

Abschlussbericht

ZE: Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) Gustav-Meyer-Allee 25 13355 Berlin	Förderkennzeichen: 281C306C19
Vorhabenbezeichnung: Integrierte Sensorsysteme zur Erforschung und Überwachung von Bienen-Gesundheit und Umwelteinflüssen	
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2021 – 31.12.2024	
Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 31.12.2024	
Autor: Marc Ferch, Robert Hahn	

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

Projektträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Einleitende Darstellung des Projekts

Die Westliche Honigbiene (*Apis mellifera*) ist für die globale Landwirtschaft von zentraler Bedeutung. Trotz weiter Verbreitung und intensiver Erforschung ist die erhöhte Sterblichkeit der Bienenvölker bislang unklar. Vermutlich sind dafür verschiedene Faktoren verantwortlich, wie Pathogene, Nahrungsverhältnisse oder Umweltgifte. Bisherige Monitoringansätze fokussieren sich auf die Ebene ganzer Kolonien und erfassen nur grobe Indikatoren. Das Forschungsvorhaben zielt auf die Entwicklung eines innovativen, sensorgestützten Monitoringsystems ab, das Daten auf Einzeltierebene erfasst und mit Umweltparametern verknüpft. Mithilfe miniaturisierter RFID- und Mikrosensorsysteme sollen neue Erkenntnisse über das Verhalten, die Vitalität und die Stressreaktionen von Honigbienen gewonnen werden. Ergänzend wird eine Cloud-basierte Auswertungslösung konzipiert, die eine automatisierte Datenanalyse ermöglicht. Ziel ist es, ein praxisnahes Werkzeug für Imkerei, Landwirtschaft und Umweltforschung zu entwickeln.

1.1 Aufgabenstellung des Fraunhofer IZM

Im Rahmen der geplanten Entwicklungsarbeiten im Bereich der Energieversorgung für mikrosensorische Systeme sollen mehrere zentrale Arbeitsziele realisiert werden. Im Vordergrund steht die Entwicklung einer innovativen Mikrobatterie. Diese soll durch Halbleiter-Strukturierungstechnologien gefertigt werden und mit einer kleinformatigen Solarzelle kombiniert werden, um die sensorische Datenerfassung energetisch zu unterstützen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der hermetischen Integration des Mikrobatteriesystems in die Gesamtarchitektur der Sensoreinheit. Ziel ist es, eine zuverlässige und langlebige Energiequelle zu schaffen, die unter realen Einsatzbedingungen funktionsfähig bleibt. Ein Energie-Harvesting-System soll konzipiert werden, das direkt am Individuum also an der Honigbiene selbst angebracht werden kann. Dieses soll die autarke Energieversorgung der individuellen Sensorik sicherstellen und so die kontinuierliche Erfassung von Verhaltens- und Umweltdaten ermöglichen.

1.2 Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte

Die Energieversorgung und die Datenverarbeitung inkl. der Kommunikation zählen zu den zentralen Baugruppen des Sensorsystems. Auf diesen Gebieten besitzt das Fraunhofer IZM eine langjährige Erfahrung. Insbesondere ergänzt durch die Kompetenzen der flexiblen Aufbau- und Verbindungstechnologie in Kombination mit einem low-power Systemdesign und einer entsprechenden Energieversorgung konnten diese gewinnbringend in das Projekt eingebracht werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Hauptaufgaben des Fraunhofer IZM sind in AP3 "Sensorik auf der Biene zur Untersuchung von Umwelteinflüssen und Umweltgiften" aufgeführt. Zu diesem Zweck wurden in der ersten Projektphase Mikrobatterien unter Verwendung von Waferlevel-Prozessen und nebeneinander angeordneter Elektroden hergestellt. In der zweiten Hälfte des Projekts wurde das Mikrobatteriekonzept einer weiteren Optimierung unterzogen und die Elektroden in einer gestapelten Anordnung hergestellt. Die Entwicklung und Umsetzung eines Energie-Harvesting-Konzeptes erfolgte unter Verwendung der Mikrobatterien sowie einkristallinen Solarzellen.

1.4 Wesentliche Ergebnisse

Es gelang, hermetische Mikrobatterien mit nebeneinander liegenden Elektroden zu produzieren. Die Charakterisierung ergab eine Zunahme der 1-kHz-Impedanz während des Hermetisierungsprozesses. Dieser Anstieg resultiert in einem verstärkten Spannungsabfall bei Pulsbelastung und die Nutzung auf der Biene konnte nicht gewährleistet werden. Daher wurde eine zweite Generation von Mikrobatterien mit einem gestapelten Elektrodenlayout hergestellt. Dieser Aufbau zeichnet sich durch eine Verkürzung des Weges der Lithiumionen aus, was zu einem geringeren Innenwiderstand und somit zu einem geringeren Spannungsabfall führt. Die erfolgreiche Herstellung dieser Mikrobatterien ermöglichte den Nachweis, dass der Spannungsabfall signifikant geringer ausfällt. Die Ergebnisse mehrerer Langzeittests von Mikrobatterien weisen auf eine hohe Zyklenstabilität hin, wobei lediglich ein Abfall von 0,07 % pro Zyklus verzeichnet wurde. Allerdings kam es bei der Herstellung der zweiten Generation von Mikrobatterien wiederholt zu Verzögerungen, die durch wiederkehrende Anlagenausfälle und Defekte in den Reinraumprozessen zur Batteriesubstratherstellung bedingt waren. Aufgrund der Notwendigkeit einer wiederholten Anpassung der Prozesse konnte die Hermetisierung der zweiten Mikrobatteriegeneration im Rahmen des Projekts nicht fristgerecht durchgeführt werden. Es konnte jedoch die Machbarkeit des Konzepts des Energie-Harvesting demonstriert werden. Die Mikrobatterien der ersten Generation wurden unter verschiedenen simulierten Bewölkungsbedingungen erfolgreich mit einem extrem miniaturisierten Solarzellenarray geladen und anschließend mit einem Batteriezyklisierer entladen. Die ermittelten Spannungskurven und Entladekapazitäten demonstrieren, dass die Realisierung eines energieautarken Systems aus Solarmodul und Mikrobatterie ohne die Implementierung eines Batteriemanagementsystems möglich ist, wenn für die Batterieelektroden LFP und LTO verwendet werden.

2 Detaillierte Darstellung des Projekts

2.1 Darstellung der Arbeitsinhalte

2.1.1 AP1: Abgleich fachlicher Anforderungen mit technischen Parametern und Spezifikationen der Roadmap

2.1.1.1 AP 1.1 Definition der Versuchsumsetzung und Priorisierung der wissenschaftlichen Fertigstellungen (1 PM)

Es erfolgte eine Abstimmung mit den Partnern bezüglich sämtlicher für das IZM relevanter Parameter und Spezifikationen. Dies umfasst die grundsätzliche Art der Mikrobatterie, die autarke Stromversorgung mittels Solarzellen ohne Batterieelektronik sowie die Solarstromversorgung durch ein Modul aus Si-Zellen mit angepasster Batteriespannung.

2.1.2 AP3: Sensorik auf der Biene zur Untersuchung von Umwelteinflüssen und Umweltgiften

2.1.2.1 AP3.1 Definition des Anforderungsprofils an die Mikrobatteriekonstruktion (4 PM)

In Kooperation mit dem Projektpartner MicroSensys wurde das Anforderungsprofil an die Mikrobatteriekonstruktion erarbeitet. Die Realisierung einer möglichst flexiblen Anwendung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kapazitätsanforderungen bedingt die Definition von drei Größen, die sich aus zwei Grundbausteinen zusammensetzen (Abb. 1).

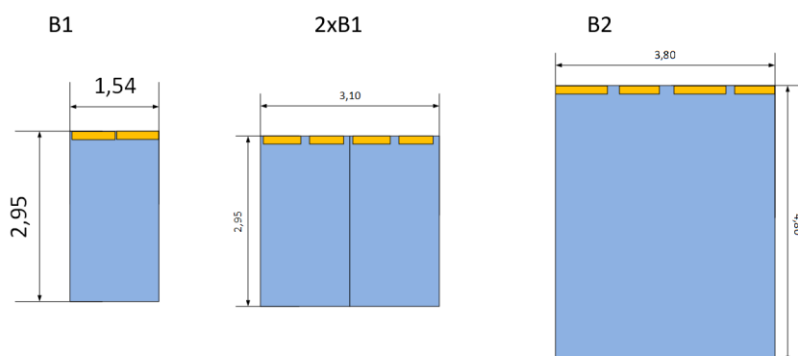


Abb.1: Abmessungen der Mikrobatterie

Die Batteriemasse beträgt bei den drei Varianten 3,2, 6,4 und 12,5 mg. Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit der direkt darüber montierten Antennenspule werden die Stromableiter schlitzförmig ausgeführt. Die finale Metallisierung zum hermetischen Verschluss wird nicht als ganzflächige Schicht, sondern als Metallring ausgeführt (Abb. 2).

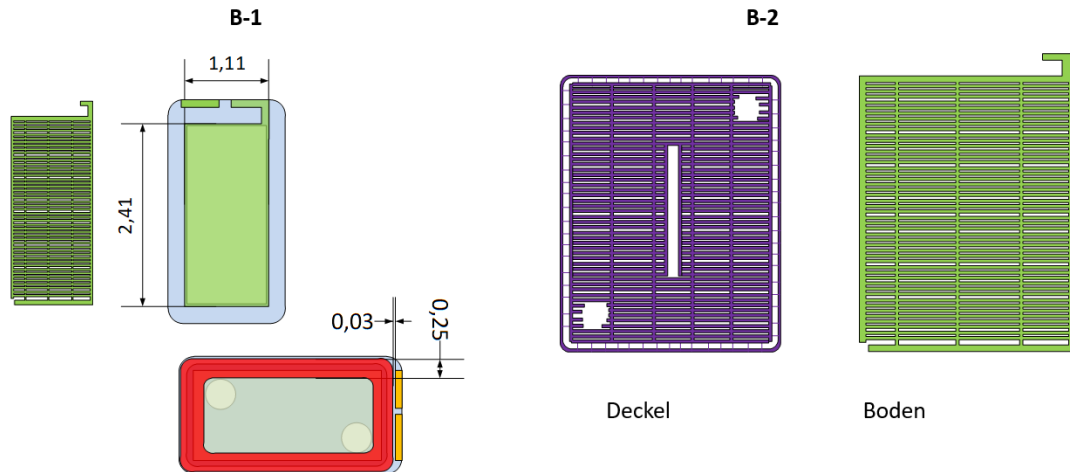


Abb. 2: Metallisierung der Mikrobatterie

Der Verzicht auf Spannungswandler zur Batterieaufladung sowie die abgesenkte Spannungskurve von Solarzellen mit einer Kantenlänge von weniger als 1 mm bedingen die Verwendung einer Batterie mit möglichst niedriger Ruhespannung. Die Erreichung dieses Ziels erfolgt mit Lithium-Ionen-Batterien durch die Kombination einer LTO-Anode mit einer LFP-Kathode (Abb. 3). Zu diesem Zweck wurden Messungen an größeren Zellen durchgeführt. Es manifestiert sich ein ausgesprochen ebenes Spannungsplateau, welches eine vollständige Ladung ermöglicht, sofern es gelingt, die Solarmodulspannung über ca. 1,9 V zu garantieren.

Minuspol Anode	Pluspol Kathode	Max. Ladespannung [V]	Min. Ladespannung [V]*	Entladeschluss- spannung [V]	Anz. Si-Solarzellen für min. Ladespannung 0.5V/0.6V
Graphit	NCA	4.2	4.0	3.0	8/6-7
Graphit	LFP	3.8	3.5	2.5	7/6
Graphit	LTO	1.8	1.65	1	3
LTO	NCA	2.65	2.5	2	5/4
LTO	LFP	2.5	2	1	4/3

Abb. 3: Kombinationsmöglichkeiten von Batterieelektroden und notwendige Anzahl der Solarzellen

2.1.2.2 AP3.4 Konzipierung und Entwicklung des Energie-Harvesting (8 PM)

Der Einsatz von Silizium-Solarzellen, die aus einkristallinem Silizium bestehen und über Rückseitenkontakte verfügen, findet Anwendung. Die Verbindung der Zellen zu einem Modul erfolgt unter Verwendung der Löttechnologie, wie sie auch bei SMD-Bauelementen zum Einsatz kommt. Das Design wurde für fünf Varianten entwickelt (Abb. 4). Die entsprechenden Solarzellen

wurden mittels Wafersäge hergestellt und Zellen sowie Module wurden getestet.

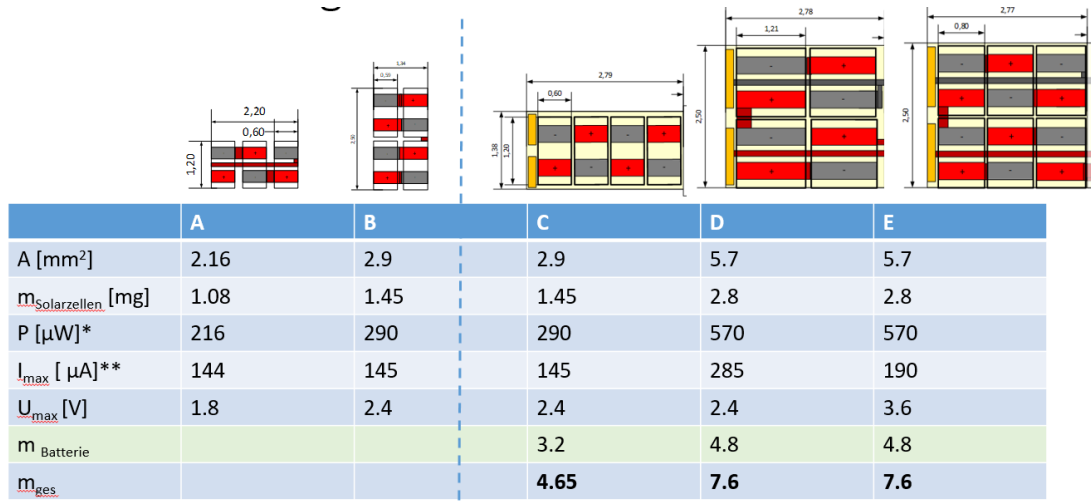


Abb. 4 Solarmodule

Die kleinste realisierbare Solarzelle ergibt sich dabei aus dem Abstand von Plus- und Minuspol auf der Rückseite der Solarzelle (Abb. 5).

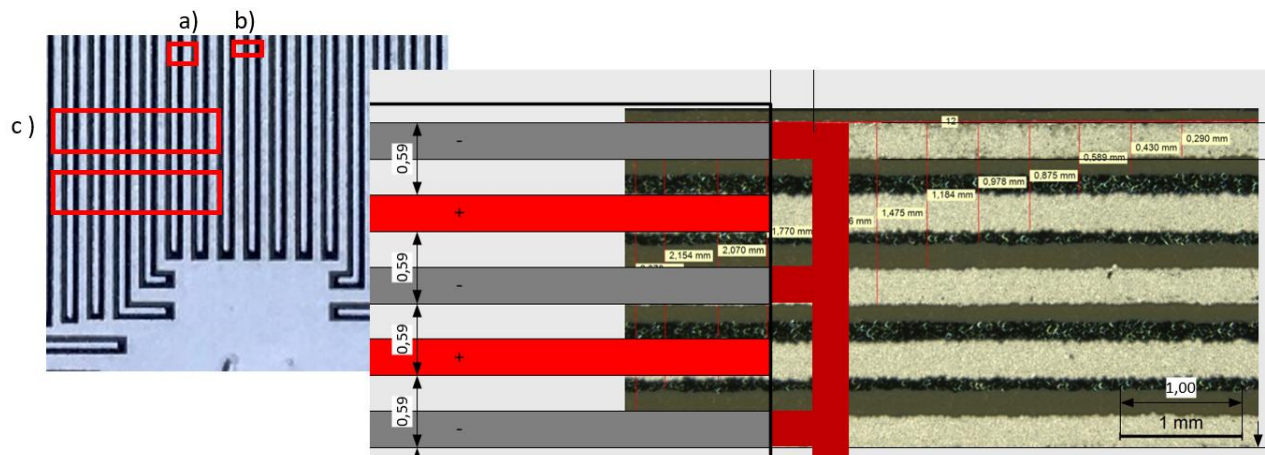


Abb. 5: Rückseite der Si-Solarzellen.

Der Aufbau des Energie-Harvesting-Konzepts wird in Abbildung 6 dargestellt. Im Rahmen des Ladevorgangs wurden die Solarzellen mit einer künstlichen Sonne bestrahlt, während die Mikrobatterie bis zur maximal möglichen Spannung der Solarzellen aufgeladen wurde. Im Anschluss erfolgte die Entladung der Mikrobatterie an einem Batteriezyklisierer, um die erreichte Kapazität zu ermitteln. Die Untersuchung wurde bei vier verschiedenen Beleuchtungsstärken durchgeführt, um die Auswirkungen der Bewölkung auf die erreichbare Kapazität zu untersuchen.

Die Beleuchtungsstärken umfassten 140 W/m^2 (stark bewölkt), 260 W/m^2 (bewölkt), 480 W/m^2 (leicht bewölkt) und 800 W/m^2 (klarer Himmel).

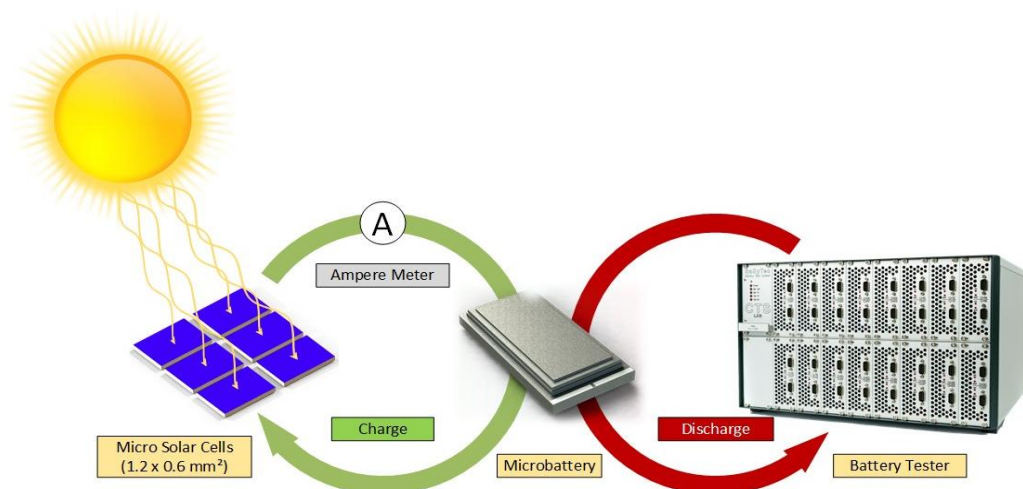


Abb. 6: Prinzip Laden und Entladen Mikrobatterien mit Solarzellenarray.

Es wurden zwei verschiedene Solarzellengrößen charakterisiert. 6x 0,8 mm breite und 6x bzw. 5x 0,6 mm breite Solarzellen wurden hierfür auf einer Leiterplatte in Reihe angeordnet und bei der unterschiedlichen Beleuchtungsstärke wurden Spannung und Strom gemessen (Abb. 7).

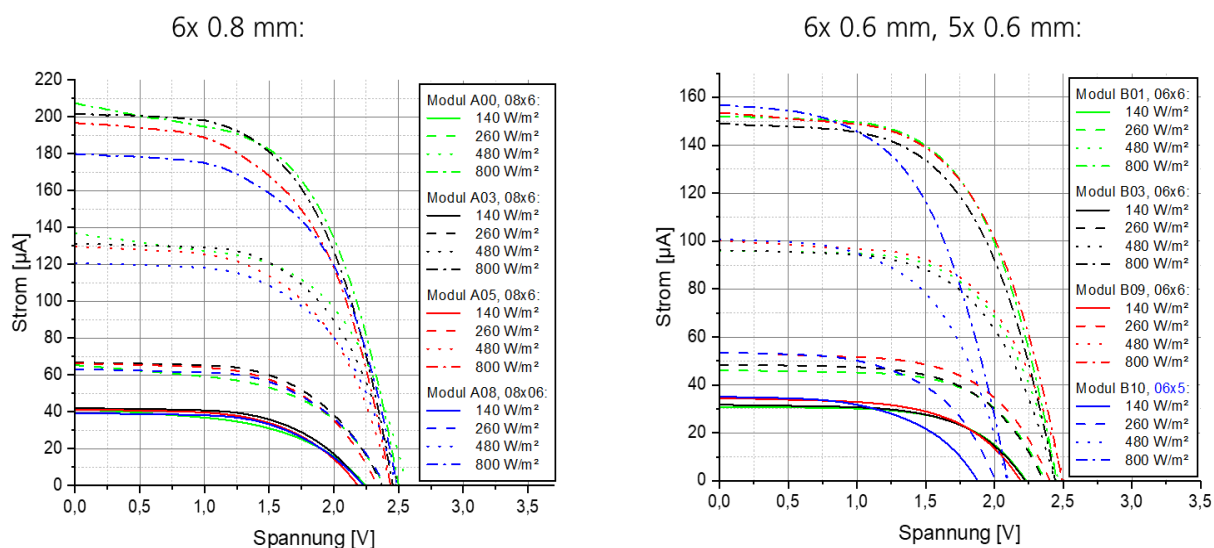


Abb. 7: Strom-Spannungskurve von 6x 0,8 mm breiten und 6x bzw. 5x 0,6 mm breiten Solarzellen.

Die Ergebnisse der Charakterisierung zeigen, dass die 0,6 mm breiten Solarzellen eine

ausreichende Stromlieferung für den Ladevorgang der Mikrobatterien gewährleisten. Gemäß der vorliegenden Evidenz wird die maximale Spannung von 2,5 V bei sechs Solarzellen die Ladung adäquat begrenzen. Die maximale Ladespannung der Batterie wird folglich erreicht und eine Überladung ist nicht möglich.

2.1.2.3 AP3.5 Konzipierung und Entwicklung der Mikrobatterien (8 PM)

Auf Grundlage der erarbeiteten Spezifikationen des Aufbaus der Mikrobatterie erfolgte die Festlegung der Herstellungstechnologie und die Erarbeitung des Designs.

In der ersten Generation wurde der Aufbau, bei dem die Elektroden nebeneinander angeordnet sind, entsprechend der am Fraunhofer IZM etablierten Methode umgesetzt. Bei der zweiten Generation wurde ein gestapelter Aufbau der Mikrobatterie realisiert (Abb. 8), da bei diesem Aufbau kleine Innenwiderstände erreicht werden können. Die grundlegenden Prozessschritte bleiben bei beiden Designs konstant. Die Kathode und die Anode wurden in Kavitäten des Siliziumdeckels bzw. Bodens dispensiert. Im Anschluss wurde der Deckel auf den Boden gebondet. Die Zufuhr des Elektrolyts wurde durch ein im Deckel befindliches Elektrolytbefüllloch gewährleistet. Im Anschluss daran erfolgte die Verschließung der Löcher mittels eines zweiten Deckels. Im Rahmen des Hermetisierungsprozesses wurde eine 10 µm dicke Nickelschicht auf der Batterien erzeugt.

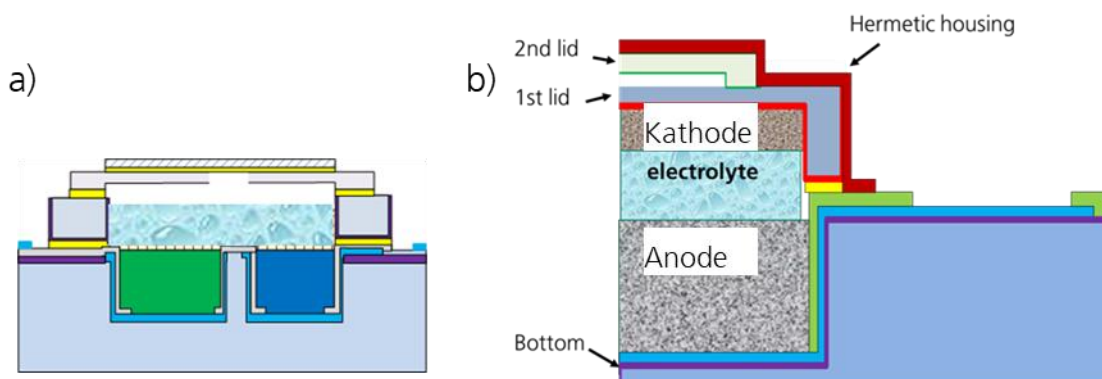


Abb. 8: Aufbau Mikrobatterien a) Gen1 – Elektroden nebeneinander und b) Gen2 - Elektroden.

Für die Fabrikation der Batterieböden und -deckelsubstrate im Reinraum wurden die einzelnen Lithografie-Masken konzipiert und produziert. Die Abbildung 9 veranschaulicht das Layout auf einem 200 mm Wafer. Die Anzahl der auf einen Wafer passenden Mikrobatterien mit den Abmessungen für B1 wird mit ca. 1500 angegeben.

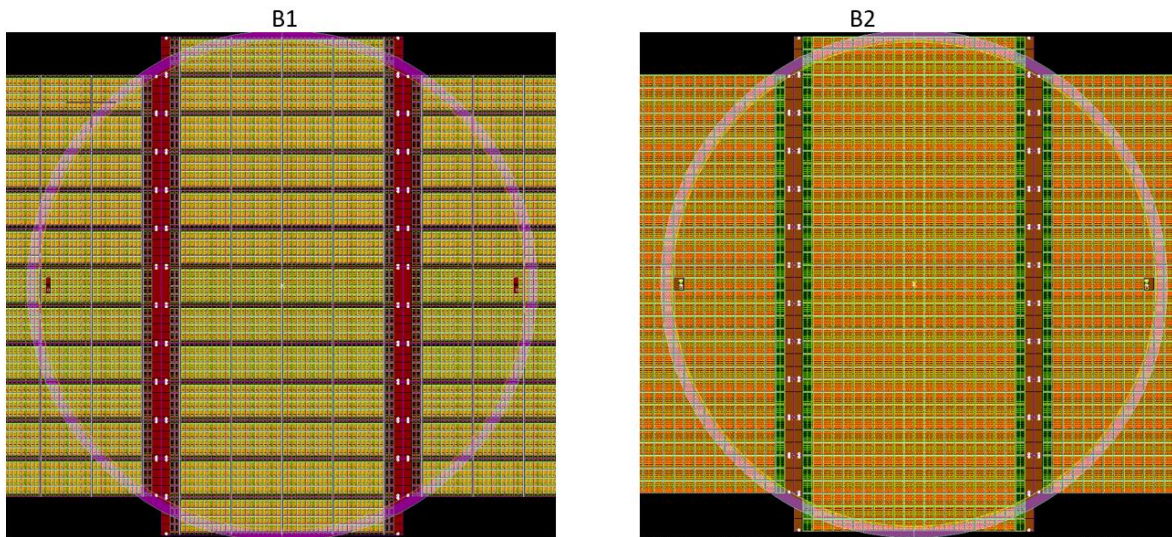


Abb. 9: Batterielayout für B1 (links) und B2 (rechts) auf 200 mm Wafer

In Abbildung 10 ist ein fertiger Wafer mit Bodensubstraten dargestellt. Zur Optimierung der Verarbeitbarkeit wurden die Substrate in kleinere Streifen gesägt. Im Anschluss wurde eine Haftschrift aus Carbon-Nanotubes in die Batteriekavitäten dispensiert, um den Kontaktwiderstand zu verringern. Die Dispensierung der Anode erfolgte auf die Haftschrift (vgl. Abb. 11).

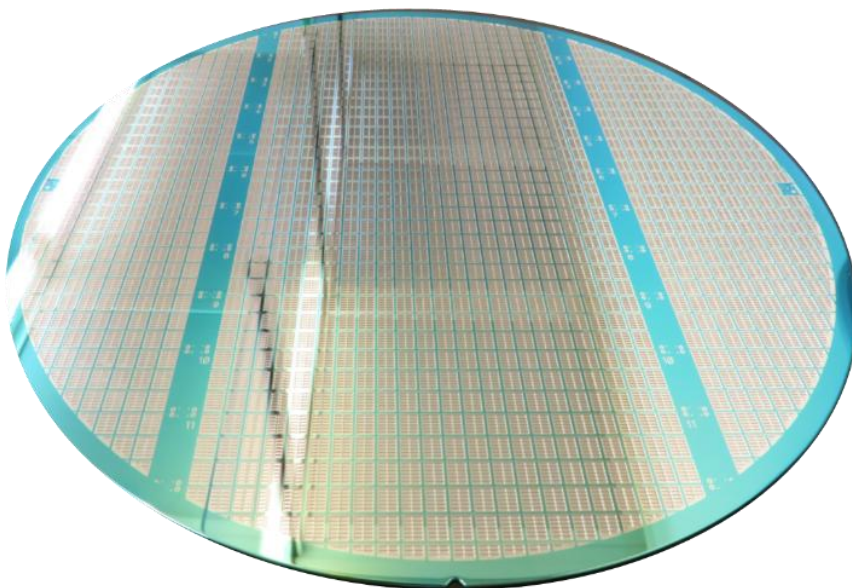


Abb.10: Wafer mit Bodensubstraten.

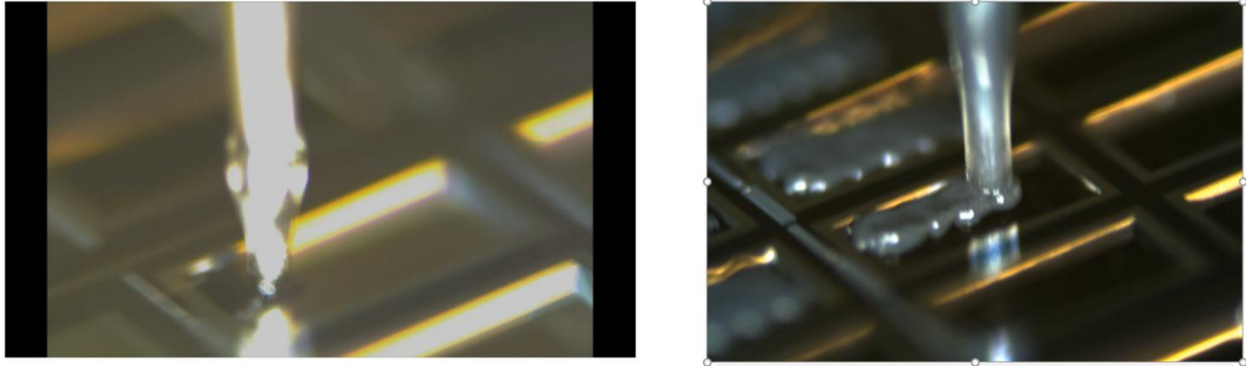


Abb. 11: Dispensieren von Haftvermittler (links) und Elektrode (rechts) in die Batteriekavitäten der Bodensubstrate.

Die die Kathode befüllten Deckel (Abb. 13) wurden mittels thermisch aushärtenden Epoxids und Fineplacer auf den mit Anode befüllten Bodensubstrat (Abb.12) gebondet.

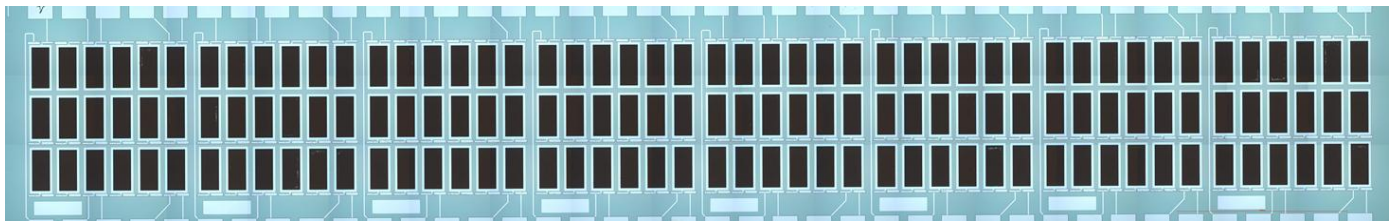


Abb. 12: Mit Anode befülltes Bodensubstrat.

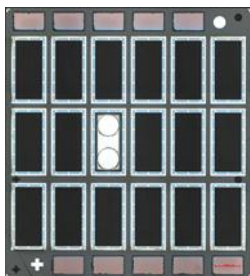


Abb. 13: Mit Kathode befülltes Deckelsubstrat.

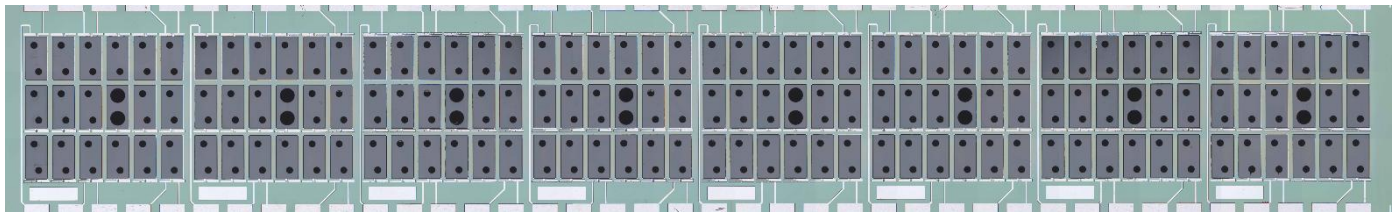


Abb. 14: Gebondetes Bodensubstrat mit Deckel.

Im darauffolgenden Schritt wurde ein temperaturstabiler Flüssigelektrolyt in eines der beiden Elektrolytbefülllöcher dispensiert. Das zweite Loch dient der Entgasung. Zum Verschließen der vorliegenden Löcher wurde ein strukturierter Glasdeckel mittels UV-Bond appliziert (vgl. Abb. 15).

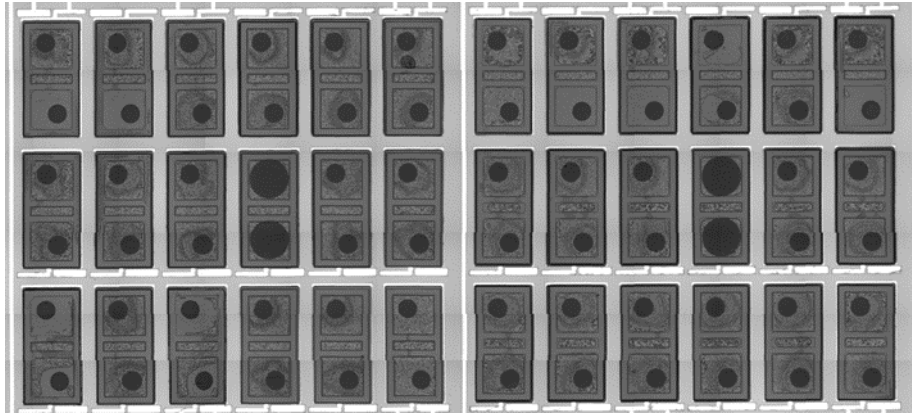


Abb. 15: Gebondetes Bodensubstrat mit Deckel.

Nach Abschluss dieses Schrittes können die Mikrobatterien in der Glovebox vermessen werden. Um eine optimale Nutzung der Mikrobatterien zu gewährleisten, wird eine Hermetisierung mit einer 10 µm dicken Schicht durchgeführt (Abb. 16).

Hermetisiertes Mikrobatterien-Array:

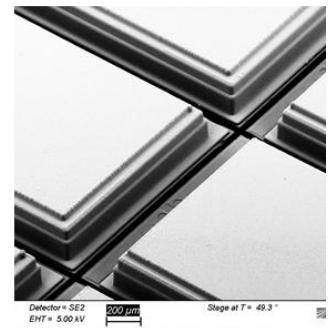
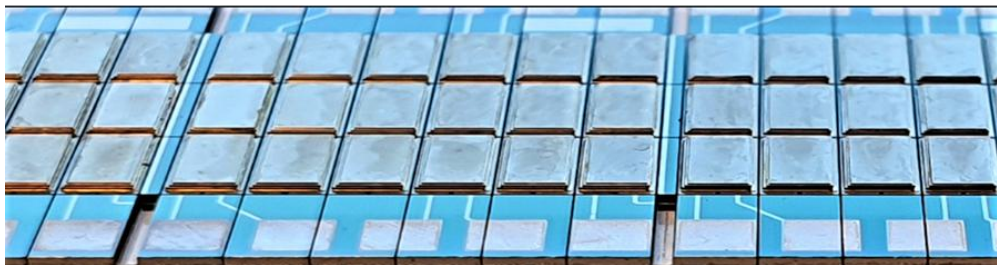


Abb. 16: Hermetisierte Generation 1 Mikrobatterien.

Im Rahmen des Projekts konnte lediglich die erste Generation von Mikrobatterien vollständig hermetisiert werden. In Bezug auf die zweite Generation wurden wiederholt Probleme bei der Reinraumfertigung der Boden- und Deckelsubstrate beobachtet. Darüber hinaus führten Anlagenausfälle, lange Reparaturzeiten, lange Lieferzeiten und das Corona-Virus zu weiteren Verschiebungen.

Es wurde festgestellt, dass es vermehrt zu unvorhergesehenen Problemen beim Ätzen des 1st Lids kam. Als Ursache wurde ein Defekt der reaktiven Ionenätzanlage identifiziert. Im Zuge der Untersuchung wurden kontinuierlich neue Artefakte entdeckt, die vor dem Anlagendefekt nicht existent waren. In den Kavitäten wurden "Siliziumnadeln" beobachtet (Abb. 17), und am Rand des 1st Lids entstand eine umlaufende "Siliziumscheibe" (Abb. 18). In der Konsequenz dessen war es erforderlich, den Ätzprozess mehrfach anzupassen, um die vorliegenden Artefakte zu eliminieren.

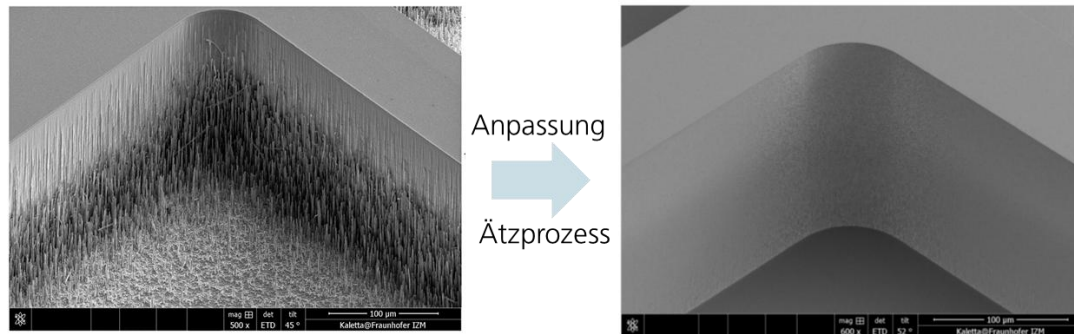


Abb. 17: Anpassung des Ätzprozesses zur Entfernung der „Siliziumnadeln“.

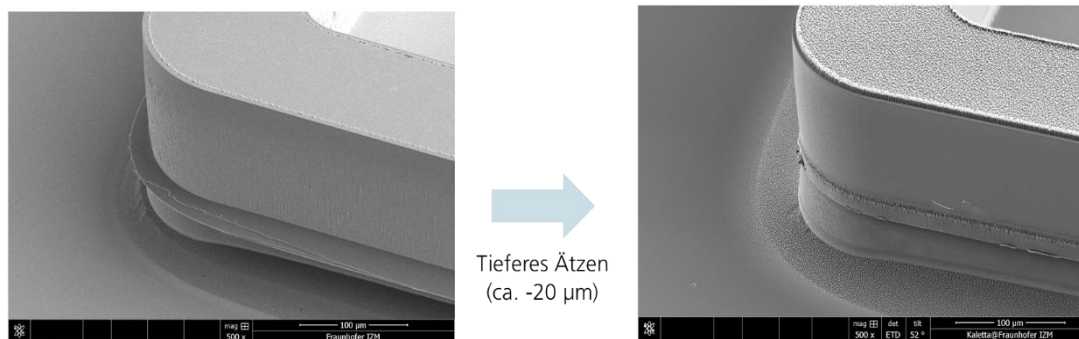


Abb. 18: Anpassung des Ätzprozesses zur Entfernung der „Siliziumscheibe“.

2.1.2.4 AP3.7 Bau, Test und Evaluation der in AP3 entwickelten Systeme (4 PM)

Die erste Generation an Mikrobatterien mit den nebeneinander liegenden Elektroden wurde hinsichtlich ihrer Kapazität, 1 kHz Impedanz und Temperaturverhalten charakterisiert. Es konnte festgestellt werden, dass insbesondere erhöhte Temperaturen während des Hermetisierungsschritts zu einer signifikanten Zunahme der Impedanz der Mikrobatterien (Abb. 19) und somit zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit führen.

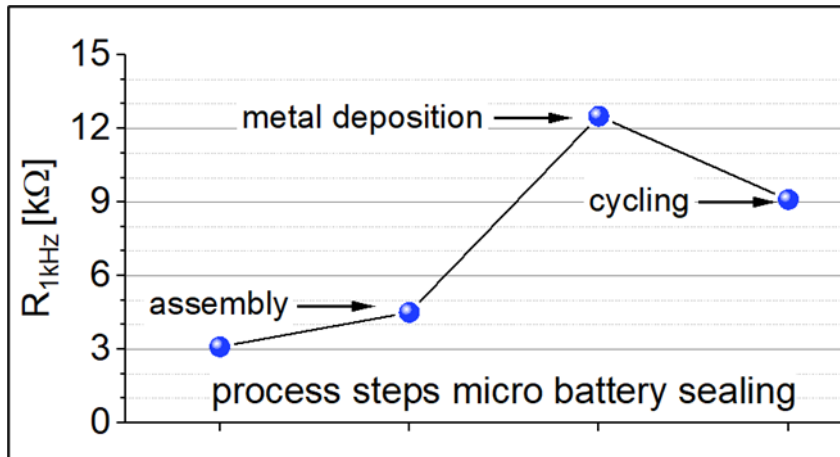


Abb. 19: Anstieg der 1 kHz Impedanz bei der Hermetisierung.

Die Modifikation des Designs für die zweite Generation an Mikrobatterien wurde vorrangig aufgrund der zuvor identifizierten Problematik vorgenommen. Das gestapelte Design hat eine Reduktion des Wegs der Ionen zur Folge. Zusätzliche Haftsichten aus Carbon-Nanotubes sollten zu einem geringeren Anstieg der Impedanz bei der Hermetisierung führen. Die Batterien der zweiten Generation wurden mit Elektrolyt befüllt und mit dem zweiten Deckel verschlossen, sodass eine Charakterisierung möglich war, ohne die Nickelverkapselung herzustellen. Zur Simulation des Hermetisierungsprozesses wurden die Batterien für die Dauer von zwei Stunden bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius ausgelagert. Die Analyse der Abbildung 20 zeigt, dass die Entladekapazität nahezu unverändert bleibt und keine signifikanten Temperatureinflüsse erkennbar sind.

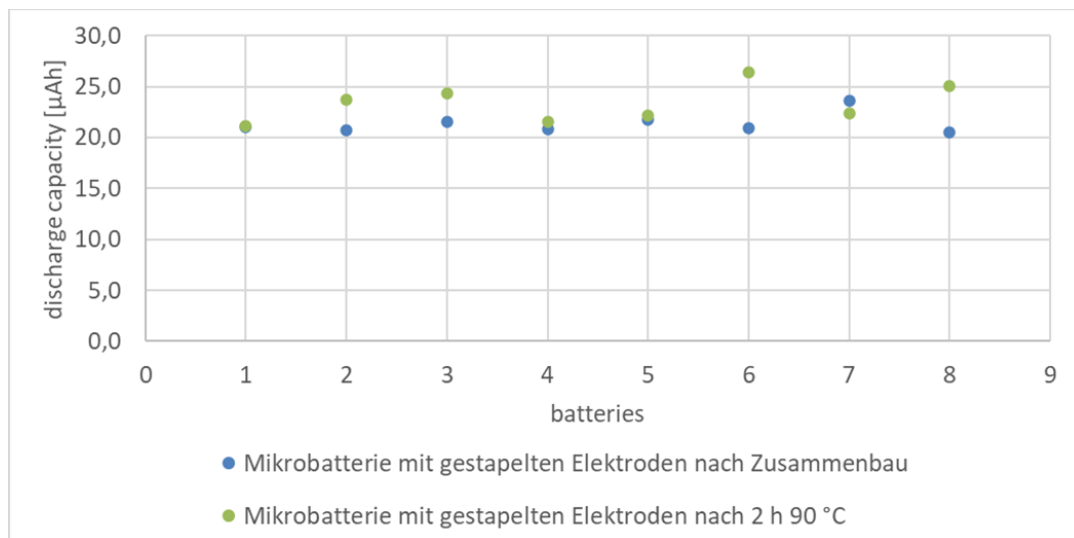


Abb. 20: Entladekapazität vor und nach Temperaturlagerung (2 h 90 °C).

Aussagekräftiger als der reine Impedanzwert sind anwendungsnahe Pulsmessungen (3 s Entladung, 60 s Pause) bei unterschiedlichen Strömen (Abb. 21). Die Pulsmessungen dienen der Simulation des Betriebs der Mikrobatterie in der Anwendung auf der Biene. Der Vergleich der Mikrobatterie-Generation-1-Kurve (blau) mit der Generation-2-Kurve (rot) offenbart eine signifikante Verbesserung der Generation-2 Batterien. Der Spannungsabfall ist deutlich geringer, sodass höhere Pulsströme genutzt werden können. Jedoch wird auch ersichtlich, dass bei einer Temperaturlagerung von zwei Stunden bei 90 °C (grüne Kurve) der Spannungsabfall sich verdoppelt im Gegensatz zu dem Zustand vor der Auslagerung. Im Gegensatz zum ersten Design ist der Spannungsabfall jedoch immer noch deutlich geringer und die Designanpassung war somit erfolgreich.

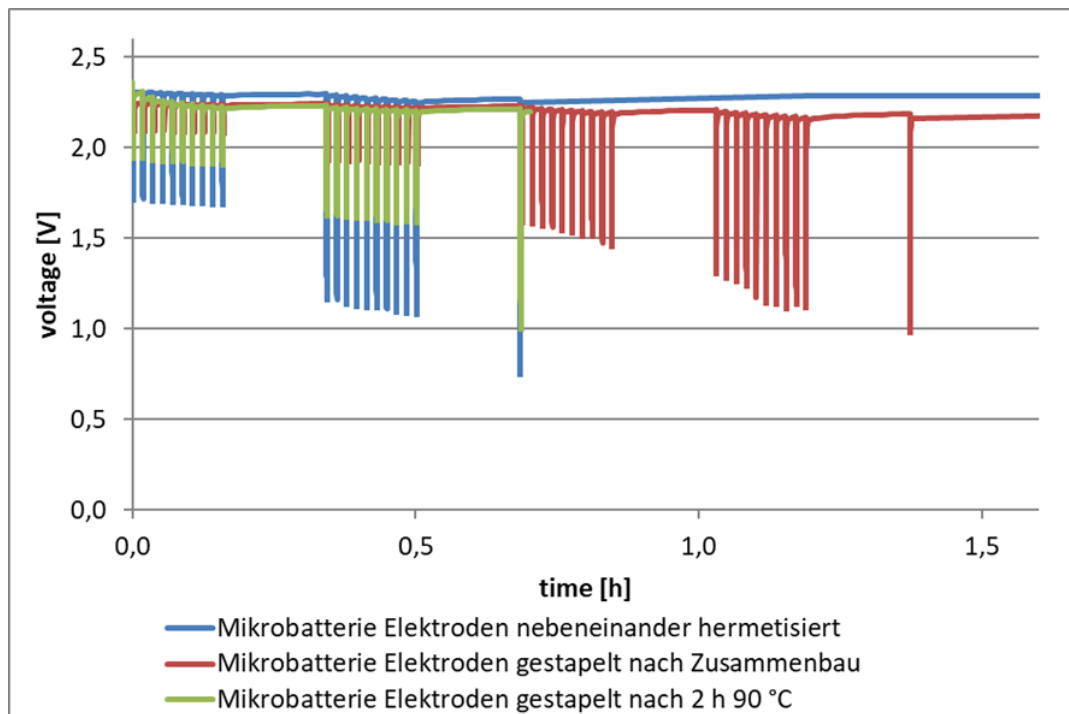


Abb. 21: Pulstest (3 s Entladung, 60 s Pause) von Generation 1 (Elektroden nebeneinander) und Generation 2 (Elektroden gestapelt) Mikrobatterien.

Des Weiteren wurde die Langzeitstabilität von Mikrobatterien der zweiten Generation nach Temperaturlagerung untersucht. Die Batterien weisen eine hohe Zyklenstabilität auf, wobei der Kapazitätsabfall pro Zyklus im Mittel bei lediglich 0,07 % bzw. 0,016 μAh liegt (Abb. 22).

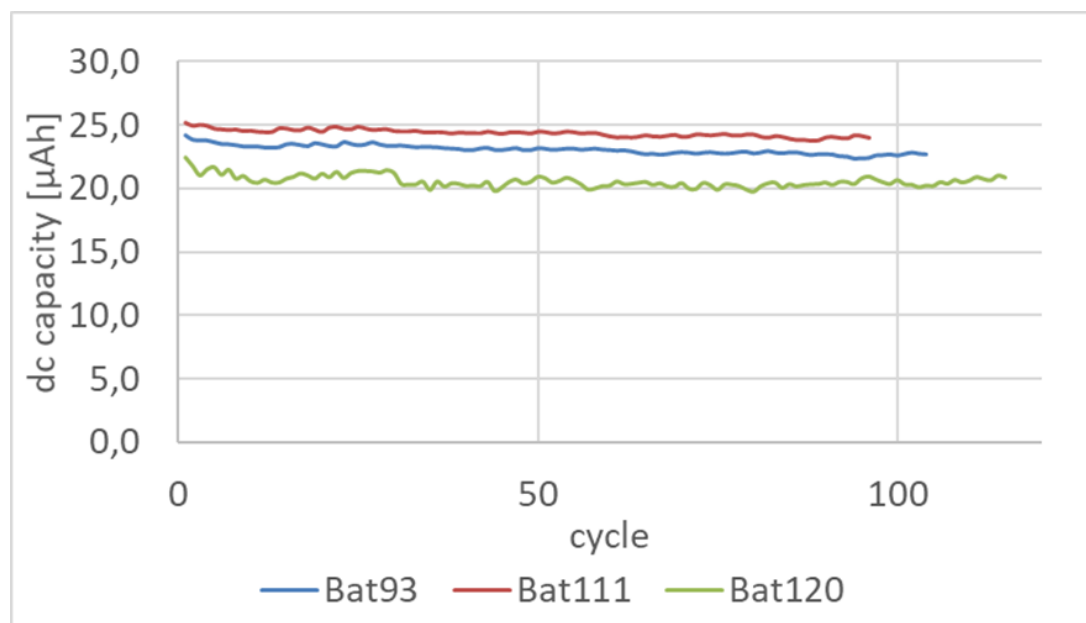


Abb. 22: Langzeittest von Generation 2 Mikrobatterien.

Die Machbarkeit des Energie-Harvesting wurde untersucht. Zu diesem Zweck wurde das Konzept unter Verwendung der in AP3.4 beschriebenen Solarzellenarrays (5 x 0,6 mm, 6 x 0,6 mm) und Mikrobatterien der ersten Generation analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass eine erfolgreiche Ladung der Mikrobatterien mit den Solarzellen möglich war. Die Ermittlung der erreichten Kapazität erfolgte anschließend durch die Durchführung einer Entladung an einem Batteriezyklisierer.

Im Rahmen der Untersuchung wurden zwei verschiedene Kathoden-Anoden-Kombinationen mit unterschiedlichen Spannungsgrenzen analysiert. Der Spannungsbereich des NCAs gegenüber dem LTO beläuft sich auf 2,8 bis 1,75 V, während der Spannungsbereich des LFP gegenüber dem LTO bei 2,5 bis 1 V liegt.

Die Entladekurven einer Mikrobatterie mit einem LFP-LTO-Elektrodensystem sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Mikrobatterie wurde mit einem Solarzellenarray geladen, welches aus 6 x 0,6 mm breiten und 5 x 0,6 mm breiten Solarzellen bestand. Die Abwesenheit einer Solarzelle im zweiten Array resultiert in einer Reduktion der Ladespannung um ca. 0,4 V. Dies impliziert, dass die Ladung der Batterie von 2,5 V auf 2,1 V reduziert wird. Die Aufladung der Batterie mit 5 x 0,6 mm breiten Solarzellen erfordert eine Bestrahlungsstärke von ca. 480 W/m² (leichte Bewölkung). Bei einer Solarzellen-Konfiguration von 6 x 0,6 mm kann selbst bei starker Bewölkung (140 W/m²) eine vollständige Aufladung erzielt werden.

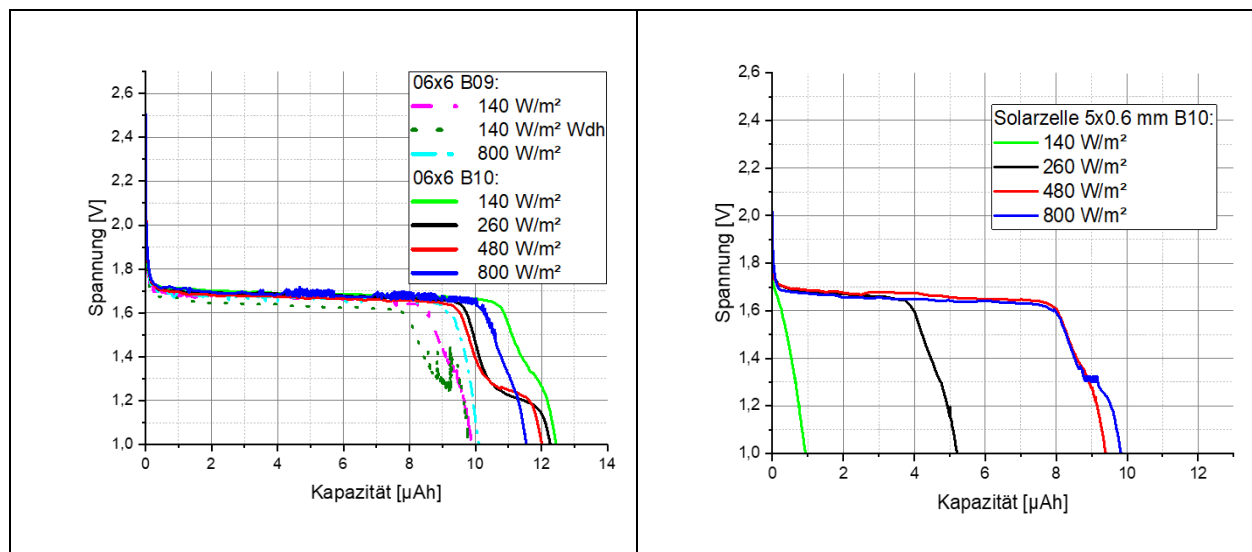


Abb. 23: Entladekurve von Mikrobatterie mit LFP-LTO, die mit einem 6x 0.6 mm breiten und 5x 0.6 mm breiten Solarzellen geladen wurden.

Die Entladekurven einer Mikrobatterie mit einem NCA-LTO-Elektrodensystem sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Mikrobatterie wurde mit einem Solarzellenarray geladen, das aus 6 Solarzellen mit einer Breite von jeweils 0,6 mm bestand. Es konnte festgestellt werden, dass das NCA-LTO-System eine höhere Spannung benötigt, um vollgeladen zu werden, als das LFP-LTO-System. Aus diesem Grund wurde auf eine Untersuchung mit 5 x 0,6 mm breiten Solarzellen verzichtet. Im Vergleich zu LFP zeichnet sich eine NCA-Elektrode durch eine höhere Kapazität aus, was sich als vorteilhaft erweisen könnte in der Anwendung.

Bei einem NCA-LTO-Elektrodensystem kann bei starker Bewölkung eine Batterie lediglich mit etwa einem Drittel ihrer Kapazität geladen werden. Die Aufladung einer Batterie erfordert eine minimale Bestrahlung von 480 W/m², um ein nahezu vollständiges Laden zu gewährleisten. Dies ist auf die unterschiedliche Ladespannung bei den Einstrahlungsstärken zurückzuführen. In Anbetracht dessen wird das LFP-LTO Elektrodensystem für die Anwendung auf der Biene präferiert.

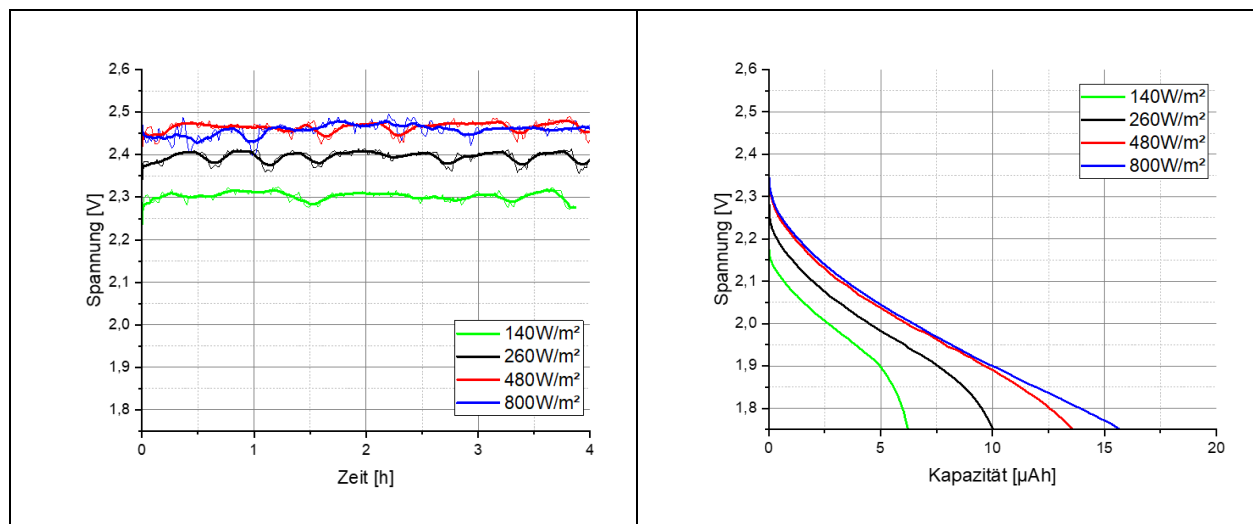


Abb. 24: Lade- und Entladekurve einer Mikrobatterie mit NCA-LTO, die mit einem 6x 0.6 mm breiten Solarzellenarray geladen wurde.

2.2 Begründung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis der Kostenpositionen wurde in einem separaten Dokument übermittelt. Den Schwerpunkt der Ausgaben bilden die für die Bearbeitung der wissenschaftlichen und technischen Inhalte notwendigen Personalausgaben.

Im Rahmen des Austauschs der Partner und der fachlichen Abstimmung wurden Treffen bei den jeweiligen Partnern abgehalten, wodurch Reisekosten entstanden sind. Aufgrund der Corona-Pandemie wurde in der überwiegenden Zahl der Fälle auf ein physisches Treffen verzichtet und stattdessen eine Videokonferenz abgehalten.

Für die Herstellung der Solarzellenarrays und insbesondere der Mikrobatterien wurden entsprechende Ausgaben für Materialien getätigt. Diese umfassten sowohl Verbrauchsmaterialien als auch Substrate und elektronische Bauelemente.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt am Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeitsforschung (IZM) zielte auf die Entwicklung einer Mikrobatterie ab, die in ein Energy-Harvesting-System integriert werden sollte. Im Rahmen der bisherigen Erfahrungen wurden entsprechende Designs und Konzepte erarbeitet und realisiert. Die Herstellung der Mikrobatterien erforderte einen hohen Personalaufwand sowie Sachkosten. Zudem waren entsprechende Fachkenntnisse bei der Herstellung der Mikrobatterien inklusive der Bedienung des komplexen Maschinenparks notwendig.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen

Das Fraunhofer IZM konnte seine Expertise in den Bereichen miniaturisierter Energieversorgung und Energiegewinnung erweitern. Aus den im Projekt erarbeiteten Ergebnissen lassen sich Nutzungsmöglichkeiten für das IZM ableiten. Die Ergebnisse ermöglichten die Nutzung und Umsetzung der Prozesse zur Herstellung der Mikrobatterien in Folgeprojekten wie FKLIB "Integrierte Hochkapazitäts-Festkörper-Li-Ionen-Batterie". Darüber hinaus befinden sich weitere Batterieprojekte in der Entwicklungsphase, die auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauen. Des Weiteren findet eine Verwertung in technischer und wissenschaftlicher Hinsicht durch das IZM statt. Diese erfolgt in Form von Publikationen und Konferenzbeiträgen sowie auf Fachmessen.

2.5 Fortschritt bei anderen Stellen im Rahmen des Projekts

Während der Projektlaufzeit sind dem Konsortium keine Forschungs- und Entwicklungsergebnisse bekannt geworden, die einen vergleichbaren Stand oder darüber hinaus erreicht haben.

2.6 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurden keine Veröffentlichungen durchgeführt. Es sind aber noch Veröffentlichungen geplant.