



Schlussbericht des Infineon Projektes
**"Sensorik, Simulation und Digitaler Batteriepass für
sichere Lithium-Ionen Batterien"**

im Rahmen des Verbundvorhabens
**SafeBatt "Aktive und passive Maßnahmen für
eigensichere Lithium-Ionen Batterien"**

Förderkennzeichen:	03X4631A
Laufzeit des Vorhabens:	01.07.2012 - 31.12.2015
Berichtszeitraum:	01.07.2012 - 31.12.2015
Erstellungsdatum:	20. April 2016
Berichtsersteller:	Dr. Rose, Dr. Elian, Dr. Ruhl, J. Kirscher, Ö. Karaca, Prof. Dr. Pelz, Dr. Schreiner, Dr. Maurer
Berichtsersteller Firma:	 Infineon Technologies AG
Revision:	1.0

Projekt gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellungen	3
I.1 Aufgabenstellung	3
I.2 Voraussetzungen des Vorhabens.....	3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Vorhabensbeginn	5
I.4.1 Sensorik	5
I.4.2 Sicherheitsrelevante Parameter & Modelle	5
I.4.3 Digitaler Batteriepass	6
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II. Eingehende Darstellungen	9
II.1 Projektergebnisse	9
II.1.1 Zell-integrierte Drucksensorik	9
II.1.2 Gassensorik auf Graphen-Basis	14
II.1.3 Simulation der Batteriesicherheit bei HW-Fehlern.....	17
II.1.4 Funktionsmodell eines Digitalen Batterie-Passes.....	31
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis	39
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	39
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	39
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	40
II.6 Veröffentlichungen	42

I. Kurzdarstellungen

I.1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben SafeBatt – „Aktive und passive Maßnahmen für eigensichere Lithium-Ionen Batterien“ umfasste diese fünf Forschungsschwerpunkte:

- i. Sicherheitstests auf Zell- und Modulebene
- ii. Intrinsisch sichere Zellchemie & passive Maßnahmen
- iii. Sicherheitsrelevante Parameter & Modelle
- iv. Sensorik & aktive Maßnahmen zur Zellsicherheit
- v. Digitaler Batteriepass

Infineon konzentrierte sich in SafeBatt auf die letzten drei dieser Forschungsschwerpunkte und hat aktiv durch wesentliche und im Folgenden im Detail präsentierte Ergebnisse zu den Themen "Zell-integrierte Drucksensorik", "Gassensorik auf Graphen-Basis", "Simulation der Batteriesicherheit bei HW-Fehlern" und "Funktionsmodell eines Digitalen Batterie-Passes" beigetragen.

I.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Unter dem Leitgedanken "Wir machen das Leben einfacher, sicherer und umweltfreundlicher – mit Technik, die mehr leistet, weniger verbraucht und für alle verfügbar ist." fokussiert sich die Infineon Technologies AG, Neubiberg, Deutschland auf die drei zentralen Herausforderungen der modernen Gesellschaft: Energieeffizienz, Mobilität und Sicherheit und bietet Halbleiterkomponenten und –systeme für Automobil-, Industrieelektronik, Informations- und Kommunikationstechnologie, sowie Chip-Card und Sicherheitslösungen an.

Eine wesentliche Grundidee von SafeBatt war die Verbesserung der Zellsicherheit durch aktive Maßnahmen in Form von Sensoren, die frühzeitig und eindeutig einen sicherheitskritischen Zustand der Zellen einer Lithium-Ionen Batterie (LIB) erkennen können, sodass durch rechtzeitig ergriffene Gegenmaßnahmen größerer Schaden vermieden wird. Für Infineon war und ist diese Anwendung und Weiterentwicklung der automotiven Sensorik ein strategischer Schwerpunkt.

Im Gegensatz zu vielen Bereichen der automotiven Mikroelektronik, wo man auf Jahrzehnte an Erfahrung beim Einsatz mikroelektronischer Komponenten in der jeweiligen Applikation zurückblicken kann, ist dies im Bereich der Batterietechnik für Anwendungen der Elektromobilität (noch) nicht der Fall. Trotzdem ist die Erwartungshaltung an die Applikation bzw. an die dafür benötigten Komponenten ebenso



hoch und bedarf zu ihrer Erfüllung des massiven Einsatzes von Simulationen, insbesondere bei Aussagen zur Sicherheit.

Ein strategisch nicht weniger wichtiger Fokus von Infineon in SafeBatt war die Entwicklung und Darstellung eines Funktionsmodells des sogenannten "Digitalen Batterie-Passes" (DBP) mit dem Ziel, eine lückenlose Historie jedes einzelnen Moduls einer LIB zu gewährleisten.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Schwerpunkt des Interesses von Infineon lag in SafeBatt im Wesentlichen auf den Teilaufgaben TA3 Aktive Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit / Sensorik, TA4 Modellierung / Simulation und TA6 Systemintegration & Digitaler Batteriepass.

Selbstverständlich haben Infineon-Experten bei der Definition der Nutzungsprofile, Anforderungen & Spezifikationen (TA1) und bei den Demonstratoren & deren Validierung (TA7) die diese Teilaufgaben koordinierenden Partner unterstützt und mit dem benötigten Input an Zahlen und Einschätzungen versorgt.

Auf dem Gebiet der Sensorik (TA3) hat Infineon eine zell-interne Sensorik der Parameter Druck und Temperatur entwickelt und - gemeinsam mit den entsprechenden Partnern - die Integration und Evaluierung der Sensorik in bzw. an Demonstratoren und kompletten Batteriesystemen vorangetrieben. Gleichzeitig wurden auch Entwicklung und Evaluierung neuartiger Gassensoren auf Graphen-Basis gestartet, mit dem Ziel, durch frühzeitige Detektion von gasförmigen Abbauprodukten während kritischer Zellzustände einen weiteren Beitrag leisten zu können.

Bei der Simulation / Modellierung (TA4) lag das Hauptinteresse von Infineon an der Entwicklung einer Methodik, mit der die Batteriesicherheit in der Gegenwart von Hardware-Fehlern simulatorisch beschrieben werden kann. Dazu musste eine elektrische Beschreibung der LIB-Zelle in Form eines Zellmodells erarbeitet werden.

Neben den Arbeiten und Zuarbeiten zur Integration der Sensorik war der Fokus von Infineon in Systemintegration und Digitalem Batteriepass (TA6) auf letzterem. Der Digitale Batteriepass (DBP) erfasst, verarbeitet und speichert pro Modul kritische Zellparameter und gibt diese auf Anfrage entsprechend den Zugriffsbefugnissen wieder. Alle diese Vorgänge sollen hohen Sicherheitsanforderungen genügen und wurden daher gemäß dem Infineon zur Verfügung stehenden aktuellem Stand der kryptographischen Methoden der Sicherheitstechnologie entwickelt.

In allen diesen Arbeitspaketen hat Infineon in SafeBatt - wie im Detail in Kapitel II.1 berichtet - positive und für die weiteren Pläne sehr ermutigende Ergebnisse erzielt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Vorhabensbeginn

I.4.1 Sensorik

Zu Vorhabensbeginn wurde bei LIBs der Zustand der Zellen mittelbar durch die Messung von Strom, Spannung und Temperatur auf der Platine des Batteriemanagementsystems modellbasiert erfasst. Serientaugliche Erfassungsmethoden auf Zellebene gab es nicht im Markt. Zur Zellzustandserfassung ist eine zellnahe bzw. zellintegrierte Sensorik notwendig.

Die Erfassung der Zelltemperatur als kritische Sicherheitsgröße erfolgte auf der Oberfläche des Zellengehäuses. Es ist bekannt, dass gerade bei großformatigen Batteriezellen ein großer Temperaturgradient zwischen der Temperatur im Inneren der Zelle und der Oberflächentemperatur herrscht. Eine sensorische Erfassung der zellinternen Temperatur bringt für das Batterie-Monitoring bzw. für die Detektion sicherheitskritischer Zustände erhebliche Vorteile.

Für die zellbasierte Sensorik hat Graphen aufgrund seiner Eigenschaften hervorragendes Potential zum Einsatz als Material für elektrochemische Sensoren und Gassensoren. Elektrochemische Sensoren vielfältiger Art wurden auf Graphen-Basis bereits demonstriert. Darüber hinaus kann Graphen auch chemisch funktionalisiert werden, um die Empfindlichkeit auf spezifische Analyten zu erhöhen.

Für die zellnahe Sensorik ergeben sich für die Packungs- und Gehäusetechnik gänzlich andere Anforderungen als beim Aufbau auf Leiterplatten. Eine kompakte und funktionale Bauform ist entscheidend für die Integration in die Batteriemodule. Der aktuelle Stand der Technik sind in Bezug auf Kosten und Bauform aufwändige Sensorgehäuse, zum Teil bestehend aus mehreren großen Komponenten.

I.4.2 Sicherheitsrelevante Parameter & Modelle

In den Bereichen der Simulations- und Modellierungsmethoden kann Infineon auf mehr als 10 Jahren Erfahrung aufbauen. Die Beschreibungsmethoden und das Verfahren für die Simulation und Verifikation, die zur Vorhabensbeginn eingesetzt wurden, sind im Rahmen des AutoSUN BMBF Projekts entwickelt worden. Auf dieser Basis werden die Steigerung der Effizienz der Simulation und der Modellierung, und die Automatisierung der Simulation und der Messung im Laufe des Projekts weiterentwickelt.

Eine vor kurzer Zeit durchgeführte Literaturrecherche im Internet hat zwar viele Veröffentlichungen der direkten Konkurrenten TI, Freescale, STM, etc. auf dem Gebiet der simulatorischen Verifikation von Schaltungen und von Embedded Software erbracht, zu dem in SafeBatt bearbeiteten Gebiet der Applikations-Simulation auf System-Ebene konnten aber keine Publikationen gefunden werden. Wir gehen daher davon aus, dass



die hier entwickelte Methodik zur Simulation der Batteriesicherheit in der Gegenwart von Hardware-Fehlern ein Alleinstellungsmerkmal für Infineon darstellt.

I.4.3 Digitaler Batteriepass

Zu Vorhabensbeginn und auch heute noch verfügt die Fahrzeugbatterie über eine Steuerung, das Batterie-Management-System (BMS), das wiederum über einen nicht flüchtigen Speicher verfügt. Die Datenermittlung erfolgt über Ausleseroutinen in der Werkstatt. Anschließend werden die Daten über Internet an den Fahrzeughersteller übermittelt. Erfasst werden dabei der kummulierte Ladungsdurchsatz, Betriebs- und Standzeiten, zeitliche Temperaturverteilungen im Stand und im Betrieb, die über die Lebensdauer kummuliert dargestellt werden. Fehlerursachen wie Abschaltungen, Spannungsüberschreitungen und Ähnliches werden aufgezeichnet.

Aus dem Fachgebiet der photovoltaischen Prepaid Inselsysteme sind Methoden bekannt, bei denen die lebensdauerrelevanten Einflüsse ebenfalls komprimiert in einem Speichersystem abgelegt werden (Innovatives Photovoltaik-Kompaktsystem VKZ 29862).

Die authentifizierbare Erfassung, Speicherung und Ausgabe von kritischen Daten der Zellen eines LIB-Moduls in Form des Digitalen Batteriepasses ist in dieser Form ein bis dato nicht berichteter ganzheitlicher Ansatz.



I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Als Vorhabenskoordinator ist Infineon natürlich in den Großteil des Informationsflusses innerhalb des Vorhabens und auch zu potentiellen Kooperationen mit anderen Vorhaben (z.B. das BMWi-Verbundvorhaben "DriveBattery 2015" oder dem BMBF-Verbundvorhaben "LithoReclI") direkt eingebunden. In dieser Rolle war Infineon nicht nur Veranstalter und Organisator des Kick-Off des Vorhabens, des Konsortialtreffens zum Abbruchmeilenstein M18 und des Abschlussevents, sondern auch sehr aktiv an Planung, Moderation und Auswertung der anderen Konsortialtreffen des Vorhabens beteiligt. Weiters war Infineon Veranstalter der monatlichen Telekonferenzen der TA-Koordinatoren ("Jour Fixe") sowie vieler anderer, meist themengebundener Treffen und Telefonkonferenzen. Schließlich sollten auch noch die zahlreichen Abstimmrunden im Zusammenhang mit dem Konsortialvertrag angesprochen werden.

Von den oben angesprochenen themengebundenen Treffen und Diskussionen erscheinen folgende aufgrund ihres Umfangs und ihres positiven Effekts auf das Gesamtvorhaben besonders erwähnenswert:

- Bei der Sensorik hat Infineon nicht nur als TA-Koordinator die mit dem FhG ICT gemeinsame Entwicklung einer zell-internen Sensorik wesentlich bestimmt und zur Sensorintegration nach einer allgemeinen ersten Basisversion ein komplettes Redesign des Sensoraufbaus gemäß den Vorgaben der insgesamt drei verschiedenen Zellhersteller erstellt, sondern auch die Auswerteplatine der zell-internen Sensorik für die Erfassung der Daten & Meldungen der zell-externen Sensorik erweitert.
- Auf dem Gebiet der Simulation gab es regelmäßigen Erfahrungsaustausch mit allem auf diesem Gebiet tätigen Vorhabenspartnern, insbesondere mit Daimler und den Kollegen von Uni Münster / MEET bei der Erstellung eines elektrischen Zellmodells und den Kollegen der TUM zum Batteriemodell.
- Beim Digitalen Batteriepass hat Infineon die im Vorhaben vertretenen OEMs aktiv eingebunden und in vielen Abstimmrunden die Parametrierung und auch die Evaluierung des Funktionsmodells des DBP vorangetrieben.
- Mit dem Entwurf einer FMEA für das gesamte LIB-System hat Infineon auch wesentlich zur adaptiven Risikoanalyse (TA6 Integration) beigetragen.

Abgesehen von vielen informellen Kontakten und Diskussionen - vor allem im Rahmen des jährlich im Januar stattfindenden Batterieforums der KLiB in Berlin -, der Vorstellung des Vorhabens bei der Internationalen Konferenz der Bundesregierung "Elektromobilität bewegt weltweit" im Mai 2013 in Berlin, bei den AG2 Sitzungen der Nationalen Plattform Elektromobilität in den Jahren 2014 und 2015 und auf dem iWing-Konferenz des BMBF in Dresden im April 2015 durch den Verbundkoordinator sowie mehrerer offizieller Anfragen zu verschiedenen Themen sind vonseiten Infineon vor allem auch die im



Kapitel II.6 einzeln aufgezählten sechs Vorträge und sechs Poster mit Infineon-Beteiligung bei nationalen und internationalen Tagungen zum Thema LIB zu berichten.

II. Eingehende Darstellungen

II.1 Projektergebnisse

Im Folgenden werden die aus Sicht von Infineon wesentlichen Ergebnisse des Projekts SafeBatt ausführlicher dargestellt. Sämtliche wesentlichen Detailinformationen sind in aller Ausführlichkeit in den Ergebnisberichten ("Deliverables") auf dem Projektserver dokumentiert, von denen Infineon insgesamt 19 als verantwortlicher Autor beigetragen hat. Alle diese Berichte werden gerne auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Um den Eindruck einer nicht beabsichtigten Priorisierung der Ergebnisse im Folgenden zu vermeiden - Aussagen über den Nutzen und die Wichtigkeit enthalten die Kapitel I3., II.3 und II.4 -, sind die Ergebnisse nach aufsteigender AP-Nummer sortiert.

II.1.1 Zell-integrierte Drucksensorik

Die Arbeiten von IFX auf dem Gebiet der Sensorik betrafen in erster Linie die Entwicklung und Untersuchung von zellinternen Drucksensoren und von Gassensoren auf Graphen-Basis. Die prinzipielle Möglichkeit und Sinnhaftigkeit beider Konzepte konnte in SafeBatt demonstriert werden. Ein Hauptergebnis der Analyse der im Vorhaben entwickelten ersten und zweiten Generation von Baumustern der Drucksensoren ist, dass für eine praktische Anwendung im automobilen Umfeld die Passivierung der Sensoren und deren Package weiter verbessert werden muss, was im Rahmen von SafeBatt nicht mehr möglich war.

Das Ziel der **Entwicklung einer zellinternen Drucksensorik** war es, geeignete Drucksensoren inklusive Package (= Gehäuse, mechanische Befestigung und elektrische Anschlüsse) mit entsprechender Beständigkeit gegen die Zellchemie der LIBs bereitzustellen, damit diese dann im Rahmen der TA6 in die Zellen der am Vorhaben direkt oder als Unterauftragnehmer / Entwicklungspartner von Vorhabenspartnern beteiligten Zellhersteller integriert werden können. Abbildung II.2.1 zeigt zwei Varianten von diesen Vorgaben entsprechenden Musteraufbauten zellinterner Drucksensoren, welche nach den Vorgaben der Zellhersteller entworfen, hergestellt und an diese dann geliefert wurden. Als Trägermaterial, welches gleichzeitig die elektrischen Anschlüsse liefert, wurde das sogenannte "Flexprint"-Material gewählt, welches mittels Fotolithografie strukturiert wurde. Eine Variante dieses Aufbaus enthält auch einen separaten Temperatursensor für genauere Temperaturmessungen, als wie sie im Drucksensor (dort mit dem Hauptzweck der Temperatur-kompensation der Druckmesswerte) verfügbar sind.

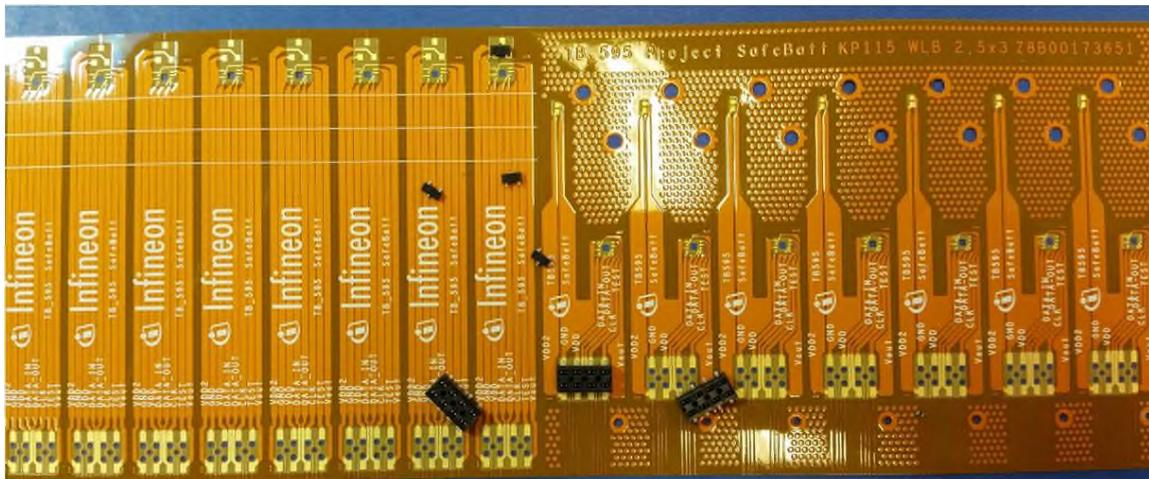


Abb. II.2.1: Zwei unterschiedliche Designs des Flexprint Gen 2-Aufbaus mit Druck- und Temperatursensoren

Für die chemische Passivierung des gesamten Sensoraufbaus wurden einerseits die gängigen Materialien wie Epoxy, Parylene oder Polyimide evaluiert. Andererseits wurden auch alternative Passivierungsmaterialien wie amorpher Kohlenstoff untersucht. Mit einem optimierten Epoxy-Underfiller und einer möglichst homogen abgeschiedenen Polyimid-Schichte konnte eine Passivierung gegenüber Standard-Elektrolyt erreicht werden, welche bei einem einfachen Eintauchtest Standzeiten von mindestens einer Woche zeigte.

Messungen an in Zellen integrierten Sensoren zeigten allerdings, dass die chemische Beständigkeit der verwendeten Standardmaterialien für eine kontinuierliche Sensorik unter Betriebsbedingungen in elektrisch aktiven Zellen mit dann maximal 10 bis 15 Stunden Standzeit nicht ausreichend ist. Insbesondere nach der Formierung der Zellen (mehrmaliges Laden und Entladen mit relativ hohen Strömen) ist ein dauernd eingeschalteter Sensor nicht mehr funktionsfähig. Trotzdem konnten - wie in der TA6 ausführlich beschrieben - aussagekräftige Druck- und Temperaturmessungen in der Zelle durchgeführt und somit die zu entwickelnde Funktionalität der zellinternen Druck- und Temperatursensorik bestätigt werden.

Mehrere ausgefallene Sensoraufbauten wurden von den Zellherstellern zurück geliefert und zur genaueren Bestimmung der Ausfallursache untersucht. Abbildung II.2.2 zeigt eine Computertomographieaufnahme eines solchen Flexprintsensors.

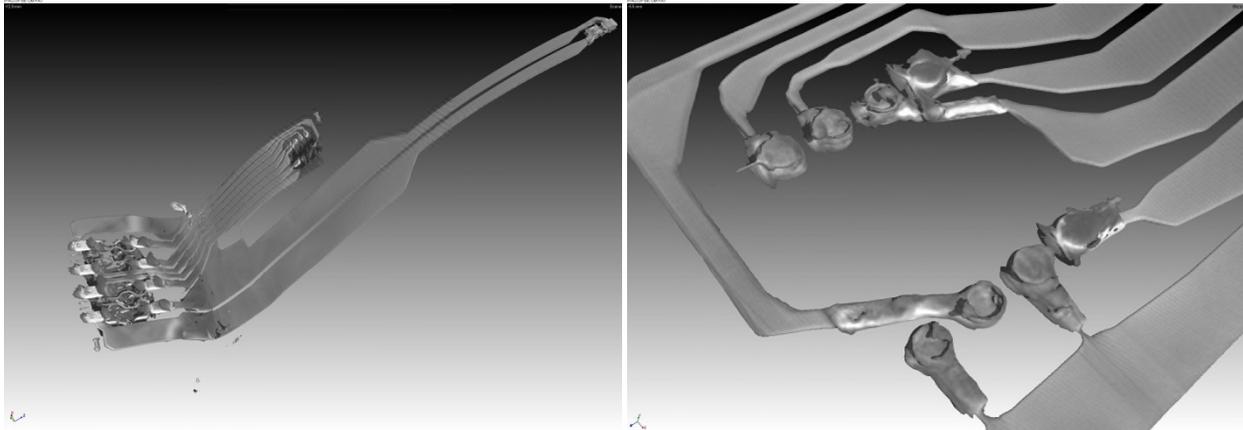


Abb. II.2.2: Computertomographieaufnahme eines defekten, retournierten Flexprintsensors (links) und Detailaufnahme der Anschlüsse des Drucksensorchips (rechts)

Man erkennt im Gesamtbild (linkes Bild in Abbildung II.2.2), dass die Knickstelle, welche sich durch das Einklemmen des Trägermaterials in die Fuge zwischen Zellgehäuse und Zelldeckel beim Einbau ergibt, unbeschädigt ist. Lediglich an den zwei äußeren Leads sind unklare Artefakte erkennbar. Somit erscheint die gewählte Einbaumethode grundsätzlich gangbar, die mechanische Belastung stellt für das Bauteil kein Problem dar. Hingegen zeigt das rechte Bild der Anschlüsse des Drucksensorchips teilaufgelöste Lotkugeln sowie einen Kurzschluss zwischen benachbarten Leiterbahnen, offensichtlich durch strominduzierte Diffusion des Metalls.

Diese Ergebnisse bestätigen dringenden Entwicklungsbedarf der Passivierung des Sensoraufbaus für den Betrieb in einer elektrisch aktiven LIB-Zelle.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konnten Konzeptnachweise für Druckmessung mit verschiedenen Flexprintgehäusen erbracht werden. Muster von Sensoren basierend auf Flexprint-Gehäusen wurde an die Projektpartner zur Realisierung von Musteraufbauten verteilt. In enger Abstimmung zwischen dem Pouchzellenhersteller und Infineon konnte **der Einbau in unterschiedliche Zelltypen** erfolgreich gezeigt werden, siehe Abbildung II.2.3. Das Flexprints substrat ist in die Schweißnaht zwischen Anoden- und Kathodenableiter eingesetzt, sodass der am anderen Ende montierte Drucksensor sich in der LIB-Zelle befindet.

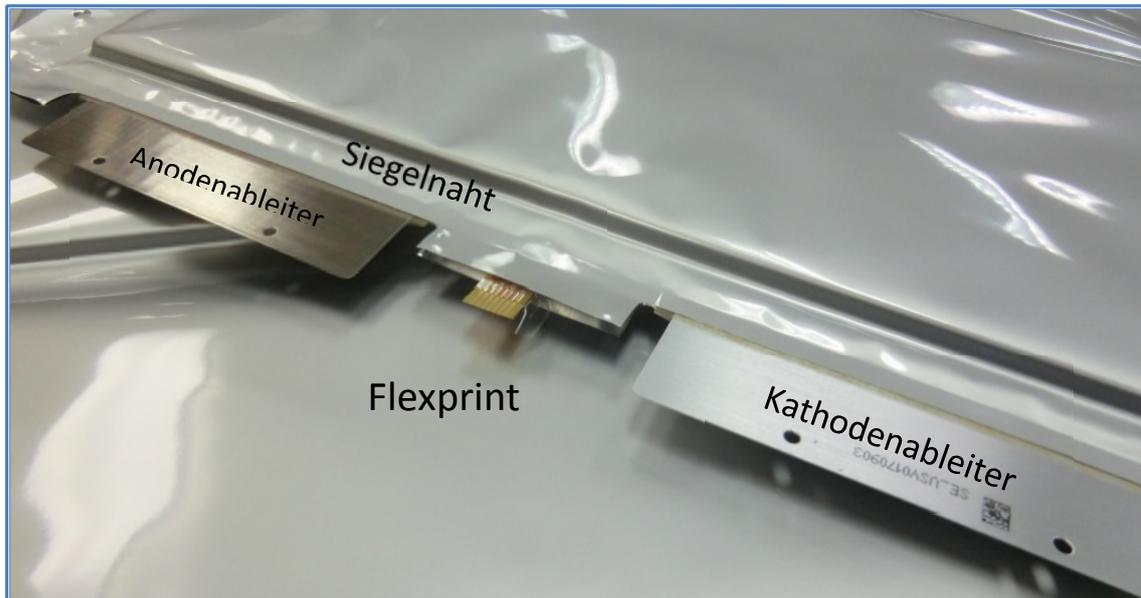


Abb. II.2.3: Pouchzelle mit integrierter Flexprintdurchführung

Vergleichbare Ergebnisse konnten auch in Zusammenarbeit mit den Herstellern von Rund und prismatischen Zellen erzielt werden. Abbildung II.2.4 zeigt je eine Zelle mit integrierten Sensoren.

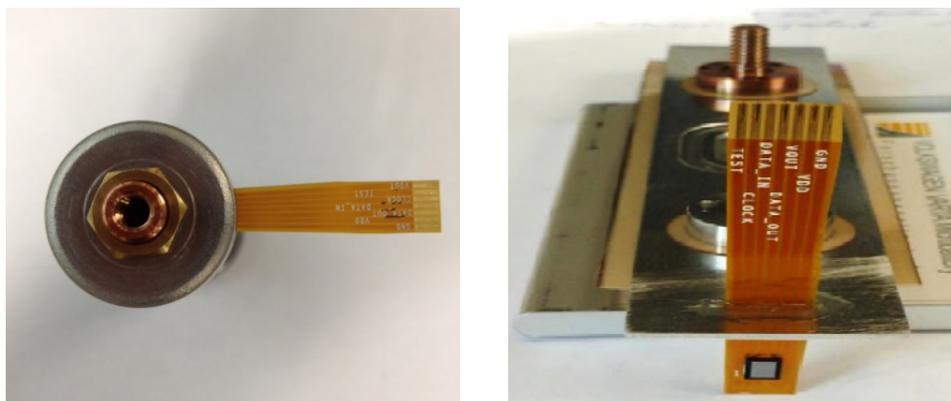


Abb. II.2.4: Integration von Flexprintgehäusen in eine Rund- und eine Prismatische Hardcasezelle

Für die von den Projektpartnern in unterschiedliche Zellen integrierten zellinternen Sensoren konnte der prinzipielle Nachweis der Funktionalität im Rahmen der von IFX unterstützten Evaluierung der Sensoren durch Vorhabenspartner erbracht werden. Die Integration der zellexternen Sensorik bzw. deren elektrischer Anschluss wird mit einem

zusätzlichen Aufstecksocket an der von IFX erstellten **Auswerteplatine für die zellinterne Sensorik** ermöglicht.

Die Platinen wurden fertig bestückt und in Betrieb genommen. Damit bestand die Möglichkeit, Druck- und Temperatursensoren für sechs Zellen an einer Platine anzuschließen und über CAN-Bus auszulesen. Die Flexprintsensoren, die in die Zellen integriert sind, können direkt an der Platine angesteckt werden. Auf der Platine befindet sich auch ein Aufstecksocket für die Platine der zellexternen Sensorik. Abbildung II.2.5 zeigt eine bestückte Platine, allerdings ohne die zellexterne Aufsteckplatine. Die Software zur Ansteuerung wurde programmiert und debugged.

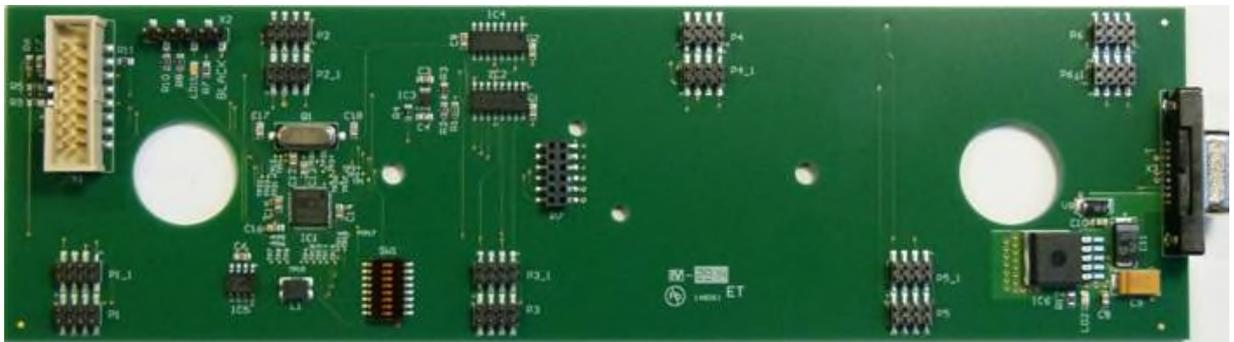


Abb. II.2.5: Bestückte Auswerteplatine mit CAN-Bus-Anschluss und Aufstecksocket für zellexternen Auswerteplatine

II.1.2 Gassensorik auf Graphen-Basis

Das Entwicklungsziel der **zellinternen Gassensorik** war die frühzeitige Detektion von Gasen, welche bei der Zersetzung des Elektrolyts im Abuse-Fall entstehen. Dafür wurde von den Zellherstellern als Hauptkomponente CO_2 genannt. Da die chemische Umgebung im Zellinneren (LiPF_6 als Leitsalz und Kohlensäureester als Lösemittel) hoch korrosiv ist, wurde als grundlegende Sensortechnologie ein Gassensor mit Graphen als aktivem Sensormaterial entwickelt, welches als Kohlenstoffmodifikation gegen die korrosive Umgebung in der Zelle chemisch stabil ist. Graphen an sich reagiert nicht sensitiv auf die Adsorption von CO_2 , daher musste für die Entwicklung des CO_2 -Sensors eine geeignete Funktionalisierung des Graphens gefunden werden.

Ein derart funktionalisierter Graphen-Sensor ist in Abbildung II.3.1 gezeigt. Die Messgröße ist die Änderung des elektrischen Widerstands der Graphenschicht mit den funktionalisierenden Nanopartikeln (rechtes Bild), welche sich zwischen den Leiterbahnen des Chips (linkes Bild) befindet.

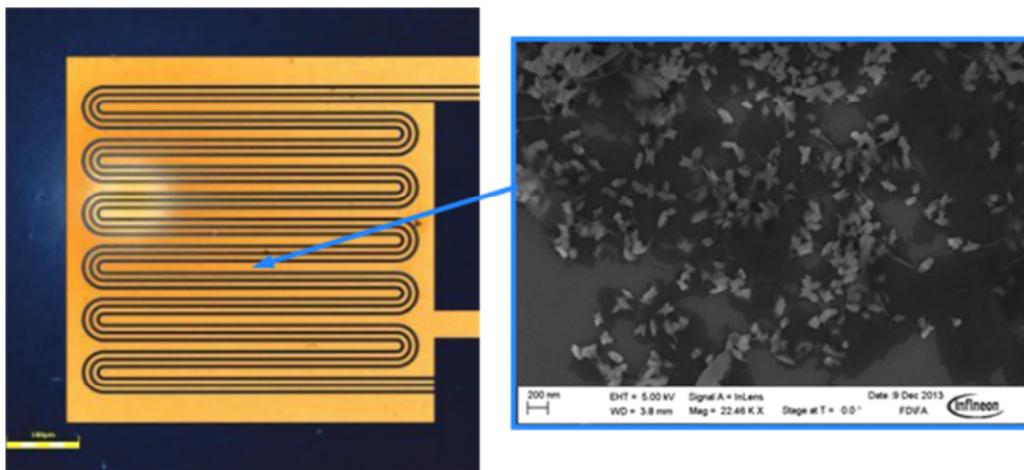


Abb. II.3.1: Ansicht eines Graphen-basierten Gassensors mit einer Detailaufnahme (REM) der mit Nanopartikeln funktionalisierten Graphen-Schicht.

Abbildung II.3.2 zeigt den Vergleich des Sensorsignals des funktionalisierten Graphen mit einem kommerziell erhältlichen CO_2 -Sensor (Fa. Figaro). Mit dieser und weiteren Messungen konnte gezeigt werden, dass Empfindlichkeit, Reaktionszeit und Linearität der Sensorantwort beider Sensoren vergleichbar sind.

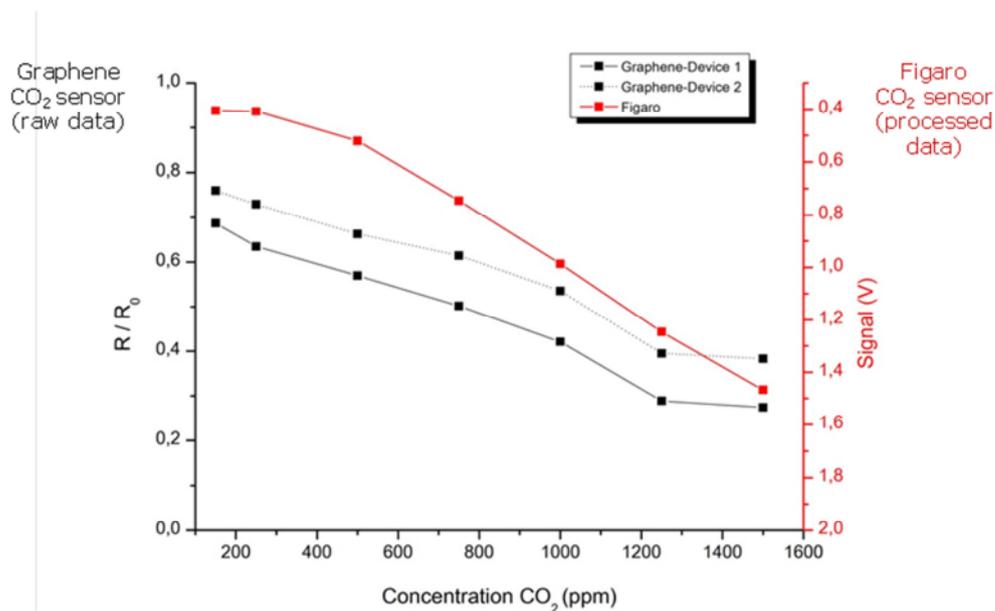


Abb. II.3.2: Vergleich der Sensorantwort des Graphen-basierten CO₂-Sensors mit der eines kommerziell erhältlichen CO₂-Sensors (Fa. Figaro).

Graphen bietet die Möglichkeit, mit verschiedenen Funktionalisierungen unterschiedliche Gase detektieren zu können. Mehrere dieser unterschiedlich funktionalisierten Sensoren wurden zu einem Sensorarray zusammengefasst. Eine Auswertung mittels Hauptkomponentenanalyse ermöglicht so die Realisierung eines Multigasensors. In Abbildung II.3.3 ist die Sensorantwort auf die Gase NO₂, H₂ und CH₄ nach Datenreduktion auf eine zweidimensionale Abbildung dargestellt.

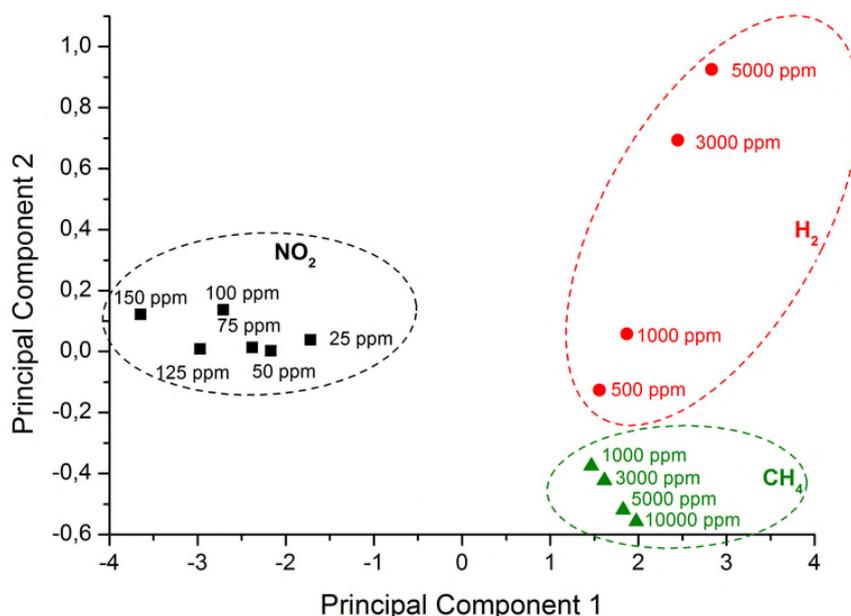


Abb. II.3.3: Hauptkomponentenanalyse eines Multigasensorarrays



Da von den Vorhabenspartnern nicht, wie ursprünglich geplant, Batteriezellen mit Kapillare zum Anschluss der Gassensoren an den Gasraum der Zellen geliefert wurden, konnte die Funktion der Sensoren an realen Zellen nicht gezeigt werden.

II.1.3 Simulation der Batteriesicherheit bei HW-Fehlern

Bei der Entwicklung von neuen Infineon Automotive -Produkten wird immer mehr die Einhaltung der ISO 26262 Norm („Road vehicles – Functional safety“) verbindlich. Die inhärente Komplexität der Schaltungen im Bereich der Elektronikentwicklung erlaubt eine kohärente Betrachtung der Funktionalen Sicherheit nur mit der Hilfe von umfassenden Simulationen. Dafür wurde in SafeBatt die Methodik der Sicherheitsanalyse durch Hardwarefehler Injektion entwickelt, welche eine umfassende Betrachtung der Sicherheit in der Gegenwart von Hardwarefehlern liefert, und auf die im Projekt erstellten Zell- und Leistungselektronik- Modelle erfolgreich angewendet.

Trotz ggf. intrinsischer Zellsicherheit erfordert die Sicherheitsbetrachtung auf Modul- und Batterieebene die Berücksichtigung der dazugehörigen Leistungselektronik bezüglich ihrer Fähigkeit, das System jederzeit in einem sicheren Zustand zu halten, bzw. zu bringen. Formal stimmt diese Forderung mit der ISO 26262 („Road vehicles – Functional safety“) Norm überein. Aus diesem Grund wurde bei der simulativen Sicherheitsbetrachtung die Leistungselektronik zusammen mit den Zellen betrachtet und der Fokus auf die Erkennung sicherheitskritischer Abweichungen gelegt.

Zu dieser Untersuchung werden mit der Methode der varianzbasierten Fehlerdekomposition die Auswirkungen von Fehlern beschrieben, die einzeln und in Kombination mit anderen Fehlern auftreten können, bzw. als Single-Point Faults (SPFs) und Multiple-Point Faults (MPFs) klassifiziert sind. Diese Klassifizierung von Hardwarefehlern erfolgt gemäß ISO26262 mit einem Flussdiagramm, wie es in Abbildung II.1.1 beschrieben ist.

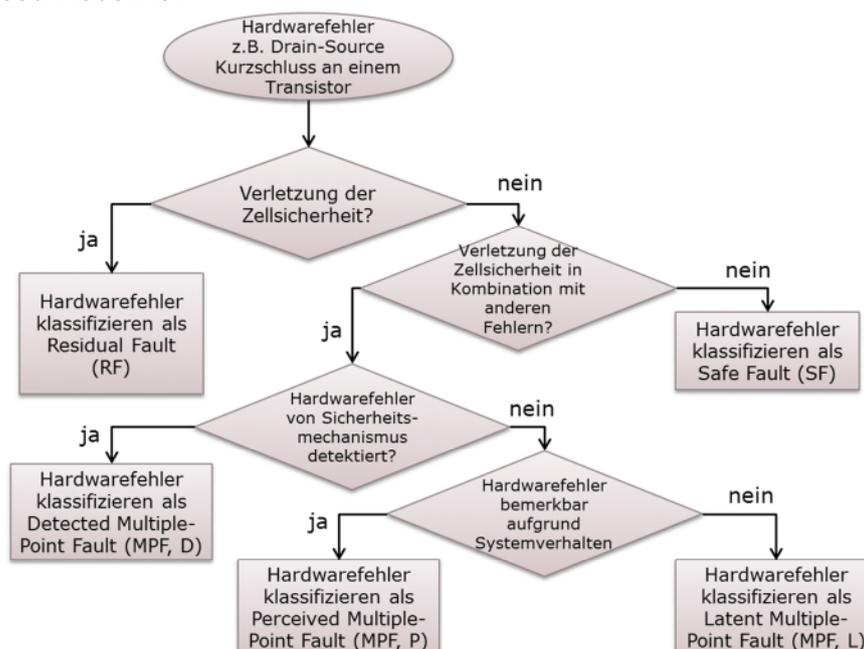


Abb. II.1.1: Flussdiagramm gemäß ISO 26262 zur Klassifikation von HW-Fehlern.

Entsprechend dieser Klassifizierung werden zuerst alle Fehler einzeln untersucht, um ihr Potential für eine Sicherheitsverletzung zu bestimmen. Falls ein Fehler einzeln auftritt und dieser die Sicherheit beeinträchtigt („verletzt“), wird er als Residual Fault (RF) klassifiziert, da er vom Sicherheitsmechanismus nicht aufgefangen wird. Falls das RF Potential ausgeschlossen werden kann, wird anschließend untersucht, ob der Fehler in Kombination mit einem anderen Fehler eine Sicherheitsverletzung verursachen kann. Hier spielt der Latent Multiple-Point Fault (MPF, L) eine wichtige Rolle, da dieser Fehler weder von den Sicherheitsmechanismen detektiert, noch vom Menschen bemerkt bzw. kontrolliert werden kann. D.h. er ist latent bis ein anderer Fehler stattfindet und somit eine Sicherheitsverletzung hervorruft. Die modellgestützte quantitative Sensibilitätsanalyse ermöglicht es somit, die Auswirkungen unterschiedlicher Fehler nach ISO 26262 zu bewerten.

Für diese Simulationen wurde in Zusammenarbeit mit Daimler und der Universität Münster ein Zellmodell entwickelt, welches das elektrische Klemmenverhalten der Zelle korrekt beschreibt. Das Modell der Leistungselektronik spiegelt ein generisches Modell eines BMS (Battery Management System) wieder. Dieses Modell stellt eine typische Integrierte Schaltung dar, die bis 12 Li-Ion Zellen überwachen kann. Neben den Überwachungsfunktionen für Spannung, Strom und Temperatur ermöglicht diese Schaltung passives und aktives Balancing sowie die entsprechenden Sicherheitsmechanismen.

Elektrisches Zellmodell

Dieses Modell ermöglicht, die Funktion von Li-Ionen-Zellen im Zusammenspiel mit der zugehörigen Leistungselektronik simulativ zu beschreiben. Dafür wurde ein Impedanzmodell der Zelle in Form eines elektrischen Ersatzschaltbilds mit passiven Bauteilen erstellt, mit dem lediglich das elektrische Klemmenverhalten der Zelle betrachtet wird. Das elektrische Verhalten der Zelle kann auf diese Weise durch eine Spannungsquelle, einen Widerstand und eine bestimmte Anzahl von Zeitgliedern beschrieben werden (siehe Abbildung II.1.2).

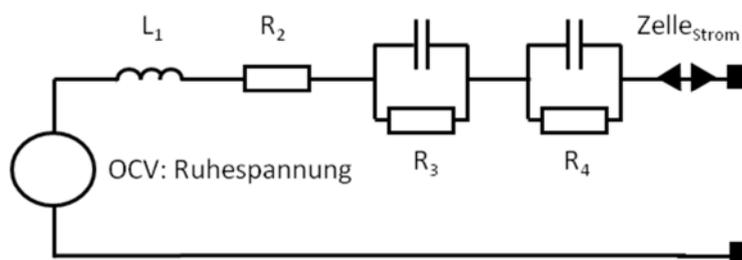


Abb. II.1.2: Zellmodell als elektrisches Ersatzschaltbild

Tabelle II.1.1 zeigt die verwendeten Modellparameter

Parameter	Beschreibung
OCV	Leerlaufspannung
L_1	Induktivität der Zelle und Zuleitungen
R_2	ohmscher Widerstand
R_3 C_3 und R_4 C_4	Zeitglieder (RC-Glieder)

Tab. II.1.1: Parameter des elektrischen Zellmodells

Die Parameter sind u.a. Funktionen der Temperatur und des Ladezustands der Zelle. Der Ladezustand (SoC) wird anhand eines Amperestundenzählers berechnet:

$$SoC = \frac{Q_{Start} + \int Zelle_{Strom} \cdot dt}{C_N}$$

wobei Q_{Start} der Anfangsladezustand ist. C_N ist die Nennkapazität und $Zelle_{Strom}$ ist der Strom, der durch die Zelle fließt.

Die Parameter des elektrischen Modells wurden anhand der Impedanzspektren geschätzt. Die hier angewandte Parametrierung -Methodik wurde in Zusammenarbeit mit der Daimler AG und der Universität Münster entwickelt.

Impedanzspektren wurden sowohl bei einer frischen Zelle, als auch während der Zyklierung der Zellen aufgenommen. Dies ermöglicht, die Parameter mit einer zusätzlichen Dimension, nämlich der Anzahl von Zyklen, zu beschreiben. Exemplarisch ist dies in der Änderung des ohmschen Widerstands R_2 in Abbildung II.1.3 gezeigt.

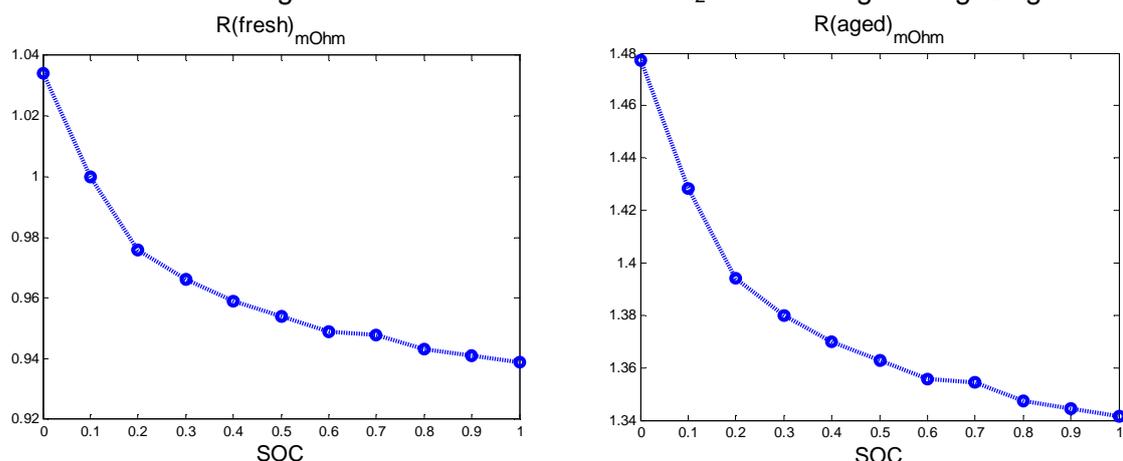


Abb. II.1.3: Abhängigkeit des Innenwiderstandes einer LIB-Zelle als Funktion des Ladezustands bei einer frischen Zelle (li) und einer gealterten Zelle (re)

Abbildung II.1.4 zeigt die Abhängigkeit von R_2 R vom SoC und von der Zahl der Lade- und Entladezyklen einer LIB-Zelle bis zum Ende ihrer Lebensdauer (80% SoH).

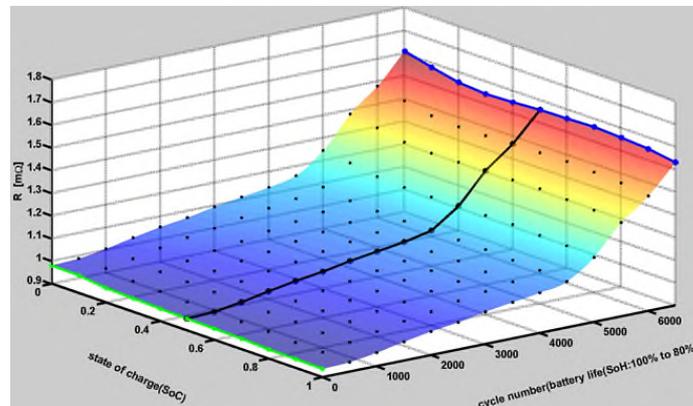


Abb. II.1.3: Abhängigkeit des Innenwiderstandes einer LIB-Zelle als Funktion des Ladezustands und der Zellalterung ("State of Health" - SoH)

Zur **Validierung des elektrischen Zellmodells** wurden eine Zelle und das Modell bezüglich ihrer Spannungsantwort im Zeitbereich verglichen. Als Anregung dienten sowohl rechteckförmige Strompulse als auch das „Artemis“-Stromprofil, das innerhalb TA1 definiert wurde. Abbildung II.1.4 zeigt den graphischen Vergleich der simulierten und gemessenen Zellspannungsantworten zu einer „Artemis“-Stromprofil Anregung.

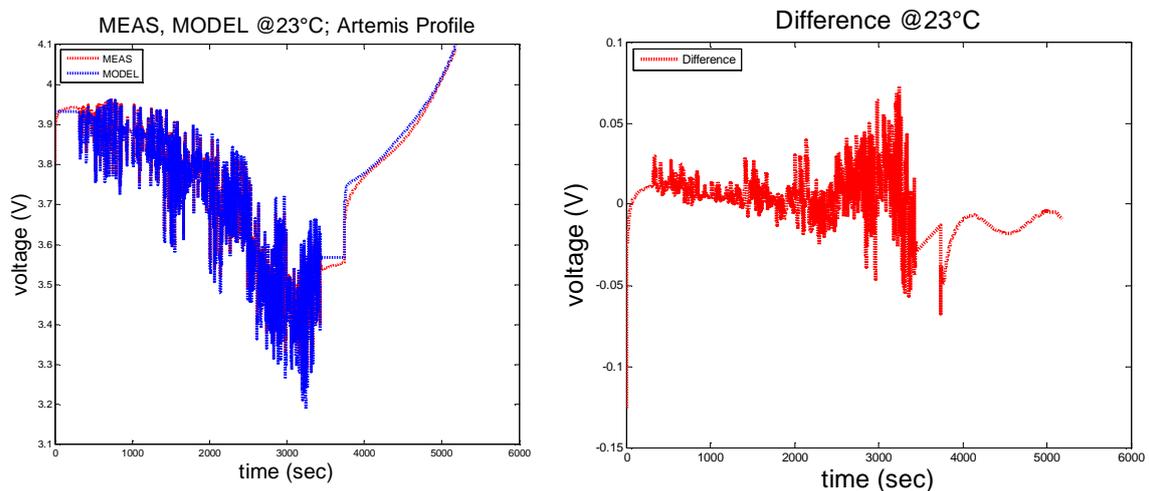


Abb. II.1.4: Vergleich der simulierten und gemessenen Zellspannungsantworten bei Anregung mit dem Artemis Stromprofil (23°C).

Abbildung II.1.5 zeigt einen vergrößerten Bildausschnitt zu dem Zeitpunkt, als die Zelle nach dem Artemis-Stromprofil wieder mit einem konstanten Strom aufgeladen wird (ca. $time=3741$ sec in Abbildung II.1.4).

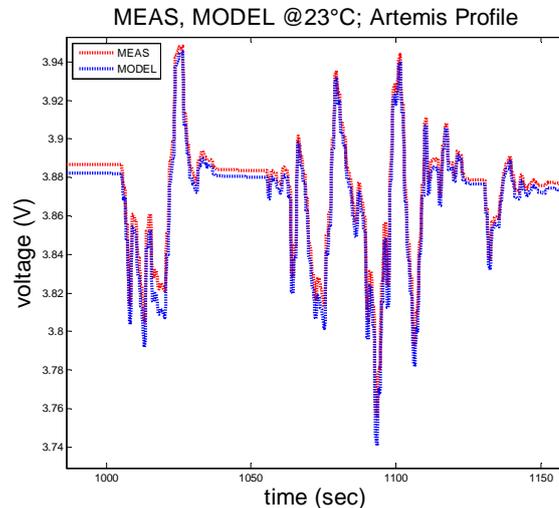


Abb. II.1.5: Vergrößerter Bildausschnitt des in Abbildung II.1.4 dargestellten Vergleichs zwischen simulierter und gemessener Zellspannungsantwort.

Der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Zellspannungen zeigt, dass die Dynamik der Zelle mit einem Modellfehler kleiner 80mV beschrieben werden kann. Diese Genauigkeit ist für die Anwendung des Modells völlig ausreichend.

Eine detaillierte Beschreibung der Zellmodellierung ist in den Ergebnisberichten E 4.2 "Entwicklung Methodik Simulation Batteriesystem" und E 4.4 "Entscheidung Simulationsmethodik für Zellsicherheit" enthalten.

Modell der Leistungselektronik

Im Modell ist eine typische Integrierte Schaltung zur Überwachung eines LIB-Moduls beschrieben, welche bis 12 Li-Ion Zellen überwachen kann. Abbildung II.1.6 zeigt die Konfiguration mit Spannungsüberwachung und aktivem Balancing von zwei LIB-Zellen. Die Schaltung besteht aus Leistungsschalter, Umsetzer, Balancing-Algorithmus, Drahtinduktivität sowie einem Flyback-Transformator (eine primäre und zwei sekundären Induktivitäten), der für die Energieübertragung zwischen den Zellen sorgt.

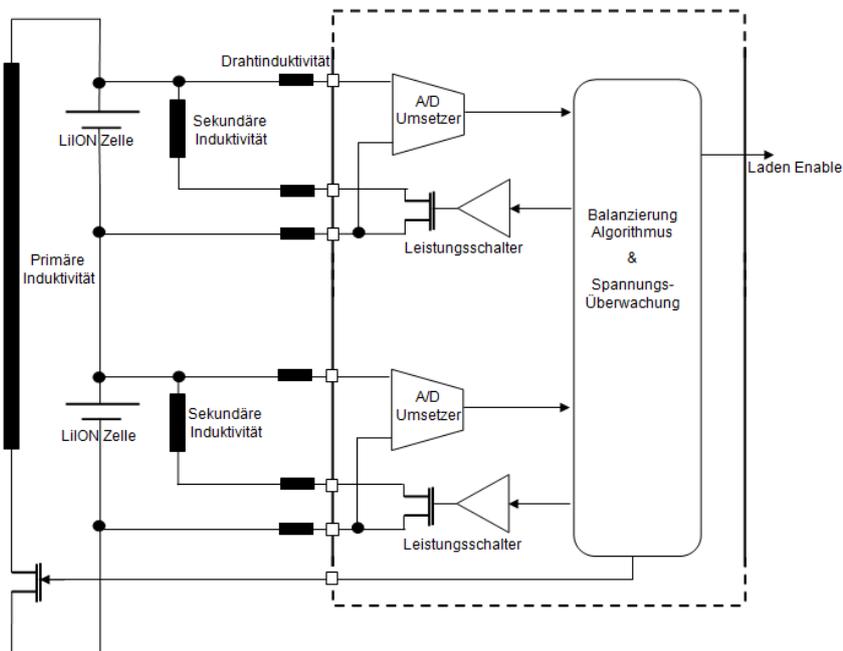


Abb. II.1.6: Leistungselektronik für Überwachung und aktives Balancing von zwei LIB-Zellen.

Die Funktionalität des Modells wurde am Beispiel des aktiven Balancing anhand von Messdaten, die an einem realen System aufgenommen wurden, im Vergleich zu den simulierten Strom- und Spannungsmessungen überprüft. Abbildung II.1.7 zeigt diesen Vergleich von Simulation (links) mit den Messdaten (rechts).

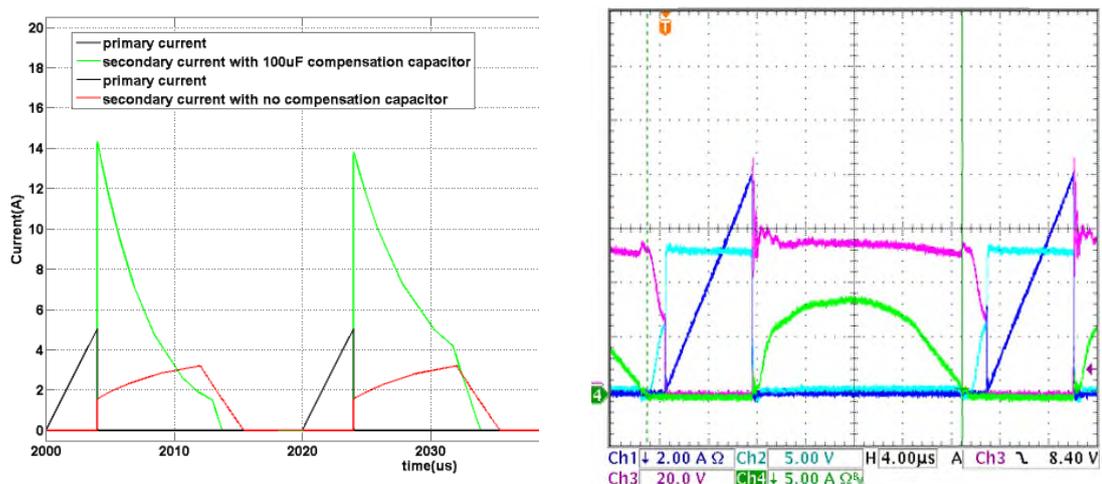


Abb. II.1.7: Qualitativer Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts) der Ströme bzw. Spannungen beim aktiven Balancing von zwei LIB-Zellen.

Das linke Bild zeigt den Strom der Primärseite (schwarz), den Strom der Sekundärseite (rot) sowie den Strom der Sekundärseite mit zusätzlichen Komponenten (grün). Das rechte Bild zeigt den Strom der Primärseite (dunkelblau), den Strom der Sekundärseite (grün) sowie die entsprechenden Spannungen am Transformator (hellblau & rosa). Die idealen Ströme in den primären und sekundären Seiten des Transformators nehmen jeweils linear zu bzw. ab, solange der entsprechende Schalter geschlossen ist. Die Messergebnisse zeigen, dass der Strom der sekundären Seite nicht dreieckig ist, wie die Theorie vorgibt. Das bedeutet, dass die Energieübertragung zur Balancierung nicht ideal ist. Der Grund hierfür sind die Bodydioden der Leistungsschalter. Darüber hinaus spielt auch die parasitäre Induktivität des Drahts eine Rolle. Diese Effekte wurden im Modell berücksichtigt.

Mit den im Vorigen beschriebenen Modellen einer LIB-Zelle und der Leistungselektronik eines Moduls hat Infineon nun die Möglichkeit, das Verhalten eines Moduls inklusive seines Battery Management Systems (BMS) elektrisch hinlänglich in seinen wesentlichen Eigenschaften zu beschreiben. Mit Hilfe dieser Modelle können Experimente, bzw. Simulationen, durchgeführt werden, deren Ergebnisse Rückschlüsse auf das Verhalten des Systems zulassen. Insbesondere die Zellmodelle liefern an dieser Stelle einen essentiellen Beitrag, da Infineon als Halbleiterhersteller bisher nur eine begrenzte Expertise auf diesem für die zukünftige Automobilelektronik wichtigen Gebiet hatte.

Darüber hinaus gestatten diese Modelle eine Durchführung von statistischen Simulationen, bei denen eine größere Anzahl von Simulationenläufen durchgeführt wird, wobei die wichtigsten Komponentenparameter für jeden Lauf entsprechend einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion gesetzt werden. Vergleichbare Untersuchungen wären auf einem realen System gar nicht möglich.

Automatisierte Sicherheitsanalyse durch Hardwarefehler Injektion

Infineon hat in SafeBatt eine induktive simulative Sicherheitsanalyse entwickelt, mit der die Zellsicherheit auf Modulebene in Abhängigkeit von Defekten in der Elektronik (Hardwarefehler) analysiert werden kann. Dabei werden wahrscheinlich auftretende Einpunkt- sowie Mehrpunktfehler in das Modell des Moduls (Zelle und Leistungselektronik) injiziert und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem simuliert. Anschließend werden die sicherheitskritischen Zustandsgrößen der Zellen, wie Zellspannung oder Zelltemperatur, aus den Simulationsergebnissen verwendet, um die Zellsicherheit und Effektivität der in der Elektronik implementierten Sicherheitsmechanismen zu evaluieren.

Diese induktive Sicherheitsanalyse wurde automatisiert und in den Entwicklungsflow für mikroelektronische Produkte eingebunden. Der Prinzipablauf und die dafür verwendeten Software-Tools sind in Abbildung II.1.8 dargestellt.

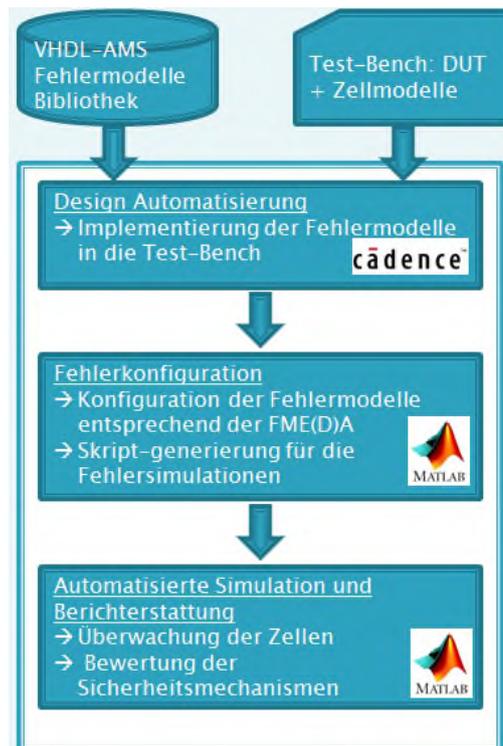


Abb. II.1.8: Prinzipablauf und Tools für die induktive Sicherheitsanalyse.

Die Fehlermodelle bilden dabei typische Hardware-Fehler, wie hard faults (open, short) und soft faults (transient), im Modell ab. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mit den oben beschriebenen Modellen einer passiven Balancierung und hard faults, die am Ausgang des A/D-Wandlers zur Spannungsmessung injiziert werden, erzielt (siehe Abbildung II.1.9).

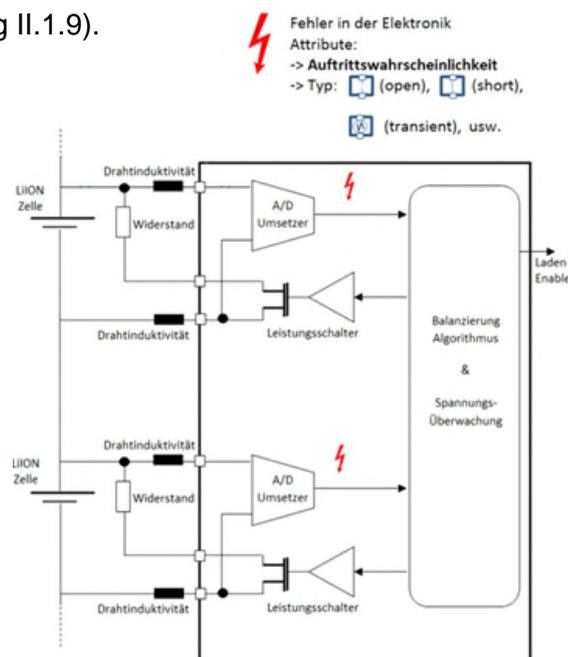


Abb. II.1.9: Modelle und Fehler in der Elektronik, die am Ausgang des A/D Umsetzers injiziert wurden.

Als Sicherheitsbedingung wurde die Einhaltung der maximalen und minimalen zugelassenen Zellspannung definiert, bzw. deren Verletzung (Safety-Goal Violation). Typische Ergebnisse, auch unter Berücksichtigung von verschiedenen SoC-Zuständen der Zellen, sind in Abbildung II.1.10 dargestellt.

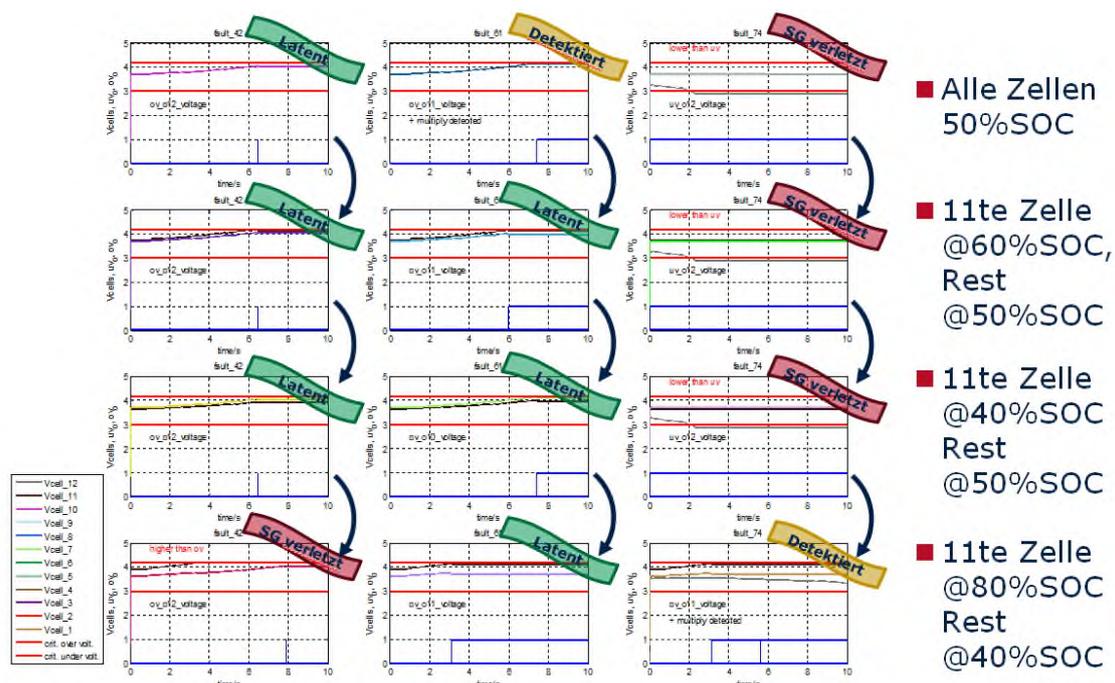


Abb. II.1.10: Zeitliche Entwicklung der Zellspannung bei verschiedenen Hardware Fehlern (variiert je Spalte) für verschiedene SOC-Werte einzelner Zellen eines 12-Zellen Moduls (variiert je Zeile).

Wie obiges Beispiel zeigt, können bestimmte Fehler in der Hardware die Zellsicherheit negativ beeinflussen; sie können aber auch mit Hilfe der simulativen Fehlerinjektion als solche identifiziert und analysiert werden. Allerdings ist die Analyse aller möglichen Fehler mit hohem simulativen Aufwand verbunden, insbesondere, wenn der Effekt des Fehlers auf die Zelle von Umgebungs- und Betriebsbedingungen abhängt und Mehrpunktfehler ebenfalls analysiert werden müssen. Auch zeigen erste Ergebnisse, dass der größte Teil der simulierten Fehler zu keiner Sicherheitsverletzung führt, sodass die Ausbeute einer Simulation aller möglichen Fälle z.B. mit der Methode der Monte-Carlo Simulationen im Vergleich zum hohen Aufwand relativ gering ist. Um diese Ausbeute und damit die Effizienz der Fehlersimulationen zu erhöhen, wurden Methoden

zur globalen Fehler-Sensibilitätsanalyse entwickelt. Diese Analyse wird vor der eigentlichen Fehlerinjektion durchgeführt.

Für den ersten Schritt einer **qualitativen Fehler-Sensibilitätsanalyse** werden bestimmte Stellen in der Schaltung (Schnittstellen von Komponenten) gekennzeichnet, an denen in einer Reihe von Simulationen Signalstörungen entsprechend einer Testmatrix initiiert werden. Die Ergebnisse der sicherheitsrelevanten Ausgangsgröße (in unserem Fall Zellspannung) und der Testmatrix (Eingangsgrößen), werden als Sensibilitätsmaße für die Ausgangsgrößen berechnet. Abbildung II.1.11 zeigt die Ergebnisse zweier Fehler-Sensibilitätsanalysen in einem Punktdiagramm in rot und blau.

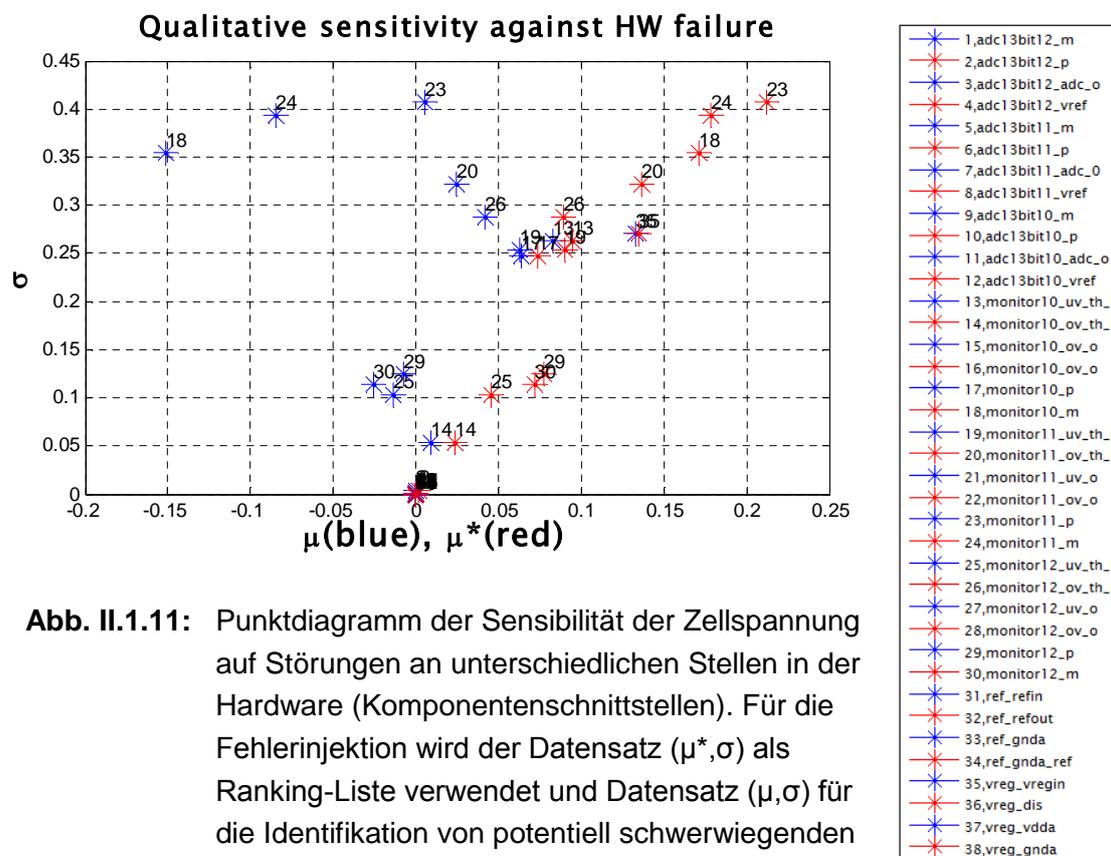


Abb. II.1.11: Punktdiagramm der Sensibilität der Zellspannung auf Störungen an unterschiedlichen Stellen in der Hardware (Komponentenschnittstellen). Für die Fehlerinjektion wird der Datensatz (μ^*, σ) als Ranking-Liste verwendet und Datensatz (μ, σ) für die Identifikation von potentiell schwerwiegenden Einpunkt- und Mehrpunktfehlern.

Die Ergebnisse im roten Datensatz (μ^*, σ) liegen auf einer Geraden, welche von $\mu=0$ in die obere rechte Ecke des Diagramms zeigt. Die Anordnung dieser Punkte auf der Geraden ist ein Maß dafür, welche Stelle in der Schaltung den größten Einfluss auf die Ausgangsgröße hat – je weiter oben rechts, umso einflussreicher. Damit kann der (μ^*, σ)-Datensatz als Ranking-Liste für die Fehlerinjektion verwendet werden, indem die einflussreicheren Stellen zuerst und genauer durch Fehlerinjektion und Simulation analysiert werden.

Die Ergebnisse des blauen Datensatzes (μ, σ) liegen verstreut um die Orthogonale bei

$\mu=0$. Der Abstand μ eines Datenpunktes von der Orthogonalen wird dabei interpretiert als die relative Auslenkung, die die Ausgangsgröße (hier die Amplitude der Zellspannung) aufgrund ihrer Sensibilität auf einen HW-Fehler an der entsprechenden Stelle erfährt. Der Betrag σ ist ein Maß für die Sensibilität der Ausgangsgröße auf eine Interaktion der entsprechenden Stelle mit anderen Stellen. Damit kann der (μ, σ) -Datensatz dazu verwendet werden potentiell schwerwiegende Einpunkt- und Mehrpunktfehler im Vorfeld zu identifizieren.

Als Beispiel einer **globalen Fehler-Sensibilitätsanalyse** wurde eine Fehlerinjektion am Leistungsschalter beim Vorgang des passiven Balancing gewählt. Bei dem betrachteten Hardwaremodell handelt es sich um eine generische Subkomponente eines elektronischen Bauteils, nämlich eine Treiberschaltung zur Steuerung einer Last. Beim passiven Balancing ist eine solche typische Last der Widerstand parallel zur Zelle, über den die Zelle mit dem höchsten Ladungszustand im Modul entladen wird, um sie ihre Spannung an die der anderen Zellen anzugleichen. (siehe Abbildung II.1.12).

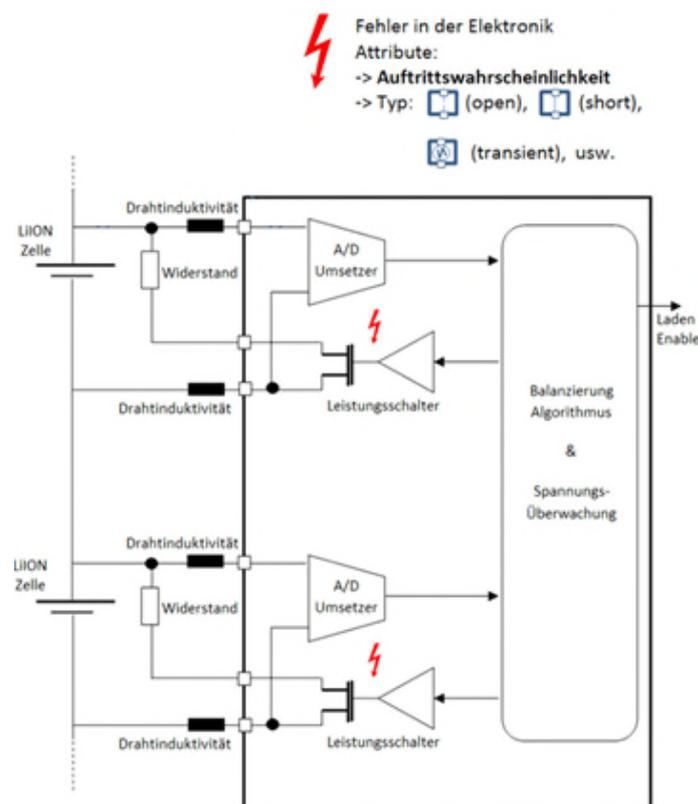


Abb. II.1.12: Fehlerinjektion am Leistungsschalter beim passiven Balancing.

Die Treiberschaltung hat zwei Versorgungsspannungen, die als potentielle Fehlerquellen untersucht werden:

- X1 = 1,5V Versorgungsspannung VDD1v5
- X2 = 5V Versorgungsspannung VDD5v

Die sicherheitskritische Größe ist das Spannungssignal, das die Last steuert

- Y = Spannungssignal zur Steuerung der Last Vp

Die Effekte von X1, X2 und deren Interaktion sowie die Varianz von Y wurden zu jedem Zeitpunkt aus stochastischen Fehlersimulationen berechnet:

$$V1 = \text{Var}(E(Y|X1))$$

$$V2 = \text{Var}(E(Y|X2))$$

$$V12 = \text{Var}(E(Y|X1, X2)) - V1 - V2$$

$$V(Y) = \text{Var}(Y)$$

Die ermittelten Werte sind in Abbildung II.1.13 als Funktion der Zeit gezeigt. Zusätzlich wurden die Autokorrelationskoeffizienten und Kreuzkorrelationskoeffizienten der Fehlerquellen und der sicherheitskritischen Größe ermittelt, um Aussagen über das transiente Verhalten von Y treffen zu können; diese sind in Abbildung II.1.14 dargestellt.

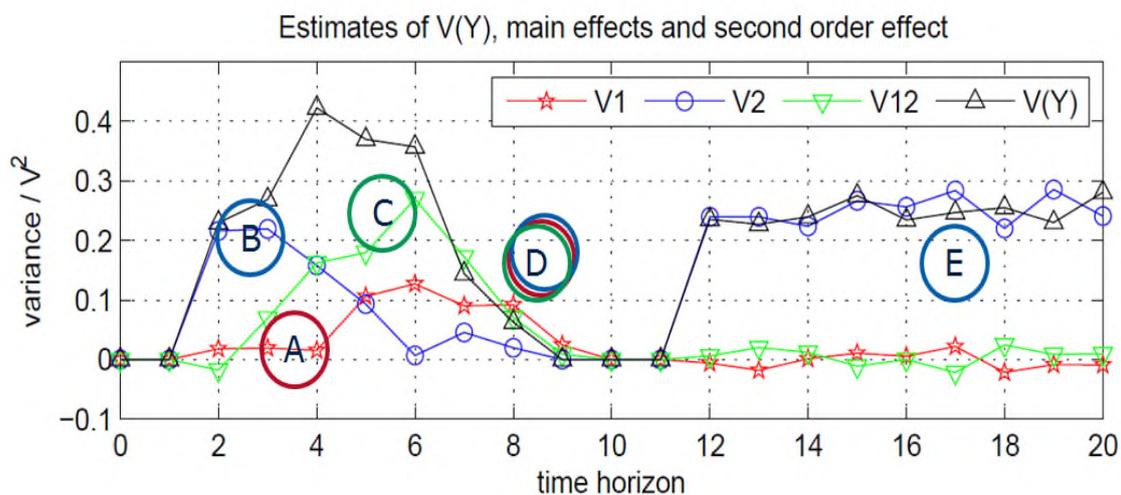


Abb. II.1.13: Geschätzte Effekte ($V1$ und $V2$) durch zwei unterschiedliche Fehlerquellen, Effekte durch Interaktion ($V12$) beider Fehlerquellen und Varianz der sicherheitskritischen Größe ($V(Y)$) als Funktion der Zeit (msec).

Die Memory-Länge m , welche aus Abbildung II.1.14 bestimmt werden kann, gibt Auskunft über die Dauer des transienten Verhaltens von Y bezüglich einer Fehlerquelle.

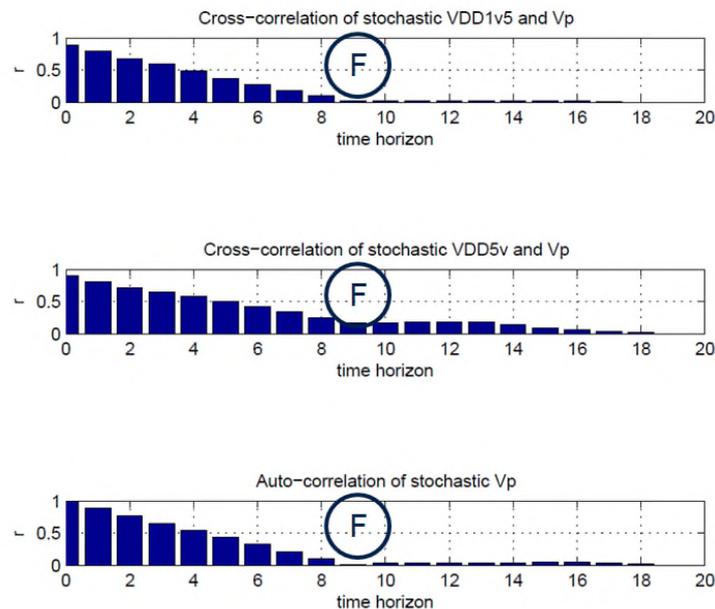


Abb. II.1.14: Kreuzkorrelationen und Autokorrelation als Funktion der Zeit zur Bestimmung der Memory-Länge m von Y . Hier $m=9\text{ms}$, da die Korrelationskoeffizienten alle bei 9ms zum ersten Mal ihr Minimum erreichen.

Die in den beiden Abbildung II.1.13 und II.1.14 dargestellten Ergebnisse können anhand der mit A, B, F gekennzeichneten Stellen folgendermaßen interpretiert werden:

Verlauf von V1: Kein, bzw. vernachlässigbarer Effekt V1 bis 4ms . Ab 4ms wachsender Effekt bis 6ms , danach fallend bis 10ms . Kein Effekt bis Ende der Simulation bei 20ms .

Der Kurvenverlauf bei Markierung A deutet auf ein latentes Verhalten der Fehlerquelle X1 bis 4ms hin. Der Effekt von X1 wird erst ab 5ms am Ausgang Y erkennbar und dort auch nur bis max. $m=9\text{ms}$ (siehe Markierung F in Bild 13). Ab 9ms kein Effekt durch Fehlerquelle X1, d.h. latentes Verhalten ab 9ms .

Verlauf von V2: Ab 2ms großer Effekt in V2, ab 3ms sinkend. Kein Effekt ab 9ms bis 11ms . Ab 12ms konstanter Effekt bis zum Ende der Simulation bei 20ms .

Der Kurvenverlauf bei Markierung B deutet auf einen starken Effekt der Fehlerquelle X2 hin, der bei 6ms wieder abklingt. Trotzdem deutet die Memory-Länge von $m=9\text{ms}$ darauf hin, dass der Effekt unter Umständen bis 9ms bemerkbar ist (zB. wenn der Fehler ab 2ms auftritt). Ab 12ms hat die Fehlerquelle X2 alleine Einfluss auf Y.

Verlauf von V12: Ab 3ms stetig wachsender Effekt V12 bis 6ms . Ab 7ms stetiger Fall bis 9ms . Kein Effekt bemerkbar bis zum Ende der Simulation bei 20ms .

Der Kurvenverlauf bei C deutet auf latentes Verhalten bis 2ms hin. Der größte interaktive Effekt kann bei 6ms erwartet werden. Ab 9ms bis Ende der Simulation bei 20ms kein Effekt mehr durch Interaktion der Fehlerquellen zu erwarten.

Diese Interpretation wird unterstützt mit Ergebnissen aus Fehlerinjektionen von Spannungsabfällen an den jeweiligen Versorgungsspannungen, welche in Abbildung II.1.15 gezeigt sind. Die Bemerkungen am Rand beziehen sich auf die durch Pfeile angedeuteten Stellen im Kurvenverlauf und korrespondieren mit den vorherigen Interpretationen.

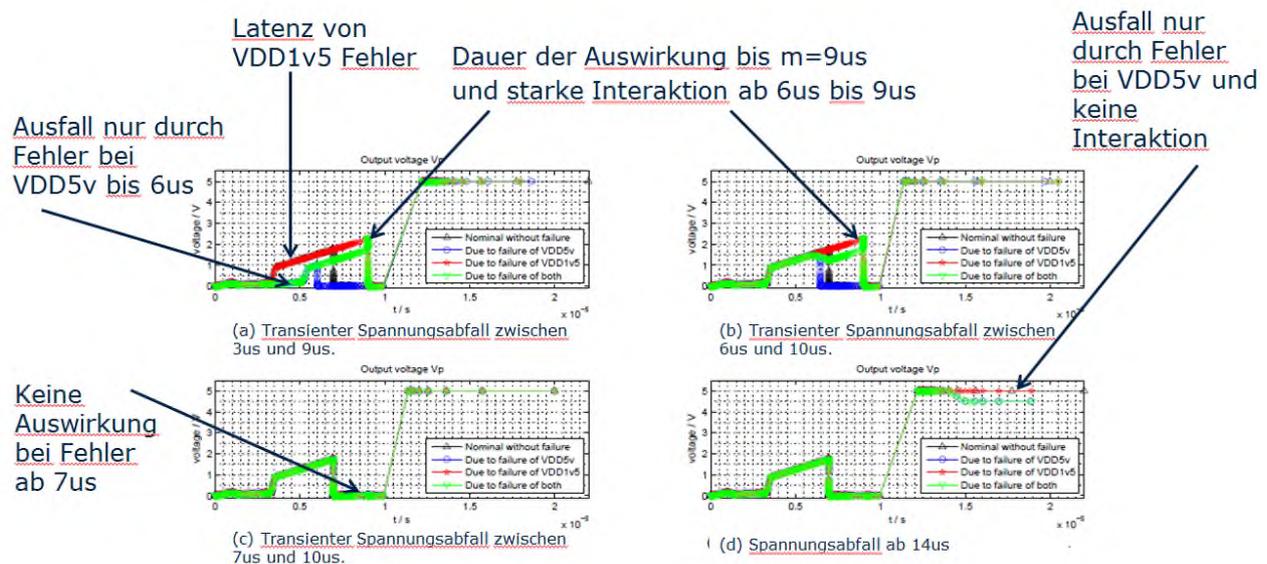


Abb. II.1.15: Fehlerinjektion von Spannungsabfällen zu unterschiedlichen Zeiten. Die Kurven zeigen jeweils die sicherheitskritische Größe V_p nach der jeweilig beschriebenen Fehlerinjektion. Die mit Pfeilen angedeuteten Stellen im Kurvenverlauf beziehen sich auf die Markierungen A, B, ... , F in den vorherigen Ergebnissen und deren Interpretation.

Wie gezeigt werden konnte, ermöglichen die entwickelten Methoden eine kohärente Betrachtung der Funktionalen Sicherheit auf Modulebene anhand von Simulationen unter Berücksichtigung von Fehlern in der Elektronik. Diese kohärente Betrachtung unterstützt die Argumentation zur Konformität mit der ISO 26262 Norm („Road vehicles – Functional safety“) welche in zunehmenden Maße bei der Entwicklung von Automobilelektronik gefordert wird. Daher konnte die in SafeBatt entwickelte Methodik auch in weiteren Entwicklungen für verschiedenen Applikationen (nicht nur in der Elektromobilität) erfolgreich angewendet werden.

II.1.4 Funktionsmodell eines Digitalen Batterie-Passes

Der Digitalen Batterie-Pass (DBP) soll pro Modul kritische Zellparameter erfassen, verarbeiten, speichern und auf Anfrage entsprechend den Zugriffsbefugnissen wiedergeben. Alle diese Vorgänge sollen hohen Sicherheitsanforderungen genügen.

Als erster Schritt wurde unter Anleitung von VW mit Beteiligung der anderen OEMs, weiterer Experten und auch Infineon eine Liste von Parametern erstellt, welche hinsichtlich Darstellung (Histogramm, Einzelwerte), sowie Aufzeichnungsintervall und Grenzwerte beschrieben wurden. Diese Liste wurde basierend auf den im Vorhaben gewonnenen Erkenntnissen sowie des aktuellen Entwicklungsstandes des DBP überarbeitet und ergänzt. Ein Teil dieser Parameter ist in Tabelle II.4.1 dargestellt.

Zellparameter	Berechnung BMS		Min	Max	Histogramm-Auflösung	Signalgüte	Speicherung Chip	
	Darstellung	Frequenz						
Temperatur	Histogramm	10 s	-40 °C	80 °C	2 K	1 K	Keine Skalierung notwendig	
Innendruck (Gas)	Histogramm	10 s	0,1 bar	6 bar	0,1 bar	0,05 bar	Skalierung notwendig Faktor: 10	
Spannung	Histogramm	100 ms	0,9*U_Min_Safety	1,1*U_Max_Safety	10 mV	1 mV	Skalierung notwendig Faktor: 100	
[Chemo-Sensor]	Ereignis	40Tppm...770Tppm: Zündgrenze 180Tppm...590Tppm: Explosionsgrenze						Keine Skalierung notwendig
SOH	Wert		0 %	100 %		1%	Keine Skalierung notwendig	
Energie-/Leistungsdurchsatz	Wert	Ladungsdurchsatz bereits im Strom-Histogramm enthalten Leistungsdurchsatz würde Leistungshistogramm erfordern						Keine Skalierung notwendig
Selbstentladung	Wert	Umsetzung? Fall: Balancing / Jede Zelle?					1 mV	
Innenwiderstand Zelle / Modul	Wert	Zelle: Modul:	1mΩ 5mΩ	50mΩ 1Ω			<5 %	

Tab. II.4.1: Aktualisierte Liste (Teilauszug) der Zellparameter für den digitalen Batteriepass. Ergänzungen sind in grün hervorgehoben

Als nächster Schritt wurde ein Funktionsmodell für den DBP entwickelt, welches die allgemeine Architektur des DBP und wichtige Aspekte der Fahrzeug-Integration beschreibt. Dazu wurden die folgenden Ziele definiert:

- Erfassung von für Lebensdauer und Funktion einer Batterie kritischen Parametern
- Authentisierung des DBP über kryptographische Methoden
- Nicht-Manipulierbare Speicherung der Daten in einem DBP
- Verifizierbarer Zugriff auf gesicherten die Daten des DBPs



Die vollständige Implementierung des DBP-Konzepts soll für jedes einzelne Batteriemodul die lückenlose und authentifizierte Verfolgbarkeit seiner Historie ermöglichen. Dies wiederum ist eine eindeutige Basis für die individuelle Lebensdauerprognose einer Batterie und ihrer Komponenten. Somit liefert der DBP die Grundlage zur Berechnung des Wiederverkaufswertes einer Batterie bzw. ihrer Module und schafft belastbare Fakten im Gewährleistungsfall.

Das Funktionmodell des DBP betrachtet dabei die folgenden, pro Modul relevanten Anwendungsfälle:

- Verifikation der Batterieauthenzität:
Fälschungssichere Detektion von inkorrekten Modulen durch Kryptographie
- Erkennung von defekten Modulen im Markt:
Nachweis für Safety-kritische Batterien (Offline). Protokollierung von kritischen Ereignissen.
- Sicheren Austausch von Batterien:
Module können zwischen über mehrere Fahrzeuge ausgetauscht und verifiziert eingebunden werden.
- Ermittlung des Wiederverkaufswert:
Notwendiger Bestandteil für den Handel/Wiederverkauf von Batterien
- Verifizierbarer Datenaustausch der Historien-Daten
Durch kryptographische Signaturen sind die Daten auch als Nachweis bei Streitfragen verifizierbar.
- Produktion von Batterien:
Erkennung und Protokollierung von produzierten Batterien. Verhinderung von kopierten Modulen, Problemen bei Zulieferern, Transport oder Ersatzteil-Handel.
- Recycling-Absicherung:
Protokollierung von der Herstellung über Lebensdauer bis zur Wiederverwertung
- Schutz vor Datenmissbrauch:
Hoher Schutz von Nutzer-Daten in der Historie ist eine Forderung der Gesellschaft (Politik)
- Schutz der Daten/IP:
Nutzungsstatistiken als wertvolle Information über Nutzung von Elektro-Fahrzeugen

Die generische Architektur eines solchen Batterie-Systems mit dem DBP ist in Abbildung II.4.1 dargestellt. Ein Batterie-Management System (BMS) steuert die verschiedenen Module (Blöcke) der LIB, deren Anzahl natürlich von Hersteller zu Hersteller variiert. Für jedes Modul ist ein DBP vorgesehen, der die historischen Daten des Moduls speichert

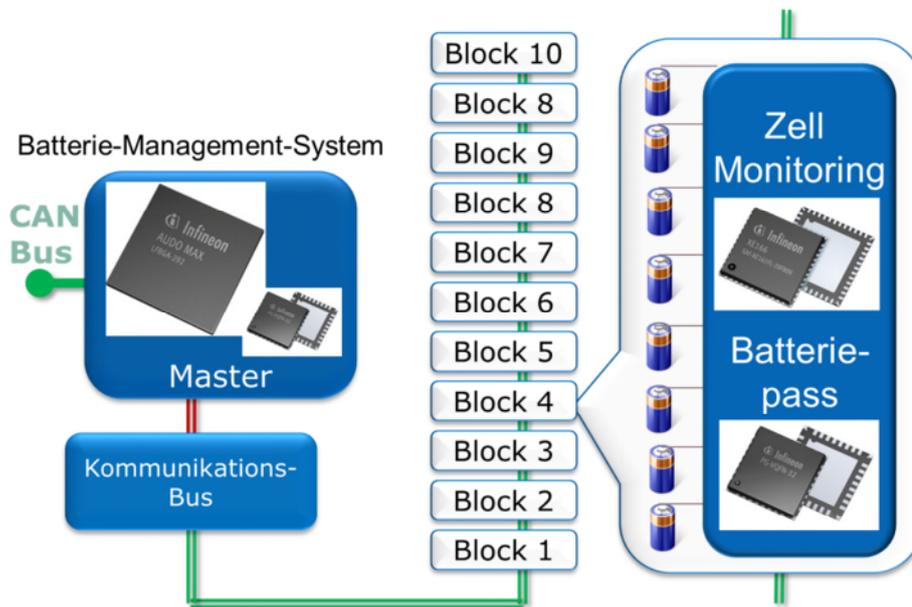


Abb. II.4.1: Architektur eines Batterie-Systems mit DBP

Der interne Aufbau des Funktionsmodells bzw. das Konzept des DBP ist schematisch in Abbildung II.4.2 dargestellt.

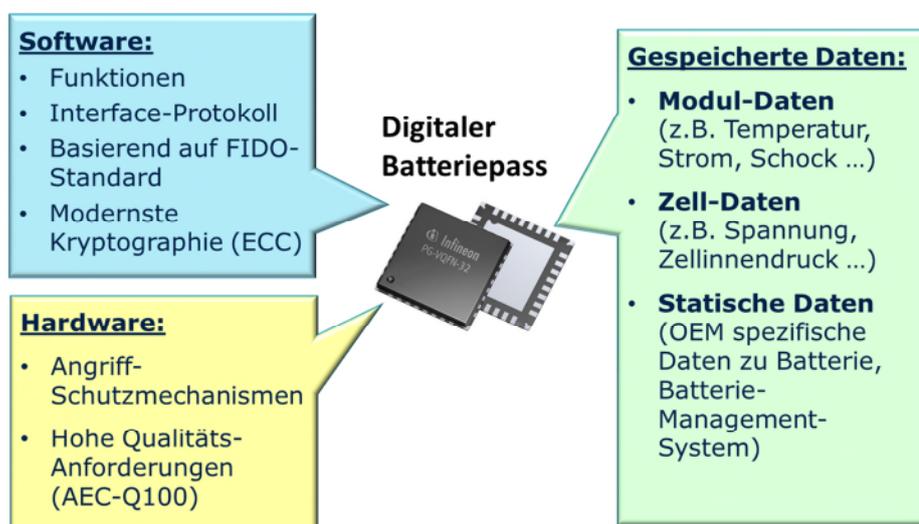


Abb. II.4.2: Funktionsmodell und internes Konzept DBP

Der DBP besteht im Wesentlichen aus 3 Teilen: Die Hardware, die diverse Schutzmechanismen bietet, um eine Manipulation der gespeicherten historischen Daten



sowie der kryptographischen Schlüssel zu verhindern. Dies ist insbesondere für die Technologien im Smartcardbereich eine essentielle Eigenschaft, da die Hardware verschiedene Sensoren und kryptographische Schutzmaßnahmen implementiert. Die Software implementiert die Funktionen des Digitalen Batteriepass. Die Softwarearchitektur besteht aus mehreren Schichten, die Kommunikationsdaten von der Hardware auf der untersten Schicht bis zur Applikation auf der obersten Schicht, weiterreichen und verarbeiten. Durch dieses Modell lässt sich eine moderne Architektur umsetzen, die zudem sehr portabel ist und in Zukunft leicht gepflegt werden kann. Ein Modul der unteren Schicht ist die Steuerungseinheit für die kryptographische Unterstützung. Die zu verschlüsselnden Daten werden von der Applikation zu dieser Steuerungseinheit weitergeben und werden dann mit Hardwareunterstützung schnell und effektiv verschlüsselt.

Zur Kommunikation mit dem Batterie Management System soll ein Protokoll genutzt werden, das eine Zugriffskontrolle auf die historischen Daten ermöglicht. Dazu muss der Kommunikationspartner mit Hilfe kryptographischer Funktionen identifiziert und authentisiert werden. Darauf basierend entscheidet die Applikation welche Rechte dem Kommunikationspartner zustehen.

Ein wichtiger nächster und für Infineon relativ arbeitsaufwendiger Schritt war die Qualifikation der Hardware des DBP für eine mögliche Anwendung im automobilen Umfeld. Als Ausgangsbasis dienten Security ICs aus der SLE97-Produktfamilie, die aus dem Consumer-Bereich stammen. Die wesentlichen Ergebnisse waren:

- Die bereitgestellte Silizium-Technologie ermöglicht ein kosteneffizientes Hardware-Design und ein größeres Anwendungsfeld der SLE97 Security ICs.
- Im Rahmen des Vorhabens wurden neue Methoden und Konzepte zur Qualitätssteigerung solcher ICs entwickelt.
- Die Qualitätsbewertung wurde an der SLE97-Produktfamilie durchgeführt, die nun den automobilen Zuverlässigkeitstest AEC-Q100 erfüllen können und folglich für „in-car“ Anwendungen verwendet werden können.
- Dies stellt eine Neuigkeit dar, da ähnliche Produkte basierend auf solchen Smartcard ICs und einer ARM Architektur mit einem hohen Sicherheitslevel (Common Criteria EAL5+ certified) nicht bekannt sind.

Eine zentrale Rolle spielen dabei die Bedrohungsszenarien, die im Rahmen des Projektes berücksichtigt wurden. Es wurden verschiedene Angriffe auf Halbleiter-ICs untersucht, so dass der DBP eine hohe Resistenz gegen Angriffe hat. Die verschiedenen Szenarien von Angriffen und deren Klassifizierung werden in Abbildung II.4.3 aufgezeigt.

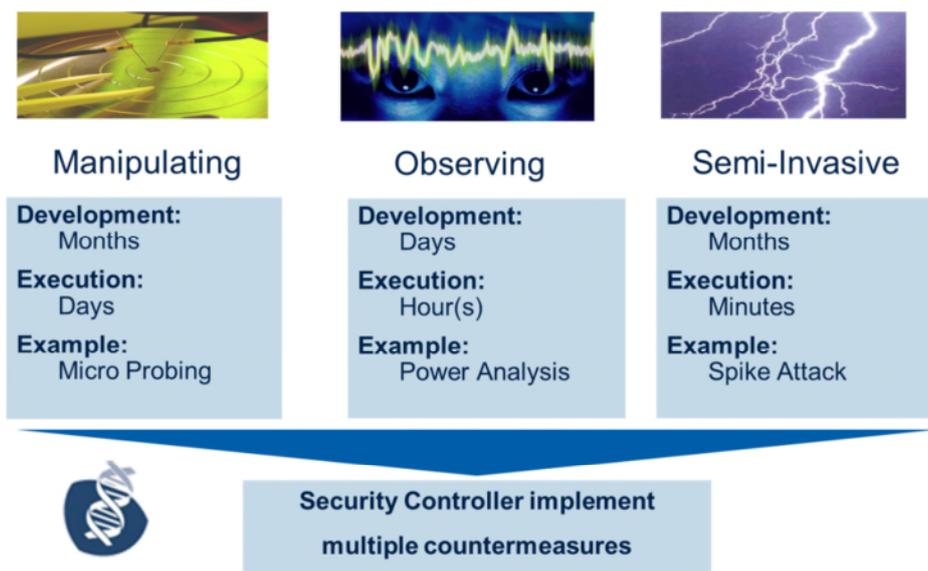


Abb. II.4.3: Angriffsszenarien und deren Klassifizierung

Eine ganzheitliche Sicherheit kann dabei nur erreicht werden, wenn auch die Prozesse in der Herstellung und der Verwaltung betrachtet werden. Eine Übersicht über diese Zusammenhänge zwischen der Sicherheit eines Produkts und des Prozesses werden in Abbildung II.4.4 aufgezeigt.



Abb. II.4.4: Sicherheit durch Produkte und Prozesse

Auf der gesicherten Hardware wird eine spezielle Firmware implementiert, die als Schnittstelle nach außen arbeitet und die internen Funktionen des DBP implementiert. Die Architektur des DBP ist in der Abbildung II.4.5 dargestellt.

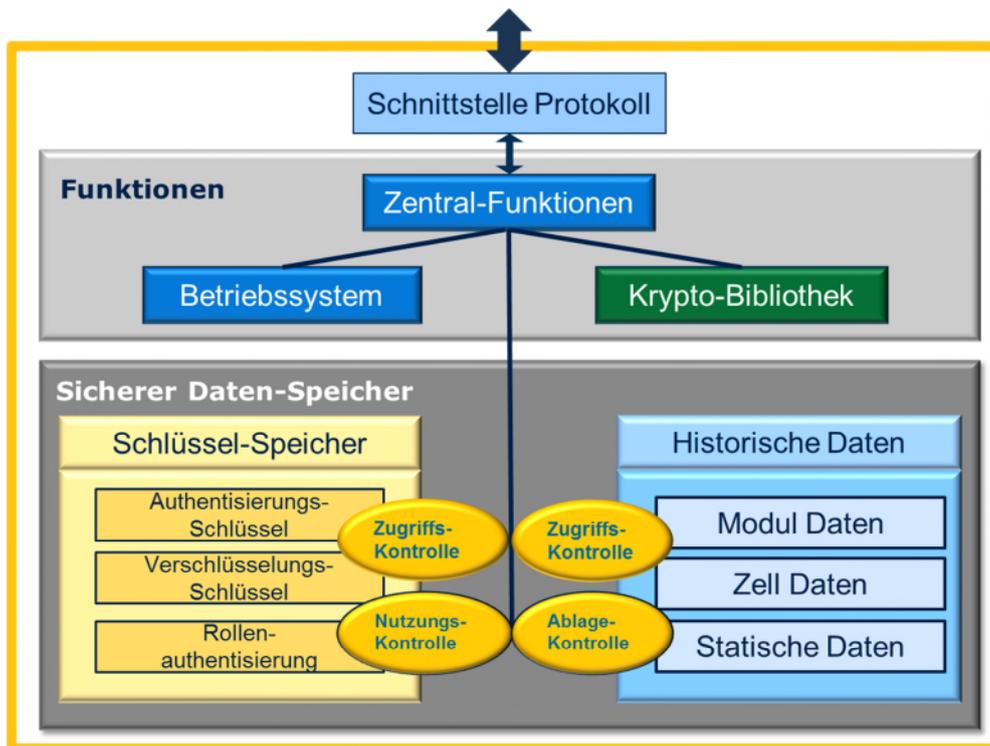


Abb. II.4.5: Interne Architektur der Firmware des DBP

Die Entwicklung des digitalen Batteriepasses (DBP) konnte mittels eines proof-of-concept Prototyps demonstriert werden (siehe Abbildungen II.4.6 und II.4.7), welcher im Wesentlichen aus einem für den DBP adaptierten Krypto-Chip auf einer Platine mit der notwendigen Ansteuerungselektronik, den Schnittstellen zu einem PC und einem an die Anforderungen an den DBP angepassten SW-Paket besteht.

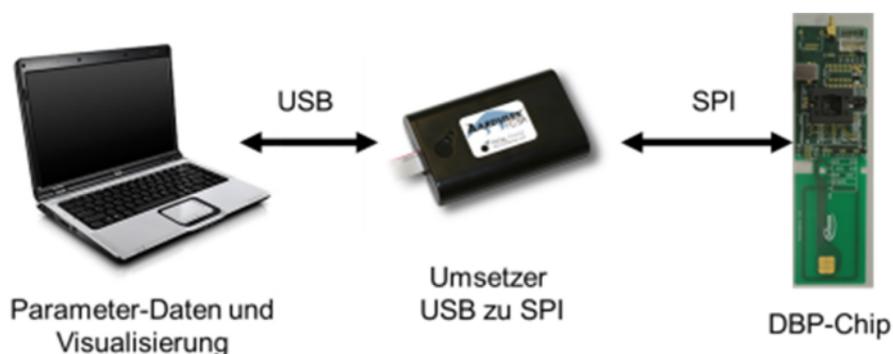


Abb. II.4.6: Proof of Concept Hardware für den DBP

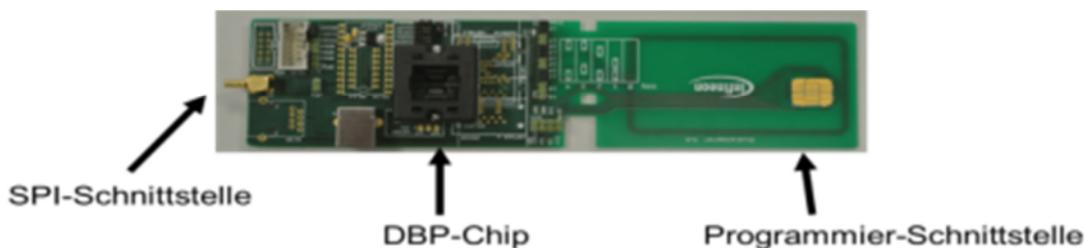


Abb. II.4.7: Platine mit Ansterelektronik für den DBP

Der Demonstrator wurde mit einem Parameter und den Kryptographie-Funktionen Personalisierung, Authentisierung, sicherer Datenspeicherung und verifizierbarer Datenzugriff mit einem eigenständigen Prototypen validiert. Für die Ansteuerung wurde eine PC-Anwendung im PC entwickelt, die die entsprechenden Funktionen ausführen kann. Abbildung II.4.8 zeigt die Benutzerschnittstelle dieser Anwendung mit den ausgeführten Kommandos nach einer Personalisierung des DBP und dem Auslesen eines Histogramms.

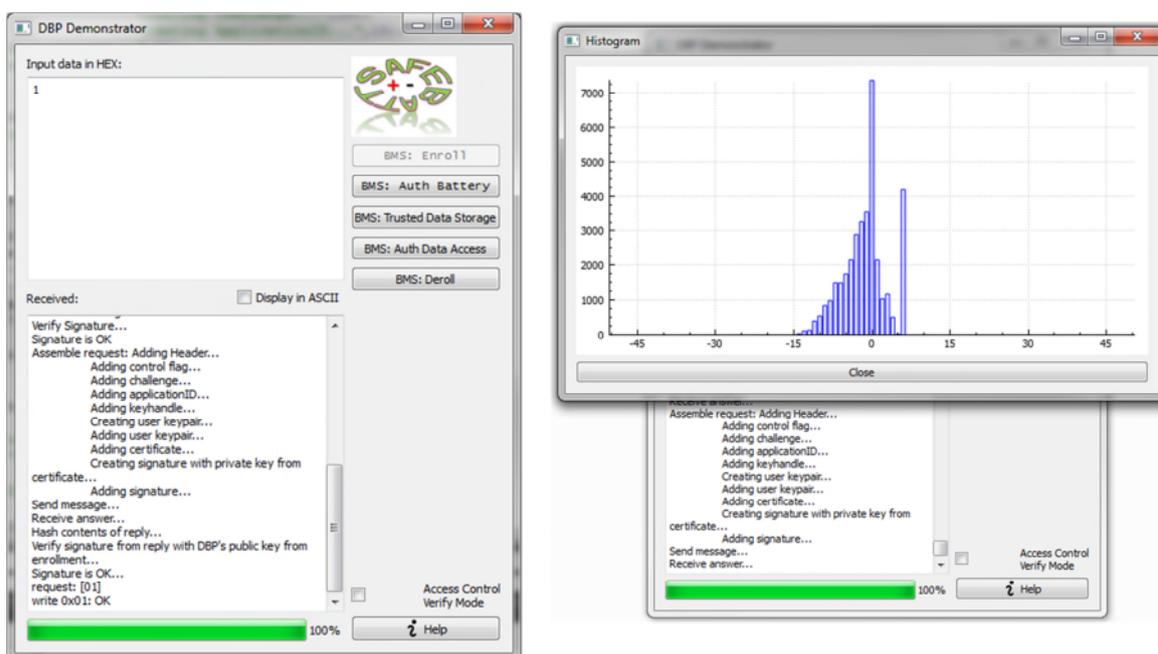


Abb. II.4.8: Benutzerschnittstelle des DBP-Demonstrators



Die Machbarkeit der prototypischen Implementierung des Konzepts konnte somit erfolgreich erreicht werden. Alle zentralen kryptographischen Funktionen wurden implementiert. Die Validierung erfolgte durch folgende ausgeführte Tests:

- Datenübertragung über das SPI Interface dargestellt
- Durchführung der Kryptographie nachgewiesen
- Funktionale Tests zur Evaluation der Security-Maßnahmen durchgeführt
- Nutzung von realistischen Testdaten von VW/IAV erfolgreich angewendet

Die Tests wurden von Infineon in enger Zusammenarbeit mit den OEMs, insbesondere VW, erfolgreich durchgeführt.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der Gesamtaufwand von Infineon wird als Verwendungsnachweis vom Infineon Controlling direkt an den PTJ berichtet.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie im Detail in den Berichten zu den einzelnen Ergebnissen ausgeführt ist, konnten viele der Arbeiten erst durch die Diskussion mit Vorhabenspartnern so fokussiert bzw. neu ausgerichtet werden, dass die berichteten Ergebnisse möglich waren.

Vor allem bei den Grundsatzuntersuchungen zur Gassensorik und auf dem Gebiet der Simulation, aber auch in anderen Bereichen erlaubte die Förderung eine Tiefe der wissenschaftlichen Untersuchung, wie sie ohne diese Unterstützung nur schwer realisierbar gewesen wäre. Ebenso erleichtert die Förderung die Realisierung und Optimierung von Demonstratoren, welche erst zu den - z.B. bei der zell-internen Sensorik - recht beachtlichen Ergebnissen geführt haben.

Ein wichtiges, wenn auch nicht durchwegs positives Ergebnis für Infineon war die Erkenntnis, dass für eine praktische Langzeit-Anwendung der zell-internen Sensorik die Passivierung der Sensoren und deren Packages (incl. der Anschlüsse) substantiell verbessert werden muss. Eine wichtige Voraussetzung für dieses Ergebnis war die Zusammenarbeit mit den verschiedenen Projektpartnern und der sich daraus ergebende intensive Datenaustausch, welcher im Alltag zwischen OEM und Tier 2, welcher Infineon nun einmal ist, eher selten der Fall ist.

Infineon ist überzeugt davon, dass die geleisteten Arbeiten und die verbrauchten Aufwände in SafeBatt durchaus in einem vernünftigen Verhältnis zu den Ergebnissen stehen. Schlussendlich war auch der relativ hohe Eigenkostenanteil von Infineon ein Garant dafür, dass keine Aufwände getätigt wurden, welche den in den Vorhabenszielen widerspiegelten Zielen von Infineon nicht zweckdienlich sind.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans

Alle Konsortialpartner von SafeBatt, so auch Infineon, werden die im Verbundvorhaben gewonnenen Erfahrungen und Technologien über einen langfristigen Zeitraum für die Entwicklung von Batteriesystemen und deren Komponenten nutzen. Hierbei ist eine Verwendung vor allem für Elektrofahrzeuge - auch mit Range Extendern - realistisch. Somit ist zusätzlich zum langfristig angelegten Nutzengewinn des Forschungsvorhabens ein Technologieschub für die nächsten Jahre gegeben.

Der in den Zwischenberichten fortgeschriebene Verwertungsplan von Infineon hat global betrachtet mit Abschluss von SafeBatt weder an Relevanz noch an Gültigkeit verloren. An einzelnen Punkten konnte eine bessere Situationsbewertung erreicht werden, wie im Detail im Erfolgskontrollbericht ausgeführt.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Auf dem für Infineon momentan als strategisch besonders interessant gesehenen Gebiet der zell-internen Sensorik sind zwar einzelne Veröffentlichungen der prinzipiellen Sinnhaftigkeit dieses Konzepts, aber derzeit keine konkreten Produkte von Wettbewerbern bekannt. Weiterhin erfolgt in seriennahen Anwendungen die Erfassung der Zelltemperatur als kritische Sicherheitsgröße auf der Oberfläche des Zellengehäuses bzw. in der Elektronik des Batterie- bzw. Modul-Managements. Die gerade bei großformatigen Batteriezellen auch in SafeBatt nachgewiesenen größeren Temperaturgradienten zwischen der Temperatur im Inneren der Zelle und der Oberflächentemperatur erfordern unnötig hohe "Sicherheitsabstände" bei der Definition einer für die Sicherheit kritischen Temperatur. Eine sensorische Erfassung der zell-internen Temperatur und vor allem die in SafeBatt nachgewiesene Erfassung des Zell-Innendrucks bringen für das Batterie-Monitoring bzw. für die Detektion sicherheitskritischer Zustände erhebliche Vorteile.

Analoges gilt für den Digitalen Batteriepass, zu dem mit interessierten, aber nicht am Vorhaben beteiligten Firmen und Instituten viele Diskussionen geführt werden konnten. Für LIB-Anwendungen in Mobiltelefonen wurden in den letzten Jahren vereinfachte Dokumentations- und Identifizierungssysteme entwickelt. Somit bleibt die kryptographisch auf aktuellem Stand der Technik befindliche, authentifizierbare Erfassung, Speicherung und Ausgabe von kritischen Daten der Zellen eines LIB-Moduls in Form des Digitalen Batteriepasses von SafeBatt in dieser Form ein bis dato nicht berichteter ganzheitlicher Ansatz.

Eine vor kurzer Zeit durchgeführte Literaturrecherche im Internet hat zwar viele Veröffentlichungen der direkten Konkurrenten TI, Freescale, STM, etc. auf dem Gebiet simulatorischer Verifikation von Schaltungen und von Embedded Software erbracht, zu dem in SafeBatt bearbeiteten Gebiet der Applikations-Simulation auf System-Ebene konnten aber keine Publikationen gefunden werden. Wir gehen daher davon aus, dass die hier entwickelte Methodik zur Simulation der Batteriesicherheit in der Gegenwart von Hardware-Fehlern ein Alleinstellungsmerkmal für Infineon darstellt.

Infineon plant, die Ergebnisse von SafeBatt auf dem Gebiet der Sensorik und des DBP in einem weiterführenden Projekt mit dem Titel "MiBZ - Multifunktionale intelligente



Batterie-Zelle" zu vertiefen und in einem beschränkten Anwenderkreis einer Umsetzung näher zu bringen.



II.6 Veröffentlichungen

Vorträge

- W. Maurer: "SafeBatt", Batterieforum 2013, Berlin, Jänner 2013
- W. Maurer: "SafeBatt: Aktive und passive Maßnahmen für eigensichere Lithium-Ionen Batterien", Tagung safeemobility, Karlsruhe, Juni 2013
- O. Karaca, J. Kirscher, L. Maurer, G. Pelz: "Towards Simulation Based Evaluation of Safety Goal Violations in Automotive Systems", IEEE Forum on specification & Design Languages, München, September 2014; erhielt den "Best Paper Award"
- W. Maurer, M. Rose, D. Hoffmann, A. Rheinfeld: "Monitoring and improving the safety behavior of lithium-ion battery cells by advanced sensor-, test-, and simulation-capabilities", Advanced Automotive Batteries Conference Europe 2015, Mainz, Jan. 2015
- W. Maurer: "Sicherheit von Batteriezellen - aktive und passive Maßnahmen: Vorhaben SafeBatt", BMBF i-WING 2015, Dresden, April 2015
- Z. Zhang, J. Kirscher, R. Kokozinski, G. Pelz: „Simulative Analysis Methods deployed to Optimize Automotive Battery Management“, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Montreal, Oktober 2015

Poster

- W. Maurer: "Leuchtturmprojekt SafeBatt", Internationale Konferenz der Bundesregierung "Elektromobilität bewegt weltweit", Berlin, Mai 2013
- W. Maurer: "Aktive und passive Maßnahmen für eigensichere Lithium-Ionen Batterien", Workshop Elektromobilität des BMBF, Bonn, Dez. 2013
- W. Maurer: "SafeBatt", Batterieforum Deutschland, Berlin, Jänner 2014
- M. Rose, W. Maurer: "Sensor Technologies for Lithium-Ion Batteries: Update on New Developments by SafeBatt", Kraftwerk Batterie 2014, Münster, März 2014

Buchbeitrag

- JP. Schmidt, S. Dandl, AC. Gentshev, K. Elian, M. Rose: Kapitel "Integrierte Zell-Sensorik in Lithium-Ionen-Akkus für Elektro- und Hybridfahrzeuge" in "Automobil-Sensorik", Editor T. Tille, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-662-48943-7 (2016)

Infineon-interne Vorträge & Poster

- Poster "Quantification of functional safety of automotive smart power ICs", Infineon Innoweek13, Neubiberg, Nov. 2013
- Poster "Failure and effect simulation in analog-mixed-signal systems with emphasis on functional safety", Infineon Innoweek14, Neubiberg, Nov. 2014



-
- Vortrag "Towards Simulation Based Evaluation of Safety Goal Violations in Automotive Systems" Infineon Modelling & Simulation Community, Neubiberg, Dez. 2014
 - Vortrag "Fault simulation required from ISO26262", Infineon Modelling & Simulation Community, Neubiberg, Dez. 2014
 - Poster "Simulating automotive safety", Infineon Innoweek15, Neubiberg, Nov.2015