplette Zeitverhalten des Memristors integriert. Abbildung 31 (rechts) zeigt die Kennlinie eines Memristors, welche mittels dieses Modells simuliert wurde, im Vergleich zu einer gemessenen UI-Kennlinie. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Das Modell kann zur Nachbildung des Strom-Spannungsverhaltens der Memristoren mit hoher Funktionalität genutzt werden hat jedoch bezüglich seines Zeitverhaltens einige Unzulänglichkeiten. Hier müssen weitere Versuchsreihen durchgeführt werden, um das Modell sukzessive anzupassen. Diese Anpassungen sind erforderlich, um die Memristoren letztlich auch im gepulsten Modus oder unter Verwendung zeitkontinuierlicher Wechselsignale mit hoher Präzision simulativ nachbilden zu können.

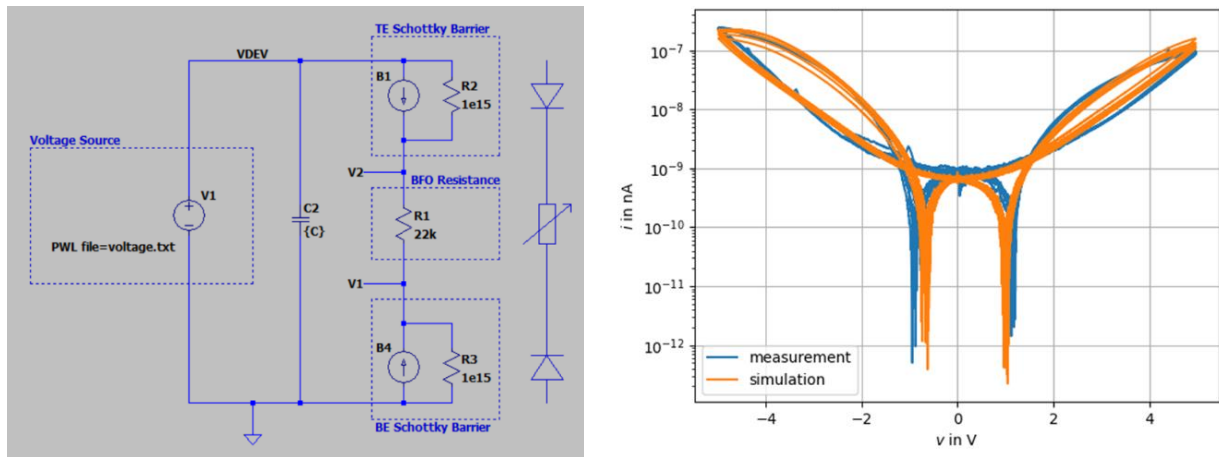


Abbildung 31: (links) Phänomenologisches Modell eines Memristors für die Schaltungssimulation im LTSpice, (rechts) simuliertes Strom-Spannungs-Verhalten

2.9 AP 8 Systemtest und Validierung

2.9.1 Systemtest im Laboraufbau (AP 8.1)

Zu Test- und Demonstrationszwecken des Systems zur energieautarken Vibrationsdetektion wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Paderborn ein Demonstrator aufgebaut, siehe Abbildung 32. Dieser besteht aus einem stilisierten Motorgehäuse, in das ein Lautsprecher eingebaut ist. Im Motorengehäuse befindet sich zudem ein Bluetooth-fähiger Audioverstärker mit dem verschiedene Vibrationssignale auf das MEMS appliziert werden können. Die Veränderung des Innenwiderstandes des Memristors kann mittels eines RFID-fähigen Readers, z.B. einem Smartphone, ausgelesen werden. Neben konventionellen Sinussignalen können auf diese Weise auch Sound-Files über den Lautsprecher abgespielt werden. Diese können beispielsweise an realen Fertigungsanlagen aufgenommen worden sein, was einen Test in einer Laborumgebung mit Daten eines realen Anwendungsszenarios gestattet.

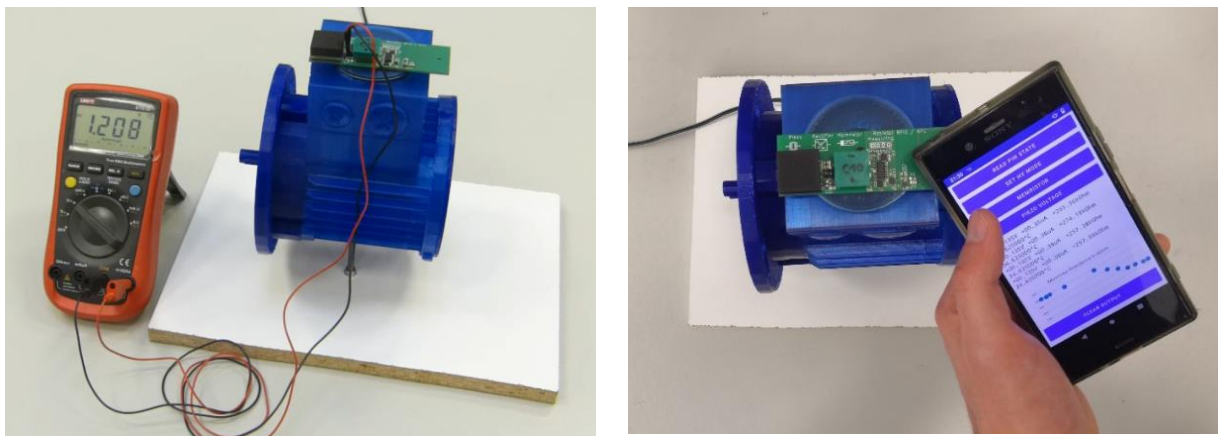


Abbildung 32: Testaufbau zur Charakterisierung des Demonstrators in einer Laborumgebung, (links) Ausgangsspannung der Ladungspumpe bei Anregung des piezoelektrischen Wandlers, (rechts) Auslesevorgang des Memristors mit einem Smartphone über die RFID-Schnittstelle

Um den Demonstrator in einer Laborumgebung zu testen, wurden Daten einer laufenden Hydraulikpumpe mit einer eigens dafür konstruierten Datenloggerplatine und einem konventionellen Beschleunigungssensor aufgenommen. Diese Daten wurden in wav-Dateien gewandelt und mit dem Ausgang der Soundkarte des Rechners in den Verstärker des Demonstrators eingespielt. Eine Beschreibung des Schaltplanes der Datenloggerplatine findet ich im Berichtsteil der Universität Paderborn.

2.9.2 Systemtest in den Anwendungsszenarien (AP 8.2)

Als Anwendungsszenario wurde von einem Mitglied des Industriebeirates, der MSF-Vathauer GmbH, ein Motorenprüfstand zur Verfügung gestellt. Auf diesem Prüfstand wurde ein Motor mit einem signifikanten Lagerschaden montiert und bei verschiedenen Drehzahlen und Ansteuerprofilen getestet. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte über die bereits beschriebene Datenloggerplatine des Projektpartners Universität Paderborn. In Abbildung 33 links ist der Testaufbau dargestellt, die Abbildung auf der rechten Seite zeigt den montierten Datenlogger sowie den Beschleunigungssensor auf dem Motor.

Die ersten Testläufe in den Anwendungsszenarien der MSF-Vathauer GmbH dienten dem Zweck, sich mit den Anwendungsumgebungen für derartige Sensorsysteme vertraut zu machen und daraus weitere Anforderungen an die Wandler und die Speicher abzuleiten. Sie bildeten den Abschluss des Projektes. Mit den erfolgreichen Funktionsnachweisen kann in Folgeprojekten oder Industrieaufträgen begonnen werden, die Sensorik detailliert auf die Bedarfe der Industriepartner zuzuschneiden.



Abbildung 33: Testaufbau zur Charakterisierung des Demonstrators auf dem Motorenprüfstand, (links) Gesamtansicht des Testaufbaus, (rechts) auf dem Motor montierter Datenlogger und Beschleunigungssensor

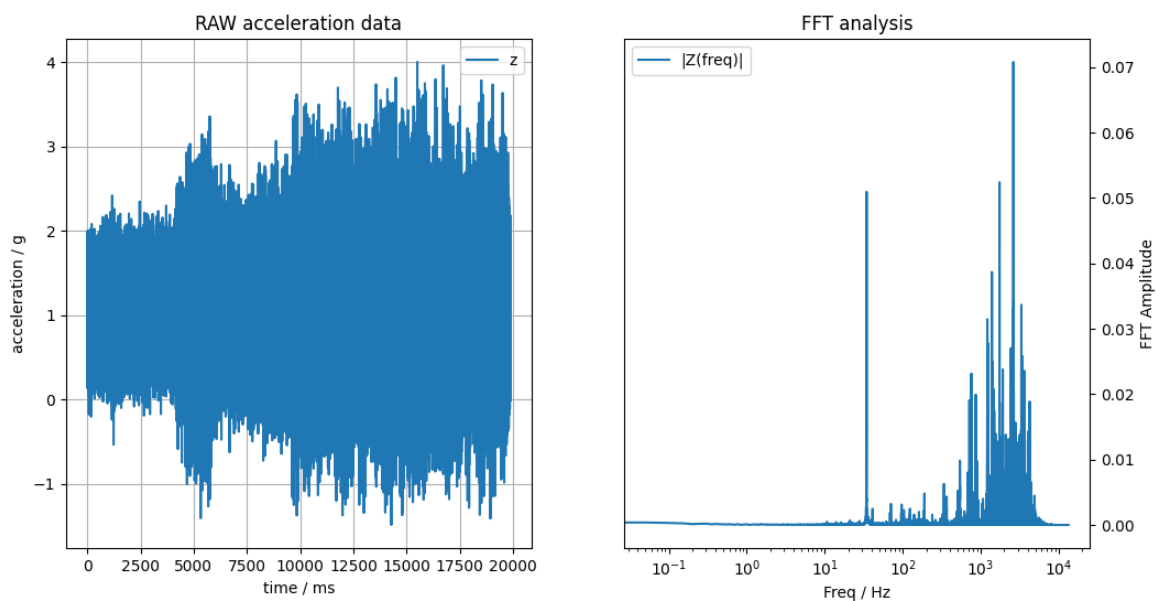


Abbildung 34: Zeitsignal (links) und schnelle Fourier-Transformierte (rechts) der Messungen auf dem Motorenprüfstand

Abbildung 34 zeigt das vom Beschleunigungssensor gemessene Zeitsignal und dessen FFT. In beiden Messungen wurde der Motor bei einer konstanten Drehzahl von 35 Hz betrieben. Die

Messungen decken hohe Frequenzanteile in den Motorschwingungen zwischen 1 kHz und 7 kHz auf. Außerdem sind starke Schwankungen der Schwingungsamplitude bei konstantem Motorlauf erkennbar. Beides könnten Hinweise auf den Defekt im Motor sein. Die Grafik in Abbildung 34 rechts kennzeichnet mögliche Schadfrequenzen, welche bei defekten Lagern in Elektromotoren auftreten können. Werden diese Frequenzen mittels energieautarker Sensorik überwacht, so kann das Zeitintegral über diese Schwingungen sowie die mechanisch abgespeicherte Schwingungsamplitude direkt in die noch verbleibende Laufzeit des Lagers umgerechnet werden. Auf diese Weise können künftig Lagerschäden vorhergesagt und teure Reparaturen an Fertigungsanlagen vermieden werden.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projekt UpFUSE wurden für das Fraunhofer ENAS insgesamt 404.044,80 € bewilligt. Diese Mittel wurden nahezu vollständig ausgeschöpft. Davon entfallen ca. 300.645,88 € auf Personal. Für Sachkosten im Sinne von Verbrauchsmaterial sowie allgemeine Verwaltungsaufgaben wurden ca. 31.151,33 € ausgegeben. Für Reisekosten wurden ca. 4.945,67 € verausgabt. Weitere Details sind dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis zu entnehmen.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Die von der Technischen Universität im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten waren zur Erfüllung der Projektziele notwendig und angemessen.

5 Nutzen und Verwertung der Projektergebnisse

Aus Sicht der Technischen Universität Chemnitz kann das Projekt ForMikro-UpFUSE als ein sehr wichtiges und erfolgreiches Projekt gewertet werden. Als eines der wesentlichen Projektergebnisse kann die Tatsache angeführt werden, dass innerhalb der Projektlaufzeit wichtige Erkenntnisse zu bislang noch sehr unerforschten Betriebsarten des Bauteils Memristor gewonnen worden, der Langzeitspeicherung und der zeitintegralen Speicherung variabler Eingangssignale. Diese Ergebnisse fließen unmittelbar in drei Folgeprojekte ein, welche sich sehr intensiv mit neuromorphem Rechnen und memristiven Hardwarebeschleunigern beschäftigen. Auch in diesen Anwendungsszenarien müssen die gelernten Muster teilweise über längere Zeiträume ohne zusätzliche Hilfsenergie stabil gehalten werden. Weitere Projekte im Rahmen der erwähnten Thematiken befinden sich gegenwärtig in der Beantragung.

Neben den Speichern wurden im Rahmen des Projektes verschiedene Demonstratorboards gefertigt, wobei eines zur Ansteuerung der Memristoren mit multiplen Eingangssignalen bei gleichzeitiger Strommessung diente. Das andere ist der Demonstrator eines energieautarken Sensorsystems, welches alle erforderlichen Komponenten, piezoelektrisches MEMS, Ladungspumpe, nanoionischer Speicher, RFID-Schnittstelle und Antenne zur drahtlosen Energieübertragung enthält. Beide Boards wurden bereits auf einige Fachmessen gezeigt und haben dort für Aufsehen gesorgt. Gegenwärtig gibt es Gespräche mit Unternehmen, welche als Anwender der entwickelten Sensorplattform in Frage kommen.

Zwischen den Konsortialpartnern und den Mitgliedern des Industriebeirates ergab sich innerhalb der Projektlaufzeit eine sehr enge Zusammenarbeit. Zwischenzeitlich gibt es bereits einige konkrete Ideen, wie sich eine weitere Zusammenarbeit innerhalb dieser Thematik sowie in angedachten Folgethemen gestalten könnte. Ein Projektantrag mit Beteiligung der Ruhr Universität Bochum und der TU Chemnitz, welcher einen mechanischen Akkumulator adressiert, wird derzeit erstellt. Ein weiterer Antrag zu einem energieautarken Sensorwafer zur Überwachung von Plasmaprozessen in der Mikroelektronik befindet sich gegenwärtig in der Vorbereitung.

Im Rahmen des Projektes wurden fünf Fachveröffentlichungen angefertigt [1-5]. Eine weitere Publikation, welche das gesamte nanoionische Konzept adressiert, befindet sich gerade in Arbeit. In Rahmen des Projektes ForMikro-UpFUSE wurden zwei Masterarbeiten, eine Bachelorarbeit

und eine Projektarbeit abgefertigt. Eine weitere Bachelorarbeit, welche teilweise auf den Arbeiten des Projektes aufbaut, befindet sich gerade in der Bearbeitungszeit. In der Mastervorlesung „Technologien für Mikro- und Nanosysteme“ wurde zwischenzeitlich eine Vorlesung komplett den memristiven Bauteilen gewidmet. In diese Vorlesung werden auch Ergebnisse des Projektes ForMikro-UpFUSE einfließen.

6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Kombination aus piezoelektrischem Wandler und Memristor zur Anfertigung energieautarker Sensoren ist ein Novum im Bereich der Mikro- und Nanotechnologie. Bisherige Arbeiten an Memristoren konzentrierten sich vordergründig auf den Einsatz dieser Bauteile als nichtflüchtige Speicher in Computeranwendungen, ReRAM, oder für das neuromorphe Rechnen. Die Anforderungen, welche an die nanoionischen Speicher in diesen Anwendungsfeldern gestellt werden, variieren stark von den Vorgaben für diese Speicher im Projekt ForMikro-UpFUSE. Während die ReRAM-Zellen schnell schalten und die als künstliche Synapsen fungierenden Memristoren im Bereich des neuromorphen Rechnens möglichst wenig Energie für einen Schaltzyklus benötigen sollten, müssen die nanoionischen Speicher im Bereich der energieautarken Sensorik vor allem eine hohe Langzeitstabilität der gespeicherten Werte und eine sehr geringe Memristanz aufweisen, um einen Sättigungseffekt des Innenwiderstandes über der Zeit zu vermeiden. Damit unterscheiden sich die Forschungen an die Speicher im Projekt ForMikro-UpFUSE stark von den typischen Arbeiten auf dem Gebiet der Memristoren. Nach bestem Wissen gibt es keine weiteren bekannten Arbeiten in der Industrie, bei Forschungseinrichtungen oder Universitäten auf dem Gebiet der im Projekt verfolgten Vision. Ebenfalls sind bis zum heutigen Tag keine Sensoren bekannt, welche nach dem im Projekt angestrebten Funktionsprinzip arbeiten.

Aus dem Projekt ForMikro-UpFUSE heraus wurde gegen Projektende die Firma „mechIC“ gegründet [9], welche sich mit der Kommerzialisierung der energieautarken Sensoren mit mechanischem Grundprinzip, siehe Berichtsteil der Ruhr Universität Bochum, beschäftigt. Die Gründer sind zwei Projektmitarbeiter, welche sich auf eine EXIST-Förderung beworben haben, die schließlich am 1. April 2024 bewilligt wurde. Teile der Technologie, welche von mechIC vertrieben werden, sollen künftig in den Reinräumen der TU Chemnitz gefertigt werden.

7 Referenzen und Veröffentlichungen zum Projekt

- [1] Hoffmann, M.; Schmitt, P.; Zimmermann, S.; Stöckel, C.; Forke, R.; Geneiß, V.; Wittemeier, S.; Hedayat, C.; Hilleringmann, U.; Kuhn, H.: *Speichernde Sensorkonzepte mit in-memory-Computing, ganz ohne elektrische Hilfsenergie*, Mikrosystemtechnik Kongress 2021 (MST 2021), 2021, pp. 106-109 (ISBN 978-3-8007-5656-8)
- [2] Stoeckel, C.; Shaporin, A.; Schaller, F.; Melzer, M.; Forke, R.; Zimmermann, S.; Kuhn, H.: *Passive, frequency-selective piezoelectric MEMS with wake-up electronics for ultra-low-power vibration sensors*, GMM-Fb. 102: EASS 2022; Energieautonome Sensorsysteme 2022, Beiträge der 11. GMM-Fachtagung, 5. – 6. Juli 2022 in Erfurt
- [3] Hoffmann, M.; Schmitt, P.; Wittemeier, S.; Schaller, F.; Shaporin, A.; Stoeckel, C.; Geneis, V.; Forke, R.; Hedayat, C.; Hilleringmann, U.; Kuhn, H.; Zimmermann, S.: *Storing MEMS Interfaces Without Electrical Auxiliary Energy for Long-Time Monitoring*, 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Munich (Germany), 2023 Jan 15-19; Proceedings, pp 522-525 (ISBN 978-1-6654-9308-6, 978-1-6654-9309-3, 2160-1968, 1084-6999)
- [4] Shaporin, A.; Stoeckel, C.; Melzer, M.; Schaller, F.; Forke, R.; Zimmermann, S.; Kuhn, H.: *Optimal design of piezoelectric MEMS for vibration monitoring system with nanoionics zero-energy memory elements*, 24th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE 2023), Graz (Austria), 2023 Apr 16-19; Proceedings, pp 1-5

- [5] Zimmermann, S.; Hoffmann, M.; Forke, R.; Stöckel, C.; Schmitt, P.; Wittemeier, S.; Geneiß, V.; Kiefner, U.; Schaller, F.; Shaporin, A.; Hedayat, C.; Kuhn, H.: *Sensor systems with internal data processing and storage as well as wireless interface running without electrical energy storage and energy harvesting devices*, EPoSS Annual Forum 2023, 4.-7. Juli, Villach (Austria)

Veröffentlichungen mit Bezug zum Projekt:

- [6] Stoeckel C., Meinel K., Melzer M., Žukauskaitė A., Zimmermann S., Forke R., Hiller K., Kuhn H.: *Static High Voltage Actuation of Piezoelectric AlN and AlScN Based Scanning Micromirrors*, *Micromachines*, 13 (4), 2022, doi: 10.3390/mi13040625

Sonstige Referenzen:

- [7] Strukov, D.B.; Snider, G.S.; Steward, D.R.; Williams, R.S.: The missing memristor found, *Nature*, Vol. 435, **2008**, S. 80 - 83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
- [8] Ielmini, D.; Waser, R.: *Resistive Switching*, Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, 69469 Weinheim, Germany, **2016**, ISBN: 978-3-527-33417-9
- [9] Internetpräsenz des Start-Ups mechIC, www.mechic.de