

# Anwendungsbedarfe für Mikrosystemtechnik in der Batterie-Kreislaufwirtschaft

## Application needs of microsystems technology in the battery cycle economy

*Carl-Ernst Forchert, i-vector Innovationsmanagement GmbH, Berlin, Deutschland, forchert@i-vector.de; Jörg Acker, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Deutschland; Jung-Hwa Lee, Berliner Hochschule für Technik, Berlin, Deutschland; Jens Markowski, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Deutschland*

### Kurzfassung:

Mit Sensoren und Mikrosystemtechnik wird die Batterie erst intelligent. Die einzelnen Prozessschritte im Wertschöpfungskreislauf bedürfen intelligenter Lösungen, insbesondere in der Bewertung der Leistungsfähigkeit, aber auch des Gefahrenpotentials, das von gebrauchten Batterien ausgehen kann. Lösungen des 2<sup>nd</sup>-Use werden erst durch eine eingehende Diagnose und Bewertung möglich. Auch in den darauffolgenden Schritten des Recyclings und der Materialverarbeitungen werden neu zu entwickelnde Diagnose- und Prozesskontrollsysteme auf Basis von Mikrosystemtechnik notwendig.

Im Überblicksvortrag werden einzelne mögliche Anwendungen der Mikroelektronik im Wertschöpfungsprozess Batterie skizziert, die als Denkanstöße zu Ausgangspunkten für weitere FuE-Vorhaben dienen können.

### Summary:

Sensors and microsystems technology make the battery intelligent. The individual process steps in the value creation cycle require intelligent solutions, especially in the evaluation of performance but also of the potential hazards that can emanate from used batteries. Second-use solutions are only possible through an in-depth diagnosis and evaluation. Also in the following steps of recycling and material processing new diagnostic and process control systems based on microsystem technology will have to be developed.

In the overview lecture, individual possible applications of microelectronics in the battery ecosystem will be outlined, which can serve as thought-provoking starting points for further R&D projects.

**Keywords:** circular economy, sustainability, automation, sensors, processcontrol

### Batterie-Kreislaufwirtschaft

Die Wertschöpfungskette Batterie beinhaltet eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse und Technologien, die ständig weiterzuentwickeln sind. Im Bereich der Fahrzeugantriebe steht insbesondere die Traktionsbatterie im Fokus. Als Traktionsbatterie wird ein System betrachtet, das aus Gruppen von Batteriezellen (Modulen) besteht, die miteinander verbunden und von einem Gehäuse umschlossen sind. Sie bildet eine vollständige Einheit zur Verwendung im Fahrzeug zur Speicherung der für die Traktion und den Betrieb des Fahrzeuges notwendige Energie. Dabei ist die einzelne Batteriezelle

ein zentrales, aber nicht alleiniges Element der Batterie.

Traktionsbatterien sind zentraler Enabler der Elektromobilität und damit Element der Mobilitäts- und Energiewende. Dabei stehen deutsche Akteure im Wettbewerb mit asiatischen und nordamerikanischen Regionen. Hier gilt es, die bisher in Deutschland entwickelten Kompetenzen in diesem relativ neuen Wirtschaftszweig zur Entfaltung zu bringen. Dazu gehört insbesondere auch die anwendungsnahe Mikroelektronik.

Unter Betrachtung sämtlicher Aspekte ist es das Ziel, die Wertschöpfungskette Batterie zu einer Kreislaufwirtschaft zu schließen.

Am Anfang stehen die Herstellung der Batteriematerialien, die Produktion der Batteriezellen und kompletter Systeme. Hierfür werden verschiedene Ausprägungen hochqualifizierter Automatisierungstechnik für die Batteriezellfertigung und -systemmontage benötigt. Über die gesamte Wertschöpfung hinweg sind wichtige Querschnittsaufgaben die Logistik, insbesondere Transport und sichere Lagerung, sowie der Brandschutz, sowohl im Herstellprozess als auch in der sicheren und adäquaten Lagerung.

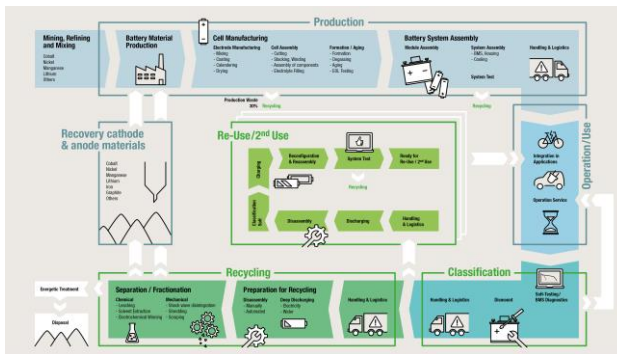


Bild 1. Wertschöpfungskette Batterie, Quelle: Batterienetzwerk ReLioS e.V. / i-vector Innovationsmanagement

Zerstörungsfreie, schnelle und zugleich präzise Test- und Klassifikationsmethoden stellen eine zwingende Voraussetzung für die Reparatur und eine erneute Nutzung dar. Wenn der Gebrauchsnutzen und die zu erwartende Restlebensdauer des Batteriesystems oder einzelner Module unter einen Schwellwert sinkt, kann das System in seine Einzelteile zerlegt werden und der partiellen Wiederverwendung und dem Recycling zugeführt werden.

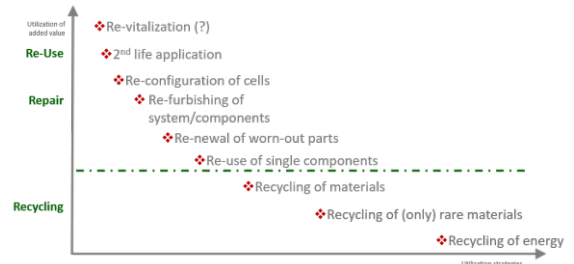


Bild 2. Alternative Verwertungsstrategien gebrauchter Traktionsbatterien, Quelle: i-vector Innovationsmanagement

Grundsätzlich sind Verwertungsstrategien zu präferieren, die einen möglichst hohen Werterhalt gebrauchter Traktionsbatterien versprechen. Hierbei sind die Nachhaltigkeitsdimensionen: Ökologie, Ökonomie und gesellschaftliche Akzeptanz auf einander abzustimmen.

### Mikrosystemtechnik als Enabler in der Region – Anwendungen in der Batteriewirtschaft

Reuse, Reparatur und Recycling werden eine zentrale Rolle bei der strategischen Rohstoffverfügbarkeit und Bezahlbarkeit für den Nutznießenden spielen. Sie stellen eine strategische Notwendigkeit für Deutschland, eingebettet im europäischen Verbund, dar. Der europäische Markt gehört zu den am schnellsten wachsenden Märkten für Elektrofahrzeuge weltweit. In der Metropolregion Berlin-Brandenburg inklusive der angrenzenden Bundesländer findet sich bereits jetzt eine Vielzahl von Akteuren, die Beiträge im Wertschöpfungsökosystem Batterie leisten. Weitere können sich mit ihren Kompetenzen beteiligen. Ebenso ist die Region attraktiv für die Ansiedlung auch internationaler Akteure [1]. Neue Verfahren helfen, Rohstoffabhängigkeiten zu mindern und Lieferketten zu sichern. Einhergehend mit dem technologischen Fortschritt sind neue Batterietechnologien zu entwickeln. Bei der Materialentwicklung werden unterschiedliche Kompetenzen der Analytik und Charakterisierung benötigt. Dabei sind auch digitale Lösungen zur Betrachtung des gesamten Lebenszyklus („Batteriepass“, Life-Cycle-Assessment) zu entwickeln und zum Einsatz zu bringen [2]. Entsprechende Vorgaben sind verbindlich durch das kürzlich verabschiedete Batteriegesetz vorgegeben, die auch für Deutschland bindend sind [3]. Es wird angestrebt, dass recyceltes Material in der EU bereits im Jahr 2035 bis zu 30 Prozent des Bedarfs an Lithium, Nickel und Kobalt in der Batteriezellenproduktion ausmachen soll. Bis 2040 soll sich dieser Anteil verdoppeln [4].

Im Bild 1 ist eine Übersicht der Wertschöpfungskette Batterie dargestellt. Anhand dieser werden im Beitrag einzelne mögliche Anwendungen der Mikroelektronik skizziert. Besondere – im Hinblick auf den Einsatz der Mikrosystemtechnik trachtige – abzusehende Anwendungsbedarfe seien im Folgenden exemplarisch dargestellt.

### Mikrosystemtechnik in der Diagnose und Klassifizierung von Gebrauchtbatterien

Zeigt das Batteriemanagementsystem BMS dem Nutzer an, dass der Batteriezustand unter einen adäquaten Grenzwert (beispielsweise, wenn der State-of-Health SoH > 80 %) gesunken ist, so ist das Fahrzeug dem Service zuzuweisen und die Ursachen der Leistungsminde rung zu inspizieren. Dies kann im Fahrzeug oder im bereits ausgebauten Zustand erfolgen.

Derzeit werden die Batterien messgerätech nisch lediglich hinsichtlich ihrer elektrischen Parameter untersucht. Eine Gefährdungsanaly se erfolgt bisher ausschließlich über Sichtprü fungen (auffällige Beschädigungen, besondere

Korrosionsmarken oder Aufbauchungen). Hier sind Lösungen einer automatisierten Diagnose des Gefährdungspotentials gebrauchter Traktionsbatterien notwendig. Das bisherige Spektrum elektrisch erfassbarer Messmethoden ist um die Detektion relevanter Gefährdungssphäre zu erweitern. Hierzu gehören Druck- und Gassensoren, die in Kombination mit den zur Verfügung stehenden Werten aus dem BMS (Temperatur und Beschleunigungssensoren), Aussagen über eine Kritikalität der vorliegenden Batterie erlauben und eine Klassifizierung in Gefährdungsklassen ermöglicht. Verformungen lassen sich beispielhaft über Faser-Bragg-Gitter-Sensoren detektieren [4] [6]. Allerdings müssten sie bereits in der Betriebsphase kritische Verformungen aufzeichnen und als Historienwerte im BMS hinterlegt werden.

### **Automatisierte Detektion von Li-Ionen-Batterien im Abfallsystem als aktuelle Aufgabenstellung**

Eine zunehmende Problematik stellt die nicht-deklarierte Entsorgung von Li-Ionen-Batterien im konventionellen Entsorgungssystemen, beispielsweise im Hausmüll und Elektronikschrott dar. Die steigende Anzahl von Brandereignissen in Abfallbehandlungsanlagen, Wertstoffhöfen, Lagern und Transportfahrzeugen aufgrund von defekten bzw. beschädigten Zellen belegen diesen Trend [7] [8], der sich in den nächsten Jahren mit Sicherheit ausweiten wird. Besonders betroffen sind vor allem Li-Ionen-Zellen mit NMC-beschichteten Kathoden, innerlich beschädigte Li-Ionen-Zellen sowie gealterte Zellen bzw. Zellen mit geringer Restkapazität.

Lösungsansätze bestehen zum einen bereits bei der Annahme bzw. im Lager beispielsweise durch Handheld-Geräte, ähnlich der Metall- oder Drogendetektion in Flughafen-Sicherheitskontrollen sowie während des Aufbereitungsprozesses durch eine on-belt-Detektion im Gutstrom mit über dem Band angeordneten Sensoren oder Kameras und einem automatischen Auskreisen der identifizierten Objekte. Hier können unterschiedliche oberflächenanalytische, durchstrahlende oder gasdetektierende Verfahren zum Einsatz kommen. Li-Ionen Zellen können bereits heute durch X-Ray Computertomographen nach Smith-Heimann sicher detektiert werden.

Allerdings sind diese für den Einsatz in Recyclingprozessen noch zu kostspielig. Herausforderungen liegen daher in der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Erkennungsrate der einzusetzenden Sensoren, einschließlich der Auswertungstechnik.

### **Mikrosystemtechnik ermöglicht effizientes Recycling**

Die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Lithiumbatterien im industriellen Maßstab basiert auf drei wesentlichen Verfahrensrouten, der pyrometallurgischen, der mechanischen/thermischen und der hydrometallurgischen Route, die einzeln oder in Kombination eingesetzt werden. Eine ausschließliche pyrometallurgische Verwertung der Batterien oder Module ist durch die von der EU vorgegebenen Rückgewinnungsquoten de facto ausgeschlossen.

Stand der Technik für das Recycling von Zellen aus Lithium-Traktionsbatterien sind derzeit Verfahren, bei denen nach einer kompletten Vorzerkleinerung der Zellen bzw. Module die metallischen Komponenten Aluminium und Kupfer sowie die Separatorfolien abgetrennt und getrennt verwertet werden und eine sog. Schwarzmasse verbleibt, welche neben den Materialien aus der Kathodenbeschichtung auch das Anodengraphit sowie diverse Materialverschleppungen enthält. Da diese Technologie hinsichtlich ihrer mechanischen Behandlung sowohl für alle Arten NMC (Nickel-Mangan-Cobalt)-Akkus als auch für LFP (Lithium-Eisenphosphat) geeignet ist, ist davon auszugehen, dass sich diese Verfahrensweise weiter durchsetzt. Dennoch ist eine aufwändige chemische oder mechanisch-chemische Nachbehandlung erforderlich.

Hierfür sind Sensoren und Steuerungselemente der Mikrosystemtechnik notwendig, die abhängig von der aktuellen Beschaffenheit der Schwarzmasse die Prozessmedien in ihrer chemischen Zusammensetzung überwachen, z.B. über Konzentrationssensoren bestimmter zentraler chemischer Elemente (Leitfähigkeit, ionen-sensitive Sensoren, Trübung, Farbigkeit im UV). Die Sensorsignale speisen das (in-situ) Steuerungssystem – basierend auf einem mathematischen Modell – um die Stellgrößen während des laufenden Prozesses hinsichtlich angestrebter Reinheitsgrade der Endprodukte und des Energieeinsatzes nachzuregeln.

Die Erarbeitung von technischen Lösungen zur Trennung und möglichst sortenreinen Rückgewinnung dieser Komponenten ist derzeit Gegenstand verschiedener Forschungsvorhaben. Die Fachgebiete Physikalische Chemie und Prozess- und Anlagentechnik der BTU entwickeln derzeit im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes gemeinsam mit Batterieherstellern, Recyclingunternehmen und Maschinenbauunternehmen hierfür technische Lösungen.

## References

- [1] Studie „Batteriekompetenzen in und um Brandenburg“, Studie im Auftrag der Wirtschaftsförderung Land Brandenburg WFBB durchgeführt von der i-vector Innovationsmanagement GmbH, 2023.
- [2] NPM Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: Schwerpunktroadmap Nachhaltige Mobilität – Standards und Normung der Arbeitsgruppe 6 Standardisierung, Normung, Zertifizierung und Typgenehmigung, 2020, Seite 18
- [3] VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, Juni 2023
- [4] Kampker, Neuhausen, Rose, Offermanns, European battery recycling market analysis, A profitable and sustainable business before 2035, PWC und RWTH Aachen (PEM), 16.08.2023
- [5] Chen, D.; Zhao, Q.; Zheng, Y.; Xu, Y.; Chen, Y.; Ni, J.; Zhao, Y. Recent Progress in Lithium-Ion Battery Safety Monitoring Based on Fiber Bragg Grating Sensors, *Sensors* 23, 5609-5627 (2023); doi:10.3390/s23125609
- [6] Dotoli, M.; Rocca, R.; Giuliano, M.; Nicol, G.; Parrusa, F.; Baricco, M.; Ferrari, A.M.; Nervi, C.; Sgroi, M.F. A Review of Mechanical and Chemical Sensors for Automotive Li-Ion Battery Systems, *Sensors* 22, 1763-1781 (2022); doi:10.3390/s22051763
- [7] Nigl, T.; Pomberger, R. Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterien: Sind unsere Anlagen noch versicherbar? Recycling- und Sekundärrohstoff-Konferenz, Berlin, März 2020
- [8] Boeckh, M. Das Rücknahmesystem für batteriehaltige Geräte hat große Mängel – Teil 1\_ Brandgefährliches Nichtstun, [www.umweltwirtschaft.com](http://www.umweltwirtschaft.com), Januar 2020