

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Lithium-Ionen-Batterien für Hybridnutzfahrzeuge: Entwicklung von Produktions- & Testverfahren sowie Aufbau des Demonstrators & Validierung



Abschlussbericht des Verbundprojekts

FUEL
future
goes
electric



September 2011

BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“

Lithium-Ionen-Batterien für Hybridnutzfahrzeuge: Entwicklung von Produktions- & Testverfahren sowie Aufbau des Demonstrators & Validierung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Der Bericht stellt die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt vor. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Förderkennzeichen:

02PO2630	Continental AG
02PO2631	ZF Friedrichshafen AG
02PO2632	ADS-tec GmbH

Projektlaufzeit:

01.10.2009 - 30.06.2011

Autoren:

Continental	Stefan Bonnekessel, Dipl.-Ing. Simon Abraham, Dipl.-Ing. Alfred Nimpsch, Dipl.-Ing. Steffen Schuberth, Dipl.-Ing. Alfred Höß, Dr.-Ing.
ZF Friedrichshafen	Maximilian Wagner, Dipl.-Ing. Klaus Egger, Dipl.-Ing.
Ads-tec GmbH	Andreas Greif, Dipl.-Ing. Thomas Dittert, Dipl.-Ing.

Zusammenfassung und Ausblick

Insbesondere im innerstädtischen Stopp & Go-Betrieb zeigt die permanente Belastung von Hybridantrieben bei Nutzfahrzeugen wesentlich höhere Effizienz (absolut geringerer Dieselverbrauch) als beim PKW. Die Vorteile für die Betreiber von Hybrid-Nutzfahrzeugen und die Umwelt sind also deutlich höher als im PKW-Bereich. Hierfür wurden im Rahmen diverser Vorentwicklungsprojekte bei ZF und Continental die Anforderungen an die prinzipielle Funktionsweise dieser Systeme ermittelt.

Energiespeichersysteme für Hybrid-Nutzfahrzeuganwendungen unterscheiden sich von den gängigen PKW-Energiespeichern primär in den erheblich unterschiedlichen Anforderungen in Leistungs- und Belastungsspektrum. Diese unterschiedlichen Anforderungen betreffen primär die Leistungsklasse, die Spannungslage, die Anzahl an Belastungszyklen, die siebenfachen Vibrationsanforderungen und die Lebensdauer der zu fertigenden Produkte. Batterie-Einsätze im externen Fahrzeuganbau erfordern zusätzliche Vorkehrungen an das Energiespeichersystem, um die deutlich verschärften Umweltbedingungen zu verkraften.

Bei Projektstart von FUEL waren keine für eine spätere Serienfertigung von Nutzfahrzeug-Energiespeichern geeigneten Produktionstechniken verfügbar. Gesamtziel des Projektes FUEL war daher die Entwicklung neuartiger Produktionstechnik zur Herstellung von mechanischen und elektromechanischen Baugruppen mit technischen Funktionen sowie spezifischen Produktions- und Testverfahren für den Aufbau von Baugruppen und Demonstratoren für Li-Ionen-Energiespeichersysteme. Der Schwerpunkt lag vor allem bei der Entwicklung der Produktionstechnik für die Anwendung eines neuen Zellformates (so genannte SoftPacks), speziellen Baugruppen und den Testverfahren für die Erprobung von Produktionstechnologieträgern bzw. Demonstratoren entsprechend den Anforderungen von Hybrid-Nutzfahrzeugen.

Zur Bearbeitung der Themen wurde das Projekt FUEL in drei Teilprojekte gegliedert: „Baugruppen u. Funktionsentwicklung“, „Produktionstechnik“ und „Test und Validierung“. Die in den drei Teilprojekten erarbeiteten Methoden bilden eine breite technische Orientierung, die in der vor FUEL durchgeführten Machbarkeitsphase in dieser Form nicht möglich war. Im Einzelnen wurden in FUEL folgende Ergebnisse erzielt:

„Baugruppen und Funktionsentwicklung für Energiespeicher“

- Innerhalb von FUEL konnte eine breite Entwicklungsgrundlage für die Nutzfahrzeughybridanwendung erarbeitet werden. Ein wesentliches Ergebnis ist die Abstimmung und Erstellung eines umfangreichen Lastenheftes zum Energiespeicher, das neben mechanischen, energetischen auch die Aspekte der Funktionalen Sicherheit vollständig abbildet.
- Nach diesem Lastenheft konnte eine neue Generation von Versuchs- / Demonstrationsenergiespeichern entwickelt und aufgebaut werden. Diese Energiespeicher bilden die Grundlage, um wesentliche Detailzusammenhänge der Hybridfunktionalitäten innerhalb von Simulationen und Tests herauszuarbeiten und von diesen Erfahrungen zu lernen.

- In einigen Punkten besteht bei Abschluss von FUEL weiterer Klärungsbedarf, insbesondere im Hinblick auf die Kühlung von Energiespeichern für Nutzfahrzeuganwendungen, dessen positive Lösung wesentlich für eine wirtschaftliche Verwertung ist.

„Produktionstechnik“

- Innerhalb von FUEL konnte für die Kernprozesse Bi-Pack-Fertigung und Zellkontaktierung je ein neuartiges Verfahren entwickelt und ein halbautomatischer Prozessprüfstand konstruiert und aufgebaut werden. Mit den anschließenden Versuchen mit den Prozessprüfständen konnte die Beherrschbarkeit dieser Prozesse durch die Verbundpartner prinzipiell nachgewiesen werden. Dabei konnten die Taktzeiten im Vergleich zum bisher bekannten Stand der Technik markant verkürzt werden.
- Der im Konsortium erarbeitete Ansatz des Rollnahtschweißens ist für die Sonderanwendung der Zellkontaktierung nach aktuellem Wissenstand ein Novum in der Montagetechnik.
- Allerdings hat sich bei den Versuchsreihen gezeigt, dass sich Nebenprozesse wie Teilezuführung, Vorbereitung und Handling der Li-Ionen Pouchzellen nur sehr aufwändig beherrschbar sind. Hier besteht auch nach FUEL Bedarf an Forschung und Entwicklung.

„Test und Erprobung“

- Vor dem Hintergrund einer in der Projektzeit von FUEL nicht erzielten vollständigen technologischen Reife der Energiespeicher- und Verfahrenstechnik wurde die geplante breite Validierung und Erprobung nicht vollständig durchgeführt. Es wurden hingegen verstärkt Prinzipversuche und erste Lebensdauer- und Missbrauchstests am Energiespeicher und dessen Einzelbaugruppen durchgeführt worden sowie mehrfach wiederholte Fertigungsversuche bei den beteiligten Partnern und deren Unterlieferanten.

Insgesamt wurden in FUEL signifikante Fortschritte auf allen relevanten Themengebieten erzielt, allerdings besteht infolge der Komplexität vor allem bei der Hybridanwendung des Stadtbuseinsatzes noch Klärungsbedarf. Das Konsortium geht deswegen davon aus, dass auch nach erfolgreichem Abschluss von FUEL ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Energiespeichern für die Anwendung in Hybrid-Nutzfahrzeugen besteht.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	17
1.1	Motivation und Problemstellung	18
1.2	Gesamtziel des Forschungsverbundes	21
1.2.1	Gesamtzielsetzung.....	21
1.2.2	Projektstruktur – 3 Themenbereiche	22
1.3	Zielsetzung der beteiligten Verbundpartner	23
1.3.1	Zielsetzung von Continental AG (Continental, TAEM).....	23
1.3.2	Zielsetzung von ADS-tec GmbH (ads-tec).....	24
1.3.3	Zielsetzung von ZF Friedrichshafen AG (ZF).....	25
2	Voraussetzungen der Projektdurchführung	26
2.1	Continental AG (TAEM, Continental)	26
2.1.1	Unternehmensprofil und strategische Kooperationen.....	26
2.1.2	Vorarbeiten zum Projekt.....	30
2.2	ADS-tec GmbH (ads-tec).....	31
2.2.1	Unternehmensprofil und Vorarbeiten	31
2.2.2	Forschungspartner	35
2.3	ZF Friedrichshafen AG (ZF)	35
2.3.1	Unternehmensprofil.....	35
2.3.2	Vorarbeiten	37
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	38
3.1	Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektbeginn.....	38
3.1.1	Nutzfahrzeuganwendung und Li-Ionen Batteriezellen-Konzept.....	38
3.1.2	Relevante Bauteile und Baugruppen	41
3.1.2.1	Mechanische Bauteile.....	42
3.1.2.2	900V Steuerungselektronik.....	43
3.1.2.3	Zell-Design und Batteriemodul	46
3.1.2.4	Thermomanagement und Kühlsystem.....	49
3.1.2.5	Software-Architektur und Funktionalität.....	50
3.1.2.6	Systemintegration und Speicherverwaltung	51
3.1.2.7	Service-Konzept.....	51
3.1.3	Produktionstechnik.....	52
3.1.3.1	Montageverfahren zur Herstellung der Bi-Pack Zellverbunde.....	52
3.1.3.2	Verbindung der Zellelektroden (Hauptstrompfad)	56
3.1.3.3	Montage der Zellmodule	60
3.1.3.4	Flexboard-Montage.....	60
3.1.4	Test- und Validierungsverfahren für Produktionstechniken und Baugruppen	61
3.1.5	Patentsituation zu Energiespeichern für Nutzfahrzeug-Anwendungen	61
3.2	Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektende	63
3.2.1	Zusammenfassung des technischen Standes bei Projektende	63
3.2.2	Fortsetzung der Arbeiten nach Projektende FUEL	65
4	Planung und Ablauf des Vorhabens	66
4.1	Projektplanung.....	66
4.1.1	Projektleitung	66
4.1.2	Meilensteinplanung	67
4.1.3	Zeit- und Meilensteinplanung.....	67

4.2	Abweichungen im Projektablauf	71
4.2.1	Notwendigkeit eines Redesigns des Energiespeicherkonzepts	71
4.2.2	Schwächen Energiespeicherkonzept BF2 (Projektziel)	72
4.2.2.1	Batteriemodul.....	72
4.2.2.2	HV-Anschlüsse	73
4.2.3	Energiespeicherkonzept BF3 (Redesign)	73
5	Erzielte Ergebnisse	77
5.1	NKW Speichersystem: Komponenten	77
5.1.1	Mechanische Bauteile	77
5.1.1.1	Schlüsselspezifikationen.....	77
5.1.1.2	Thermische und mechanische Simulationen	78
5.1.1.3	Fertigungsoptimierte Auslegung von Batteriegehäuse und Tragrahmen in Leichtbauweise	79
5.1.1.4	Auslegung von mechanischen Schwingungsdämpfern	82
5.1.1.5	Luftentfeuchtungs- & regeneratives Trocknungskonzept: Konzeption und Auslegung	85
5.1.2	900V Elektronik, Elektromechanik-Bauteile und Systemarchitektur	86
5.1.2.1	Entwicklung der Systemarchitektur.....	87
5.1.2.2	900V Steuerelektronik – Master Control Board (MCB).....	90
5.1.2.3	900V Steuerelektronik – Cell Supervising Circuitry (CSC, CSE)	95
5.1.2.4	Ausarbeitung und Erprobung von toolunterstütztem Kabelbaumdesign mit Fokus auf simultaner Entwicklung von Montageverfahren	98
5.1.2.5	Entwicklung einer Strom-Messschaltung (CSM) für die Hochstroman- wendung	100
5.1.3	Li-Ionen Zelldesign	104
5.1.3.1	Abstimmung der Bauteilgeometrien, Werkstoffe und Toleranzen	104
5.1.3.2	Prüfspezifikation und Lebensdaueranalysen	105
5.1.4	Thermalhaushalt und Komponenten	109
5.1.4.1	Externes Kühlsystem	110
5.1.4.2	Abfuhr der Verlustwärme aus der Zelle zum speicherinternen Flüssig- keitskühler.....	120
5.1.5	Software-Architektur.....	122
5.1.6	Systemintegration Speicherverschaltung.....	128
5.1.6.1	Normal- und Sicherheitsfunktionen	129
5.1.6.2	Kommunikationsschnittstelle	133
5.1.6.3	Diagnosekonzept	134
5.1.6.4	Applikationsdatenkonzept.....	135
5.1.6.5	Statistikdaten	136
5.1.6.6	Fehler und Fehlerreaktionen.....	137
5.1.6.7	Sonderfunktionen.....	138
5.1.6.8	Leistungsvorhersage und Lebensdauer	139
5.1.6.9	Integration Batterie-Management-System (BMS) in Hardware-in-the- Loop Prüfstand (HiL).....	141
5.1.6.10	Simulation von Fahrzyklen.....	144
5.1.7	Service Konzept	146
5.2	NKW Speichersystem: Produktionstechnik	152
5.2.1	Montagekonzept Bi-Pack	152
5.2.1.1	Ausarbeitung, Bewertung und Vergleich von Montagekonzepten für Bi- Pack-Zellverbunde	153

5.2.1.2	Definition des Bi-Pack-Fügeprozesses.....	160
5.2.1.3	Entwurf, Konstruktion & Aufbau eines halbautomatischen Fertigungsab- laufs „Bi-Pack Montage“	163
5.2.2	Zellkontaktierungskonzept	166
5.2.2.1	Analyse der Verbindungstechniken zur Ableiterkontaktierung	167
5.2.2.2	Definition des Ultraschallschweißverfahrens: Festlegung der Prozess- parameter und Zugkraftversuche	176
5.2.2.3	Weitere Versuche zur Validierung des Schweißfahrens	181
5.2.2.4	Werkzeugoptimierung.....	185
5.2.2.5	Definition der Prüfstrategie	186
5.2.2.6	Konstruktion eines Prozessprüfstands	188
5.2.3	Produktionskonzept Zellmodule	189
5.2.3.1	Zellmodul-Montage	191
5.2.3.2	Prozessablauf	195
5.2.4	Produktionskonzept Flexboard.....	197
5.2.4.1	Konzeptentwicklung.....	199
5.2.4.2	Vorversuche zur Validierung der Schweißverbindung bei der Flexboard- Montage	201
5.3	Produktion: Validierung & Systemdemonstration	204
5.3.1	Validierung Bi-Pack Montage.....	205
5.3.2	Validierung Zell-Modulmontage	221
5.3.3	Validierung Flexboard-Montage.....	237
5.3.4	Validierung thermo-mechanische Komponenten	238
5.3.5	Validierung elektro-mechanische Komponenten	238
5.3.6	Validierung Zelldesign.....	244
5.3.7	Validierung Kühlsystem.....	251
5.3.8	Validierung Software	252
5.3.9	Demonstration: Speicher-Gesamtsystem	253
5.3.9.1	Definition von Testverfahren für stationäre und mobile Prüfstände ...	254
5.3.9.2	Stationäre Prüfstandserprobung der Demonstratoren für Stadtbusse	256
5.3.9.3	Mobile Prüfstandserprobung der Demonstratoren für schwere Stadt- busse	263
5.3.9.4	Mobile Prüfstandserprobung der Demonstratoren für leichte Stadtbusse	265
5.3.9.5	Mobile Prüfstandserprobung der Demonstratoren für Verteiler LKWs.	266
5.3.9.6	Stationäre Prüfstandserprobung der Demonstratoren zur Prüfung des Ausfallverhaltens, Zusammenspiel mit anderen Komponenten	270
5.3.9.7	Umwelttests	272
5.3.9.8	Abuse-Tests.....	275
6	Ausblick auf die Verwertungsplanung	278
7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	279
8	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	282
9	Veröffentlichungen und Vorträge	283
9.1	Berichte, Vorträge und Veröffentlichungen	284
9.2	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	284
10	Referenzen	286
11	Abkürzungen.....	287
12	Glossar.....	289

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erwartete Entwicklung des Automobilmarktes im Übergang von konventionellen zu Hybrid- und Elektrofahrzeugen	17
Abbildung 2: Geplantes Li-Ionen Energiespeichermodule für Nutzfahrzeug-Hybridanwendungen	19
Abbildung 3: Komponenten des FUEL-Energiespeichers (dargestellt ist der BF2 Stand zum EFL2-60 Demonstrator für den 7,5to Verteiler-LKW als Ergebnis der Entwicklung und Erprobung im Rahmen des Projekts FUEL)	20
Abbildung 4: Schnittstellen des FUEL EFL2-60 Demonstrators (Ergebnis der Entwicklung und Erprobung im Rahmen von FUEL)	21
Abbildung 5: Projektstruktur von FUEL	22
Abbildung 6: Conti-Eigenentwicklung der 5,5Ah High-Power Zelle für Hybridanwendungen	29
Abbildung 7: Verteilte Kompetenzen von ZF und Continental im Bereich Hybridantriebstechnik	29
Abbildung 8: TAEM Verbundprojekte LIONHEART und HYSYS	31
Abbildung 9: ads-tec Smart Batterie aus 4 Lithium Ionen Rundzellen, Fahrzeugdiagnosegerät mit zwei Smart Batteries	34
Abbildung 10: Smart Batterie aus Lithium Ionen Flachzellen, ads-tec Compact 3 Serie	34
Abbildung 11: ads-tec Prüfstand für Lithium Ionen Batterien	34
Abbildung 12: ZF Elektroantrieb aus den 90er Jahren	36
Abbildung 13: Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen	40
Abbildung 14: Hydroforming - Matrize nach dem Umformprozess (die Geometrie der Außenkannte zeigt den Verlauf des nachgeflossenen Werkstoffs) und Analyse des homogenen Spannungsverlaufs im Bauteil	43
Abbildung 15: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Energiespeichers	44
Abbildung 16: Darstellung der Montagereihenfolge: von der Einzelzelle zum Energiespeicher	53
Abbildung 17: Äußere Zellgeometrie: Kontaktierungs- & Anbindungselemente	54
Abbildung 18: Prinzipdarstellung Ultraschallschweißen, Anordnung Sonotrode u. Amboss	58
Abbildung 19: Nahaufnahme einer kontinuierlichen Ultraschall-Schweißung bei gleichen Materialien	58
Abbildung 20: Klemmverbindung der Fa. Hoppecke	59
Abbildung 21: Gehäusevariante klassischer Batterien (Kunststoff mit u. ohne Verguss, Teilverguss)	60
Abbildung 22: FUEL Projektstruktur	68
Abbildung 23: Strukturierung der Arbeitspakete mit Bezug zum Montageablauf eines Energiespeichers	69
Abbildung 24: Produktionskonzept Stand BF2	72
Abbildung 25: Fertigteil Zellmodul für BF2-Speicher	73
Abbildung 26: HV-Anschlüsse BF2	73
Abbildung 27: Stack-Anordnung der Bi-Pack-Zellen (Stand BF3)	74
Abbildung 28: Variantenvergleich für BF3: HV Stecker – HV Kabeldurchführung	75
Abbildung 29: Neuentwicklung HV-Kabeldurchführung für BF3	75
Abbildung 30: Verschaltungskonzept für den Bus-Speicher (Master – Slave unter Berücksichtigung der HV Verbindungstechnik)	75
Abbildung 31: Gewichtete Auswertung der Tragarmvarianten	76
Abbildung 32: Explosionsdarstellung Gehäuse des FUEL-Energiespeichers	80
Abbildung 33 Berechnung der Materialdicke der Gehäuseoberschale	80
Abbildung 34: Ergebnisse der Mold-Flow-Simulation am Beispiel des Elektromechanikmoduls	82
Abbildung 35: Halterkonstruktion inkl. Schwingungsdämpfer (MO-Lager) beim BF2-Demonstrator	84
Abbildung 36: Vibrationsprofil gem. ISO 16750-3, Leistungsdichte über der Frequenz	84
Abbildung 37: Ablaufelement im Gehäuseboden	86

Abbildung 38: Anforderungen an eine HV Batterie	87
Abbildung 39: MCB für FUEL Demonstratoren	91
Abbildung 40: MCB Testadaption – EMV Antennenmessung.....	92
Abbildung 41: Ansicht der 36-zelligen Anordnung	96
Abbildung 42: Ansicht der Testadaption.....	96
Abbildung 43: Exemplarische Darstellung der Messgenauigkeit der Zellspannung	97
Abbildung 44: Vereinfachung des FUEL Kabelbaums im Zuge des Redesigns zum BF3	99
Abbildung 45: Verdeutlichung der wesentliche Einzelmaßnahmen am Kabelbaum.....	99
Abbildung 46: Stromsensor FUEL Demonstratoren (ohne Deckel)	102
Abbildung 47: Ergebnisse einer EMV-Untersuchung (radiated emissions)	103
Abbildung 48: Alterungseffekte infolge Lade-/Entladezyklen (60% SOC, 40°C)	106
Abbildung 49: Auswirkungen der kalendarischen Dauer auf die Kapazität der Zellen (bei 100% SOC, 50°C)	106
Abbildung 50: Unterschiede der Lebensdauersimulation bei verschiedenen Datenbasen (Datenerhebung über Fa. EVA).....	107
Abbildung 51 Relative Häufigkeitsverteilung von Temperaturen an ausgewählten Standorten	108
Abbildung 52: Mögliches Endergebnis von Simulationen unter Referenzanwendungsbedingungen (Chiller = Einsatz eines zusätzlichen Niedertemperaturkühlers).....	108
Abbildung 53: Kühlungsvarianten im Fahrzeug	111
Abbildung 54: Kombinationsmöglichkeiten (Auswahl)	112
Abbildung 55: Kühlsystem Verteiler Lkw	112
Abbildung 56: Kühlsystem Stadtbuss mit Heizelement.....	113
Abbildung 57: Kühlsystem Stadtbuss mit autarker Heizung über Fahrzeugkreislauf	113
Abbildung 58: Leistungsaufnahme Kühlsystem mit Kältebaugruppe	115
Abbildung 59: Schematische Darstellung der Steuerung des Kühlsystems	115
Abbildung 60: Funktionsweise 1-Kreis Kühlsystem	116
Abbildung 61: Messaufbau zur Vermessung des batterieinternen Kühlsystems	117
Abbildung 62: Druckverlust über Volumenstrom bei den BF2-120 Demonstratoren	118
Abbildung 63: Kühlsystem Kompaktanlage ohne Kälteanlage für Dachaufbau.....	119
Abbildung 64: Kühlsystem Kompaktanlage mit Kälteanlage für Dachaufbau	119
Abbildung 65: Kühlsystem Modulbau Pumpenbaugruppe	119
Abbildung 66: Kühlsystem Modulbau Kühlerbaugruppe	120
Abbildung 67: Kühlsystem Modulbau Kälteanlage.....	120
Abbildung 68: Ergebnisse der thermischen Simulation.....	121
Abbildung 69: Exemplarische Bewertung verschiedener Kühlfinnen-Varianten	121
Abbildung 70: Simulation der Temperaturverteilung über die Kühlplatten der drei Zellmodule innerhalb des FUEL Energiespeichers.....	122
Abbildung 71: Speicherverschaltung Parallel / Seriell.....	123
Abbildung 72: PowerUpSequenz des Demonstrators im HV-System.....	129
Abbildung 73: Zustandsdiagramm.....	130
Abbildung 74: PowerDownSequenz des Demonstrators im HV-System	131
Abbildung 75: Dynamikbegrenzung und Abregelung	131
Abbildung 76: Fehlerreaktionssequenz Interlock-Fehler	133
Abbildung 77: CAN Topologie	134
Abbildung 78: Diagnose bei den 120 kW Demonstratoren	135
Abbildung 79: Applikationsdatenkonzept	136
Abbildung 80: Konzept Onlinediagnose	138
Abbildung 81: Leistungs- und Momentenprognose.....	140

Abbildung 82: Effekt der Ladungsträgerverarmung	140
Abbildung 83: Prinzipdarstellung zur Regelung der Lebensdauer	141
Abbildung 84: Vernetzung Steuergeräte im HiL	142
Abbildung 85: HiL Integration Batteriesteuergerät	143
Abbildung 86: HiL Prüfstand.....	144
Abbildung 87: Strom-, Spannungs- und Ladezustandsverlauf aus Simulationen von Fahrzyklen	145
Abbildung 88: Erwartete Lebensdauer der Batterie	145
Abbildung 89: Übersicht zu ZF Schulungen zum sicheren Umgang mit Hybridsystemen	148
Abbildung 90: Zellmodule und Tragrahmen des BF2-Demonstrators.....	149
Abbildung 91: Elektromechanikmodul des BF2-Demonstrators.....	150
Abbildung 92: Montagekonzepte für Bi-Pack Zellverbunde	153
Abbildung 93: FTIR Charakterisierung der Zellfolie	156
Abbildung 94: Ergebnisse DDK der Zellfolie	156
Abbildung 95: Vergleich der Zugscherfestigkeiten (ads-tec /IFS)	157
Abbildung 96: Vergleich der Versagenstemperaturen (ads-tec /IFS)	158
Abbildung 97: Vergleich der Schälfestigkeiten (ads-tec /IFS)	158
Abbildung 98: Anlagenkonzept zur Bi-Pack Fertigung	159
Abbildung 99: Detail Rundtaktisch mit Bandklebeautomat	159
Abbildung 100: Auszug aus dem Flow Chart zum Prozess Bi-Pack fügen – Abfolge der Bi-Pack Montage im Projekt FUEL.....	161
Abbildung 101: Einflussgrößen auf die Klebeverbindung	162
Abbildung 102: Beispiel für eine DOE zur Ermittlung des Prozessparametereinflusses	162
Abbildung 103: Zur Verifikation der Bi-Pack Montage	162
Abbildung 104: Beispielhaftes Layout für den Prozess Bi-Pack Montage	164
Abbildung 105: CAD-Modell Prozessprüfstand Kleben.....	166
Abbildung 106: In FUEL betrachtete Verbindungstechniken für die Zelltabs.....	167
Abbildung 107: Widerstandsmessungen Schweißverbindung	170
Abbildung 108: Schliffbild Clinchen (ads-tec /IFS)	170
Abbildung 109: Schliffbilder Laserlöten (ads-tec /IFS)	170
Abbildung 110: Schliffbild Laserschweißen.....	171
Abbildung 111: Schliffbild Ultraschallschweißen	171
Abbildung 112: Bruchbilder Zugversuche (Clinchen, Löten, Laserschweißen, Ultraschallschweißen)	171
Abbildung 113: Vergleich der Zugfestigkeiten (ads-tec/IFS).....	172
Abbildung 114: Schwingungsrichtungen beim US-Schweißen (grün = Rollnaht)	174
Abbildung 115: US-Schweißen – Gegenüberstellung von Linien- und Rollnahtschweißverfahren	176
Abbildung 116: Vorrichtung zum Fügen	177
Abbildung 117: Zugversuch (statische Versuchsplanung, DOE)	177
Abbildung 118: Haupteffektdiagramme für Zugfestigkeit der Ableiter (dargestellt sind jeweils Datenmittelwerte).....	179
Abbildung 119: Wahrscheinlichkeitsnetz von Zugkraft (Normalverteilung der Zugkraftwerte)	179
Abbildung 120: Prozessfähigkeit der Schweißverbindung (Zugkraftmessung).....	180
Abbildung 121: Stromtragfähigkeit der Verbindungspartner	181
Abbildung 122: Aufnahmen metallographischer Analysen.....	182
Abbildung 123: Zur Durchführung der Schälprüfung für den Festigkeitsnachweis der Schweißverbindung	183
Abbildung 124: Ergebnisse der Schälprüfung für unterschiedliche Schweißparameter	183
Abbildung 125: Ergebnis der Reproduzierbarkeitsuntersuchungen am Batterieblock.....	184

Abbildung 126: Werkzeugoptimierung – schmaler Amboss.....	185
Abbildung 127: Werkzeugoptimierung – Sonotrode.....	185
Abbildung 128: Ergebnisse der Reproduzierbarkeitsuntersuchungen nach Werkzeugoptimierung ...	186
Abbildung 129: Beispiele für die drei Bruchklassen	187
Abbildung 130: Boxplot der Festigkeit abhängig von der Bruchklasse	187
Abbildung 131: CAD-Modell Prozessprüfstand Zellkontaktierung	189
Abbildung 132: Einflussfaktoren Zellmodulmontage	190
Abbildung 133: Anforderungen an den Ableiterschutz (links: Klammerlösung)	191
Abbildung 134: Gesamlayout mit Kleberoboter.....	193
Abbildung 135: Gesamlayout mit Rundtakttisch	193
Abbildung 136: 3D-Ansicht Gesamlayout mit Kleberoboter	194
Abbildung 137: Detail: vertikales Bestücken	194
Abbildung 138: Detail-Darstellung Bestücken auf Rundtakttisch.....	195
Abbildung 139: Detail-Darstellung Werkstückträger Bestücken.....	195
Abbildung 140: Prozessabläufe zur Zellmodulmontage – Prozessschritte „Bi-Pack Stecken“ und „Übergabe zum Biegen/Schweißen“	196
Abbildung 141: Möglichkeit der manuellen Entnahme des Ableiterschutzes mittels Kipp-Dreh- Einrichtung.	196
Abbildung 142: Demonstrator „Steckplatz“.....	197
Abbildung 143: Ableiter mit angeschweißter Sensorleitung.....	198
Abbildung 144: Komplettes Zellmodul.....	199
Abbildung 145: Cu-Fähnchen mit S-Schlag zur Positionierung der Sense-Leitung.....	200
Abbildung 146: Positionierung und Fixierung der Cu-Fähnchen im CSE	200
Abbildung 147: Positionierung CSE- und Zellmodulgehäuse	201
Abbildung 148: Schweißversuche mit Zelleiter und Sense-Leitung.....	202
Abbildung 149: Festigkeitsuntersuchung der Schweißverbindung (Zugprüfmaschine).....	202
Abbildung 150: Festigkeitsuntersuchung der Schweißverbindung – Ergebnis der Zugprüfung	202
Abbildung 151: Grafische Darstellung der Zugversuche.....	203
Abbildung 152: Prozessfähigkeitsuntersuchung Ultraschall-Schweißen	203
Abbildung 153: Prozessfähigkeitsuntersuchung zur max. Zugkraft F_{max}	204
Abbildung 154: Prüfverfahren zur Bi-Pack Montage	206
Abbildung 155: Prüfverfahren Ultraschallprüfung	207
Abbildung 156: Versuchsaufbau zur Scher- / Schälfestigkeitsmessung der Klebeverbindung	207
Abbildung 157: Einsatz einer Druckmessfolie für nicht-zerstörende Überwachung der Prozesskräfte	208
Abbildung 158: Innenradius Kühlblech.....	209
Abbildung 159: Spalt Klebefilm bei verschiedenen Radien.....	210
Abbildung 160: Fehlerbild – abgelöstes Klebeepad bei Entfernung des Liners.....	212
Abbildung 161: Wet Out bei verschiedenen Unterlagen	214
Abbildung 162: Wet-out Fläche nach der ersten Optimierung	214
Abbildung 163: Verbesserter Prozessprüfstand Kleben	216
Abbildung 164: Optimal beklebtes Kühlblech, frei von Luftblasen	217
Abbildung 165: Gesamtansicht Prozessprüfstand	218
Abbildung 166: Schubladen zum Einlegen der Li-Ionen-Zellen	218
Abbildung 167: Scannen des DMC der Zellen vor dem Einlegen	219
Abbildung 168: Portal zum Kühlblechhandling / Pressen	219
Abbildung 169: Auszug aus den Prozessfähigkeitsuntersuchungen zur Y-Lage (links) und X-Lage (rechts).....	220

Abbildung 170: Demonstrator „Zellmodulmontage“	221
Abbildung 171: Flowchart zum Prozessablauf „Li-Ionen-Zellen prüfen“	223
Abbildung 172: „Demonstrator“ zur Verifikation der Lithium-Ionen-Einzelzellen (oben: 3D Planung, unten Realisierung in FUEL).....	224
Abbildung 173: Zelle Scannen	226
Abbildung 174: Daten Scannen.....	226
Abbildung 175: Auszug aus einer Reporting-Datei (Traceability auf Einzelteilbasis)	227
Abbildung 176: File-Server und Reporting System zur Speicherung aller Stamm- und Prozessdaten	228
Abbildung 177: Positionierung der Zelleiter in der Ausrichtstation	229
Abbildung 178: Optische Vermessung der Zelle	230
Abbildung 179: Ergebnis der mechanischen Prüfung (Kamera)	230
Abbildung 180: Ergebnis der Messmittelfähigkeits-Untersuchung.....	231
Abbildung 181: Zelleiter kontaktieren, Überprüfung el. Größen	231
Abbildung 182: Ergebnis der elektrischen Prüfung	232
Abbildung 183: Demonstrationsanlage zum Test der Zellen	233
Abbildung 184: Automatisierung der Prüfung der Zellen	233
Abbildung 185: Dummy für Schweißversuche	234
Abbildung 186: Schweißstand zur Zellmodulherstellung	235
Abbildung 187: Zellmodul mit gebogenen Zelleitern vor und nach der US-Rollnahtverschweißung im Schweißstand.....	235
Abbildung 188: Zellmodul im Werkstückträger	236
Abbildung 189: Hand-Stackvorrichtung	237
Abbildung 190: Messschaltung zum Test der Schütze	239
Abbildung 191: Explodiertes Schütz nach mehrmaligem Schalten unter Last (450V/2000A)	240
Abbildung 192: Zur Anordnung der Prüfstücke auf der Adapterplatte und Definition der Prüfaxen x, y, z	241
Abbildung 193: Komplettes E-Modul (Elektro-Mechanik-Modul).....	242
Abbildung 194: Wärmeverteilung im E-Modul.....	242
Abbildung 195: ZF-Lebensdauertest der Vorladeeinheit.....	243
Abbildung 196: Vergleich des Kaltstartverhaltens von Zellen mit unterschiedlichen Elektrolyten	245
Abbildung 197: Ablaufdiagramm kalendarische Alterung	246
Abbildung 198: Vergleich vom kalendarischen Alterungsverhalten von Zellen mit unterschiedlichen Elektrolyten	246
Abbildung 199: Entladeverlauf von Versuchszellen mit verschiedenen Elektrolytvarianten	248
Abbildung 200: Leistungsverlauf (Lade- und Entladeleistung) der Zelle mit Elektrolyt Nr. 3	248
Abbildung 201: Ermittlung des Arbeitspunktes (Zelle mit Elektrolyt Nr. 3).....	249
Abbildung 202: Innenwiderstandsverlauf in Abhängigkeit vom Ladezustand und Temperatur (Zelle mit Elektrolyt Nr. 3)	250
Abbildung 203: Vergleich der zyklischen Alterung der vier Elektrolytvarinaten bei 1000 Zyklen mit 100% Entladetiefe.....	250
Abbildung 204: Messtechnik am stationären Prüfstand	256
Abbildung 205: BF1-120 Demonstrator am stationären Prüfstand	257
Abbildung 206: Maximale Ladeströme über Zelltemperatur (4,2V / Zelle).....	258
Abbildung 207: Maximaler Dauerstrom (Derating/Beharrung ohne Temperierung der Umgebungsluft)	259
Abbildung 208: Innenwiderstandsverlauf als Funktion der Temperatur pro Zelle des BF1-120 Demonstrators	260

Abbildung 209: Eigenerwärmung BF1-120 Demonstrator (Erwärmung mit I_{max} zwischen 40% und 60 % SOC)	261
Abbildung 210: Überstrom am stationären Prüfstand bei der BF1-120 Demonstrator Erprobung	262
Abbildung 211: Verlauf Zelltemperaturen BF2-120 Demonstrator	263
Abbildung 212: Mobiler Prüfstand zur Erprobung der BF2-120 Demonstratoren	264
Abbildung 213: Umbau des mobilen Prüfstands und Integration der BF2-120 Demonstratoren.....	264
Abbildung 214: Ursache des Kurzschlusses	264
Abbildung 215: Kurzschlusspfad	265
Abbildung 216: Anordnung Hybridkomponenten auf dem Fahrzeugdach	266
Abbildung 218: Mobile Prüfstände zur Erprobung der BF1-60 und BF2-60 Demonstratoren	266
Abbildung 218: EMV-Filterbox.....	267
Abbildung 219: Temperaturverlauf BF1-60 Demonstrator	268
Abbildung 220: Prüfstandumbau für die BF2-60 Demonstrator Erprobung	269
Abbildung 221: Vergleich simulierter (gelb) und gemessener (magenta) Verlauf der Spannung eines BF2-60 Demonstrators bei Belastung (oben: Gesamtmessung, unten: Zoom eines aussagekräftigen Teilintervalls)	269
Abbildung 222: Blockschaltbild Prüfstands Aufbau	271
Abbildung 223: Stationärer Prüfstand für BF1-60 Demonstrator Erprobung	271
Abbildung 224: Stationärer Prüfstand für BF2-60 Demonstrator Erprobung	271
Abbildung 225: Salzsprühnebeltest BF1-60: Energiespeicher vor und nach dem Test.....	272
Abbildung 226: Vibrationstest BF2-60.....	273
Abbildung 227: BF2-60 Energiespeicher in der Klimakammer	274
Abbildung 228: Versuchsaufbau BF2-60 Energiespeicher und hohe Luftfeuchte	274
Abbildung 229: IP Tests am BF2-60 Energiespeichergehäuse (links: Dampfstrahlen unter einem Winkel von 30°, rechts: geringe Mengen eingedrungenen Wassers)	275
Abbildung 230: Versuchsanordnung Kurzschlussstest (BF1-60).....	276
Abbildung 231: Versuchsanordnung Überladungstest (BF1-60).....	276
Abbildung 232: Eindringen eines Nagels in den Energiespeicher (BF1-60)	277
Abbildung 233: Startseite des FUEL-Projekts: www.fuelproject.de	283

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: FUEL Verbundpartner	26
Tabelle 2: Vergleich der Anforderungen an Energiespeicher für PKW- und Nutzfahrzeuganwendungen	39
Tabelle 3: Technologievergleich Speichersysteme Hybrid NFZ Anwendungen	62
Tabelle 4: Maßnahmen zur Verbesserung von Herstellbarkeit und Montage des Kabelbaums	99
Tabelle 5: Vergleich Modulbauweise zu Kompaktanlage	114
Tabelle 6: Bewertungskriterien Klebeverfahren	155
Tabelle 7: Anforderungen Zellkontaktierung	168
Tabelle 8: Auszug der Ergebnisse zu den Parameteruntersuchungen US-Schweißen	178
Tabelle 9: Abweichungen vom idealen Eintauchvorgang	211
Tabelle 10: Abweichungen der Zelloberfläche	213
Tabelle 11: Messergebnisse verschiedener Schütze	239
Tabelle 12: Übersicht Leistungsmessungen	247
Tabelle 13: Testplanung BF1-120 Demonstratoren am stationären Prüfstand (Ausschnitt)	255

1 Aufgabenstellung

Mobilität ist eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren und die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit unserer Gesellschaft und muss auch in Zukunft sicher gestellt sein. Die Verknappung fossiler Brennstoffe und der damit ansteigende Ölpreis, die Erhöhung der Treibhausgase in der Atmosphäre, die zur Erderwärmung führt, sowie die erwartete Zunahme des weitverbreiteten Automobilverkehrs um den Faktor 4 von 2010 bis 2020 zwingen die globale Automobilindustrie in den kommenden 10 Jahren, den Übergang von herkömmlichen Antrieben zu Hybrid- und Elektrofahrzeugen nachhaltig einzuleiten.

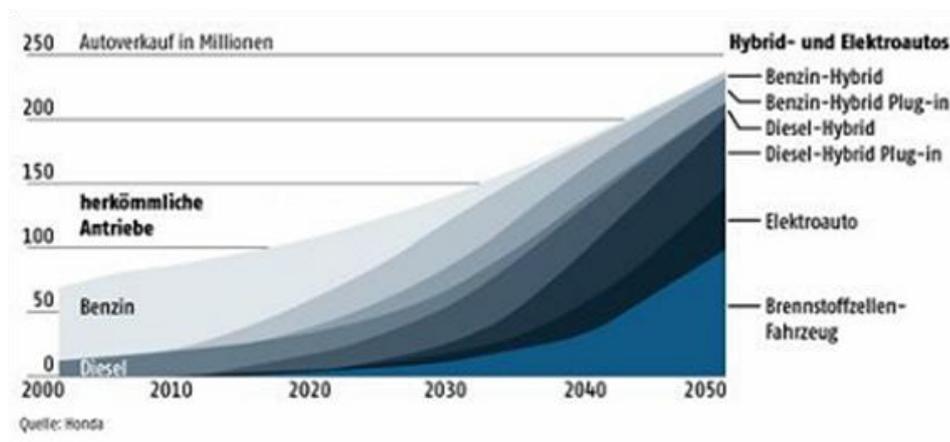


Abbildung 1: Erwartete Entwicklung des Automobilmarktes im Übergang von konventionellen zu Hybrid- und Elektrofahrzeugen

Da diese Veränderungen keinesfalls auf PKWs beschränkt bleiben, war es das Ziel des Verbundprojektes FUEL, die Entwicklung von Produktionstechnologien und –verfahren für die Herstellung von Li-Ionen Energiespeichersystemen für hybridisierte Nutzfahrzeuge (auch: Nutzkraftwagen NKW) voranzutreiben. Den Kern dieser Li-Ionen Energiespeicher bilden großformatige Lithium-Ionen-Zellen in sog. Softpack-Design. Hierbei handelt es sich um ein Zellformat, die sogenannte Softpack-Zelle (Flachzellen), welche bisher neuartig in automobilen Anwendungen ist und die aufgrund von Erfahrungen mit Prototypen in der Nutzfahrzeuganwendung große Vorteile verspricht.

Bei Projektstart FUEL existierte keine Referenzlösung für eine notwendige Produktionstechnologie für hohe Stückzahlen, die den speziellen Anforderungen der zukünftigen Hybrid-Nutzfahrzeug-Anwendungen gerecht ge-

worden wären. Im Rahmen dieses Verbundprojektes FUEL sollte daher - parallel zur Weiterentwicklung der Baugruppen der Energiespeichersysteme – in einem „Simultaneous Engineering“ Ansatz die notwendige Produktionstechnik vorangetrieben werden, um die Wechselwirkung der Baugruppenauslegung auf die Fertigungstechnik zu nutzen und iterativ in nachfolgenden Erprobungen die Fertigungstechnik optimal auszulegen.

1.1 Motivation und Problemstellung

Bei Projektstart waren Li-Ionen Batterien für den Großserien-Einsatz in Produkten wie Power Tools, Handys etc. verfügbar. Für automobiler Anwendungen starteten die ersten Kleinserien im Bereich der PKW (Tesla, i-MiEV, Leaf) – die sich für den Bereich Nutzfahrzeuge aber nicht eigneten, da neben technischen Anforderungen auch die meisten fertigungstechnischen Fragestellungen noch ungelöst waren. An die Spitze im Wettlauf um automobilmfähige Li-Ionen-Batterien eilten die Asiaten (Sanyo(J), Sony(J), Panasonic(J), Hitachi(J), Samsung(SK), LG(SK), BYD(PRC), von denen jeder mehr als 200 Millionen Zellen p.a. produziert, während alle anderen Wettbewerber (JCL Saft (USA/FR), A123(USA), Li-Tec und Gaia (DE), Leclanché (DE/CH)) mit weniger als 50 Millionen Zellen weit dahinter liegen.

Energiespeichersysteme für Nutzfahrzeuganwendungen unterscheiden sich von den gängigen PKW-Energiespeichern primär in den erheblich unterschiedlichen Anforderungen in Leistungs- und Belastungsspektrum. Diese unterschiedlichen Anforderungen betreffen primär die Leistungsklasse, die Spannungslage, die Anzahl an Belastungszyklen, die siebenfachen Vibrationsanforderungen und demnach die Lebensdauer der zu fertigenden Produkte. Batterie-Einsätze im externen Fahrzeuganbau erfordern zusätzliche Vorkehrungen an das Energiespeichersystem, um die deutlich verschärften Umweltbedingungen zu verkraften.

Insbesondere im innerstädtischen Stopp & Go-Betrieb zeigt die permanente Belastung von Hybridantrieben bei Nutzfahrzeugen wesentlich höhere Effizienz (absolut geringerer Dieserverbrauch) als beim PKW. Die Vorteile für die Betreiber von Hybrid-Nutzfahrzeugen und die Umwelt sind also deutlich höher als im PKW-Bereich. Hierfür wurden im Rahmen diverser Vorentwicklungsprojekte bei ZF und Continental die Anforderungen an die prinzipielle Funktionsweise dieser Systeme ermittelt.

Hybridsysteme im NKW-Bereich werden dann als marktfähig betrachtet, wenn die Einsparung an Kraftstoff in einem wirtschaftlichen Verhältnis zu den erhöhten Anschaffungskosten der Fahrzeuge steht. Das Energiespeichersystem stellt kostenseitig den größten Einzelposten in einem Hybrid-system dar, weshalb der Entwicklung einer kostengünstigen Volumenpro-
duktion dieser Komponente eine Schlüsselrolle für eine breite Markteinfüh-
rung zukommt. Da bei Projektstart noch keine serientaugliche Produk-
tionstechnologie von Li-Ionen Batterien für NKWs existierte, mussten so-
wohl Kerntechnologien als auch die dazu erforderlichen Produktionspro-
zesse in einem Kooperationsverbund von kompetenten Zulieferern zügig
entwickelt werden.

Um die anstehenden Aufgaben rasch zu lösen, wurden an einer zugelie-
ferten Zelleneinheit neben zahlreichen anwendungsspezifischen Techno-
logien mit entsprechenden Montagemaßnahmen auch die erforderlichen
Fertigungsprozesse entwickelt, so dass mittelfristig den Nutzfahrzeug-
bauern ein Batterie-Modul im attraktiven Kistenmaß angeboten werden
kann, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 2: Geplantes Li-Ionen Energiespeichersmodul für Nutzfahrzeug-Hybridan-
wendungen**

Der konzeptionelle Grundaufbau der Energiespeicher von FUEL (s.
Abbildung 3) weist drei Hauptmodule auf:

- Das Batteriemodul kann als Herz des Hochvoltspeichers bezeich-
net werden. Es sind die Batteriezellen enthalten, die an Kühlfinnen
geklebt werden. Von den Kühlfinnen wird die Verlustleistung zum
Wärmetauscher geleitet. Die Ableiter der Zellen werden miteinan-

der verbunden. Darüber angeordnet sitzt die Zellüberwachungseinheit (CSC – Cell Supervising Circuit), welche Spannung und Temperatur der Zellen überwacht. Da die Zellen in Reihe geschaltet sind, ist es zudem nötig, ihre Spannungslagen auszugleichen („Balancing“).

- Das Elektromechanikmodul: alle elektromechanischen Komponenten, wie Schütze, Sicherungen, Wartungstrenner, Stromsensor und HV-Anschlüsse nimmt das Elektromechanikmodul auf. Über eine Wartungsklappe am Gehäuse kann man von außen den Wartungstrenner ziehen, die HV-Anschlüsse anschließen und eine 30A-Sicherung tauschen.
- Das Außengehäuse des Energiespeichers: sowohl die Batteriemodule als auch das Elektromechanikmodul werden von einem Tragrahmen gehalten. Dieser hat mit den beiden Gehäuseschalen und den Dichtungen zudem die Aufgabe, das Innere des Speichers vor äußeren Einflüssen zu schützen, als auch die Umwelt vor gefährlichen HV-Spannungen zu schützen.

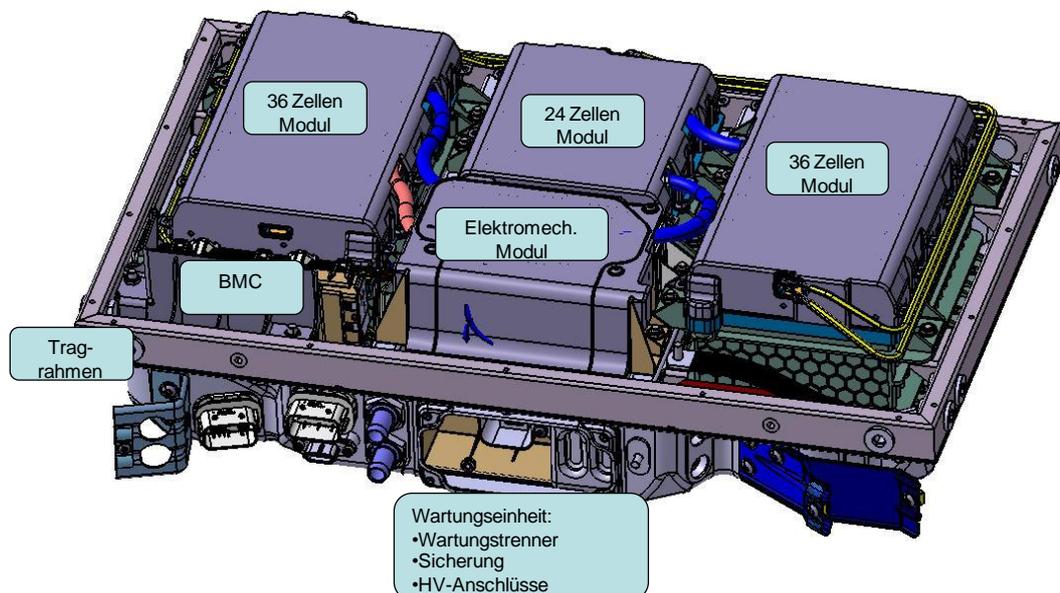


Abbildung 3: Komponenten des FUEL-Energiespeichers (dargestellt ist der BF2 Stand zum EFL2-60 Demonstrator für den 7,5to Verteiler-LKW als Ergebnis der Entwicklung und Erprobung im Rahmen des Projekts FUEL)

Die Schnittstellen des Energiespeichers sind in der nachfolgenden Abbildung angedeutet.

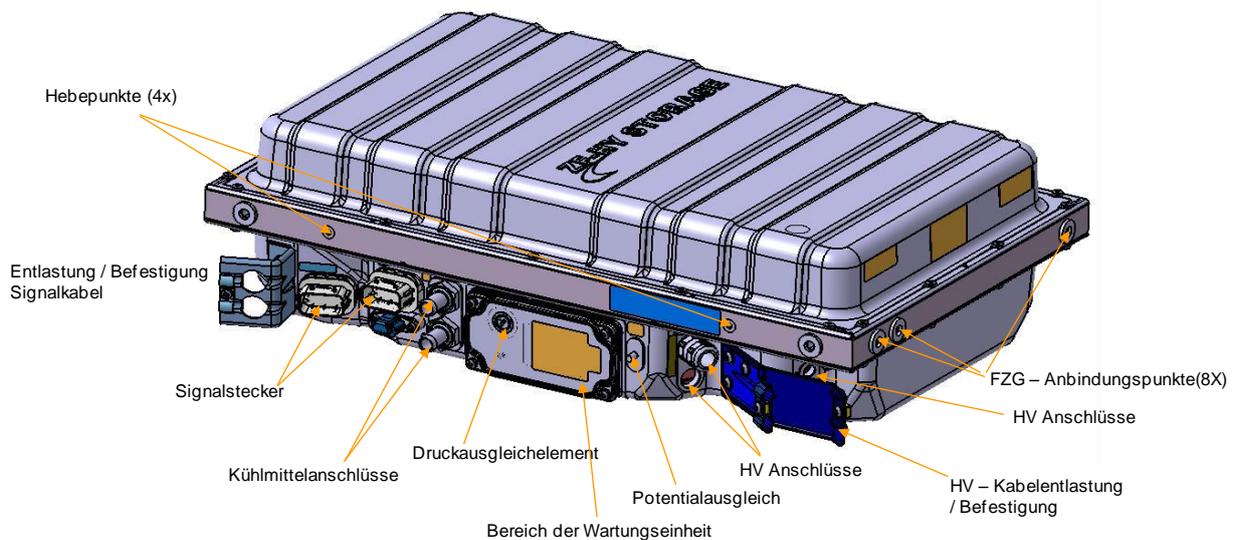


Abbildung 4: Schnittstellen des FUEL EFL2-60 Demonstrators (Ergebnis der Entwicklung und Erprobung im Rahmen von FUEL)

1.2 Gesamtziel des Forschungsverbundes

1.2.1 Gesamtzielsetzung

Gesamtziel des Projektes FUEL war die Entwicklung neuartiger Produktionstechnik zur Herstellung von mechanischen und elektromechanischen Baugruppen mit technischen Funktionen sowie spezifischen Produktions- und Testverfahren für den Aufbau von Baugruppen und Demonstratoren für Li-Ionen-Energiespeichersysteme. Der Schwerpunkt lag vor allem bei der Entwicklung der Produktionstechnik für die Anwendung eines neuen Zellformates der speziellen Baugruppen und den dafür zu entwickelnden Testverfahren für die Erprobung von Produktionstechnologieträgern bzw. Demonstratoren nach den Anforderungen der Anwendung in Hybrid-Nutzfahrzeugen.

Das Projekt FUEL – future goes electric – wurde als Verbundprojekt durch die drei Industriepartner Continental (Verbundpartner war die rechtliche Einheit „Temic Automotive Electric Motors GmbH“ der Continental AG, weitere Einheiten waren als Unterauftragnehmer involviert), ZF Friedrichshafen AG (ZF) und ADS-tec GmbH (ads-tec) durchgeführt. Namhafte Forschungsinstitute und Hochschulen wurden zur Sicherstellung der Berücksichtigung aktuellster Forschungsergebnisse über Fremdbeauftragung-

gen in das Projekt eingebunden. Spezialwissen auf einzelnen relevanten Fachgebieten konnte ebenfalls durch Unterbeauftragungen v.a. kleiner und mittelständischer Unternehmen in das Projekt integriert werden.

Die Gesamtkoordination des Forschungsprojektes FUEL erfolgte durch Continental. Die umfangreichen technischen Arbeiten wurden gemeinsam bearbeitet, wobei jeweils ein Partner die Federführung für bestimmte Aufgaben übernahm.

1.2.2 Projektstruktur – 3 Themenbereiche

Die Verbundpartner gliederten die durchzuführenden Arbeiten in drei Bereiche, die drei Arbeitspaketen zugeordnet wurden, s. Abbildung 5.

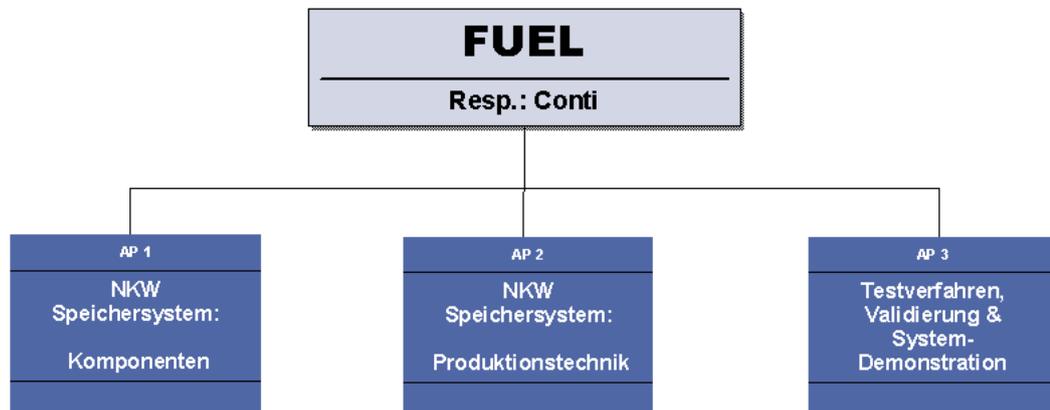


Abbildung 5: Projektstruktur von FUEL

Die zentralen Inhalte der drei Arbeitspakete werden kurz zusammengefasst:

- *AP1: NKW Speichersystem: Komponenten*
 Es wurden Bauteile, Baugruppen und Funktionen spezifiziert und nachfolgend in die Entwicklung der Herstellungsverfahren eingebunden. Parallel dazu erfolgte die Konstruktion / Anpassung dieser Bauteile, Baugruppen in Abhängigkeit von den angestrebten Fertigungstechnologien. Die konstruktive Arbeit fand ihren Abschluss mit der Prüfung der Herstellbarkeit unter den genannten Rahmenbedingungen. Beim Entwicklungsprozess stand die Erprobung der Einzelbaugruppen hinsichtlich der Montierbarkeit im Vordergrund.

- *AP2: NKW Speichersystem: Produktionstechnik*
Inhalte waren neben dem Montageablauf des Energiespeichers (von der Einzelzelle bis hin zum endmontierten System) die fertigungstechnischen Details und deren notwendige Prozesse (z.B. Steuerung & Kontrolle). Die Ergebnisse aus den jeweiligen Einzelversuchen an den Fertigungsanlagen und der Parameterfestlegungstests flossen rekursiv in die Konstruktion und den Aufbau / die Inbetriebnahme der Einzelanlagen zur Optimierung ein. Mit Hilfe dieser Einzeluntersuchungen wurde die Prozessfähigkeit nachgewiesen. Zur Erreichung der Wirtschaftlichkeit der Fertigungsabläufe wurden bei der Auslegung der Komponententechnologie und der Definition der Produktionsverfahren entsprechende Ausbringungsmengen und Taktzeiten vorgegeben.
- *AP3: Testverfahren, Validierung und Systemdemonstration*
Der dritte Themenbereich umfasste die Entwicklung der Testverfahren und den Validierungsablauf, dem die Demonstratoren als Ergebnis der entwickelten Produktionstechnik unterzogen wurden.

1.3 Zielsetzung der beteiligten Verbundpartner

1.3.1 Zielsetzung von Continental AG (Continental, TAEM)

Die Ziele von Continental in FUEL gliedern sich nahtlos in die Gesamtzielsetzung von FUEL ein: Übergeordnetes Ziel von Continental war die Entwicklung von Energiespeichern, deren Baugruppen sowie der Herstellungsverfahren zur Fertigung dieser Systeme.

Die Teilziele von Continental im Projekt FUEL lagen erstens im Aufbau entsprechender Kompetenz in den „Komponententechnologien“, wie z. B. bei mechanischen Bauteile des Energiespeichermoduls sowie der notwendigen Tragrahmenstruktur, kritischen elektromechanischen Elementen der 900V Elektronik, seriennahen Lösungen zum Batterie-Modul, Komponenten des Thermalhaushalts zur Kontrolle des Temperaturniveaus, der Regel- und Steuerungs-Software, attraktiven Service-Konzepten unter Einbindung aller erforderlichen Maßnahmen zur Systemintegration.

Zweitens lag ein Schwerpunkt von Continental auf den Produktionsverfahren. Zunächst sollten Lösungen zur Produktionstechnik adressiert werden

(Montagekonzept Bi-Pack, Zellkontaktierungskonzept und Produktionskonzepte für Zell-Module und „Flexboards“). Anschließend sollten die Einzelsysteme validiert und die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems demonstriert werden.

Mit FUEL betrat Continental technologisches Neuland: Für den gewählten Anwendungsfall waren bei Projektstart weder Komponenten noch Betriebsstrategien (Software) und auch keine erprobte Fertigungstechnik verfügbar. Somit war im Rahmen von FUEL in allen genannten Bereichen gleichermaßen Entwicklung zu betreiben:

- Entwicklung von Komponenten für Spannungsniveau und Sicherheitsanforderungen
- Darstellung der Steuerungssoftware, um das Energiespeichersystem in allen Betriebszuständen sicher betreiben zu können und den Nachweis der Funktion und Dauerhaltbarkeit führen zu können
- Entwicklung und Applikation von Produktionstechniken, Fertigungs- und Fügeverfahren

1.3.2 Zielsetzung von ADS-tec GmbH (ads-tec)

Ziel von ads-tec im Verbundprojekt FUEL war es, innovative Produktionsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien für Hybrid-Nutzfahrzeuganwendungen zu entwickeln. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Themenfelder:

- Entwicklung eines innovativen Montageverfahrens für Bi-Packs
- Entwicklung eines innovativen Zellkontaktierungsverfahrens
- Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Modulmontage
- Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Flexboardmontage

Nach Abschluss der theoretischen Untersuchungen und Vorversuche sollte in jedem Arbeitspaket ein Prozessprüfstand aufgebaut und getestet werden. Mit den Testprüfständen sollten Versuchsreihen zur Batteriefertigung gefahren werden. Ziel war der Nachweis der Prozessfähigkeit der neuartigen Montageprozesse.

Im Zuge der Projektdurchführung wurde die Aufgabenstellung von ads-tec angepasst. Wegen zum Teil negativer Testergebnisse mit dem ursprünglichen Design des Energiespeichers (BF2 Stand) führte der Projektpartner TAEM ein Design-Review am Batterie-Demonstrator durch (s. Beschrei-

bung der Redesign-Maßnahmen zum BF3 Stand in Abschnitt 4.2.3 dieses Berichts).

Deshalb konnte ads-tec erst wesentlich später als im Projektplan vorgesehen auf das Design eines vorerst finalen Stands des Demonstrators zurückgreifen. Die Arbeiten zum Montageverfahren für Bi-Packs sowie die Entwicklung des Zellkontaktierungsverfahrens konnten dennoch vollständig bearbeitet werden. Es wurde jeweils ein Verfahren mit innovativem Charakter entwickelt, als Verfahrensprüfstand aufgebaut und erfolgreich getestet.

Die Arbeitspakete zur Modul- und Flexboardmontage konnten nur eingeschränkt bearbeitet werden. Für die Modulmontage wurden Werkstückträger für Montage- und Schweißversuche entwickelt und Handversuche durchgeführt. Zum Thema Flexboardmontage konnte nur der theoretische Teil bearbeitet werden.

Um trotzdem die von ads-tec für das Verbundprojekt geschaffenen Ressourcen optimal zur Erforschung innovativer Produktionsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien zu nutzen, wurden in Absprache mit den Projektpartnern und dem Projektträger weitere Aufgaben für ads-tec definiert. Ziel der weiteren Aufgaben war, weitere nicht speziell auf das Bi-Pack Design abgestimmte Klebe-, Montage- und Zellkontaktierungsverfahren auf ihre Automatisierbarkeit hin zu testen.

Dazu wurde ein bei ads-tec bestehendes Batterie-Design auf Produktionsanforderungen (insbesondere Kleben) optimiert. Aufbauend auf diesem Batteriedesign wurden bei ads-tec Testprüfstände für drei alternative Klebeverfahren sowie jeweils für eine Modulmontage und ein Zellkontaktierungsverfahren realisiert.

1.3.3 Zielsetzung von ZF Friedrichshafen AG (ZF)

Die Hauptzielsetzung von ZF in FUEL lag in der Darstellung einer geeigneten Produktionstechnologie und -verfahren für nutzfahrzeugtaugliche Energiespeichersysteme. Einen besonderen Schwerpunkt bildete die Erprobung des Gesamtenergiespeichers in Nutzfahrzeugen. Hier standen folgende Anwendungen im Fokus: Ein 7,5 to Hybrid-Verteiler-LKW und ein leichter 18 to sowie ein schwerer 28 to Hybrid-Stadtbuss.

2 Voraussetzungen der Projektdurchführung

Wie erwähnt, setzt sich das FUEL Konsortium aus den nachstehend aufgeführten Verbundpartnern zusammen.

	<u>TAEM GmbH</u> (Koordinator, ein Unternehmen der Continental Gruppe)	<u>ZF Friedrichshafen AG</u>	<u>ADS-tec GmbH</u>
Organisation	Geschäftsbereich Hybrid Electric Vehicles	Nutzfahrzeug und Sonderantriebstechnik	Geschäftsbereich Automation
Abteilung	BU HEV, Segment EM	EH	
Straße	Sickingenstr. 42 - 46	Alfred-Colsman-Platz 1	Raiffeisenstrasse 14
Postleitzahl	10553	88038	70771
Ort	Berlin	Friedrichshafen	Leinfelden
Webseite	www.continental-corporation.com	www.zf.com	www.ads-tec.de
Ansprechpartner	Hr. Bonnekessel	Hr. Egger	Hr. Frank

Tabelle 1: FUEL Verbundpartner

Zum besseren Verständnis der Rollenverteilungen werden die Firmenprofile der Verbundpartner sowie deren Vorarbeiten auf den für FUEL relevanten Themenfeldern vorgestellt.

2.1 Continental AG (TAEM, Continental)

2.1.1 Unternehmensprofil und strategische Kooperationen

Temic Automotive Electric Motors GmbH (TAEM) ist ein Unternehmen der Continental Gruppe mit 170 Mitarbeitern am Standort Berlin. Die Continental AG ist einer der weltweit führenden Zulieferer der Automobilindustrie mit umfassendem Know-how in der Reifen- und Bremsen-Technologie, der Fahrdynamikregelung, der Elektronik und der Sensorik. Continental beschäftigt rund 150.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in 36 Ländern an nahezu 200 Werken, F&E-Zentren und Teststrecken.

Als Kompetenzträger für elektrische Antriebstechnik stellt die TAEM das Entwicklungszentrum für Hybridantriebssysteme in der Continental Grup-

pe dar und bildet den Kern des Geschäftsbereiches „Hybrid-Elektro-Antriebe“ der Continental.

Ein Schwerpunkt der TAEM ist die Entwicklung von elektrischen Energiespeichersystemen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge – ein Entwicklungsschwerpunkt für Antriebe für Elektrostraßenfahrzeuge befindet sich im Aufbau. Beide Schwerpunkte sind von großer Bedeutung für die kritischen Komponenten der kommenden Elektrofahrzeuge. In ersten Serienprojekten werden bereits elektrische Antriebsstränge und Speichersysteme aus eigener Entwicklung realisiert.

Die Kunden von Continental benötigen entweder leistungsoptimierte Speicher für Hybridanwendungen oder energieoptimierte Speicher für Plugin- oder Elektrofahrzeuge. Innerhalb dieses Geschäftsbereiches werden Serienentwicklungen für verschiedene Automobilhersteller und ebenso die notwendigen Basisentwicklungen getätigt.

Die Entwicklung von Antriebssystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge begann bereits Mitte der 90er. Schwerpunkte der 90iger Jahre waren Projekte um das Thema ‚Integrierter Kurbelwellen Starter Generator‘ sowie Konzepte zu Leistungselektroniken und die Integration von Hochvolt-Komponenten in die Fahrzeug-Bordarchitektur.

Der Durchbruch gelang 2003 mit einem Mild- Hybrid¹ –Antrieb für den GM-Silverado. Damit war Continental 2003 der erste unabhängige Automobilzulieferer weltweit mit einer Serienproduktion von Hybrid-Antriebskomponenten. Produktionsstandorte sind Landsberg/Lech und Nürnberg.

2008 startete Conti die Produktion der weltweit ersten Lithium-Ionen-Batterie für Automobile. Die weltweit erste Serienanwendung dieser Batterietechnologie findet im Mercedes Benz S400 sowie im 7er BMW Active-Hybrid 7 Anwendung. Basis dieser ersten Generation an Li-Ionen Energiespeichern von Continental stellt das Hardcase Rundzellen-Format dar. Produktionsstandort ist ebenfalls Nürnberg, wo die neue Produktion eingerichtet wurde. Ebenfalls in Nürnberg gefertigt wird die Leistungselektronik, die gemeinsam mit der Li-Ionen Batterie in der Daimler S-Klasse in Serie verbaut wird.

¹ Mild Hybrid = ein Hybridfahrzeug, bei dem der Elektromotor den Verbrennungsmotor bei Bedarf unterstützt, aber nicht alleine den Vortrieb übernehmen kann.

In seinen Li-Ionen Energiespeicherentwicklungen legt TAEM die höchsten Sicherheitsmaßstäbe an und zieht für den Nachweis einer unübertroffenen Crashsicherheit neutrale Prüfinstitutionen hinzu: Crashtests des TÜV Süd mit stahlummantelten Li-Ionenbatterien von Continental (Mercedes 400 Hybrid und BMW ActiveHybrid 7) zeigen, dass die ersten Kleinserien-Prototypen dem typischen Impulsspektrum einer Kollision standhalten. Um jedoch zu großserientauglichen Lösungen zu gelangen, die sich auch für Mittel- und Kleinfahrzeuge eignen, sind neue Produktionsprozesse zu erschließen.

Das Produktionskonzept und die Fertigungstechnologien der PKW-Batterieanwendung lassen sich nur in geringem Umfang auf Nutzfahrzeuganwendungen übertragen. Grundsätzlich liegen die Abmessungen und das Gewicht der NKW-Speichersysteme außerhalb der Fertigungsfähigkeit vorhandener Anlagen. Ebenso basiert diese PKW-Anwendung auf dem Formatstand der Hardcase-Rundzelle. Diese Zelle ist ein Zulieferteil der *Fa. Saft, Frankreich²* (100%ige Tochter von Johnson Controls). Die Robustheitsanforderungen an diese Systeme erfordert einen verstärkten Strukturaufbau sowie durch den modularen Ansatz eine erheblich höhere Komplexität. Diese Zusammenhänge erfordern einen gänzlich neuen Ansatz für die Entwicklung einer Serienfertigung.

In einer Gemeinschaftsentwicklung mit dem japanischen Unternehmen ENAX wurden von Continental eine Reihe von Softpackzellen entwickelt (siehe Abbildung 6). Als Resultat verfügt Continental über Zugang und Nutzungsrechte an diesen Zellen, wobei allerdings eine Produktion in großen Stückzahlen mit ENAX nicht angestrebt wird. Der Bezug zu FUEL ergab sich einerseits aus dem bei Continental vorliegenden Know-how und auch in der Möglichkeit, auf Musterstückzahlen dieser Zellen für die Verwendung im Projekt zurückgreifen zu können, falls erforderlich.

Continental und ZF verbindet im Bereich Entwicklung von Hybridsystemen seit einigen Jahren eine etablierte Partnerschaft. Gemeinsame Tätigkeiten lagen bisher schwerpunktmäßig im Bereich der automobile Antriebstechnik (PKW), s. Abbildung 7. Die hier dargestellten Bereiche des Antriebsstranges zeigen die Kompetenzen der beiden Partner ZF und Continental im Schwerpunkt Hybridantriebe. Aus dieser Aufstellung war es beiden Firmen in der Vergangenheit möglich, Komplett-Hybridsysteme für PKW-Anwendungen anzubieten: ZF stellte die Technologien für die elektrische

²Link Saft-Batterietechnik: www.saftbatteries.com; Press release: www.highbeam.com

Antriebsmaschine in Verbindung mit dem Getriebe und Drehmomentdämpfern bereit. Continental komplettierte das Hybridsystem mit der Leistungselektronik, der Motorsteuerung und des Li-Ionen Energiespeichers.



Abbildung 6: Conti-Eigenentwicklung der 5,5Ah High-Power Zelle für Hybridanwendungen



Abbildung 7: Verteilte Kompetenzen von ZF und Continental im Bereich Hybridantriebstechnik

Die Kooperation beider Firmen ist seit 2009 auf den Bereich der Nutzfahrzeuanwendungen erweitert worden. Das erste Projekt im Bereich Nutzfahrzeuanwendungen war eine Machbarkeitsbetrachtung für Li-Ionen Energiespeicher in der Anwendung von NKW-Hybridantriebssystemen. In dieser Machbarkeitsphase sind auf Basis eines bestehenden PKW-Energiespeichers erste Prinzipversuche durchgeführt und erste Erkenntnisse

hinsichtlich der Konzeption eines zukünftigen NKW-Energiespeichers gesammelt worden.

Die Continental Business Unit Hybrid Electric Vehicles möchte auch weiterhin als Key Player und Komponenten- / Systemlieferant für das Kompetenzfeld Energiespeicher für Hybrid- und Elektrofahrzeuge auftreten und beabsichtigt daher die möglichst rasche Verwertung der Ergebnisse des Projekts FUEL.

2.1.2 Vorarbeiten zum Projekt

Continental (TAEM) konnte sich bereits von FUEL durch eine Beteiligung an mehreren öffentlichen Projekten umfangreiches Knowhow auf dem Gebiet der Energiespeicher aneignen. Besonders hervorzuheben sind:

- *LIONHEART*

Im EU Projekt LIONHEART (Partner Continental, Daimler, Saft) wurden in von Anfang 2003 bis Ende 2005 die Grundlagen für die Steuerung der Lithium-Ionen-Zellen und –Batterien erarbeitet, die in der Lithium-Ionen-Batterie für den Daimler S 400 BlueHybrid, der weltweit ersten Lithium-Ionen-Batterie in Automotive eingesetzt wird. Diese erste Generation von Steuerungs- und Überwachungselektronik für Li-Ionen Energiespeichersystemen mit PKW-Anwendungen bildet die Grundlage für die Weiterentwicklung zu der 900V Steuerungselektronik für die Energiespeichersysteme mit Nutzfahrzeuganwendungen.

- *HYSYS*

Das EU Projekt HYSYS „Fuel Cell Hybrid Vehicle Component Development“ wurde durch das Konsortium Saft, Magna, Daimler u. Continental über eine Laufzeit von vier Jahren durchgeführt (1.12.2005 – 30.11.2009). Im Rahmen von HYSYS kamen die in LIONHEART entwickelten Batterien zum Einsatz und konnten funktional weiterentwickelt werden (Funktionstests im Fahrzeug, Fehleranalysen und -beseitigung). Abbildung 8 illustriert den Weg von LIONHEART über HYSYS zur Industrialisierung der weltweit ersten Lithium-Ionen Automotive Batterie. Für diese Entwicklung wurde TAEM 2005 der Ferdinand Porsche Preis verliehen.

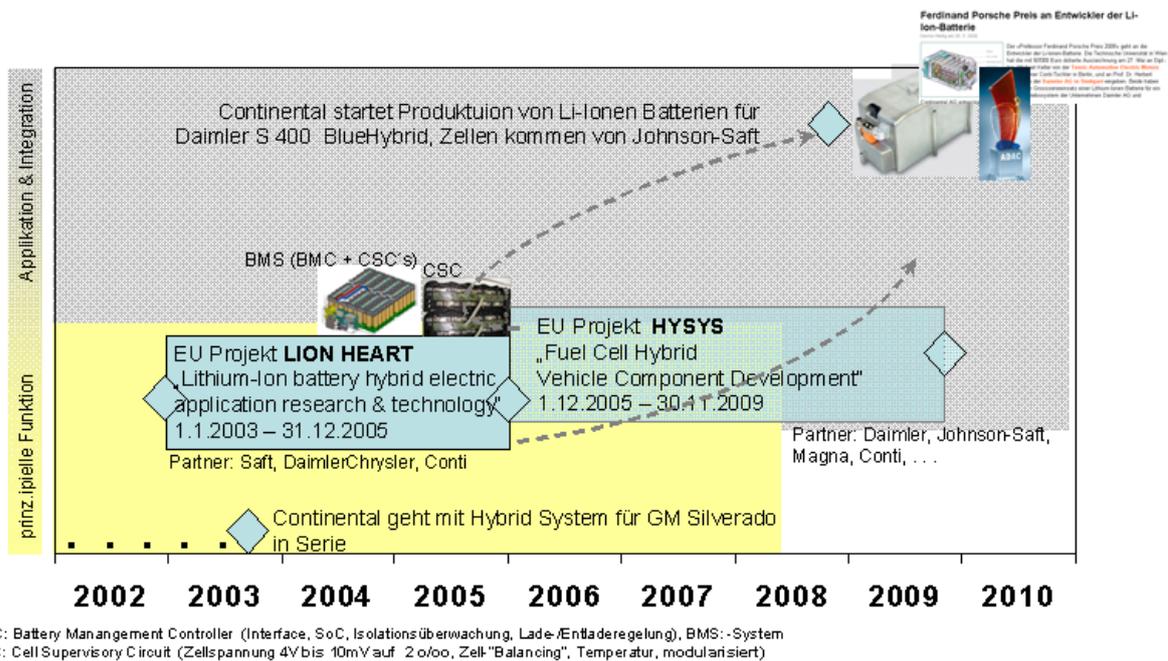


Abbildung 8: TAEM Verbundprojekte LIONHEART und HYSYS

- *Li-5*

Li-5 ist ein Projekt, das im Rahmen der Förderinitiative LiB 2015 bearbeitet wird. Als Verbundpartner dieses von Continental (TAEM) koordinierten und vom BMBF geförderten Projektes sind beteiligt: Li-Tec Battery, Süd-Chemie, Daimler AG, Merck, RWTH, ZSW, TU Chemnitz.

Das Ziel von Li-5 ist die Erforschung und Entwicklung einer neuen langzeitstabilen 5V-Lithium-Ionen-Zelle, die einerseits keine lebensdauerbedingte Einschränkung der Entladetiefe auf wenige Prozent benötigt und andererseits aufgrund der 5V-Chemie eine höhere Energiedichte. Inhalt von Li-5 ist die Optimierung der inneren Struktur und Chemie der Zelle.

2.2 ADS-tec GmbH (ads-tec)

2.2.1 Unternehmensprofil und Vorarbeiten

ads-tec besitzt aufgrund des umfangreichen Know-hows im Maschinenbau und in der Elektronik die wesentlichen Grundbausteine, Erfahrungen und

Referenzen, um auf den neuen, im Projekt FUEL zu bearbeitenden Gebieten schnell und sicher agieren zu können. Insbesondere kann ads-tec die erfolgreichen Erfahrungen als Generalunternehmer komplexer Maschinen und Anlagen einbringen, sowie auf über sechs Jahre Batteriedesign und über 25 Jahre Elektronikentwicklung zurückgreifen. So sind beispielsweise mehr als 50.000 von ads-tec in Soft- und Hardware entwickelte Lithium-Ionen-Akkus als Smart-Batteries umgesetzt und in industriellen Diagnoseeinrichtungen im weltweiten Einsatz. Darüber hinaus produzieren namhafte Automobilhersteller aktuelle Motorenteile auf Anlagen und Maschinen von ads-tec.

Als Entwickler und Systemarchitekt von Maschinen und Anlagen zeichnet sich ads-tec im Geschäftsbereich Automation durch ein besonderes Know-How in der Mechanikkonstruktion sowie der Prozess-, IT- und Steuerungstechnik aus. Somit stehen die wesentlichen Bausteine zur Verfügung, die bei Sonderlösungen und herausfordernden Aufgabenstellungen im industriellen Fertigungsumfeld benötigt werden.

Besondere Expertise besteht auf dem Gebiet der Automobilherstellung. Hier hat ads-tec beispielsweise als Generalunternehmer wesentliche Teile einer Motorenteilfertigungsanlage (Auftragsvolumen im zweistelligen Millionenbereich) übertragen bekommen. ads-tec hat von der DaimlerChrysler AG (heute Daimler AG) einen anerkannten Lieferantenpreis als Produktionsmittellieferant des Jahres 2002 erhalten. Weitere Referenzen gibt es im Bereich komplexer Handhabungssysteme und schnell taktender Zuführautomaten. ads-tec sieht sich aufgrund der Erfahrungen und Referenzen besonders gut gerüstet, um die neuen Themen im Bereich der Elektromobilität aufzugreifen und diese schnell nach Vorne zu bringen - nicht zuletzt deshalb, weil ads-tec eine der sehr wenigen Firmen ist, die alle erforderlichen Detailbereiche in der künftigen Elektromobilitätstechnologie (Mechanik, Fertigungsverfahren, Elektronik, Prozesswissen, Software, Akku-Technologien, Simulation, Zertifizierungen und mehr) zu 100 % im eigenen Haus hat.

Beispiele aus den Geschäftsbereichen Daten- und Systemtechnik zeigen dies ebenfalls sehr deutlich. Im Bereich der Elektronik für Getriebesteuerungen hat ads-tec für die Robert Bosch GmbH Software entwickelt, die 3.000 Getriebesteuergeräte pro Tag „flasht“ (mit Software bespielt). Die notwendigen CAN-Bus Protokolle und Technologien sind von ads-tec beherrschte Themen und die Spezialprotokolle für das Fastflashing von Steuergeräten mit 1.6 MBit/s wurden im eigenen Haus entwickelt.

Im Bereich der Leistungselektronik entwickelt ads-tec DC/DC Schaltregler sowie komplette Powerdistributions-Systeme für Industrie-PCs aus Eigenentwicklung. Das reicht von einfachen 1 W DC/DC Schaltreglern bis zu 120 W galvanisch getrennten DC/DC Schaltreglern mit weitem Eingangsbereich (DC_{IN} 10V - 36V; $V_{out}=12V/10A$). Im Bereich der Rechnertechnik entwickelt und produziert ads-tec komplette PC Systeme (Motherboard und Gehäusedesign) auf Basis der neusten Intel Prozessoren und Chipsätze (z.B. 2nd generation Intel® Core™ i7). Basierend auf diesen aktuellen Chipsätzen entwickelt ads-tec Industrie-PCs, Tablet-PCs, Fahrzeugdiagnose-Geräte, Access Points und Firewalls. Bei mobilen Systemen wie den Tablett-PCs gehört seit Jahren die Entwicklung der Lithium-Ionen-Akkutechnologie mit zu den Aufgabengebieten von ads-tec. Hier ist sehr viel Know-How und Erfahrung im Hause vorhanden. Darüber hinaus entwickelt und programmiert ads-tec μ Controller sowie FPGA basierte Lösungen. So sind in den ads-tec- Industrie-PCs in der Regel sowohl μ Controller (PIC16LF877A, H8-3684, Renesas DF2117) als auch CPLDs bzw. FPGA (Lattice LCMXO2280C und LFECP33E-5F484I) für die Hardwareüberwachung und Tastenauswertung sowie diverse Steuerungsaufgaben integriert.

Im Bereich der Softwareentwicklung entwickelt ads-tec AMI UEFI BIOS sowie die μ Controller Firmware im Haus. Ferner entwickelt ads-tec für diese Systeme sowohl die Applikationen (.NET , MFC , WEB, Linux) als auch die notwendigen Treiber. Die heute von ads-tec entwickelten und produzierten Lithium-Ionen-Akkus haben Zellkonfigurationen von 4s bzw. 3S3P mit einem Leistungsbereich von 32 bis 65 Wh und sind nach dem Smart Battery Standard entwickelt worden (Abbildung 9, Abbildung 10). Hierfür hat ads-tec komplette Batterien, deren Elektronik und Software zum Batteriemangement und für Schutzfunktionen selbst entwickelt und produziert. Weiter wurden auch die passenden Smart Battery Charger und Smart Battery Manager für die simultane Aufladung und Entladung von bis zu zwei Smart Batteries gleichzeitig entwickelt.

ads-tec hat für die eigenen Batterien die Fertigungsmess- und Prüftechnologie zum schnellen Kalibrieren, Messen und Prüfen selbst entwickelt. Auf den Prüfständen (Abbildung 11) werden folgende Prüfungen durchgeführt: Im ersten Schritt wird die Steuer- und Kontrollplatine programmiert und kalibriert. Danach wird eine Seriennummer mit Datum in den Speicher der Platine geschrieben und die eingebauten LED's überprüft. Nun werden die wesentlichen Tests durchgeführt. Diese sind das Messen der Zellspan-

nung und des Ladestroms. Anschließend werden die Temperatursensoren überprüft und die FET aus- und eingeschaltet. Nun wird die Batterie aktiviert, der Fehlerstatus der Platine zurückgesetzt und die Smart Batterie auf 30% aufgeladen.



Abbildung 9: ads-tec Smart Batterie aus 4 Lithium Ionen Rundzellen, Fahrzeugdiagnosegerät mit zwei Smart Batteries



Abbildung 10: Smart Batterie aus Lithium Ionen Flachzellen, ads-tec Compact 3 Serie



Abbildung 11: ads-tec Prüfstand für Lithium Ionen Batterien

Im Bereich der Qualitätssicherung von Lithium-Ionen-Akkus verfügt ads-tec über folgende Zertifikate und Zulassungen für die eigenen Lithium-Ionen-Batterien: BBFS (Battery Household & Commercial), UL201 Garage Equipment, UN3090 Transport of Dangerous Goods sowie DIN EN ISO 9001:2000.

Um die im Verbundprojekt FUEL gestellten Aufgaben zu lösen, wurden die dafür notwendigen Kapazitäten dadurch geschaffen, dass Mitarbeiter aller Entwicklungs-Abteilungen für das Forschungs- und Entwicklungsteam FUEL eingeteilt wurden. Damit konnten Synergien aus allen Entwicklungsbereichen von ads-tec genutzt werden. Zusätzlich zu Neueinstellungen wegen besserer Konjunktur wurden in mehreren Abteilungen zusätzliche Mitarbeiter für die Entwicklungsaufgaben im FUEL-Projekt eingestellt. Diese vergrößerten Kapazitäten im Bereich F&E bleiben bei ads-tec auch nach Ablauf des Verbundprojekts bestehen, da ads-tec durch das im Projekt gewonnene Know-How Aufträge im Bereich der automatisierten Batterieproduktion gewinnen will.

2.2.2 Forschungspartner

Darüber hinaus mussten - um die ehrgeizigen Ziele des Verbundprojekts zu erreichen - Technologien erarbeitet und optimiert sowie in einer wirtschaftlichen Prozesskette mit einem hohen Automatisierungsgrad verknüpft werden. Hierfür arbeiteten die Fachleute für Fertigungsautomation von ads-tec mit den Experten auf dem Gebiet der Fügetechnik vom IFS der Universität Braunschweig zusammen. Am IFS wurden grundlegende Fragen bezüglich Kontaktierung und Klebung der Zellen erarbeitet. Die Prozesse zu den IFS Klebverfahren wurden von ads-tec auf Eignung zur Einbindung in hoch-automatisierte Produktionsprozesse untersucht und bewertet und anhand von Prozessprüfständen evaluiert.

Im Bereich der Zellkontaktierung hat ads-tec außerdem mit weiteren Partnern zusammengearbeitet, um auch Sonderverfahren zu untersuchen, für die das IFS nicht über die geeignete Ausstattung verfügt. Diese sind in Kapitel 7 genannt.

2.3 **ZF Friedrichshafen AG (ZF)**

2.3.1 Unternehmensprofil

ZF ist einer der weltweit größten Automobilzulieferer für Getriebe, Achsen, Lenkungen und Fahrwerkskomponenten. Um auch in Zukunft die Marktposition sicherzustellen, ist ZF bereits seit Anfang der 90er Jahre auf dem Gebiet der Elektro- und Hybridantriebe tätig.

Begonnen wurde mit der Darstellung einer ganzen Reihe von Fahrzeugen mit rein elektrischem Antrieb und unterschiedlichen Energiequellen. Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge nur über Elektromotoren angetrieben wurden und ein Dieselmotor allenfalls zur Erzeugung der elektrischen Energie benutzt wird. Dies waren zum einen ein Flottenversuch in Stuttgart mit 17 rein elektrisch angetriebenen Gelenkbussen, bei denen die Energie über ein Diesel-Generatorsystem bereitgestellt wurde, acht Hybridbusse mit NaNiCl-Hochtemperaturbatterien für einen rein elektrischen Fahrbetrieb, sowie jeweils ein Oberleitungsbus, ein reiner Batteriebus als auch der erste Brennstoffzellenbus. In Summe wurden mit diesen Fahrzeugen 4 Mio Kilometer im Feldversuchsbetrieb zurückgelegt.



Abbildung 12: ZF Elektroantrieb aus den 90er Jahren

Serienentwicklungsaktivitäten waren damals im Hinblick auf die bereits für Mitte des Jahrzehnts erwartete Serienreife der Brennstoffzelle geplant. Unter lokalen Emissionsgesichtspunkten schien damals die Brennstoffzelle den Batterien deutlich überlegen. Mit den sich abzeichnenden erheblichen Verschiebungen der Brennstoffzellenplanungen wurden die Entwicklungsaktivitäten zur rein elektrischen Antriebstechnik bei ZF ebenfalls auf Vorentwicklungsaktivitäten zurückgestuft.

Mit den deutlichen Steigerungen der Kraftstoffpreise wurden diese seit 2004 auf das Gebiet der Hybridantriebe im NKW verlagert. Hybridantrieb bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Antrieb über den Verbrennungsmotor oder über einen Elektromotor erfolgen kann. Hier wurden im Rahmen von diversen Vorentwicklungsprojekten unterschiedliche Hybridsysteme dargestellt und untersucht. Ziel war es, unterschiedliche Hybridsysteme jetzt mit dem Fokus Gesamtwirtschaftlichkeit und maximaler Kraftstoffeinsparung / globaler CO₂-Reduzierung zu untersuchen und zu

bewerten. Die Energiespeichertechnologie stand in diesen Projekten allerdings nicht im Fokus, sondern man konzentrierte sich auf die Darstellung von Prototypen zur Sicherstellung des Systemkonzeptes.

2.3.2 Vorarbeiten

Die folgende Auflistung gibt einen chronologischen Überblick über die bisherigen Vorentwicklungsaktivitäten der ZF auf dem Gebiet der Hybridantriebe (ab 2004):

1. 2004: Mild Hybrid Verteiler-Lkw (12 to) mit Blei-Säure Batterie (Prototyp)
2. 2006: Mild Hybrid Verteiler-Lkw (12 to) mit Li-Ionen Batterie (Prototyp)
3. 2007: Parallel-Hybrid Verteiler-Lkw (12 to) mit Li-Ionen Batterie (Prototyp)
4. 2008: Parallel-Hybrid Transporter (4 to) mit Li-Ionen Batterie (Prototyp)
5. 2009: Parallel-Hybrid Stadtbus (18 to) mit Li-Ionen Batterie (Prototyp)

Nach Bestätigung des Systemkonzeptes der Hybridsysteme in den Vorentwicklungsprojekten gilt es nun, die einzelnen Komponenten zu optimieren, um letztendlich ein Seriendesign daraus abzuleiten. Für den Markterfolg der Hybridsysteme im NKW ist die Verfügbarkeit eines kostengünstigen und leistungsfähigen Energiespeichers zwingend notwendig. Dieser kann aber nur dargestellt werden, wenn die Produktionstechnologie von Beginn an optimiert und optimal auf die zu erwartenden Anwendungen angepasst wird.

Derzeit entwickelt die ZF Friedrichshafen AG im Rahmen des Verbundförderprojektes „HyTruck“ ein modulares Hybridantriebssystem für Nutzfahrzeuge. Dabei steht die Darstellung eines modularen Hybridmodulbaukastens für Nutzfahrzeuge im Vordergrund, aus dem sich für die unterschiedlichen Fahrzeug- und Einsatzklassen im LKW-Bereich zwischen 8to und 40to hinsichtlich E- Maschinenleistung und -drehmoment, Batteriedimensionierung, Neben- und Zusatzaggregate-Ausstattung angepasste und kostengünstige Hybridantriebssysteme/-fahrzeuge konfigurieren lassen. Die Entwicklung und Validierung geeigneter Produktionstechnologien und -verfahren für nutzfahrzeugtaugliche Energiespeichersysteme sind nicht Inhalt des Förderprojektes HyTruck, sondern werden in FUEL adressiert.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Komplexität und Umfang des Projektes FUEL stellen besondere Herausforderungen an übersichtliche und gleichzeitig erschöpfende Ausführungen zu allen Komponenten und allen produktionstechnischen Fragestellungen eines Energiespeichersystems für Nutzfahrzeuge.

In Abschnitt 3.1 wird daher an ausgewählten Stellen über eine Beschreibung des Standes der Wissenschaft und Technik eingegangen. Um den Projektfortschritt durch FUEL aufzuzeigen, erfolgt bereits hier ein Ausblick auf die zu Projektbeginn formulierten Projektziele und die zu deren Erreichung beabsichtigten Arbeiten.

Der bei Projektende erreichte technische Stand wird in Abschnitt 3.2 kurz zusammengefasst. Eine sehr detaillierte Darstellung der im Projekt erreichten Ergebnisse folgt in Kapitel 5 dieses Berichts.

3.1 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektbeginn

Generell gilt und war zu beachten, dass von einem fundierten Stand der Wissenschaft und Technik bei Projektstart im vorliegenden Anwendungsgebiet Hybrid-Nutzfahrzeuge nicht gesprochen werden konnte. Ausführliche Patent- und Literaturrecherchen bestätigten dies. Mit dem Vorhaben FUEL betraten die Projektpartner in nahezu allen Arbeitspaketen technologisches Neuland.

3.1.1 Nutzfahrzeuganwendung und Li-Ionen Batteriezellen-Konzept

Das Konsortium sieht den Schwerpunkt seiner Aktivitäten in Energiespeichersystemen für Hybridsysteme für die Anwendung in Nutzfahrzeugen: LKWs und Nahverkehrsbusse. Dabei war es erklärtes Ziel, weitere Anwendungen der in FUEL zu entwickelnden Produktionstechniken und -prozesse aus diesen beiden Referenzapplikationen abzuleiten.

Tabelle 2 vergleicht die Anforderungen an Energiespeicher für Nutzfahrzeuganwendungen mit denen bei PKW-Anforderungen und verdeutlicht die hohen Herausforderungen im Bereich der Nutzfahrzeuge, die durch die verschärften Einsatzbedingungen der Nutzfahrzeuge bedingt sind.

Parametervergleich	Energiespeicher LKW/Bus- Anwendung	Energiespeicher PKW-Anwendung
Maximale Spannungslage	900V	450V
Vibrationsbelastung & –Dauer (Verhältnis)	10	1
Zyklenzahl Ladung/Entladung Zelle	11	1
Entladeleistung (10s, 60% SOC)	120 kW/240 kW	60 kW
Kaltstarteigenschaften (-25°C)	20 kW	5kW
Lebensdauer über Zeit	15 Jahre	15 Jahre
Lebensdauer mit Betrieb	50 000h	5 000h
Maximal Strom (Parallelschaltung)	500 A	200 A
Anbausituation zur Umgebung, innerhalb / außerhalb des Fahrzeugs	Fahrzeug- Außenanbau im Crashbereich	Fahrzeug- Inneneinbau, Crash geschützter Bereich
Anforderung an Beschädigungs- schutz	hoch	gering

Tabelle 2: Vergleich der Anforderungen an Energiespeicher für PKW- und Nutzfahrzeuganwendungen

Die deutlichsten Unterschiede zu den PKW-Anforderungen weisen die Nutzfahrzeuge im Bereich der Vibration (Faktor 7 höher) und der Betriebsdauer (Faktor 10 höher) auf. Dies musste bereits in die Konzeptauswahl der Befestigungstechnologie der Li-Ionen Zellen im Energiespeicher einfließen und war bei der Wahl des Produktionsprozesses zu berücksichtigen.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie haben Continental & ZF-Friedrichshafen bereits bis Projektstart wesentliche Grundlagen erarbeitet und basierend auf einem von Continental entwickelten Vorläuferformat grundlegende Erkenntnisse gewonnen. Dadurch wurden sowohl die Bauform als auch das Format der Softpack-Zelle (oder auch Pouch- / Coffeepack-Zelle) definiert. Mit der 5,5 Ah Softpack-High-Power-Zelle³ (s. Abbildung 6) verfolgt Continental mit diesem Format einen Ansatz in der Li-Ionen Technologie, der als Forschungs- & Entwicklungsthema seit einigen Jahren im internationalen Technologiewettbewerb unterschiedlich bewertet wird.

Für großformatige Anwendungen in der Automotive-Antriebstechnik weist das Softpack-Konzept⁴ gegenüber der bisher in der Consumer⁵-Industrie

³ High Power Zelle = Hochleistungszelle, für Hybridanwendungen, High Energie Zelle = Hochenergiezelle, für die Elektrofahrzeuganwendung

⁴ Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies von Masaki Yoshio, Ralph J. Brodd, und Akiya Kozawa von Springer Verlag GmbH (Gebundene Ausgabe - Oktober 2007)

(Power Tools, Handys etc.) etablierten Hartrundgehäuse-Technik (s. Abbildung 13) folgende wesentliche Vorteile auf:

- erheblicher Gewichtsvorteil (20 – 30%)
- erhöhte Designrobustheit durch reduzierte Teileanzahl & - Vielfalt
- optimierte Wärmeabfuhr und Kühlmöglichkeit
- erhebliche sicherheitstechnische Vorteile: bei Überhitzung besteht keine Explosionsgefahr, sondern es erfolgt ein kontrollierter Druckabbau durch definiertes Öffnen der Siegelnähte
- vereinfachte Industrialisierbarkeit: der Lagenaufbau ermöglicht eine höhere Prozess-Sicherheit, der Formfaktor des Konzepts ermöglicht eine Design-Varianz bei geringem Investitionsaufwand für Werkzeugänderungen.

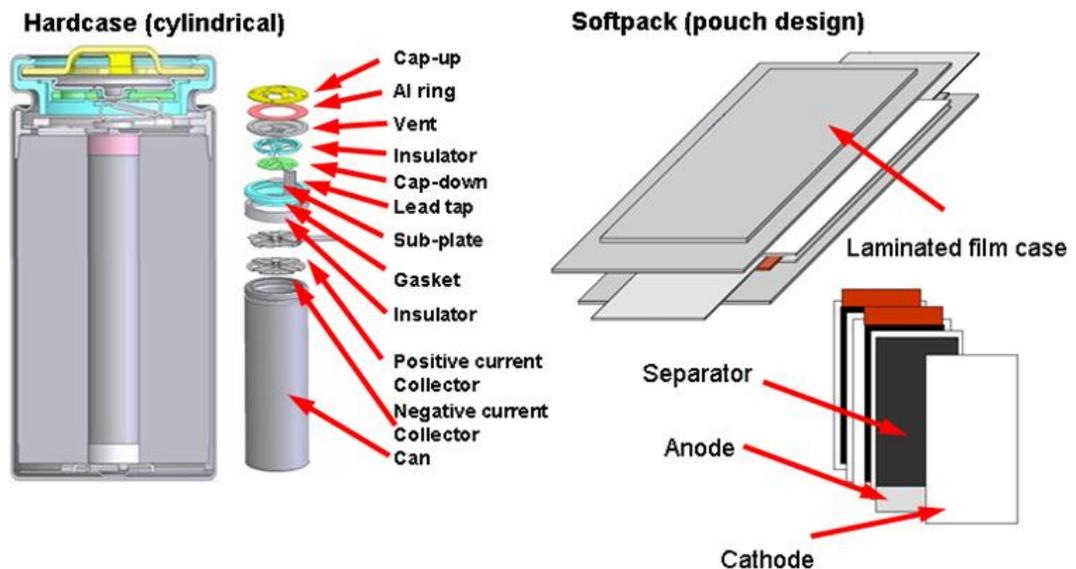


Abbildung 13: Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen

Während bisher die Hartgehäusetechnik für Li-Ionen Batterien sich im Bereich der Consumer-Industrie etabliert hat⁵, findet aktuell für Anwendungen in der Automotive-Antriebstechnik die Softpack- oder auch Pouchzelle ihren Weg in die Marktbesetzung. Die Herausforderung und gleichzeitig Chance für den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland bestehen in der Erarbeitung und Positionierung des neuen Zellformates für die Nutzfahrzeugklasse. Alle bisher gestarteten Aktivitäten in diesem Bereich fan-

⁵ Consumer Industrie = Verbraucher Industrie, , i.d. Unterhaltung, Hobby, Freizeit, d.h. Verwendung keine Fahrzeuganwendung

⁶ Lithium Batteries: Science and Technology - Taschenbuch (13 Januar 2009) von Gholam-Abbas Nazri und Gianfranco Pistoia

den ausschließlich in Kooperation mit asiatischen Herstellern statt (s. LG⁷, Panasonic, A123⁸)

Das Format der Softpackzelle wird u.a. von den Firmen LG (Korea), A123 (USA) und Li-Tec für die Verwendung in automobilen Anwendungen vorbereitet. Von keinem dieser genannten Hersteller ist eine Ausrichtung hinsichtlich von Nutzfahrzeuganwendungen bekannt. Continental hat auf Basis dieses Softpack Zellformates in Zusammenarbeit mit Fa. Enax (Japan) eine Zelle entwickelt. Weiterhin verfügt Continental über die bestehende Minderheitsbeteiligung an Fa. Enax permanent Zugriff auf ein Minimum an Fertigungskapazitäten für Li-Ionen Zellen. Diese sog. „ENAX-Zelle“ ist wirtschaftlich nur für Kleinserien volumina darstellbar.

Im Rahmen des Verbundprojektes ProLiEMo⁹ wird seit Anfang 2009 an Softpack-Zellen geforscht. Im Vordergrund stehen dabei neuartige, industrielle Fertigungstechnologien zur Herstellung von großformatigen Zellen (für PKW-Elektrofahrzeuganwendungen) und deren Komponenten sowie die automatisierte Produktion primär von Zellen, aber auch von Modulen, Batterien- und Batteriebaugruppen.

Im Gegensatz zu ProLiEMo konzentrieren sich die Verbundpartner in FUEL ausschließlich auf Zellen für Hybridanwendungen mit dem Schwerpunkt von Nutzfahrzeuganwendungen. Fertigungstechnologien zur Herstellung von Zellen wurden in FUEL im Gegensatz zu ProLiEMo nicht betrachtet. Gegenstand von FUEL waren vielmehr Produktionstechniken zur optimierten Vor- und Endmontage von Energiespeichersystemen und deren Baugruppen für die Zielanwendung Hybrid-NKW.

3.1.2 Relevante Bauteile und Baugruppen

Ein Schlüsselement der Konstruktion bildet der Bereich ‚thermo-mechanische und elektrische Anbindung der Li-Ionen Softpack-Zelle‘, deren konstruktive Lösung entscheidend für die Herstellbarkeit und die Dauerfestigkeit des Bauteils ist. In allen infrage kommenden Baugruppen-Konzepten und deren Produktionsverfahren spielen die Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), der Hochvoltsicherheit für Luft- und Kriech-

⁷ Link Fa. LG: www.lgchem.com

⁸ Link Fa. A123: www.a123systems.com

⁹ ProLiEMo = Produktionsforschung für Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien für ElektroMobilität. Im Konsortium: Litarion, Li-Tec, Deutsche Accumotive u. Daimler AG

strecken, sowie der mechanisch-/dynamischen Festigkeit eine bedeutende Rolle.

3.1.2.1 Mechanische Bauteile

Für die Konzeption und Entwicklung der Komponenten des Energiespeichers und der fahrzeugseitigen Schnittstellen zum Hybridsystem¹⁰ mussten die mechanischen Baugruppen entwickelt werden, da keine für NKW-Anwendungen geeigneten Komponenten verfügbar waren. Neue Herstellungsverfahren mussten parallel zur Entstehung der Bauteile und Baugruppen entwickelt und validiert werden, um sicher zu stellen, dass die technischen (Funktion) und ökonomischen (Stückzahlen) Anforderungen zu erfüllen sind. Wesentliche Hauptbaugruppen sind dabei das Energiespeicher-Gehäuse und die Tragrahmenstruktur.

Im Vordergrund standen die Erarbeitung eines Konzeptes sowie die Bewertung und Realisierung eines Gehäuses für ein Li-Ionen Energiespeichersystem unter besonderer Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen, z. B. an die Mindest-Temperaturfestigkeit im Brandfall, die elektromagnetische Abschirmfunktion (interne wie externer Strahlung), die mindeste mechanische Strukturfestigkeit (harte Einsatzbedingungen) und das minimale Gewicht.

Um die für alle Hybrid- und Elektrofahrzeuge elementare Randbedingung der Gewichtsminimierung erfüllen zu können, musste bei der Wahl geeigneter Umformtechniken ein Höchstmaß an Umformung und Bauteilprofilierung bei einem Minimum an Blechdicke realisiert werden. Dazu musste das Hydroforming-Verfahren so weiter entwickelt sind, dass die hier angestrebten Stückzahlen ohne Qualitätseinbußen zu erschwinglichen Preisen erreicht werden können. Das Umformen über Hydroforming ermöglicht aufgrund homogener Spannungsverläufe im Bauteil die Konstruktion von wesentlich komplexeren Blech-/Gehäuse-Strukturen als es beispielsweise beim klassischen Umformen / Tiefziehen möglich ist.

¹⁰ Das „Hybridsystem“ umfasst im Wesentlichen die Komponenten Antriebsmotor(en), Leistungselektronik (Spannungswandler, Konverter, Inverter), Energiespeicher(system) sowie die Steuerung, z.B. den „Hybridcontroller“.

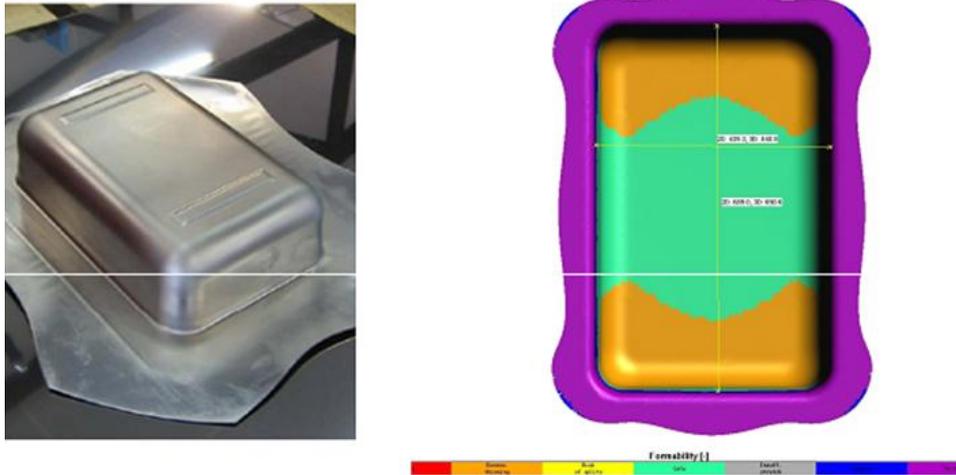


Abbildung 14: Hydroforming - Matrize nach dem Umformprozess (die Geometrie der Außenkante zeigt den Verlauf des nachgeflossenen Werkstoffs) und Analyse des homogenen Spannungsverlaufs im Bauteil.

Continental verfolgte deshalb in FUEL eine Gemeinschaftsentwicklung mit Fa. Fluidforming¹¹/Wesselmann Engineering, die auf der Weiterentwicklung des Maschinenkonzepts HydroformM FP 25 basiert, welches seit 2005 mit bisher 5 Fertigungs-Musteranlagen erfolgreich umgesetzt worden ist. So plante Fluidforming in FUEL sowohl die Optimierung der Prozessparameter bei der Wahl des Innendrucks, der bei Serienfertigungen üblicherweise bis zu 3.000 bar betragen kann, als auch die laserschweißbasierte Nachbearbeitung der Bauteile.

3.1.2.2 900V Steuerungselektronik

1. Elektromechanik-Komponenten für Energiespeicher

Die elektromechanischen Komponenten eines Energiespeichers sind zentrale Elemente für die Funktionalität und die Sicherheit des Energiespeichers. Mit diesen Komponenten wird der Stromfluss innerhalb des Speichers im Betriebsfall gewährleistet, wie auch im Fehlerfall sicher unterbrochen. Aus der Prinzipskizze in Abbildung 15 wird die Komplexität der Verschaltung der Hauptkomponenten mit signal- und hochvoltführenden Teilen deutlich.

¹¹ Verfahren Fa. Fluidforming = Hydroformmaschine FB25, 1. Preis Kategorie Umformtechnik der EURO BLECH'06

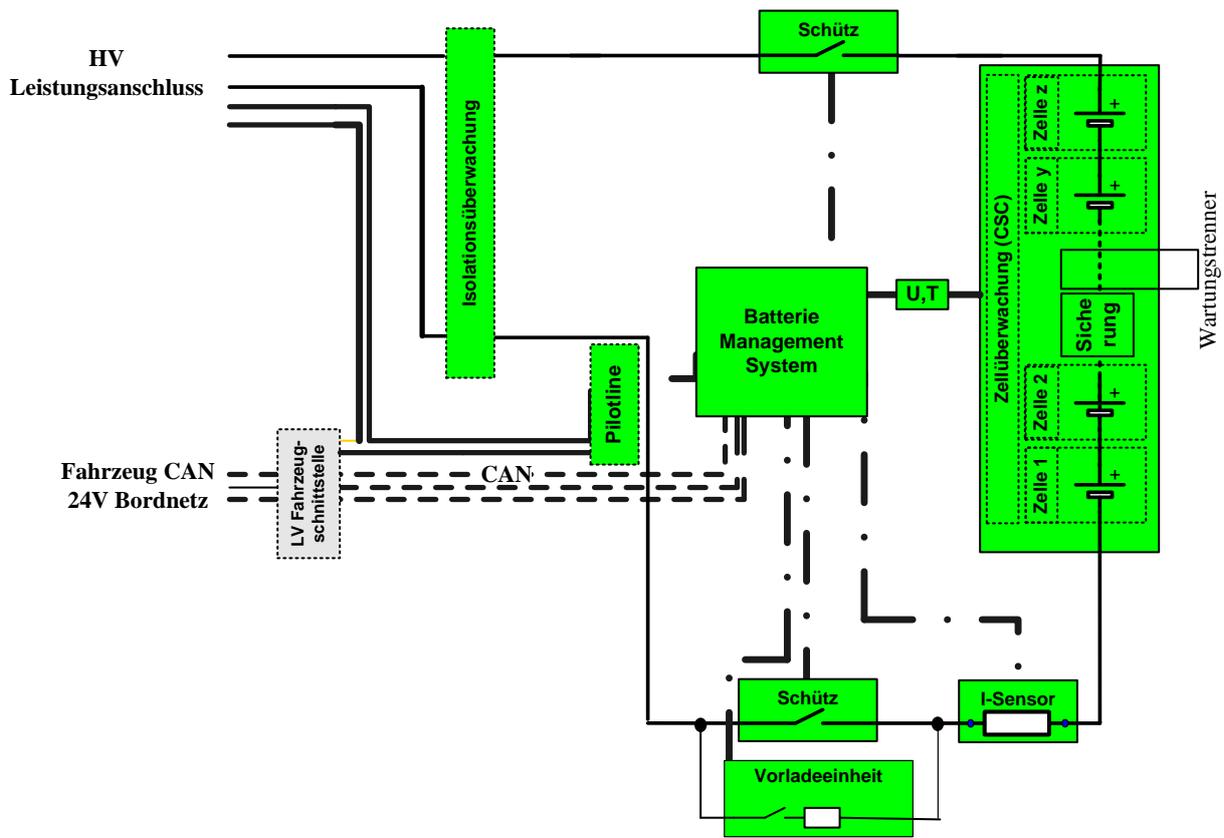


Abbildung 15: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Energiespeichers

Die einzelnen Komponenten sind in den Blockkästen mit ihrer Bezeichnung gekennzeichnet. HV Leistungsleitungen sind mit mittlerer Strichdicke, interne Kommunikationsleitungen in Strich-Punkt Linien dargestellt, die Pilotline in fetter Strichdicke und der Fahrzeug CAN Bus mit Strichlinien.

Die Kernkomponenten des Speichers stellen dabei die in Reihe geschalteten Zellen dar. Diese werden durch die Zellüberwachung (CSC) und dem Batteriemanagementsystem überwacht. Das Batteriemanagementsystem (BMS) ist über einen Kommunikationsbus mit den übergeordneten Fahrzeugsteuergeräten (Fahrzeug CAN) verbunden. Es versorgt sich unabhängig vom Batteriesystem aus dem 24 V Bordnetz des Nutzfahrzeugs. Durch eine Pilotline werden die Schnittstellen zum Fahrzeug hin überwacht. Der HV Leistungsanschluss ist über Schütze und Sicherungen mit den Zellen verbunden. Die Schütze, die Vorladeeinheit, der Stromsensor, die Pilotlinien- und Isolationsüberwachung sind über interne Kommunikationsleitungen mit dem BMS verbunden.

Die Schütze des Energiespeichers stellen einerseits die Potentialtrennung der HV Anschlüsse von den Zellen im Service-, Park- und Crash-Fall sicher, und dienen andererseits zur Abschaltung kleiner Überströme im Fehlerfall. Die Abschaltung größerer Überströme (Kurzschluss) erfolgt über eine Schmelzsicherung. Neben der Abschaltung im Überstromfall werden die Schütze auch zur Abschaltung weitere Fehler eingesetzt, wie Überspannung, Übertemperatur, Isolationsfehler oder geöffneter Pilotline. Die Schütze werden über das Batteriemanagementsystem angesteuert, und sind das zentrale Sicherheitselement des Speichers.

Im Wartungsfall wird an den HV Anschlüssen des Speichers hantiert. Um einen Schutz vor einem elektrischen Schlag oder der Bildung eines Lichtbogens sicherzustellen, ist der Speicher bei der Wartung gegen Wiedereinschalten zu sichern, wozu ein „Wartungstrenner“ eingesetzt wird. Dieser trennt den Strompfad des Speichers mechanisch. Durch diese Trennung wird eine sichere Potentialtrennung der beiden HV Anschlüsse gewährleistet, da beide Pole des Batterieblocks potentialfrei gegenüber dem Batteriegehäuse und der Fahrzeugmasse ausgeführt sind.

Die Elektronikplatine des Batteriemanagementsystems, der Stromsensor, die Schütze und die Vorladeeinheit können zusammen in einem Elektronikmodul vormontiert und dann in den Speicher integriert werden. Da sich die Sicherungen und der Wartungstrenner an einer anderen Stelle im Speicher befinden werden diese Teile zu einem Wartungsmodul zusammengefasst.

Neben den bereits genannten höheren Anforderungen an die Lebensdauer und die mechanische Stabilität werden beim NKW schärfere Bedingungen an das erhöhte Spannungsniveau der elektromechanischen Komponenten als beim PKW geknüpft, die sich mit den bei PKW Speichern üblichen Komponenten bei weitem nicht erfüllen lassen.

Elektromechanik-Komponenten in der 900V Spannungsklasse wurden zum Zeitpunkt des Starts von FUEL ausschließlich für industrielle Anwendungen eingesetzt. Diese Bauteile sind in der Regel sehr schwer und voluminös und erfüllen damit nicht die Bauraumanforderungen, die an einen Fahrzeug-Energiespeicher gestellt werden. Ebenso muss als Voraussetzung für einen Einsatz dieser Bauteile in der geplanten Nutzfahrzeuganwendung eine Qualifizierung für automobiler Anwendungen (Homologation) durchgeführt werden, was letztendlich zu einer Neuentwicklung dieser Bauteile führt.

Folgende Elektromechanik-Komponenten wurden daher im Rahmen von FUEL neu entwickelt:

- Sicherungen für NKW in der 900V Klasse.
- Schütze, wobei die wesentliche Herausforderung an der sicheren Trennung des Stromflusses unter Last und der Auflösung des entstehenden Lichtbogens lag (im Fehlerfall treten Ströme bis 4 kA auf, die Schütze müssen kurzzeitig eine thermische Leistung bis zu 3,6 MW aufnehmen).
- Wartungstrenner für 900V-System (bei Projektstart wurden nur Wartungstrenner für Hybrid- und Elektrofahrzeuge im PKW-Bereich bis 450V angeboten).

2. Systemarchitektur, Steuerungselektronik und Sicherheitskonzept

Die Systemarchitektur adressiert das Ansteuerungskonzept nach der Schaltplan-Skizze (s. Abbildung 15) unter Beachtung der Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen und den daraus abzuleitenden Sicherheitskonzepten. Im Sicherheitskonzept eines NKW-Energiespeichers waren folgende Baugruppen zu berücksichtigen:

- Bi-Pack, Zellmodule: Hochvoltisolation zwischen den Einzelzellen und zur Energiespeicher-Erdung
- Kühlmodule: Hochvoltisolation Kühlmedium (Fahrzeug-Erdung) gegen Energiespeicher-HV-Erdung
- Verschaltung: Isolations-, Luft- und Kriechstrecken-Richtlinien
- Elektronik: Berücksichtigen von Richtlinien und Notschaltfunktion
- Software: intelligente Reaktion auf Fehlerfälle im Abgleich mit dem Schaltungsaufbau der Elektronik (Redundanz-Richtlinien)
- Service-Konzept

3.1.2.3 Zell-Design und Batteriemodul

Lithium-Ionen-Zelle: Bauteilgeometrie, Werkstoffe und Toleranzen

Voraussetzung für die Auslegung von elektrischen Energiespeichern ist die vollständige Charakterisierung der verwendeten Zelltypen hinsichtlich ihrer elektrischen Parameter. Vor dem Hintergrund der langen Lebensdaueranforderung in NKW-Anwendungen besitzt die Bestimmung der elektrischen Parameter und Analyse des Alterungsverhaltens der Einzelzellen eine noch größere Bedeutung als beim PKW.

Zyklische und kalendarische Alterungsuntersuchungen beschreiben die Alterungsvorgänge von Lithium-Ionen-Zellen phänomenologisch anhand von elektrischen Parametern wie Kapazität und Innenwiderstand. Für ein vertieftes Verständnis der Alterungsvorgänge spielt die chemische Degradation des Elektrolyten eine wesentliche Rolle. Eine Minimierung der chemischen Degradation des Elektrolyten trägt dazu bei, die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Zellen zu verlängern, wodurch sich auch alterungsbedingte Effekte, wie z.B. Ausgasung oder Volumenzunahme in den Griff bekommen lassen.

Um die Stabilisierung der Lebensdauer der Einzelzellen im Energiespeicher positiv zu beeinflussen, bietet sich das Prinzip der Ladeumverteilung an. Erste Basiserfahrungen lagen bei Projektbeginn bereits vor, jedoch keine statistisch abgesicherte Erprobung.

Sicherheitsaspekte

Da eine Markteinführung des Formats der Softpack-Zelle für automobiler Anwendungen noch nicht absehbar war, konnten bei Projektstart bzgl. der idealen Zusammenstellung (Schichten und Lagen) noch keine Bewertungen getroffen werden. Die unterschiedlichen Wettbewerber verfolgten hierbei jeweils eigene Konzepte¹².

Das Thema Sicherheit bei Li-Ionen Zellen wird wesentlich durch konstruktive Faktoren beeinflusst: Separatoren mit keramischem Anteil, alternative aktive Kathoden- und Anodenmaterialien und Elektrolyte mit höheren Siedepunkten.

Der Produktionstechnik fällt ganz erhebliche Bedeutung beim Sicherheitsaspekt zu. Dazu gehören Punkte wie: Keine scharfen Schnittkanten, kein Einbringen von metallischen Verunreinigungen, Installation von Absaugvorrichtungen, sehr exakte Elektroden und Separator-Positionierung, Gehäusedichtigkeit und Ableiterdurchführung. Für NKW-Energiespeicher waren die Prozesse weiterzuentwickeln und zu automatisieren.

¹² s.Van Schalkwijk, Besenhard, Jürgen O, Dr. F. Trueb, Kiehne, H. A. (2003), Anderson, Anna S. (2000);

Ladungsumverteilung (active Balancing) für Energiespeicher

Die Energiespeichersysteme werden von einem Batterie-Management-system (BMS) überwacht und gesteuert. Ein wichtiger Bestandteil des BMS ist die „Symmetrierung“¹³ der Einzelzellen im Gesamtsystem, d.h. die Überwachung einer symmetrischen Spannungslage, wofür verschiedene Ansätze verfolgt werden.

Stand der Technik bei Projektstart war die passive Symmetrierung der Einzelzellen (Passive Balancing). Dabei wird die auf die symmetrische Spannungslage bezogene überschüssige Energie mittels Widerständen in thermische Energie umgewandelt und steht somit für den elektromotorischen Antrieb der Fahrzeuge nicht mehr verfügbar. Das aktive Symmetrieren (Active Balancing) der Einzelzellen bietet die Möglichkeit, die Energie umzuschichten, um auf diesem Wege die notwendige symmetrische Spannungslage zu erreichen.

Batteriezustandserkennung

Ein weiterer Schwerpunkt, um das Thema ‚Lebensdauer‘ der einzelnen Li-Ionen Zellen im Energiespeicher für die Nutzfahrzeuganwendung effektiver optimieren zu können, betrifft die Strategie der Batteriezustandserkennung. Ein geeignetes Konzept war auszuarbeiten und die Algorithmen dafür zu entwickeln und zu implementieren.

Für den zuverlässigen Betrieb wird ein intelligentes Akkumulator-Management benötigt, dessen Betriebsführung einen optimalen Kompromiss zwischen hohem Energiedurchsatz und optimaler Lebensdauer der Akkumulatoren gewährleistet. Dies erfordert parallel die Entwicklung von Diagnoseverfahren für Akkumulatoren, die eine hohe Zuverlässigkeit durch die intelligente Kombination verschiedener Methoden und der Berücksichtigung der jeweiligen Teilegenauigkeiten aufweisen. Neben den bewährten Verfahren wie der Ladungsbilanzierung und der Ruhespannungsauswertung kommen auch zukunftsweisende Verfahren in Betracht, welche auf Echtzeit-Modellen zur Bestimmung von Ladungseffizienz und Ruhespannungs-Hysterese basieren.

Darüber hinaus ist die Leistungsvorhersage für die eingesetzten Akkumulatoren eine entscheidende Funktion für die Betriebsstrategie des ge-

¹³ Symmetrierung = Ladungsausgleich zwischen mehreren Zellen eines Energiespeichers

samten Hybridfahrzeugs. Dabei sind Algorithmen mit adaptiven Verhalten (neuronale Netzwerke oder auch spezielle Filtermethoden) zukünftig unabdingbar, bei denen der Algorithmus die Änderungen der Leistungsfähigkeit der Akkumulatoren im Verlauf der Alterung „lernt“ und so auch eine Bestimmung des Alterungszustands (State-of-Health – SOH) als Verhältnis der Batterieleistungsfähigkeit am Anfang und am Ende der Batterielebensdauer erlaubt.

3.1.2.4 Thermomanagement und Kühlsystem

Die Konzeption eines Kühlsystems für Energiespeicher in Fahrzeughybridsystemen ist entscheidend für den Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Li-Ionen Zelltechnik im Speicher. Eine kritische Alterung der Zellen (und damit proportional ein schleichend irreversibler Leistungsverlust) setzt bei Temperaturen $> 60^{\circ}\text{C}$ ein (die ideale Temperatur der Energiespeicher beträgt $< 30^{\circ}\text{C}$). Der Betrieb von Hybridsystemen mit ihren permanenten Lade- und Entlade-Zyklen bewirkt eine Selbsterwärmung der Zellen. Besonders herausfordernd ist dieser Effekt wegen der vielen Start-Stopp-Zyklen bei der in FUEL adressierten Anwendung „Hybrid-Stadtbus“.

Die erforderliche Wärmeabfuhr durch Kühlung muss zentral über ein Thermomanagement des Hybridfahrzeugsystems gelöst werden. Bei Projektstart wurden für die angestrebten NKW-Anwendungen folgende Kühlkonzepte betrachtet:

- Luftkühlung von Nickel-Metallhydrid Batterien bei Allison Hybrid¹⁴: Kühlung der Batterie mittels Umgebungsluft
- Luftkühlung von Li-ion Batterien der Fa. Hitachi bei Eaton Hybrid¹⁵
- Luftkühlung von Li-ion Batterien der Fa. Hitachi bei Mitsubishi Fuso Hybrid¹⁶
- Fluidkühlung von Li-ion Batterien der Fa. Magna bei Volvo Hybrid¹⁷: Kühlung der Batterie mit Kühlflüssigkeit, die in einem konventionellen Wasser/Luft-Kühler gekühlt wird
- Fluidkühlung von Li-ion Batterien der Fa. Saft bei EVO Hybrid (mit Kälteanlage zur Gewährleistung der Unabhängigkeit von der Umgebungsluft)

¹⁴ Link Fa. Allison: www.allisontransmission.com

¹⁵ Link Fa. Eaton Hybrid: www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid

¹⁶ Link Mitsubishi-Fuso: www.mitfuso.com

¹⁷ Link Volvo: www.volvo.com/bus/global/

Unter Berücksichtigung aller Anforderungen der in einem Hybridsystem zu kühlenden Komponenten muss eine Gesamtlösung gefunden werden. Da bereits für die Leistungselektronik ein Kühlsystem <60°C benötigt wird, liegt es nahe, dies auch für die Batterie mit zu verwenden. Ein Kühlsystem in Kombination mit einer Kälteanlage wird nur zum Einsatz kommen, wenn die Schädigung der Batterie die Nachteile solch einer komplexen Lösung rechtfertigt. Nachteile sind im Wesentlichen der Energieverbrauch des Kompressors, Gewicht, Einbauraum und Anschaffungskosten.

3.1.2.5 Software-Architektur und Funktionalität

Zur Ansteuerung und Überwachung jedes einzelnen Energiespeichers wird ein Steuergerät mit einem Batterie-Management-Controller (*BMC*¹⁸), einer Zellüberwachungselektronik (*CSC*)¹⁹ und einem Strom-Messmodul (*ISA-Modul*) eingesetzt. Dieses Steuergerät ist ein zentrales Element, sowohl für die Funktionalität wie auch die Sicherheit des Energiespeichers. Mit Hilfe der Software, die auf dem BMC zur Verfügung steht, werden die Systemkomponenten so angesteuert, dass der Stromfluss innerhalb des Speichers im Betriebsfall gewährleistet wie im Fehlerfall sicher unterbrochen wird.

Die Zellüberwachungselektronik ermittelt alle Einzelzellspannungen, misst mittels Sensoren die Temperaturen von Zellgruppen, übermittelt die Messdaten zum potentialgetrennten BMC und führt vom BMC initiierte Zellsymmetrierung (Vorgang zum Ladungsausgleich) aus. Die Software auf dem BMC kommuniziert mit der Überwachungselektronik und dem Strom-Messmodul. Durch die Kommunikation mit der CSE werden Überwachungsmessungen initiiert, die im BMC ausgewertet werden, und die Zellsymmetrierung auslöst.

Aufgrund der optionalen seriellen oder parallelen Verschaltung von 2 bis 4 Speichersystemen müssen auch die beiden BMCs miteinander synchronisiert werden, kommunizieren und Messdaten austauschen. Da sich das System nach außen als eine Einheit darstellen soll, fungiert ein BMC als Master, der die Kommunikation mit dem Fahrzeug übernimmt. Üblicherweise setzt sich die Software des BMC aus der Basissoftware - unterteilt in „Microcontroller-Abstraction Layer“ (*μCAL*) und „Control Unit Abstraction

¹⁸ BMC = Batterie-Management Controller

¹⁹ CSC = Cell Supervisory Circuit, Zellüberwachungselektronik

Layer²⁰ (ECUAL), der Energiespeicher-Managementapplikation sowie dem Batterie-Kernel²¹ (Verwaltung der Batterie-Kenngrößen) zusammen.

3.1.2.6 Systemintegration und Speicherverwaltung

Integration in das Hybridsystem

Dies beinhaltet die Entwicklung eines Konzeptes zur Integration der Batterie und des Kühlsystems in ein Fahrzeughybridsystem, wobei sämtliche Schnittstellen (Hardware und Software), sowie das Kommunikationskonzept festgelegt werden. Einen wesentlichen Schwerpunkt stellte die Integration in das Sicherheitskonzept des Hybridsystems dar.

Speicherverschaltung

Dem Konzept der Speicherverschaltung fällt wesentliche Bedeutung in einer überzeugenden Systemarchitektur zu. Großes Potential für skalierbare Hybridsysteme wurde in der Serienschaltung und modularisierten Parallelschaltung gesehen.

Der ursprüngliche Grundansatz eines Energiespeichersystems für den leichten 7,5t Verteiler-LKW (60kW Leistung, 450V Systemspannung) sollte über eine serielle Verschaltung von zwei Speichern auf die leistungsstärkere Anwendung des Stadtbusses (120kW, 900V Systemspannung) weiter entwickelt werden. Um auch Märkte für Fahrzeug-Hybridsysteme mit Energiespeichern erhöhten Energieinhalts zu erschließen, sollte der Ansatz der modularisierten Parallelschaltung von Speichern (z.B. für schwere Stadtbusse) verfolgt werden. Dieser bietet den Vorteil, dass auch längere Fahrstrecken im rein elektrischen Modus zu bewältigen sind, z.B. in verkehrsberuhigten Bereichen oder in Fußgängerzonen.

3.1.2.7 Service-Konzept

Um eine Komponente am Markt etablieren zu können, muss über das Angebot eines qualitativ hochwertigen Produktes hinaus auch der sogenannte „After Sales Service“ geboten werden. Hierzu gehören gute Beratung bei der Inbetriebnahme, ein kompetenter und schneller Reparaturservice, wie auch ein Rücknahme-Konzept am Ende der Lebensdauer. Um diesen Anforderungen auch bei Lieferung von Hochvolt-Batterien in

²⁰ Layer = Ebene, d.h. Software zur Beschreibung des Aufbaus verwendet

²¹ Batterie Kernel = Verwaltung der Batterie-Kenngrößen

Hybridsystemen gerecht zu werden, müssen umfangreiche Dokumente wie z.B. Betriebsanleitung, Ersatzteilkatalog, Diagnoseanleitung, Reparaturhandbücher und Vorschläge zur Werkstattausstattung erstellt werden.

Für die Möglichkeit der Reparatur einer defekten Lithium-Ionen-Batterie müssen alle ausfallträchtigen Komponenten der Batterie definiert und als Ersatzteil/Reparaturkit eingeführt werden. Diese Komponenten müssen auf ihre De- und Montierbarkeit mittels Probemontagen untersucht werden, was zum Teil enorme Auswirkungen auf das Produktionsdesign haben kann, da durch diese Anforderung gewisse Produktionstechniken ausgeschlossen bzw. angewendet werden müssen. Abschließende Prüfungen nach Norm mit den entsprechenden Prüfgeräten mussten ausgearbeitet werden.

3.1.3 Produktionstechnik

Wesentlich für den Umfang der Entwicklung der Fertigungsprozess-Schritte von der Bi-Pack-Montage, zur Zellmodul-Montage und der nachfolgenden Endmontage des Energiespeichers ist die Erkenntnis, dass der gewählte Produktionsprozess in Volumen und Komponentendimension variabel sein muss, und bisher für die Verwendung des Softpack-Zellformates als Ausgangsbau teil für eine Energiespeicherkonstruktion weltweit auf keine Erfahrung zurückgegriffen werden kann. Erste automobiler Serienanwendungen (bei PKW: Hybrid- und Elektrotraktion, bei NKW: Hybridtraktion) mit diesem Zellformat befanden sich bei Projektstart noch in der Entwicklungsphase.

3.1.3.1 Montageverfahren zur Herstellung der Bi-Pack Zellverbunde

Energiespeichersysteme auf der Basis von Li-Ionen-Zellen haben einen relativ komplexen Aufbau, der mit den bisher etablierten Starterbatterien auf Blei-Säure Basis keine Gemeinsamkeiten mehr besitzt. Neben zahlreichen ungelösten technischen chemo-physikalischen Grundlagenproblemen besteht die wesentliche technische Herausforderung in den Montageprozessen der einzelnen Bauteile, wie z.B. die Li-Ionen Zellen, deren Kühlbleche, Wärmetauscher zur Flüssigkeitskühlung, Überwachungselektroniken und diverse mechanische Strukturbauteile (siehe Abbildung 16). Die Basis dieses Aufbaukonzeptes bildet die Softpack-Zelle. Ihre mechanische und elektrische Anbindung stellt besondere Anforderungen an die Konstruktion des betroffenen Bauteils, wie auch an die Definition der ausgewählten Montage- und Fügeprozesse.

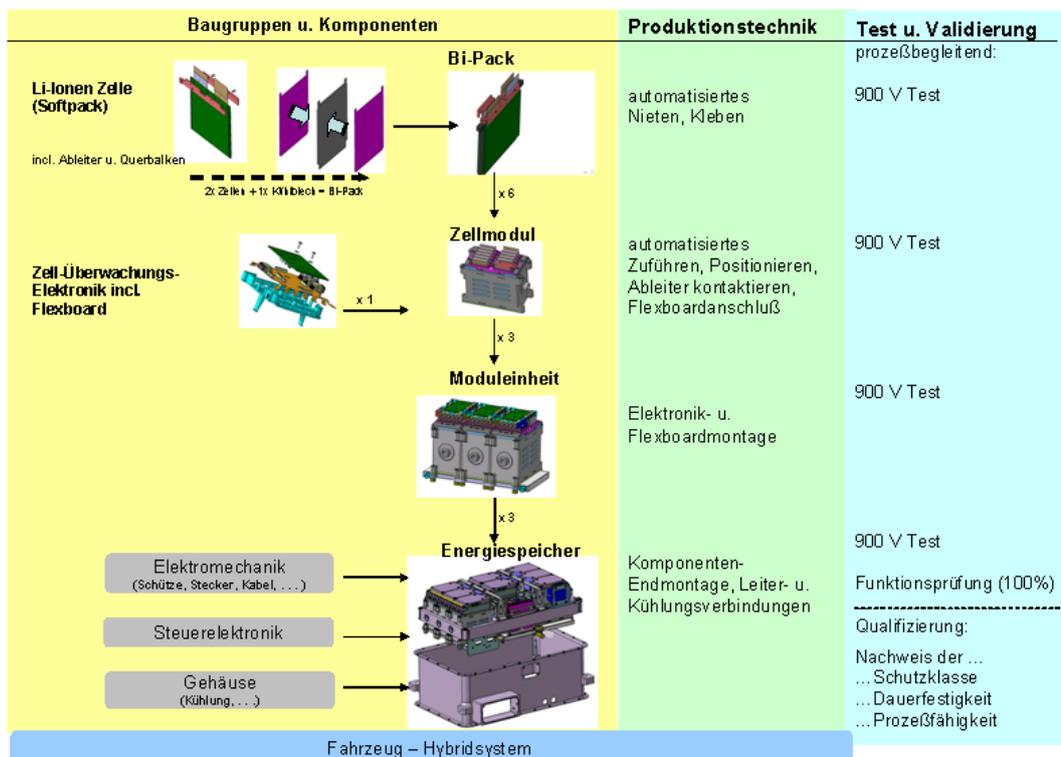


Abbildung 16: Darstellung der Montager Reihenfolge: von der Einzelzelle zum Energiespeicher

Erschwerend wirkte sich der Sonderumfang für die ausgewählten Demonstrator-Anwendungen aus: der im Verbundprojekt geplante Einsatz von Li-Ionen Softpack-Zellen für Nutzfahrzeuge war bei Projektstart weder aus potentiellen Serienanwendungen von Wettbewerbern abzuleiten, noch wurden Konzeptstudien veröffentlicht. Diese Situation erforderte eine gleichzeitige Neuentwicklung von Montage- und Fügeprozess-Abläufen. Sollte demnach die Validierung Probleme aufzeigen, war nicht auszuschließen, dass dies auch eine Anpassung des Verfahrens oder eine Designänderung der betroffenen Bauteile nach sich zieht. Bei der gesamten Projektdurchführung war somit ein hohes Maß an „Simultaneous Engineering“ gefordert.

Grundlegende Notwendigkeit der Zellbefestigung

Zellen und Batterien müssen den mechanischen und dynamischen Anforderungen der Automobilindustrie genügen, wobei es unumgänglich ist, die Zellen vor inneren und äußeren Erschütterungen zu schützen. Sie müssen deshalb in oder an ihren umgebenden Tragstrukturen befestigt werden,

um fahrzeugbedingte Impulse und Schwingungen auszugleichen und zu verhindern, dass die Zelle an andere Bauteile stößt.

Wie in Abbildung 17 zu sehen, werden die Anoden (aus Kupfer) mit einem Ableitertab (auch aus Kupfer) verbunden. Gleichfalls werden die Kathoden (Aluminium) mit einem Aluminium Ableitertab verbunden. Diese beiden Ableitertabs ragen aus der verschweißten Zelle heraus. Die äußere Zellgeometrie (im Wesentlichen Länge, Breite, Dicke) hängt demzufolge von den Erfordernissen des nachfolgenden Kontaktierungs-Verfahrens ab.

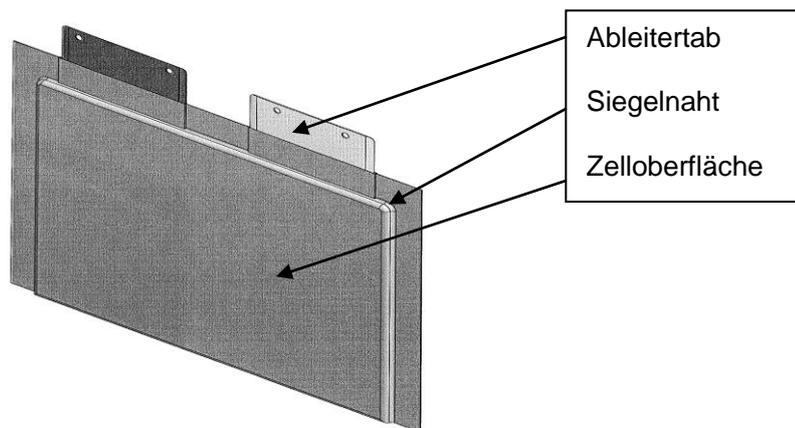


Abbildung 17: Äußere Zellgeometrie: Kontaktierungs- & Anbindungselemente

In der technischen Anwendung als Batterie werden mehrere Zellen so miteinander verbunden, dass jeweils der Pluspol der nachfolgenden Zelle mit dem Minuspol der vorherigen Zelle verbunden wird, was eine exakte Positionierung und Fixierung voraussetzt. Dafür bieten sich 3 Möglichkeiten an: Befestigung an der Zelloberfläche, Befestigung am Zellrand (Siegelnaht) und Befestigung an den Zelltabs. Alle genannten Varianten werden in PKW-Anwendungen verfolgt und innerhalb von Entwicklungsprojekten erprobt, was aber zum Zeitpunkt des Projektstarts keine Rückschlüsse auf Tendenzen, geschweige denn auf Lösungen in NKW-Bereich erlaubte. Daher wird zunächst auf den Stand der Technik der Zellbefestigung bei Start von FUEL eingegangen.

Klebeverfahren und Klebemittel

Auf dem Gebiet der Klebebänder ist einer der führende Hersteller 3M Deutschland GmbH aus Neuss mit großer Erfahrung in der Entwicklung elektrisch leitender und wärmeleitfähiger Klebebänder. Bei Projektstart waren deren spezifische Merkmale wie hohe Dauerfestigkeit, gute Wärmeleitfähigkeit und elektrische Isolation für den NKW-Einsatz allerdings noch

unzureichend. Auch musste die Dicke des Klebefilms auf $t=50$ bis $100\mu\text{m}$ verringert werden. Ein weiterer Anbieter von Klebtechnologien ist die Firma Biolink GmbH²², die in vielen Bereichen Hochleistungs-Klebeverbindungen anbietet.

In einem ersten Schritt mussten geeignete Klebeverfahren und Klebemittel identifiziert werden, welche die Anforderungen an Haltbarkeit, Wärmeleit- und Isolationsfähigkeit erfüllen, wobei insbesondere die letztgenannten schwer zu vereinbaren sind. Mittels einer einleitenden Markt- und Verfahrensanalyse wurden erste Parameter der geeigneten Klebe- und Reinigungsverfahren ermittelt und die Vor- sowie Nachteile der verschiedenen Klebe- und Reinigungsverfahren in eine Wirkflächenanalyse gegenübergestellt und bewertet.

Die notwendige Klebeschicht darf nicht mehr als $50\mu\text{m}$ bis $100\mu\text{m}$ dick sein, um noch ausreichende Wärmeleitung zu gewährleisten. Eine derartige Klebeverbindung setzt besondere Ansprüche an die Reinheit der zu verklebenden Komponenten voraus. Bei Reinigungsverfahren ist von Bedeutung, eine Lithium-Ionen-Zelle so zu säubern, dass die aktivierte Oberfläche für die Klebeverbindung geeignet ist, aber eine Beeinflussung der Zelle durch Wärme oder andere Energien ausgeschlossen bleibt.

Die Problematik des Verklebens wird im Patent für das Verkleben von Leiterplatten mit Polymermaterialien²³ beschrieben, wobei eine hitzeaktivierbare Klebefolie mit Dicke $t=5$ bis $100\mu\text{m}$ unter Druck und/oder Vakuum aufgebracht wird. Die Schwierigkeiten des Aufbringens von sehr dünnen Klebefilmen aus hitzeunempfindlichen Materialien werden dabei verdeutlicht.

Reinigung der Klebeflächen

Die zur Reinigung der in FUEL verwendeten Werkstoffe benötigten Verfahren waren prinzipiell bereits bei Projektstart bekannt. Eine Besonderheit des Reinigungsprozesses besteht allerdings darin, dass eine der zu behandelnden Oberflächen eine - auf 30% ihrer Kapazität geladenen - Lithium Ionen Zelle ist, was die Entwicklung oder Anpassung der Methodik erfordert. Die Oberfläche der Zelle und die Außenhaut aus einer Aluminium-Verbundfolie sind empfindlich und können nicht mit Bürst- oder

²² <http://www.biolink-tapes.com>

²³ (DE102008006390A1) tesa AG, Hamburg

Nassreinigungsverfahren behandelt werden. Im Rahmen einer Dissertation führte Dr. Ralf Hose an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig eine entsprechende Untersuchung der Oberflächenreinigung mit einem Nd-YAG-Laser durch, wobei eine gute Reinigungswirkung und Oberflächenstruktur erzielt wurden. Zur Erweiterung des Erfahrungsportfolios auf verschiedenen Materialarten und höhere Prozessgeschwindigkeit waren weitere Versuche notwendig.

3.1.3.2 Verbindung der Zelleiter (Hauptstrompfad)

Ausschlaggebend für die Funktion der Batterie ist die Zellverbindungstechnik. Um die dauerhafte Sicherheit des Kontakts zwischen den Zellen zu gewährleisten, ist eine stoffschlüssige Verbindung notwendig, wofür folgende Verfahren in Frage kommen: Laserschweißen, Widerstandsschweißen, Schrauben, Toxen/Clinchen (stoff- wie formschlüssige Fügeverfahren). Die Ableiter bestehen aus vernickeltem Kupfer (Anode) und reinem Aluminium (Kathode). Um die notwendige Spannungslage und Kapazität zu erreichen, werden Zellen parallel und seriell verschaltet, wofür bis zu 4 Tabs an einer Stelle in Ultraschallschweißtechnik miteinander verbunden werden, was bereits an einer Musteranlage demonstriert wurde²⁴. Über die Lebensdauer der Batterie muss gewährleistet sein, dass der Kontaktwiderstand sich nicht wesentlich erhöht, da sonst Hotspots zu Bränden führen können.

Auswahl geeigneter Fügeverfahren

Zum thermischen Schutz der Zellen während der Herstellung muss der Wärmeeintrag durch die Verbindungstechnik eng begrenzt werden, um die empfindliche Siegelnaht der Zelle im Bereich der Ableiterdurchführung (Tab) nicht zu beschädigen. Da die Toleranzgrenze für Li-Ionen Zellen bei ca. 60°C liegen, kommen Löt- oder ähnliche Verfahren nicht in Betracht. Dies gilt auch für „Toxen“ und „Clinchen“ als form-/kraftschlüssige Verbindungen, da es in dem Kontakt-Übergangsbereich zu einer undefinierten Erhöhung der Widerstandes und damit zu einem Wirkungsgradverlust kommen kann.

²⁴ Erkenntnisse aus Continental Untersuchungen

Laserschweißen

Die Erfahrungen bei Projektbeginn zeigten, dass die beiden zu fügenden Materialien infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit mittels Laserschweißen nur schwer zu verbinden sind, da dadurch mehr thermische Energie eingetragen wird als die Lithium Ionen Zelle verträgt. Dezidierte Ergebnisse hierzu lieferte das vom BMBF bis 2006 geförderte Forschungsprojekt „Optische Technologien zur Herstellung mikrotechnischer Produkte aus artungleichen Materialien“²⁵. Erkenntnisse der beiden Hersteller von Laserschweißanlagen Fa. Trumpf und Fa. Rofin belegten, dass solide Aussagen zu Fügeverbindung nur über Versuche möglich sind.

In der Dissertation von Dr. Kilian Klage, Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen, wurde die Untersuchung zum Laserschweißen von ungleichen Metallen vertieft, wobei sich zeigte, dass die Materialstärken unter 0,5 mm liegen müssen, um überhaupt eine Verbindung zu erreichen. Darüber hinaus waren weitere umfangreiche Untersuchungen mit den Parametern der Laserquellen, Strahlstärken und Vorschüben notwendig, um weitere Erkenntnisse über die Machbarkeit zu erzielen.

Ultraschallschweißen

Zur Optimierung des Innenwiderstands des Batteriesystems ist der Zell- und Kontakt-Widerstand (z.B. Systeme mit 96 Zellen -> 192 Kontakte) gering zu halten. Das Ultraschallschweißen (US-Schweißen) bietet hierfür gute Voraussetzungen, da keine Schweißnaht mit eingeschränktem Querschnitt, sondern eine stoffschlüssige Kontaktfläche entsteht. Bei Ableitern von 50 mm Breite ergibt sich mit einer 4 mm breiten Sonotrode eine 200 mm² große Kontaktfläche (s. Abbildung 18), die sowohl über gute mechanische als auch elektrische Eigenschaften verfügt. Zum Ultraschallschweißen werden die Tabs auf einem Amboss übereinander gelegt und dann der Schwinger (Sonotrode) auf den Amboss aufgesetzt. Durch Anregung der Sonotrode und bei hinreichend hoher Pressung werden die Tabs verschweißt.

²⁵ Schlussbericht, vom 31. Januar 2006, Fraunhofer Institut für Lasertechnik

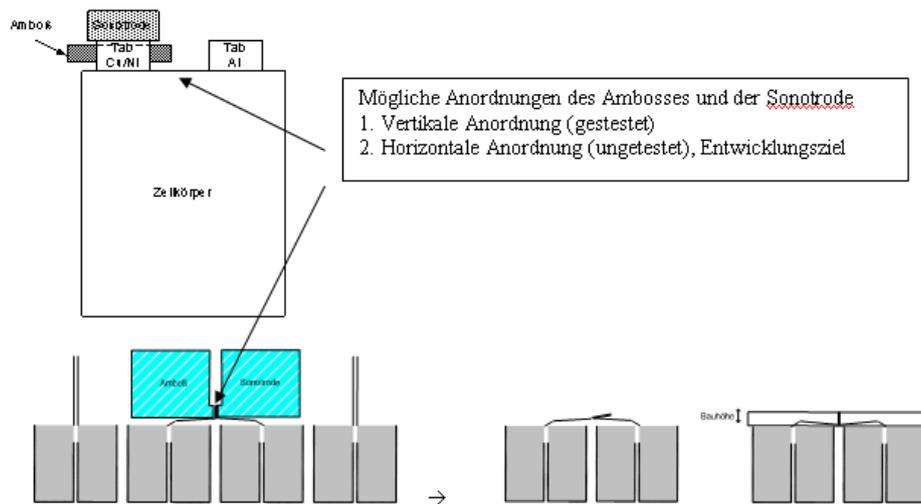


Abbildung 18: Prinzipdarstellung Ultraschallschweißen, Anordnung Sonotrode u. Amboss



Abbildung 19: Nahaufnahme einer kontinuierlichen Ultraschall-Schweißung bei gleichen Materialien

Das Fügen der beiden Materialien mit Hilfe von Ultraschall wurde an der Otto von Guericke Universität in Magdeburg im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Projektes²⁶ untersucht und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS unterstützt. Das Ergebnis dieser Arbeiten zeigte, dass das Fügen der unterschiedlichen Materialien grundsätzlich möglich ist, aber anwendungsspezifische Sonotroden und Ambosse voraussetzt. Für die Ultraschallverfahren wurden als führende Anbieter die Firma Schunk Sonosystems GmbH²⁷ und die Firma Branson Ultraschall Technik²⁸ in Betracht gezogen.

²⁶ Aif-Nr. 1294/BG DVS-NR. 1.028

²⁷ <http://www.sut.biz>

²⁸ <http://www.branson.de> (Ultrastream für NE Metalle zulässige Folien 20µm bis 1mm)

Continental kooperierte schon vor FUEL mit *Schunk Sonosystems GmbH*, einem der führenden Anbieter für derartige Technologien - und konnte bereits in Machbarkeitsuntersuchungen die grundsätzliche Durchführbarkeit nachweisen, was aber noch keine Aussage zur der Prozessfähigkeit erlaubte. Im Rahmen von FUEL wollte Continental weitere Ansätze zum Ultraschallschweißen für Zellelektroden erarbeiten und beabsichtigte, den erfolgversprechendsten Ansatz in Richtung Prozessfähigkeit weiterzuentwickeln.

Klemmverbindung

Alternativ zu den stoffschlüssigen Verbindungen war eine patentierte Klemmverbindung (DE 202008012441U 2009.04.23) der Hoppecke Advance Battery Technology GmbH denkbar. Die abgebildete Klemmverbindung ist zwar speziell für Lithium-Ionen-Flachzellen entwickelt worden, erschien aber nur bedingt geeignet, da die Wartungsfreiheit über die Lebensdauer nicht gewährleistet ist.

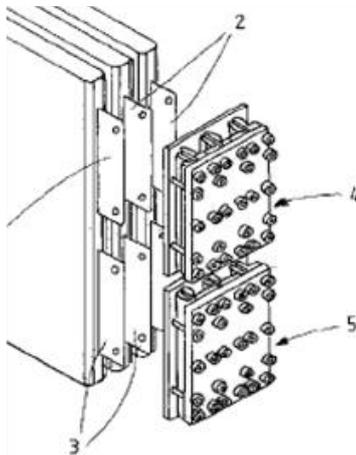


Abbildung 20: Klemmverbindung der Fa. Hoppecke

Produktionswirtschaftlichkeit und Prozessfähigkeit

Vor dem Hintergrund einer zur erwartenden Produktionsmenge von ca. 20.000 Speichersystemen / Jahr ergibt sich für den Montageablauf der Bi-Packs eine Jahresstückzahl von ca. 1 Mio Einheiten, was eine vollautomatische Fertigung erfordert. Da vor diesem Hintergrund die Anforderungen an Prozessstabilität und –sicherheit große Bedeutung erlangen, sollte im Rahmen von FUEL die Konzeption eines solchen Fertigungsablaufes mit betrachtet werden.

3.1.3.3 Montage der Zellmodule

Zellmodule als zweite Integrationsstufe nach dem Bi-Pack sind hinsichtlich Ihrer Funktion mit Gehäusen herkömmlicher Batterien vergleichbar. Ihre Aufgabe besteht in der mechanischen Aufnahme der Batteriezellen und in dem Schutz vor übergroßen statischen und dynamischen Kräfteinwirkungen. Konstruktive Lösungen für Zellmodule, welche aus Softpackzellen bestehen, existierten bei Projektstart FUEL noch nicht. In bekannten Batterietypen wie Blei-, NiCd / NiMH- und Alkalimanganbatterien finden im Kunststoffgehäuse Verwendung, mit und ohne zusätzlichen Verguss (s. Abbildung 21).



Abbildung 21: Gehäusevariante klassischer Batterien (Kunststoff mit u. ohne Verguss, Teilverguss)

3.1.3.4 Flexboard-Montage

Das Flexboard ist funktionsbezogen ein Zwischenelement, das die starren robusten Zellableiter mit der Zellüberwachungselektronik (CSC) verbindet. Eine direkte Kontaktierung von Elektronik und Zellableiter ist technisch bedingt möglich, lässt sich aber aufgrund verschiedener Leiterquerschnitte nicht dauerhaft darstellen.

Dieses Problem wird durch das Flexboard gelöst, welches zu beiden Anbindungsseiten die erforderlichen, unterschiedlichen Querschnitte aufweisen kann und zusätzlich als Ausgleichselement kritische mechanische Spannungen der Zellableiter von den Leiterplatten der Elektronik fern hält.

Hierbei leitet das Flexboard die Strom- und Spannungsabgriffe von den Zellen an die Überwachungselektronik weiter. Über die geforderte Lebensdauer bestehen hohe mechanische Anforderungen (Dauerfestigkeit) sowie thermo-elektrische Anforderungen (erhöhte Leitungswiderstände infolge der Querschnittsänderungen) an diese Verbindungen, die über die gefor-

derte Lebensdauer gewährleistet werden müssen. Im Rahmen von FUEL sollte die optimal geeignete Verbindungstechnik für die Montage der Flexboards ermittelt und in einer Produktionseinrichtung umgesetzt und erprobt werden.

3.1.4 Test- und Validierungsverfahren für Produktionstechniken und Baugruppen

Zur Abschätzung des Innovationsgrads einer Energiespeicheranwendung im Bereich Nutzfahrzeuge ist der Vergleich zu Anforderungen bekannter PKW-Anwendungen aussagekräftig. Um allerdings ein komplettes Bild zu erhalten, sind die entsprechenden Prüfanforderungen und -abläufe in die Betrachtung mit einzubeziehen. Testverfahren und Konzepte fertigungsbegleitender Qualitätsprüfungen einschließlich der erforderlichen Prüfeinrichtungen waren bei Projektstart nicht verfügbar und mussten in Fuel entwickelt werden.

3.1.5 Patentsituation zu Energiespeichern für Nutzfahrzeug-Anwendungen

Zur Vollständigkeit der Darstellung des wissenschaftlich-technischen Standes bei Projektstart von FUEL wird noch kurz auf die Patentsituation eingegangen. Tabelle 3 fasst die Speichersystemtechnologien für Hybrid-systeme für Nutzfahrzeuganwendungen zusammen. Beim Projektstart von FUEL waren für NKW-Anwendungen 3 elektrische Energiespeichertechnologien am Markt verfügbar:

- *Doppelschichtkondensatoren (UltraCaps)*
Diese haben den Vorteil von hoher Zyklenstabilität und somit langer Lebensdauer, allerdings ist der Energieinhalt im Vergleich zu Batterien sehr begrenzt. Weitere Nachteile sind hohes Gewicht und Volumen. Diese wurden daher als nicht zukunftsfähig angesehen.
- *Nickel-Metall Hydrid (NiMH) Batterien*
Diese Technologie war aktuell verfügbar, und wurde vor allem von der Fa. Panasonic auch in NKW-Applikationen eingesetzt. Nachteile sind geringere Energie- und Leistungsdichte als bei Li-Ionen Batterien und somit auch hohes Volumen und Gewicht. Diese Speicher sind für deutsche Firmen kaum zugänglich, da enge Kooperationen mit amerikanischen Firmen bestehen.

- *Li-Ionen Technologie*

Dieser Technologie wird allgemein das größte Zukunftspotential eingeräumt, da sich hier Zyklenstabilität, hoher Energieinhalt und Leistungsdichte in bisher bester Kombination vereinen. Diese Technologie wird weltweit weiterentwickelt und vor allem auch in PKW-Hybrid Applikationen eingesetzt (z.B. Daimler S-Klasse Hybrid).

Wettbewerber	Anwendung	Zell- / Speicher- technik	Energiespeicher- Lieferant
Fa. Eaton (USA)	Verteiler Lkw / Parallelhybrid	Li-Ionen	Fa. Hitachi (Japan)
Fa. BAE Systems (USA)	Verteiler Lkw / Parallelhybrid	Li-Ionen (LiFePO ₄)	Fa. A123 Systems (USA)
Fa. Allison (USA)	Stadtbus und Verteiler Lkw / leistungsverzweigter Hybrid	Nickel-Metall-Hybrid (NiMH)	Fa. Panasonic (Japan)
Fa. ISE (USA)	Stadtbus / serieller Hybrid	Doppelschicht-Kondensatoren (UltraCaps)	Fa. Maxwell (Schweiz/USA)
Fa. Voith (D)	Stadtbus / Parallelhybrid und serieller Hybrid	Doppelschicht-Kondensatoren (UltraCaps)	Fa. Maxwell (USA)

Tabelle 3: Technologievergleich Speichersysteme Hybrid NFZ Anwendungen

Das FUEL Konsortium hat bereits frühzeitig die Wichtigkeit der oben genannten Detailspekte erkannt und im Vorlauf bereits erste Patentansprüche formuliert & eingereicht. Im Wesentlichen wurden folgende Bereiche abgedeckt: konstruktive Lösung eines Energiespeicheraufbaus für Nutzfahrzeuganforderungen, der Bi-Pack Aufbau, Befestigung von Zellen, die Konzeption der Zellmodule, mechanische Unterbaugruppen des Energiespeichers wie Kühler- / Wärmetauscher, Gehäuse, Hochvoltkabel-Auslegung, Verschaltungsvarianten, Verfahren zur Ableiterkontaktierung.

Darüber hinaus wurde eine ausführliche, professionelle Patentrecherche sämtlicher Baugruppen des Batteriespeichers über einen externen Dienstleister durchgeführt. Dabei wurden insbesondere der Batteriesystemaufbau, der Batterieaufbau und der BMC Kernel betrachtet. Als Ergebnis dieser Studie ist davon auszugehen, dass die recherchierten Patente das Projekt FUEL - wenn überhaupt - nur in äußerst geringem Maße behindern können. Die betroffenen Kernbereiche sind bereits durch Eigenanmeldungen der Verbundpartner gesichert, so dass einer Verwertung der Ergebnisse im Anschluss an das Forschungsprojekt nichts im Wege steht.

3.2 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektende

Der wissenschaftlich-technische Stand bei Projektende ist zu allen in Abschnitt 3.1 genannten Themen sehr detailliert in Kapitel 5 dieses Berichts dargestellt. Wie dort detailliert erläutert, stieß man bei einigen Themen während der Realisierungsphase des FUEL Energiespeichers auf unerwartet hohe Schwierigkeiten. Um diese zu lösen, wurde ein Redesign des Energiespeichers erforderlich (auf die Redesign-Maßnahmen zum BF3 Stand wird in Abschnitt 4.2.3 eingegangen), das eine Projektverzögerung nach sich zog.

3.2.1 Zusammenfassung des technischen Standes bei Projektende

Der in den einzelnen Arbeitspaketen (d.h. Themenbereichen) erzielte Fortschritt durch FUEL wird bereits an dieser Stelle des Berichts kurz zusammengefasst:

Arbeitspaket 1: Komponenten für NKW-Energiespeicher

Von den insgesamt 7 vorgesehenen Themenbereichen konnten 6 planmäßig in der Machbarkeitsprüfung bearbeitet werden. Die Umsetzung der Konstruktion sowie der Demonstratoraufbau erfolgten verzögert. Als Ursachen für die Verzögerungen sind Qualitätsprobleme beim Lieferanten anzuführen. Seitens Continental lagen bei Projektbeginn nicht ausreichende Kenntnisse für die Auslegung und Beherrschung der speziellen NKW-Anforderungen vor. Die Wechselwirkung zwischen der konstruktiven Bauteilauslegung und den fertigungsbedingten Festigkeitswerten bzw. Toleranzen trat erst bei der Erprobung hervor.

Nach dem Projektende von FUEL sind weitere Änderungen an Schlüsselbaugruppen erforderlich, um alle NKW-Anforderungen erfüllen zu können.

- Dies betrifft u.a. das bereits erwähnte Thermo-/Kühlmanagement mit der Notwendigkeit des Redesigns zum BF3. Das Thermo-/Kühlmanagement für Energiespeicher für die 7,5to LKW-Anwendung konnte gut gelöst werden. Allerdings muss für die Hybridbus-Anwendung infolge der hohen thermischen Belastung durch viele Start-Stopp-Zyklen das Thermomanagement nach Projektende von FUEL noch weiterentwickelt werden.

- Weiterhin arbeitet der in FUEL entwickelte Energiespeicher momentan sehr gut im Bereich zwischen 100% und 70% State-of-Charge, in FUEL angestrebt war aber der Bereich bis herunter zu 50% SOC, so dass auch hier noch eine vertiefte Betrachtung erforderlich ist.

Arbeitspaket 2: Produktionstechnik für NKW-Speichersysteme

Die Kernprozesse („Bi-Pack kleben“ und „Ableiter kontaktieren“) konnten nahezu planmäßig über Prinzipversuche und Verfahrensauswahl-Bewertungen verfolgt werden: Konstruktion, Aufbau und Nachweis der Prozessfähigkeit des Demonstrationsablaufes wurden für „Bi-Pack kleben“ innerhalb von FUEL erbracht. Konstruktion, Aufbau und erste Einrichtung einer Versuchsfertigung können für den Prozessschritt „Ableiter kontaktieren“ demonstriert werden.

Die Prozessschritte „Zellmodulmontage (Stacken)“ und „Flexboardmontage“ konnten in FUEL nur über manuelle Prinzipabläufe und Montageverfahren durchgeführt werden. Die Ursachen hierfür sind: Die Notwendigkeit von Simultaneous Engineering in Abstimmung mit den Ergebnissen aus Arbeitspaket 1 zog einen hohen Koordinierungsaufwand nach sich, der nicht vollständig erfüllt werden konnte. Die Findung der Zusammenarbeit zwischen den Partnern erfolgte verzögert. Gleichzeitig war die Projektlaufzeit sehr kurz, so dass sich Verzögerungen stark fortpflanzten. Weiterhin erwiesen sich die Konstruktion und der Aufbau von Forschungsanlagen als komplexe Herausforderungen.

Nach dem Ende von FUEL sind vertiefte Fertigungsreihen auf den Demonstrationsabläufen erforderlich, um ein endgültiges Fazit bzgl. der Prozessschritte „Zellmodulmontage“ und „Flexboardmontage“ geben zu können.

Arbeitspaket 3: Testverfahren, Validierung und Systemdemonstration

Die einzelnen Tasks konnten gestartet werden, wobei die Umsetzung teilweise verzögert erfolgte. Die Hauptursache dafür waren die erwähnten Verzögerungen bei der Bereitstellung der FUEL-Energiespeicher sowie der Verfahrensabläufe zur Produktion der FUEL-Energiespeicher.

Die Prüfanforderungen und Testaufbauten wurden definiert und erstellt. Aufgrund der kurzen Laufzeit von FUEL konnten die Investitionen in La-

borprüfstände nur teilweise gestartet werden. Nach Beendigung von FUEL sind weitere Erprobungsreihen erforderlich, um den Nachweis für validierte Baugruppen zu erbringen.

3.2.2 Fortsetzung der Arbeiten nach Projektende FUEL

Die innerhalb von FUEL verstärkt aufgetretenen technischen Fragestellungen unterstreichen die Herausforderungen, die mit der NKW-Hybridanwendung an die Entwicklungspartner gestellt werden. Sie erfordern einen wiederholten Abgleich der Ergebnisse von FUEL gegenüber den tatsächlichen NKW Anforderungen. Dieser betrifft sowohl die aktuelle Marktentwicklung für NKW-Hybridanwendungen als auch wiederholte Abstimmungen mit Kernlieferanten hinsichtlich Machbarkeitsnachweisen für relevante Herstell- und Lieferqualitäten. Schließlich sind weitere Optimierungen aller Baugruppen und Prozesse erforderlich, um endgültig (und für alle Prozessschritte) die erfolgreiche Validierung und Prozessfähigkeit nachweisen zu können. Diese Optimierungen erfordern eine detaillierte Auswertung aller Projektergebnisse.

Insgesamt betrachtet sind allerdings die im Projekt erzielten Ergebnisse so vielversprechend, dass die Verbundpartner die Arbeiten (speziell die Erprobung des FUEL-Demonstrators) auch nach Abschluss des Projektes FUEL auf eigene Kosten weitertreiben. Der rasche Transfer der Projektergebnisse von FUEL in die Produktentwicklung ist erklärtes Ziel aller Partner.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

4.1 Projektplanung

Der Darstellung des technisch-wissenschaftlichen Standes bei Projektbeginn in Abschnitt 3.1 folgend, wurde in Abstimmung mit den beteiligten Verbundpartnern eine Arbeitspaketstruktur mit drei technischen Arbeitspaketen gewählt. Projektleitung und -koordination übernahm Hr. Stefan Bonnekessel, Continental (TAEM).

4.1.1 Projektleitung

Die Entwicklung von Baugruppen, Funktionen und Herstellungsprozessen für Energiespeichersysteme bindet eine große Anzahl von Mitarbeitern aus unterschiedlichen Fachbereichen und ihren Teams. Die Abstimmung, Koordination und Ausrichtung auf das gemeinsame FUEL-Projektziel bedeutete eine komplexe Herausforderung.

Die Projektleitung regelte sowohl die interne Abstimmung aller Arbeitsbereiche des Projektes über wöchentliche Regelbesprechungen und Berichte. Für die Energiespeicher-Anwendungen von LKW und Bus wurden jeweils ein Projektleiter und ein systemtechnischer Projektleiter vorgesehen. Ebenso wurde über die Projektleitung die Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern und die Berichtserstattung an den Projektträger koordiniert.

Weiterhin war die Projektleitung zuständig für die Durchführung der Projektreviews hinsichtlich des technischen Erfüllungsgrades der Entwicklungsumfänge sowie die Koordinierung von Projektzwischenberichten an den Projektträger. Darüber hinaus überwachte der Projektleiter die Erfüllung der gesetzten Meilensteine und Budgetvorgaben. Bei Problemen erfolgte über die Projektleitung die Eskalation in die Leitungsebene.

Die Ziele jedes Projektleiters sind die reibungslose Projektdurchführung, die Erreichung aller festgelegten technischen Ziele bis Projektabschluss, die Einhaltung der gesetzten Meilensteine und der Budget-Vorgaben. Nach Abschluss des Projektes ist festzuhalten, dass diese Ziele auch von den FUEL-Verbundpartnern in vollem Umfang mit getragen und konse-

quent verfolgt wurden: Die Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern kann als ausgesprochen kooperativ bezeichnet werden.

4.1.2 Meilensteinplanung

Im Kern befassten sich die Arbeiten in FUEL mit der Entwicklung von neuen effizienten Fertigungsverfahren und -prozessen zur Produktion von Baugruppen für Li-Ionen Energiespeicher sowie mit dem Setzen entsprechender Standards. Die dabei in FUEL adressierten Speichertechnologien beinhalten die Fertigung eines neuen Zellformates aus technischer, ökonomischer und qualitativer Sicht, die notwendigen Entwicklungsschritte sowie den Funktionsnachweis durch Erprobung unter Betriebsbedingungen in entsprechenden Nutzfahrzeug-Prototypen.

Wegen des hohen Forschungsrisikos wurde bereits vor Projektbeginn nach Alternativlösungen für alle Optionen gesucht. Dies betraf auch die Beschaffung der Li-Ionen Zellen, so dass in Verbindung mit den Vorarbeiten und den Kompetenzen der Verbundpartner von einem Erreichen der Projektziele ausgegangen werden durfte.

Zur möglichst effizienten Überwachung des Projektfortschritts und zur frühzeitigen Erkennung etwaiger Schwierigkeiten im Projekt wurde eine Vielzahl von Meilensteinen definiert. Diese orientierten sich an den technischen Zielen entsprechend der Entwicklungs-Road-Map. Die konsequente Überwachung der Meilensteine erwies sich als sehr effektiv. Auf die Erreichung der einzelnen Meilensteine wurde in den Projektmeetings und v.a. bei Projektreviews und in den Zwischenberichten eingegangen.

4.1.3 Zeit- und Meilensteinplanung

Wie erwähnt, gliederte sich das Projekt in drei technische Hauptarbeitspakete (s. Abbildung 22). Der Bezug der Arbeitspakete zum Montageablauf eines Energiespeichers ist in Abbildung 23 verdeutlicht.

Im Vordergrund von FUEL standen die Erarbeitung neuer effizienter, standardisierbarer Fertigungsverfahren und Verfahrensabläufe zur Produktion von Baugruppen für Li-Ionen-Energiespeichersysteme. Im Speziellen betraf dies die Einbindung eines neuen Zellformates in die Produktionstechnik durch eine neue Fertigungstechnologie, die sowohl aus sicherheitstechnischer als auch effizienter und qualitativer Sicht entwickelt und geprüft wird und in einen fertigungstechnischen Reifegrad gebracht wer-

den sollte, der den wirtschaftlichen Zielen entspricht. Konkrete Arbeitsergebnisse sollten sich in funktionsfähigen Demonstratoren widerspiegeln und den erreichten Stand der Fertigungstechnik aufzeigen.

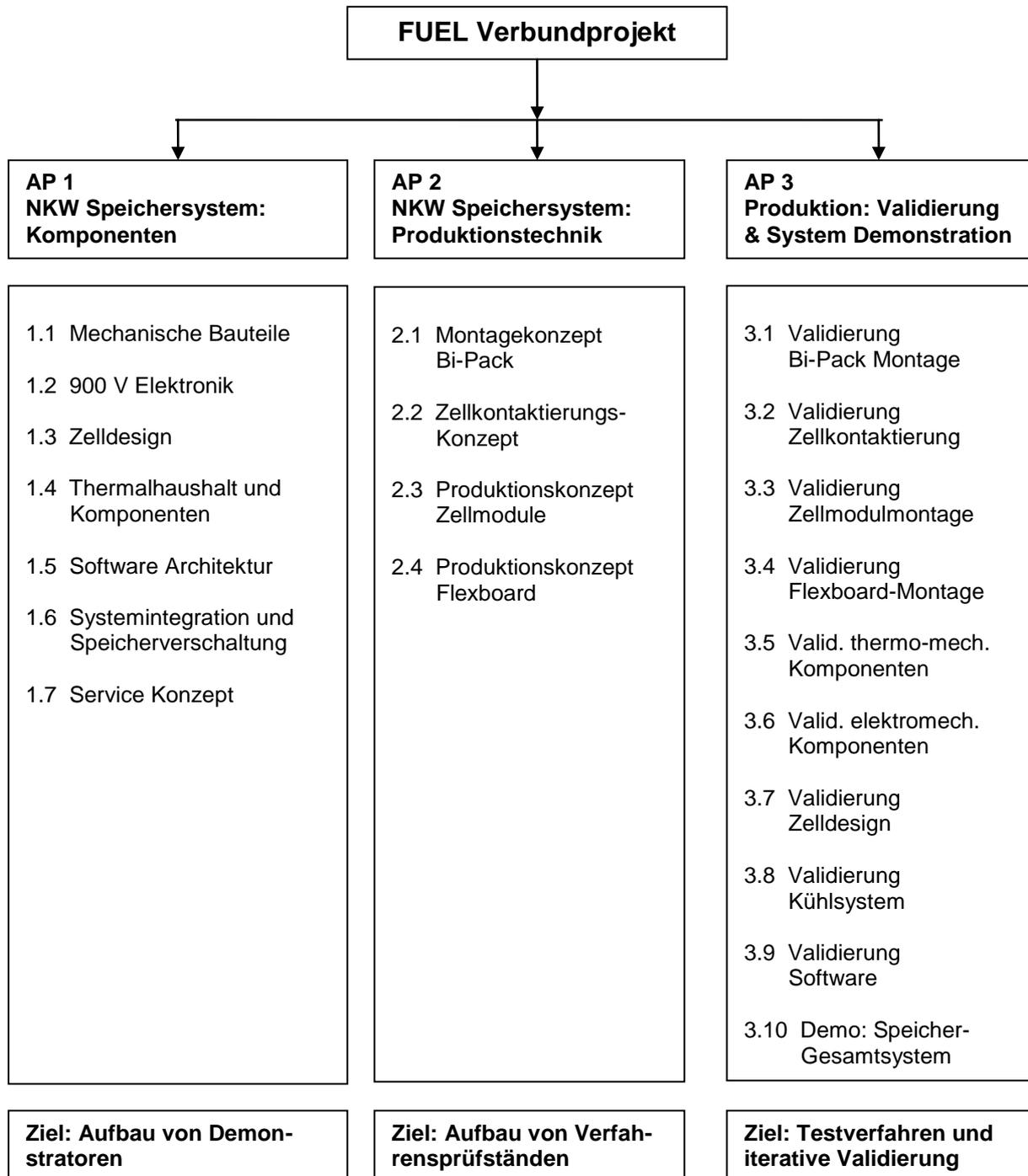


Abbildung 22: FUEL Projektstruktur

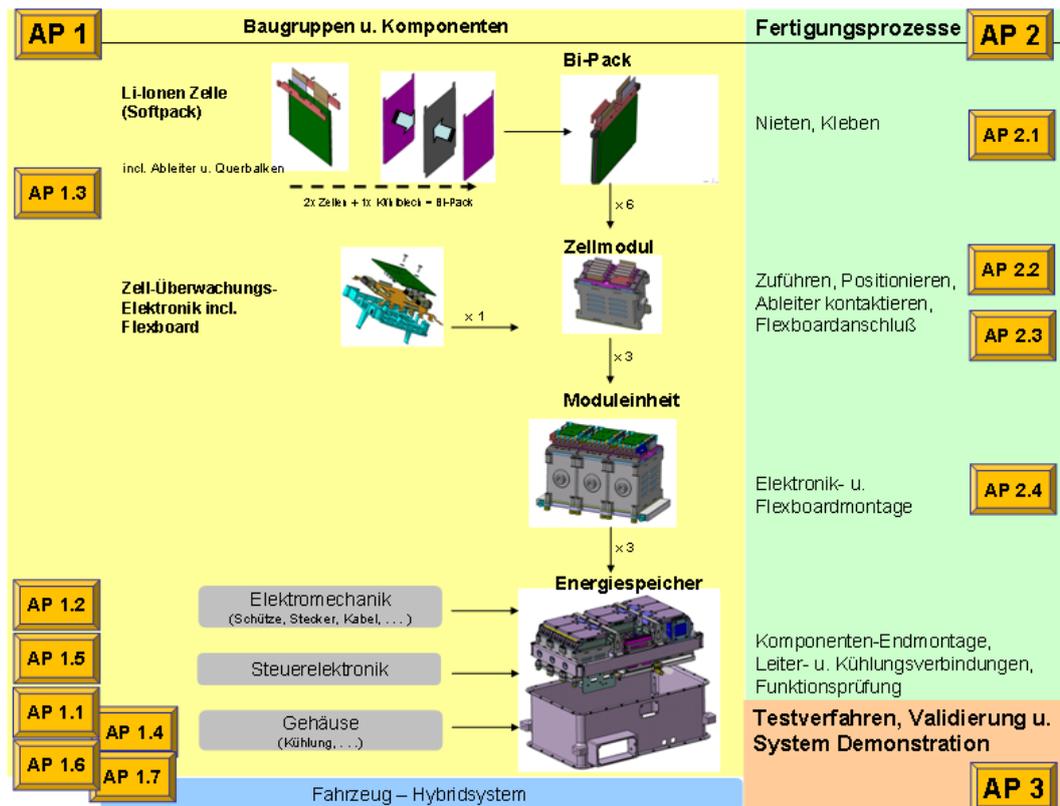


Abbildung 23: Strukturierung der Arbeitspakete mit Bezug zum Montageablauf eines Energiespeichers

Die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit des Herstellungsergebnisses sollte nach den vielfältigen Anforderungen der Anwendung in Hybrid-Nutzfahrzeugen geprüft und validiert werden. Auf diese Zielsetzung wurde die Planung der Beteiligungen an den drei Arbeitspaketen ausgerichtet.

AP 1: NKW-Speichersystem - Komponenten

Wesentlich für die Planung des Hauptarbeitspakets 1 war die Erfassung und Definition von nutzfahrzeugspezifischen Anforderungen an die Lithium-Ionen-Batterie. Die Anforderungen bilden die Grundlage für die Entwicklung von neuen Produktionstechnologien und –verfahren und bestimmen die Auslegung und Entwicklung von Baugruppen und Funktionen. Diese Ergebnisse ermöglichten schließlich den Aufbau von nutzfahrzeugtauglichen Batterie-Demonstratoren für die Anwendungen in den Projekten Verteiler-Lkw und Stadtbuss.

Für den Arbeitsplan des Arbeitspaketes 1 wurden Bauteile, Baugruppen und Funktionen spezifiziert und nachfolgend in die Entwicklung der Her-

stellungsverfahren eingebunden. Parallel dazu erfolgt die Konstruktion / Anpassung dieser Bauteile, Baugruppen in Abhängigkeit von den angestrebten Fertigungstechnologien. Die konstruktive Arbeit fand ihren Abschluss mit der Prüfung der Herstellbarkeit unter den genannten Rahmenbedingungen, wobei die Erprobung der Einzelbaugruppen hinsichtlich der Montierbarkeit bei diesem Entwicklungsprozess im Vordergrund stand.

AP 2: NKW-Speichersystem - Produktionstechnik

Arbeitspaket 2 wurde simultan mit der Bauteil- und Baugruppenentwicklung in Arbeitspaket 1 vorangetrieben. Wesentlicher Punkt war die Wechselwirkung zwischen diesen beiden Arbeitspaketen. Bei der Entwicklung der Bauteile u. Baugruppen wurde direkt versucht, deren wirtschaftliche Herstellbarkeit und nachfolgende Montierbarkeit mit zu berücksichtigen und anschließend hinsichtlich der Prozessfähigkeit auszuarbeiten.

Inhalt der Arbeitsplanung des Arbeitspaketes 2 waren neben dem Montageablauf des Energiespeichers (von der Einzelzelle bis hin zum endmontierten System) die fertigungstechnischen Details und deren notwendige Prozesse (z.B. Steuerung & Kontrolle). Die Ergebnisse aus den jeweiligen Einzelversuchen an den Fertigungsanlagen und der Parameterfestlegungstests flossen rekursiv in die Konstruktion und den Aufbau /die Inbetriebnahme der Einzelanlagen zur Optimierung ein. Mit Hilfe dieser Einzel-Untersuchungen sollte die Prozessfähigkeit nachgewiesen werden. Zur Erreichung der Wirtschaftlichkeit der Fertigungsabläufe wurden bei der Auslegung der Komponententechnologie und der Definition der Produktionsverfahren entsprechende Ausbringungsmengen und Taktzeiten vorgegeben.

AP 3: Test – Validierung und Systemdemonstration

Die Planung des Hauptarbeitspakets 3 bestand aus der Entwicklung von Testverfahren und der Validierung der Demonstratoren, um somit den Nachweis der neuen Produktionstechnologien und –verfahren zu erbringen. Die Validierung fand bei Continental und ZF in stationären und mobilen Prüfständen sowie im Musterbau und den dort zu platzierenden Demonstrator-Fertigungsabläufen statt.

4.2 Abweichungen im Projektablauf

Trotz der kurzen Projektlaufzeit von FUEL wurde versucht, den sehr engen Zeitplan einzuhalten. Durch unvorhergesehene Iterationsschleifen entstanden jedoch Verzögerungen, die bis zum Projektende von FUEL nicht vollständig aufgeholt werden konnten. Als Folge dieser Verzögerungen konnten bei den Partnern nicht alle Arbeiten im geplanten Zeitumfang abgeschlossen werden. Für die Verzögerungen sind zwei Aspekte besonders relevant:

- Durch Lösen der inneren Ableiter i.d. Zelle entstanden Zelldefekte. Im Zuge der Erprobung im Zeitraum Januar-April 2011 wurde erkannt, dass diese Defekte bei Belastungen mit Strömen über 100A auftreten. Als Ursache konnte mangelhafte Fertigungsqualität des Zelllieferanten ermittelt werden.
- Wegen der nachfolgend näher beschriebenen unzureichenden EMV- und v.a. Kühlprobleme erfolgte für einzelne Erprobungen die Verwendung von frühen Demonstratoren (sog. BF1 Stand, der im Rahmen einer Machbarkeitsstudie von ZF und Continental Anfang 2010 entwickelt wurde). Die Kühlprobleme des BF2-Stands wurden ab ca. Mitte 2010 offenbar.

4.2.1 Notwendigkeit eines Redesigns des Energiespeicherkonzepts

Aufgrund des hohen Forschungsrisikos, v.a. im Hinblick auf geeignete Produktionstechnologien unter besonderer Berücksichtigung der speziellen Anforderungen für Hybrid-Nutzfahrzeuge, musste ein nicht geplantes Redesign durchgeführt werden: Der ursprüngliche Plan sah vor, dass in FUEL der sogenannte Energiespeicher Demonstrator Stand BF2 entwickelt, vertieft getestet und validiert wird. Die technische Reife der ersten Tests zum BF2 zeigte in erster Linie eine eindeutige Unterperformance der Kühlleistung. Umfangreiche Untersuchungen bestätigten, dass zur Erzielung der benötigten Performance des Kühlsystems markante Design-Änderungen erforderlich sind. Erste Konzeptansätze wurden in den letzten Projektmonaten verfolgt.

Die Ausarbeitung des endgültigen Konzepts für das Redesign zum so genannten BF3 Stand erfolgt nach Projektende von FUEL. Bereits die in FUEL durchgeführten Konzeptansätze ließen erkennen, dass die Design-Änderungen u.a. zu einer Geometriezunahme von ca. +15% führen werden, was wiederum mit markanten Auswirkungen bzgl. Dauerfestigkeit etc. einhergeht.

Da sich mit dem BF2-Energiespeicher nicht die volle benötigte Performance der NKW-Energiespeicher darstellen ließ, ist man nicht wie bei der Antragstellung geplant in die Validierung der Verfahrenstechnik gegangen, sondern hat Einzeltests zur Funktions- und teilweise Dauer-Erprobung gestartet, deren Ergebnisse in Kapitel 5 präsentiert sind.

4.2.2 Schwächen Energiespeicherkonzept BF2 (Projektziel)

4.2.2.1 Batteriemodul

Das ursprüngliche Produktionskonzept ist in Abbildung 24 skizziert. Zur Herstellung der Kunststoffteile werden große Werkzeuge benötigt. Die Größe der Werkzeugwürfel beträgt ca. 0,5 – 1,5m Kantenlänge.

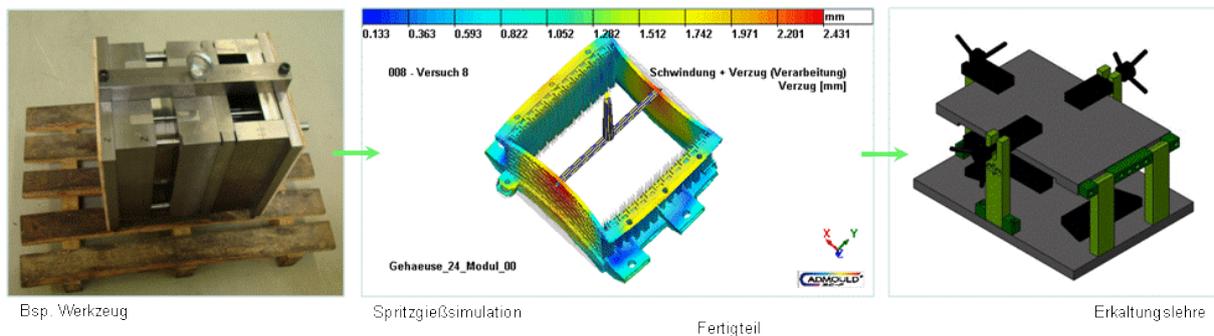


Abbildung 24: Produktionskonzept Stand BF2

Zur Herstellung von unterschiedlichen Batteriemodulen (1x24/2x36) werden mehrere Werkzeuge benötigt. Umfangreiche Spritzgießsimulationen waren erforderlich, um Verzug der großen Kunststoffteile in den Griff zu bekommen. Ferner wird eine Erkaltingslehre benötigt, um dem starken Verzug der Teile beim Auskühlen entgegenzuwirken.

Die Montage der Fertigteile (s. Abbildung 25) sollte durch Einschieben der Kühlfinnen in das Kunststoffgehäuse erfolgen, was viel Handarbeit erforderte. Das ursprüngliche Kühlkonzept sah eine einseitige Kühlung auf Flachkühlern vor. Wie erwähnt, wurde wegen nicht ausreichender Kühleigenschaften ein Redesign erforderlich (BF3).

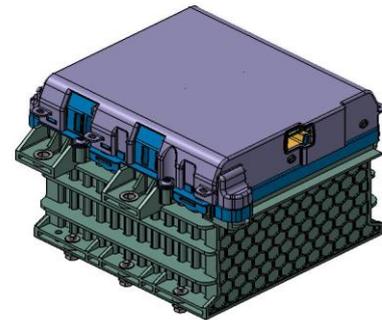


Abbildung 25: Fertigteil Zellmodul für BF2-Speicher

4.2.2.2 HV-Anschlüsse

Im B2 Stand wird eine marktübliche Kabelverschraubung verwendet (Abbildung 26). Diese bewirkt hohe Kosten durch die aufwendige Montage, zudem erfüllt sie die Anforderungen bezüglich Dichtigkeit nicht vollständig.



Abbildung 26: HV-Anschlüsse BF2

Ferner ergibt sich für verschiedene Kabeldurchmesser kein Gleichteil und es ist ein zusätzlicher Schweißflansch im Gehäuseboden erforderlich. Um diesen Nachteilen entgegenzutreten, wurde im BF3 Stand ein modifiziertes Konzept verfolgt.

4.2.3 Energiespeicherkonzept BF3 (Redesign)

Im Zuge des Redesigns wurden mehrere Erkenntnisse des BF2 Standes eingearbeitet. Dies betrifft u.a. Maßnahmen zur besseren Herstellbarkeit und einfacheren Montage. Mit Blick auf die Herstellbarkeit wurde eine Reihe von Verbesserungen angestrebt: Einfache Werkzeuge zur Herstellung von Bi-Pack bzw. Batteriemodulen, Verfolgung eines Gleichteilkonzepts (möglichst viele Gleichteile: 4 x 24 Batteriemodul), v.a. ein verbessertes Kühlkonzept, um den Anforderungen von Nutzfahrzeugen gerecht zu werden (flächig durchströmte Kühlfinne), ferner Kostenersparnis durch andere Herstellverfahren (Strangpressen). Hinsichtlich der Montage wurde eine gestackte Realisierung angestrebt (s. Abbildung 27), da diese einen schnelleren Aufbau ermöglicht und später in der Serienfertigung leichter umgesetzt werden kann.

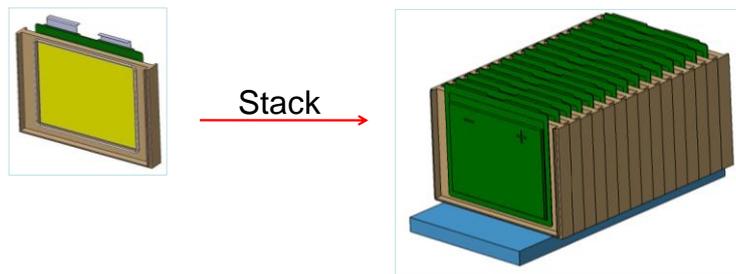


Abbildung 27: Stack-Anordnung der Bi-Pack-Zellen (Stand BF3)

Im Zuge der Erarbeitung eines geeigneten Kühlkonzepts wurden verschiedene Entwürfe analysiert. Aufgrund eines leistungsfähigeren Kühlkonzeptes für den BF3 Musterstand ergeben sich neue Batteriemodulabmessungen. Um einen möglichst kompakten Bauraum zu erzielen, wurden verschiedene Speicherarchitekturkonzepte untersucht und nach den relevanten Kriterien Bauraum, EMV-Konzept (High Voltage, Low Voltage), mechanische und elektrische Kundenschnittstellen, erforderlicher Bauraum für die Kühlung, Gewicht, mechanische Stabilität, Montagekonzept, Gleichteilkonzept, Entwicklungsrisiko und Kosten bewertet.

Für die High Voltage Anschlüsse erfolgte für das BF3 Konzept zunächst ein Variantenvergleich von HV Steckern und HV Kabeldurchführungen, s. Beispiele in Abbildung 28. Die Untersuchungen führten auf die Notwendigkeit der Neuentwicklung einer HV-Kabeldurchführung, wie sie in Abbildung 29 dargestellt ist.

Auf Basis gegebener Requirements und optimierten Bauraums wurde in Zusammenarbeit mit einem Zulieferer ein einheitliches HV Kabeldurchführungssystem entwickelt und erfolgreich getestet. Im Vergleich zum oben beschriebenen BF2-Konzept bietet es eine Reihe von Vorteilen: Es besteht ein einheitliches System für alle Kabeldurchmesser und ermöglicht leichte Montage durch einen Bajonett Verschluss. Im Herstellungsprozess der Energiespeicher stellt das System ein Montageteil ohne zusätzliche Fertigungsschritte dar. Das Kontaktsystem ist einheitlich für Truck- und Bus-Anwendung.

Das resultierende Konzept zur Verschaltung von HV-, DC/DC-, Sense- und Bordnetzleitungen im BF3 Konzept zeigt Abbildung 30.

Stecker



Kabeldurchführung

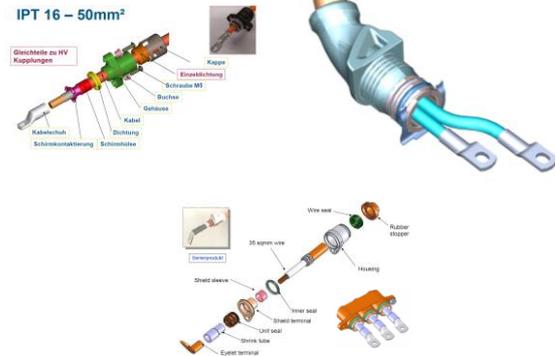


Abbildung 28: Variantenvergleich für BF3: HV Stecker – HV Kabeldurchführung

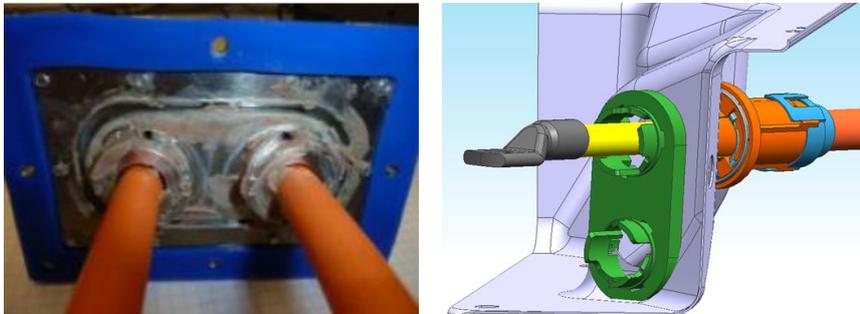


Abbildung 29: Neuentwicklung HV-Kabeldurchführung für BF3

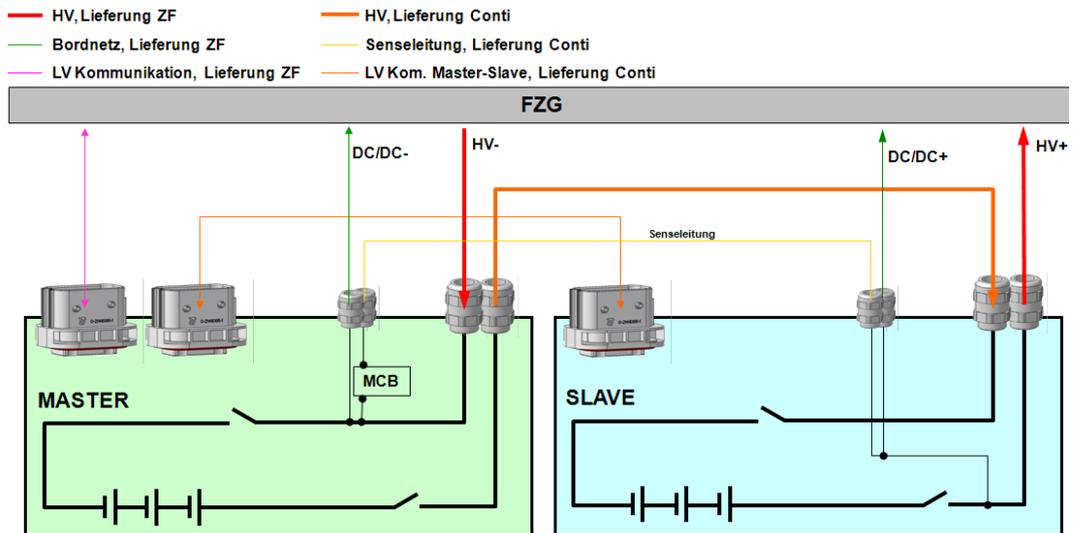
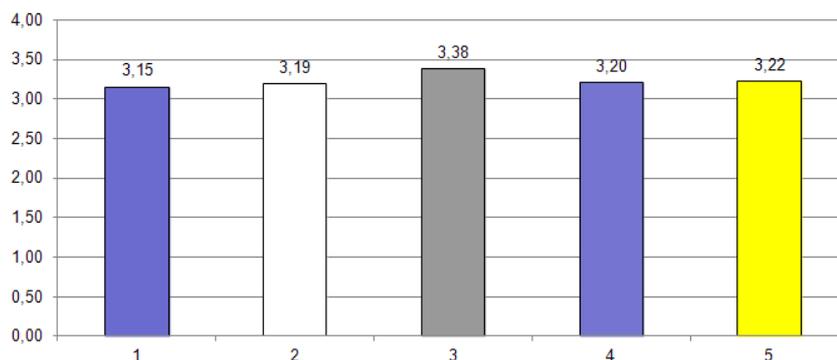


Abbildung 30: Verschaltungskonzept für den Bus-Speicher (Master – Slave unter Berücksichtigung der HV Verbindungstechnik)

Wie erwähnt, wird das BF3-Konzept im Vergleich zum BF2 Stand auf ca. 15% größere Module führen. Als Folge davon war mit höherer dynamischer Belastung durch ein geändertes Vibrationsprofil (4,2g Dauervibra-

tion) zu rechnen. Infolgedessen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Fluid Forming die Machbarkeit der Gehäuseschalen geklärt. Aufgrund der großen Dimensionen und des hohen Umformgrades ist hierbei der Gehäuseboden als besonders kritisch zu sehen.

Da dem Tragrahmen eine besondere Bedeutung zukommt, erfolgte eine Studie zu unterschiedlichen Tragrahmenvarianten, im Zuge derer auch die Werkstoffauswahl mit Blick auf Gewichtsreduzierung neu bewertet wurde. Das Ergebnis der mit FE-Simulationen untermauerten Analysen zeigt die folgende Abbildung 31. Demnach konnten die besten Ergebnisse bei Realisierung des Tragrahmens über eine Aluminium-Druckguss-Legierung erwartet werden. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Shaker-Tests mit Stahl zur Absicherung der mechanischen Stabilität bei höherer dynamischer Belastung und Brandtests bei Verwendung von Aluminium zur Absicherung der mechanischen Stabilität im Brandfall (Fahrgastsicherheit) durchgeführt.



1. Edelstahl Schweißkonstruktion aus mehreren Norm Profilen
2. Edelstahl Schweißkonstruktion aus mehreren Norm Profilen mit Stahl-Schmiede Ecken
3. Tragrahmen als Komplettteil aus Aluminium Druckguss Legierung
4. Schweißkonstruktion aus Aluminium Strangpressprofilen und Al. Druckguss Ecken
5. Schweißkonstruktion aus Aluminium Strangpressprofilen und Al. Einschubelemente

Abbildung 31: Gewichtete Auswertung der Tragrahmenvarianten

5 Erzielte Ergebnisse

Die Detaildarstellung der technischen Ergebnisse folgt der in Abschnitt 3.1 gewählten Struktur.

5.1 NKW Speichersystem: Komponenten

Die Hauptzielsetzung von Arbeitspaket 1 bestand im Aufbau von Demonstratoren auf Komponentenebene.

5.1.1 Mechanische Bauteile

Die hohen Leistungsanforderungen an zukünftige Energiespeicher von NKWs und ihre exponierte Einbausituation erforderten die gezielte Eigenentwicklung aller mechanischen Baugruppen für den modularen Einsatz des Energiespeichersystems in Nutzfahrzeugen und deren Einbausituationen. Dabei wurden sowohl die technischen Aspekte mit Hilfe ingenieurwissenschaftlicher Methoden im Bereich der Mechanik (Containment), der Thermo-Mechanik (Kühlsystem), und der Elektro-Mechanik (Zellkontaktierung & -Verschaltung sowie Speicherregelung) adressiert. Das Design der entstehenden Komponenten wurde maßgeblich durch die Herstellbarkeit bestimmt.

5.1.1.1 Schlüsselspezifikationen

Energiespeichersysteme aus bisherigen Vorentwicklungsprojekten von ZF wurden nicht auf den Serieneinsatz in Nutzfahrzeugen ausgelegt. Der Einbau erfolgte in Funktionserprobungsfahrzeugen und Prüfständen und diente zur Darstellung von Hybridsystemen.

Für den modularen Einsatz des Energiespeichersystems ist es erforderlich, die nutzfahrzeugtypischen Anforderungen und Einbausituationen der geplanten Applikationen (LKW, Stadtbusse usw.) zu ermitteln und daraus die entsprechenden Anforderungen abzuleiten, welche die Produktionstechnologien und -verfahren stark beeinflussen. Hierfür musste eine Hardware- und Prüfspezifikation erstellt werden, welche alle applikationsspezifischen Anforderungen an den Demonstrator enthält. Die wesentlichen Aspekte dabei sind:

- *Ermittlung der Umweltbedingungen:* Die Umweltbedingungen an den Energiespeicher wurden von ZF definiert, eine Spezifikation erstellt und mit dem Verbundpartner Continental zur Auslegung der Demonstratoren abgestimmt. Basis hierfür waren die geplanten Einsatzfahrzeuge, meteorologische Daten, Normen und Kundenanforderungen.
- *Ermittlung der elektrischen Anforderungen:* Die elektrischen Anforderungen wurden anhand fahrzeugseitiger Anforderungen, Normenrecherchen sowie gesetzlicher und Kundenanforderungen definiert. Eine Spezifikation wurde erstellt und mit dem Verbundpartner Continental abgestimmt.
- *Ermittlung der applikationsspezifischen Leistungs- und Energieanforderungen:* Für die Erarbeitung dieses Teilarbeitspakets wurden für die Fahrzeuge Verteiler-Lkw und Stadtbuss die Antriebsstrangdaten zusammengestellt und die Simulationen mit einer einheitlichen Fahrstrategie auf den einsatztypischen Strecken (Verteiler-LKW-Routen im Stadtgebiet und reale Stadtbusstrecken) durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf dem Kosten-/Nutzenverhältnis. Zum einen mussten die fahrzeugspezifischen Betriebspunkte, wie Anfahrvorgänge, Bremsvorgänge etc. abgedeckt werden können, und zum anderen sollte der Demonstrator nicht überdimensioniert werden, was Mehrgewicht und Kosten verursachen würde.
 - Ermittelte Anforderungen an Verteiler-LKW: 7,5-12 to:
 - Leistungsanforderungen @ End of Life: 60 kW
 - Energieanforderung @ End of Life: 420 Wh
 - Ermittelte Anforderungen an Stadtbusse 18 – 28 to:
 - Leistungsanforderungen @ End of Life: 120 kW
 - Energieanforderung @ End of Life: 1 kWh
- *Erstellung einer Prüfspezifikation:* Die Prüfungen wurden von ZF definiert, in eine Prüfspezifikation eingearbeitet und mit Continental abgestimmt.

5.1.1.2 Thermische und mechanische Simulationen

Parallel zur konstruktiven Ausarbeitung der Baugruppen und Einzelbauteile wurden festigkeits- und temperaturkritische Teile über FEM-Modelle genauer analysiert und optimiert. Begleitend zu Prinzipversuchen in AP 3 wurden die Simulationsergebnisse getestet. Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Herstellbarkeit durchgeführt.

Bei den mechanischen Simulationen stand besonders die simultane Simulation der Fertigungsprozesse im Vordergrund. Die Schwerpunkte lagen auf der Umformfähigkeit und den Spannungsverläufen im Blechumformprozess sowie auf der Moldflow²⁹-Simulation im PAGF-Spritzgussverfahren. Darüber hinaus wurde im Umfang der Simulationen den verschärften Stabilitätsanforderungen der NKW-Anwendungen Rechnung getragen, speziell bei den Schlüssel-Bauteilen: Batteriemodul, Gehäuse und Tragrahmen sowie dem endmontierten Gesamtsystem.

Für die Berechnung wurden die geforderten Tests und Belastungen dem Test-Lastenheft entnommen. Im Einzelnen wurde die Beanspruchung durch Vibrations- und Torsionsbelastungen errechnet. Auf Basis einer Schädigungsanalyse wurden zudem Lebensdauerabschätzungen unter Vibrationsbelastung ermittelt.

5.1.1.3 Fertigungsoptimierte Auslegung von Batteriegehäuse und Tragrahmen in Leichtbauweise

Die zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren für ein solches Gehäuse inkl. des inneren Tragrahmens werden durch zwei Faktoren eingeschränkt: die relativ große Bauteilgeometrie sowie die für den Hybridmarkt prognostizierte Stückzahl von ca. 15 – 20 Tsd. Stück/Jahr. Neue Umformtechnologien im Leichtbau boten hier Lösungsansätze, die jedoch auf die speziellen Produktionsbedingungen in NKW weiter zu entwickeln waren. Ziel dabei war, mithilfe kostengünstiger Umformverfahren ein Höchstmaß an Umformung und Bauteilprofilierung bei einem Minimum an Blechdicke zu erreichen und gleichzeitig allen Anforderungen zur Betriebssicherheit und Qualität zu genügen. Das Hydroforming-Verfahren sollte daher so weiter entwickelt werden, dass die angestrebten Stückzahlen ohne Qualitätseinbußen zu marktfähigen Kosten erreicht werden können.

Gehäuseentwicklung

Das Gehäuse des Energiespeichers stellt aufgrund der Anforderung für den Fahrzeugaußenanbau bei verschiedenen Nutzfahrzeugklassen und den hohen Vibrationsanforderungen ein Kernbauteil dar. Die hohe Festigkeit und Steifigkeit darf gleichzeitig nicht mit hohem Bauteilgewicht und

²⁹ Moldflow= Füllsimulationen, welche den gesamten Spritzgießprozess von der Auslegung der Kühlung über die Simulation der Füll- und Nachdruckphase bis hin zum Schwindungs- und Verzugverhalten abbildet

Bauteilüberdimensionierung erkaufte werden. Abbildung 32 zeigt die Explosionszeichnung des Energiespeichers (BF2-Stand).

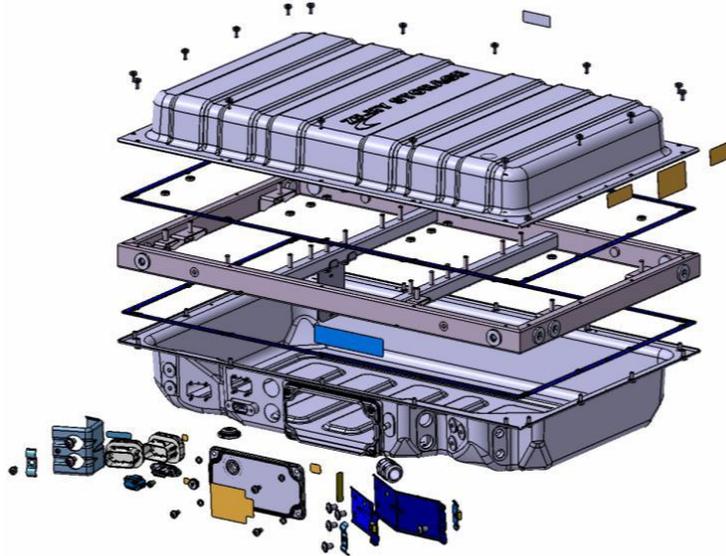


Abbildung 32: Explosionsdarstellung Gehäuse des FUEL-Energiespeichers

Die dargestellte Ober- und Unterschale wurden nach abgeschlossener Konzeptauswahl fertigungstechnisch als Umformbauteile ausgelegt. Für die Blechumformteile (Gehäuseober- und -unterschale sowie die Wartungsklappe) wurden Umformsimulationen durchgeführt. Hierbei waren Berechnungen für die Materialdicken, den Kontaktabstand zum Werkzeug und die Formbarkeit für eine Beurteilung der Machbarkeit nötig. Abbildung 33 zeigt exemplarisch die Berechnung der Materialdicke der Gehäuseoberschale für ein 0,8mm-starkes Edelstahlblech.

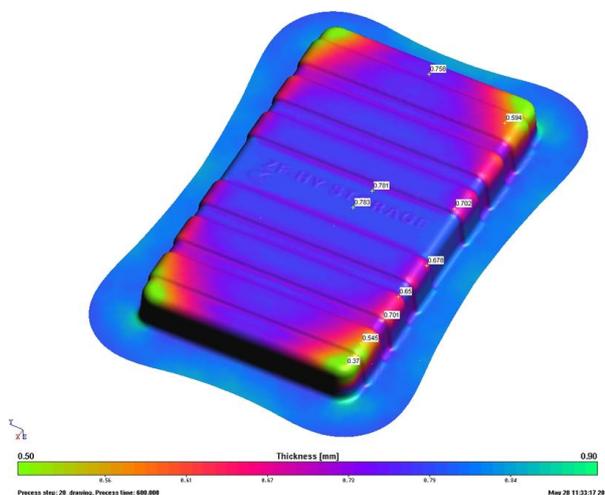


Abbildung 33 Berechnung der Materialdicke der Gehäuseoberschale

Hinsichtlich der Konzeption des inneren Tragrahmens musste aufgrund begrenzter Entwicklungsressourcen auf eine Standard Schweißkonstruktion als temporäre Lösung zurückgegriffen werden. Die ersten Erprobungen ab dem dritten Quartal 2010 zeigten klare Risiken dieses Bauteilkonzeptes auf. Festigkeitsmängel lagen speziell in dem zunächst ausgewählten Fügeprozess (Laserschweißen ohne Zusatzstoffe) gegenüber den tatsächlich geforderten Vibrationsanforderungen. Die erfolgte Umstellung auf verstärkte Nähte mit dem WIG-Schweißverfahren³⁰ (mit Schweißgut-Zugabe) wurde als nicht wettbewerbsfähig angesehen, da eine 100%-Überwachung aller Nähte erforderlich ist (DIN-Anforderung für dynamisch belastete Schweißverbindungen). Daher erfolgte in 2011 eine erneute Überarbeitung des Bauteils Tragrahmens. Dabei wurden unterschiedliche Konzeptansätze wie eine Gussbauteil-Lösung oder Kombinationen aus Gesenkschmiede-Eckverbindern verschweißt mit Stahlprofilen vertieft untersucht (vgl. auch Ergebniszusammenfassung in Abbildung 31).

Mold-Flow-Simulationen

Bei der Betrachtung von Herstellungskonzepten für die Fertigung von Kunststoffgehäusen wurden sogenannte „Mold-Flow“-Simulationen durchgeführt. Am Beispiel des Elektromechanikmoduls sind die Ergebnisse einer solchen Simulation zu erkennen (siehe Abbildung 34). Für eine umfassende Beurteilung der Machbarkeit sind insbesondere folgende Punkte ausschlaggebend: Werkzeugwandtemperatur bei Entformung und Füllende, Wandstärke, Druckverlust, Siegelzeit, Randschichtdicke bei Nachdruckende, Entformungszeit, Lufteinschlüsse, Einfallstellen und vor allem Verzug.

³⁰ WIG-Schweißverfahren= Wolfram-Inertgas- ~ (engl. TIG, EN ISO 4063: Prozess 141). WIG-Schweißanlage, bestehend aus einem Schweißbrenner und einer Stromquelle für Gleich- und Wechselstromschweißen. Das Paket besteht aus Schläuchen, verbindet beide Elemente und enthält die Schweißstromleitung, die Schutzgaszuführung, die Steuerleitung und teilweise einen Zu- und Rücklauf für Kühlwasser.

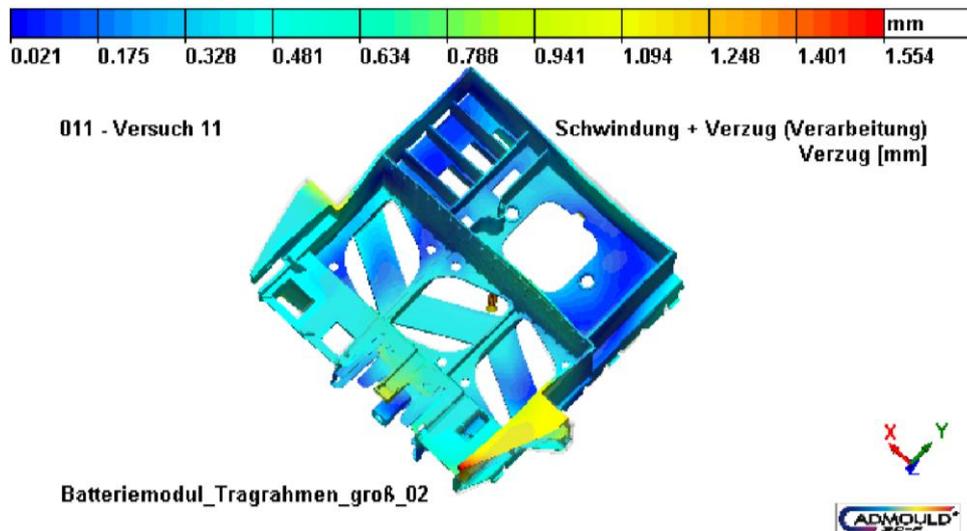


Abbildung 34: Ergebnisse der Mold-Flow-Simulation am Beispiel des Elektromechanikmoduls

Konstruktive Integration von Elektronik-/Elektromechanikmodul

Die Verbaubarkeit wurde generell über Analysen im CAD überprüft (Bau-
maße und mechanische Schnittstellen). Im späteren Verlauf wurden Rapid
Prototyping Teile für eine Verbauprobe herangezogen. Darüber hinaus
wurden Toleranzberechnungen über die die gesamte Maßkette der Bau-
gruppen durchgeführt.

Die Elektromechanik-Komponenten wurden zur Baugruppe Elektromecha-
nikmodul integriert und fertigungstechnisch als vormontierbare Einheit
konzipiert. Gleiches gilt für die Batteriemodule. Hochvoltsicherheit, Elek-
tromagnetische Verträglichkeit, Kühlung und Montierbarkeit mussten be-
achtet und nachgewiesen werden.

5.1.1.4 Auslegung von mechanischen Schwingungsdämpfern

Dynamische Belastungen (mechanischer Schock, Vibrationen, Biegemomente etc.), auf welche der Lithium-Ionen-Energiespeicher ausgelegt werden mussten und zugleich die Produktionstechnologien/-verfahren stark beeinflussten, sind stark abhängig vom jeweiligen Einsatzfall des Fahrzeugs sowie vom Einbauort im Fahrzeug. Würden jeweils die härtesten Anforderungen als Grundlage der Auslegung dienen, würde dies zu einem enorm hohen Gewicht und sehr großen Abmessungen des Energiespeichers führen.

Daher musste ein mittleres Lastkollektiv zur Auslegung des Energiespeichers ermittelt werden, mit welchem der größte Teil der Einsatzfälle der Fahrzeuge sowie der Einbauorte im Fahrzeug abgedeckt werden kann. Um den Energiespeicher nun auch in Fahrzeugen mit größeren dynamischen Belastungen einsetzen zu können, musste ein Entkopplungs-/Dämpfungssystem ausgelegt werden. Dies ist für die konstruktive Auslegung und Dauerfestigkeit des Energiespeichers und somit auch für die Produktionstechnologien/-verfahren von entscheidender Bedeutung und wirkt bei optimaler Gestaltung entlastend für die mechanischen Verbindungen der Baugruppen.

Auslegung von mechanischen Schwingungsdämpfern

Es wurde ein Konzept für den BF2-Demonstrator erarbeitet und mittels technischer Berechnungen abgesichert. Die Schwingungsdämpfer werden benötigt, um die Betriebsfestigkeit des Demonstrators zu gewährleisten. Vibrationen, welche bspw. durch Fahrbahnanregungen oder durch den Verbrennungsmotor verursacht werden, können zur mechanischen Ermüdung von Baugruppen des Demonstrators führen.

Die Festigkeitsauslegung von nutzfahrzeugtauglichen Baugruppen erfolgt u.a. unter Berücksichtigung des Vibrationsprofils der Norm ISO 16750-3. Die mechanische Auslegung nach dieser Norm würde jedoch ein enormes Mehrgewicht und hohe Kosten verursachen. Aus diesen Gründen wurde das Vibrationsprofil der Norm ISO 16750-3 für die Auslegung des Demonstrators um 50 % reduziert unter der Berücksichtigung, dass der Demonstrator über Schwingungsdämpfer, welche die restlichen 50 % dämpfen, mechanisch an das Fahrzeug angebunden wird. Die Abbildung 35 zeigt die Halterkonstruktion inkl. Schwingungsdämpfer (MO-Lager) für den BF2-Demonstrator.

Die Abbildung 36 zeigt das Vibrationsprofil gem. Norm 16750-3 und die um 50 bzw. 75 % reduzierten Profile. Für die mechanische Auslegung der Demonstratoren wurde das um 50 % reduzierte Profil verwendet.

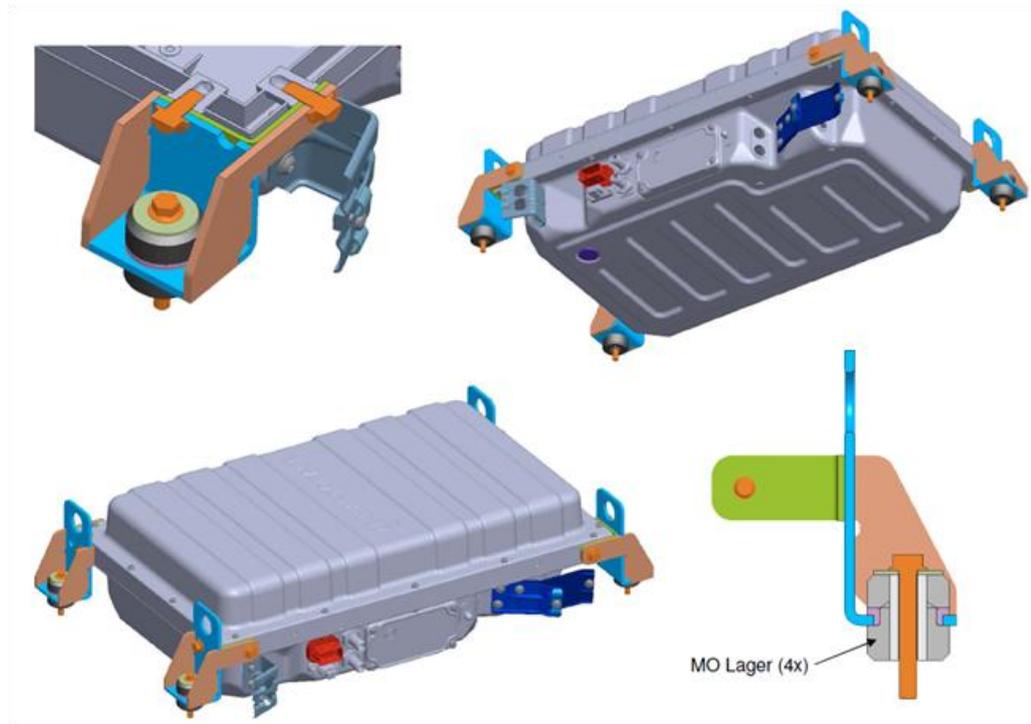


Abbildung 35: Halterkonstruktion inkl. Schwingungsdämpfer (MO-Lager) beim BF2-Demonstrator

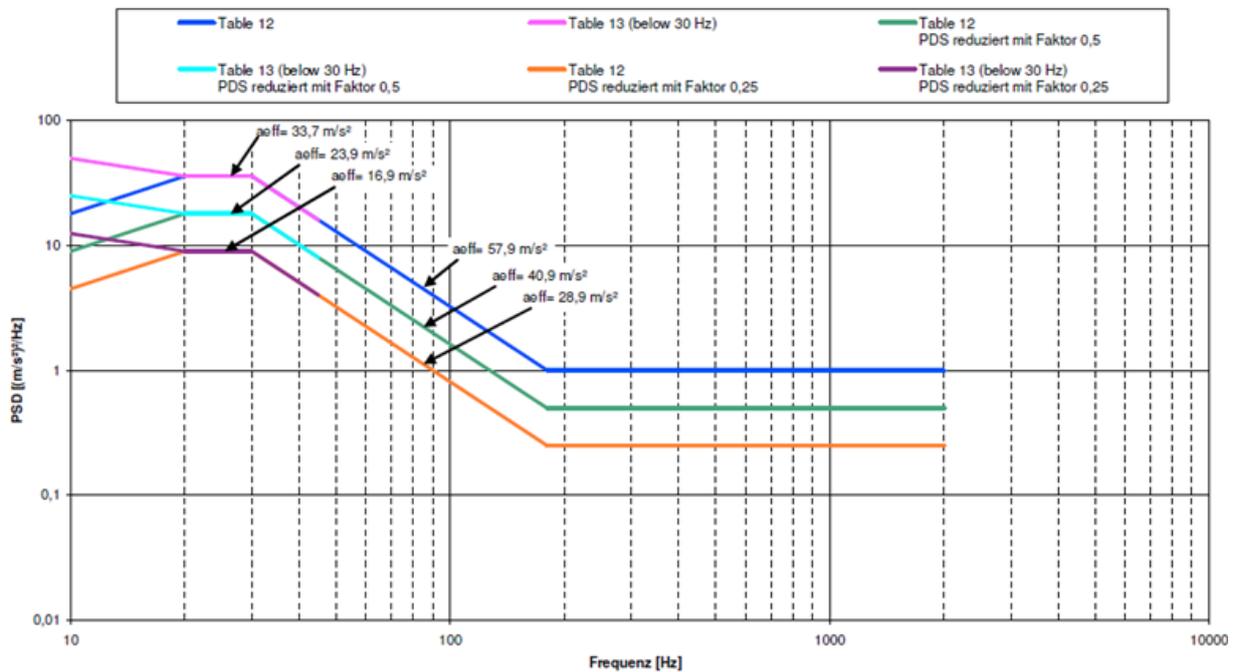


Abbildung 36: Vibrationsprofil gem. ISO 16750-3, Leistungsdichte über der Frequenz

5.1.1.5 Luftentfeuchtungs- & regeneratives Trocknungskonzept: Konzeption und Auslegung

Die Energiespeicher werden in einem Temperaturbereich zwischen -40°C und $+80^{\circ}\text{C}$ betrieben. Infolge von Kondensationseffekten ist – insbesondere bei Spannungen von bis zu 900V – durch Kriechströme, Kurzschlüsse und Oberflächenverschmutzung ein erhebliches Ausfallrisiko und die Beschädigung der Kontrollelektronik oder Korrosion an wichtigen Bauteilen gegeben, etwa den Kontakten des Hauptstrompfades. Eine erfolgversprechende Lösung bieten hier leistungsstarke und zuverlässige Luftentfeuchtungs-Komponenten. Ziel war daher die Entwicklung eines kompakten, zuverlässigen, und kostengünstigen Designs für eine möglichst wirtschaftliche Herstell- und Montierbarkeit dieser neuen Funktionseinheit. Im Hinblick auf höchste Leistungsfähigkeit und höchstmögliche Nutzungsdauer war besondere Beachtung auf den Aspekt der Regenerationsfähigkeit zu legen.

Im Rahmen von FUEL wurden Untersuchungen zum aktiven Entfeuchtungs- und Trocknungskonzept durchgeführt. Begleitend hat man in Temperatur-Feuchte-Wechselprüfungen auf Basis der aufgebauten Demonstratoren die entstehende durchschnittliche Kondensatmenge innerhalb des Energiespeichers ermittelt. Für die aktuellen Demonstratoren wurde eine passive Entfeuchtung über ein Ablaufelement im Gehäuseboden realisiert (Abbildung 37). Auch diese vergleichsweise einfache Lösung muss alle Anforderungen erfüllen, u.a. die Dichtheit gemäß IP6k9k beim Dampfstrahlen von außen.

Zum Schutz gegen Dampfstrahlreiniger ist ein (langer) geführter Schlauch mit der Gehäuseöffnung verbunden (schwarz im Teilbild rechts in Abbildung 37 angedeutet; das Bild zeigt eine detaillierte Betrachtung der Gehäuseöffnung). Die Gehäuseöffnung selbst wird durch ein feinmaschiges Gitter geschützt. Dieses verhindert bei abgerissenem bzw. entferntem Schlauch zwar ein Eindringen eines Fingers oder Drahts, erfüllt aber bei entferntem Schlauch keine Umweltaanforderungen nach IP6k9k. Hierfür wäre die Einbringung einer Membran erforderlich, jedoch könnte dann das Kondenswasser nicht ablaufen. Die thermische Isolation der unteren Gehäusehälfte wird durch gegossenen / tiefgezogenen Schaum erreicht.

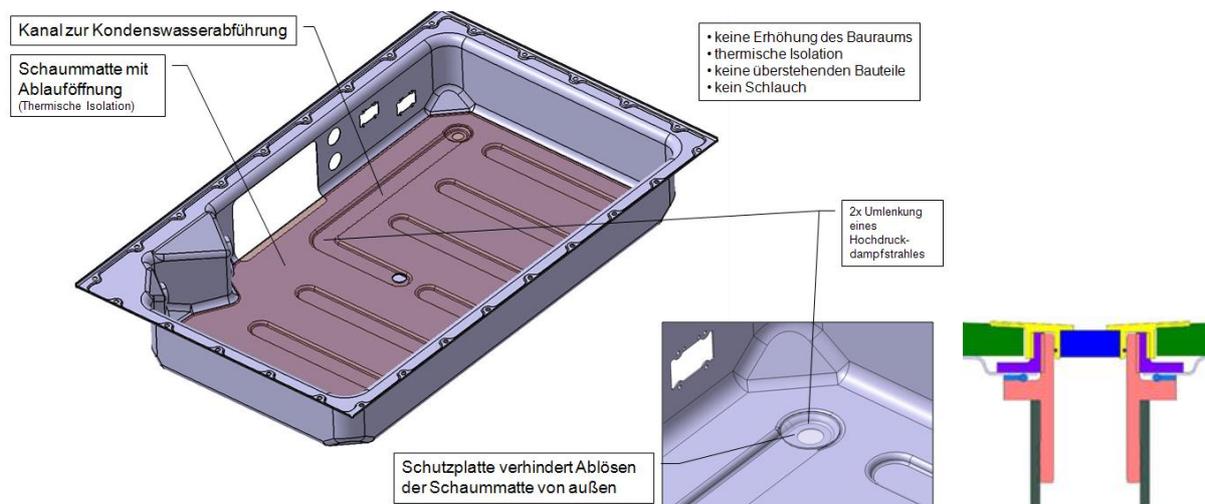


Abbildung 37: Ablaufelement im Gehäuseboden

5.1.2 900V Elektronik, Elektromechnik-Bauteile und Systemarchitektur

Um die hohen geforderten Leistungen zu erreichen, muss die elektrische Spannung der NFZ-Energiespeicher auf bis zu 900V erhöht werden. Alle elektronischen und elektromechanischen Subsysteme müssen dieser Spannung über die gesamte Lebensdauer sicher widerstehen, ohne dass Risiken für Personen oder die Zuverlässigkeit des Systems entstehen. Im Störfall muss die Überwachungselektronik in der Lage sein, die Hochspannung sicher von der Umgebung zu trennen.

Die hierfür zu entwickelnde Systemarchitektur sollte sich einerseits an bekannte, funktionell nachgewiesene Konzepte anlehnen. Andererseits galt es, die notwendigen, durch das Master-Slave-Konzept bedingten Änderungen zu identifizieren und zu implementieren. Dabei mussten Architekturen identifiziert werden, die sich trotz der hohen Spannungen mit verfügbaren elektronischen Komponenten und Fertigungsverfahren umsetzen lassen.

Basierend auf bestehender Elektronik für 450V Anwendungen wurden von Continental Funktionen implementiert, um eine für Master-Slave-Systeme geeignete Elektronik bereit zu stellen. Dabei mussten die hohen Anforderungen an die elektrische Isolation und die sehr hohen Prüfspannungen von bis zu 3200V beachtet und konstruktiv umgesetzt werden.

5.1.2.1 Entwicklung der Systemarchitektur

Die Erarbeitung einer geeigneten Systemarchitektur für die 900V Steuer-
elektronik einer HV Batterie³¹ umfasste die Identifikation aller relevanten
Anforderungen an die Batterie, das Ausarbeiten einer Systemarchitektur
zur Erfüllung diese Anforderungen, das Erstellen eines Sicherheitskon-
zeptes, das Ableiten von Anforderungen an Teildisziplinen Mechanik,
Elektronik und Software, das Auswählen von elektromechanischen Kom-
ponenten (wie beispielsweise Sicherungen) sowie das Erstellen einer
FMEA.

Anforderungen an den FUEL Demonstrator

Die FUEL Demonstratoren wurden bei der TAEM GmbH nach den Pro-
zessen der Automobilindustrie entwickelt. Die Anforderungen an eine HV
Batterie sind vielfältig, die wichtigsten sind in Abbildung 38 zusamen ge-
fasst.



Abbildung 38: Anforderungen an eine HV Batterie

Zusammen mit Projektpartner ZF wurden von Continental die spezifischen
Anforderungen für die Anwendung der HV Batterie in Nutzfahrzeugen
erarbeitet. Als Ziel-Plattformen wurden Verteiler-LKWs mit 7,5-12 to Ge-
samtgewicht und Gelenkbusse mit bis zu 28 to Gesamtgewicht definiert.
Es zeigte sich, dass die Anforderungen an die FUEL Demonstratoren in
wesentlichen Punkten von denen der PKW Anwendungen abweichen:

³¹ (HV – High Voltage, in diesem Dokument Nennspannungen >60V)

- *Leistungsfähigkeit:* Vorgesehen wurden Anwendungen auch in Gelenkbussen mit bis 28to zulässigen Gesamtgewicht. Um hier eine merkliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs zu erzielen, sind sehr hohe elektrische Leistungen des Energiespeichers gefragt. Ziel waren 120kW Entladeleistung für 10 Sekunden.
- *Nennspannung:* Aus den hohen Leistungsanforderungen ergab sich auch eine höhere Nennspannung der Batterie, die im Bereich bis 900V statt bisher 450V (PKW) liegt.
- *Langlebigkeit:* Einsätze im kommerziellen Bereich, wie z.B. Stadtbusse erfordern eine hohe Betriebsdauer bis 50.000 Stunden bei einer Lebensdauer von bis zu 10 Jahren.
- *Mechanische Robustheit:* Die Vibrationsanforderungen sind wesentlich höher als bei PKW Anwendungen, einmal durch die höheren Vibrationsbelastungen bei LKWs, als auch die insgesamt deutlich höhere Betriebsdauer (50.000 h bei NKW, 5.000 h bei PKW).
- *Bordnetzspannung:* Bei NKWs werden 24V als Bordnetzspannung verwendet (im PKW: 12V).
- *Wartbarkeit:* Die Batterie muss auch von Nicht-Elektrofachkräften ein- und ausgebaut werden können. Zudem sollen einfache Wartungsarbeiten auch für Nicht-Elektrofachkräfte möglich sein. In beiden Fällen muss die Gefahr eines elektrischen Schlags vermieden werden.

Entwicklung der Systemarchitektur für NKW

Grundlage für die Entwicklung der Systemarchitektur für die FUEL-Demonstratoren waren bekannte Systemarchitekturen, wie sie im PKW Bereich zum Einsatz kommen. Aufgrund der großen Bandbreite der Fahrzeuggewichte der Zielanwendungen und der damit einhergehend großen Bandbreite an Leistungsanforderungen ist ein modular erweiterbares Batteriesystem sinnvoll, mit dem Ziel eines großen Anteils von Gleichteilen (aus wirtschaftliche Gründen). Es wurden zwei Konfigurationen des FUEL Demonstrators ausgearbeitet:

- *Demonstrator ELF2-60:* Zielanwendung ist der Verteiler LKW bis 7,5to. Der Energiespeicher basiert auf einer Reihenschaltung von 96 (z.B. 4 x 24) 5,5Ah Zellen in einem Batteriegehäuse.
- *Demonstrator ELF2-120:* Zielanwendung hier sind Hybridbusse bis 28to. Der Energiespeicher besteht hier aus zwei Energiespeichern ELF2-60. Er beinhaltet 180 Zellen mit je 5,5 Ah.

Die Reihenschaltung zweier HV-Batterien im Fall ELF2-120 stellte sich als besondere Herausforderung der Systementwicklung heraus, welche über den bekannten Stand der Technik bei Hybridbatterien hinausgeht. Entsprechend der Forderung nach gleichen Systemschnittstellen beider Konfigurationen wurde ein Master-Slave Konzept entwickelt. Die Systemfunktionen wurden jeweils auf Master oder Slave BMC allokiert. Aus der BMC des Master Speichers wurde so das MCB (Master Control Board). Im Laufe der Entwicklung konnten dann MCB und BMC vereinheitlicht werden, so dass bei den Demonstratoren nunmehr ausschließlich die MCB zum Einsatz kommen.

Die FUEL-Energiespeicher ELF2-60 bestehen aus folgenden Hauptkomponenten:

- *Batteriemodule*: Sie enthalten die Li-Ionen Zellen, welche innerhalb eines Moduls seriell (=in Reihe) geschaltet sind. Die Batteriemodule selbst sind auch seriell verschaltet.
- *Schütze*: Diese verbinden und trennen die Batterie elektrisch vom restlichen Hybridsystem, je nach Anforderung und Systemzustand. Bei sicherheitsgefährdenden Systemzuständen (Isolationsfehler, Überstrom, Übertemperatur der Batterie und dergleichen) müssen die Schütze den HV-Stromkreis sicher unterbrechen.
- *Vorladung*: Parallel zur Batterie geschaltet befindet sich im HV-Kreis eine Kapazität in Form des Zwischenkreiskondensators. Beim Zuschalten der Batterie muss dieser Kondensator über einen strombegrenzenden Vorladewiderstand auf die Batteriespannung aufgeladen werden. So werden die Kontakte der Schütze geschont, welche sonst regelmäßig sehr hohe Ströme schalten müssten.
- *Sicherung*: Im Fall von Überstrom oder Kurzschluss muss die Sicherung im Zusammenspiel mit den Schützen den HV-Stromkreis sicher unterbrechen.
- *CSE (Cell Supervising Electronics)*: Elektroniken, welche Zellspannungen und -temperaturen messen und an die BMC weiterleiten. Auf den CSEs befinden sich auch die Symmetrierschaltkreise zum Ausgleich der Ladezustände der einzelnen Zellen.
- *MCB (Master Control Board)*: Steuergerät, welches sämtliche Messwerte des Batterie-Systems (auch von CSE und Stromsensor) erfasst und die Steuerung der Schütze, wie auch der Symmetrierschaltkreise übernimmt. Die Kommunikation mit den restlichen Hybridkomponenten übernimmt die MCB.
- *Stromsensor*: Misst den Strom im HV-Kreis, mittels Messshunt.

- *Wartungstrenner*: Hiermit kann der HV-Stromkreis sichtbar und dauerhaft unterbrochen werden. Dies wird z.B. für den Anschluss der Batterie an das Hybridsystem benötigt.

Ein Konzept zur elektrischen Sicherheit des 900V Systems bezüglich Isolationskoordination und Schutz vor elektrischem Schlag wurde erarbeitet und vom TÜV Süd geprüft.

5.1.2.2 900V Steuerelektronik – Master Control Board (MCB)

Die Entwicklung des Schaltungsdesigns der Steuerungselektronik (Master Control Board MCB) wurde infolge der zu betrachtenden Gesichtspunkte in mehreren Schritten durchgeführt.

1. Schaltungsdesign und PCB-Layout

Zunächst wurden die Anforderungen an das MCB zusammen getragen und in DOORS, einer Datenbank-Lösung für Anforderungs-Spezifikation und –management auf die Hardware Ebene herunter gebrochen, spezifiziert und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet. Zusammenfassend für die Steuerelektronik MCB gliedern sich die Anforderungen wie folgt:

- Die Steuerelektronik soll modular aufgebaut sein, um in einer einzelnen Batterie mit 450V oder im Verbund mit zwei Batterien mit 900V im Master-Slave-Betrieb eingesetzt werden zu können.
- Das sichere Schalten der Batteriespannung durch die Schütze muss kontrolliert und erkannt werden (Stuck at Detection).
- Kommunikation mit der Fahrzeug- und der Batterie-internen Elektronik muss gewährleistet werden.
- Das Vorladen des Zwischenkreises muss überwacht und angesteuert werden.
- Eine redundante Sicherheitsarchitektur soll zur Verfügung gestellt werden, um bei Übertemperatur, Überspannung oder Überstrom in den sicheren Zustand schalten zu können.
- Die Anforderungen an die Umwelt- und EMV Qualifikation entsprechen im groben den Normen für LKW Applikationen und wurden Continental durch den Kunden ZF vorgegeben und spezifiziert.

Beim Schaltungsdesign und der Erstellung des PCB Layouts wurde besonders auf folgende Punkte geachtet:

- *Isolationskoordination:* Für Nennspannungen ab 60 V_{DC} ist ein Schutz gegen direktes Berühren (z.B. Isolierung) und indirektes Berühren (z.B. Schutzmaßnahme Isolationsüberwachung) vorzusehen. Ein durchgängiges Normenwerk besteht jedoch für die Automobilindustrie nicht, weswegen die Notwendigkeit bestand, bestehende Gesetze und Normen zu sichten und einen Standard eines elektrisch sicheren Betriebsmittels zu definieren. Diese Umsetzung erfolgte für Continental in Zusammenarbeit mit dem TÜV SÜD. Auf diese Ergebnisse konnte zurückgegriffen werden. Reviews der Schaltungen und des PCBs erfolgten entsprechend.
- *EMV optimiertes Design:* Um im Layout ein EMV optimiertes Design erstellen zu können, wurden EMV- Simulationen und entwicklungs- begleitende Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse umgesetzt und verifiziert wurden. Zudem wurden während der Layout-Erstellung die Continental EMC Guidelines umgesetzt.
- *DTC (design to cost):* Um ein kostengünstiges Design zu erstellen, wurde die Stückliste bewertet. Es wurden Maßnahmen definiert, welche den Ersatz von verschiedenen Bauelementen und die Verwendung von generischen Modulen zur Folge hatten.

Die Umsetzung des Designs führte auf die in Abbildung 39 zu sehenden MCB für die FUEL Demonstratoren.



Abbildung 39: MCB für FUEL Demonstratoren

2. Abgleich und Erstellung der Spezifikation für die EMV³² Qualifikation

Zur Durchführung und zum Bestehen einer EMV-Qualifikation ist das Vorliegen einer Qualifikationsvorschrift in Form einer Testspezifikation auf der Grundlage der einschlägigen Richtlinien und Konzernvorgaben erforderlich. In enger Zusammenarbeit mit dem eigenen akkreditierten Testzentrum wurde diese am Entwicklungsstandort von Continental in Regensburg erstellt. Ein EMV-Standard für Hochvoltanwendung in der Automobilindustrie ist nicht verfügbar. Erweiterte Tests sowie die Anpassung bestimmter Parameter mussten in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen OEMs erarbeitet werden.

3. Erstellung und Erprobung einer Testadaption für die EMV-Qualifikation

Auf Grundlage der erstellten Testspezifikation und unter Berücksichtigung der besonderen Erfordernisse einer Hochspannungsanwendung wurde eine Erprobungsvorrichtung erstellt, die das Einbringen der zu qualifizierenden MCB-Elektronik in die Messkammer ermöglicht (Abbildung 40). Die Testvorrichtung wurde erfolgreich in Betrieb genommen und unterstützt seither die laufenden entwicklungsbegleitenden Messungen.

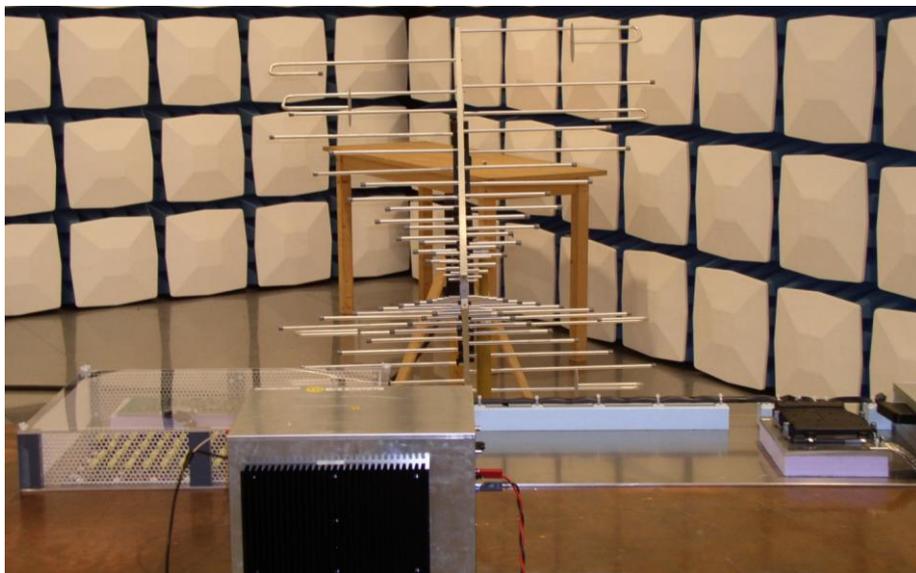


Abbildung 40: MCB Testadaption – EMV Antennenmessung

In Zusammenarbeit mit dem Continental konzerneigenen EMV Zentrum wurden schaltungstechnische EMV-Maßnahmen erarbeitet und umgesetzt. Durch EMV-Simulationen für kritische Schaltungsteile konnte bereits

³² EMV: Elektro-Magnetische Verträglichkeit

im Vorfeld die Wirksamkeit der Maßnahmen abgeschätzt werden. Verifikationsmessungen haben gezeigt, dass die Überkopplung vom Hochvolt- auf den Niedervolt-Kabelbaum extrem kritisch ist und durch geeignete Maßnahmen gedämpft werden muss.

4. Erstellung und Erprobung eines automatischen Testsystems für die parametrische Funktionsprüfung sowie Entwicklung eines Funktionstestablaufs

Mit der Zielsetzung, einen präzisen, zuverlässigen und reproduzierbaren Testablauf bei der detaillierten Funktionsprüfung von sowohl Kunden- als auch Qualifikationsmustern der Batterieelektronik zu gewährleisten, wurde eine automatische Testanlage entwickelt und realisiert. Das umfangreiche Prüfprotokoll erlaubt eine qualifizierte Beurteilung der Funktion und der Genauigkeit der Messelektronik.

Das automatische Prüfsystem zementiert im sogenannten Initial Performance Test den Status Quo der zu qualifizierenden Prüflinge und liefert in den Zwischentests und dem Final Performance Test den Wert der Abweichungen der Parameter.

5. Sourcing der neuen elektronischen Bauelemente

Im Rahmen der Weiterentwicklung und des Requirement Engineering entstanden Anforderungen an die eingesetzten elektronischen Bauelemente, die den Ersatz herkömmlicher Komponenten durch neue Bauteile erfordern. Die noch relativ neu am Markt befindlichen elektronischen Bauelemente für die Li-Ionen Batterieapplikationen mussten technisch ausgewählt und durch das Supplier Quality Management (SQM) sowie den Technischen Einkauf „gesourced“ werden. Die „Inquiry Sheets“ für die Marktanalyse der lieferbaren Komponenten wurden erstellt und der Sourcing Prozess seitens der Elektronikentwicklung aktiv unterstützt.

6. Einführung der neuen elektronischen Bauelemente in das „Electronic Component Data Management“ (ECDM)

Die neuen elektronischen Komponenten wurden im ECDM System mit ihren Kenndaten angelegt. Aufgrund der Neuanlage wurde eine systemübergreifende CAD-Geometrie erstellt, die die Verwendung des Bauteils in den Design-Werkzeugen zur Schaltplanerstellung ermöglicht. Der Qualifizierungsprozess seitens SQM wurde gestartet.

7. Erstellung von FMEA und FMEDA

Die Erstellung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) sowie der FMEDA³³ erfolgt in enger Kooperation zwischen einem erfahrenen FMEA-Moderator und dem jeweiligen Hardware-Entwickler unter Verwendung des verbreiteten Software-Pakets IQ-FMEA. Beide Analysen wurden während des Betrachtungszeitraumes auf einen dem Musterstand entsprechenden adäquaten Reifegrad gebracht. Die Umsetzung der definierten Maßnahmen wurde entsprechend nachverfolgt.

8. Design Verifikation

Die einzelnen Musterstände der Elektronik wurden einer Verifikation unterzogen, wobei im ersten Schritt das Hauptaugenmerk auf die einzelnen Module gelegt wurde. Die Module wurden im Vorfeld durch geeignete Abgrenzung der umgesetzten Funktionen definiert. In einem zweiten Schritt wurde die Gesamtfunktionalität der Elektronik verifiziert. Hier lag das Hauptaugenmerk auf der Schnittstelle zur Systemumgebung.

9. Erstellung einer Zuverlässigkeitsprognose der MCB³⁴

Die zu erwartende Zuverlässigkeit der in der MCB verbauten elektronischen Bauteile wurde anhand der mitgeteilten Temperaturprofile und der Betriebsdauer mithilfe der in der SN29500 hinterlegten Bauteileausfallraten prognostiziert.

10. Ausblick auf die weiteren Entwicklungen zum MCB

Im Nachgang zum Forschungsprojekt FUEL werden seitens Continental die folgenden Aufgabenpunkte vorangetrieben:

- *EMV Maßnahmen:* Die Batterie als Schnittstelle zwischen HV und LV muss die Überkopplung von HV auf LV filtern. Diesbezüglich haben Simulationen und Messungen an der Gesamtbatterie gezeigt, dass eine Filterung der Signale direkt am fahrzeugseitigen Stecker der Batterie erfolgen muss. Ein durchgängiges Massekonzept von

³³ FMEDA: Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis (die FMEDA ist ein Verfahren zur detaillierten Ermittlung von Fehlerursachen und deren Auswirkung auf ein System)

³⁴ MCB: Master Control Board (auf 900V ertüchtigtes Batterie-Management-System)

HV/LV Filter, PCB, MCB Gehäuse und Batteriegehäuse sowie Chassis stellt die Grundlage für ein gutes Ergebnis dar.

- *Bauteilequalifikation*: Die Bauteilequalifikation vor der Design Validation muss noch abgeschlossen werden.
- *Lebensdauererprobung*: Die Lebensdauererprobung der Elektronik gemäß Kundenanforderung und interner Richtlinien steht noch aus.

5.1.2.3 900V Steuerelektronik – Cell Supervising Circuitry (CSC, CSE)

Auch dieser Aufgabenpunkt wurde in mehrere Teilaspekte gegliedert. Die Punkte 4-7 entsprechen denen des vorhergehenden Abschnitts und werden daher hier nicht erneut aufgeführt.

1. EMV-gerechtes Schaltungsdesign und PCB-Layout

Ausgehend von einer vorgegebenen modularen Realisierung der Zellspannungsüberwachung und -balancierung in Blöcken zu jeweils 12 Zellen, wurde in EMV Verifikationsmessungen und in realen Aufbauten eine mangelhafte Immunität der in einer Daisy-Chain³⁵ Konfiguration verschalteten Mess- und Kommunikationssignale offenbar.

Als zielführend erwies sich die räumliche Zusammenlegung der einzelnen Akquisitionsmodule³⁶ eines Zellblocks auf ein singuläres Substrat³⁷ und die Ausbildung einer in den Zwischenlagen des Schaltungsträgers geschirmt ausgeführten Daisy-Chain-Verbindung. Darüber hinaus wurden die Filterkomponenten der analogen Signalkonditionierung dem Störpotential angepasst.

Die anschließende Verifikation dieses Maßnahmenpaketes ergab eine wesentlich verbesserte Robustheit des Schaltungsdesigns gegenüber elektromagnetisch induzierten Störgrößen. Der innerhalb eines Zellblocks verschalteten Anzahl an Einzelzellen entsprechend, wurden die Leiterplatten für 24- und 36-zellige Applikation ausgelegt.

Die Master-Slave-Struktur der Messschaltungen innerhalb eines Makromoduls blieb insofern erhalten, als die zusammengefassten Akquisitionsergebnisse einer jeden 24er/36er Anordnung über den jeweiligen im

³⁵ Daisy Chain bezeichnet eine in Serie verbundene Anzahl von Kommunikationspartnern, hier CSEs

³⁶ Als Akquisitionsmodule werden die Messsignalaufnahmeelektroniken für eine Anzahl von Li-Ionen-Zellen bezeichnet.

³⁷ Schaltungsträger, hier Leiterplatte

Mastermodul integrierten Gateway Controller via CAN-Bus an den über-
geordneten Battery Management Controller kommuniziert werden.

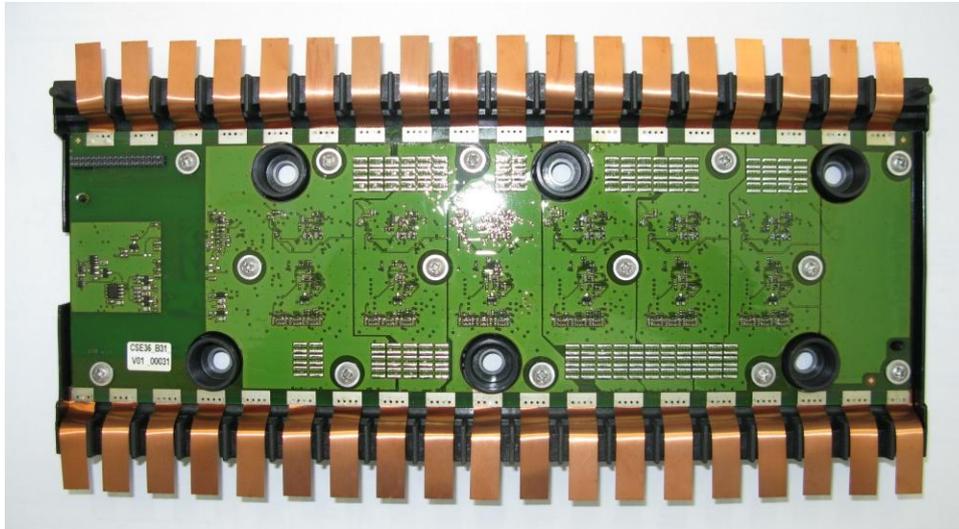


Abbildung 41: Ansicht der 36-zelligen Anordnung

2. Abgleich und Erstellung der Spezifikation für EMV-Qualifikation

Zur Durchführung und zum Bestehen einer EMV-Qualifikation ist das Vorliegen einer Qualifikationsvorschrift in Form einer Testspezifikation auf der Grundlage der einschlägigen Richtlinien und Konzernvorgaben erforderlich. In enger Zusammenarbeit mit dem eigenen akkreditierten Testzentrum in Regensburg wurde die Testspezifikation erstellt.

3. Erstellung und Erprobung einer Testadaption für die EMV-Qualifikation

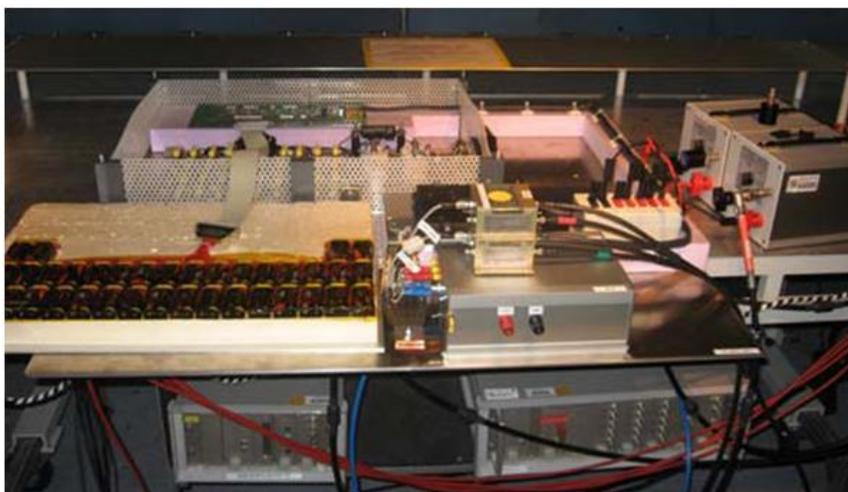


Abbildung 42: Ansicht der Testadaption

Auf Grundlage der erstellten Testspezifikation und unter Berücksichtigung der besonderen Erfordernisse einer Hochspannungsanwendung, wurde eine Erprobungsvorrichtung erstellt, die das Einbringen der zu qualifizierenden Cell-Supervising-Elektronik in die Messkammer ermöglicht (Abbildung 42). Eine Zellsimulationseinrichtung bestehend aus handelsüblichen Alkali-Mangan Batterien ist ebenso Bestandteil des Testadapters wie ein den realen Bedingungen nachempfunderer LV-Kabelbaum. Die Testvorrichtung wurde erfolgreich in Betrieb genommen und unterstützt seither die laufenden entwicklungsbegleitenden Messungen.

8. Design Verifikation der Zellspannungsmesselektronik

Im Hinblick auf bestmögliche Ausnutzung der gespeicherten Energie und genaueste Kalkulation der systemimmanenten Kennwerte (State-of-Health SoH, State-of-Charge SoC ...) ist eine hohe Genauigkeit der Zellspannungsmessung unabdingbar. Die von verschiedenen Einflussfaktoren – insbesondere auf Halbleiterebene - abhängige Genauigkeit der Zellspannungsmessung als Funktion der Temperatur wurde in Reihenuntersuchungen ermittelt (Abbildung 43).

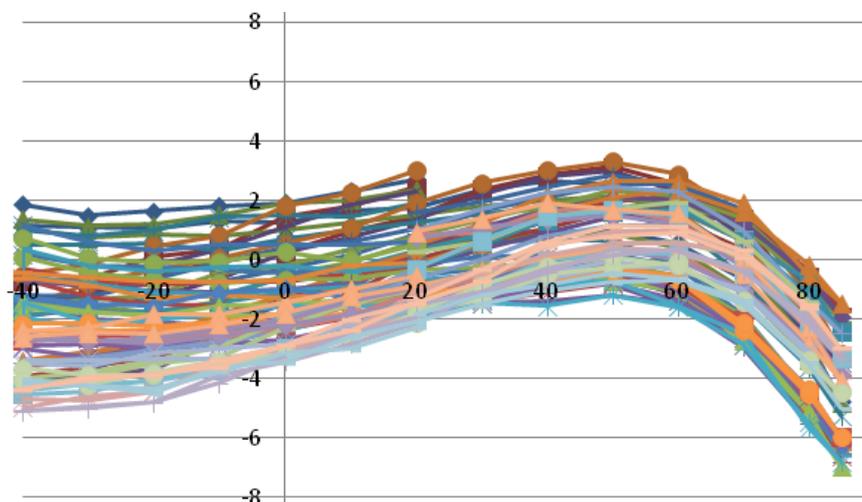


Abbildung 43: Exemplarische Darstellung der Messgenauigkeit der Zellspannung

9. Erstellung einer Zuverlässigkeitsprognose der CSE

Die zu erwartende Zuverlässigkeit der in der CSE verbauten elektronischen Bauteile wurde anhand der mitgeteilten Temperaturprofile und der Betriebsdauer mithilfe der in der SN29500 hinterlegten Bauteileausfallraten prognostiziert.

5.1.2.4 Ausarbeitung und Erprobung von toolunterstütztem Kabelbaumdesign mit Fokus auf simultaner Entwicklung von Montageverfahren

Hochvolt- und Signalleitungen in Systemen, die vergleichbar komplex aufgebaut sind wie Li-Ionen Energiespeicher, werden überwiegend unteroptimal ausgelegt und nachfolgend manuell vorkonfektioniert. Problemlösung bietet hier ein norm- und funktionsdirektes Design in der Entwicklung mit Schnittstelle in die Konstruktion. Ziel war es daher, über eine 3D-toolunterstützte Auslegung eine optimierte Dimensionierung bis hin zu einer automatisierten Konfektionierung der Kabelbäume zu ermöglichen.

Der Kabelbaum in den FUEL-Energiespeichern teilt sich in Hochvolt- und Signalleitungsumfänge auf. Die Auslegung und Konstruktion erfolgten zunächst für den BF2 Entwicklungsstand. Die Auslegung und Konstruktion erfolgte dabei noch nicht mit einem Optimierungstool. Damit ergaben sich direkte Auswirkungen auf die Qualität des Kabelbaums: Radien, Spannungen, Kollisionen und elektromagnetischen Wechselwirkungen ließen sich mit einem derartigen Vorgehen zielorientierter simulieren. Die Konstruktion wurde zunächst rein manuell durchgeführt. Hinsichtlich der Berücksichtigung optimierter Herstellbarkeit erfolgte die Auslegung in Abstimmung mit potentiellen Lieferanten und Herstellern.

Optimierungen am Kabelbaum

Im Zuge des Redesigns zum BF3 wurden mehrere Modifikationen am Kabelbaum durchgeführt, mit dem Ziel, die Herstellbarkeit und Montage des Kabelbaums für die FUEL Energiespeicher zu verbessern (s. Tabelle 4).

Abbildung 44 zeigt die Änderungen des Gesamtkabelbaums. Die wesentlichen Modifikationen am Kabelbaum zwischen den Entwicklungsständen BF2 und BF3 sind in Abbildung 45 verdeutlicht. Weitere Optimierungen beim BF3 Kabelbaum betrafen die verbesserte Definition der Anforderungen an den Kabelbaum (Schutzklassen, Test, EMV, und elektrische Requirements) sowie die konstruktive Beseitigung undefinierter, nicht abgefangener Kabelüberlängen.

Herstellbarkeit

Fuel Projekt BF2	Fuel Projekt BF 3
4 Kabelbäume	2 Kabelbäume
-	Gesamtkabelbaumlänge optimiert
Schütz ohne Schnittstelle an Kabelbaum angebunden	Schnittstelle Schütz für vereinfachte Herstellung und Service definiert
-	Werkzeugkosten geringer da weniger Kabelbäume

Montage

Fuel Projekt BF2	Fuel Projekt BF 3
Teilweise müssen Steckverbinder während Gesamtmontage konfektioniert werden	Vorkonfektionierte Kabelbäume
Führung und Halterungen mit Kabelbinder an anderen Modulen befestigt (Werkzeug zur Montage ist nötig)	Führung und Halterungen an Kabelbaum vorkonfektioniert (Werkzeug zur Montage ist nicht nötig)
Kabelbäume teilweise separate Baugruppe	Kabelbäume in Elektrikmodul integriert (Vormontagebaugruppe)

Tabelle 4: Maßnahmen zur Verbesserung von Herstellbarkeit und Montage des Kabelbaums



Abbildung 44: Vereinfachung des FUEL Kabelbaums im Zuge des Redesigns zum BF3

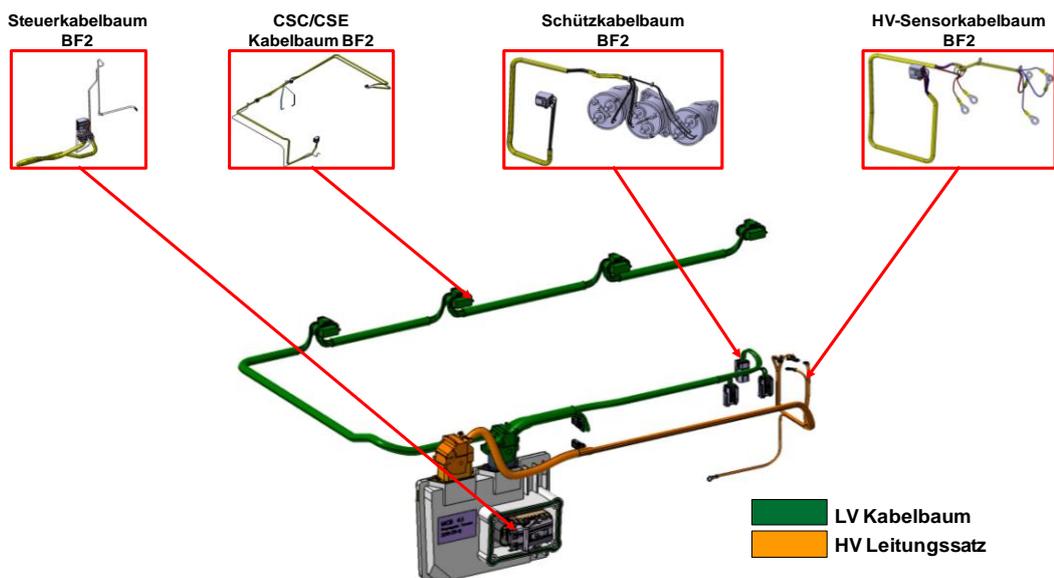


Abbildung 45: Verdeutlichung der wesentliche Einzelmaßnahmen am Kabelbaum

Optimierungen an der Konstruktion des Elektronikmoduls

Im Hinblick auf Montageverbesserungen zielte BF3 auf die Verwendung leicht in das Elektronikmodul integrierbarer vorkonfektionierter Kabelbäume, wobei ein Teil des Kabelbaums unmittelbar im Master Control Board (MCB) abgebildet wurde. Weitere allgemeine Optimierungen am Elektronikmodul betrafen eine höhere Einzelteildichte (kompaktere Bauform), vereinfachte Schnittstellen zu anderen Baugruppen, eine höhere Testdichte der NFZ-Anforderungen hinsichtlich Lebensduranforderungen (FEM-Berechnungen hinsichtlich Festigkeit sowie thermisch), sowie die Optimierung der passiven Sicherheitsvorkehrungen hinsichtlich Luft- und Kriechstrecken (Funktionssicherheit). Schließlich wurde beschlossen, den Quereinbau des Elektronikmoduls in den 4x24 Energiespeicher mit höchster Priorität zu verfolgen.

5.1.2.5 Entwicklung einer Strom-Messschaltung (CSM) für die Hochstromanwendung

Sensoren zur Bestimmung von Laststrom und Spannung eines NKW-Energiespeichers sind von systemrelevanter Bedeutung, mussten aber für die FUEL 900V-Systeme erst entwickelt werden, da Standardlösungen hier nicht existierten. Die Lösung bot eine gezielte Weiterentwicklung von Hochvolt-Technologien mit Hinblick auf die besonderen Anforderungen des Automobilsektors. Ziel für Continental war es, in FUEL einen geeigneten Stromsensor zu entwickeln und diesen hinsichtlich der Herstell- und Montierbarkeit zu optimieren.

Bei der Messung des Stroms über einen Shunt in Hochstromanwendungen kommt es darauf an, dass sehr geringe Leistungsverluste auftreten. Daher werden Shunts mit sehr kleinen Widerstandswerten (eine $\mu\Omega$) verwendet. Da diese entsprechend zu sehr geringen, zu messenden Spannungen (μV) führen, bedarf es hier einer sehr genauen und robusten Messschaltung. Dabei geht es besonders um das präzise Messen der über dem Shunt abfallenden Spannungen, die schon durch geringe äußere Störungen stark beeinträchtigt werden können. Hier wurde speziell auf die Expertise der Fa. Isabellenhütte zurückgegriffen, die im Bereich der Messtechnik für Präzisions-Strommessungen jahrelange Erfahrung besitzt. Die technische Auslegung der Strommess-Schaltung wurde von ihr maßgeblich mit verbessert. Da die Überwachung des Stroms im Gesamtsystem der Batterie hohe Sicherheitsanforderungen stellt, wurden während der gesamten Entwicklung der Strom-Messschaltung die Anfor-

derungen der ISO26262 berücksichtigt. Dies betrifft u.a. die Durchführung der FMEA, die von der Fa. Isabellenhütte erstellt wurde.

Bauteil-Spezifikation

Aus den Anforderungen des Energiespeichersystems wurden die Umgebungstemperaturanforderungen an die Strom-Messschaltung ermittelt, welche für die Abschätzung der Lebensdauer herangezogen werden. Der allgemeine Umgebungstemperaturbereich wurde gemäß ISO 16750-1 definiert (-40 °C bis +85 °C). Die IP-Schutzklasse wurde auf IP5K4 festgelegt. Es ergeben sich die Anforderungen gemäß DIN 40050. Die Medienbeständigkeit wurde gemäß ISO 16750-5 definiert und Energiespeicher-internen Medien-Listen erstellt, gegen welche das Gehäuse der Strom-Messschaltung resistent sein muss. Die Anforderungen für die Vibrationen wurden entsprechend ISO 16750-3 festgelegt und die Schock-Anforderungen gemäß IEC 60068-2-27 definiert.

Basierend auf den Anforderungen an die Strom-Messschaltung wurde ein Konzept entwickelt, aus dem die Systemarchitektur abgeleitet wurde. HV- und EMV-Anforderungen wurden abgeleitet bzw. festgelegt entsprechend den Anforderungen für den Gesamtenergiespeicher. Anforderungen des 24V-Bordnetzes bestehen nicht, da die Strom-Messschaltung nicht direkt am 24V-Bordnetz hängt.

Prüfspezifikation

Die Funktionstestspezifikation wurde entsprechend den definierten Funktionen erstellt, die Lebensdauertestspezifikation entsprechend den Lebensdauer- und Umwelanforderungen. Prüfmittel und –aufbauten wurden definiert. Die Lebensdauertestanlage wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Ebenfalls realisiert und in Betrieb genommen wurde der Funktionstester BETSY.

Auslegung und Konstruktion einer optimierten Strommessschaltung

Zunächst wurden das HW-, SW- und ME-Konzept aus der Systemarchitektur erarbeitet, HW und ME unter Berücksichtigung der Umgebungsanforderungen (Luft- und Kriechstrecken, Umweltbedingungen) und Sicherheitsanforderungen entwickelt. Die Entwicklung der SW erfolgte unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen. Der Aufbau von Entwicklungsmustern, die Inbetriebnahme der HW und SW sowie elektrische ent-

wicklungsbegleitende Tests inkl. der Messschaltungen wurden definiert und durchgeführt. Entwicklungsbegleitende SW-Tests wurden definiert und durchgeführt, ebenso erfolgten mechanische Entwicklungstests.

Schließlich wurden Tests des Gesamtsystems (HW, SW, ME) definiert und durchgeführt. Hier wurde besonderer Wert auf Tests der galvanischen Entkopplung der Hochstromseite von der Kommunikations-Seite, auf EMV-Tests sowie Tests der Genauigkeit der Strommessung gelegt. Anschließend erfolgte die mechanische und elektromechanische Integration der Strom-Messschaltung in den Hochstrompfad der Batterie.

Erarbeitung eines Herstellungs- und Montagekonzeptes für die Messschaltung

Das Herstellungs- und Montage-Konzept wurde gemeinsam mit Experten der Technologie und Fertigungsplanung erstellt und dabei spezielles Augenmerk auf die Anforderungen der Fertigung in der Automobilindustrie bzgl. v.a. Kosten und Fertigungsausfällen gelegt. Es wurde versucht, speziell auf schon etablierte und erprobte Fertigungsverfahren zurückzugreifen.

Realisierung der Entwicklungsmuster

Die Entwicklungsmuster (Abbildung 46) für die Strommessschaltung wurden anhand des ausgearbeiteten Herstellungs- und Montagekonzeptes auf Prototypenwerkzeugen durch einen Prototypenbauer aufgebaut und die Muster mit Hilfe des Funktionstesters in Betrieb genommen (sowohl für Einzeltests als auch für den Einsatz im Gesamtsystem Batterie). Die in diesem Rahmen gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Montage flossen im Zuge von Weiterentwicklungen für erleichterte Fertigbarkeit in das Design ein.



Abbildung 46: Stromsensor FUEL Demonstratoren (ohne Deckel)

Durchführung von Validierungstests

Anhand der aufgestellten Prüfspezifikationen und mit der aufgebauten Lebensdauertestanlage wurde eine Umwelterprobung mit der Strommessschaltung durchgeführt. In der Umwelterprobung wurde die Strom-Messschaltung einer beschleunigten Alterung unterzogen und das ausgearbeitete Konzept der Schaltung auf die Einhaltung der an sie gestellten Anforderungen über Lebensdauer geprüft. Aus den Ergebnissen der Lebensdaueruntersuchungen wurden Änderungen am Design abgeleitet, die zur Erhöhung der Umweltbeständigkeit führen.

Bei der Umweltprüfung wurden z.B. Tests zur Temperatur- und Feuchtigkeits-Beständigkeit, aber auch zu Vibrations- und Shock-Beständigkeit durchgeführt. Diese Tests erfolgten einzeln an der Strom-Messschaltung und wurden entsprechend ausgewertet. Teilweise wurden diese Tests auch zusätzlich im Gesamtsystem der Batterie durchgeführt. Im Laufe der Untersuchungen wurden die Muster regelmäßig am Funktionstester auf die Einhaltung der Parameter getestet. Die Umwelterprobungen bestätigten, dass das ausgearbeitete Konzept die Anforderungen erfüllt. Zusätzlich wurde die optimierte Strom-Messschaltung einer EMV-Erprobung unterzogen. Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse der EMV-Messungen.

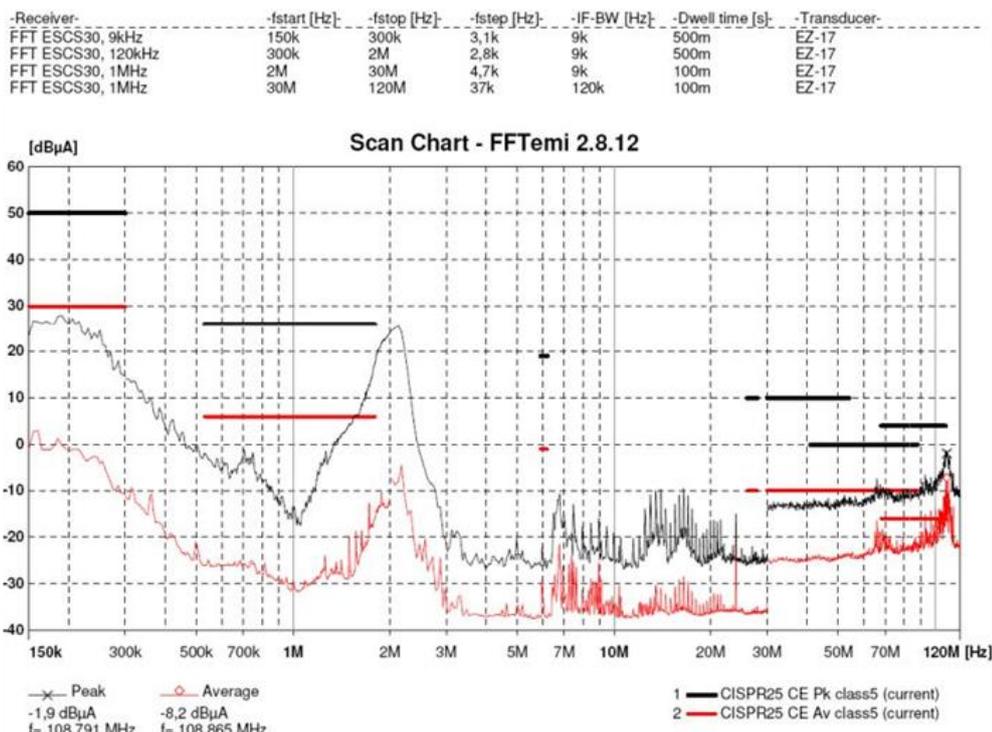


Abbildung 47: Ergebnisse einer EMV-Untersuchung (radiated emissions)

Im Rahmen der zuvor definierten Tests wurde besonders auf die Einhaltung der geforderten Messgenauigkeit sowie auf die sichere Kommunikation der Schaltung mit dem übergeordneten Steuergerät geachtet. Speziell die Anforderungen die Hochvolt-Sicherheit nach IEC60664-1 wurden im Rahmen der Entwicklung der Stommessschaltung getestet, sowohl auf Komponenten-Ebene als auch im Verbund im Gesamtsystem der Batterie.

5.1.3 Li-Ionen Zelldesign

Den wohl wichtigsten Teil der FUEL Energiespeicher stellen die Speicherzellen dar. Wie bei der Vorstellung des wissenschaftlich-technischen Standes bei Projektstart erläutert, wurde in FUEL der Einsatz gestackter angeordneter Lithium-Ionen-Flachzellen verfolgt. Die Forschungsarbeiten hierzu führten auf die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Ergebnisse.

5.1.3.1 Abstimmung der Bauteilgeometrien, Werkstoffe und Toleranzen

Ziel der Arbeiten hier war die Festlegung des äußeren Zelldesigns, welches in Verbindung mit dem Design der umgebenden Baugruppe die außergewöhnlichen Lebensdauer- und Robustheitsanforderungen im NKW gewährleistet. Im Vergleich zum PKW setzt die lange Lebensdauer von NKWs eine exakte Bestimmung der elektrischen Parameter, die vollständige Charakterisierung der verwendeten Zelltypen und eine Analyse des Alterungsverhaltens der Einzelzellen voraus, was zwangsläufig ein Kernkriterium für die Auslegung von elektrischen Energiespeichern ist. So wurde beabsichtigt, den Aspekt der Zell-Volumenänderung durch Alterungsversuche abzusichern und in die Konstruktion von Bi-Pack und Zellmodul mit einfließen zu lassen. Via Toleranzanalyse sollte dieser Betrag bei der Auslegung der Montageprozesse berücksichtigt werden.

Erstellung der Spezifikation und Zeichnung für die Li-Ionen Zellen hinsichtlich geometrischer Abmaße

Die für die Energiespeicher von FUEL verwendeten Zellen basieren auf dem Entwurf der Zell-Entwicklung von Continental, die Lieferung der Zellen erfolgte durch die Fa. LG Chem. Das in FUEL zur Anwendung kommende Zelldesign, speziell die Zellchemie und die Geometrien wurden durch Continental von den Systemanforderungen des Energiespeichers und der mit ZF geplante NKW-Hybridanwendung abgeleitet. Abschließend erfolgte die Festlegung der Bauteilspezifikation und die Erstellung und der

Zeichnungen. Die gelieferten Muster entsprechen den mechanischen Anforderungen und sind im System wie vorgesehen verbaubar.

Während der Lagerung sowie während der Lade- und Entladezyklen durchläuft die Zelle Volumenänderungen, die über das Zell-Packaging in der Batterie aufgefangen werden. Hierzu wird zwischen den einzelnen Bi-Packs konstruktiv ein Puffer vorgesehen, über den diese Änderungen aufgefangen werden.

5.1.3.2 Prüfspezifikation und Lebensdaueranalysen

Prüfspezifikation

Die Prüfspezifikation zur Ermittlung der Lebensdauer der Li-Ionen Zellen basiert auf langjährigen Erfahrungen mit Li-Ionen Zellen. Unter Laborbedingungen werden die Zellen in verschiedenen Umgebungen (Temperatur) gelagert und zyklisch vermessen. Dabei werden für die Modellierung relevante Kenngrößen wie Innenwiderstand und SOC³⁸ in Abhängigkeit von der Lagerzeit beobachtet und aufgezeichnet. Um auf eine lückenlose und vergleichbare Datenbasis zurückzugreifen, wurde eine ausgedehnte Testmatrix (SOC 30% -100%; Temperatur -40°C bis +70°C) abgefahren. Um diese Testkapazität in vollem Maße und innerhalb der benötigten Zeit abzudecken, vergab Continental einen Teil des Testbedarfs an den externen Dienstleister Fa. EVA Fahrzeugtechnik. Dies beschleunigte die Datenerhebung und somit die Entwicklung des gesamten Batteriesystems.

Die beiden Diagramme fassen die Messergebnisse einer Zelle bei zyklischer (Abbildung 48) und kalendarischer Alterung (Abbildung 49) zusammen. Dabei wurden bei zyklischer Alterung verschiedene Entladetiefen dargestellt. Diese Daten waren insbesondere bei der Lebensdauersimulation je nach vorgegebenem Anwendungsprofil von Bedeutung.

³⁸ SoC (state of charge) = Kennwert für den Ladezustand von Akkus. Der SoC-Wert kennzeichnet die noch verfügbare Kapazität eines Akkus im Verhältnis zum Nominalwert.

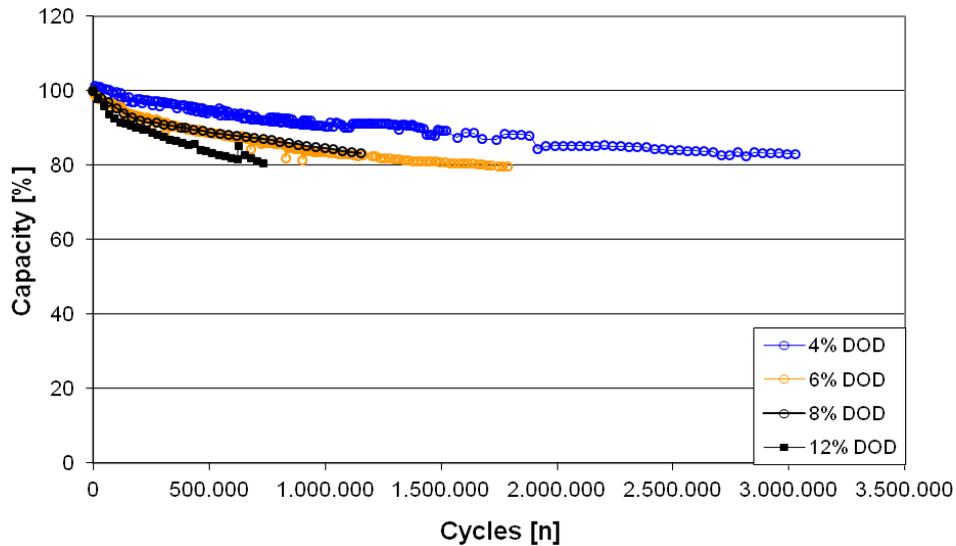


Abbildung 48: Alterungseffekte infolge Lade-/Entladezyklen (60% SOC, 40°C)

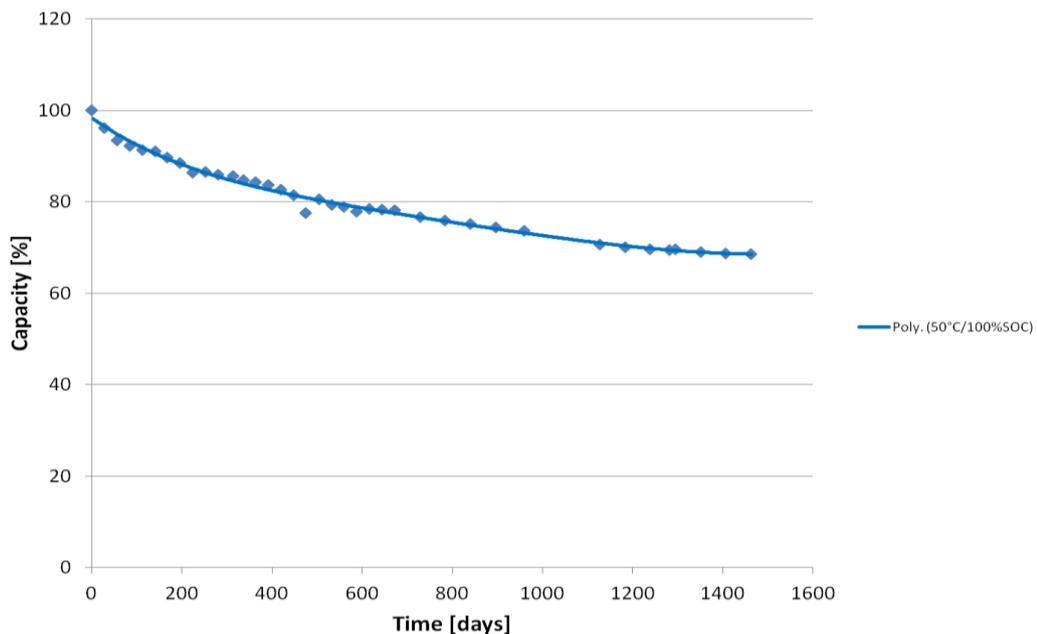


Abbildung 49: Auswirkungen der kalendarischen Dauer auf die Kapazität der Zellen (bei 100% SOC, 50°C)

Simulationen zur Lebensdauerberechnung von Zellen

Anhand der durch die o.g. Versuche gewonnenen Daten wurden die Zellmodelle weiter detailliert, so dass durch Computersimulationen auf Basis originaler Fahrprofile eine Vorhersage über die Lebensdauer und die Alterung der verwendeten Zellen ermöglicht wurde. Die Modelle beschreiben das System nicht vollständig. Für eine höhere Genauigkeit der Vorhersage wurde daher ein höherer Detaillierungsgrad der Basisdaten und der Alte-

rungsdaten erforderlich. Anhand der oben beschriebenen Messungen zur Zellalterung konnten die mathematischen Modelle verfeinert werden.

Im Zuge des Förderprojektes wurde festgestellt, dass für eine Lebensdauervorhersage von mindestens 10 Jahren eine Datenbasis von mindestens 3 Jahren oder mehr vorliegen muss. Die dabei von EVA aufgenommenen Daten der Zellen für Temperatur- und zyklische Alterung konnten dafür verwendet werden. Die sich ergebenden Unterschiede bei der Simulation auf verschiedenen Datenbasen sind Abbildung 50 zu entnehmen.

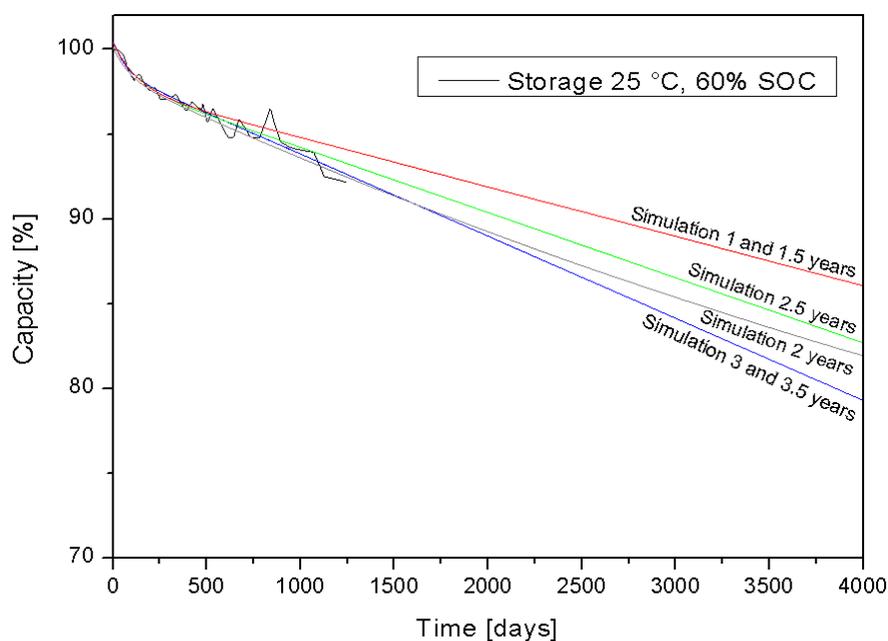


Abbildung 50: Unterschiede der Lebensdauersimulation bei verschiedenen Datenbasen (Datenerhebung über Fa. EVA)

Im nächsten Abschnitt werden die relevanten Parameter für die Auslegung des Kühlkonzepts näher beschrieben. Einen dieser Parameter stellt die Umgebungstemperatur ein. Li-Ionen-Zellen können nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich betrieben werden. Die in FUEL adressierten Anwendungen Verteiler-LKW und Gelenkbus sollen in unterschiedlichen Ländern zum Einsatz kommen. Daher wurden bei der Auslegung des Kühlkonzepts sowie bei allen Analysen zur Lebensdauer der Energiespeicher exemplarisch drei Orte zugrunde gelegt: Moskau, Berlin und Athen. Die relative Häufigkeitsverteilung der Temperatur an diesen Standorten ist in Abbildung 51 illustriert.

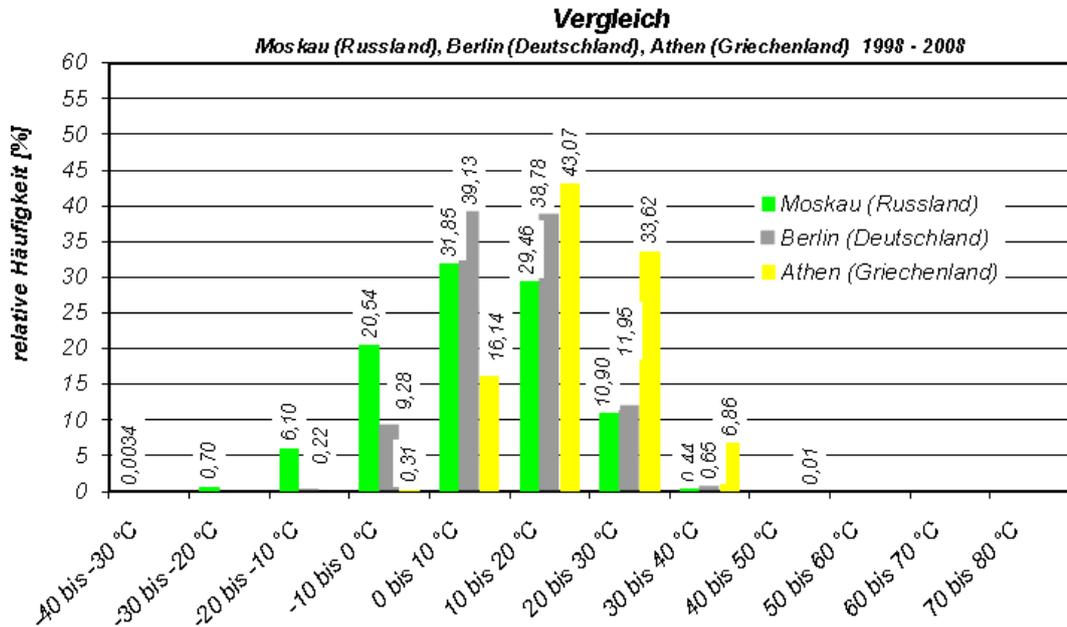


Abbildung 51 Relative Häufigkeitsverteilung von Temperaturen an ausgewählten Standorten

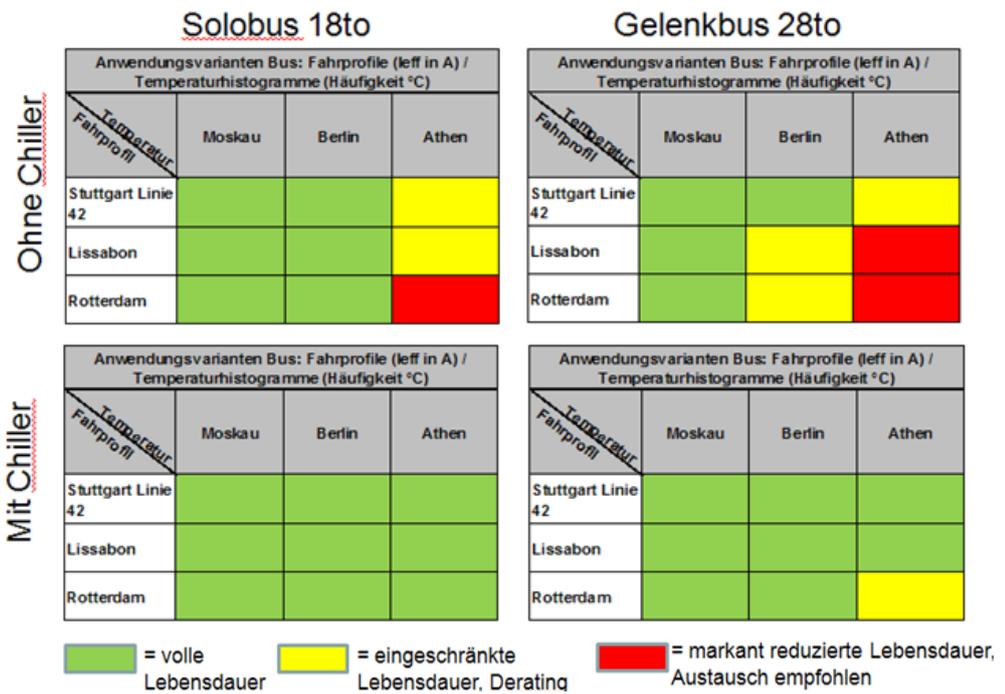


Abbildung 52: Mögliches Endergebnis von Simulationen unter Referenzanwendungsbedingungen (Chiller = Einsatz eines zusätzlichen Niedertemperaturkühlers)

Speziell vor dem Hintergrund der extremen Lastanforderungen der Hybridanwendung im Nutzfahrzeug, insbesondere der des schweren Gelenkbusses, stellt die Überprüfung der ausreichenden Zellperformance über die Lebensdauer sowie der hiermit zusammenhängenden Abfuhr der entstehenden Verlustwärme eine Schlüsselstelle des Projektes dar. Für eine

hinreichende Simulation des Zellverhaltens über die Lebensdauer wurden auch hier die Ergebnisse der Alterungstests der Fa. EVA verwendet. Aufgrund dieser Basis ist es möglich, zu jedem Zeitpunkt des Zelllebens unter entsprechenden Randbedingungen Spannungsverhalten, Innenwiderstandsverhalten, Kapazitätsverhalten und die entstehende Verlustwärme zu simulieren. Die über Simulationen gewonnene Bewertungsmatrix in Abbildung 52 zeigt die möglichen Auswirkungen.

Auf Basis des aktuellen Zelldesigns wurden zur Bestätigung der Zellauslegung Lebensdauersimulationen für einen Solo-Bus (15,5to) durchgeführt, wobei das Temperaturprofil von Athen ohne Chiller und das Fahrprofil Stuttgart L42 zugrunde gelegt wurden. Hierzu ist anzumerken, dass vom Zelllieferant LG Chem der Betrieb nur bis zu 70% Kapazität (BOL) bestätigt wurde. Zur Erreichung einer akzeptablen Lebensdauer von mindestens 7,5 Jahren muss der Betrieb bis mindestens 50% erfüllt sein. Die Anhebung dieser Grenze von 50% auf 70% bewirkt eine Lebensdauerverkürzung um etwa 40% auf nur noch ca. 4,5 Jahre. Für eine wirtschaftliche Umsetzung am Markt müssen im Rahmen vertiefter Untersuchungen nach dem Projektende von FUEL Alternativlösungen entwickelt und validiert werden (s. hierzu auch die Anmerkungen zu weiteren Arbeiten nach Projektende in Abschnitt 3.2 dieses Berichts).

5.1.4 Thermalhaushalt und Komponenten

Je nach Anwendung des Energiespeichers werden für Hybridfahrzeuge, Plug-in Hybride oder in Elektrofahrzeugen Spitzenleistungen von 10 kW bis über 120 kW benötigt. Obwohl der Bedarf an kontinuierlicher Leistung deutlich darunter liegen kann, stellt insbesondere diese Peak-Leistung hohe Anforderungen an die Kühlung, zumal der Bauraum für die Energiespeicher äußerst begrenzt ist.

Eine effiziente Kühlung ist Grund-Voraussetzung für den Einsatz von Li-Ionen-Zellen in Energiespeichern. Bei tiefen Temperaturen ist die Leistung der Batterie stark eingeschränkt und wiederum bei hohen Temperaturen nimmt die Lebensdauer exponentiell ab. Wird die Temperaturobergrenze überschritten, kann dies zur Schädigung und zu etwaigen Sicherheitsrisiken führen. Demzufolge müssen Lithium-Ionen-Batterien in einem Temperaturbereich betrieben werden, in welchem die Leistungs- sowie Lebensdauernanforderungen erfüllt werden und keine Sicherheitsrisiken auftreten können.

5.1.4.1 Externes Kühlsystem

Um diese Sicherheitsrisiken ausschließen zu können, war es notwendig, ein externes Kühlsystem zu konzipieren und zu entwickeln, welches die Demonstratoren in einem optimalen Betriebstemperaturbereich hält. Zusätzlich war zu berücksichtigen, dass die Ausführung des externen Kühlsystems (bspw. Durchflussmenge, max. Druckabfall, zulässige Temperaturgradienten in der Batterie) große Auswirkungen auf das Design des batterieinternen Aufbaus und damit der Produzierbarkeit und der Produktionstechnologien/-verfahren hat.

Gleichzeitig sind sowohl Kostenfaktoren (Hochleistungsbatteriezellen mit Nennkapazitäten > 4 Ah liegen konstruktionsbedingt deutlich höher als die von einfachen Consumer-Batteriezellen mit geringerer Kapazität) zu beachten, als auch die im Automobilbereich üblichen Lebensdauern von mehr als 10 Jahren.

Ziel dieses Arbeitspunkts war es daher, ein externes Kühlsystem zu konzipieren und zu entwickeln, so dass zusätzliche Anforderungen an die Produktionstechnologien und –verfahren definiert werden können und die Test- und Validierungsphase zur Erprobung der neuen Produktionstechnologien und –verfahren ohne Sicherheitsrisiken durchgeführt werden kann.

Die Schlüsselanforderungen an die Kühlung im Energiespeichersystem hängen von folgenden Parametern ab:

- Grenzwerte der Maximaltemperatur, die von der Li-Ionen Zelle ertragen werden können, ohne Eintreten einer irreversiblen Zellalterung und damit verbundener Leistungsminderung.
- Fahrprofil und die daraus resultierende durchschnittliche elektrische Leistung (erfasst als effektiver Wirkstrom des Energiespeichers).
- Umgebungstemperatur – d.h. die statistische Temperaturverteilung am Einsatzstandort des Fahrzeugs.
- Eingesetzte Kühlung am Fahrzeug – Flüssigkeitskühlungskreislauf mit Zwangskühler gegen Umgebungstemperatur-Niveau / ggf. Niedertemperatur-Zusatzkühlkreislauf (Chiller).
- Wirkungsgrad der Zelle (damit auch die anteilige Verlustleistung).
- Konstruktive Anbindung der Zelle und Auslegung des Wärmeübergangs von der Li-Ionen Zelle zum speicherinternen Flüssigkeitskühler.

Konzeptentwicklung

Die Arbeiten in der Konzeptphase wurden mit dem Kooperationspartner Fa. Behr abgeschlossen. Als Ergebnis entstand das erarbeitete Kühlkonzept (passives Kühlsystem) aufgrund der Erkenntnisse aus der Erprobung der BF1-60 Demonstratoren und des Wechsels der Lithium-Ionen-Zelle (höherer Innenwiderstand → Erhöhung der Verlustleistung) durch den Verbundpartner Continental. Dieses Konzept ist für die Stadtbusanwendung nicht darstellbar. Eine erneute Konzeptphase ergab, dass ein Niedertemperaturkühlkreislauf zur Kühlung der Demonstratoren vorgesehen werden muss, um die Batterie auf konstanter Temperatur halten zu können, damit die angestrebte Lebensdauer erreicht werden kann.

In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die untersuchten Konzepte und Kombinationsmöglichkeiten zur Integration der HV-Batterie in den Kühlkreislauf dargestellt.

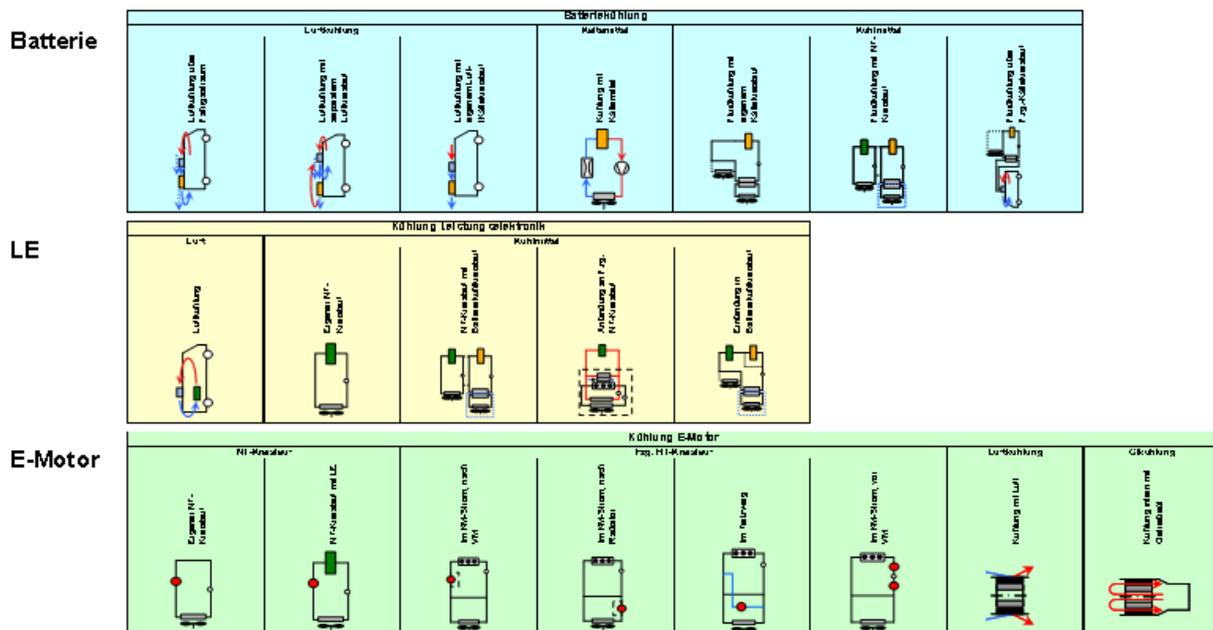


Abbildung 53: Kühlungsvarianten im Fahrzeug

Mögliche Kombinationen	LE-Kühlung							
	Eigener NT-Kreislauf		NT-Kreislauf mit Batteriekühlkreislauf		Anbindung an Ezg. NT-Kreislauf		Einbindung in Batteriekühlkreislauf	
Batteriekühlung	EM NT	EM HT	EM NT	EM HT	EM NT	EM HT	EM NT	EM HT
Luftkühlung über Fahrgastraum 	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Luftkühlung mit eigenem Luft- und Kältekreislauf 	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗
Fluidkühlung mit eigenem Kältekreislauf 	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓
Fluidkühlung zusammen mit NT- Kreislauf 	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗

Abbildung 54: Kombinationsmöglichkeiten (Auswahl)

Folgendes Kühlkonzept wurden aus der Konzeptstudie zur Kühlung der HV-Batterie für den Verteiler LKW ausgewählt (Abbildung 55).

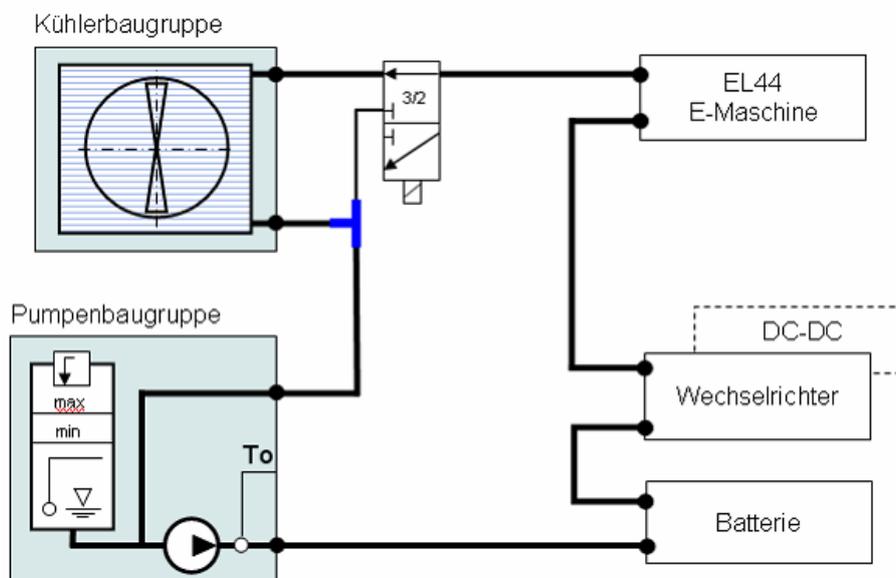


Abbildung 55: Kühlsystem Verteiler LKW

In Abbildung 56 und Abbildung 57 ist zusätzlich zur Kühlung eine Heizung abgebildet. Bei tiefen Temperaturen ist die Leistungsfähigkeit der Li-Ionen Batterie sehr stark eingeschränkt. Daher wird eine Heizung benötigt, um die Li-Ionen Batterie auf Betriebstemperatur zu bringen und somit die notwendige Leistungsfähigkeit zu erreichen.

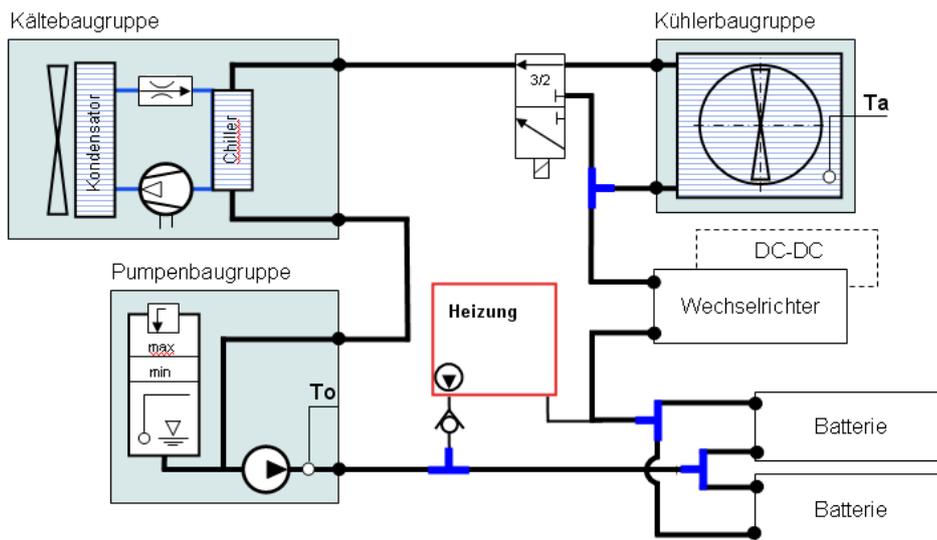


Abbildung 56: Kühlsystem Stadtbus mit Heizelement

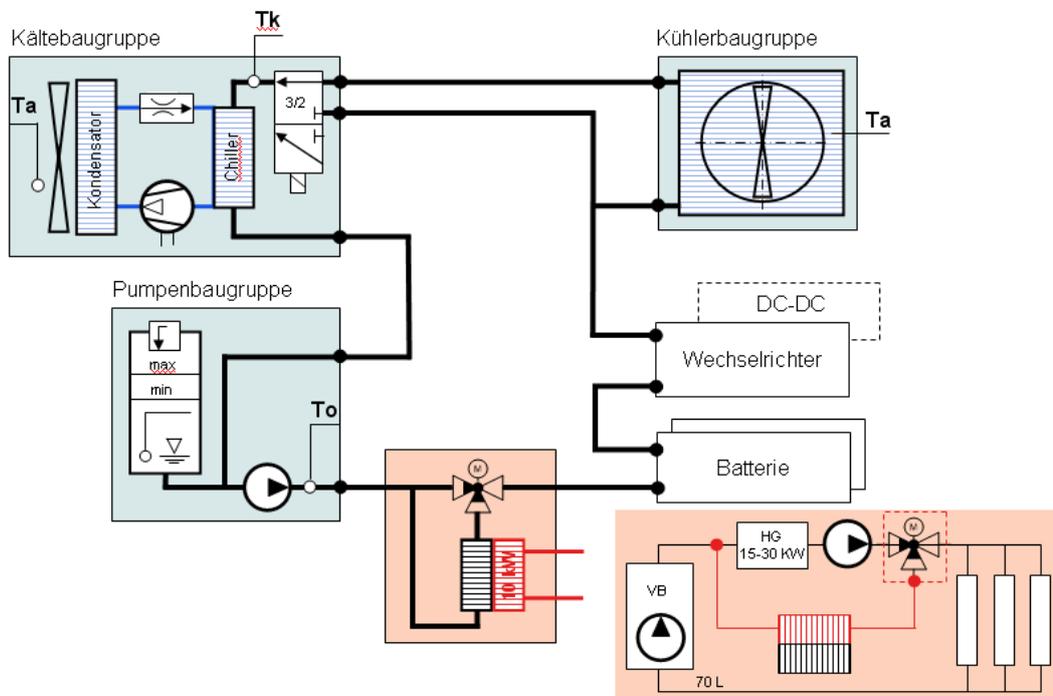


Abbildung 57: Kühlsystem Stadtbus mit autarker Heizung über Fahrzeugkreislauf

Zudem wurde während der Konzeptstudie entschieden, das Kühlsystem in einer Modulbauweise (einzelne Baugruppen) auszuführen. Die Vor- bzw. Nachteile der Modulbauweise zur Kompaktanlage sind in Tabelle 5 dargestellt.

	Modulbauweise	Kompaktanlage
Gewicht	-	+
Einbauraum	++	--
Varianten	++	--
Montage	-	+
Herstellbarkeit	+	-
Kosten	+	-

Tabelle 5: Vergleich Modulbauweise zu Kompaktanlage

Ermittlung der Umweltbedingungen und elektrischen Anforderungen

Die Ermittlung der Umweltbedingung in Abhängigkeit des Einbauraums im Fahrzeug und der elektrischen Anforderungen wurde abgeschlossen und eine Spezifikation erstellt. Da es sich um ein NT-Kühlsystem handelt, muss der Eintrag von Fremdwärme möglichst verhindert werden. Der Einfluss direkter Sonneneinstrahlung sowie sonstiger Wärmequellen auf das Kühlsystem muss durch Isolierung oder Wahl des Einbauorts verhindert werden. Zur Berücksichtigung des Fremdwärmeeinfluss wurde ein Referenztemperaturprofil von Athen herangezogen, s. Abbildung 51.

Die Kühlwassertemperatur beim Kühlsystem des Verteiler-Lkw ohne eine Kältebaugruppe ergibt sich aus folgendem Ansatz: Kühlwasser = Lufttemperatur + ΔT 10 K.

Beim Kühlsystem des Stadtbusses mit einer Kältebaugruppe wird die Kälteleistung bei höheren Umgebungstemperaturen reduziert. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass die maximal verfügbare Kälteleistung ausreichend ist, um die Li-Ionen Zellen bei einer Außentemperatur von bspw. 45 °C auf Betriebstemperatur halten zu können. In der folgenden Abbildung 58 ist die elektrische Leistungsaufnahme aus dem 24 V Bordnetz des Kühlsystems mit einer Kältebaugruppe in Abhängigkeit der Außentemperatur dargestellt. In Abhängigkeit zur Außentemperatur wird die Kältebaugruppe an- bzw. abgeschaltet.

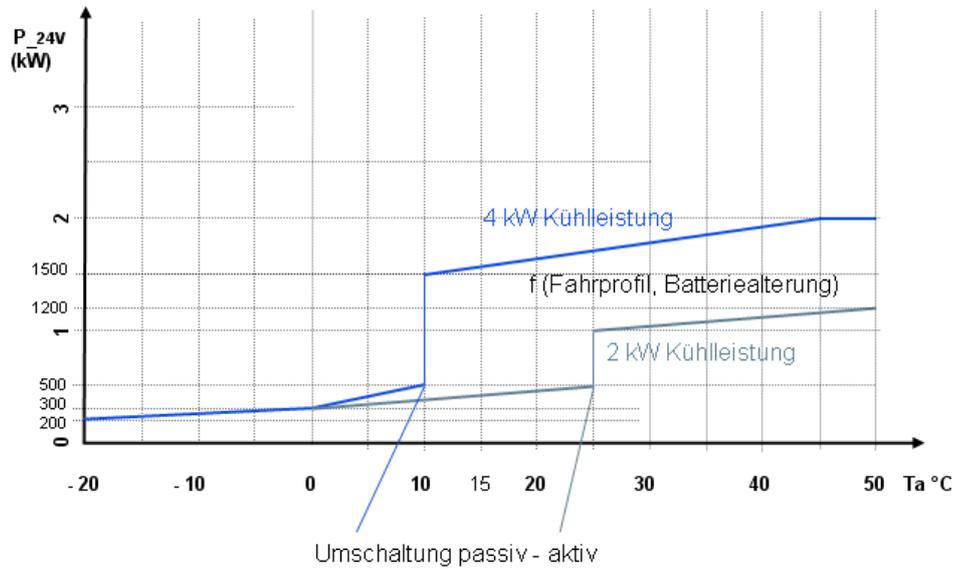


Abbildung 58: Leistungsaufnahme Kühlsystem mit Kältebaugruppe

Die Steuerung des Kühlsystems wird mittels der Hybrid-Control-Unit (HCU) realisiert. In Abbildung 59 ist die Steuerung schematisch dargestellt.

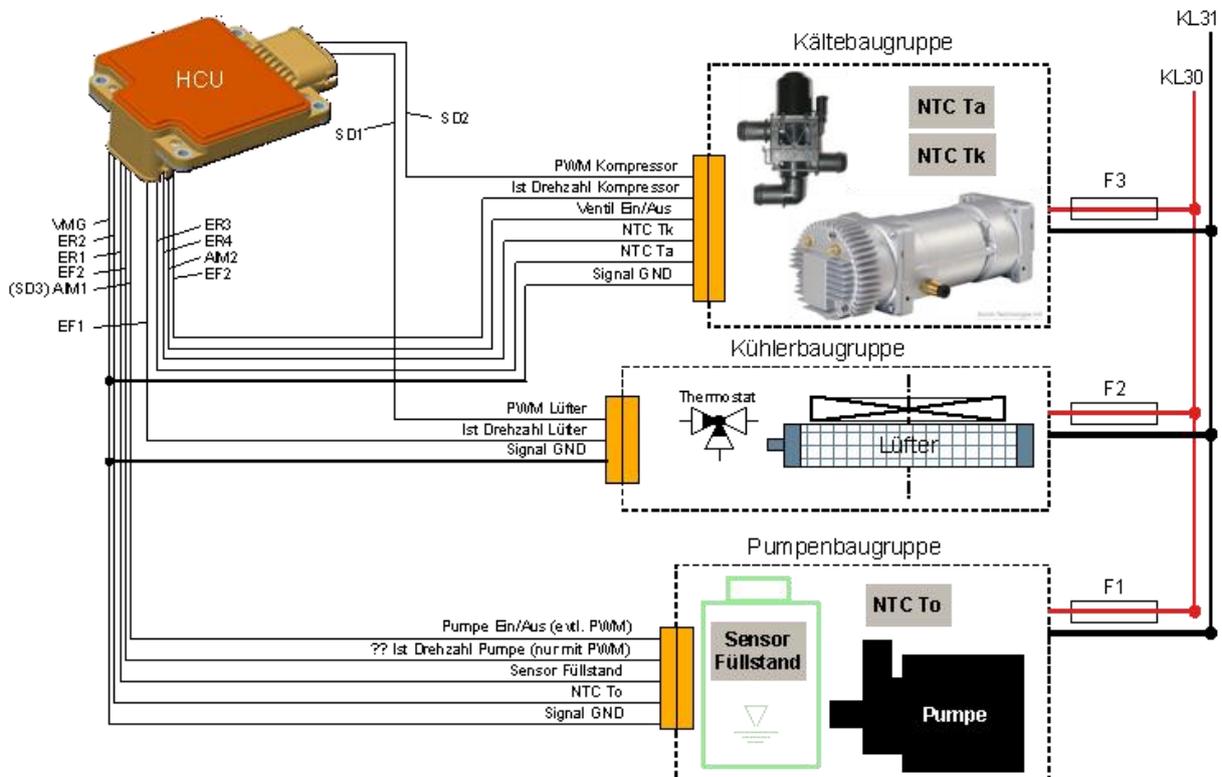


Abbildung 59: Schematische Darstellung der Steuerung des Kühlsystems

Auslegung des Kühlsystems

Es wurde eine detaillierte Spezifikation erstellt. Hier ein Auszug besonders relevanter Daten:

- Aufnahmeleistungen der Baugruppen über das 24V Bordnetz:
 - Pumpenbaugruppe: 150 W
 - Kühlerbaugruppe: 300 W
 - Kälteanlage: 1600 W (800-1300W Kompressor plus 300W Lüfter)
- Kälteleistung des Kühlsystems nominell 4 kW

In Abbildung 60 ist die Leistung Kühlsystems mit einer Kälteanlage für die HV-Batterie in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für verschiedene Isolinien der Zelltemperatur für bspw. 40 °C und 50 °C dargestellt. Bei Umgebungstemperaturen <10 °C wird mit dem Basiskühlsystem ohne Kälteanlage gekühlt. Bei steigender Umgebungstemperatur wird die Kälteanlage hinzu geschaltet (Mischbetrieb), um die Lithium-Ionen-Zelle auf der Betriebstemperatur halten und somit die Lebensdauer gewährleisten zu können.

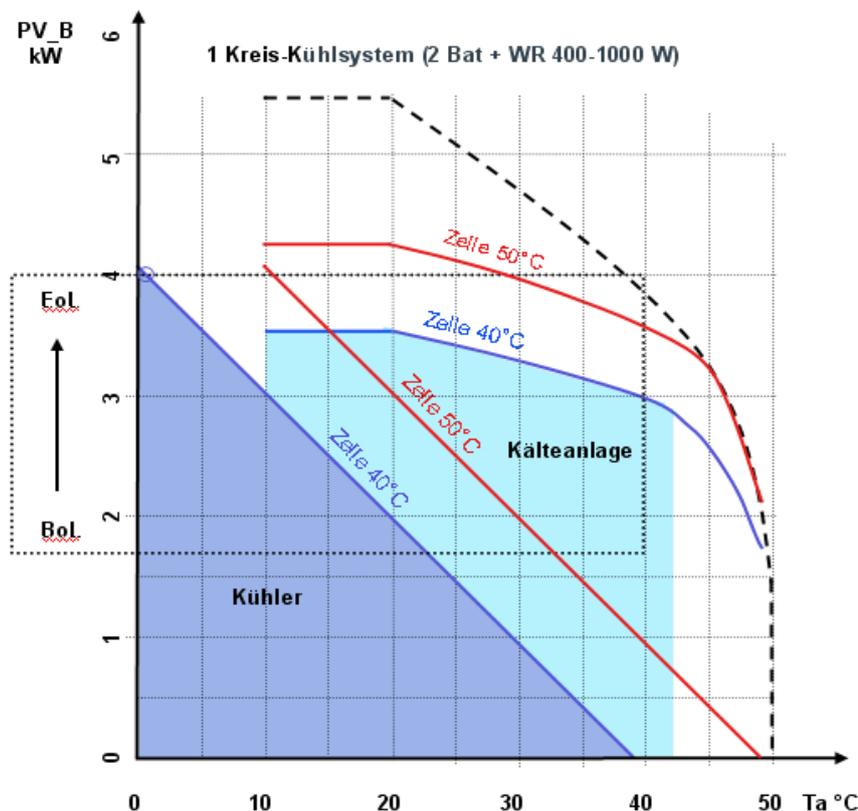


Abbildung 60: Funktionsweise 1-Kreis Kühlsystem

Zur Leistungsauslegung und Bestimmung des Arbeitspunkts der Kühlmittelpumpe wurde das batterieinterne Kühlsystem eines BF2-120 Demonstrators vermessen. Hierzu wurde der Druckverlust in Abhängigkeit zur Durchflussmenge ermittelt. In Abbildung 61 ist der Messaufbau dargestellt. Die Anlauf- und Beruhigungsstrecke sorgen für vergleichbare Strömungsprofile. Die Druckverluste wurden mittels Differenzdrucksensoren ermittelt. Die Teilbatterien Master und Slave wurden kühlungsseitig parallel geschaltet.

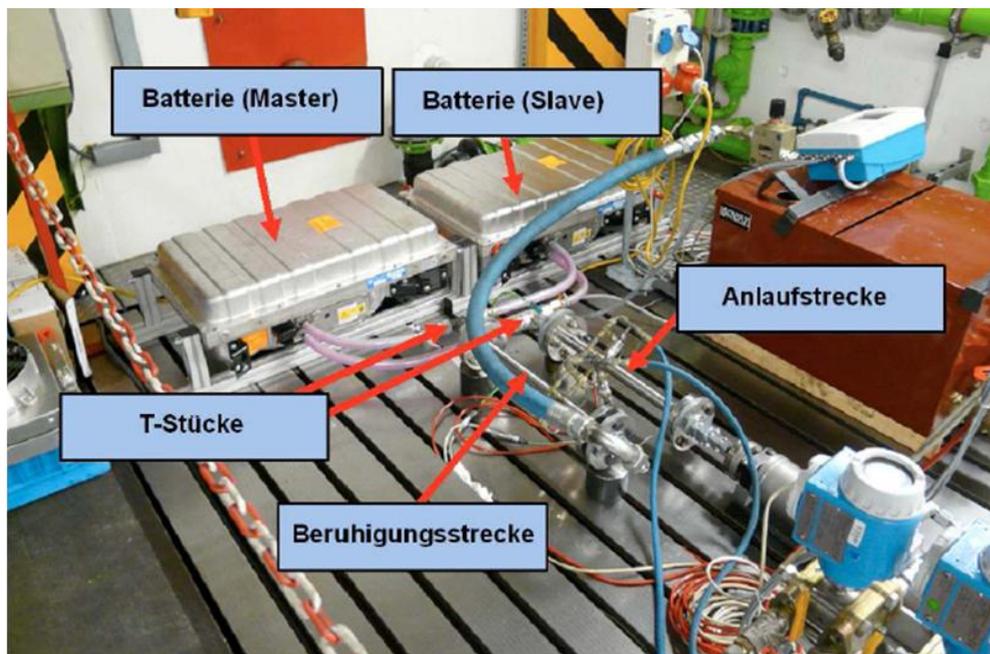


Abbildung 61: Messaufbau zur Vermessung des batterieinternen Kühlsystems

In der Abbildung 62 ist der Druckverlust über den Volumenstrom der parallelgeschalteten Teilbatterien Master und Slave dargestellt. Bei einem benötigten Volumenstrom von min. 20 l/min ergibt sich ein Druckverlust von ca. 190 mbar. Im Gesamtsystem (Wechselrichter, Kühler, Kühlmittelschläuche, Ventile usw.) ergibt sich ein Druckverlust von ca. 400 mbar. Im Worst Case muss der Volumenstrom auf 30 l/min erhöht werden, was zur Folge hat, dass der Druckverlust auf ca. 800 mbar im Gesamtsystem ansteigt. Dies bedeutet eine hohe Leistungsanforderung an die Kühlmittelpumpe.

Für die Weiterentwicklung der Demonstratoren muss das batterieinterne Kühlsystem pro Teilbatterie auf die max. Werte von 100 mbar @ 15 l/min ausgelegt werden.

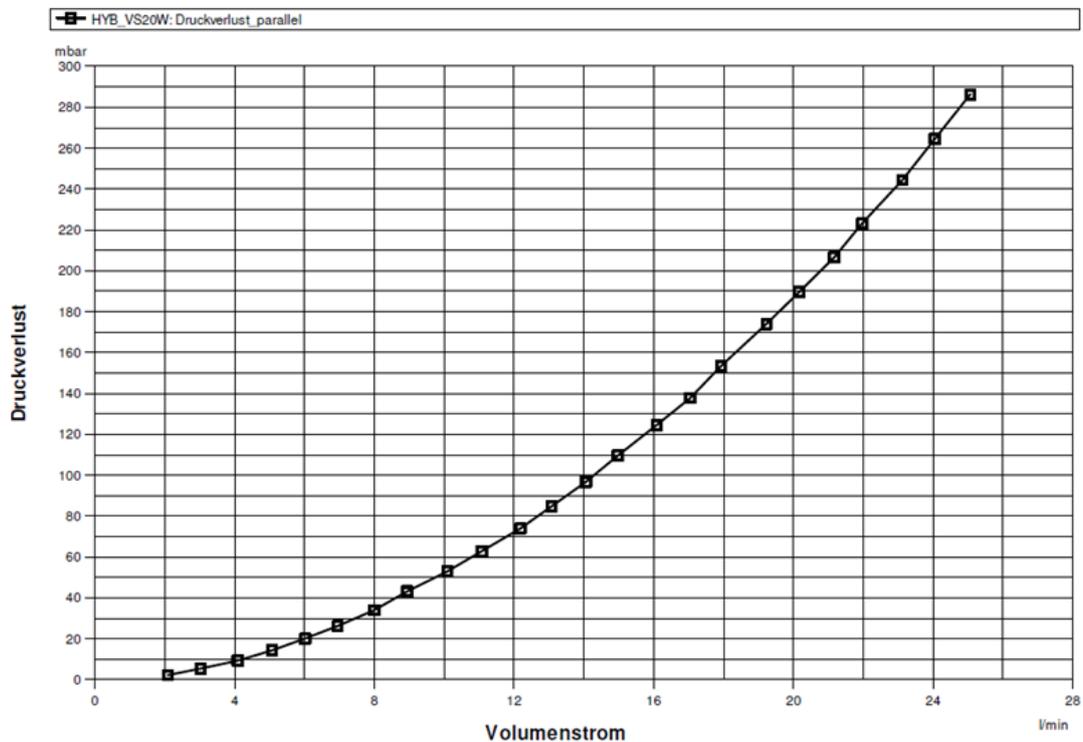


Abbildung 62: Druckverlust über Volumenstrom bei den BF2-120 Demonstratoren

Aufbau von Demonstratoren des externen Kühlsystems

Der Aufbau von Demonstratoren des Kühlsystems konnte aus den in Abschnitt 3.2 genannten Gründen im Förderzeitraum nicht abgeschlossen werden. Mit der Konstruktion des Kühlsystems wurde während des Förderzeitraums noch begonnen. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 63 - Abbildung 67) sind die Konstruktionsstände der Kompaktanlage und der Modulbauweise des Kühlsystems dargestellt.

Die Erprobung der Demonstratoren der HV-Batterie musste daher mit einem Kühlsystem aus ZF Hybrid Vorentwicklungsprojekten erfolgen. Das Kühlsystem hatte keine Kälteanlage, somit war es nicht möglich, bei hohen Umgebungstemperaturen die Demonstratoren der HV-Batterie im mobilen Prüfstand auf einer konstanten Temperatur halten zu können. Dies hatte zur Folge, dass manche Erprobungsumfänge, wie bspw. der Nachweis der Kaltstartleistung, nur an stationären Prüfständen mit einer Kälteanlage durchgeführt werden konnten.

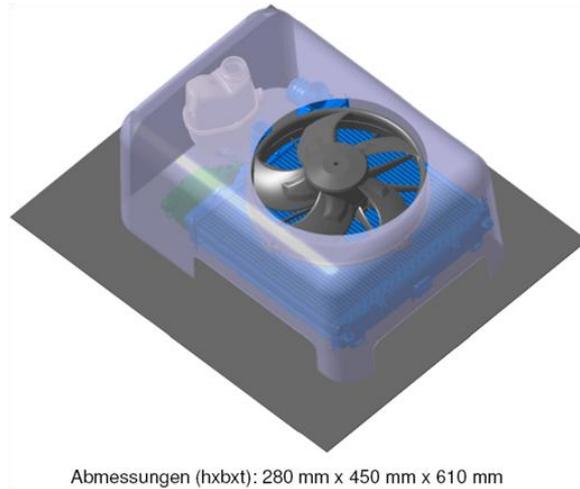


Abbildung 63: Kühlsystem Kompaktanlage ohne Kälteanlage für Dachaufbau

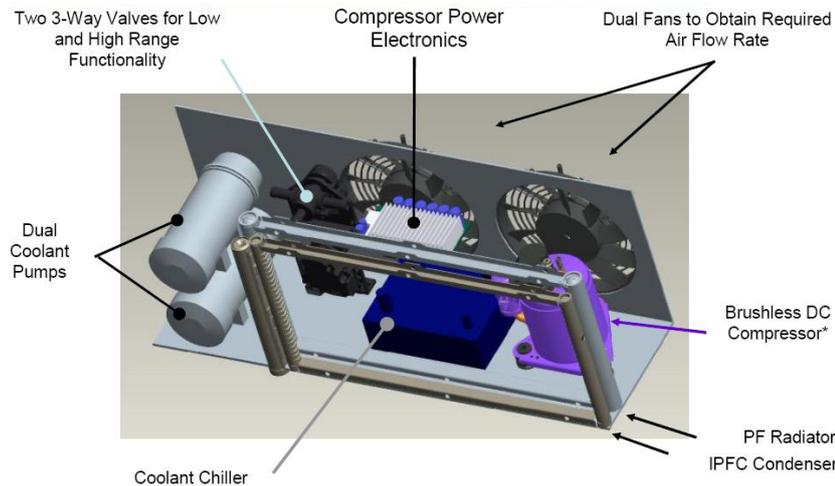


Abbildung 64: Kühlsystem Kompaktanlage mit Kälteanlage für Dachaufbau

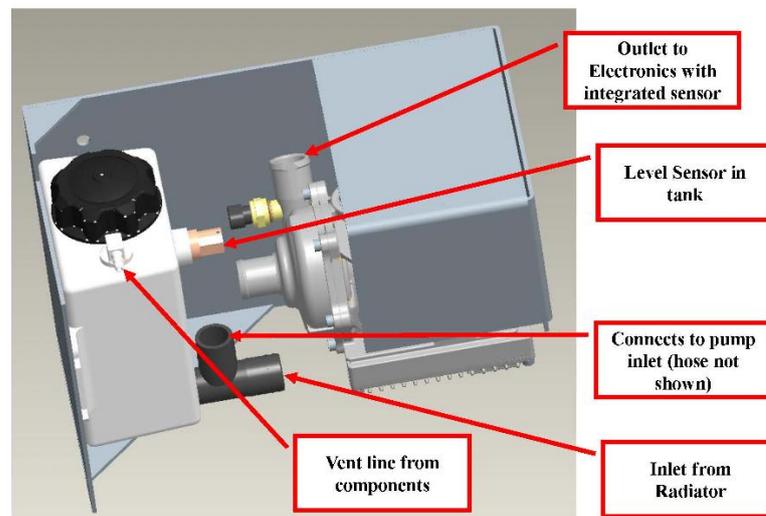


Abbildung 65: Kühlsystem Modulbau Pumpenbaugruppe

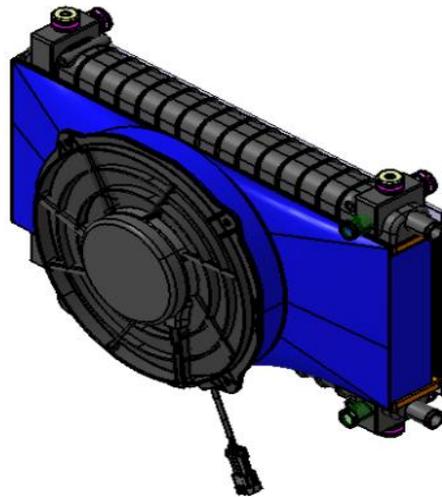


Abbildung 66: Kühlsystem Modulbau Kühlerbaugruppe

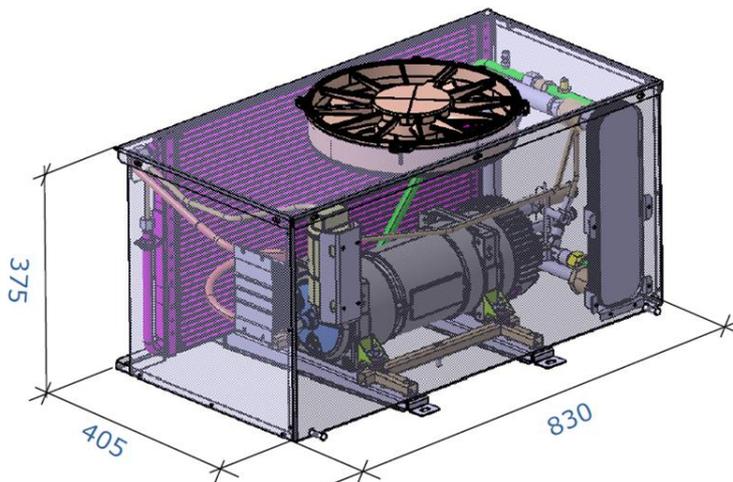


Abbildung 67: Kühlsystem Modulbau Kälteanlage

5.1.4.2 Abfuhr der Verlustwärme aus der Zelle zum speicherinternen Flüssigkeitskühler

Betrachtung des Wärmegradienten von der Zelle in die Kühlfinne

Zum Nachweis der Erfüllung der Anforderungen an die Zellkühlung wurden thermische Simulationen der Wärmeableitung durch die Finne durchgeführt. Abbildung 68 zeigt die Ergebnisse einer solchen Simulation mit ANSYS. Dargestellt ist der zu erwartende Temperaturverlauf über den Querschnittsverlauf eines Bi-Packs. Am unteren Ende stößt die Kühlfinne auf den Speicherinternen Wärmetauscher (fluiddurchströmte Kühlplatten, s. auch Abbildung 70).

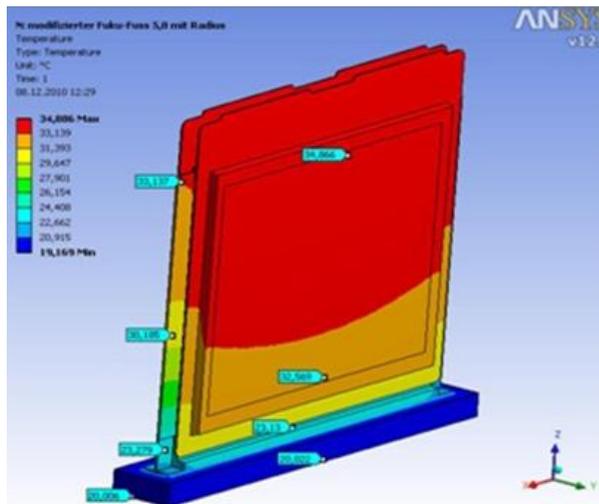


Abbildung 68: Ergebnisse der thermischen Simulation

Im Rahmen von Konzeptbetrachtungen zum FUEL BF2 Stand wurden unterschiedliche Kühlfinnen-Varianten analysiert, deren Wärmeabfuhr-Potential bewertet und nachfolgend in einer Matrix verglichen (Abbildung 69).

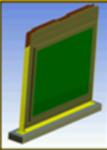
Kriterium	BF2 (Cu - Finne)	BF2.mod	
		Truck: Variante 1 (optimierte Kühlfinne) 	Bus: Variante 1 & Chiller 
Temperaturdiff. EOL [K]	15	12	36
Bauraum	+	+/-	+/-
Gewicht	-	+/-	+/-
Designrisiken	+/-	+	+
Termin	+/-	+/-	+/-
Kosten	-	+/-	+/-
Lebensdauer Truck	-	+	+
Lebensdauer BUS	-	-	+

Abbildung 69: Exemplarische Bewertung verschiedener Kühlfinnen-Varianten

Betrachtung des Wärmeabfalls im Übergang von der Finne in den Kühler und schließlich in das Fluid

Ebenso wurden die auftretenden Druckverluste und die Verteilung des Kühlmittel-Volumenstroms über die 3 Kühlmodule simuliert. Alle Berechnungen wurden dabei für unterschiedliche Verlustleistungen der Zelle, un-

terschiedliche Kühlmittel-Volumenströme und Vorlauftemperaturen durchgeführt.

Für die Erreichung der geforderten Lebensdauer ist neben der Auslegung des Wärmetauschers die Abfuhr der Wärme von der Zelle in den Wärmetauscher zu untersuchen. Diese Funktion wird durch die Kühlfinne erreicht. Hier ist insbesondere auf eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Zelle zu achten, da dies Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle hat. Abbildung 70 zeigt ein Simulationsergebnis.

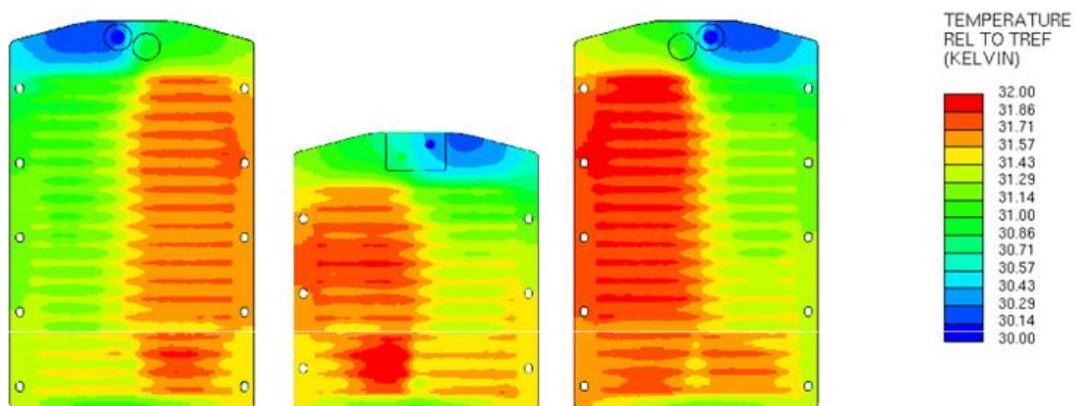


Abbildung 70: Simulation der Temperaturverteilung über die Kühlplatten der drei Zellmodule innerhalb des FUEL Energiespeichers

Wie bei der Vorstellung des BF2-Kühlkonzepts bereits angedeutet, konnte zwar der Nachweis der Montierbarkeit der Zell-spezifischen Baugruppen erbracht werden, allerdings zeigten sich auch bei der Umsetzung des Kühlkonzepts Probleme beim Nachweis der Dauerfestigkeit und damit der Lebensdauer: Durch wiederholt nicht überzeugende Ergebnisse (die Ergebnisse auf Speicherebene wichen erheblich vom zuvor simulierten Verhalten ab) wurde der Projektfortschritt verzögert. In Konsequenz waren verstärkte Untersuchungen zur Kühlung auf Speicherebene erforderlich, die auch nach Projektende weitergeführt werden müssen.

5.1.5 Software-Architektur

Im Vordergrund dieses Arbeitspunktes standen die Software-Architektur und ihre Funktionalität einschließlich des Abgleichs des Hard- und Software-gestützten Sicherheitskonzeptes und höchster Anwendungsdiversität unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Herstellbarkeit und Variantensteuerung.

Es werden Software-Funktionen benötigt, mit deren Hilfe das zentrale Steuergerät des Energiespeichers alle Aufgaben zur Zellüberwachung, Kommunikation zur Fahrzeug-Hybridsteuerung sowie wesentliche Sicherheitsnotfunktionen regelt und überwacht. Vollständig vorliegende Software ist die Voraussetzung für das gezielte Ansteuern aller möglichen Betriebszustände und mithin für das aussagekräftige Testen der Speicherfunktionen. Zur Problemlösung musste eine spezielle Software spezifiziert, entwickelt und verifiziert werden, welche die intelligente Reaktion auf Fehlerfälle mit dem Schaltungsaufbau der Elektronik abgleicht (u.a. durch die entsprechend den Sicherheitsrichtlinien geforderte Redundanz).

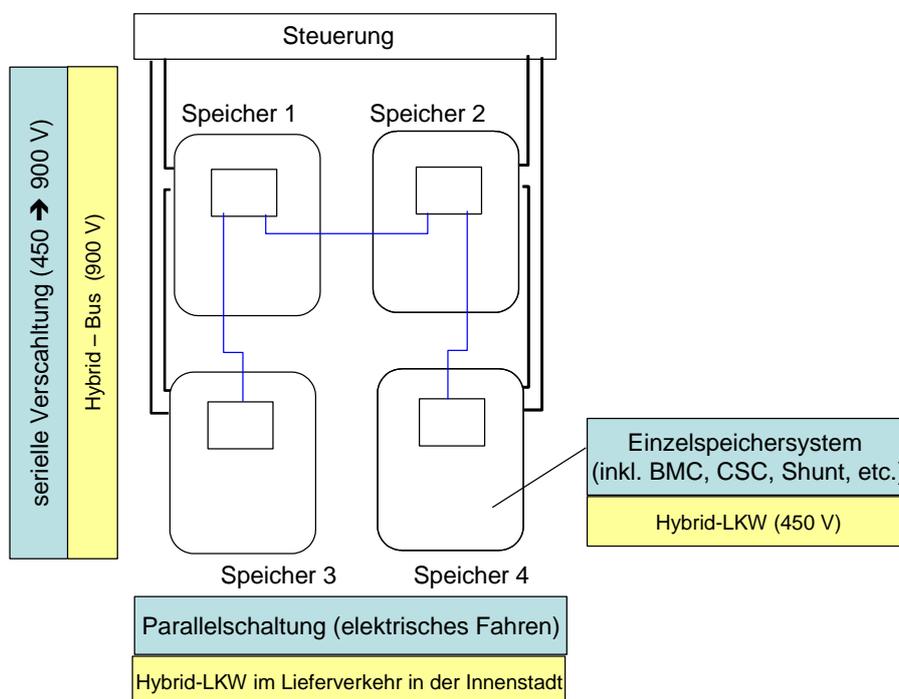


Abbildung 71: Speicherverschaltung Parallel / Seriell

In teilweise parallel laufenden Iterationen wurde zunächst die Steuerungssoftware für das Einzel-Energiespeichersystem (Anwendung: Hybrid-LKW) realisiert und schließlich auf die Anwendungen Hybrid-Bus (serielle Verschaltung von Energiespeichersystemen) sowie einem Hybrid-LKW mit der Möglichkeit zum elektrischen Fahren (Parallelschaltung zweier in Serie geschalteter Energiespeicher für erhöhte Speicherkapazität) entwickelt. Abbildung 71 illustriert die Varianten der Speicherverschaltungen für die verschiedenen Applikationen der Hybrid – NKW.

Entwicklung der Software-Architektur

Die entwickelte Software-Architektur erfüllt die Vorgaben an die Sicherheitsanforderungen der ISO 26262, die Prozessanforderungen der ISO 15504 (ASPICE), die Maximierung des Gleichteilanteil zwischen Einzelbatterien und verschiedenartig verschalteten Batterien (seriell/parallel) sowie an gute Skalierbarkeit und Wartbarkeit und einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit.

Um die Sicherheits- und Prozessanforderungen zu erfüllen, wurde als Architekturbeschreibungsform die UML-Modellierung³⁹ als semiformale Methode festgelegt. Ein UML-Modell wurde erstellt, welches sowohl Software Architektur als auch das dazugehörige Feindesign enthält. Um die Konsistenz und die Nachverfolgbarkeit zu erhöhen, erfolgten flankierende Maßnahmen wie Erstellung einer Modellierungsrichtlinie, die Schulung der Entwickler und die Entwicklung geeigneter Prüf- und Messwerkzeuge.

Um den Gleichteilanteil zwischen Einzelbatterien und verschiedenartig verschalteten Batterien (seriell/parallel) zu maximieren, wurden Konzepte mit besonderer Berücksichtigung der Skalierbarkeit der Anzahl der Teilbatterien erstellt. Als wesentliches Konzeptauswahlkriterium wurde die Limitierung der Ressourcen (Bandbreite der internen Kommunikation, CPU- und Speicherressourcen) bei guter Skalierbarkeit der Anzahl der Teilbatterien identifiziert.

Es wurde ein Konzept gewählt, welches zentrale und dezentrale Elemente geeignet kombiniert. Als dezentrale Anteile der Software wurden Datenverarbeitung und Fehlererkennung definiert, d.h. jede Teilbatterie besitzt eigene Funktionen für die Batteriezustandsbestimmung, eigene Fehlerpeicher und eigene permanente Datenspeicher. Als zentrale Elemente wurden Zustandsverwaltungen und Fehlerreaktionen definiert.

Aspekte wie gute Skalierbarkeit und Wartbarkeit, ferner gute Wiederverwendbarkeit, wurden durch einen geschichteten Architekturansatz und die Definition einer Vielzahl von Komponenten und funktionalen Softwareeinheiten berücksichtigt. Die Schichtung orientierte sich am AUTOSAR⁴⁰-Standard.

³⁹ UML-Modellierung (unified modeling language)= vereinheitlichte Modellierungssprache zur Spezifikation, Konstruktion und Dokumentation von Teilen von Software und anderen Systemen.

⁴⁰ AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture)= Entwicklungspartnerschaft aus Automobilherstellern, Steuergerätherstellern sowie Herstellern von Entwicklungswerkzeugen, Steuergeräte-

Entwicklung der Batterie-Management-Controller (BMC)⁴¹ Framework-Software

Es wurde eine Framework-Software (Basissoftware) entwickelt, welche die üblichen Grundfunktionen einer Basissoftware für Automobilanwendungen erfüllt:

- *Flashbootloader*
- *System Services* und *Betriebssystem* inkl. ECU-Zustandsverwaltung, Kompatibilitätsprüfungen, Reset- und Traphandling
- *Kommunikationsservices*: CAN⁴²-Kommunikationsservices einschließlich der Definition der Kommunikationsmatrizen für Hybrid- und MessCAN, als auch für die interne Kommunikation zwischen CSE-BMC, Stromsensor-BMC sowie Master- und Slave
- *Fehlermanagement* inkl. Entprellmechanismen, Kundendienst- und interner Fehlerspeicher, ferner Verwaltung von abgasrelevanten Fehlern gemäß OBD⁴³
- *Speicherservices*

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung der Frameworkanteile für ein verteiltes Batteriesystem. Folgende Konzepte wurden hierfür erarbeitet und umgesetzt:

- *Synchronisation von ECU⁴⁴ Zuständen von Master- und Slave*: Hierbei wurde besonderer Wert auf die Robustheit der Umsetzung gelegt, damit Fälle wie Kommunikationsunterbrechungen, Defekt einer Teilbatterie sowie kurzfristige Reset und Spannungsunterbrechungen erkannt und sicher beherrscht werden können.
- *Verteiltes Fehlermanagement*: Jede Teilbatterie besitzt ein eigene Fehlererkennung und einen eigenen Fehlerspeicher. Die Slave-Fehler werden gruppiert über den internen CAN an den Master

Basis-Software und Mikrocontrollern. Ziel von AUTOSAR ist die Erleichterung des Austausches von Software auf verschiedenen Steuergeräten.

⁴¹ BMC (battery management controller)= überwacht den gesamten Stromhaushalt von Batterien: Die verfügbaren Ampèrestunden werden wie ein Tankinhalt (Ladestrom minus Entladestrom) gemessen und angezeigt.

⁴² CAN (controller area network)= asynchrones, serielles Bussystem und gehört zu den Feldbussen

⁴³ OBD (on board Diagnose)= Fahrzeugdiagnosesystem. Während des Fahrbetriebes werden alle abgasbeeinflussenden Systeme überwacht, zusätzlich weitere wichtige Steuergeräte, deren Daten durch ihre Software zugänglich sind

⁴⁴ ECU (electronic control unit)= elektronische Module, die systemweit Informationen über die Betriebszustände und weiteren relevanten Daten im Fahrzeug austauschen.

gesendet, welcher die Aufgabe der Fehleraggregation und der Fehlerreaktion übernimmt.

- *Verteilte Diagnose*: Es wurde ein Konzept für die verteilte Diagnose erarbeitet und umgesetzt. Über den Tester können sowohl Master- als auch Slave individuell angesprochen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer Broadcast-Diagnoseanfrage.
- *Master-Slave-Kommunikation und Kommunikationsüberwachung*: Es wurde eine Kommunikationsmatrix für die Interbatteriekommunikation erstellt, welche aus Teilgruppen mit unterschiedlichen Prioritäten besteht. Sicherheitsrelevante Kommunikationsanteile wurden mit speziellen Datenschutzmechanismen versehen. Die Fehlerreaktion aufgrund eines Kommunikationsausfalls wird sowohl vom Master als auch vom Slave ausgeführt.
- *Verteiltes Flashen*: Es wurde Konzept für verteiltes Flashen erstellt, welches das Flashen sowohl aller BMSs (Master- als auch Slave) als auch der CSEs und Shunts ermöglicht. Das zentrale Element dieses Konzeptes ist ein FlashRouter.

Umsetzung der Basis Software Komponenten nach dem AUTOSAR Standard

Zur Erreichung eines hohen AUTOSAR-Anteils der Basissoftware wurde eine AUTOSAR-Strategie erstellt, welche schrittweise den AUTOSAR-Anteil erhöht. Dies erfolgt durch (1) die Integration von zugelieferter AUTOSAR-Software und (2) durch die Umsetzung von AUTOSAR-Schnittstellen. Als zuzuliefernde AUTOSAR-Software wurden das Betriebssystem und der CAN-Protocol Stack⁴⁵ definiert. Diese Softwareanteile wurden testweise in die Basissoftware integriert und erfolgreich in Betrieb genommen. AUTOSAR-Schnittstellen wurden für einen Großteil der Basissoftware designed und umgesetzt z.B. für die SystemServices, für das Fehlermanagement, für die Speicherservices und für Teile des MCALs⁴⁶.

Konzeptentwicklung und Umsetzung eines Sicherheitskonzeptes für die Software mit Abgleich zur Hardware-Sicherheitsfunktion und der Auswirkung auf die Herstellbarkeit

⁴⁵ Protocol Stack (Protokollstapel)= konzeptuelle Architektur von Netzwerkprotokollen. Die einzelnen Protokolle werden dabei als fortlaufend nummerierte Schichten (*layers*) eines Stapels (*stacks*) übereinander angeordnet.

⁴⁶ MCAL (Modular Calendar Access Library)= Bibliothek für den Zugriff auf Kalender. Die Bibliothek ist modular programmiert, mit austauschbaren Treibern.

Aus den Sicherheitszielen wurden die speziellen Sicherheitsanforderungen an die Software abgeleitet und mit den Sicherheitsklassifikationen (QM⁴⁷, ASIL⁴⁸-A, ASIL-B) versehen. Diese Sicherheitsklassifikationen wurden während der Architekturerstellung den einzelnen Softwareeinheiten zugeordnet. Das Sicherheitskonzept berücksichtigt sowohl FSI (Functional Safety Integrity) als auch SSI (System Safety Integrity). Die SSI Anteile wurden in einer eigenen Komponente zentralisiert und teilweise umgesetzt. Die FSI-Anteile wurden in die Funktionssoftware allokiert, um strukturelle Redundanzen zu reduzieren.

Entwicklung der BMC Applikations-Software

Es wurde eine Applikationssoftware entwickelt, welche die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Funktionen realisiert:

- Ansteuerung und Überwachung der elektronischen Schalter (Schütze)
- Erkennung von nicht-funktionsfähigen elektronischen Schaltern
- Überwachung des Alterungsgrades der Schalter
- Isolationsmessung
- Überwachung einer Sicherheitsschleife durch alle an der HV Spannung beteiligten Steuergeräte (Interlock)
- Umsetzung von Überwachungsfunktionen für Spannungs-, Strom- sowie Temperaturgrenzen
- Ermittlung von Batteriekenngößen wie z.B. „State of Charge“ (SoC), „State of Health“ (SoH) und „State of Function“ (SoF)⁴⁹
- Stromprognose
- Plausibilisierung der gemessenen Signale (z.B. Spannung und Strom)
- Umsetzung einer Cell-Balancing-Methode⁵⁰
- Steuerung und Überwachung der Vorladeeinheit

⁴⁷ QM (quality management) = Qualitätsmanagement

⁴⁸ ASIL (automotive safety integrity level)= Teil der ISO-Norm 26262 für sicherheitsrelevante elektrische/elektronische Systeme in Kraftfahrzeuge.

⁴⁹ SOF (state of function)= Leistungsfähigkeit. Die Menge an elektrischer Energie, die pro Zeiteinheit entnommen werden kann. Sie wird in der Regel in Watt angegeben und ist das Produkt aus Entladestrom und Entladespannung.

⁵⁰ Cell balancing method= Verfahren zum Ausgleich des Ladezustands von Batteriezellen

Die Softwarefunktionen wurden entwickelt und erfolgreich am Energiespeicher in Betrieb genommen. Zusätzlich zu den beschriebenen Grundfunktionen wurden Funktionen entwickelt und umgesetzt, welche den Betrieb mehrerer Teilbatterien in verschiedenen Verschaltungsvarianten ermöglichen:

- *Verteilte Schützensteuerung:* Für das synchronisierte Schalten von Schützen in verschiedenen Teilbatterien wurde ein Konzept erarbeitet. Zentrales Element dieses Konzeptes ist ein Contactor Router. Bei der Erstellung dieses Konzeptes standen die gute Skalierbarkeit, die leichte Erweiterbarkeit und die Flexibilität hinsichtlich verschiedener Verschaltungen im Vordergrund.
- *Verteilter Batteriekern:* Um den Umfang der internen Kommunikation zwischen den Teilbatterien gering zu halten, wurde ein Konzept mit verteilten Batteriekernen entwickelt. Hierbei ermittelt jede Teilbatterie die eigenen inneren Zustände und ein spezieller Handler abstrahiert die Teilbatterien für das Gesamtsystem. Schwerpunkt bei der Erstellung dieses Konzeptes war die Gleichheit dieses Softwareteils für Master und Slave, da Varianten in der gewählten Modellierungssprache nicht wirtschaftlich unterstützt werden können.
- *Verteiltes Cell Balancing:* Hierfür wurde ein Konzept entwickelt und umgesetzt. Schwerpunkt dieses Konzeptes war die Robustheit und die gute Erweiterbarkeit dieses Konzeptes. Die periodischen Aufwackzeiten für die Durchführung des Cell Balancings werden hierbei zentral vom Master vorgegeben.

5.1.6 Systemintegration Speicherverschaltung

Der Energiespeicher mit seiner elektronischen Steuerung ist ein komplexes System, welches wiederum in das Hybridsystem des Fahrzeuges integriert werden muss. Im Umfang dieser Systemintegration waren wesentliche Punkte wie Schnittstellen-Festlegung, Sicherheits- und Notfallstrategien sowie Störfestigkeiten der Systeme und Baugruppen aufeinander abzustimmen. Das Ziel dieses Arbeitspaketes war ein hinsichtlich aller Schnittstellen vollständig abgestimmter Energiespeicher, der ohne Fehlerrückmeldungen an das Fahrzeughybridsystem von ZF angeschlossen und erfolgreich betrieben werden kann. Die Umsetzung erfolgte in enger Abstimmung zwischen den Verbundpartnern ZF Friedrichshafen und Continental.

5.1.6.1 Normal- und Sicherheitsfunktionen

Um die Leistungsfähigkeit des Demonstrators im Systemverbund mit Wechselrichter, E-Maschine und HybridControlUnit (HCU) nachzuweisen, musste das Zusammenspiel dieser Komponenten entworfen werden. Dies musste über Softwarefunktionen auf der HCU realisiert werden. Hierzu war eine Software-Architektur zu entwickeln, welche die Normalfunktionen und die Sicherheitsfunktionen beinhaltet. Dazu gehörte auch ein Absicherungskonzept für die sicherheitskritischen bzw. -relevanten Funktionen, die nach IEC61508 (Standard in der Automobilindustrie) entwickelt wurden.

Implementierte Normalfunktionen

a) Einschaltsequenz des Demonstrators im Systemverbund

Dabei wurde eine Einschaltsequenz mit festen maximalen Zeiten nach Abbildung 72 definiert, die für einen Fahrer eines Hybridfahrzeuges als komfortabel gelten soll, also zeitlich nicht zu lange dauert.

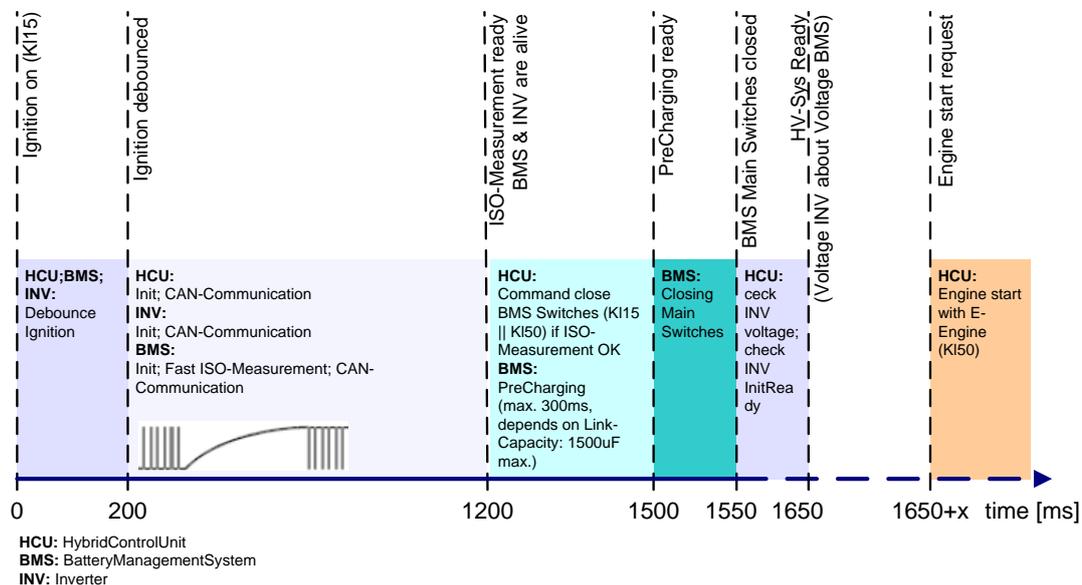


Abbildung 72: PowerUpSequenz des Demonstrators im HV-System

Weiter mussten während der Hochlaufphase die ersten Diagnosen, wie z.B. die Isolationsmessung, abgeschlossen sein. Hieraus ergab sich unter anderem das Zustandsdiagramm nach Abbildung 73 für das Steuergerät des Demonstrators. Die PowerUpSequenz wurde wie beschrieben umgesetzt und positiv getestet. Ein bis Projektende FUEL offener Punkt ist die

schnelle Isolationsmessung, welche während der PowerUpSequenz durchgeführt werden soll. Da die Messung über das gewählte Messverfahren sehr träge ist, stehen hier noch weitere Optimierungen an, mit welchen die gewünschte Hochlaufzeit erreicht werden sollte.

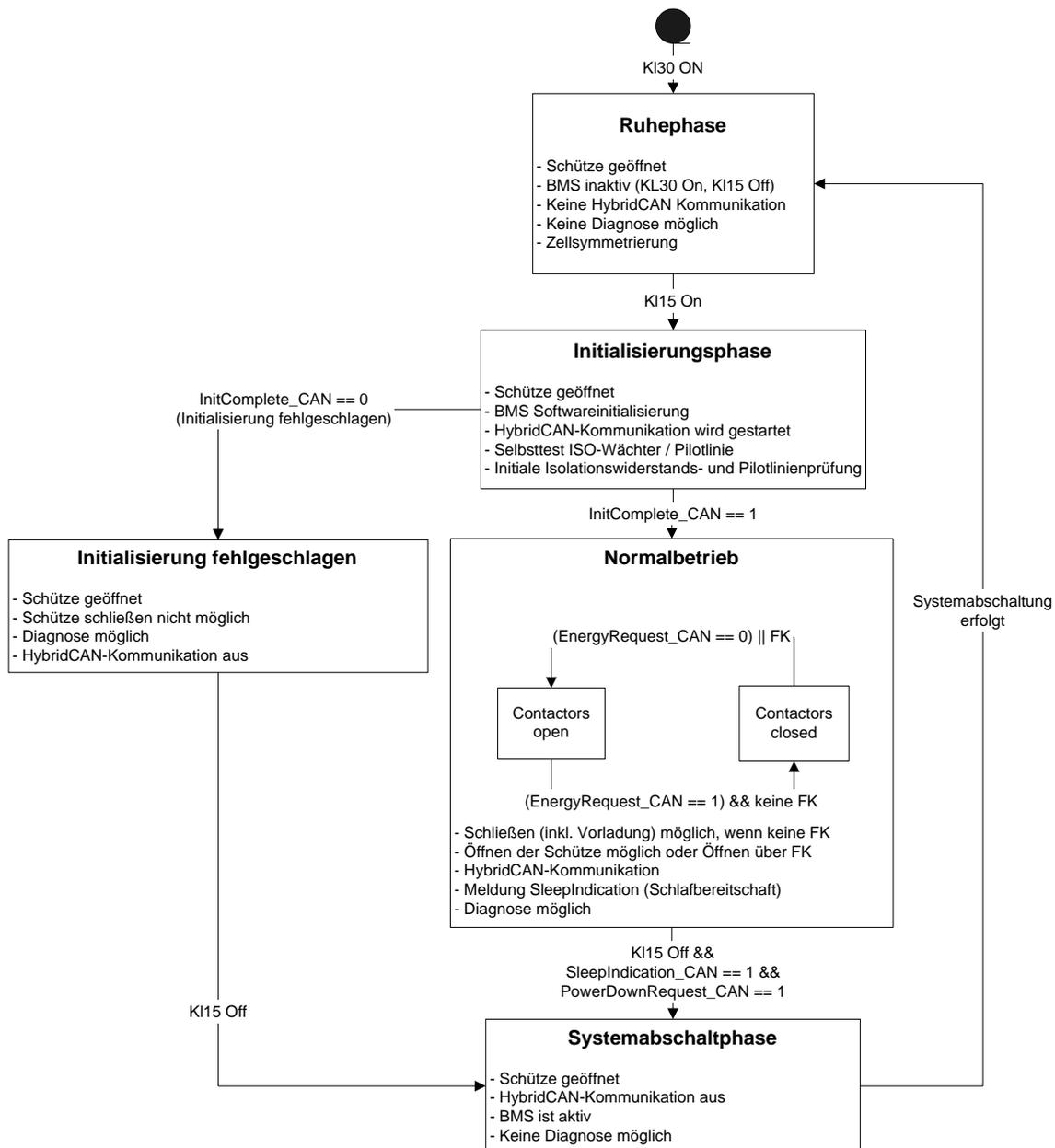


Abbildung 73: Zustandsdiagramm

b) Ausschaltsequenz des Demonstrators im Systemverbund

In Abbildung 74 ist die Ausschaltsequenz dargestellt. Die Zwischenkreis-
spannung wird in endlicher Zeit aktiv auf <60V DC entladen und danach

die Steuergeräte der einzelnen Komponenten abgeschaltet. Für ein eventuelles fehlerhaftes Ausschalten mussten auch hier Diagnosen vorgesehen werden.

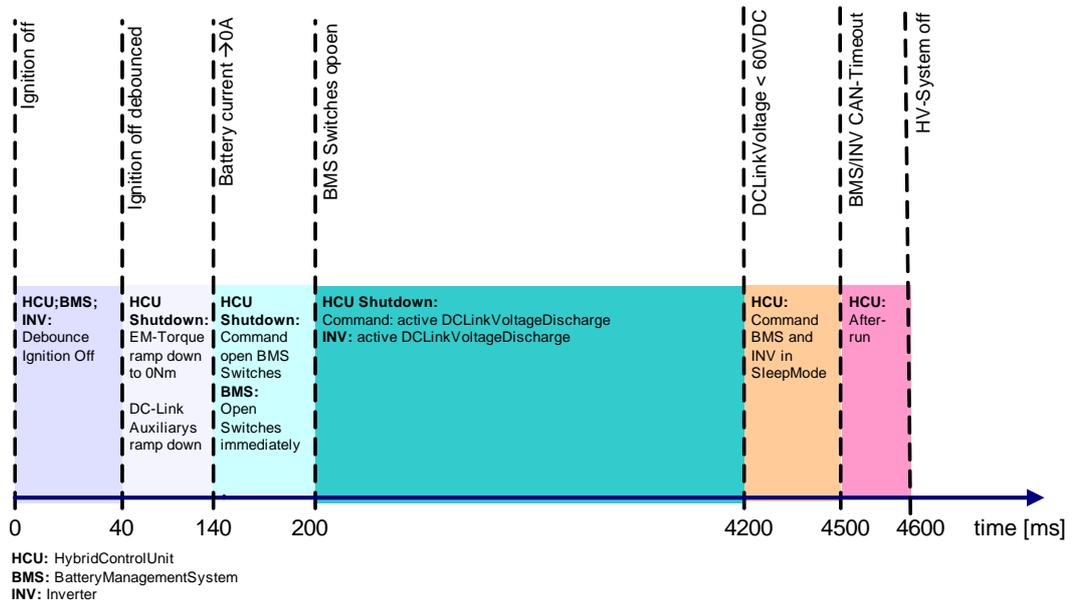


Abbildung 74: PowerDownSequenz des Demonstrators im HV-System

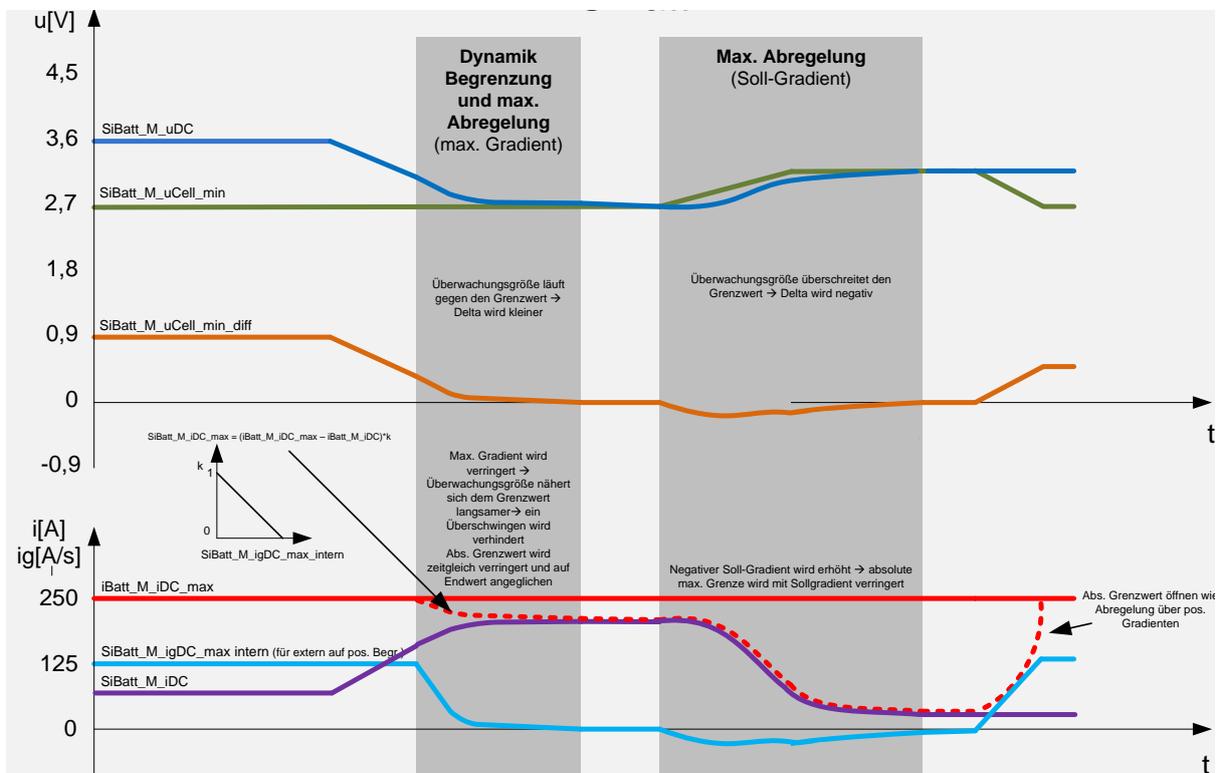


Abbildung 75: Dynamikbegrenzung und Abregelung

c) Komponentenschutz und maximale Leistungsausbeutung

Um den Demonstrator bis an seine maximale Leistungsgrenze betreiben zu können, mussten auf der HCU Dynamikbegrenzungen und Abregelungen implementiert werden. Beispielhaft zeigt dies Abbildung 75 an der minimalen Einzelzellspannung des Demonstrators.

Implementierte Sicherheitsfunktionen

Das Umsetzen der Sicherheitsfunktionen ist ohne ein Zusammenspiel des Steuergerätes des Demonstrators und der HCU nicht zu gewährleisten. Hierzu wurden folgende grundlegenden Sicherheitsfunktionen zwischen ZF und Continental abgestimmt und implementiert:

a) Isolationsmessung

Der Demonstrator hat die Aufgabe, den Isolationswert (Widerstandswert zwischen Gehäuse und HV+, HV-, Phase U, Phase V und Phase W) zu messen und bei Unterschreitung des Grenzwertes an die HCU zu melden. Die HCU führt danach eine definierte sicherheitsrelevante Systemreaktion durch.

b) Pilotlinie

Ein Pilotlinienfehler bedeutet, dass die HV-Spannung einer HV-Komponente (Batterie, Wechselrichter und E-Maschine) nicht berührungssicher ist. In diesem Fall muss der Zwischenkreis nach Norm innerhalb 5s auf unter $60 V_{DC}$ entladen werden. Hierzu wurde die in Abbildung 76 dargestellte Fehlerreaktionssequenz festgelegt.

c) Absicherung der CAN-Signale

Für alle unter a) und b) verwendeten CAN-Signale mussten CAN-Botschaftsintegritätsmaßnahmen definiert werden, welche eine sichere Übertragung von Informationen zwischen den Steuergeräten sicherstellen.

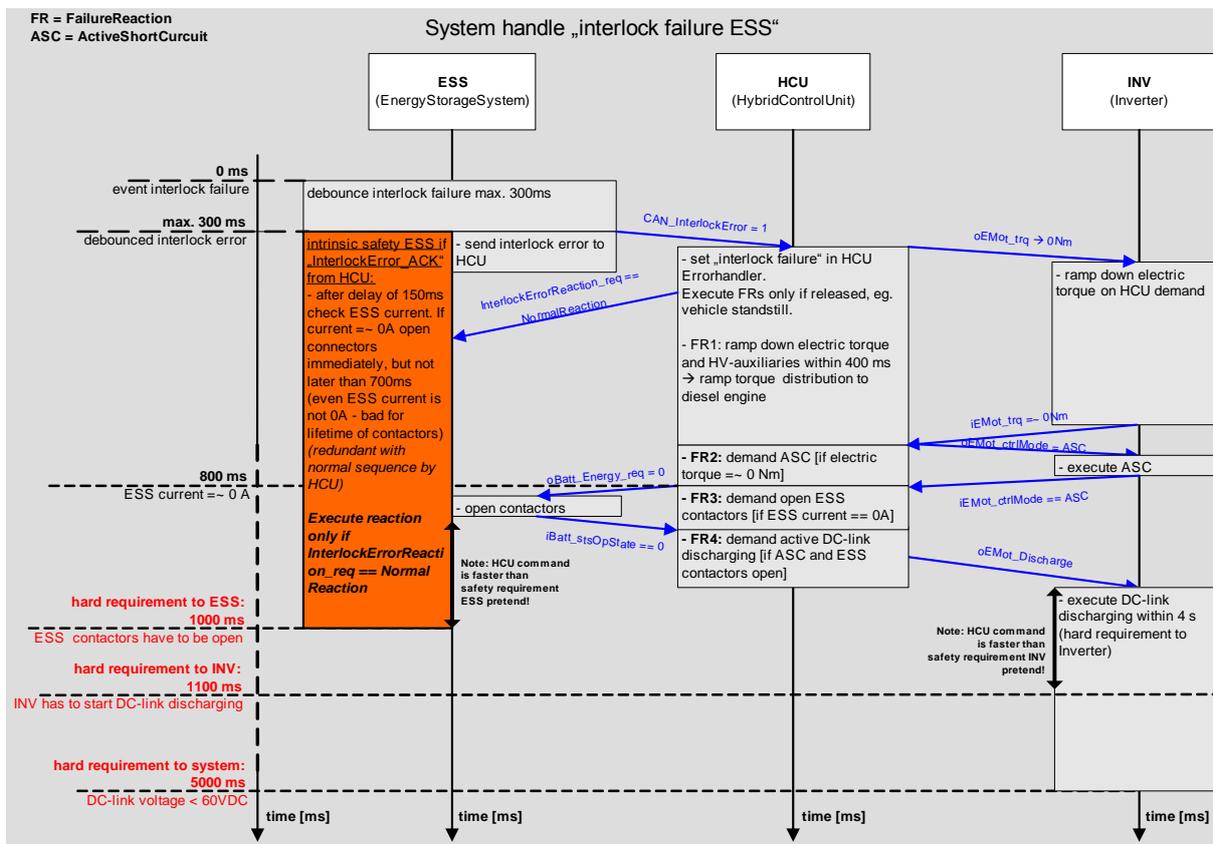


Abbildung 76: Fehlerreaktionssequenz Interlock-Fehler

5.1.6.2 Kommunikationsschnittstelle

Um die Normal- und Sicherheitsfunktionen ausführen zu können, müssen Informationen zwischen den Steuergeräten ausgetauscht werden. Hierzu musste eine Kommunikationsschnittstelle definiert werden, welche den Datenkanal (CAN-Bus) so wenig als möglich belastet. Weiter musste das Konzept die abgesicherte Übertragung von sicherheitsrelevanten Signalen beinhalten. Zusätzlich sind Diagnoseinformationen zu übertragen.

Die CAN-Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Steuergerät des Demonstrators und der HCU wurde während des Entwicklungszyklus mehrmals modifiziert und ist im jetzigen Stand vollständig ausgeführt und in die Steuergerätopologie integriert. In Abbildung 77 ist die CAN Topologie dargestellt. Die Schnittstelle zwischen dem Fahrzeug-CAN und dem Hybrid-CAN stellen die Steuergeräte HCU und TCU (Transmission Control Unit) dar.

Alle Normalfunktionen, Sicherheitsfunktionen und Diagnosen können damit durchgeführt werden. Für die Absicherung von sicherheitsrelevanten

CAN-Signalen wurden die zusätzlichen Botschaftsintegritätsmaßnahmen AliveCounter und Checksumme implementiert. Die CAN Buslast im Gesamtsystem überschreitet nie 50% und lässt somit noch Platz nach oben.

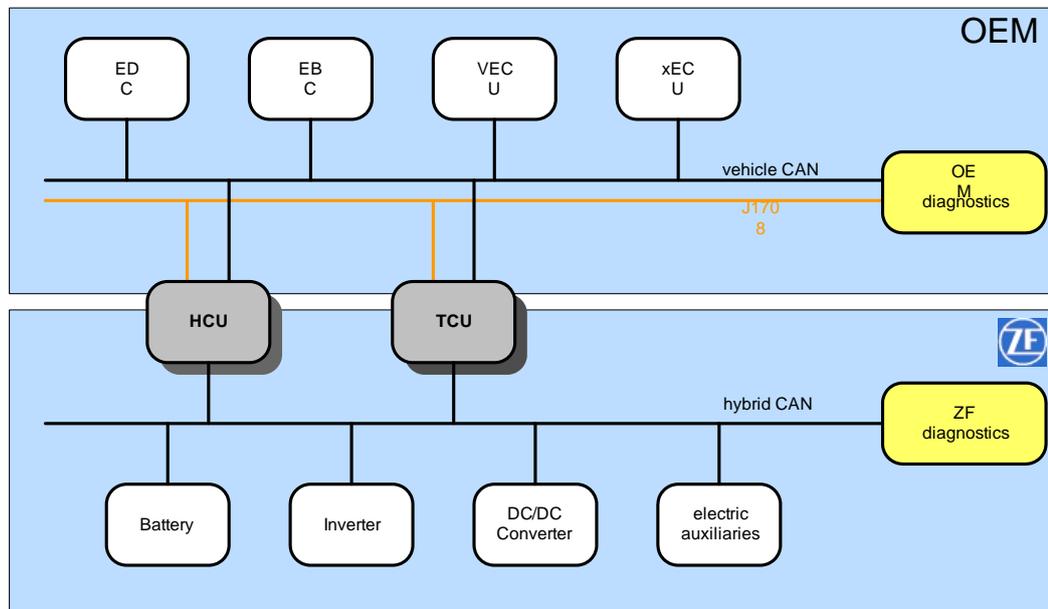


Abbildung 77: CAN Topologie

5.1.6.3 Diagnosekonzept

Das Hybridsystem ist durch ein Zentraldiagnosekonzept (oder auch Masterdiagnose) im Fahrzeugsystem diagnostizierbar. Die Kommunikation zwischen Hybridkomponente (Energiespeicher) und OEM-Diagnose erfolgt hierbei über das Hybridsteuergerät (HCU). Dieses wiederum kommuniziert mit den untergelagerten Hybridkomponenten über geeignet zusammengefasste Fehlergruppen. Die Diagnose des Gesamtsystems stellt sich somit dem OEM als homogenes System dar, was eine Einbindung des ZF-Hybridsystems in das OEM-Diagnose-Konzept einfach ermöglicht (Grundvoraussetzung zur Marktdurchdringung).

Für die Diagnose wurde für das Busspeicher-System mit 2 BMCs ein virtueller Fehlerspeicher im Master verwirklicht (Abbildung 78). So kann der Diagnostester den Energiespeicher wie ein einzelnes Gerät behandeln und Standard Diagnoseservices (UDS) verwenden. Weiter können die physikalischen Fehlerspeicher von Master und Slave für Tausch- und Kundendienstzwecke getrennt ausgelesen werden.

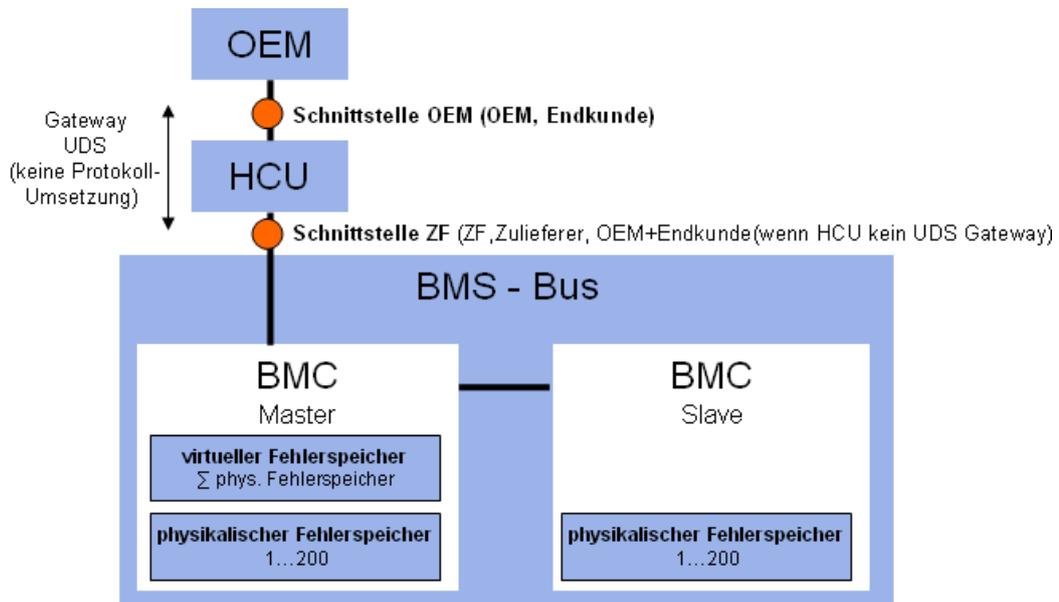


Abbildung 78: Diagnose bei den 120 kW Demonstratoren

5.1.6.4 Applikationsdatenkonzept

Die Grundüberlegung bestand darin, dass Komponenten wie Energiespeicher und Wechselrichter applikationsabhängige Bedingungen (Parameter) benötigen, z.B. Systemkonfigurationen, Daten zur Administration (Stücklisteninfo) oder auch zur Lebensdauer und zur Einsatzprognose.

Beim herkömmlichen Design erfolgen die komponentenspezifischen Bedingungen im entsprechenden Steuergerät. Als Folge entstehen Aufwände zur Datenstandpflege (ZF oder OEM), logistischer Aufwand zur Zusammenführung der entsprechenden Stücklistenspezifikationen/Komponenten, vermehrte Prozesse bezüglich End-of-Line in den Fertigungs- und Montagelinien sowie zur Variantenbereitstellung im Kundenservice-Prozess über physikalisch unterschiedliche Geräte oder End-of-Line.

Um die beschriebenen Aufwände weitestgehend zu beseitigen, wurden die zur Applikation des Energiespeichers benötigten Daten in einem gekapselten Speicherbereich der HCU abgelegt (Abbildung 79). Dies war sinnvoll, da hier die gesamten Prozesse bezüglich Applikation, Dokumentation, und Seriadatenverwaltung etabliert sind und somit kein nennenswerter Zusatzaufwand entsteht.

Alle für die Applikation relevanten Daten des Energiespeichers wurden im Hybrid Master (HCU) abgelegt und werden bei Bedarf während der Initialisierung des Systems zum Energiespeicher übertragen. Nachdem alle Vor-

und Nachteile der verschiedenen Applikationsdatenkonzepte ausgearbeitet wurden, wurde ein Konzept ausgewählt. Dieses wurde umgesetzt und bereits positiv getestet. Somit kann die Standard-Energiespeichersoftware auf verschiedene Einsatzbereiche appliziert werden, was die Erstellung und Verwaltung (Stücklisten) von verschiedener Energiespeichersoftware vermeidet und damit die Logistik extrem vereinfacht.

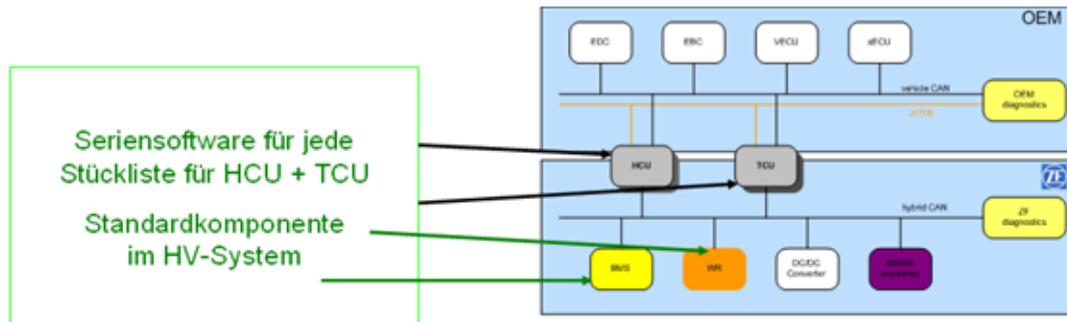


Abbildung 79: Applikationsdatenkonzept

Für den Energiespeicher kann z.B. die Anzahl der in die Pilotlinie eingebrachten Nebenverbraucher appliziert werden. Eine Implementierung des erarbeiteten Applikationsdatenkonzeptes erlaubt die Applikation von verhaltensrelevanten Parametern (Applikationsparametern) und Identifikationsdaten des Energiespeichers zur Laufzeit.

Die Hybridkomponenten können nun als neutrale Standardkomponenten in das Fahrzeugsystem verbaut werden. Bei erstmaliger Inbetriebnahme des Gesamtnetzwerkes tauscht die HCU mit den Standardkomponenten (Energiespeicher) die entsprechenden Daten über spezielle Services aus. Damit ist das System einsatzbereit. Somit können Standardkomponenten unabhängig von Hybridsystemstücklisten im Logistikprozess und beim Kundenserviceprozess verwendet werden.

5.1.6.5 Statistikdaten

Die Hauptaufgaben lagen in der Entwicklung von geeigneten Funktionen/Berechnungen, die im realen Fahrbetrieb die betriebs-, kraftstoffverbrauchs- und lebensdauerrelevanten Daten ermitteln und in entsprechender Komprimierung im nichtflüchtigen Speicher des Steuergerätes ablegen. Dies musste unter Berücksichtigung von Laufzeit und Speichergröße erfolgen. Damit wurden die Grundlagen für eine dynamische auf das Einzelfahrzeug abgestimmte Betriebsstrategie geschaffen.

Die Speicherung auf dem Energiespeichersteuergerät und die sinnvolle grafische Darstellung der Daten wurde umgesetzt. Diese Daten zeigen, in welchen Betriebsbereichen der Energiespeicher betrieben wurde. Über eine Auswertung dieser Daten können nun z.B. die Einflussfaktoren auf die Alterung der Energiespeicherzellen bestimmt werden.

Da die Erprobung bei Projektende von FUEL noch nicht in die Breite ging, konnten die ermittelten Statistikdaten zu verschiedenen applizierten Systemen noch nicht ausgewertet und verifiziert werden. Der Umfang der Statistikdaten kann sich im Zuge der Durchführung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Arbeiten nach Projektende FUEL daher weiterentwickeln.

5.1.6.6 Fehler und Fehlerreaktionen

Um in Echtzeit ein sicheres und harmonisches Fehlerverhalten im Gesamthybridsystem zu erhalten, müssen die möglichen auftretenden Fehler des Energiespeichers an das übergeordnete System gemeldet werden (es sind nur von der Elektronik direkt oder indirekt erkennbare Fehler verarbeitbar). Hierzu musste ein Konzept entwickelt und umgesetzt werden, welches eine eindeutige Zuordnung von Fehler und Fehlerreaktion erlaubt. Weiterhin musste das Konzept eine Diagnosediefe auf mindestens die kleinste auswechselbare Komponente erlauben.

Das auch als Onlinediagnose bezeichnete Konzept gemäß Abbildung 80, meldet die HV-Komponentenfehler über Clusterfehler (Sammelfehler), und damit auch die Energiespeichersteuergerätefehler, zur Laufzeit an den Hybridmaster (HCU). Dieser leitet damit die korrekte Systemfehlerreaktion (Fehlermeldung an Fahrer oder aktive Aktionen) ein und legt gleichzeitig eine Information über die Art des Fehlers im HCU Fehlerspeicher ab. Über die Art des Fehlers kann nun der Fehlerort diagnostiziert werden, was zukünftig ein Tauschkonzept der austauschbaren Teile des Energiespeichers ermöglicht, ohne den detaillierten Fehlerspeicher des Energiespeichers auszulesen.

Die Funktion „Onlinediagnose“ wurde implementiert und positiv getestet. Abgestimmte Systemfehlerreaktionen und Fahrerinformationen erfolgen wie gewünscht. Um eine tiefere Fehlerort-Diagnose für den OEM zu erhalten, kann sich die Granularität der Clusterfehler über das Förderprojekt hinaus weiter verändern. Das Konzept wurde aber hiermit nachgewiesen.

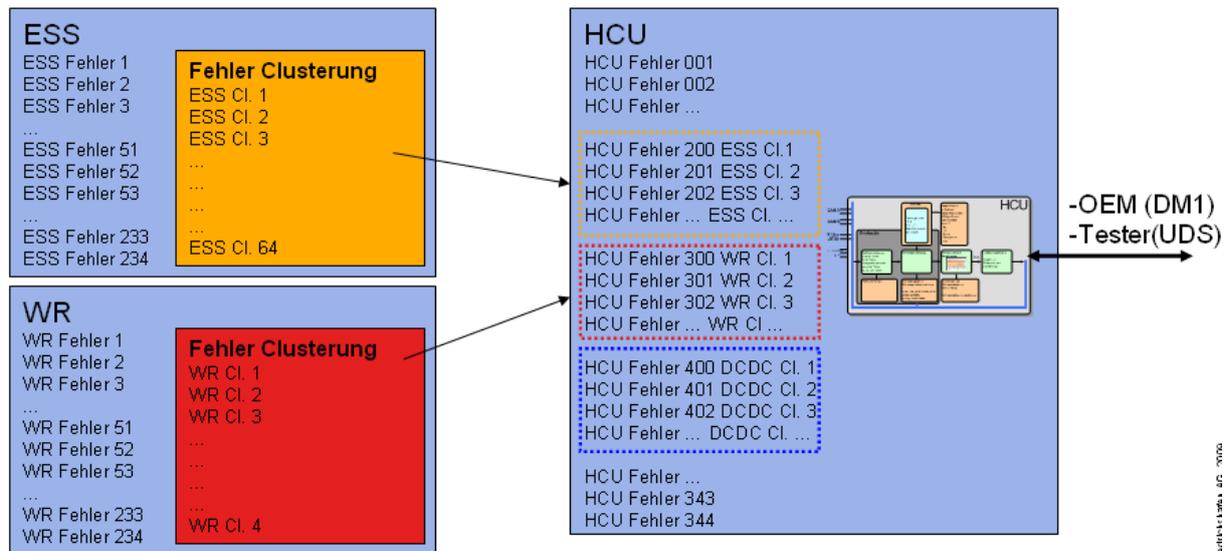


Abbildung 80: Konzept Onlinediagnose

5.1.6.7 Sonderfunktionen

Als Sonderfunktionen sind Funktionen auf dem Hybridmaster (HCU) deklariert, welche nicht direkt die Ansteuerung des Energiespeichers durchführen.

a) Ansteuerung Kühlsystem

Das Kühlsystem besteht mindestens aus einem Kühlmitteltemperatursensor, einem Volumenstrom-Magnetventil, einer Kühlmittelpumpe und einem in der Drehzahl steuerbaren Lüfter. Diese Sensoren und Aktoren müssen über entsprechende diskrete analoge oder digitale Schnittstellen oder über eine CAN-Schnittstelle bedient werden. Hierzu wurden Funktionen zur Ansteuerung der Komponenten entwickelt, welche der Herausforderung der konträren Anforderungen an das Kühlsystem Rechnung tragen: Der Energiespeicher soll einerseits möglichst immer eine konstant niedrigere Temperatur haben, aber andererseits sollte dabei der Energiebedarf der Kühlung nicht höher als die gewonnene Energie des Hybridsystems sein.

Die Kühlsystemleistung konnte über Funktionserweiterungen merkbar minimiert, also unnötiges Ansteuern des Lüfters und der Pumpe vermieden werden. Allerdings steht für die Weiterentwicklung noch das Potential des vorgesteuerten Kühlens offen, d.h. die Erhöhung der Kühlleistung, sobald elektrische Leistung in den Energiespeicher eingetragen oder ab-

gerufen wird. Dadurch kann schon das Anfallen der Wärme verhindert werden.

b) Energiespeicher Wärmen

Der Innenwiderstand der Lithium-Ionen-Zelle des Energiespeichers steigt zu tiefen Temperaturen hin exponentiell an. Lade- und Entladeströme und damit auch die Leistung, werden sehr stark eingeschränkt, da die Zellspannung bei Stromfluss über den höheren Innenwiderstand schnell die maximalen Grenzen erreicht. Da in der Busanwendung ein Anfahren des Fahrzeuges nur rein elektrisch möglich ist, soll auf dem Hybridmaster eine Erwärmungsfunktion implementiert werden, die während des Fahrzeug-Stillstandes über die zugelassenen Lade- und Entladeströme eine Selbsterwärmung der Zellen hervorruft. Die Spezifikation dieser Funktion wurde erstellt, die Implementierung wird jedoch erst nach Projektende FUEL abgeschlossen werden.

5.1.6.8 Leistungsvorhersage und Lebensdauer

a) Leistungsvorhersage

Es wurde eine Softwarefunktion entwickelt und umgesetzt, welche aus der Leistungsvorhersage des Energiespeichers das prädiktiv zur Verfügung stehende Moment der E-Maschine ermittelt, bzw. die zur Verfügung stehende elektrische Energie für elektrische Hochvolt-Verbraucher priorisiert.

Die Leistungsvorhersage des Energiespeichers darf hierbei nur einen geringen Fehler aufweisen. Ist der Fehler zu hoch, pflanzt sich dieser in der Kette Energiespeicher – Wechselrichter fort, und die Drehmomentverteilung im Gesamthybridsystem wird zunehmend falsch. Um alle Grenzwerte, wie z.B. die Zellspannung und die Zelltemperatur des Energiespeichers einzuhalten und wertvolle Daten für die Hybridstrategie zu liefern, wurde die folgende Leistungsvorhersage (Stromvorhersage mit Spannungseckpunkt) implementiert, aus welcher der Wechselrichter ein zur Verfügung stehendes Drehmoment mit Eckdrehzahl errechnen kann. Die Leistungsvorhersage (Abbildung 81) musste während des Förderprojekts komplett überarbeitet werden, da diese den Ladungsträgerverarmungseffekt einer Lithium-Ionen-Zelle bei einer Entladung des Energiespeichers zunächst nicht berücksichtigte.

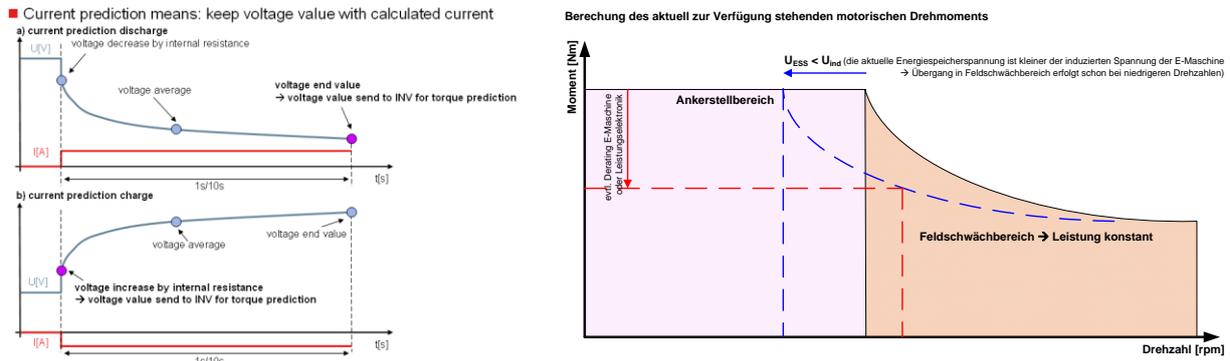


Abbildung 81: Leistungs- und Momentenprognose

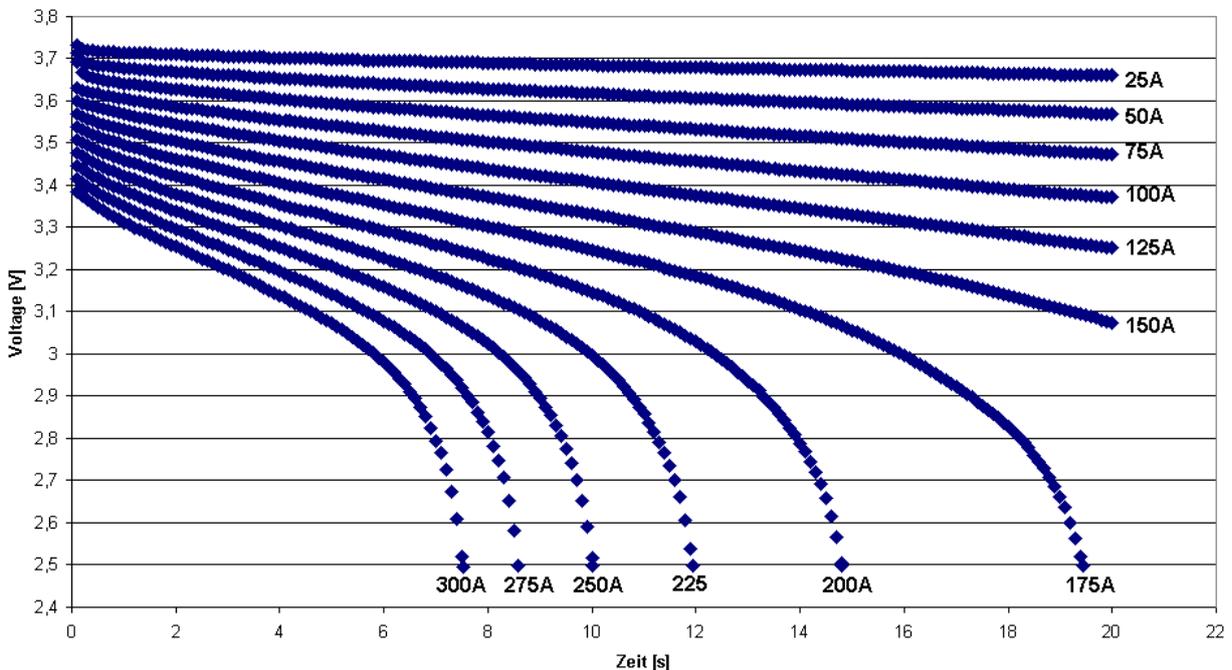


Abbildung 82: Effekt der Ladungsträgerverarmung

Dieser Effekt führt zu einem sehr dynamischen Abfall der Zellspannung (siehe Abbildung 82), welcher die betroffene Zelle zugleich überproportional altert. Erste Ergebnisse am Prüfstand zeigen positive Resultate der Leistungsvorhersage.

b) Lebensdaueroptimierung, Lebensdauerverwaltung

Die Lebensdauer der einzelnen Komponenten im Fahrzeug soll gesteuert aufeinander abgestimmt werden. Hierzu muss eine Softwarefunktion entwickelt und umgesetzt werden, welche den Alterungszustand des Energiespeichers ermittelt und diesen über die Laufzeit über geeignete Stellgrößen gesteuert auf das definierte Lebensdauerende des Gesamtsystems heraufführt. Hierzu wurden Alterungsindikatoren des Energiespei-

chers definiert: Der temperaturnormierte Innenwiderstand und die temperaturnormierte Ist-Kapazität. Weiter wurde ein End-Of-Life (EOL) Alterungszustand festgelegt, welcher nun über „härtere“ oder „weichere“ Lade- und Entladeströme an den Gesamtsystem-EOL-Punkt (Solllebensdauer) herangeführt werden soll.

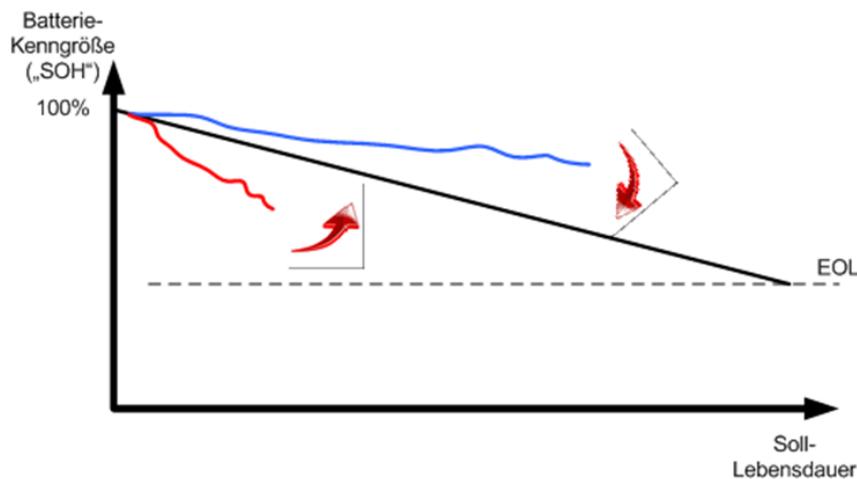


Abbildung 83: Prinzipdarstellung zur Regelung der Lebensdauer

Der Nachweis dieser Funktion konnte nicht fertiggestellt werden, da hierzu auch eine Alterung der Energiespeicherzellen im Fahrzeug eintreten muss, welche sich zum Ende dieses Förderprojektes nicht mehr realisieren ließ. Weiter wurde erkannt, dass sich der Zusammenhang der Alterung und der möglichen Stellgrößen, wie SOC-Hub, Temperatur, absoluter SOC und weiterer Parameter hoch komplex darstellt und erst nach dem Ende des Förderprojektes FUEL vertieft betrachtet werden kann.

5.1.6.9 Integration Batterie-Management-System (BMS) in Hardware-in-the-Loop Prüfstand (HiL)

Die Normalfunktionen sowie die sicherheitsrelevanten Funktionen des Energiespeichers müssen im integrierten Gesamthybridsystem abgesichert werden. Dazu sollen alle Fehler bzw. Fehlerreaktionen des Batterie-steuergerätes stimuliert werden können und auf das Gesamtsystem wirken.

Im Hochvoltsystem am realen Energiespeicher ist die Manipulation von Fehlern teilweise schwer darstellbar, weil beispielsweise die Zellchemie geschädigt werden kann, bei hohen elektrischen Leistungen die Schütze oder andere elektrische Bauteile zerstört werden könnten und nicht zuletzt durch gefährliche Zustände des Energiespeichers die testdurchführende

Person in Gefahr geraten könnte. Daher wird für diese Testzwecke das Batteriesteuergerät in den Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstand integriert (Abbildung 84), um in geeigneter Weise alle Fehler bzw. Fehlerreaktionen des Batteriesteuergeräts simulieren zu können.

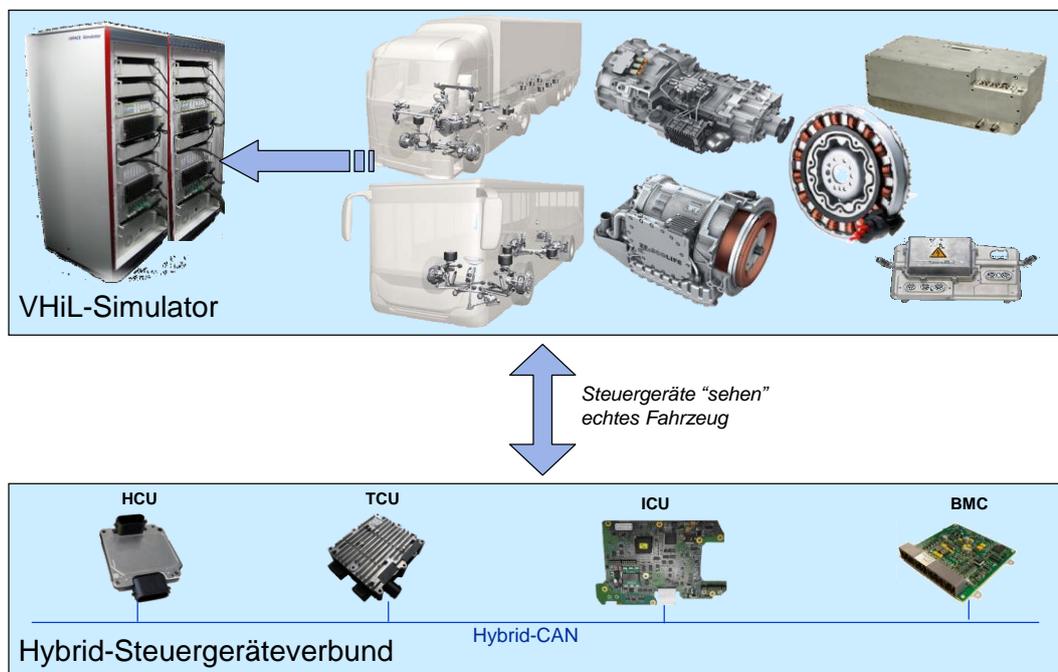


Abbildung 84: Vernetzung Steuergeräte im HiL

Das Batteriesteuergerät besteht aus dem BMC-Master und den CSC-Slaves (siehe Abbildung 85). Die CSCs überwachen die einzelnen Zellen des Energiespeichers. Die Überwachung sowie die weiteren Funktionalitäten wie z.B. Zell-Symmetrierung oder die Kommunikation zum BMC-Master erfolgte über eine Autobox der Fa. DSpace.

Das BMC-Master Steuergerät übernimmt im Energiespeichersystem die gesamte Diagnose-Funktionalität, sowie die Kommunikation zum Hybridsteuergerät. Der BMC-Master wird daher original, ohne Hardware- oder Software Änderungen in dem Steuergeräte-Verbund eingesetzt. Das BMC übernimmt außerdem die Spannungsmessung des Energiespeichers, die Ansteuerung der Leistungsschütze sowie die Überwachung des Zwischenkreises. Daher wurde für die Integration ein Zwischenkreis inkl. Zwischenkreiskondensator mit HV-Spannung realisiert.

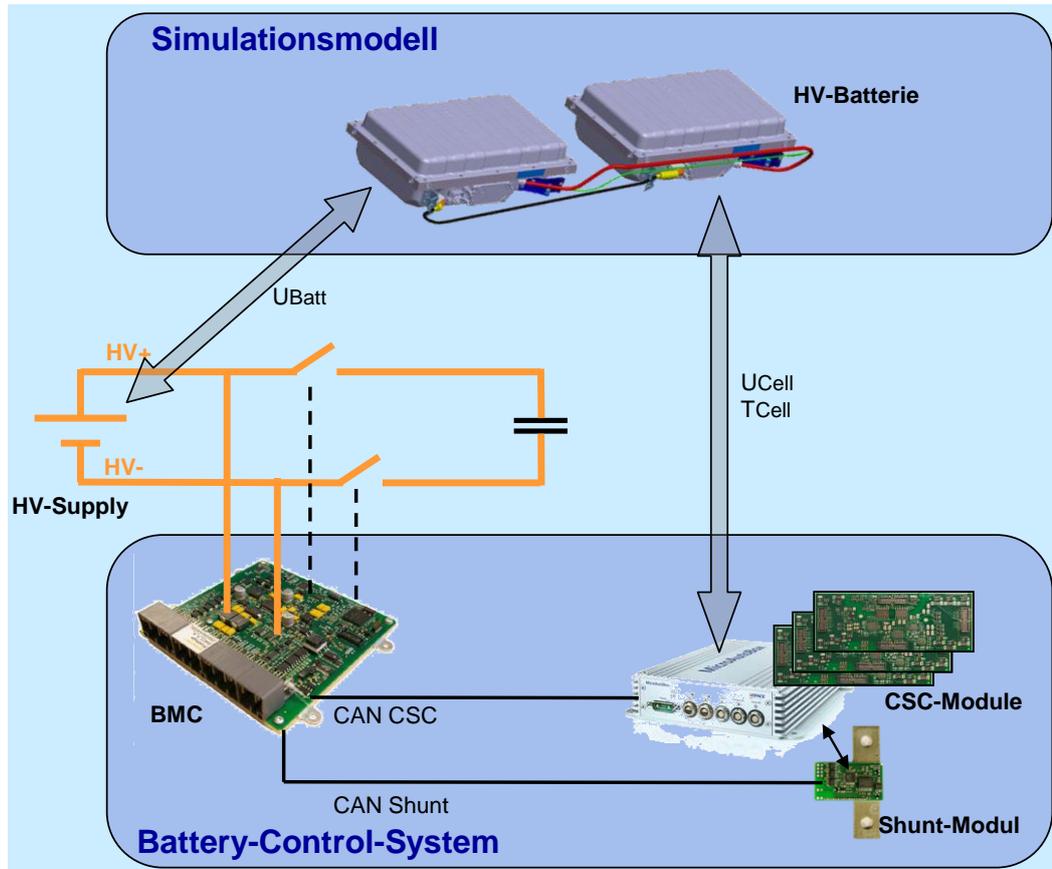


Abbildung 85: HiL Integration Batteriesteuergerät

Die Integration des Batteriesteuergerätes (mit flashbarer Software) am HiL wurde erfolgreich durchgeführt. Dabei wurde sogar ein „echter“ Zwischenkreis mit HV-Spannung verwirklicht, um dem realen System so nahe wie möglich zu sein. Unterschiede zum realen System sind dadurch nur die Lithium-Ionen-Zellen, die weiterhin simuliert werden müssen.

In der Abbildung 86 ist der Hardwareaufbau des HiL Prüfstands dargestellt. Mit diesem System können bei Software-Änderungen am Energiespeichersteuergerät oder bei der HCU Freigabetests durchgeführt werden. Die Stimulation von Fehlern oder das Einstellen von gewünschten Testzuständen sind mit Hilfe dieses Systems leicht herzustellen. Der HiL erleichtert die Systemtests erheblich. Der Grundstein für einen automatisierten Systemtest wurde damit gelegt.

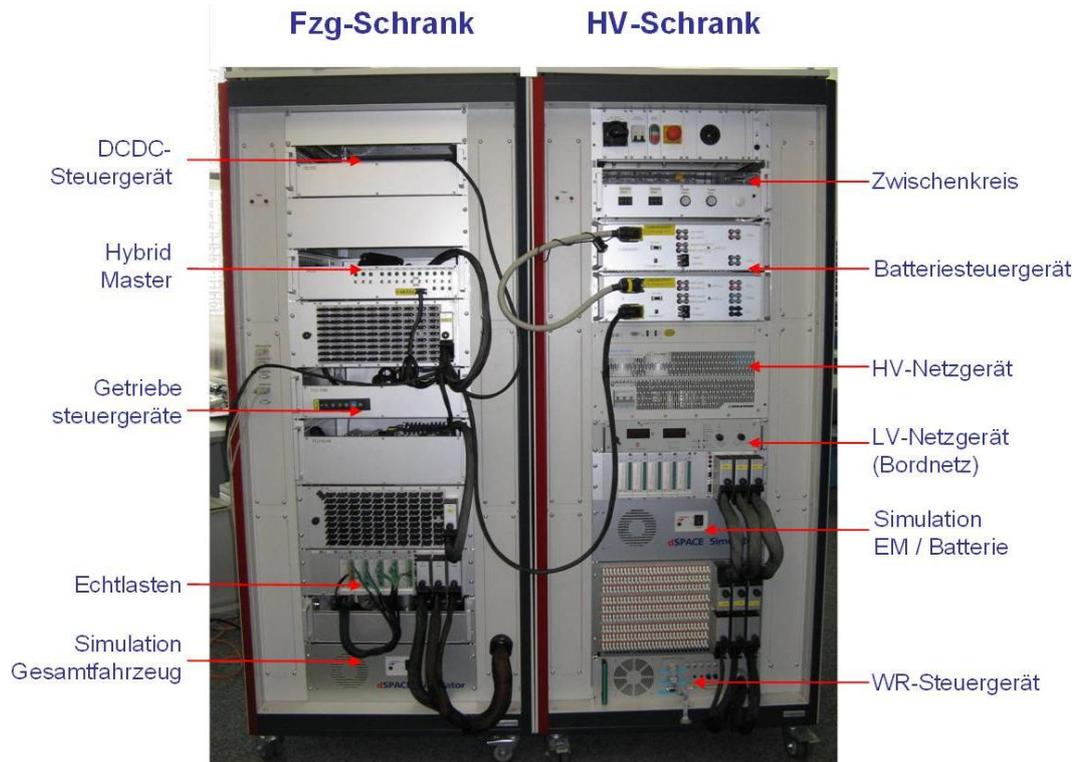


Abbildung 86: HiL Prüfstand

5.1.6.10 Simulation von Fahrzyklen

Die Lebensdauer von Energiespeichern (Demonstrator) ist eine der großen Herausforderungen der Technologieentwicklung. Diese hängt unter anderem stark von SOC-Hüben bzw. SOC-Ständen, Temperatur, Energiedurchsatz, Strom bzw. Stromänderung ab. Die Ermittlung dieser Parameter erfolgt mittels Simulation unterschiedlicher Fahrzeuge, Beladungen und Strecken.

Weiterhin ist die Wirtschaftlichkeit des Systems eine weitere Grundvoraussetzung zur Marktdurchdringung. Bei den Simulationen wird neben bauteilauslegungsrelevanten Daten auch die Kraftstoffeinsparung ermittelt. Die Simulationsumgebung wurde entwickelt und erstellt, Fahrzyklen wurden simuliert. Dabei wurden der Strom-, Spannungs- und der Ladezustandsverlauf (SOC) bei einzelnen Strecken (bspw. reale Bus-Strecke „Stuttgart Linie 42“) betrachtet und bewertet (siehe Abbildung 87), um Aussagen zu erhalten, inwieweit die HV-Batterie belastet wird und um daraus Lebensdauerprognosen treffen zu können.

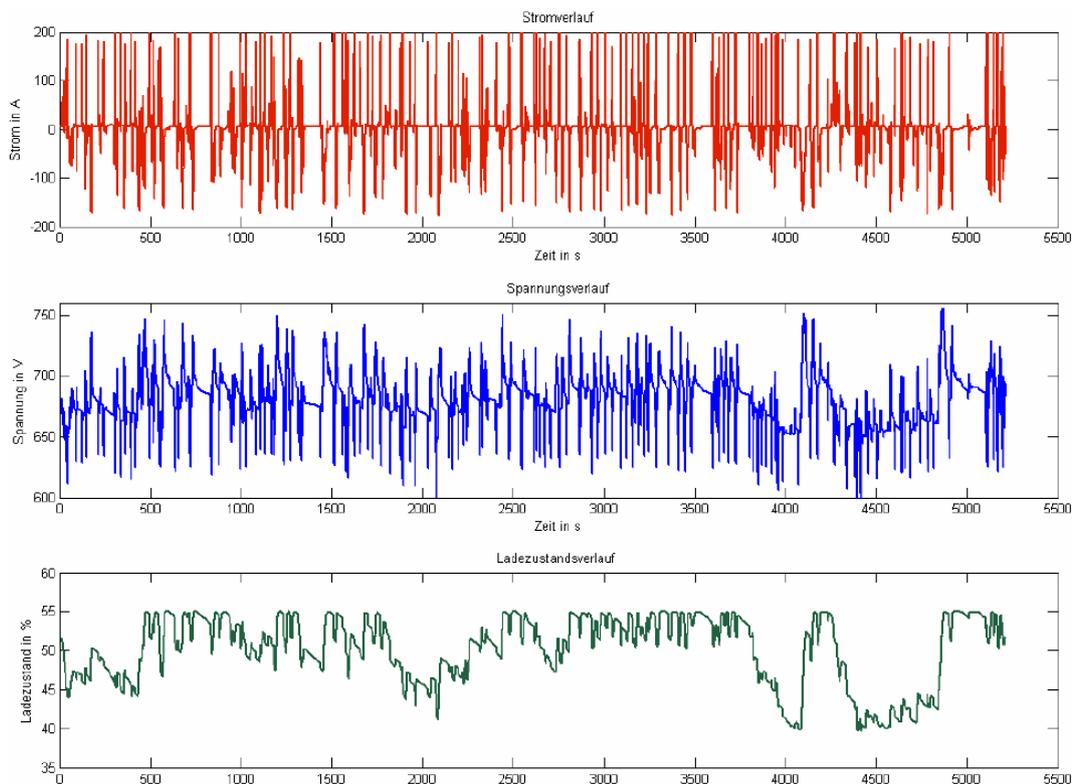


Abbildung 87: Strom-, Spannungs- und Ladezustandsverlauf aus Simulationen von Fahrzyklen

Der von ZF ermittelte Strom-, Spannungs- und Ladezustandsverlauf wurde dem Verbundpartner Continental ausgehändigt, um unter bestimmten Randbedingungen (Stecken, Temperatur, Fahrzeug) die Lebensdauer des Energiespeichers abzuschätzen. In Abbildung 88 sind die Ergebnisse der Lebensdauerberechnungen für einen Stadtbus mit einer Teilbeladung von 23,5 to bei verschiedenen Strecken und Umgebungstemperaturen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine geforderte Lebensdauer von 10 Jahren nicht erreicht wird und ein Tausch der Batterie notwendig wird. Dies hat enorme Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamthybridsystems, da sich die Amortisationszeit deutlich verlängert.

Fahrprofil	Umgebungstemperaturprofil		
	Athen	Berlin	Moskau
Gelenkbus_23500kg_Sort1_Conti_20110215.mat Zelltemperatur bei Fahrbetrieb = $T_{\text{Vorlauf}} + 1,7 \cdot P_{\text{th_Zelle}}$, aber mind. 40°C	6,3	7	7,1
Gelenkbus_23500kg_London_Conti_20110211.mat Zelltemperatur bei Fahrbetrieb = $T_{\text{Vorlauf}} + 1,7 \cdot P_{\text{th_Zelle}}$, aber mind. 40°C	5,5	6,7	6,9
Gelenkbus_23500kg_Stuttgart_Conti_20110211.mat Zelltemperatur bei Fahrbetrieb = $T_{\text{Vorlauf}} + 1,7 \cdot P_{\text{th_Zelle}}$, aber mind. 40°C	5,9	7,8	7,9
Gelenkbus_23500kg_Mannheim_Conti_20110211.mat Zelltemperatur bei Fahrbetrieb = $T_{\text{Vorlauf}} + 1,7 \cdot P_{\text{th_Zelle}}$, aber mind. 40°C	6,2	7,5	7,8

Abbildung 88: Erwartete Lebensdauer der Batterie

5.1.7 Service Konzept

Der Li-Ionen Energiespeicher wird als wartungsfreie Batterie konzipiert. Dennoch ist bei der Vielzahl an Einzelbauteilen und Baugruppen die Beschädigung einer Komponente noch vor Erreichen der Lebensdauer nicht auszuschließen. Der Ausfall einer preisgünstigen Komponente würde den Verlust eines wertvollen und ansonsten intakten Energiespeichers bedeuten. Um eine Komponente am Markt etablieren zu können, muss über das Angebot eines qualitativ hochwertigen Produktes hinaus auch der so genannte „After Sales Service“ geboten werden.

Um die Möglichkeit einer Reparatur einer defekten Lithium-Ionen-Batterie wahrnehmen zu können, müssen alle ausfallträchtigen Komponenten der Batterie definiert und als Ersatzteil/Reparaturkit eingeführt werden. Diese Komponenten müssen auf ihre De- und Montierbarkeit mittels Probemontagen untersucht werden, was zum Teil enorme Auswirkungen auf das Produktionsdesign haben kann, da durch diese Anforderung gewisse Produktionstechniken ausgeschlossen bzw. angewendet werden müssen. Abschließende Prüfungen nach Norm mit den entsprechenden Prüfgeräten müssen ausgearbeitet werden. Zusätzlich muss die Recyclingfähigkeit der Batterie am Ende der Lebensdauer sichergestellt werden. Hierzu müssen die gesetzlichen Anforderungen bzgl. der Recyclingquote und dem Ausschluss von Gefahrstoffen (Material- und Hilfsstoffe) betrachtet und umgesetzt werden, welche Auswirkungen auf die Produktions- und Fertigungstechnologien haben. Diese Aufgaben wurden in mehreren Schritten abgearbeitet.

Erarbeiten einer Service-Anforderungsspezifikation

Ziel war es, einen Demonstrator mit einer kostengünstigen Reparaturmöglichkeit nach dem Lebensdauerende bzw. nach einem Ausfall von einzelnen Komponenten zu entwickeln, um dem Endkunden eine wirtschaftliche Alternative zum kostenintensiven Batterieeinkauf anzubieten zu können. Aus diesem Grund wurde von ZF eine Service-Anforderungsspezifikation erstellt und mit dem Verbundpartner Continental abgestimmt, so dass die Service-Anforderungen bei der Entwicklung der Produktionstechnologien und –verfahren berücksichtigt und umgesetzt werden konnten.

Um die Service- und Reparaturfähigkeit zu erleichtern, sollten die einzelnen Komponenten des Demonstrators zu sinnvollen Modulen zusammen gefasst werden, wobei die Zusammengehörigkeit und die Tiefe des Detail-

lierungsgrades abzustimmen war. Außerdem galt es, Mechanismen zur Defekterkennung, Datensicherung und Rücksetzen von Historiendaten zu finden, die ein einfaches, sicheres - auch manipuliersicheres - und geführtes Tauschen von Komponenten ermöglichen.

Weitere Serviceanforderungen, wie Service-freundliche Zugänglichkeit der Betriebsmittel (inkl. Verdrahtung/Verkabelung) trotz hoher Schutzart, Identifikation von Speicher und Tauschteilen, Fehlerdiagnose, Kennzeichnung der Schalt- und Steuergeräte sowie Kabel, Leitungen und Klemmen, Sicherheitshinweise und Gefahrenaufkleber, Technische Dokumente, elektrische Verbindungen wie Schraub- und Steckverbindungen, Schraubverbindungen und deren Sicherungsmittel, Werkzeuge, Transportösen, wiederkehrende Prüfungen und Prüfungen nach einer Reparatur sowie Qualifizierungsbedarf wurden in separaten Workshops diskutiert und konnten bereits im BF2-Demonstrator teilweise konstruktiv umgesetzt werden.

In der Abbildung 89 sind die einzelnen Schulungsbausteine des Qualifizierungsbedarfs der Mitarbeiter für den sicheren Umgang mit Hybridsystemen zusammen gestellt. Die einzelnen Bausteine stellen die Grundvoraussetzung für die Berechtigung des Betriebs eines Hybridsystems bis hin zur Reparatur einzelner Komponenten unter Spannung dar.

Lehrgang	Baustein 1: Sicherheitsunterweisung Hybrid	Baustein 2a: Grundlagen der Elektrotechnik	Baustein 2b: Elektrische Gefährdungen und Schutzmaßnahmen	Baustein 2c: Tätigkeiten an HV-Hybridanlagen	Baustein 3: Fachmodul für Arbeiten an HV-Systemen unter Spannung (inkl.Prüf.)
Zugang / Voraussetzung	Alle Mitarbeiter, welche an Fahrzeugen und Prüfständen mit einer Hybridanlage arbeiten (- Testfahrer;- Karosseriearbeiten;- Öl-, Radwechsel- Bedienen- Funktionsentwickler)	Teilnehmer mit technischer Berufsausbildung jedoch ohne elektrotechnische Ausbildung (Mechaniker, Meister, Maschinenbau)	Baustein 2a oder Teilnehmer mit elektrotechnischer Berufsausbildung + Aufnahmeprüfung (Kfz-Elektriker, -Mechatroniker, Ingenieure mit elektrotechnischen Grundlagen)	Baustein 2b oder Teilnehmer mit elektrotechnischer Berufsausbildung+ Aufnahmeprüfung (z.B. Betriebselektriker, Elektroingenieur)	Baustein 2c und elektrotechnische Ausbildung (z.B. Betriebselektriker, Elektroingenieur)
Abschluss	Elektrotechnisch unterwiesene Person (EUP)	---	---	Fachkundiger für elektrische Fahrertriebe (FEFA)	Fachkundiger für elektrische Fahrertriebe - AuS
Befähigung	Nicht elektrotechnische Arbeiten am Hybridfahrzeug oder Prüfstand	Zugangsvoraussetzung für Baustein 2b	Zugangsvoraussetzung für Baustein 2c	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsfreiheit des HV-Systems zertifiziert • herstellen, prüfen und sicherstellen • Durchführen aller Arbeiten im spannungsfreien Zustand • Abnahme von Arbeiten am spannungsfreien HV-System • HV-Inbetriebnahme gemäß Checkliste / Betriebsanweisung • Ein- und Unterweisung von MA an HV- Fahrzeugen/ Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeiten unter Spannung (AuS) • Durchführen aller Tätigkeiten an HV- Systemen gemäß der geltenden elektrotechnischen Regeln • Anlagenverantwortlicher (ANLV) • VEFK

Abbildung 89: Übersicht zu ZF Schulungen zum sicheren Umgang mit Hybridsystemen

Nachweis der Reparaturfähigkeit durch Testmontage

Zum BF1- und BF2-Demonstrator wurden Testmontagen beim Verbundpartner Continental durchgeführt, zum einen, um die Umsetzung der Service-Anforderungen zu überprüfen und zum anderen, um die neue Technologie besser kennen zu lernen, sowie die notwendigen Fertigkeiten zu erlangen und zu verbessern. Die Erkenntnisse wurden anschließend von ZF gemeinsam mit dem Verbundpartner konstruktiv diskutiert und für den BF3-Demonstrator sowie für eine Weiterentwicklung nach Abschluss des Förderprojekts vorgesehen.

Die Granularität der Module wurde auf folgende 6 Hauptkomponenten herunter gebrochen: Zellmodule mit Überwachungselektronik und integriertem Kühler, Tragrahmen, Elektromechanikmodul, Steuergerät, Kühlsystemverschlauchung und Gehäuse mit Haube oben/unten.

Die kleinste Zellmoduleinheit besteht aus 24 und die größte aus 36 Zellen. Die Elektromechanikbauteile wie Relais, Stromsensor, Hauptsicherung, Vorladewiderstand mit zugehöriger Verkabelung, wurden in einem Modul zusammengefasst. Dies ermöglicht einen einfachen Tausch von Baugruppen. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 90 und Abbildung 91) sind einzelne Baugruppen des BF2-Demonstrators dargestellt.

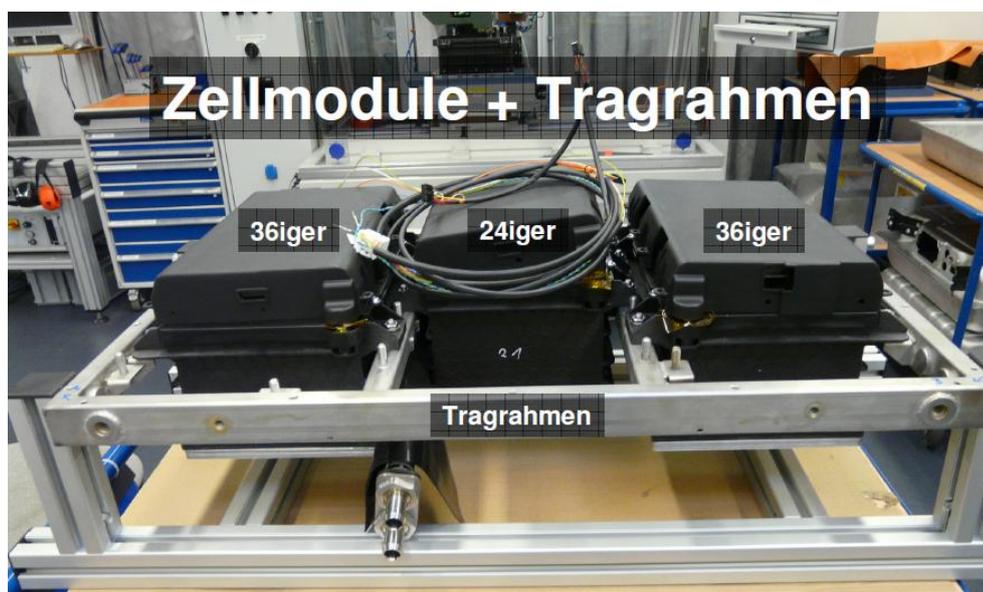


Abbildung 90: Zellmodule und Tragrahmen des BF2-Demonstrators

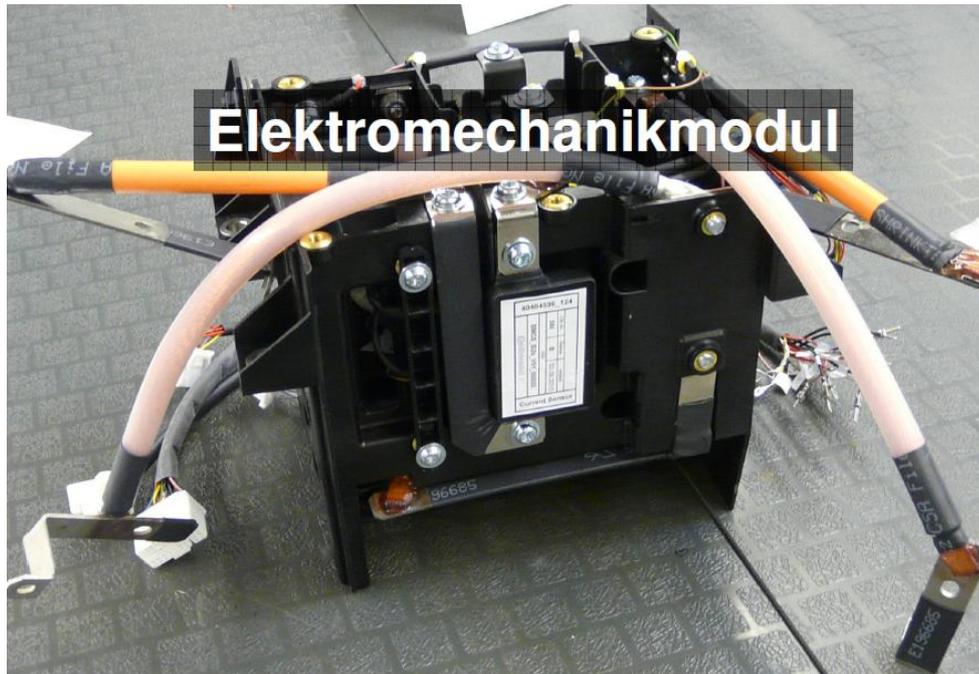


Abbildung 91: Elektromechanikmodul des BF2-Demonstrators

Definition von Ladegeräten mit Kommunikationsschnittstelle

Um HV-Batterien außerhalb des Fahrzeugs nachladen zu können, musste ein auf dem Markt befindliches Ladegerät mit dem passenden Spannungsbereich, Ladestrategien und einer frei programmierbaren CAN-Schnittstelle gefunden werden. Über eine mitgelieferte PC-Software sollten die Betriebsart und die Kennlinie einfach anzupassen sein. Hierzu wurden die Anforderungen an das Ladegerät sowie an den Demonstrator in einer Spezifikation definiert.

Es wurde ein Ladegerät der Firma BRUSA Elektronik AG bezogen. Mit diesem Gerät werden nahezu alle Anforderungen erfüllt. Lediglich die bereits fest definierten Telegramminhalte konnten im Ladegerät nicht angepasst werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, entweder eine spezielle Anpassung im Ladegerät vorzunehmen, oder einen zusätzlichen Teilnehmer als CAN-Master (z.B. ZF-Diagnosetool) zu verwenden. Diese Arbeiten werden in der Weiterentwicklung nach Abschluss des Förderprojekts durchgeführt. Der Aufbau einer ersten Ladestation wurde bereits gestartet.

Diagnosesystem

Zum Erreichen der Systemkompetenz im Service ist eine geführte Diagnose im ZF-Diagnosetool „TestMan“ notwendig, mit dessen Anweisungen die Anwender gezielt zur fehlerhaften Hybridkomponente geführt werden, und sämtliche notwendige Arbeiten an Komponenten und Fahrzeug ausführen können. Als Kommunikationsschnittstelle dient der CAN-Bus mit dem Diagnoseprotokoll UDS (unified diagnostic services).

Das Diagnosekonzept sieht eine Zentraldiagnose über das Hybridsteuergerät sowie den direkten Zugriff auf die jeweilige Hybridkomponente im Expertenmode vor. Die Diagnoseanforderungen wurden in folgende vier Themenpunkte aufgliedert: Batteriestatusanzeige und Identifikation, Softwareupdate und Kompatibilität, Fehlermeldungen, Fehlerbäume und Fehlerbehebung sowie Reparatur und Inbetriebnahme.

Die Statusanzeige greift direkt über den CAN-Bus auf alle notwendigen Daten zu. Werden zusätzliche Informationen gewünscht, können Daten auch angefordert werden. Um die Komponente eindeutig identifizieren zu können, wurde ein Identblock für alle Komponenten definiert. Um die Kompatibilität der Komponenten untereinander beim Austausch (HW/SW) sicherzustellen, wurde ein Abfragemechanismus (Kompatibilitätsindex) eingeführt und implementiert. Jede Fehlermeldung im Hybridsystem ruft im Diagnosetool den betreffenden Fehlerbaum auf, mit dem der Anwender exakt zu Fehlerfindung und Fehlerbehebung geführt wird. Der Tausch von einzelnen Bauteilen sowie die zugehörigen Softwaremechanismen werden in der Weiterentwicklung nach Abschluss des Förderprojekts implementiert.

Erarbeitung eines Rücknahme- und Entsorgungskonzepts

Am 1. Dezember 2009 trat in Deutschland das neue Batteriegesetz in Kraft, welches unter anderem das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien regelt. Vom Hersteller von Batterien wird vor dem Markteintritt ein Rücknahme- und Entsorgungskonzept gefordert, welches beim Bundesumweltamt vorgelegt werden muss. Die rechtliche Situation zum Batteriegesetz, welche Rolle (Hersteller oder Vertreiber) nimmt der jeweilige Verbundpartner ein und deren Auswirkungen auf den Konzern mussten mit der Rechtsabteilung geklärt werden.

Um die Fragen zu Logistik und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zu klären, wurde ein regelmäßiger Workshop zwischen den Verbundpartnern ZF und Continental eingerichtet. Folgende Themenschwerpunkte wurden besprochen und abgehandelt: Gefahrgutbeförderung auf Straße, Schiene, See und Zivilluftfahrt, Gefahrgutverpackungen für Prototypen und Serienbatterien, Lagerung, Rücknahme und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien.

Im Laufe des Workshops stellte sich schnell heraus, dass fachkundiges Wissen zu den Bereichen nicht, oder nur sehr gering vorhanden war und erst erarbeitet werden musste. So wurde gemeinsam mit dem Verbundpartner Continental und den Gefahrgutbeauftragten von ZF die rechtliche Situation geklärt und ein Leitfadens für die Gefahrgutbeförderung / Verpackung erstellt.

Seit Januar 2011 ist es möglich, Lithium-Ionen-Batterien, welche nach dem UN-Prüfhandbuch Teil III, Unterabschnitt 38.3 geprüfte Lithium-Ionen-Zellen beinhalten, per Luftfracht mit der Ausnahmegenehmigung A88 des Luftfahrtbundesamtes zu befördern. Für den Versand von defekten Lithium-Ionen-Batterien besteht noch keine gesetzliche Regelung / Verordnung. Eine Abstimmung mit der Bundesanstalt für Materialforschung erfolgt nach Abschluss des Förderprojekts.

5.2 **NKW Speichersystem: Produktionstechnik**

Die Hauptzielsetzung von Arbeitspaket 2 lag in der Entwicklung geeigneter Produktionsverfahren sowie im Aufbau von Verfahrensprüfständen.

5.2.1 Montagekonzept Bi-Pack

Ein effizienter NKW-Energiespeicher erfordert ein klares Konzept, ein überzeugendes Design und die Erprobung der Verfahrensabläufe zur Montage der Bi-Pack Baugruppen für die Li-Ionen Batteriezellen. Zur Realisierung ist die Entwicklung mehrerer Schlüsseltechnologien z.B. Oberflächen- & Verbindungstechnologien erforderlich und in ein konsistentes Gesamtsystem zu integrieren. Ziel war es daher, alle Komponenten zu integrieren und in einem Demonstrationsaufbau zur Fertigung bzgl. der Taktzeit in einem vollautomatischen Fertigungsablauf zu erproben. Ferner

sollte der Nachweis einer hohen Prozesssicherheit des entwickelten Ver-
fahrensablaufes erbracht werden.

5.2.1.1 Ausarbeitung, Bewertung und Vergleich von Montagekonzepten für Bi-Pack-Zellverbunde

Bei der Betrachtung von Montageverfahren zur Erstellung von Bi-Pack
Zellverbunden wurden, wie in Abbildung 92 dargestellt, drei Grundprinzi-
pien der Verbindungstechnik unterschieden. Die Aufschlüsselung der
Unterpfade repräsentiert Beispiele für die jeweiligen Kategorien.

Zur Bewertung der Verfahren gegeneinander wurden die Anforderungen
an die Verbindung sowie an das Bi-Pack herangezogen und gewichtet.
Zur Vereinfachung der Darstellung wurden vorab Verfahren, welche die
Oberfläche oder das Bauteil einem Risiko aussetzen, wie etwa Schwei-
ßen, nicht weiter in die einzelnen Unterverfahren unterteilt.

Nach der durchgeführten Bewertung der Verbindungen stellte sich heraus,
dass gerade das Kleben als Verfahren Vorteile gegenüber anderen Ver-
fahren besitzt. Als Beispiel hierfür lassen sich folgende Punkte anführen:
gute HV-Sicherheit bei Verwendung von Klebeband (gleichmäßige
Schichtstärke), gute Wärmeabfuhr (vollflächige Anbindungsfläche), ferner
gute Festigkeiten durch Einleitung der Kraft über die gesamte Fläche.

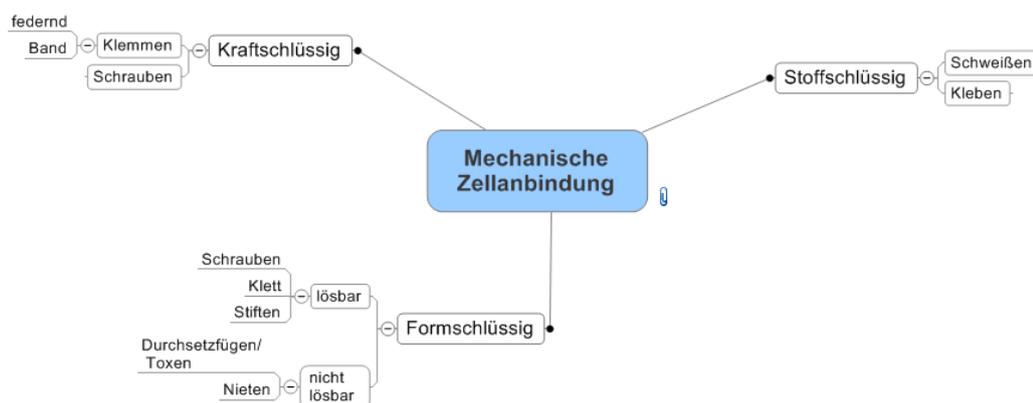


Abbildung 92: Montagekonzepte für Bi-Pack Zellverbunde

In der weiteren Betrachtung von Klebverbindungen zur Fertigung eines Bi-
Packs hatte die Verwendung von Klebeband unter anderem folgende Vor-
teile: Geringe Verschmutzung im Prozess, keine Tropfzeit⁵¹ im eigent-
lichen Sinne, gute Positioniermöglichkeit, weiterhin keine Beeinträchtigung

⁵¹ Tropfzeit: Verarbeitungsdauer von Klebstoff

der Fördereinheit bei Maschinenstillstand. Daher wurde der Klebprozess mittels Klebeband ausgewählt und umgesetzt.

Hierzu wurden vom Verbundpartner ads-tec umfangreiche Analysen mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

- Nach Abschluss der Spezifikation der Bi-Pack-Fertigung wurden mit verschiedenen Klebstoffen Versuche durchgeführt. Für die verschiedenen Klebeverfahren wurden Anlagenkonzepte für eine vollautomatische Produktion projektiert. Auf Basis der Versuchsergebnisse und Analysen der Konstruktion wurden die Klebstoffe und Verfahren bewertet.
- Als Klebeverfahren wird empfohlen, Transferfilm von einem Liner auf die Kühlbleche aufzutragen und die Zellen anzudrücken. Der Klebstoff mit der besten Bewertung ist der Haftklebstoff CP 792 der Firma Biolink. Er wird als Transferfilm und -band unter der Bezeichnung "Translink 130r" bzw. "Unilink" angeboten. Für dieses Verfahren wurde ein halbautomatischer Prozessprüfstand konstruiert. Mit ihm kann außer dem empfohlenen Klebefilm ein breites Spektrum anderer Bänder/Filme verarbeitet werden.
- Mit diesem Prozessprüfstand konnte im Rahmen von FUEL die Prozessfähigkeit des Klebens per Klebefilm von der Rolle nachgewiesen und weiter verbessert werden.

Spezifikationen

Zur Auswahl der Klebstoffe und Ihrer späteren Bewertung wurden die zu klebenden Substrate bestimmt und charakterisiert. Zusätzlich wurden die Anforderungen an das Verfahren zur Bi-Pack-Fertigung gesammelt (vgl. Tabelle 6).

Bestimmung der zu klebenden Folie

Die Eignung möglicher Klebeverfahren wird bestimmt durch die Betriebsbeanspruchung, die Art und Oberflächenbeschaffenheit der zu klebenden Materialien, sowie weitere Anforderungen an die Klebung. Da der Hersteller der Batteriezellen anfangs keine zuverlässigen Aussagen über die Beschaffenheit der Außenfolie machen konnte, wurden eigene Untersuchungen bei ads-tec an den vom Projektpartner Continental zur Verfügung gestellten Dummy-Zellen durchgeführt.

Anforderung	Beschreibung
Geringer Anpressdruck	Maximale Kraft auf die Zelle: 4N/cm ²
Auflagefläche der Zelle	Ca. 110*140 mm ²
Daraus ergibt sich maximale Anpresskraft	< 616 N
ads-tec empfiehlt die Anpresskraft so niedrig wie möglich zu halten.	
HV Durchschlagfestigkeit	4 kV
Niedrige Wärmeeinbringung beim Kleben	< 65°C sonst Beschädigung oder beschleunigte Alterung der Zelle
Betriebstemperatur	-40°C bis 70°C
Thermische Beständigkeit der Klebung	-40°C bis 100°C
Lebensdauer	10 Jahre
Belastung der Klebung der Bi-Packs im Speicher	Entsprechend: ISO 16750-3, 4.1.2.7 Test VII + table 12 (6g in alle Richtungen) ISO 16750-3, 4.2 +4.2.2 (Einmalschock 25g) ISO 16750-3, 4.3 ISO 16750-4
Gute Feuchtigkeitsbeständigkeit	
Hohe Rollenschälfestigkeit	
Hohe Zugscherfestigkeit	
Geringe Schichtdicke	< 100 µm
Prozessfähigkeit	
Gute Adhäsion auf PET und Al	
Kurze Aktivierungsdauer	Rechenbeispiel: Bei 2 min Aktivierung und 20 sec Taktzeit: 12 Zellen im Zwischenspeicher -> 12 zusätzliche Werkstückträger
Kurze <u>Abbindedauer</u>	Rechenbeispiel: Bei 2 min Abbinden und 20 sec Taktzeit: 6 Bi-Packs im Zwischenspeicher -> 6 zusätzliche Werkstückträger
Kein Abbinden ohne Klebung auf der Zelle bei Maschinenstopp	Sonst bei Not-Aus eine oder zwei Zellen zerstört, Kosten jeweils 100 €
Niedrige Kosten Klebstoff	
Möglichst keine flüchtigen Lösungsmittel	
Gute Automatisierbarkeit	

Tabelle 6: Bewertungskriterien Klebverfahren

Dazu wurden mit Hilfe der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) und der dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK) die Materialien und Schmelzpunkte der verschiedenen Schichten der Außenfolie bestimmt. Über Goniometer-Versuche wurde außerdem die Oberflächenenergie der Außenfolie gemessen. Die Untersuchungen wurden an den Folien von Dummy-Zellen mit verschiedenen Entwicklungsständen vorge-

nommen. Abbildung 93 zeigt exemplarisch die FTIR Charakterisierung der äußeren Schicht der Batteriefolie.

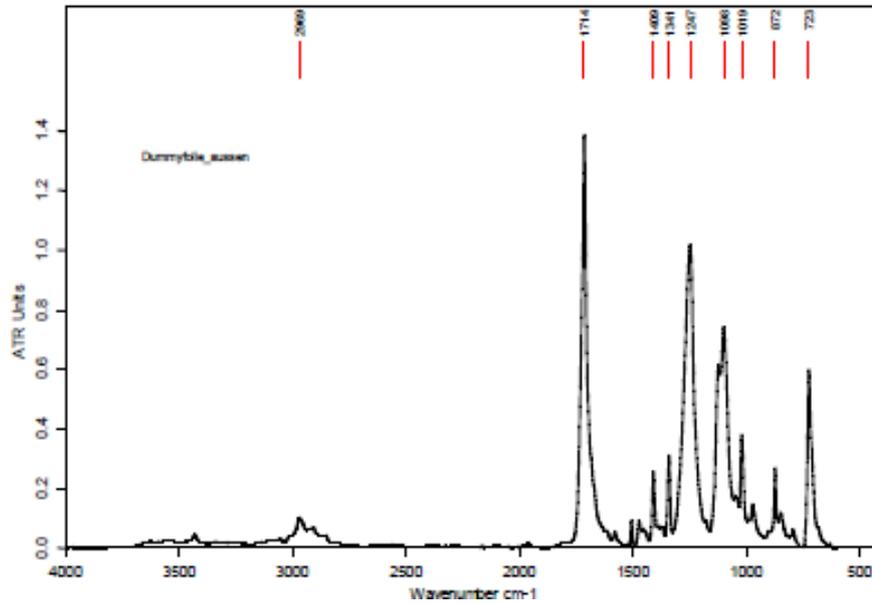


Abbildung 93: FTIR Charakterisierung der Zellfolie

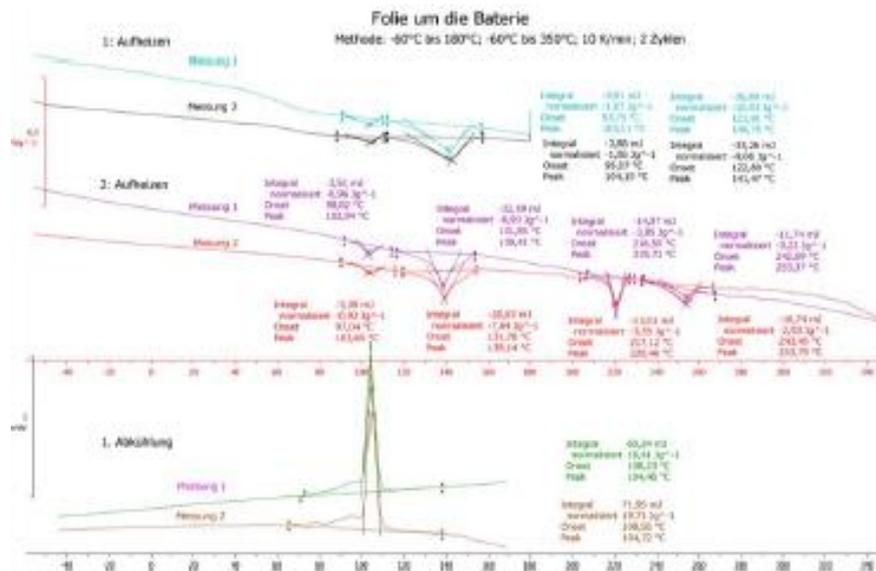


Abbildung 94: Ergebnisse DDK der Zellfolie

Abbildung 94 zeigt die Ergebnisse der DDK-Untersuchungen der Zellfolie. Die einzelnen Schmelzpeaks lassen sich dabei den verschiedenen, im Folienverbund verwendeten Materialien zuordnen.

Untersuchung der Klebstoffe

Aufgrund der Ergebnisse konnten verschiedene Klebstoffe für den Bi-Pack-Verbund ausgewählt, getestet und verglichen werden. Folgende Klebstoffe wurden bewertet: 3M 966 (Acrylat), Technicoll 8204 (Cyanacrylat), Duplocoll VP 20745 (Latent reaktive PU-Folie), Biolink CP 792 (UV-Acrylat, viskos), Collano N1 169 (UV-Acrylat, viskos), Weicon RK 1500 (2 K No-Mix), Panacol Penloc GZ 107A (2 K No-Mix), ifs R9SL (UV-Kautschuck), Technicoll 9221 (Dispersion, Haftklebstoff) sowie 3M Scotchweld 30 (Dispersion, Kontaktklebstoff).

Folgende Versuche wurden mit den Proben durchgeführt: Ermittlung der Zugscherfestigkeit, Ermittlung der Rollenschälfestigkeit und Ermittlung der SAFT (shear adhesion failure temperature, dies ist die Versagenstemperatur der Scherhaftkraft). Als Benchmark diente der vom Projektpartner Continental vorgeschlagene Transferfilm 966 der Firma 3M. Die Versuchsergebnisse sind in den folgenden Grafiken dargestellt (Abbildung 95 – Abbildung 97).

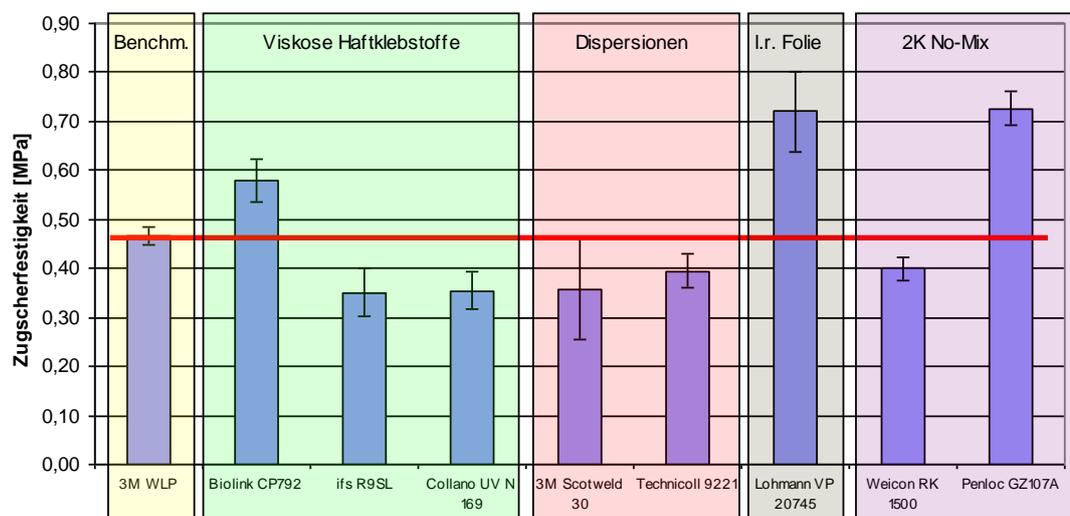


Abbildung 95: Vergleich der Zugscherfestigkeiten (ads-tec /IFS)

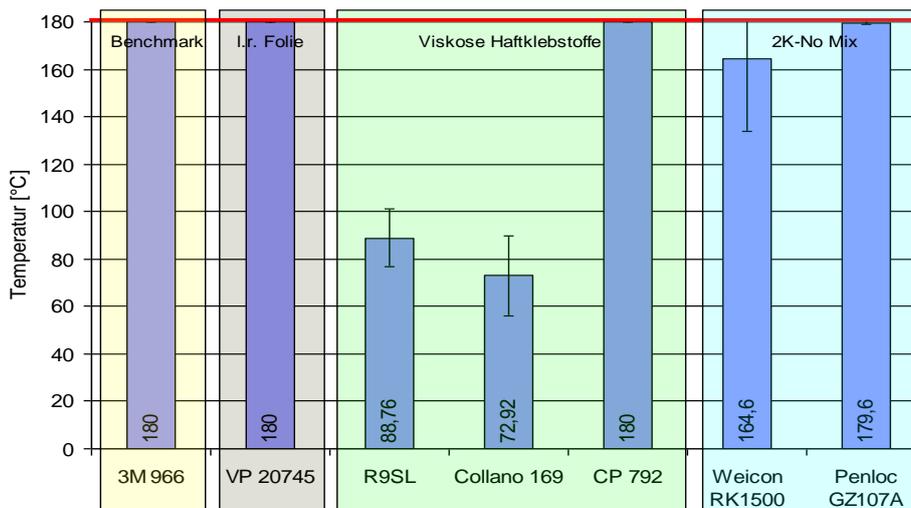


Abbildung 96: Vergleich der Versagenstemperaturen (ads-tec /IFS)

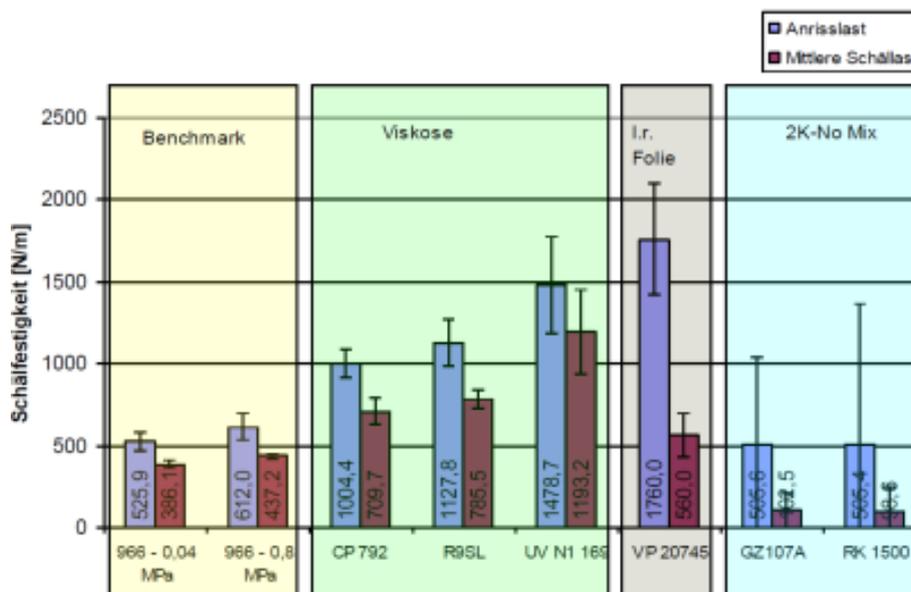


Abbildung 97: Vergleich der Schälfestigkeiten (ads-tec /IFS)

Anlagenkonzepte

Es wurde überprüft, wie gut sich die verschiedenen Verfahren für eine automatische Anlage zur Bi-Pack-Fertigung eignen. Dafür wurden für jedes Klebverfahren mehrere Konzepte für Anlagen zur Bi-Pack-Fertigung erstellt. Dabei wurden folgende Stationen berücksichtigt: Zulaufband für Blister mit Zellen, Vereinzelung der Blister und Zellen, Wareneingangskontrolle mit optischer und elektrischer Vermessung der Zellen, Ausrichten der Zellen für Klebevorgang, Aufbringung von Klebstoff auf Zellen und / oder Kühlbleche, ggf. aktivieren des Klebstoffs, Fügen von Kühlblechen und Zellen, Übergabe der Bi-Packs an nachgeschaltete Anlagen.

Für diese Konzepte wurden Ablaufdiagramme und Taktzeitanalysen erstellt. Wegen der Gefahren (Kurzschluss, Brand, Austreten flüchtiger und flüssiger giftiger Stoffe), die sich aus unsachgemäßem Handling der Zellen ergeben, wurden möglichst automatisierte Lösungen bevorzugt. Diese verhindern, dass sich der Bediener selbst in Gefahr bringt. In Abbildung 98 sind verschiedene Details eines Anlagenkonzepts zur Bi-Pack Fertigung zu sehen. Abbildung 99 zeigt den Rundtaktisch mit Bandklebeautomat im Detail.

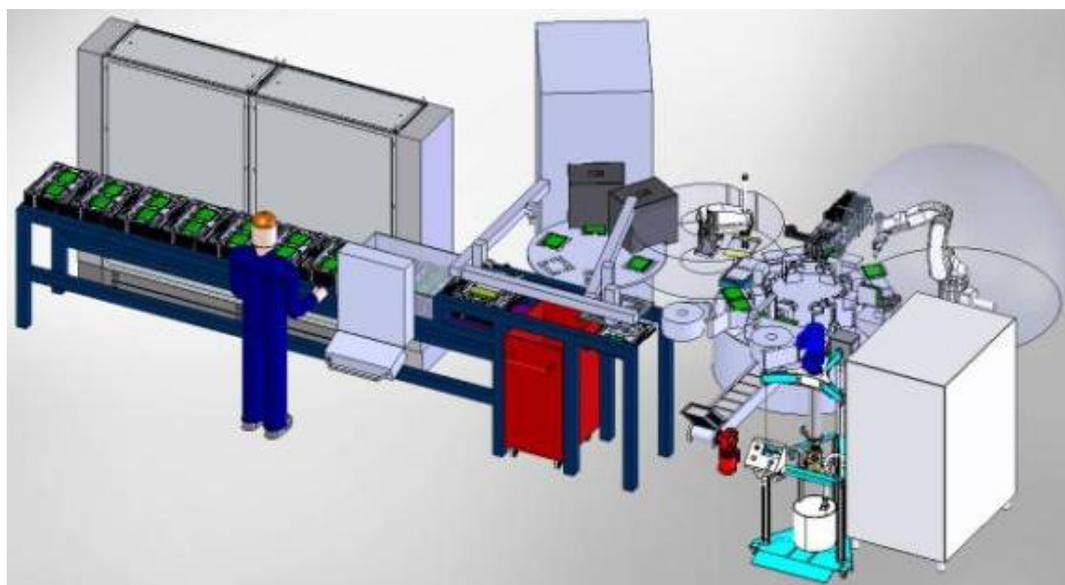


Abbildung 98: Anlagenkonzept zur Bi-Pack Fertigung

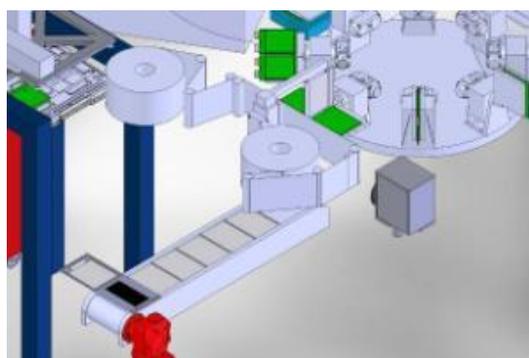


Abbildung 99: Detail Rundtaktisch mit Bandklebeautomat

Bewertung der Klebeverfahren

Auf Basis der Versuchsergebnisse und der Anlagenkonzepte wurden Klebstoffe und Klebeverfahren bewertet. Dazu wurden die wichtigsten Spezifikationen herangezogen und gewichtet. Für die Bi-Pack-Fertigung

sind Acrylat-Klebstoffe geeignet. Diese können entweder als Klebefilm oder -band aufgebracht werden oder flüssig, was allerdings eine UV-Vernetzung erfordert. Für den speziellen Anwendungsfall der Bi-Pack-Fertigung ist das Aufbringen des Klebstoffs als (bereits vernetzter) Klebefilm am besten geeignet. Solche Klebefilme sind in verschiedenen Dicken erhältlich. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Klebstoffherstellern wurde eine optimale Schichtdicke für die Verklebung ermittelt. Diese Auswahl wurde anhand der Versuchsergebnisse auf Plausibilität überprüft. Über Berechnung der Temperaturgradienten wurde die Funktionserfüllung der Wärmeleitung für diese Klebstoffdicke überprüft. Beide Prüfungen fielen positiv aus.

Als Folge der durchgeführten Untersuchungen und Versuche empfahl adstec dem Projektpartner Continental, statt des bisher verwendeten Klebefilms „966“ (Fa. 3M) den Klebefilm „translink 130r“ (Fa. Biolink) zu verwenden.

5.2.1.2 Definition des Bi-Pack-Fügeprozesses

Zur Definition des Fügeprozesses wurde im ersten Schritt ein Flow Chart erstellt, welches die grundlegenden Prozessschritte darstellt. Ein Beispiel hierfür ist auszugsweise in Abbildung 100 skizziert. In Ergänzung mit einer daraufhin durchgeführten P-FMEA wurden alle Risiken, die während des Fügeprozesses auftreten können, betrachtet und Abstellmaßnahmen definiert. Die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes zur Isolation der Zellableiter ist nur ein Beispiel. Nach der intern aufgestellten Anforderung der doppelten Sicherheit wird an jeder Zelle ein Ableiter isoliert. Hierdurch ergibt sich im Fügeprozess und in den darauffolgenden Schritten (Händeln, Stacken, etc.), dass jedes Bi-Pack auch bei Verlust eines Isolationselementes noch keinen internen Kurzschluss verursachen kann.

Nach Erstellung des Ablaufes wurde ergänzend eine U&W (Ursache und Wirkung) Matrix erstellt, um die kritischen Prozesse zu definieren und gezielt die anspruchsvollen Prozessschritte zu bearbeiten.

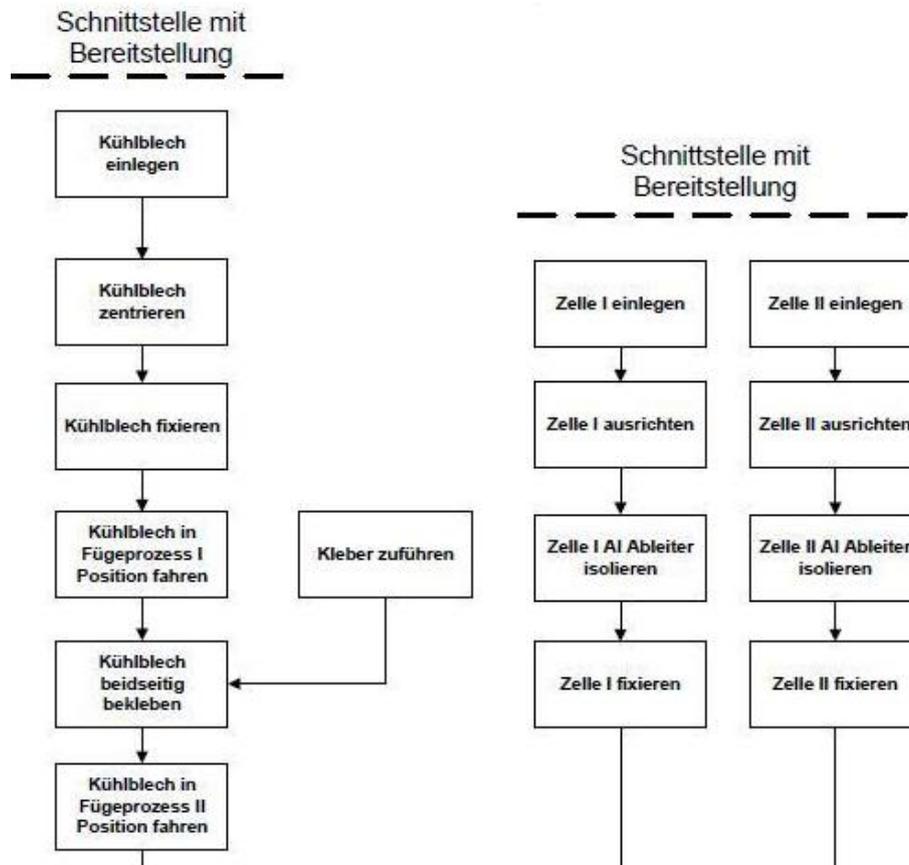


Abbildung 100: Auszug aus dem Flow Chart zum Prozess Bi-Pack fügen – Abfolge der Bi-Pack Montage im Projekt FUEL

Fertigungsparameter

Die generellen Anforderungen des Kleberherstellers an den Fügeprozess im Bezug auf die optimale Klebfestigkeit mit den Größen Anpresszeit und Anpressdauer können nur bei der ersten Klebung (Klebstoff auf Kühlblech) realisiert werden. Die empfohlenen 20N/cm² Anpresskraft kann die Soft-Pack Zelle nicht aufnehmen. Um dennoch eine den Anforderungen gerechte Verklebung zu realisieren, wurden Versuche zu den definierten Einflussgrößen - im besonderen auf die Prozessparameter in Abbildung 101 - durchgeführt und ihr Einfluss auf die Scherfestigkeit untersucht.

Hierbei war der Einfluss der Prozessparameter nicht in dem vorher erwarteten Maß aufgetreten. Die Variation der Parameter in den für die Zelle ertragbaren Grenzen (wie beispielhaft in Abbildung 102 dargestellt) ergab keine eindeutige Korrelation. Daher wurde für den Prozess zur Absicherung der Klebeverbindung 80% der zulässigen Anpresskraft (auf die Zelle) sowie eine Pressdauer von 10s gewählt.



Abbildung 101: Einflussgrößen auf die Klebeverbindung

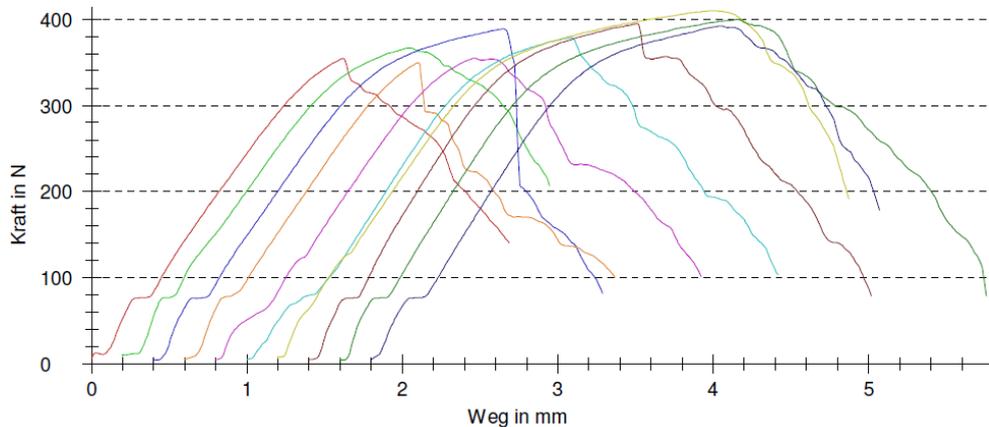


Abbildung 102: Beispiel für eine DOE zur Ermittlung des Prozessparametereinflusses

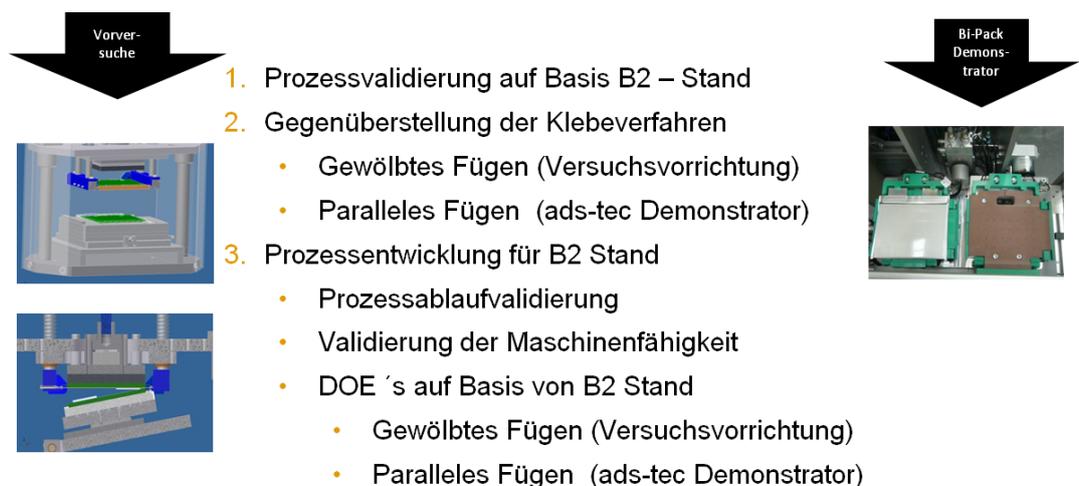


Abbildung 103: Zur Verifikation der Bi-Pack Montage

Um Verunreinigung durch Luft zu vermeiden, wurden Versuche mittels einer Fügevorrichtung durchgeführt (Abbildung 103). Hierbei wurde das Aufbringen der Soft-Pack Zelle parallel, schräg oder ballig betrachtet. Aufgrund der geringen Erfahrung des Lieferanten als auch seitens Continental in Bezug auf eine Schädigung durch ein Wölben der Zelle wurde das ballige Fügen nicht weiter verfolgt. Im Prozess wird parallel gefügt.

Reinigungsverfahren

Bei der Betrachtung von Reinigungsverfahren wurde sich primär nur auf Verfahren für das Kühlblech beschränkt, da die Zelle an sich keine Freigabe zur Reinigung besitzt. Generell wurden alle Fügebauteile mit folgenden Anforderungen deklariert: frei von Fett, Öl, Span, Grad und Kratzer.

In Zusammenarbeit mit dem Kleberhersteller wurden die ermittelten Rauheitswerte (R_z : 2,5 μm) sowie die Ausbildung von aufgetragenen Tropfen als Indikator der Oberflächenspannung als geeignet ermittelt. Im Prozess soll das Kühlblech bereits Isopropanol gespült angeliefert werden, um die Installation einer Waschanlage zu vermeiden.

Ein Tauchbad, wie es für das Kühlblech möglich ist, kann durch die offenen Kanten der Siegelnähte nicht umgesetzt werden. Für die Reinigung der Soft-Pack Zelle müssen Anlagen konstruiert werden, welche durch eine bestimmte Wischtechnik nur die Oberfläche des Zellkerns reinigen. Als Ansatz sind Konzepte denkbar, wie etwa das Verwenden von Polierscheiben, welche das Reinigungsmittel aufnehmen.

5.2.1.3 Entwurf, Konstruktion & Aufbau eines halbautomatischen Fertigungsablaufs „Bi-Pack Montage“

Der erste Entwurf für einen halbautomatischen Fertigungsablauf zur Bi-Pack Montage ist in Abbildung 104 zu sehen. Er diente zur Verdeutlichung des Ablaufs im Gespräch mit dem Verbundpartner ads-tec, welcher die Konstruktion sowie den Aufbau in diesem Projekt übernahm. Zur vereinfachten Kommunikation wurde ein Lastenheft erstellt, in dem alle wesentlichen Punkte zum Prozess, den Bauteilen sowie den Rahmenbedingungen enthalten sind.

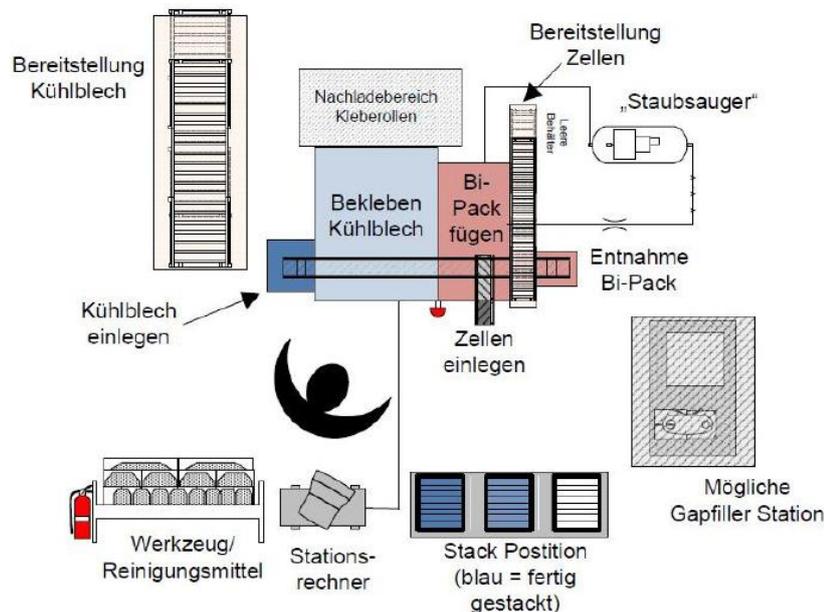


Abbildung 104: Beispielhaftes Layout für den Prozess Bi-Pack Montage

Konstruktion des Prozessprüfstands durch ads-tec

Mit Hilfe der Konzepte für Gesamtanlagen konnten die kritischen Prozesse zur Bi-Pack-Fertigung identifiziert werden. Diese sind das Ausrichten der Zellen, das Auftragen von Klebefilm auf die Kühlbleche, das Handling von Restliner, die blasenfreie Herstellung des Kontakts sowie das Pressen der Bi-Packs.

Das Ausrichten der Zellen muss auf verschiedene funktionale Anforderungen abgestimmt werden. Diese können sich abhängig vom Batteriedesign ändern. Am flexibelsten sind Lösungen mit optischer Lagererkennung. Diese sind aber aufgrund ihres hohen Kostenaufwands (es werden Kamera und Mehrachsroboter benötigt) nicht praktikabel. ads-tec hat ein Modell für einen Greifer mit integrierter mechanischer Ausrichtung gebaut. Dieser kann Zellen aus Blistern vereinzeln und gleichzeitig ausrichten. Der Prozessprüfstand verfügt deshalb über ein mechanisches Ausrichtkonzept.

Die Schwierigkeit beim Aufbringen von Klebefilm ist das Handling. Bei Vorserienfertigung werden einzelne Klebstreifen von Hand aufgebracht und die Abdeckung abgezogen. Wegen des aufwändigen Handlings der Klebestreifen und der Abfallstücke ist so ein Verfahren für eine automatische Fertigung nicht praktikabel. ads-tec hat einen Klebeautomat entwickelt, der Klebstoffzuschnitte auf die Kühlbleche aufbringt. Auf einer

Rolle Liner befinden sich dabei mehrere hundert Klebstoffzuschnitte. Der Liner mit den Klebstoffstücken kann von der Rolle abgewickelt werden. Der Abfall kann auf einer zweiten Rolle aufgewickelt werden. Dabei wird auch die Oberkante des Kühlblechs beklebt. Das verbessert die HV-Sicherheit der Batterie.

Lithium-Ionen-Zellen sind druckempfindlich. Das Andrücken der Zellen an ein Kühlblech kann ihre Qualität verringern. Werden beide Zellen einzeln ans Kühlblech gedrückt, wird dabei eine der beiden Zellen zweimal gedrückt, was zu unterschiedlicher Zell-Alterung im Bi-Pack führen kann. ads-tec hat ein Konzept entwickelt, bei dem beide Zellen blasenfrei auf das Kühlblech gelegt und danach gemeinsam gepresst werden.

Neben der Konstruktion des Prozessprüfstands wurden die Elektroplanung und Erstellung eines Programms zur Steuerung durchgeführt. Der Prüfstand wird durch eine Soft-SPS der Firma Beckhoff angesteuert. Diese läuft auf einem ads-tec Industrie-PC. Im Rahmen der Elektroplanung wurde der Prüfstand mit zahlreichen Sensoren zur Prozessüberwachung ausgestattet. Dabei wurden auch Anregungen des Projektpartners Continental aufgenommen, der im Musterbau bereits Erfahrungen in der Bi-Pack-Fertigung sammeln konnte.

Im Rahmen der Konstruktion wurden eine FMEA und eine Gefahrenanalyse für den Prozessprüfstand durchgeführt. Der Prüfstand ist in der folgenden Abbildung 105 veranschaulicht.

Bau des Prozessprüfstands

Nach erfolgreichem Abschluss der Konstruktion wurde ein Prozessprüfstand aufgebaut und in Betrieb genommen. Anschließend wurden Versuchsreihen durchgeführt.

Zusammenfassendes Ergebnis der Versuchsreihen

Das Verfahren wurde detailliert und über einzelne Prinzipversuche abgesichert. Die erprobten Prinzipverfahren zeigen, dass der prinzipielle Einsatz als Fertigungsverfahren in der Herstellung von Bi-Packs möglich und sinnvoll ist. Ebenso zeigt sich jedoch, dass zur Erreichung der Prozessfähigkeit noch weitere konstruktive Umfänge umgesetzt werden und Detaillösungen überarbeitet werden müssen.

Eine Aussage zur Langzeitstabilität der einzelnen konstruktiven Umsetzungen kann nach den bisher gewonnenen Ergebnissen noch nicht getroffen werden. Die aus der Auswertung der Versuchsreihen resultierenden Verbesserungsansätze fließen in die weitere die Optimierung und Validierung (Arbeitspaket 3) ein.



Abbildung 105: CAD-Modell Prozessprüfstand Kleben

5.2.2 Zellkontaktierungskonzept

Um die Zellen im Rahmen einer industriellen Fertigung zusammenzufügen waren zunächst die notwendigen Fügeverfahren für die Zellableiter zu definieren und zu bewerten. Mögliche Alternativen zum Ultraschallschweißen waren auszuarbeiten und auf die Einsetzbarkeit bei einer Li-Ionen Batteriezelle zu überprüfen, um zu einer belastbaren Lösung zu gelangen. Anschließend sollte die am besten geeignete Lösung in einem zu errichtenden Prüfstand evaluiert werden, um das entwickelte Verfahren bzgl. der Taktzeit eines möglichen vollautomatischen Fertigungsablaufes zu testen und den Nachweis einer hohen Prozesssicherheit zu erbringen.

Vorab ist zu erwähnen, dass bei der Validierung verschiedener Verbindungstechnologien viele Personen dazu beigetragen haben, um eine umfangreiche Datenmenge zu gewinnen. Die betrachteten Verbindungstechniken sind in folgendem Diagramm (Abbildung 106) zusammengefasst.

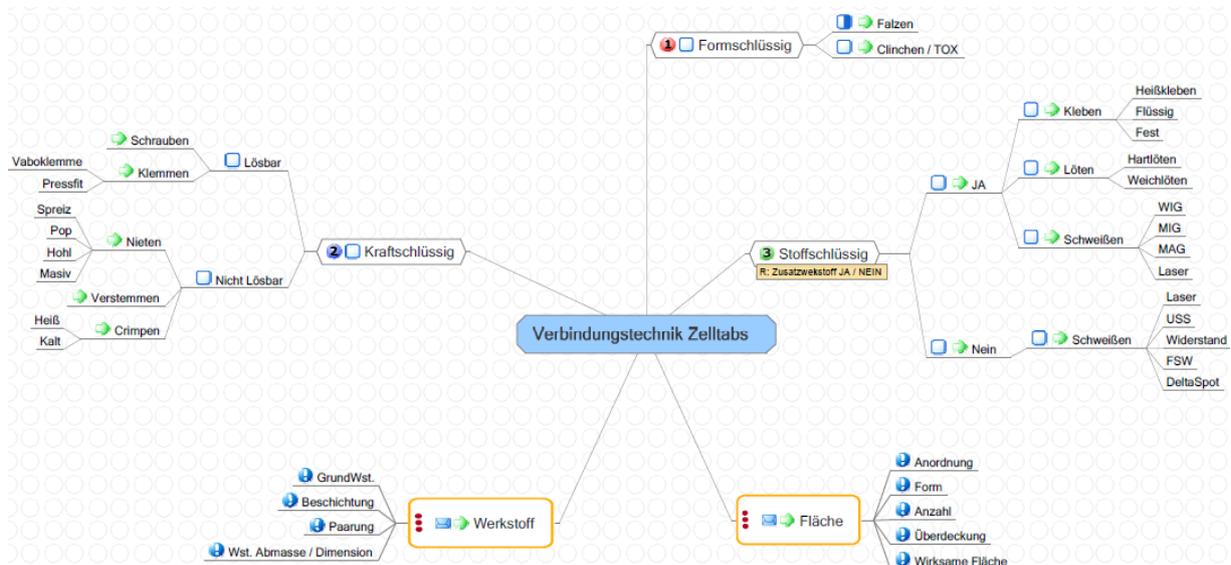


Abbildung 106: In FUEL betrachtete Verbindungstechniken für die Zelltabs

Die wichtigsten Anforderungen an die Verbindungsstelle, die durch die Verbindungstechnik zu erfüllen sind, sind eine hohe mechanische Festigkeit (statisch und dynamisch), niedriger Übergangswiderstand, hohe Stromtragfähigkeit, möglichst geringer Wärmeeinfluss sowie eine möglichst geringe mechanische Belastung der Zelle beim Fügen.

5.2.2.1 Analyse der Verbindungstechniken zur Ableiterkontaktierung

Nach Abschluss der Spezifikationen der Zellkontaktierung wurden durch den Verbundpartner ads-tec mit verschiedenen Verfahren Ableiterpaare gefügt. Mit den Ableiterpaaren wurden Versuche durchgeführt. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurden die Zellkontaktierungsverfahren bewertet. Zusammengefasst lieferte dies das folgende Ergebnis:

- Als Zellkontaktierungsverfahren wird das Ultraschall-Rollnaht-Schweißen empfohlen.
- Für dieses Verfahren wurde ein halbautomatischer Prozessprüfstand konstruiert. Im Prüfstand kommt ein Schweißgerät der Firma Steckmann Ultrasonics zum Einsatz.
- Mit dem Prozessprüfstand konnte die Prozessfähigkeit des zur Zellkontaktierung neuen Prozess des Ultraschall-Rollnahtschweißens nachgewiesen und verbessert werden.

Die einzelnen Arbeitsschritte werden nachfolgend näher beschrieben.

Spezifikation

Zur Auswahl der zu untersuchenden Zellkontaktierungsverfahren und Ihrer späteren Bewertung wurden zunächst die Anforderungen an die Verbindung der Ableitertabs und die Anforderungen an das Kontaktierungsverfahren gesammelt (vgl. Tabelle 7).

Anforderung	Beschreibung	Messgröße
Geringer elektrischer Widerstand	Durch die hohen zu erwartenden Ströme bewirkt ein zu hoher elektrischer Widerstand eine hohe lokale Einbringung thermischer Energie.	Widerstand in [$\mu\Omega$]
Gute mechanische Festigkeit	-	Zugfestigkeit in [N]
Gute Vibrationsfestigkeit	Damit die Ableiter nicht zum Schwingen neigen, soll möglichst wenig träge Masse in Form von Zusatzwerkstoff eingebracht werden.	Zusätzliche Masse in [Kg]
	Kerbwirkung kann die Festigkeit gegen schwingende Beanspruchung stark reduzieren. Es ist deshalb eine möglichst Spalt- und Riss-freie Verbindung zu bevorzugen.	Gute Anbindung im Schliffbild
Geringe Korrosionsneigung	Damit die Verbindung nicht zu Korrosion neigt, ist eine möglichst Spalt- und Riss-freie Anbindung zu bevorzugen.	Gute Anbindung im Schliffbild
Geringe Neigung zur Bildung von Hot-Spots	Eine ungleichmäßige Anbindung der Ableiter kann zu unregelmäßig verteilten Hot-Spots führen. Diese führen zu einer erhöhten thermischen Belastung der Verbindung.	Gute Anbindung im Schliffbild; Geringe Temperaturgradienten unter elektrischer Last [K/mm]
Geringe Neigung zum thermischen Durchgehen der Fügeverbindung	Treten hohe Temperaturen in der Verbindung auf (auch lokal begrenzt -> Hot-Spots), so führt das zur Verschlechterung oder sogar zum lokalen Versagen der Verbindung. Das wiederum vergrößert den Gesamtwiderstand und damit die Temperatur und kann so zum Versagen der kompletten Verbindung führen.	Versagens-Temperatur der Verbindung [$^{\circ}\text{C}$]
Anforderung	Beschreibung	Messgröße
Geringe Wärmeeinbringung	Beim Fügen darf die Temperatur an der Siegelnaht 80°C nicht überschreiten	[$^{\circ}\text{C}$] Unversehrtheit der Siegelolie
Gute Zugänglichkeit	Die Geometrie der Verbindung ist durch die Einbauposition im Batteriemodul gegeben. Der Bauraum für Werkzeuge ist stark eingeschränkt.	Werkzeuggröße L x B x H [mm ³]
Hohe Prozesssicherheit	Insbesondere bei nicht losbaren Verbindungen kann eine defekte Verbindung ein komplettes Batteriemodul zu Ausschuss machen.	Anteil der Ausschussteile [%]
Geringe Prozessdauer	Um eine Taktzeit von 20 sec einzuhalten muss in weniger 10 sec ein Verbindung geschweißt werden. Die verbleibende Zeit dient dem Beladen und Entladen des Schweiß-Apparats und dem Biegen und ggf. Spannen der Ableiter.	[sec]
Geringe Betriebskosten	Kosten Hilfsstoffe (Lote usw.) Kosten Betriebsmittel (Schutzgas usw. Energiebedarf)	[€/Zelle]
Geringe Investitionskosten	-	[€]
Geringes Gefährdungspotential des Verfahrens	z.B. Laser benötigen wegen hohen Gefährdungspotentials zusätzliche Schutzvorrichtungen	-

Tabelle 7: Anforderungen Zellkontaktierung

Untersuchte Schweißverfahren

In Kooperation mit dem IFS wurden Proben mit den verschiedenen Verfahren gefügt. Für die Schweißverfahren (US, Laser) hat ads-tec in Zusammenarbeit mit verschiedenen Herstellern selbst Proben beschafft, da dem IFS nicht alle nötigen Anlagen zur Verfügung standen. Mit folgenden Fügeverfahren wurden Proben erstellt:

- Formschlüssig
 - Clinchen
- Stoffschlüssig
 - Löten: Reflow, Laser, Thermoden
 - Laserschweißen: Gepulst, gepulst mit Pulsformung, gepulst mit Langpulsen (SHADOW), gepulst mit Zusatzwerkstoff und CW mit Faserlaser
 - Ultraschallschweißen: Rollnahtschweißen sowie lineares Schweißen

Versuche mit den Proben

Mit den gefügten Ableitern wurden in Kooperation mit dem IFS folgende Versuche durchgeführt: Zugversuche, Schliffbilder, Widerstandsmessungen und zusätzliche Einzelprüfungen.

a) Widerstandsmessungen

Für die Messung der extrem kleinen Widerstände der Ableiter-Paare steht dem IFS nicht das nötige Equipment zur Verfügung. ads-tec hat ein geeignetes Messgerät ausgewählt und beschafft. Nach dem Erarbeiten von Prüfstrategien zur Messfehler-Minimierung wurden die Messungen des Widerstands bei ads-tec durchgeführt. In Abbildung 107 ist eine Messung des Übergangswiderstands im $\mu\Omega$ Bereich über eine Kelvin-Schaltung dargestellt.

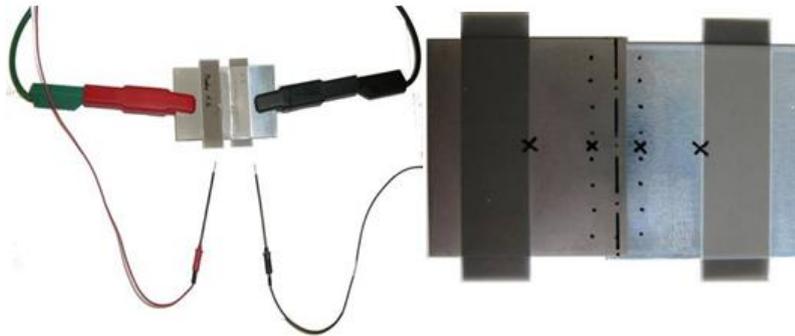


Abbildung 107: Widerstandsmessungen Schweißverbindung

b) Schliffbilder

Anhand der Schliffbilder kann überprüft werden, wie gut die Anbindung der Proben zueinander ist. Im Folgenden sind einige exemplarische Schliffbilder dargestellt für Clinchen (Abbildung 108), Laserlöten (Abbildung 109), Laserschweißen (Abbildung 110) und Ultraschallschweißen (Abbildung 111).

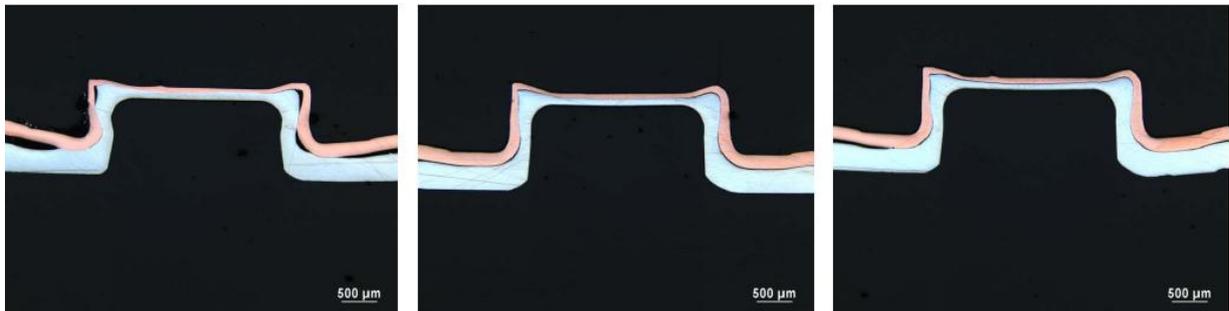


Abbildung 108: Schliffbild Clinchen (ads-tec /IFS)

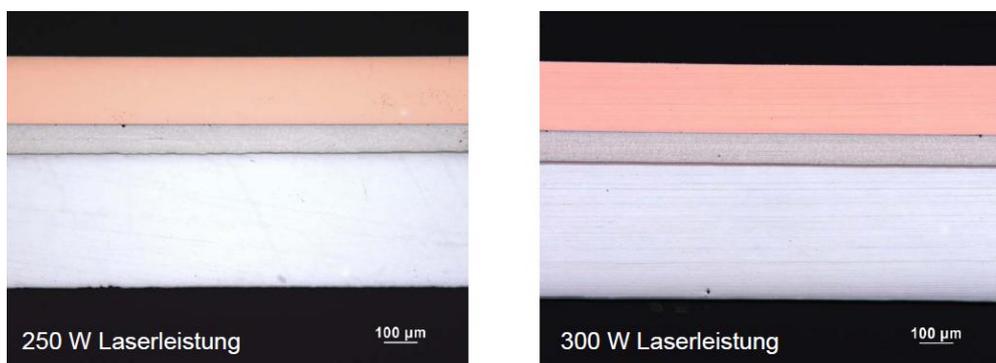


Abbildung 109: Schliffbilder Laserlöten (ads-tec /IFS)

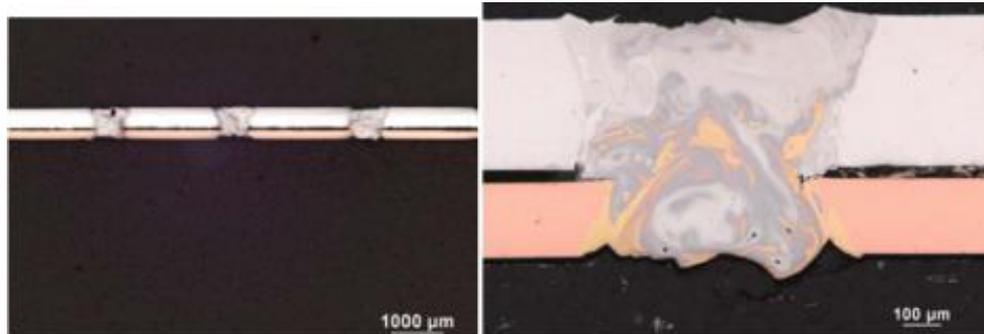


Abbildung 110: Schliffbild Laserschweißen

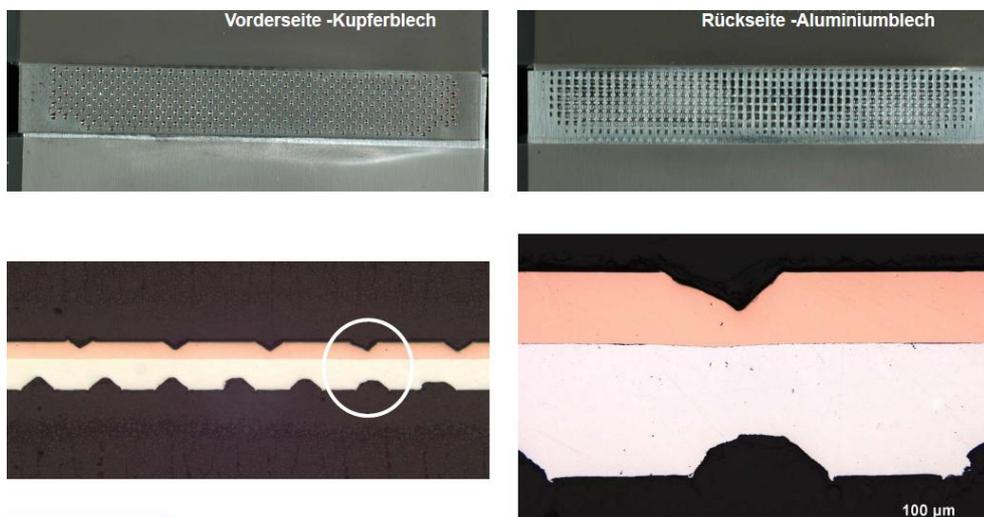


Abbildung 111: Schliffbild Ultraschallschweißen

c) Zugversuche

Mit Hilfe von Zugversuchen wurde die Festigkeit der Verbindungen ge-
prüft. Die Ergebnisse sind im Folgenden abgebildet.

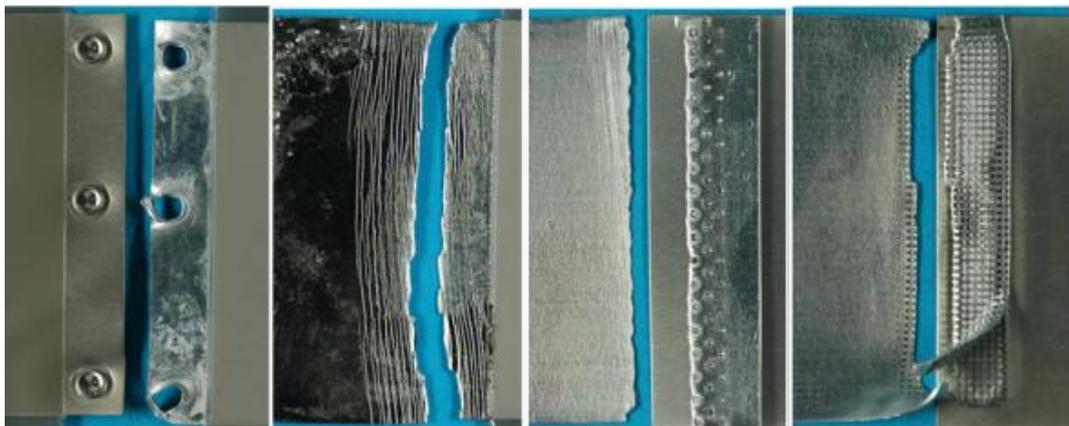


Abbildung 112: Bruchbilder Zugversuche (Clinchen, Lötens, Laserschweißen, Ultra-
schallschweißen)

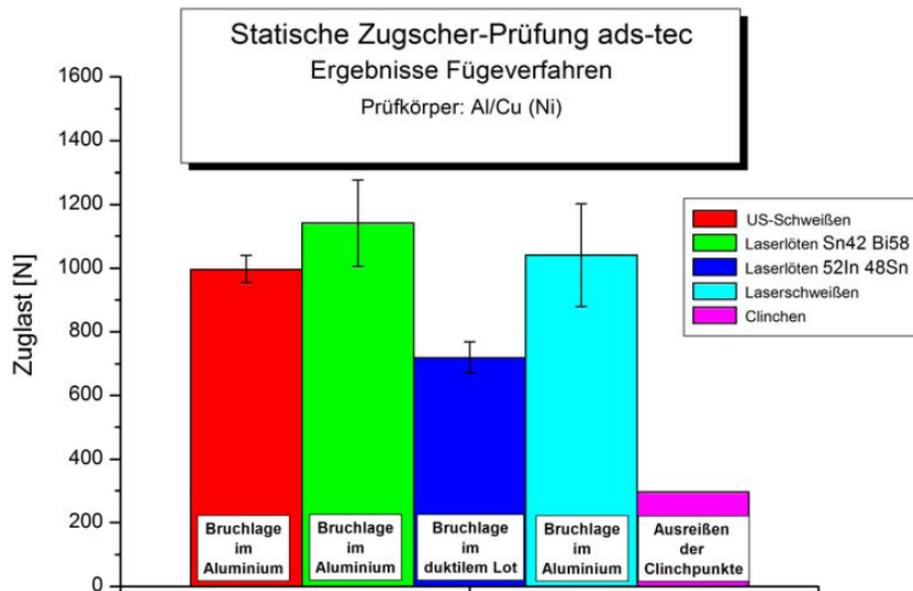


Abbildung 113: Vergleich der Zugfestigkeiten (ads-tec/IFS)

Für einzelne Verfahren wurden zusätzliche Messungen und Versuche durchgeführt (z.B. REM-Bild einer abgeschälten Probe nach Ultraschall-Schweißen, Mikrohärteprüfung bei Laserschweißen, Temperaturmessung beim Löten).

Beurteilung der Versuchsergebnisse

a) Clinchen

Die Widerstandsmessung ergab mit $\sim 135 \mu\Omega$ den schlechtesten Wert aller überprüfter Verfahren. Dies lässt sich auch mit dem Schliffbild der Probe erklären. Man erkennt, dass zwischen den geclinchten Stellen ein großer Spalt zwischen den Blechen besteht. Auch bei den Zugversuchen schneidet das Clinchen als Fügeverfahren am schlechtesten ab. Durch eine höhere Anzahl an Fügepunkten ist eine Verbesserung sowohl des Übergangswiderstands als auch der Zugfestigkeit denkbar. Allerdings sind kaum Werte erreichbar, wie sie z.B. bei den geschweißten Proben vorliegen. Auch für die Form der zu fügenden Ableiter ist das Clinchen ungeeignet, da die Werkzeuge keinen ausreichenden Platz haben.

Ansonsten wäre das Clinchen für eine automatisierte Fertigung gut geeignet. Es erfordert keine teuren Anlagen. Der Energiebedarf ist recht niedrig und es wird kein Zusatzwerkstoff benötigt. Dadurch halten sich die

Betriebskosten in Grenzen. Wegen Nichterfüllung der funktionalen Anforderungen ist das Clinchen kein geeignetes Verfahren.

b) Lötten

Der Widerstand der Verbindung war mit $\sim 55 \mu\Omega$ etwa doppelt so hoch wie beim Laserschweißen und beim Ultraschallschweißen. Damit ist er trotzdem um ~ 70 besser als der beim Clinchen. Beim Zugversuch schneidet das Lötten von allen Verfahren am besten ab. Das Hauptproblem beim Lötten ist die Wärmeeinbringung. Das gesamte verwendete Lot muss aufgeschmolzen werden. Dadurch ließ sich in allen durchgeführten Versuchen die Wärmeeinbringung in die Siegelnaht nicht kontrollieren.

Auch bei guter Funktionserfüllung wäre das Lötten für eine automatisierte Fertigung nicht geeignet. Die Ableiter müssen partiell vernickelt werden, was einen weiteren Prozessschritt in einer weiteren Anlage erfordert. In der Anlage zur Zellkontaktierung selbst muss das Lot zugeführt und aufgebracht werden. Diese zwei zusätzlichen Prozessschritte führen zu einer wesentlich komplexeren und dadurch teureren Anlage. Auch der Betrieb ist wegen des Hilfsstoffs und des großen Energiebedarfs verhältnismäßig teuer. Wegen der Nichterfüllung der funktionalen Anforderungen und der schlechten Automatisierbarkeit ist das Lötten kein geeignetes Verfahren.

c) Laserschweißen

Die Proben mit den Verfahren Faserlaser, Pulsformung, Silberfolie erreichten alle sehr gute Widerstandswerte im Bereich von $16-18 \mu\Omega$. Die Versuche, Proben mit dem SHADOW Verfahren zu schweißen, waren nicht erfolgreich. Bei den Versuchen mit einfachem Punktraster war der Widerstand schlechter ($\sim 50 \mu\Omega$). Die Schliffbilder zeigen einen relativ großen Spalt zwischen den Ableitern. Daraus erkennt man die hohe Relevanz, einen Nullspalt herzustellen. Trotzdem war die Zugfestigkeit der Lasergeschweißten Probe etwa gleich mit der der Ultraschall geschweißten Proben. Da beim Laserschweißen nur ein sehr kleines Volumen aufgeschmolzen wird, ist die Wärmeeinbringung in die Siegelnaht minimal.

Damit ist die Funktionserfüllung bei allen Laserschweißverfahren sehr gut. Bei der Bewertung der Automatisierbarkeit unterscheiden sie sich etwas. Ein Punktraster ohne Pulsformung zu schweißen macht keinen Sinn, da für die Pulsformung kaum zusätzlicher Aufwand anfällt.

Dabei wird eine Pulsnaht besser bewertet als eine Dauerstrichnaht. Hier wird eine wesentlich geringere Durchschnittsleistung des Lasers benötigt. Auch kann auf einen einfachen Festkörperlaser (Stab- oder Scheibenlaser) zurückgegriffen werden, statt einen aufwändigeren Faserlaser zu verwenden. Da beim Laser nur ein Bruchteil der vom Laser absorbierten elektrischen Leistung in der Schweißnaht in Wärme umgewandelt wird, erfordert ein Laser insbesondere in den hohen Leistungsbereichen noch Zusatzaggregate wie z. B. eine Wasserkühlung. Dies wirkt sich sowohl auf Anschaffungskosten als auch Betriebskosten einer solchen Anlage negativ auf.

Auch das Einstellen des sehr geringen Spalts zwischen den Ableiter-Blechen stellt eine Herausforderung an die Automatisierung dar. Außerdem ist zu beachten, dass für Laseranlagen besondere Sicherheits- und Schutzvorschriften gelten. Deshalb muss die Anlage u. U. in einem Laserschutzraum aufgebaut werden.

Insgesamt wird das Laserschweißen gut bewertet, da es die Funktion gut erfüllt und auch die Schwierigkeiten in der Automatisierung lösbar sind.

d) Ultraschallschweißen

Beim Ultraschallschweißen werden die beiden Werkstoffe ohne die Ausbildung eines Schmelzbades mit einander verschweißt. Dadurch ist die Wärmeeinbringung in die Siegelnaht relativ gering. Die Festigkeit und der Widerstand der Verbindung entsprechen in etwa der des Laserschweißens. Damit ist eine sehr gute Funktionserfüllung gewährleistet. Allerdings kann bei ungünstiger Richtung der Schwingungen (Abbildung 114, rot dargestellt) ein Teil ihrer Energie in der Zelle dissipiert werden und dort Schäden verursachen.

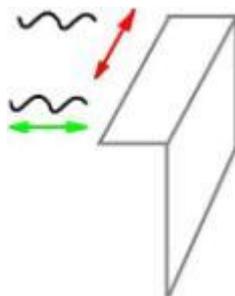


Abbildung 114: Schwingungsrichtungen beim US-Schweißen (grün = Rollnaht)

Deshalb ist beim linearen Ultraschallschweißen darauf zu achten, die Schwingungen quer zum Ableiter (in grün dargestellt) einzubringen. Beim Rollnahtschweißen werden die Schwingungen prinzipbedingt in dieser Richtung eingebracht.

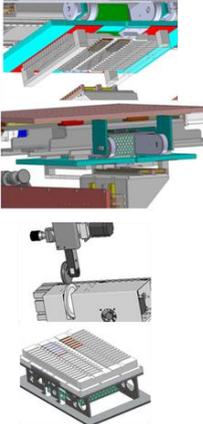
Die lineare Naht ist für die vorliegende Geometrie nur bedingt geeignet. Bei einer durchgehenden Naht (ein langer Amboss) kann der Amboss unter gegebenen geometrischen Bedingungen nicht steif genug ausgeführt werden, um die Anpresskraft mit zulässig kleiner Verformung aufzunehmen. Dasselbe gilt für eine aus mehreren Punkten zusammengesetzte lineare Naht. Für diese kommen außerdem Probleme mit der Taktzeit hinzu.

Diese beiden Probleme bestehen beim Rollnahtschweißen nicht (s. Abbildung 115). Die Sonotrode hat nur einen Linienkontakt zu den Ableitern. Deshalb wird eine wesentlich kleinere Anpresskraft benötigt, um den Schweißdruck aufzubauen. Diese Anpresskraft kann von den Ambossen gut abgestützt werden. Auch Probleme mit der Taktzeit gibt es nicht. Im Vergleich zum Laserschweißen oder Löten ist der Energiebedarf beim Ultraschallschweißen sehr gering. Auch besteht nicht die Notwendigkeit, die Ableiter vorzubehandeln oder mit dem Laserschutz vergleichbare Systeme vorzusehen. Die Anlagen und Betriebskosten sind deshalb vergleichsweise gering.

Wegen der guten Funktionserfüllung und der Eignung für eine automatisierte Produktion wurde von ads-tec das Ultraschall-Rollnahtschweißen empfohlen. Wie bereits früher erwähnt, stellt die Anwendung dieses Verfahrens für die gestellte Aufgabe in FUEL eine Weltneuheit dar. Im Zuge von FUEL wurde durch ads-tec gemeinsam mit Continental eine halbautomatische Ultraschall-Schweißstation entworfen, konstruiert und aufgebaut. Die Inbetriebnahme der Anlage (s. Abbildung 131) erfolgte im Mai 2011.

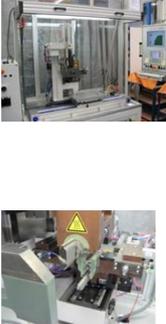
Prozessentwicklung Zellen fügen mit Fuel Anlagen

↓ Rollnaht



1. Gegenüberstellung der USS – Schweißverfahren
 - USS - Rollnaht - adstec
 - USS – Liniennaht - Continental
2. ProzessValidierung für B2
 - Prozessablaufvalidierung
 - Validierung der Maschinenfähigkeit
 - DOE 's auf Basis von B2 Stand
 - USS - Liniennaht
 - USS - Rollnaht

↓ Linien -
naht



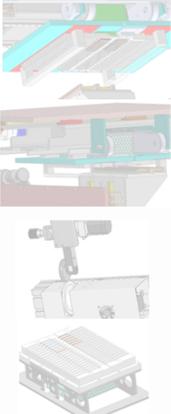
↓ Rollnaht	<i>Kriterien</i>	Rollnaht US-Schweißen	Lineares US-Schweißen	↓ Linien - naht
	Stromtragfähigkeit	+ +	+	
	mechanische Tragfähigkeit	+ +	+ +	
	thermische Belastung der Zelle	+ +	+ +	
	mechanische Belastung der Zelle	+ +	+	
	Taktzeit	++ +	--	
	Rüstaufwand	+ +	--	
	Sicherheitskonzept	+ + +	-	
	Prozessfähigkeit/ Reproduzierbarkeit	+ +	+	

Abbildung 115: US-Schweißen – Gegenüberstellung von Linien- und Rollnahtschweißverfahren

5.2.2.2 Definition des Ultraschallschweißverfahrens: Festlegung der Prozessparameter und Zugkraftversuche

Zur Ermittlung der Prozessparameter wurde aus wirtschaftlichen und aus Sicherheitsgründen vorerst mit Ableitern gearbeitet, die nicht mit Zellen verbunden waren. Somit war es möglich, diese auf eine Vorrichtung zu spannen (Abbildung 116 links), um die Fügepartner miteinander zu verbinden (Abbildung Mitte). Die Fügepartner wurden anschließend mit einer Zugbelastung beaufschlagt (Abbildung rechts), um die mechanischen Eigenschaften der Verbindungsqualität zu überprüfen.



Abbildung 116: Vorrichtung zum Fügen

Schritt 1: Definition der Prozessparameter

Als erstes Ziel galt es, die Parameter zu finden, die tendenziell (kleiner Vertrauensbereich) die geringste Streuung an mechanischer Festigkeit verursachen. Um den Einfluss der Prozessparameter auf die Streuung zu detektieren, wurden verschiedene Variationen an Parametersätze definiert. Die Fügpartner wurden anschließend mit den definierten Prozessparametern verschweißt, nach dem Schweißen in der Prüfzugmaschine befestigt und die Festigkeit der Verbindung mittels Zugprüfung ermittelt. Dabei wurde untersucht, für welche Prozessparameter reproduzierbare Ergebnisse bzgl. mechanischer Festigkeit erzielt werden (Zugversuch – zerstörerische Untersuchung, Aufbau s. Abbildung 117).



Abbildung 117: Zugversuch (statische Versuchsplanung, DOE)

Tabelle 8 zeigt einen Auszug der über diese Analysen ermittelten Ergebnisse. Als Grundlage für die Auswertung diente die Grundfestigkeit des Aluminiumableiters. Dieser hat eine Zugfestigkeit von 1340 Newton [N]. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde definiert, dass der Zielbereich der Festigkeitswerte bei 1072 N (entspricht 80% der Grundfestigkeit von Aluminium) liegen muss.

Folgende Zielkriterien sind zugleich zu erfüllen:

- Der untere Grenzwert von 965 N darf nicht unterschritten werden. Dieser Wert entspricht 90 % vom o.g. Zielbereich d.h. alle Werte müssen über der genannten Grenze liegen.
- Der untere Cpk Wert muss mind. 5 Sigma betragen ($Cpk_u > 1.67$).

Standardabweichung	Mittelwert	Plausibilität	Cpk_u
162	1206	924	0.50
130	1123	907	0.40
60	1205	1090	1.33
125	1104	857	0.37
101	1220	935	0.84
85	1140	963	0.69
42	1192	1110	1.78
114	1110	856	0.42

Tabelle 8: Auszug der Ergebnisse zu den Parameteruntersuchungen US-Schweißen

Schritt 2: Einfluss der Prozessparameter auf die mechanische Festigkeit

Die Diagramme in Abbildung 118 und Abbildung 119 zeigen den Einfluss der Prozessparameter auf die Festigkeit der Schweißstelle. Dabei hat die Schweißamplitude den signifikantesten Einfluss: Je höher die Schweißamplitude, desto schlechter die Festigkeit der Verbindung. Hingegen zeigt eine Änderung der Schweißenergie kaum Einfluss auf die Festigkeit.

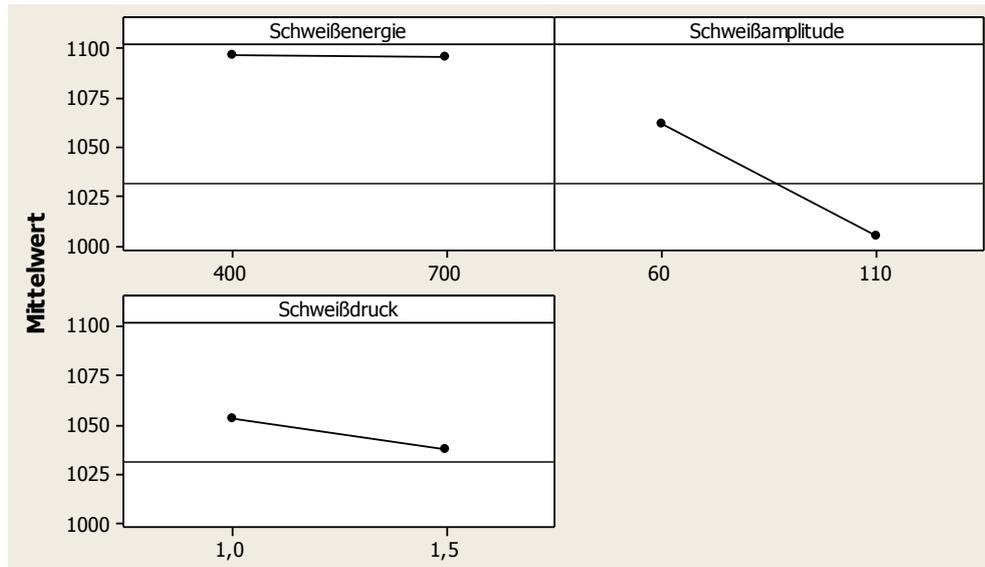


Abbildung 118: Haupteffektediagramme für Zugfestigkeit der Ableiter (dargestellt sind jeweils Datenmittelwerte)

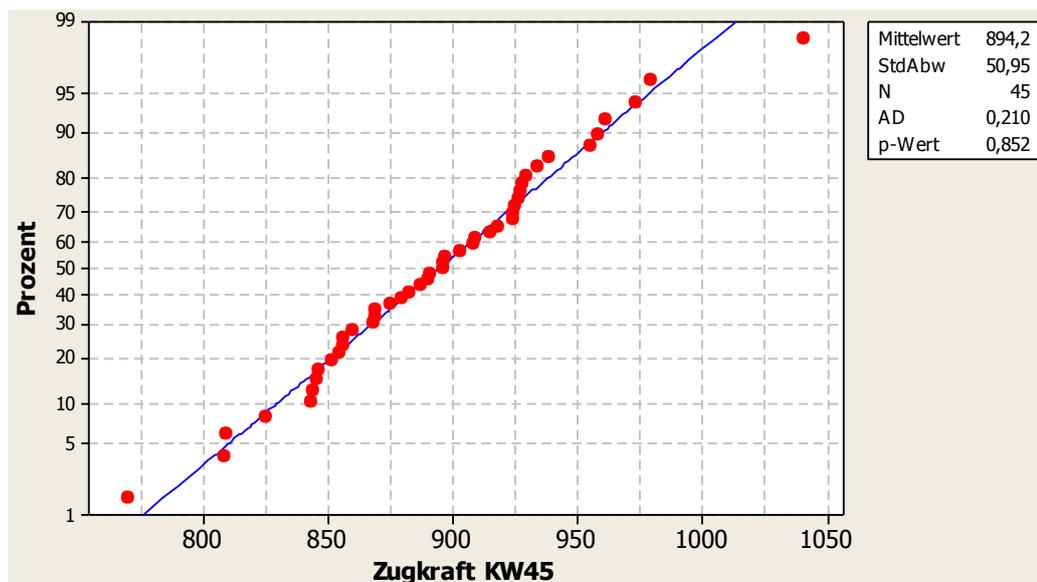


Abbildung 119: Wahrscheinlichkeitsnetz von Zugkraft (Normalverteilung der Zugkraftwerte)

Schritt 3: Reproduzierbarkeit

Der Parametersatz (700 Ws Schweißenergie, 1 bar Schweißdruck und 60% Schweißamplitude), der die geringste Streuung aufwies, wurde im nächsten Schritt auf Reproduzierbarkeit überprüft. Um einen größeren Vertrauensbereich zu schaffen, wurde die Stichprobenanzahl entsprechend erhöht. Ebenfalls wurde hierfür ein anderes Werkzeug verwendet, da das Vorherige aus konstruktiven Gründen nicht mehr eingesetzt wer-

den konnte. So war es möglich, auch den Einfluss von unterschiedlichem Werkzeug auf die Verbindungsgüte zu analysieren.

Die Überprüfung auf Reproduzierbarkeit des Parametersatzes hat gezeigt, dass das Werkzeug einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung hat. Die Werte sind weiterhin stabil und weisen eine nahezu identische Streuung auf, doch ist der Mittelwert um ca. 300 N nach unten gewandert. Hauptursachen dafür sind Kerbwirkungen, die durch die Reduzierung der Breite des Ambosses verstärkt auftreten und die sinkende Stabilität des Schweißwerkzeuges durch die Reduzierung der Abstände zwischen den Fügepartnern.

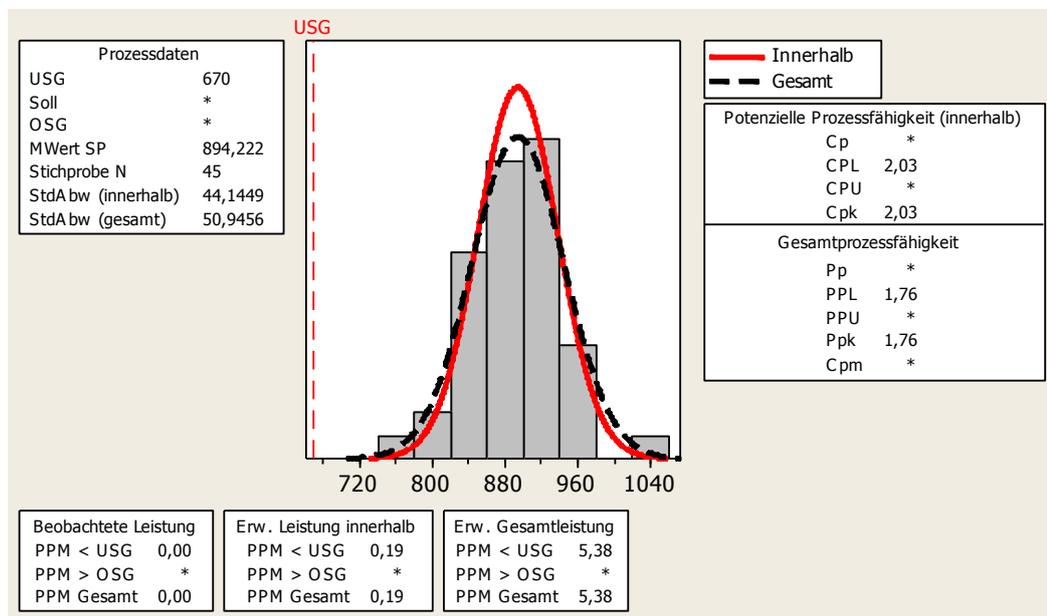


Abbildung 120: Prozessfähigkeit der Schweißverbindung (Zugkraftmessung)

Grundlegende Ergebnisse der Zugversuche

Auch mit dem geänderten Schweißwerkzeug konnte das Ergebnis des DOE reproduziert werden. Es wurden zwar etwas niedrigere Zugkräfte ermittelt, aber die Streuung der Messwerte ist immer noch sehr gering.

Die Tatsache, dass die Verschweißung während des Zugtests nicht aufreißt (kein Lösen der Fügepartner voneinander), sondern ein Riss stets knapp vor der verschweißten Stelle stattfindet, deutet darauf hin, dass während dieses Versuches an erster Stelle nicht die Qualität der Verschweißung untersucht wurde, sondern die Restfestigkeit (nach Kerbwirkung durch den Schweißvorgang) des Materials.

Die Verschweißung war stets fester als die Restfestigkeit des Materials und konnte deswegen mit vorliegendem Versuchsaufbau nicht direkt untersucht werden. Diese Theorie wurde dadurch bestätigt, dass die Erhöhung des Drucks und der Amplitude einen negativen Einfluss auf die Zugkraft haben, was den bisherigen Erfahrungen mit Ultraschallschweißen widersprach. Als Folge musste ein geänderter Versuchsaufbau erarbeitet werden, um die Qualität der Verschweißung direkt zu untersuchen. Die Zugkraft eignet sich nur bedingt für die Beurteilung der Verschweißungsqualität. Aus diesem Grunde fanden weitere Untersuchungen statt (s. folgender Abschnitt), um die Auswirkungen der o.g. Ursachen zu reduzieren.

5.2.2.3 Weitere Versuche zur Validierung des Schweißfahrens

Zur Validierung des Schweißverfahrens und der Schweißparameter wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Auf die Zugversuche wurde im voran gegangenen Abschnitt bereits eingegangen.

Stromtragfähigkeit der Verbindungspartner

Neben der mechanischen Festigkeit der Verbindung der Ableiter ist die mit dem Schweißverfahren erzielbare Stromtragfähigkeit von entscheidender Bedeutung für FUEL. Das Diagramm links in Abbildung 121 zeigt den Verlauf der Temperatur über die Zeit hinweg. Es wurden insgesamt 5 Temperaturmessfühler installiert. Dabei wurde der höchste gemessene Wert in Abhängigkeit der Zeit berücksichtigt. Die Fügepartner wurden für diesen Versuch 20 Minuten lang mit einer Stromstärke von 250 A beaufschlagt. Das Diagramm rechts zeigt den Verlauf der Temperaturänderung ΔT in Abhängigkeit von der Starttemperatur.

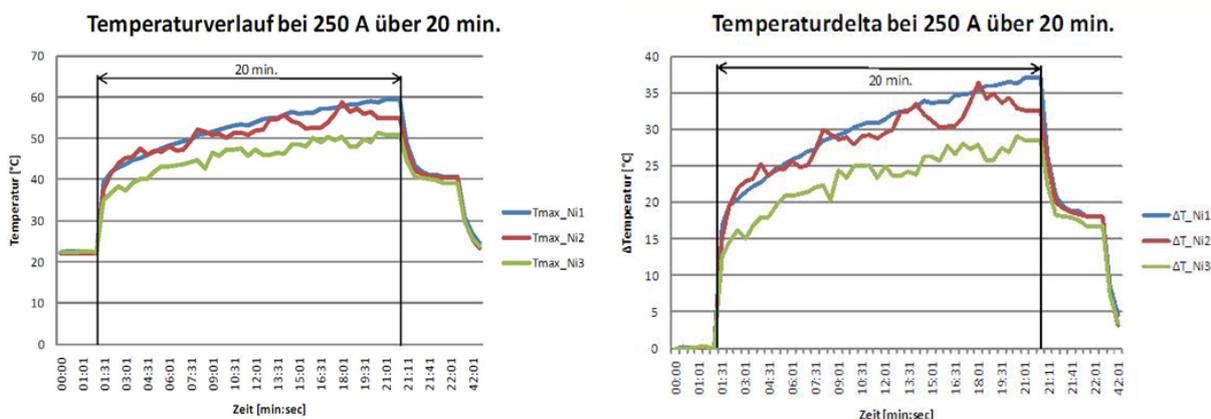


Abbildung 121: Stromtragfähigkeit der Verbindungspartner

Metallographische Untersuchungen

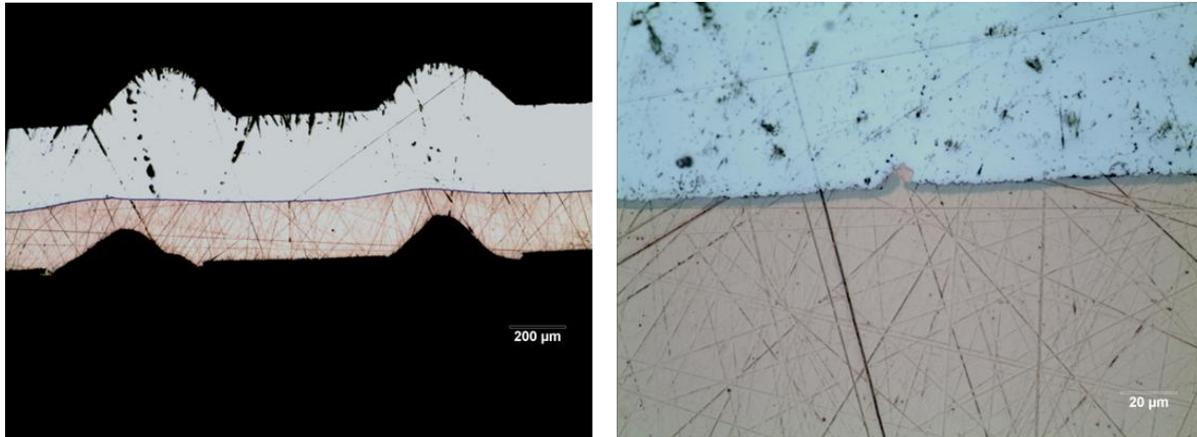


Abbildung 122: Aufnahmen metallographischer Analysen

Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen (s. Abbildung 122) bestätigten eine gute Anbindung der Materialien. Es wurde weder Risse in der Anbindungsfläche noch auf der Oberfläche festgestellt.

Schälprüfung

Alternativ zur Zugprüfung wurde untersucht, ob die Qualität der Verschweißung anhand des 180° Schältests beurteilt werden kann. Die Vorgehensweise bei diesem Versuch ist in der folgenden Abbildung 123 illustriert. Die Ableiter wurden paarweise (ein Kupfer und ein Aluminium Ableiter) im Dummyblock befestigt. Dann wurden diese über den Amboss gebogen (Aluminium auf der Sonotrodenseite, Kupfer auf der Ambossseite) und verschweißt. Nach dem Schweißen wurden die Proben für den 180° Schältest auseinander gebogen, und mit der Prüfzugmaschine geprüft.

Die Ergebnisse der Schälprüfung in Abhängigkeit der verwendeten Schweißparameter sind in Abbildung 124 verdeutlicht. Alle Parameter (Druck, Energie und Amplitude) besitzen signifikanten Einfluss auf die Schälfestigkeit der Verschweißung (charakterisiert durch die Schälkraft F_{\max}). Die höchste Festigkeit wird bei höchstem Druck, höchster Amplitude und höchster Energie erreicht, wobei mit den Maximalparametern die Resthaftung der Fügepartner an die Schweißwerkzeuge relativ hoch ist und eine Gefahr besteht, dass die Verschweißung beim Lösen des Werk-

zeugs beschädigt werden könnte. Eine Korrelation der Schweißfestigkeit mit der Schweißzeit wurde nicht festgestellt.

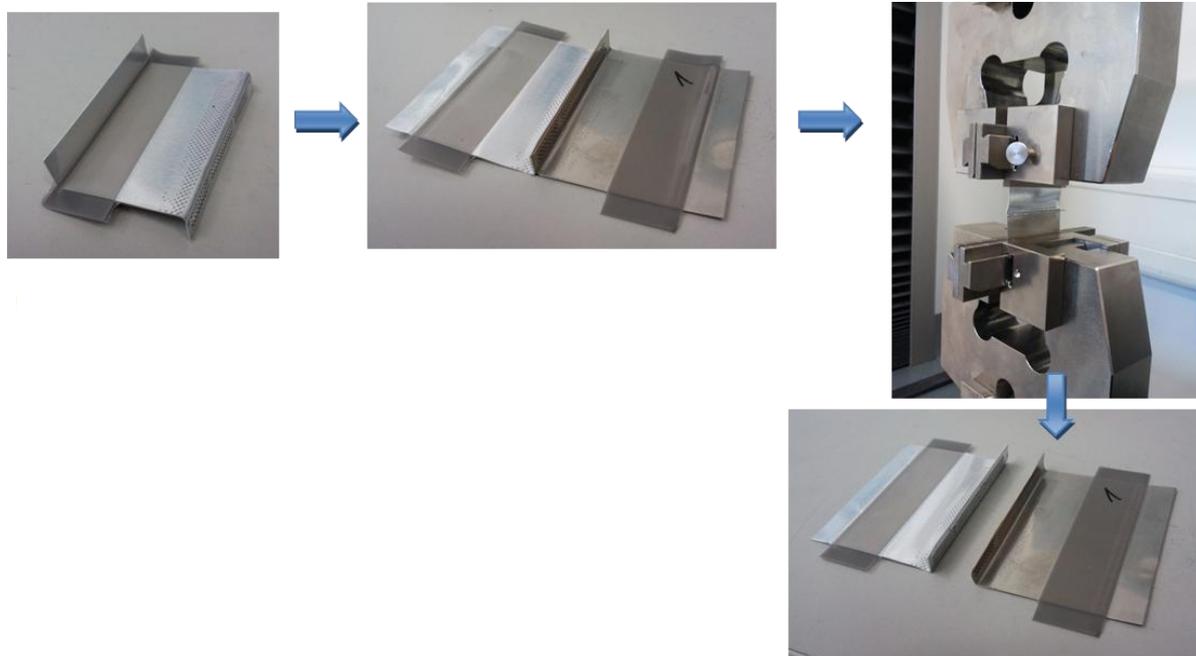


Abbildung 123: Zur Durchführung der Schälprüfung für den Festigkeitsnachweis der Schweißverbindung

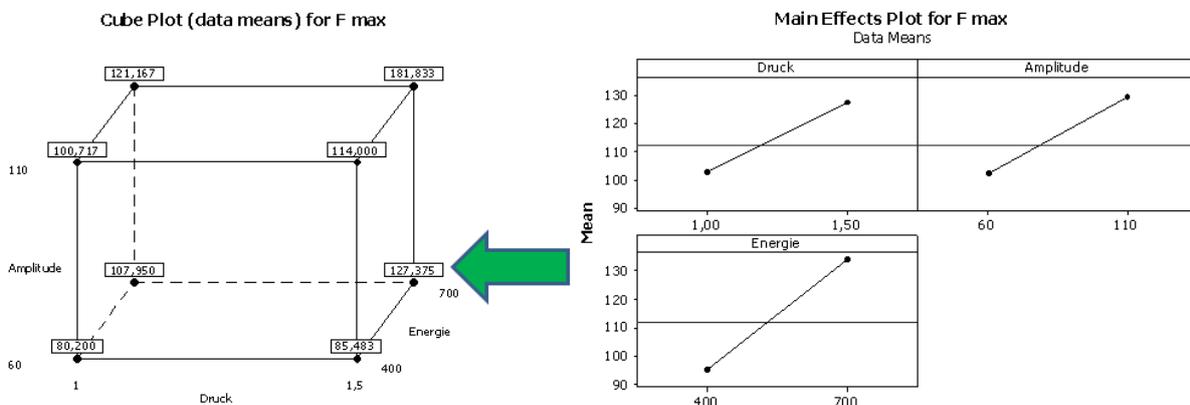


Abbildung 124: Ergebnisse der Schälprüfung für unterschiedliche Schweißparameter

Die mittels der eingangs beschriebenen Zugversuchsmessungen ausgewählten Schweißparameter korrelieren nicht (ganz) mit der höchsten Schälkraft. Mit höherem Druck beim Schweißen kann die Schälfestigkeit zusätzlich gesteigert werden. Die Erhöhung des Schweißdrucks führt aber zu einer verstärkten Kerbwirkung und damit zur Abnahme der Zugfestigkeit.

Im Rahmen der Schälversuchsreihen wurde ein sehr taugliches Modell für die Schweißfestigkeit entwickelt, mit diesem nahezu die gesamte Variation der Schältestergebnisse erklärt werden kann.

Reproduzierbarkeit am Batterieblock

Die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Versuche zur Reproduzierbarkeit fanden ausschließlich mit Ableitern statt, die auf eine Vorrichtung fixiert wurden. Um sicherzustellen, dass die mechanische Zugfestigkeit auch bei Ableitern erreicht wird, die mit Zellen verbunden sind, wurden diese im Zellblock geschweißt, anschließend von den Zellen getrennt und auf Festigkeit überprüft.

Die Ergebnisse der Reproduzierbarkeitsanalysen am Batterieblock sind in Abbildung 125 gezeigt. Das Diagramm zur Prozessfähigkeit zeigt deutlich eine Normalverteilung. Der Cpk-Wert liegt unter 1,67. Im Vergleich zu den Vorversuchen ist eine Mittelwertabnahme der Zugkraftfestigkeit um ca. 300 N sowie eine deutlich höhere Streuung der Messwerte festzustellen.

Die möglichen Ursachen für diese Abweichungen lagen in größeren Geometrietoleranzen der Zellen im Vergleich zu den Ableitern. Diese führten zu einer starken Streuung der Überlappung und einer daraus resultierenden z.T. starken Kerbwirkung. Zur Verbesserung wurden die Schweißwerkzeuge optimiert, um eine ausreichende Überlappung der Fügeteile sicher zu stellen.

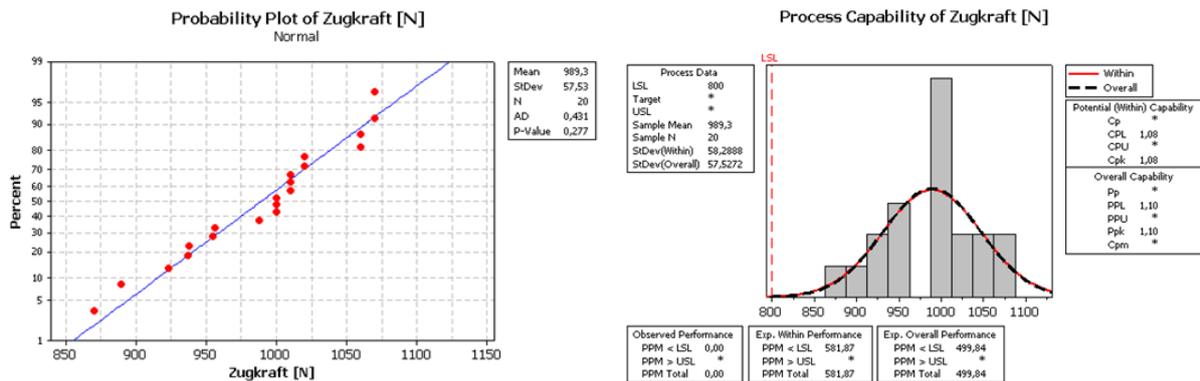


Abbildung 125: Ergebnis der Reproduzierbarkeitsuntersuchungen am Batterieblock

5.2.2.4 Werkzeugoptimierung

Die Werkzeugoptimierung betraf die sowohl den Amboss (dieser wurde verschmälert, Abbildung 126) als auch die Sonotrode. Hier wurde untersucht, ob mit einer Reduzierung der Sonotrodenfläche eine vergleichbare Verschweißung erzielt werden kann. Dabei muss die Energie signifikant reduziert werden (um das Schmelzen der Fügepartner zu verhindern), wodurch die Wahrscheinlichkeit sinkt, die innere Naht der Zelle zu beschädigen.

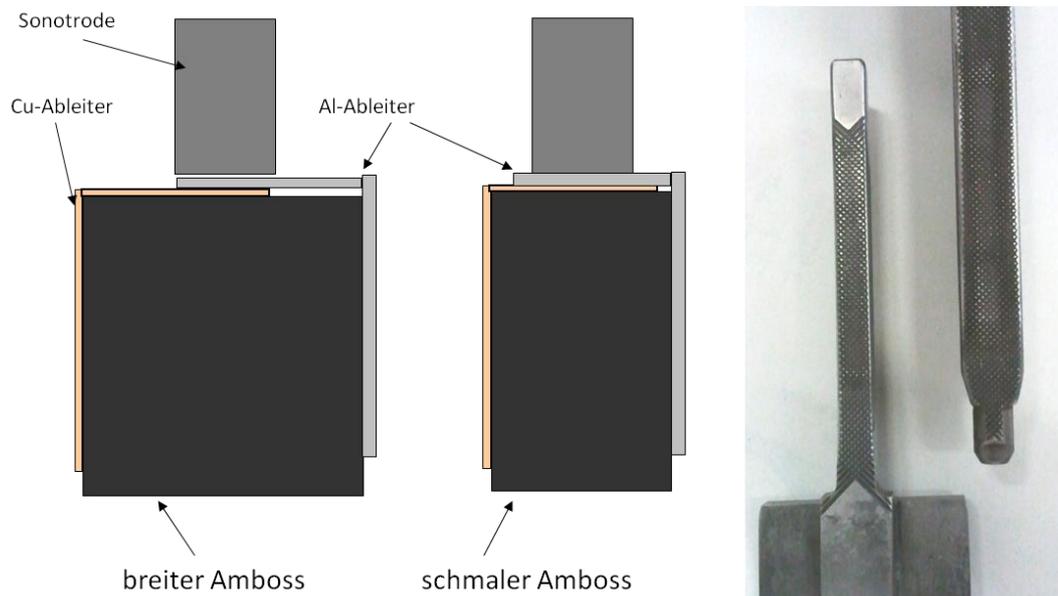


Abbildung 126: Werkzeugoptimierung – schmaler Amboss



Abbildung 127: Werkzeugoptimierung – Sonotrode

Die Verwendung einer 4-reihigen Sonotrode (Abbildung 127 links) erwies sich als schlecht, auch die 2-reihige Sonotrode lieferte nicht optimale Ergebnisse. Mit der 3-reihigen Sonotrode (mitte) konnten die besten Ergebnisse erzielt werden (hier ist insbesondere der Übergangswiderstand ausreichend gering).

Bei Reduzierung der Sonotrodenfläche von 3-reihig auf 2-reihig wurde zwar die erforderliche Energie halbiert, aber auch eine ca. 20%-ige Abnahme der Schälffestigkeit festgestellt. Die Zugfestigkeit nahm ebenfalls um etwa 20% ab. Gleiche Güte der Verschweißung wie bei der 3-reihigen Sonotrode konnte auch durch Erhöhung der Parameter nicht erreicht werden, weil einerseits die Gefahr bestand, dass die Sonotrode auf den Amboss auftrifft und andererseits die Haftung der Fügepartner an die Schweißwerkzeuge zu hoch werden könnte.

Im Anschluss an die Werkzeugoptimierungen wurden Reproduzierbarkeitsversuche mit folgenden Schweißparametern durchgeführt: Druck 1,0 bar; Energie 700 Ws; Amplitude 60%. Die Reproduzierbarkeitsuntersuchung wurde mit folgendem Werkzeug durchgeführt: Als Amboss wurde der Amboss für Musteraufbau BF2 verwendet (Breite = 6,85mm); 0,8 mm Kreuzriffel; Sonotrodenfläche 156 mm² (40x3,9) mm². Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abbildung 128 zusammengefasst. Es ergab sich eine gute Reproduzierbarkeit.

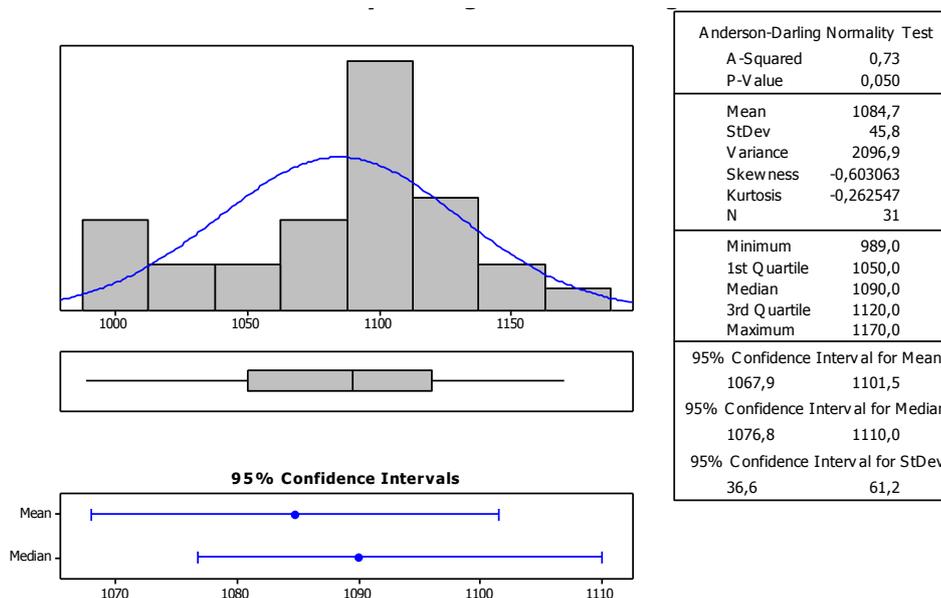


Abbildung 128: Ergebnisse der Reproduzierbarkeitsuntersuchungen nach Werkzeugoptimierung

5.2.2.5 Definition der Prüfstrategie

Für die Definition einer geeigneten Prüfstrategie wurden die möglichen Brüche in Klassen eingeteilt (s. Abbildung 129 und Abbildung 130) und getrennt bewertet:

- *Klasse 1: Lösen der Ableiter.* In diesem Fall ist die Verschweißung schwächer als die Materialfestigkeit.
- *Klasse 2: Mischbruch.* Hier entsteht ein teilhaftes Lösen der Ableiter und z.T. ein Riss des Aluminium-Ableiters. Die Verschweißungsfestigkeit ist vergleichbar mit der Materialfestigkeit.
- *Klasse 3: Riss des Aluminium-Ableiters.* In diesem Fall ist die Verschweißung fester als die Reißfähigkeit des Materials.

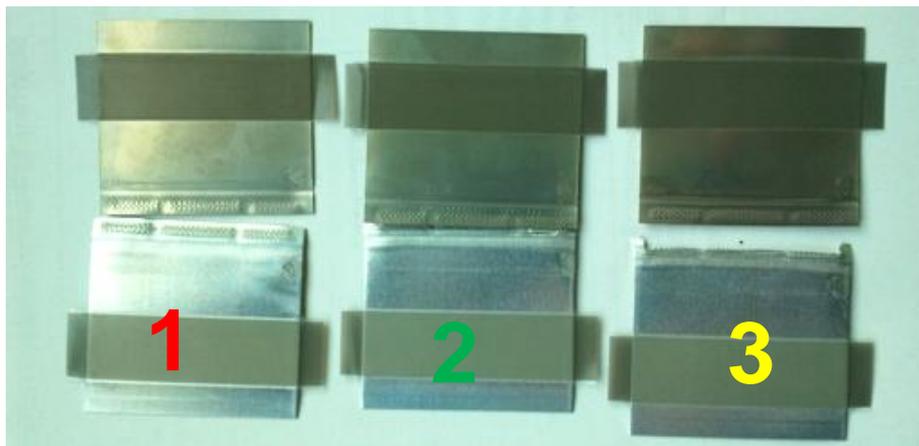


Abbildung 129: Beispiele für die drei Bruchklassen

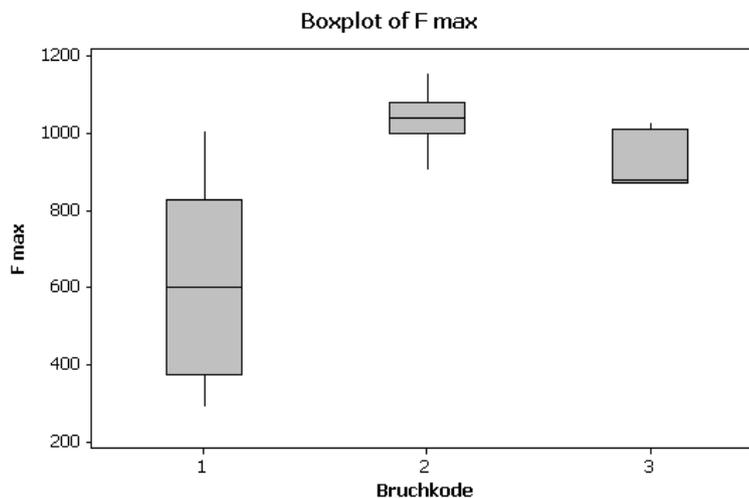


Abbildung 130: Boxplot der Festigkeit abhängig von der Bruchklasse

Prüfstrategie

Auf Basis der in den vorangegangenen Abschnitten durchgeführten Versuche wurde die folgende Prüfstrategie abgeleitet:

- Der Zugtest kann als Serienbegleitender Test in der Produktion verwendet werden.

- Mit dem Schältest kann sehr präzise die Qualität der Verschweißung beurteilt werden. Dieser ist für die Serie als Prüfmethode aber nicht geeignet, da die Fügepartner nicht seriengemäß geschweißt werden, kann aber für die Parameterentwicklung herangezogen werden.
- Stromtragfähigkeitstest und Übergangswiderstand müssen bei der Parameterentwicklung bzw. Parameteränderung durchgeführt werden. Es besteht die Gefahr, dass bei einer Querschnittabnahme der Widerstand zunimmt und infolgedessen die Fügepartner zu heiß werden.
- Am besten kann die Qualität der Verschweißung mit der metallographischen Untersuchung beurteilt werden. Diese ist aber sehr zeitaufwendig und nicht für einen Einsatz in der Serienproduktion geeignet.

5.2.2.6 Konstruktion eines Prozessprüfstands

Als kritische Prozesse beim automatischen Fügen der Ableiter wurden identifiziert: Das Positionieren des Moduls, der Schutz vor Kurzschluss, das Biegen der Ableiter in Taktzeit sowie das Schweißen der Ableiter in Taktzeit.

Im Schweißstand müssen sowohl 24er als auch 36er Module positioniert werden. Änderungen im Gehäuse-Design dürfen nicht den gesamten Schweißstand unbrauchbar machen. Zur Positionierung wurde ein Konzept zur Positionierung über Werkstückträger erarbeitet. Die Werkstückträger verfügen außerdem über einen "Kamm". Dieser dient dem Schutz vor Kurzschluss während des gesamten Prozesses. Außerdem nützt er zur Positionierung der Ableiter zum Biegen. Das Modul im Werkstückträger hängt mit den Ableitern nach unten im Schweißstand. Dadurch wird verhindert, dass herunterfallende Teile Kurzschlüsse verursachen.

Damit Biegen und Schweißen der Ableiter in Taktzeit erfolgen können, wurde ein Biegeapparat entwickelt, bei dem alle Ableiter auf einmal gebogen werden. Als Biegeleiste dienen dabei die Ambosse. Für jede Kontaktierung im Modul wird ein eigener Amboss verwendet. Dadurch müssen die Ambosse nur einmal positioniert werden. Das ermöglicht das Einhalten der Taktzeit.

Neben der Konstruktion des Prozessprüfstands wurden die Elektroplanung und die Erstellung eines Programms zur Steuerung durchgeführt.

Der Prüfstand wird durch eine Soft-SPS der Firma Beckhoff angesteuert. Diese läuft auf einem ads-tec Industrie-PC. Im Rahmen der Elektroplanung wurde der Prüfstand mit zahlreichen Sensoren zur Prozessüberwachung ausgestattet. Im Rahmen der Konstruktion wurden eine FMEA und eine Gefahrenanalyse für den Prozessprüfstand durchgeführt. Das CAD-Modell des Prozessprüfstands ist in Abbildung 131 zu sehen.

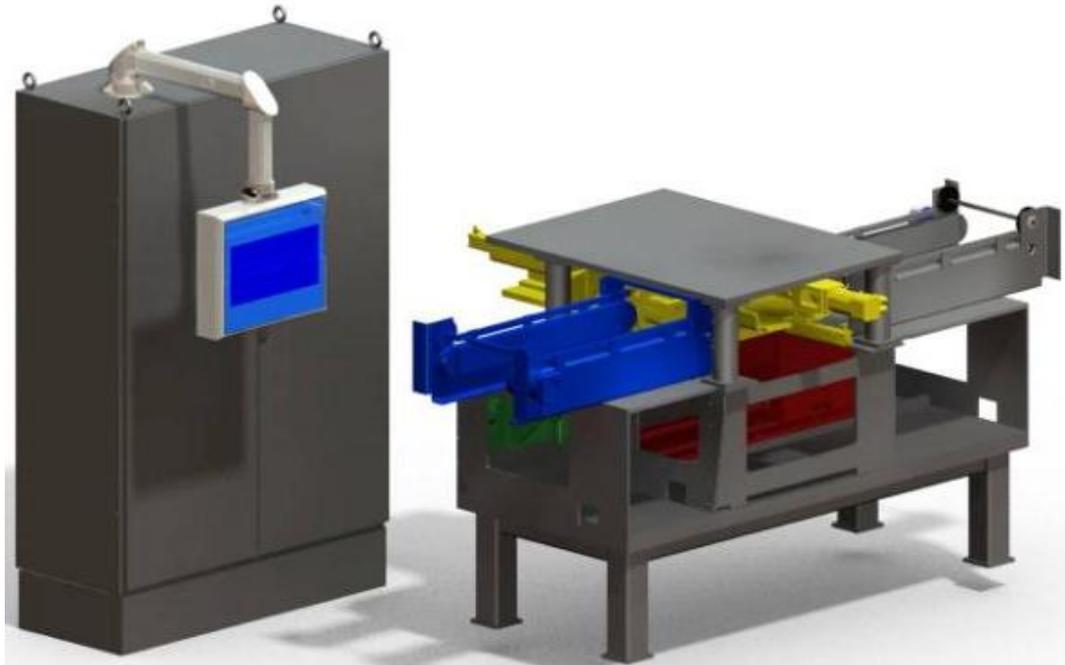


Abbildung 131: CAD-Modell Prozessprüfstand Zellkontaktierung

5.2.3 Produktionskonzept Zellmodule

Die hohe Anzahl von ca. 2 Millionen Li-Ionen Zellen erfordert einen automatisierten Herstellungsprozess für die Zell-Module bestehend aus 24 bis 36 Zellen. Da die Lithium-Ionen-Zellen dabei mit 30% ihrer Kapazität geladen sind, wird bei dem fertigen Zellmodul eine entsprechende hohe Spannung am Zellmodul anliegen. Dies ist beim Produktionsverfahren zu berücksichtigen (Arbeits- & Betriebssicherheit).

Innerhalb von FUEL wurden die Montageverfahren über Konzeptbetrachtungen und Prinzipversuche zunächst bewertet und verglichen. Anschließend wurde der komplexe Montageablauf im Detail ausgearbeitet. Ziel war dabei der Aufbau eines halbautomatisierten Montageablaufes sowie die Durchführung von Fertigungsversuchen unter vorgegebener Taktzeit mit Erfüllung aller Qualitätsanforderungen an die Montageprozesse. Im ersten

Schritt wurden dazu die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Zellmodulmontage zusammengetragen (s. Mindmap in Abbildung 132).

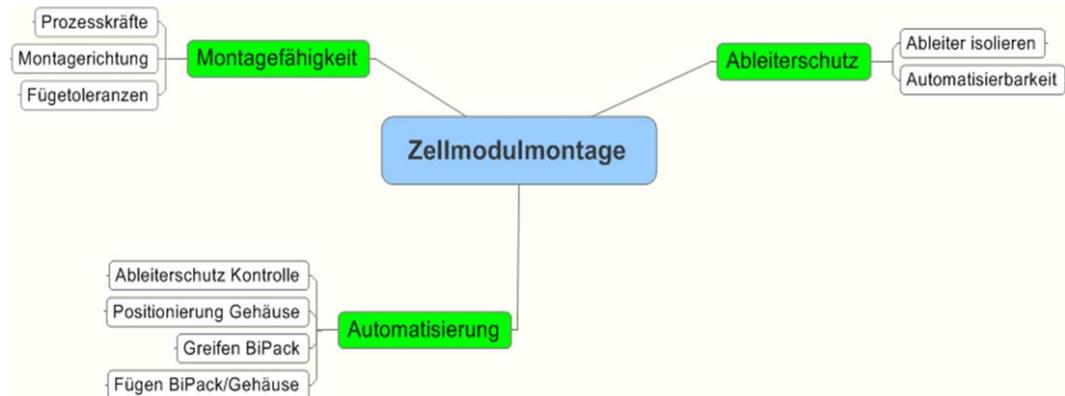


Abbildung 132: Einflussfaktoren Zellmodulmontage

Auf Basis eines Bi-Pack-Konzeptes, resultierend aus der Designfestlegung, hat sich die Montage der Bi-Packs als ein wesentlicher und signifikanter Prozessschritt in der Modulmontage herauskristallisiert. Als Bindeglied zwischen den Prozessschritten „Bi-Pack-Montage“ und „Zellableiter Kontaktieren“ mussten die aus beiden Prozessen ermittelten Erkenntnisse bzw. technischen Realisierungspunkte bei der Modulmontage berücksichtigt werden.

Folgende Punkte wurden bei der Modulmontage betrachtet und realisiert: Zusammenführen einzelner Bi-Packs zu einem Batterieblock, Schutz der Zelleableiter vor Berührung (Kurzschlussgefahr), Führen der Ableiter während des Steckvorgangs (Verbiegungsgefahr) sowie die Vorbereitung der Batterieblöcke für den Schweißvorgang (Ableiterverbindung).

Für den Schutz der Ableiter beim Handling vor Beschädigung und Verbiegung wurde ein Ableiterschutz entwickelt und eingesetzt (s. Anforderungskatalog in Abbildung 133). Der Ableiterschutz übernahm eine weitere wichtige Funktion: Die Kurzschlussvermeidung beim Handling der Zellen.

Durch die Auswahl der Variante Klammer als Ableiterschutz konnte eine Prozessüberwachung der Anwesenheit und Position der Klammer in jeder Phase der Prozesse durch geeignete Abfragen im Automatikbetrieb sichergestellt werden. Das Design des Ableiterschutzes wurde so gewählt, dass dieser bereits beim Demonstrator Bi-Pack-Montage unter Berücksichtigung des Ausrichtkonzeptes eingesetzt werden konnte.

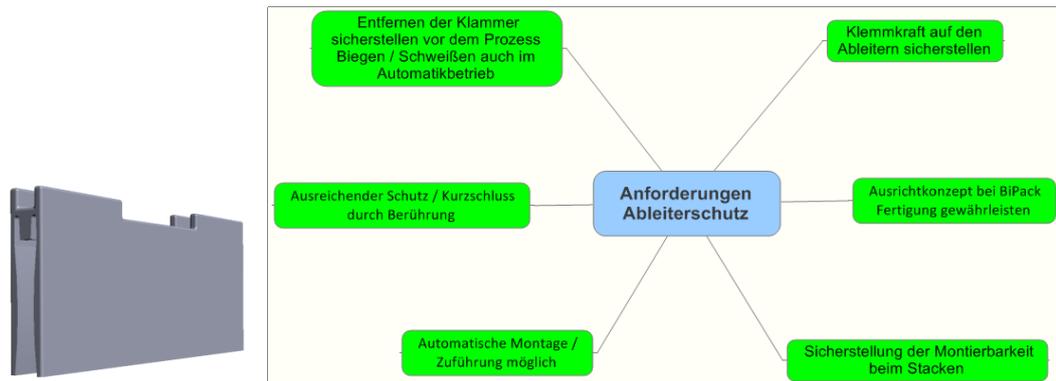


Abbildung 133: Anforderungen an den Ableiterschutz (links: Klammerlösung)

Eine Machbarkeitsstudie zum Einsatz der Klammer als Ableiterschutz wurde von der Firma ads-tec in das Design und die geplanten Fertigungsabläufe integriert. Bei einer Serienrealisierung ist dieser vollautomatisch zu führbar und montierbar. Unter der Berücksichtigung der Prozessaspekte „Ableiter Kontaktieren“ wurde durch die Verbundpartner ads-tec und Continental ein Werkstückträger entwickelt, der das Biegen und Schweißen des Batterieblocks ermöglicht.

5.2.3.1 Zellmodul-Montage

In einem hoch automatisierten Produktionsprozess für Lithium-Ionen-Batterien stellt das Bestücken der Batteriemodule einen Kernprozess dar. Dies gilt insbesondere für Lithium-Ionen-Batterien, die auf der Design-Idee des Bi-Packs basieren. Hier bildet das Bestücken der Module das Bindeglied zwischen Bi-Pack-Montage und den übrigen Montageaufgaben insbesondere die Zellkontaktierung.

Um geeignete Lösungen zum Bestücken der Module zu entwickeln, wurden zunächst verschiedene Gesamtlayouts zur Montage der Energiespeicher erstellt. In diese Gesamtkonzepte wurden verschiedene Lösungen zum Bestücken der Module konzipiert. Dabei hat sich bestätigt, dass Lösungen für das Bestücken stark von den übrigen Lösungen abhängen. Änderungen des Batteriedesigns können Lösungen zum Bestücken komplett unbrauchbar machen.

Wegen des hohen Gefährdungspotentials der Lithium-Ionen-Batterien ist von Beginn der Bi-Pack Fertigung bis zum Abschluss der Modulmontage ein durchgehender Schutz vor Kurzschluss zwingend erforderlich. Für die im Verbundprojekt FUEL realisierten Batterie-Demonstratoren müssen da-

bei insbesondere zwischen Modulmontage und Zellkontaktierung besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden.

Nach dem vorläufigen Design Freeze für den Batterie-Demonstrator wurde auf Basis der Konzepte für den Bestückungsprozess und den Schweißprozess ein hochfunktionaler Werkstückträger entwickelt. In diesen Werkstückträgern werden Batterie-Modul-Gehäuse aufgenommen. Beim anschließenden Bestücken der Module wird durch den Werkstückträger sichergestellt, dass sich keine nicht zu kontaktierenden Ableiterbleche berühren können. Die dafür verwendeten Elemente erfüllen bei der anschließenden Zellkontaktierung weitere Funktionen: Sie dienen der Positionierung und Fixierung der Ableiter beim Biege- und Schweißvorgang. Als weitere Funktion verhindert der Werkstückträger beim Schweißvorgang den Eintrag von Schwingungen über die Ableiter in die Zellen und damit Schäden an der Zellinternen Schweißverbindung der Anoden bzw. Kathoden mit den Ableitern.

Zum Schutz vor Kurzschlüssen bei der Bi-Pack-Produktion wird jeweils ein Ableiter mit einer Kunststoffklammer isoliert (Abbildung 133 links). Diese Isolierung darf erst entfernt werden, wenn die Ableiter durch den Werkstückträger sicher mechanisch getrennt sind. Auch diese Anforderung an den Bestückungsvorgang und damit an den Werkstückträger wurde erfüllt.

Durch die Verwendung dieses Werkstückträgers mit hoher Funktionsintegration kann auf den Wechsel zwischen verschiedenen Werkstückträgern für Modulmontage und Zellkontaktierung verzichtet werden. Dadurch wird über den gesamten Prozess ein Kurzschluss der Ableiter sicher verhindert.

Wegen negativer Testergebnisse bei der Komponentenentwicklung wurde der Batterie-Demonstrator in mehreren Iterationen optimiert. Für die verschiedenen Zwischenstände wurden jeweils optimale Gesamt- und Bestückungskonzepte entwickelt. Allerdings war die Zeit nach dem Design-Freeze nicht ausreichend, um einen halb-automatischen Prozessprüfstand auf Basis dieser Konzepte zu konstruieren. Versuche zur Validierung der Prozesse zur Modulmontage in AP3 mit dem neuen Werkstückträger wurden deshalb als Hand-Montage-Versuche durchgeführt. Dafür wurden fünf Werkstückträger gefertigt und aufgebaut. In den folgenden Illustrationen (Abbildung 134 - Abbildung 139) sind exemplarisch einige Layouts von Gesamtkonzepten und Details aus Konzepten zum Bestücken sowie der Werkstückträger selbst dargestellt.

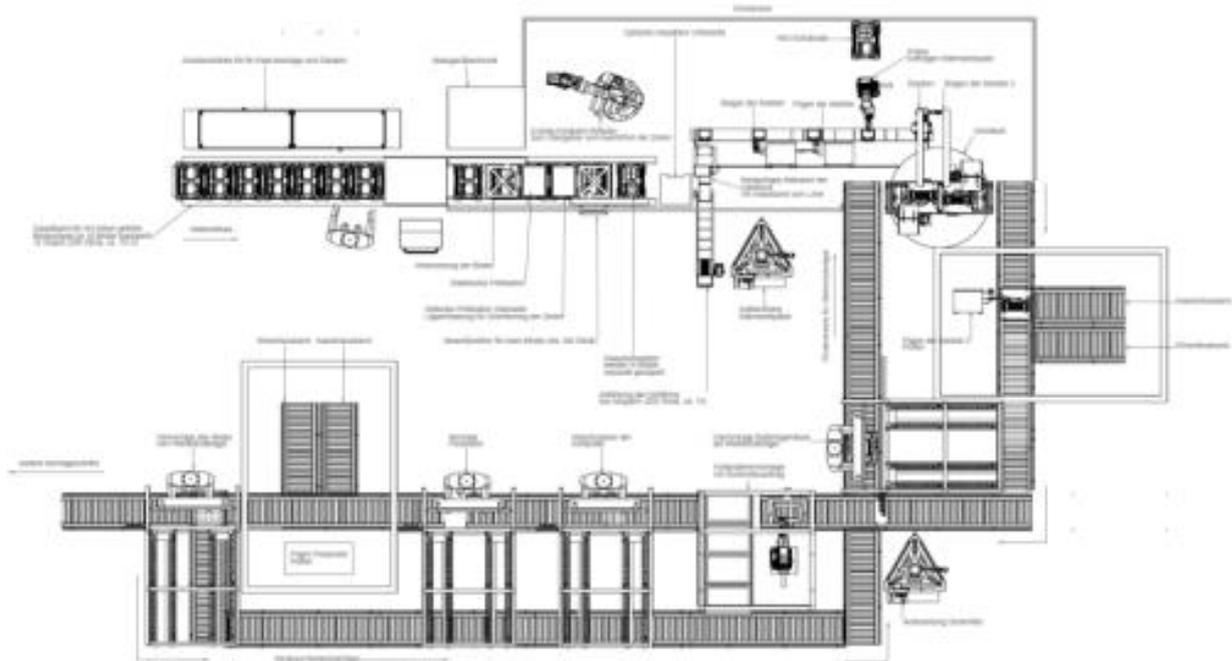


Abbildung 134: Gesamtlayout mit Kleberoboter

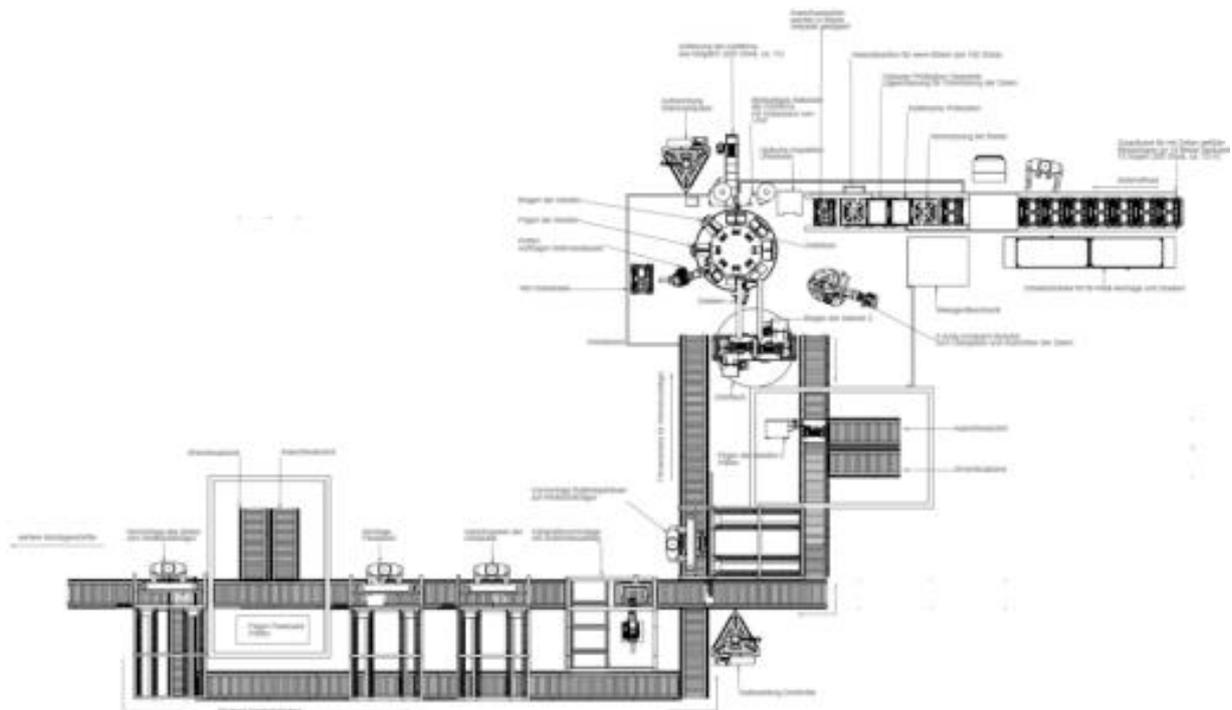


Abbildung 135: Gesamtlayout mit Rundtakttisch

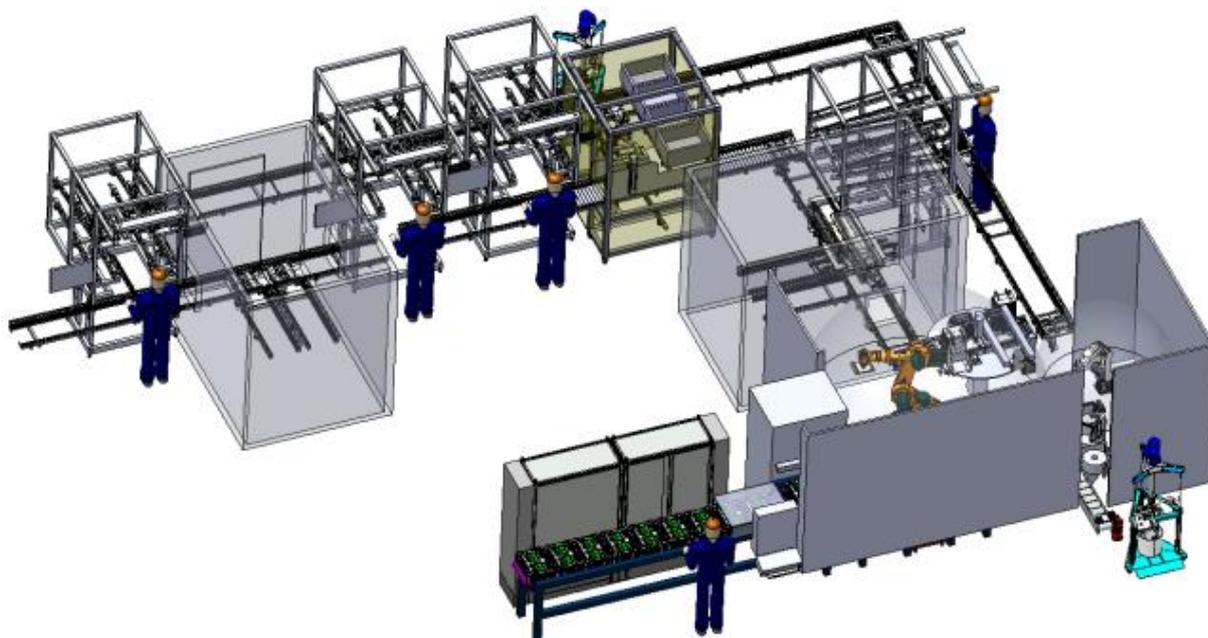


Abbildung 136: 3D-Ansicht Gesamtlayout mit Kleberoboter

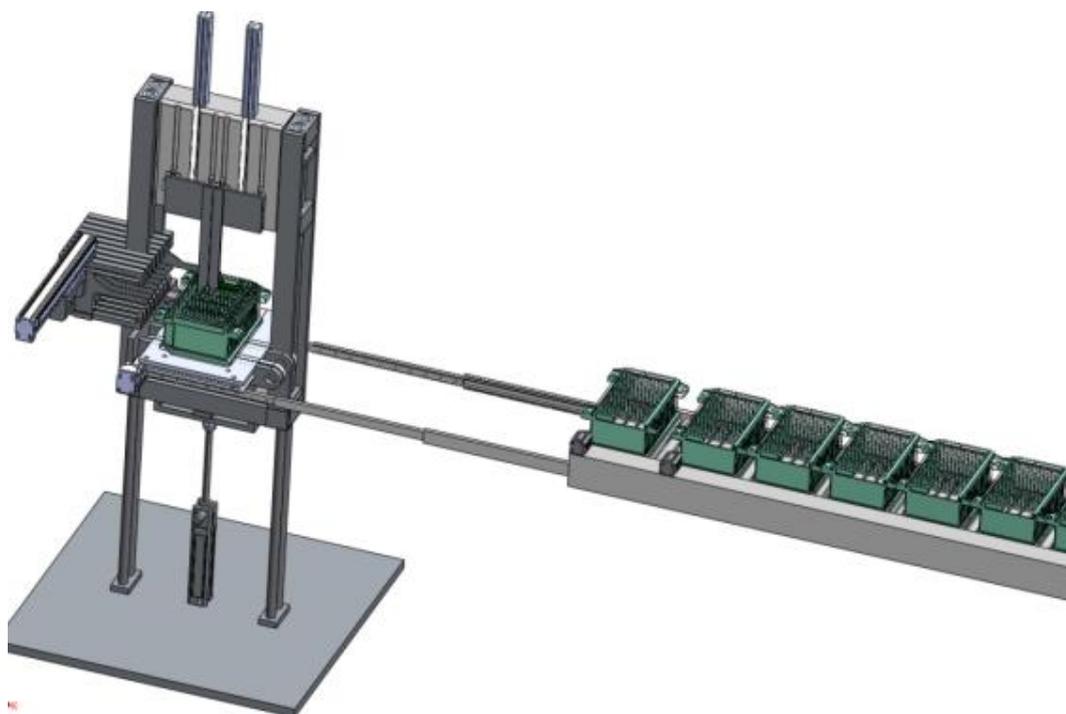


Abbildung 137: Detail: vertikales Bestücken

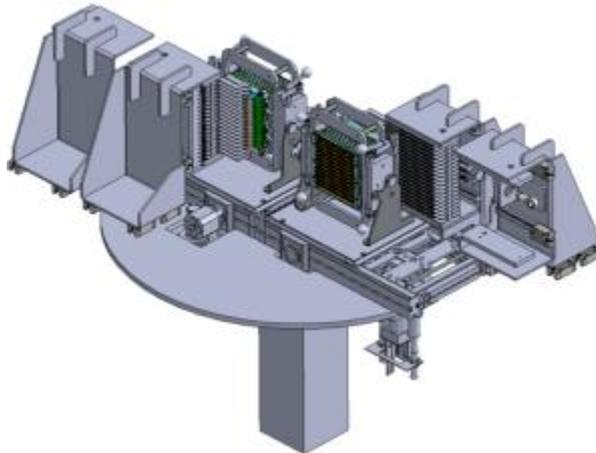


Abbildung 138: Detail-Darstellung Bestücken auf Rundtakttisch

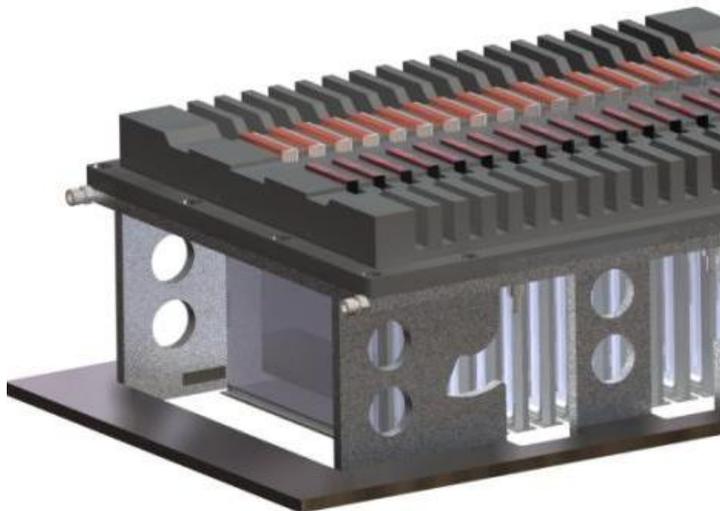


Abbildung 139: Detail-Darstellung Werkstückträger Bestücken

5.2.3.2 Prozessablauf

Der in Abbildung 140 skizzierte Prozessablauf zur Montage der Zellmodule wurde geplant und umgesetzt. Die besondere Herausforderung bestand in der Festlegung der Abläufe unter Berücksichtigung der Werkstückträgerauslegung, dem Ableiterschutz und dem zu bestückenden Batteriegehäuse.

Für den Prozessschritt „Modulmontage“ ergab sich dadurch die Herausforderung, den hochkomplexen Werkstückträger in den Prozessablauf „Stacken“ zu integrieren. Um die Eignung für einen Serieneinsatz zu untersuchen, wurde ein Demonstrator „Steckplatz“ (Abbildung 142) für die Nachweisführung aufgebaut.

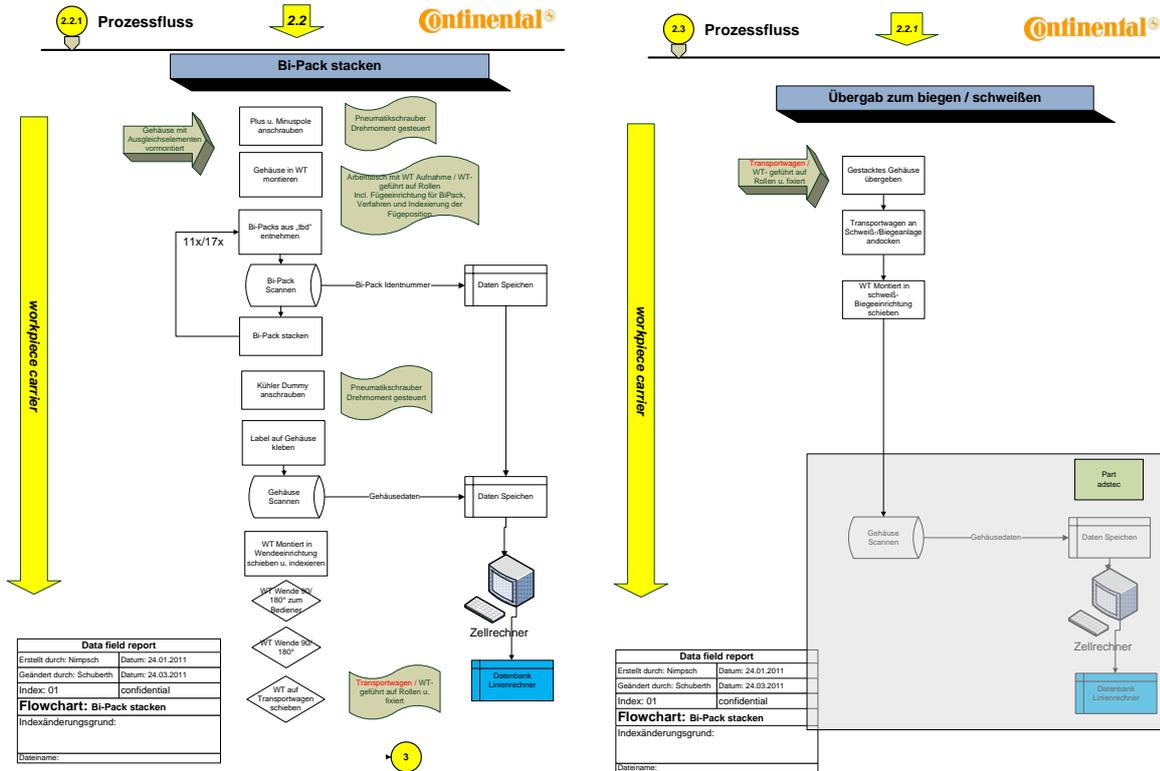


Abbildung 140: Prozessabläufe zur Zellmodulmontage – Prozessschritte „Bi-Pack Stecken“ und „Übergabe zum Biegen/Schweißen“

Aufgrund der Projektverzögerungen durch die Iterationen bei der Komponentenentwicklung für die NKW-Energiespeicher erfolgt im Demonstrator das „Stacken“ manuell mittels einer Kipp-Dreh-Einrichtung. Die Kipp-Dreh-Einrichtung wurde so ausgelegt, dass nach dem „Stacken“ die Bestückungseinheit um 180° geschwenkt wird, so dass der Ableiterschutzes (Klammer) manuell entnommen werden kann (s. Abbildung 141). Den Schutz gegen Kurzschluss durch Berührung übernimmt der Werkstück-träger.

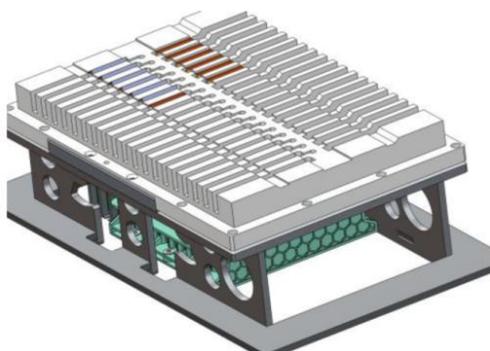


Abbildung 141: Möglichkeit der manuellen Entnahme des Ableiterschutzes mittels Kipp-Dreh-Einrichtung.

Nach dem Zurückschwenken in die Bestückposition kann der bestückte
 Werkstückträger direkt von der Kipp-Dreh Einrichtung in die Biege-/
 Schweißeinrichtung eingeführt werden. Dabei wird die Höhe der Be-
 stückung mit dem Transportband der Biege-/Schweißeinrichtung abge-
 stimmt.

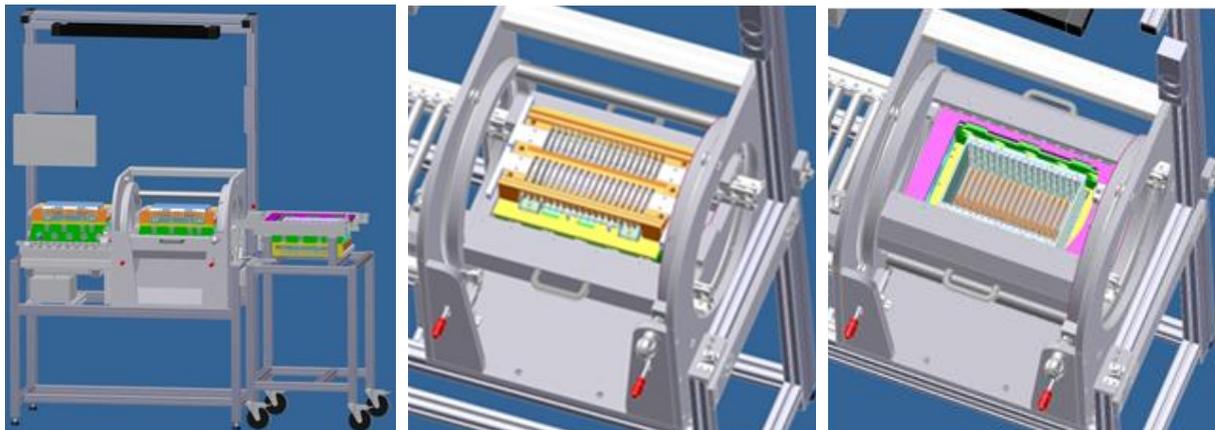


Abbildung 142: Demonstrator „Steckplatz“

Wegen verspäteter Verfügbarkeit der Werkstückträger konnten nur kleine
 Versuchsreihen im Bereich der Montage des Batteriegehäuses durchge-
 führt werden. Anhand der Ergebnisse der Versuchsreihen konnte Optimie-
 rungspotential am Werkstückträger identifiziert werden. Der Isolations-
 kamm behindert zum Teil ein einwandfreies Stecken der Bi-Packs in das
 Batteriegehäuse. Die Führung der Ableiter durch den Isolationskamm ist
 beim Steckvorgang zwingend notwendig.

Weitere Punkte, die eine Automatisierung der Abläufe beeinflussen, kom-
 men aus dem Design der Batteriegehäuse. Um eine Vollautomatisierung
 zu gewährleisten, ist das Design des Zellmodulgehäuses im Bereich der
 Führung des Kühlblechs anzupassen.

5.2.4 Produktionskonzept Flexboard

Für die Funktion des Energiespeichers muss das vollständig stromfüh-
 rende Zellmodul (Abbildung 144) mit der Steuerungseinheit (Flexboard,
 CSE) verbunden werden. Das Verbinden der Zellmodule mit der CSE
 erfolgt durch Kontaktierung der Sense-Leiter, die aus der CSE heraus-
 geführt und mit den einzelnen Ableitern vom Zellblock verbunden werden.
 Hauptaufgabe bei der Flexboardmontage ist es, das Flexboard über ein
 Kupferband (Sense-Leitung) mit den Ableitertabs der Zellen zu verbinden.

Über diese Verbindungen werden die Zellspannungen gemessen und die Zellen gebalanced.

Dadurch ergeben sich an die Verbindung von Flexboard und Ableitertabs dieselben Anforderungen wie für die Zellkontaktierung. Wichtigste Kriterien sind geringer Übergangswiderstand und hohe Festigkeit. Hinzu kommt, dass das Erzeugen dieser Verbindung nicht die bestehende Schweißverbindung der Ableitertabs beeinträchtigen darf. Generell bietet sich auch hier das Ultraschallschweißen als Lösung an. Wegen der wesentlich kleineren zu verschweißenden Fläche kann aber statt des Rollnahtschweißens auch eine unbewegte Sonotrode zum Einsatz kommen (lineares Ultraschallschweißen).

Auf Basis dieser Daten wurden Proben gefertigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Kontaktieren des Flexboards über Ultraschallschweißung nicht die vorangegangene Schweißung der Ableiter (Ultraschallrollnaht) beeinträchtigt. Abbildung 143 zeigt eine Ableiter-Kontaktierung mit kontaktiertem Kupferband. In diesem Beispiel wurden beide Schweißungen mit linearem Ultraschallschweißen durchgeführt.

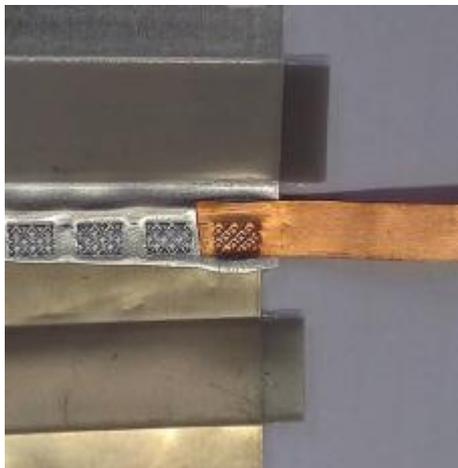


Abbildung 143: Ableiter mit angeschweißter Sensorleitung

Die in FUEL angestrebte Lösung bestand in der Entwicklung einer automatisierten Einrichtung, die das System vor dem Einbau auf Funktion überprüft und dann die Kontakte des Flexboards mit den Bi-Packs dauerhaft fügt. Ziel war es, im Rahmen von FUEL diesen Kontaktierungsautomaten zu realisieren und zu erproben. CAD-Daten zum Aufbau des Energiespeichers mit angeschlossenem Flexboard standen wegen der beschriebenen Redesigns erst zu einem relativ späten Zeitpunkt im Projekt zur Verfügung. Von diesem Zeitpunkt an war die Zeit im Projekt im

mehr ausreichend, um einen kompletten Prüfstand für den Kontaktierungsprozess aufzubauen.

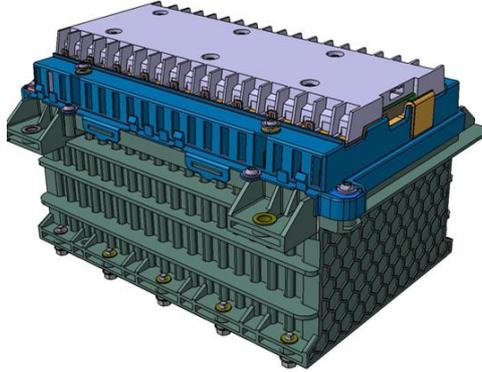


Abbildung 144: Komplettes Zellmodul

Die hohe Komplexität der CSE durch steuerungstechnische Elemente und Anforderungen an die Mechanik führten in der Designauslegung zu Verzögerungen. Dennoch wurden die folgenden Designziele erreicht:

- Reduzierung der Fügekomponenten bei der Endmontage
- Positionierung der Sense-Leiter für eine automatische Schweißung
- Positionierung der CSE am Batterieblock

Auf die im Zusammenhang mit der Flexboard-Montage in FUEL erreichten Ergebnisse wird im Folgenden detailliert eingegangen.

5.2.4.1 Konzeptentwicklung

Reduzierung der Fügekomponenten bei der Endmontage

Mit dem Ziel, eine automatische Verarbeitung der CSE zu gewährleisten, war es notwendig, die Anzahl der Komponenten so zu reduzieren, dass in nur einem Bauteil die Funktionen zur Steuerung und Überwachung der Zellmodule übernommen werden. Dies sind neben der Temperaturüberwachung die Symmetrierung des Zellmoduls und die eigentliche Steuerung.

Positionierung der Sense-Leiter für eine automatische Schweißung

Um ein automatisches Schweißen der Sense Leitung mit Zelleleitern zu gewährleisten, ist es gelungen, das Design so zu gestalten, dass eine exakte Positionierung der Sense-Leitung sichergestellt werden kann. Um Prozesssicherheit zu gewährleisten, wurde die Sense-Leitung als Cu-Fähnchen mit „S – Schlag“ ausgeführt (Abbildung 145).



Abbildung 145: Cu-Fähnchen mit S-Schlag zur Positionierung der Sense-Leitung

Dabei wurden neben der Möglichkeit der automatischen Verarbeitung noch folgende Eigenschaften des „S-Schlags“ berücksichtigt: Zugentlastung, Toleranzausgleich und Dämpfung beim Schweißvorgang.

Kein gleichzeitiges Kontaktieren der Sense-Leiter mit den Zelleleitern bei CSE Montage

Ein gleichzeitiges Kontaktieren der Cu-Fähnchen mit den Zelleleitern würde zu einem Spannungsstoß führen, der die Zerstörung der Elektronikkomponenten an der CSE zur Folge hätte. Durch das Fixieren der Cu-Fähnchen im CSE Gehäuse wurde ein weiterer Problempunkt zu Gunsten einer automatischen Umsetzung der Montage gelöst. Ein Isolieren der einzelnen Anschlüsse ist nicht mehr notwendig.

Die Cu-Fähnchen werden mit geeigneten Haltewerkzeugen bzw. mit speziell geformten Schweißwerkzeugen herausgelöst, an die gewünschte Schweißposition geführt und im CSE Gehäuse fixiert. Abbildung 146 (Mitte) zeigt die Klemmung der Sensorleitung zwischen Ober- und Unterschale. Die Kontaktierung erfolgt zeitlich versetzt durch die Zustellbewegung der Schweißwerkzeuge.

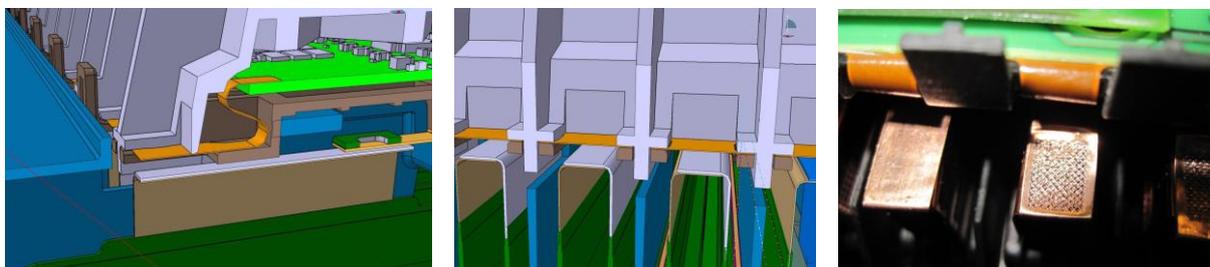


Abbildung 146: Positionierung und Fixierung der Cu-Fähnchen im CSE

Positionierung der CSE am Batterieblock

Für den Verbindungsvorgang sind eine exakte Positionierung der im Batterieblock befindlichen Zelleiter und der im CSE Gehäuse vorfixierten Cu-Fähnchen notwendig. Voraussetzung dazu ist eine design-technisch abgegliche Positionierung und Fixierung von CSE- und Batteriegehäuse. Diese Forderung wurde durch Positionierstifte/-bohrungen und Schnapphaken als Fixierung erreicht (s. Abbildung 147).

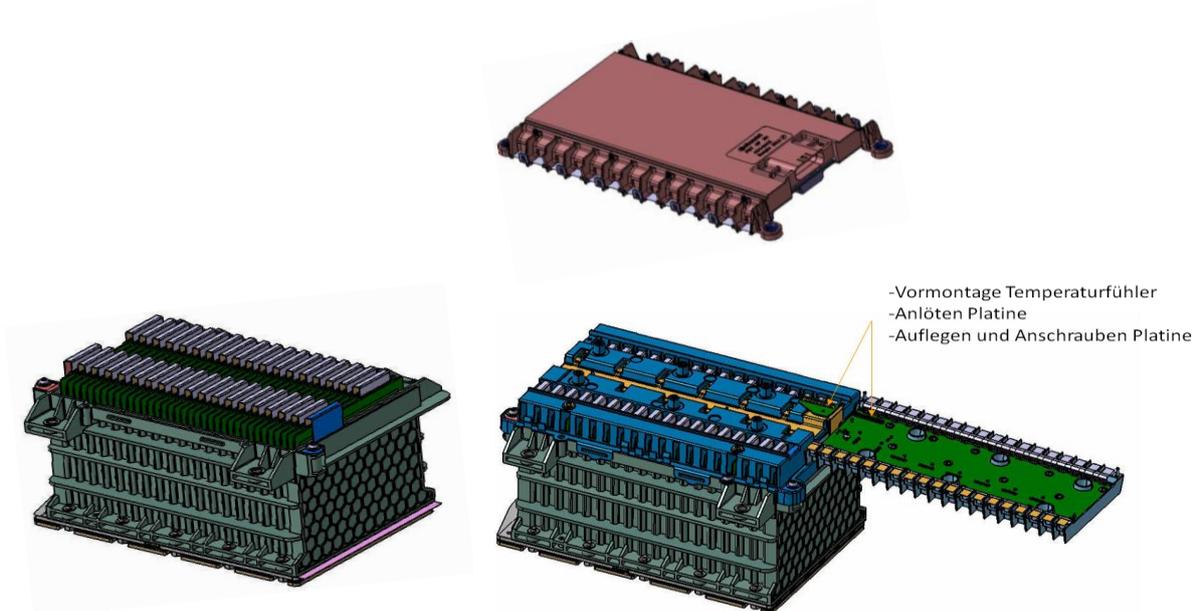


Abbildung 147: Positionierung CSE- und Zellmodulgehäuse

5.2.4.2 Vorversuche zur Validierung der Schweißverbindung bei der Flexboard-Montage

Schweißversuche mit Zelleitern und Sense-Leitungen

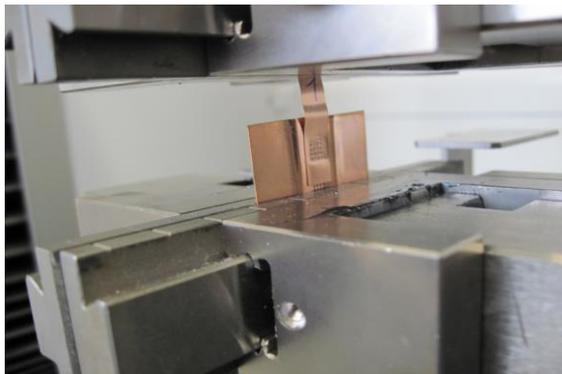
Die Vorversuche zum Schweißen mittels linearem Ultraschall-Schweißverfahren erwiesen sich als positiv. Im nächsten Schritt erfolgten Schweißversuche mit Zelleitern und Sense-Leitungen. Durch eine entsprechende Ausbildung der Werkzeuge (Amboss und Sonotrode) wurden die Ergebnisse der Zugänglichkeits- und Bauraumuntersuchungen verifiziert (Abbildung 148). Bereits die ersten Analysen zeigten optisch gute Ergebnisse.



Abbildung 148: Schweißversuche mit Zellelektrode und Sense-Leitung

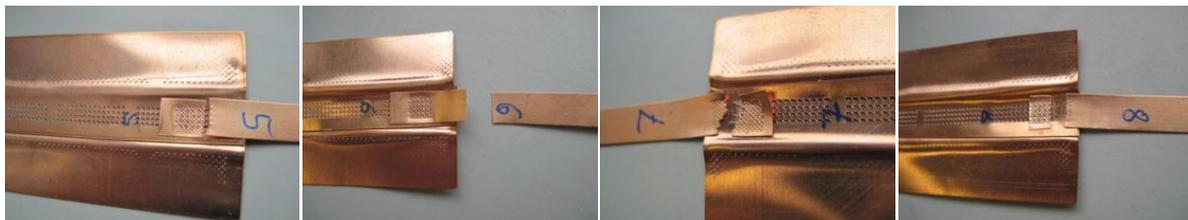
Festigkeitsuntersuchung der Schweißverbindung

Für die Untersuchung der Schweißfestigkeit wurde eine Reihe an Muster-
teilen gefertigt. Die Teile wurden präpariert, um sie in einer Zugprüfma-
schine (Abbildung 149) einspannen zu können.



**Abbildung 149: Festigkeitsuntersuchung der Schweißverbindung (Zugprüfma-
schine)**

Erwartungsgemäß versagte das Grundmaterial direkt neben der Schweiß-
verbindung (s. Ergebnisse in Abbildung 150). Damit war nachgewiesen,
dass die Schweißverbindung eine größere Kraft überträgt als das Grund-
material.



**Abbildung 150: Festigkeitsuntersuchung der Schweißverbindung – Ergebnis der
Zugprüfung**

Die statistische Auswertung der Schweißversuche (Abbildung 151) bestätigte die Auswahl des Verfahrens. Die Grundfestigkeit der Sense-Leitung beträgt durchschnittlich $F_{max} = 255 \text{ N}$. Die Festigkeit der Schweißverbindung Sense-Leitung/Zellableiter liegt im Durchschnittswert bei 223 N (91% von F_{max}). Die Prozessfähigkeitsuntersuchungen (Abbildung 152 und Abbildung 153) zeigen, dass bei einem Mindestfestigkeitswert von 180 N ein Ppk Wert von $>1,0$ vorliegt. Bei einer Mindestfestigkeit von 150 N liegt der Ppk Wert deutlich über $1,67$. Da technisch ein Wert von 100 N bereits völlig ausreicht, ist die Schweißverbindung auch unter statistischen Gesichtspunkten als völlig ausreichend dimensioniert anzusehen.

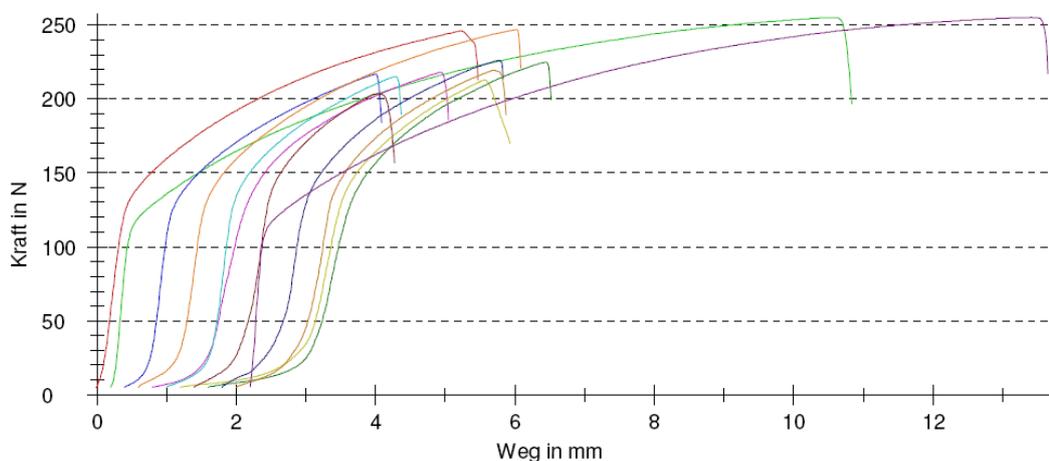


Abbildung 151: Grafische Darstellung der Zugversuche

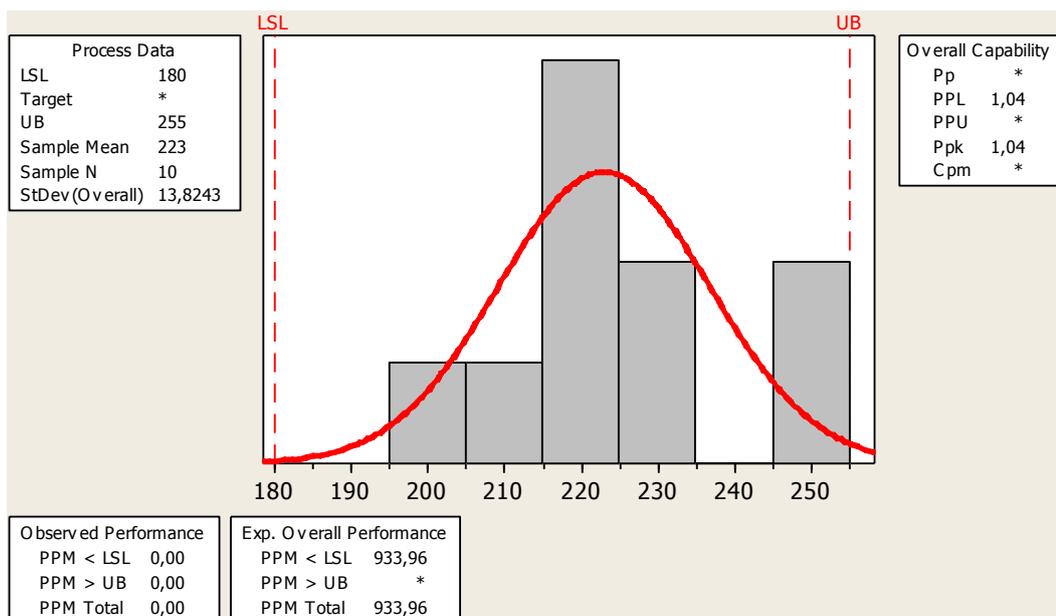


Abbildung 152: Prozessfähigkeitsuntersuchung Ultraschall-Schweißen

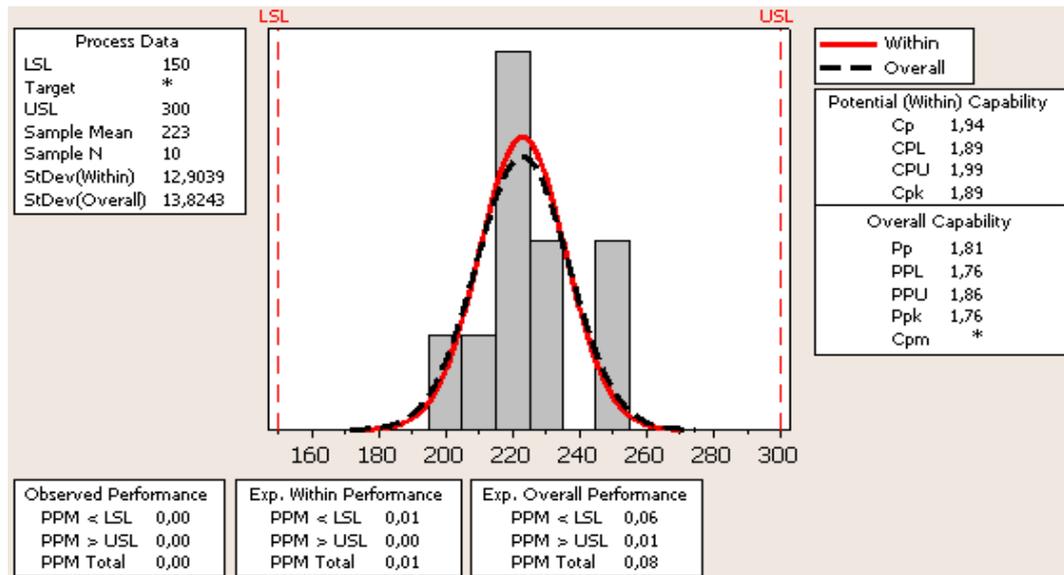


Abbildung 153: Prozessfähigkeitsuntersuchung zur max. Zugkraft F_{max}

5.3 Produktion: Validierung & Systemdemonstration

Die Hauptzielsetzung des dritten Arbeitspakets bestand in der Entwicklung von Testverfahren und deren iterativer Validierung. Im Vordergrund standen Versuchs- und Messreihen zu den Produktionstechniken (Bi-Pack-Montage, Zellkontaktierung, Zell-Modulmontage und Flexboard-Montage).

Die Entwicklung neuer Fertigungs- und Montageverfahren ist dann erfolgreich, wenn Prozess-Stabilität und Fertigungsfähigkeit nachgewiesen werden können. Nur unter dieser Voraussetzung können Verfahren als wirtschaftlich geeignet für eine industrielle Fertigung am Standort Deutschland beurteilt werden.

Die Entwicklung von Testverfahren und die Durchführung von Mess- und Erprobungsreihen für die Demonstratoren (Produktionstechniken und Baugruppen) unter umfassender Darstellung aller kritischen Betriebszustände stellen damit Schlüsselaktivitäten für die Absicherung der Montageverfahren sowie zur Erbringung des Nachweises der Fertigungsfähigkeit und Prozess-Stabilität der neuen Fertigungsprozesse dar. Im Anschluss an die Validierung der Prozesse über Prinzipversuche sollte der Nachweis der Prozessfähigkeit in einer halbautomatischen Demonstrations-Musteranlage erbracht werden.

Zur Absicherung der vier Hauptmontageschritte mussten alle Prüfungen mit Blick auf statistische Relevanz mit ausreichender Loszahl durchgeführt werden. Zusätzlich erfolgten fertigungsbegleitende Prüfungen auch von Neben- und Support-Prozessschritten. Schließlich wurden Messreihen zum Nachweis der Prozessfähigkeit des jeweiligen Montageschrittes bei vorgegebener Taktzeit durchgeführt.

5.3.1 Validierung Bi-Pack Montage

Vor der eigentlichen Durchführung der Bi-Pack Montage wird eine Qualitätsprüfung der angelieferten Zellen als wesentliche Voraussetzung angesehen. Dieser Aspekt muss beim Bauteil Zelle tiefer betrachtet werden als bei üblichen Kaufteilen, bei denen prinzipiell Stichprobenprüfungen je Charge ausreichen.

Bei der Zelle liegen bei derzeit verfügbaren Herstellungschargen erheblich größere Streuungen im Bereich Ladung, Innenwiderstand etc. vor. Diese Streuungen haben wesentlichen Einfluss auf die Parametrierung endmontierter Energiespeicher, die aus bis zu 96 Einzelzellen bestehen. Deshalb sah Continental die Notwendigkeit für 100% Prüfungen und Dokumentation der gesamten Anliefermenge von Zellen gegeben.

Vor diesem Hintergrund wurden im Zusammenhang mit FUEL verschiedene Alternativen untersucht, auf Demonstrator-Basis einen auf kurze Taktzeit (Ziel deutlich kleiner als $\frac{1}{2}$ min pro Zelle) ausgerichteten Prüf-ablauf zu entwickeln.

Auswahl von Prüfverfahren

Zum Nachweis der Bi-Pack Montage wurden Prüfverfahren entwickelt und mehrere Messreihen durchgeführt. Im Bereich der Prüfverfahren wurden zwischen den in Abbildung 154 dargestellten Verfahren unterschieden. Für Grundlagenversuche wurden ausschließlich zerstörende Verfahren angewandt, um sowohl die Scher- als auch die Schälfestigkeit zu bestimmen. Durch die geringen Schälwiderstände bei den vorhandenen Teststreifen wurden die DOEs der Prozessparameter an scherbeanspruchten Proben durchgeführt.

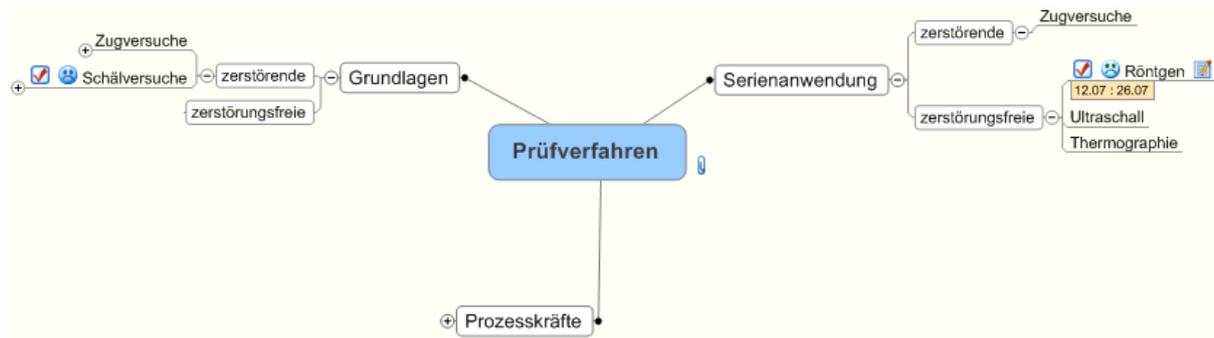


Abbildung 154: Prüfverfahren zur Bi-Pack Montage

Für eine Serienanwendung wurden die nicht zerstörenden, prozessbegleitenden Prüfverfahren Röntgen, Ultraschall und Thermographie betrachtet. Alle Prüfverfahren zielen darauf ab, in der Klebeverbindung eingeschlossene Luft nachzuweisen und den hierdurch erreichten wet-out (Anbindungsfläche) darzustellen.

Die Untersuchung mittels Röntgengerät weist kein zufriedenstellendes Ergebnis auf. Auf den aufgenommenen Aufnahmen konnte die Trennebene nicht ausreichend detailliert genug dargestellt werden. Das Verfahren ist damit nicht geeignet.

Aus den Versuchen zur Ultraschallprüfung zeigte sich, dass eine Prüfung von einseitig geklebten Soft-Pack Zellen sehr gute Ergebnisse liefert und die Trennebene detailliert abbildet, siehe Abbildung 155 rechts oben. Die Anwendung auf ein vollständig geklebtes Bi-Pack (2 Soft-Pack Zellen plus Kühlblech) konnte bis zum Ende des Projektes nicht umgesetzt werden.

Die Thermographiemessung ist aufgrund der nicht einfach zu kontrollierenden Umgebungsfaktoren noch im Aufbau und noch nicht bewertet.

Zur Ermittlung des Einflusses der Prozessparameter beim Kleben (d.h. Anpressdauer, Anpresskraft und Zeit bis zur Belastung) sollten die Kraftverläufe sowohl bei Scher- als auch bei Schälbelastung ermittelt werden können. Abschälende Prüfungen der Zellen von den Kühlblechen und der sich daraus ergebenden Schälfestigkeiten können aufgrund der Gefahr des Zerstörens der Zellkörper nur in speziellen Versuchslaboren geschehen. Diese wurden für einen Versuchsaufbau für FUEL angefragt.

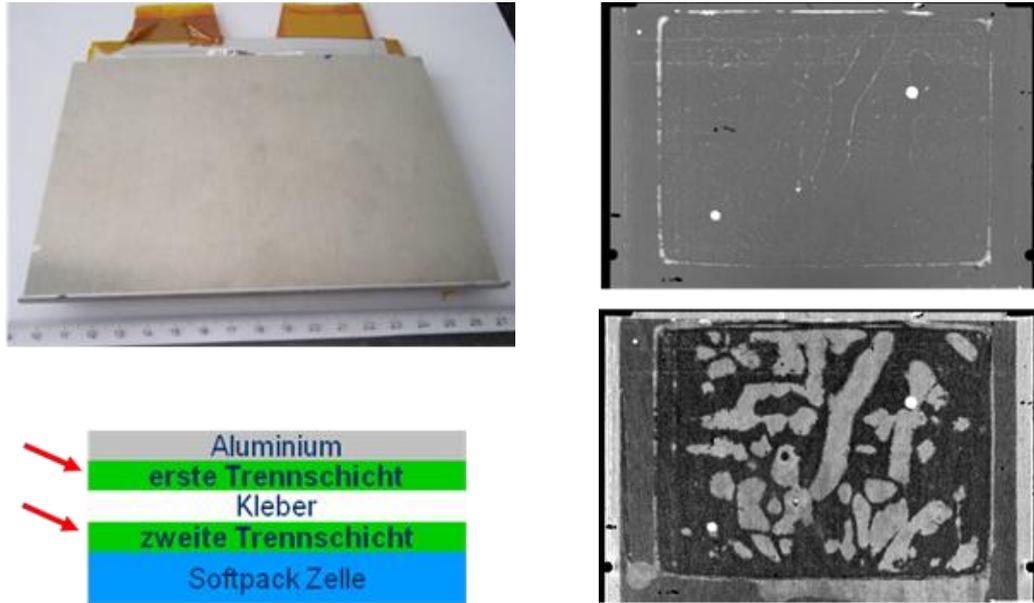


Abbildung 155: Prüfverfahren Ultraschallprüfung

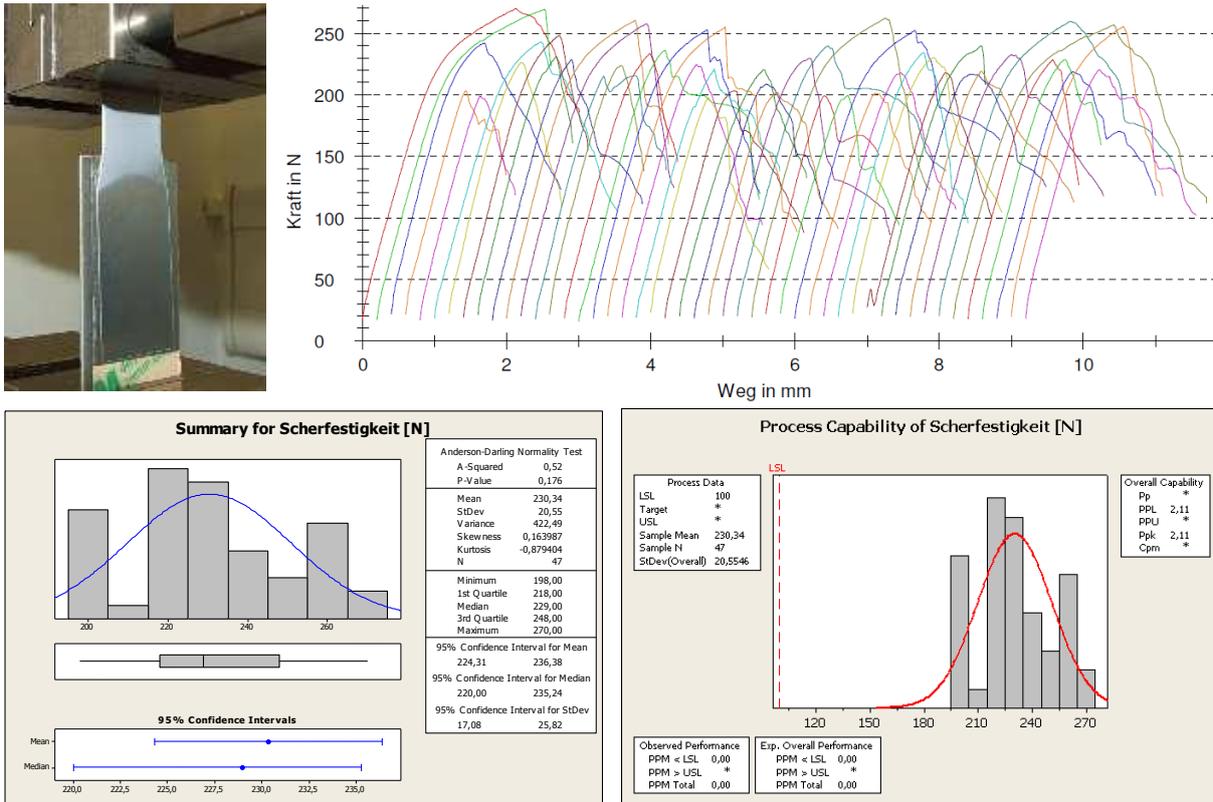


Abbildung 156: Versuchsaufbau zur Scher- / Schälfestigkeitsmessung der Klebe-
verbindung

Abbildung 156 zeigt den Versuchsaufbau zu Scher-/Schälfestigkeitsana-
lysen und die an Probeblechen aufgenommenen Messergebnisse. Diese

belegen, dass die Festigkeitsanforderungen um ein Mehrfaches übererfüllt werden.

Für eine prozessbegleitende, nicht zerstörende Überwachung der Prozesskräfte wurde mittels Druckmessfolien ein erster Aufbau an der Versuchsvorrichtung der Bi-Pack Montage realisiert (Abbildung 157).

Das Verfahren zur Validierung der Prozesskräfte und deren Verlauf im Fügeprozess konnte erfolgreich beim Demonstrator angewendet werden. Es stellt sich jedoch heraus, dass die ermittelten Belastungswerte sehr stark von der Kalibrierung des Sensors abhängen und hierdurch vorerst nur der Verlauf sowie eine quantitative Aussage zur Verbindungsfläche getroffen werden kann. Für eine Serienanwendung kommt das System aufgrund seiner komplexen Integration sowie seiner Nicht-Anwendbarkeit bei „scharfen“ Klebeflächen nicht zum Einsatz.

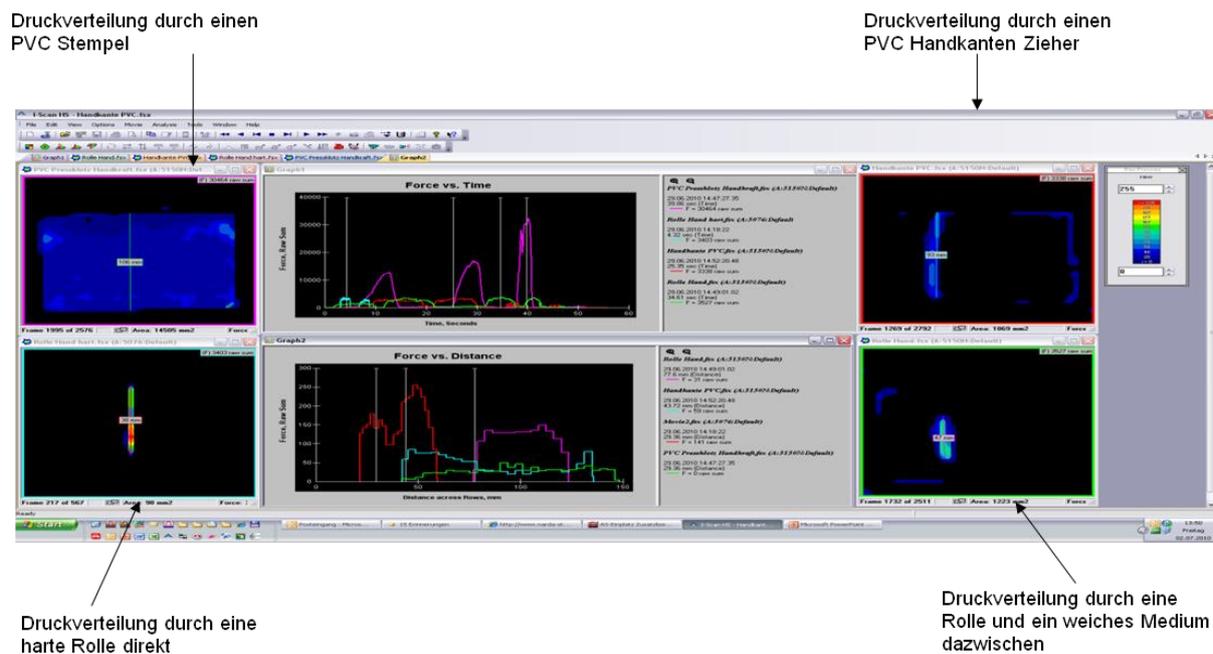


Abbildung 157: Einsatz einer Druckmessfolie für nicht-zerstörende Überwachung der Prozesskräfte

Versuche zum Demonstrator

In enger Zusammenarbeit zwischen ads-tec und Continental wurde ein Demonstrator entwickelt und von ads-tec aufgebaut. Zunächst wurden die Einzelkomponenten in Betrieb genommen und getestet. Besondere Auf-

merksamkeit wurde dabei auf die neuartigen Komponenten der Firma Festo gerichtet:

- Die Funktion des Luftlagers zur Fixierung der recht unebenen Zellen durch Ansaugen am Schwenkmechanismus erwies sich optimal für den Demonstrator geeignet.
- Die sowohl Weg- als auch Kraft-regelbare servopneumatische Achse wurde mit einer zusätzlichen Kraftmessdose kombiniert, um die Prozessüberwachung weiter zu verbessern.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Einzelkomponenten wurden in Kooperation zwischen ads-tec und Continental Versuchsreihen mit dem Teststand durchgeführt:

- Versuchsreihen zum Andrücken von Klebefilm auf Kühlbleche
- Versuchsreihen zum blasenfreien Andrücken der Zellen auf die Kühlbleche (einschließlich dem Ausrichten der Softpackzellen und dem Fügeprozess der Soft-Pack Zellen mit dem Kühlblech)
- Versuche zur Taktzeit sowie
- Versuchsreihen zur Maschinenfähigkeit

Für die Versuchsreihen standen drei verschiedene Typen von Klebefilm zur Verfügung: 3M 966, 3M 8940 und Biolink Translink 130 (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.2.1).

a) Andrücken des Klebefilms

Die Spezifikationen für die Klebebänder wurden gemeinsam von ads-tec und Continental erarbeitet. Aus Gründen der HV-Sicherheit ist es wichtig, dass der Klebefilm so nah wie möglich an die innere Kante des Kühlblech-Fußes geklebt wird (vgl. Abbildung 158).

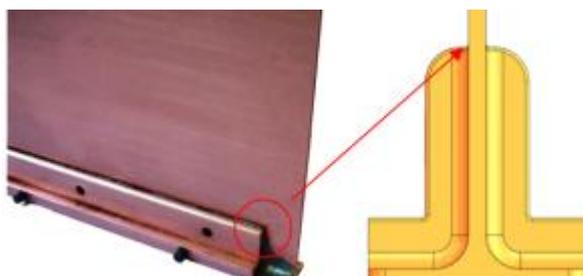


Abbildung 158: Innenradius Kühlblech

Dies stellt die größte Herausforderung beim Bekleben des Kühlblechs dar. Zum Andrücken des Klebefilms an die Fläche des Kühlblechs bieten sich gummierte Rollen an. Zwischen Rolle und Liner gibt es keine Relativbewegung. Eine Gummischicht gleicht Unebenheiten und Positionsfehler aus. Allerdings kann eine Rolle den Klebefilm nicht ganz in die Ecke des Kühlblechs drücken. Alternativ kann ein Element verwendet werden, bei dem der Liner über einen kleinen Radius gleitet. Dadurch kann der Klebefilm weiter in die Ecke gedrückt werden. In Abbildung 159 sind diese beiden Varianten skizziert (Liner und Film jeweils mit 2 mm Dicke, Bild links: Rolle mit $R = 10$ mm, Bild rechts Andrückschuh mit $R = 1$ mm).

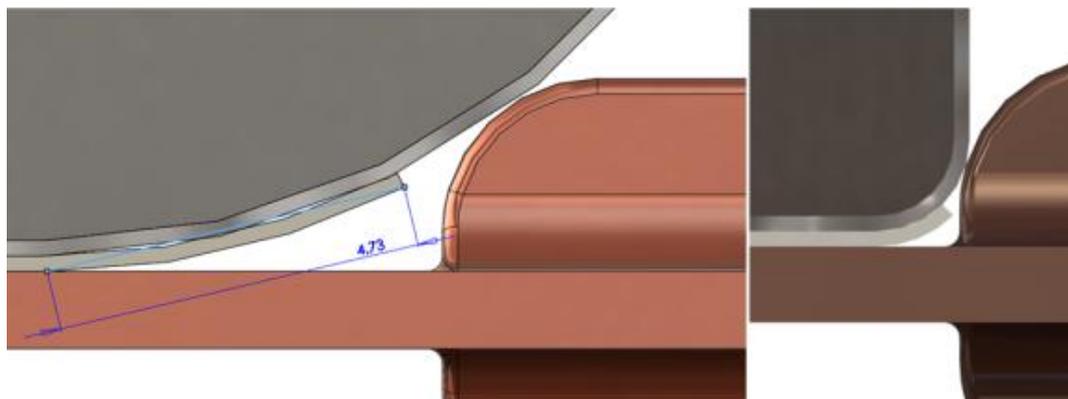


Abbildung 159: Spalt Klebefilm bei verschiedenen Radien

Man erkennt, dass bei beiden Varianten der Klebefilm im Endbereich nicht auf dem Kühlblech aufliegt. Dies erschwert das Abziehen des Liners vom beklebten Kühlblech. Neben Versuchen mit den abgebildeten Varianten wurden auch Versuche mit scharfkantigen Andrückschuhen durchgeführt. Diese verbesserten das Ergebnis kaum und führten außerdem zu starker Abriebbildung (abgerieben wurde die hintere Silikonisierung des Liners), was für einen stabilen Klebeprozess nicht zulässig ist.

Ähnliche Effekte ergeben sich auch durch minimale Abweichungen vom idealen Prozessablauf. Tabelle 9 fasst die Auswirkungen verschiedener möglicher Abweichungen zusammen, die in den Versuchsreihen identifiziert wurden. Sie sind dabei in der rechten Spalte übertrieben dargestellt. Bereits Abweichungen von unter 0,1 mm führten zu instabilen Prozessen.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Prozessstabilität des Ablösevorgangs ist der Release-Wert (Kraft, die aufgewendet werden muss, um den Film vom Liner zu lösen). Dieser erwies sich insbesondere beim Band 3M 8940 als problematisch. Das Band wird auf einem sehr dünnem Kunststoffträger geliefert und muss zum Stanzen der Zuschnitte auf einen

dickeren Liner umgewickelt werden. Für einen stabilen Umwickelprozess muss der Releasewert des neuen Liners wesentlich höher sein als der des alten Liners. Bei den Versuchen mit der ersten Charge war der Releasewert des Liners so hoch, dass sich kaum ein stabiler Abzieh-Prozess darstellen ließ.

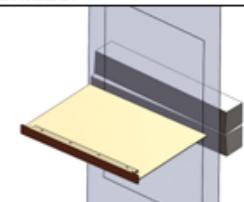
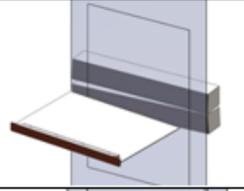
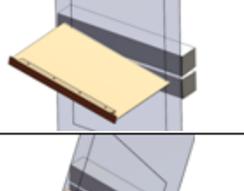
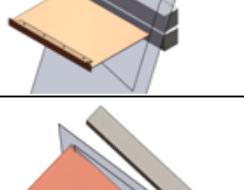
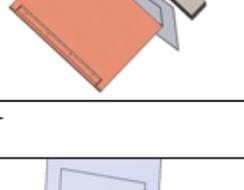
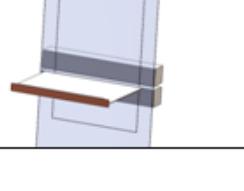
Effekt:	Auswirkung	Skizze:
Oberer und unter Andrückschuh nicht parallel: (vertikale Achse)	Film wird an mindestens einer Ecke nicht in die Ecke gedrückt	
Oberer und unter Andrückschuh nicht parallel: (horizontale Achse)	Band wird einseitig zu stark gespannt. Dadurch Klebefilmabschnitt dort zu lang	
Kühlblech nicht parallel zum Andrückschuh (vertikale Achse)	Band wird einseitig zu stark gespannt. Dadurch Klebefilmabschnitt dort zu lang	
Kühlblech nicht parallel zum Andrückschuh (horizontale Achse)	Klebefilmabschnitt schief aufgeklebt. Dadurch in zwei Ecken zu lang	
Liner läuft schief	Klebefilmabschnitt schief aufgeklebt. Dadurch in zwei Ecken zu lang	
Liner tordiert (Nebeneffekt Bahnlaufregelung)	Klebefilmabschnitt schief aufgeklebt. Dadurch in zwei Ecken zu lang	
Bandspannung zu hoch	Klebefilmabschnitt längt sich	-
Klebefilm außermittig positioniert	Klebefilmabschnitt auf Ober- oder Unterseite zu lang	

Tabelle 9: Abweichungen vom idealen Eintauchvorgang

Als Ergebnis der Versuchsreihen konnten ads-tec und Continental zusammen zusätzliche Spezifikationen für die Klebefilmzuschnitte definieren:

- Länge der Klebestreifen: 224 mm (kürzer als zunächst geplant)

Es zeigte sich, dass für einen stabilen Prozess die Klebepadlänge intensiv betrachtet werden muss. Erste Versuche ergaben eine kritische Verklebung bei Toleranzen zwischen Bauteil und Klebepad von weniger als 1mm. Das sich darstellende Fehlerbild war immer das Abziehen des Klebepads vom Kühlblech beim Entfernen des Liners, siehe Abbildung 160.



Abbildung 160: Fehlerbild – abgelöstes Klebepad bei Entfernung des Liners

Neben konstruktiven Verbesserungen am Demonstrator Prozessprüfstand (s. Beschreibung am Ende des Abschnitts), welche in gemeinsamen „Taskforces“ erarbeitet wurden, gab es eine Änderung der Klebepadlänge. Durch eine Verkürzung um 1mm kann die Anpresseinheit über das Ende des Klebepads gleiten und einen optimalen Ausgangspunkt für das Abziehen des Liners schaffen. Nach dieser Reduzierung wurde der HV Schutz neu betrachtet und zusätzliche Bauteile zum HV-Schutz den veränderten Bauteilen angepasst.

- Release-Wert des Liners so klein wie möglich (Wert hängt von Möglichkeiten des Zulieferers ab)
- Indexdurchbruch ohne Radien (beim Schalten der Lichtschranke auf Radius wird der Zuschnitt außermittig positioniert)

In weiteren Prozessversuchen ergab sich, dass die Positionierung der Klebepads bei den geforderten kleinen Toleranzen durch den Einsatz eines Lichtsschrankensensors genügend genau geregelt wird. Nachbesserungen waren nur im Bereich der Ausprägung der

Positionsstanzung erforderlich. An dieser Stelle wurden die Ausstanzungen nicht mit Radien, sondern mit scharfen Ecken hergestellt, was eine noch genauere Positionierung der Klebeabschnitte zuließ.

b) Blasenfreies Andrücken der Zellen

Neben seinen Hauptfunktionen (Tragen der Zellen, HV-Sicherheit) muss der Klebefilm die Wärmeleitung von den Zellen ins Kühlblech gewährleisten. Dazu ist es wichtig, dass beim Aufkleben der Zellen möglichst wenig Luft eingeschlossen wird. Erschwert wird dies dadurch, dass die Zellen keine glatte, plane Oberfläche haben. Die reale Oberfläche ergibt sich aus der Überlagerung der in Tabelle 10 aufgelisteten Abweichungen.

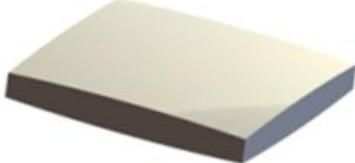
Abweichung	Skizze
Wölbung	
Durchbiegung	
Welligkeit	

Tabelle 10: Abweichungen der Zelloberfläche

Beim Verpressen des Bi-Packs kann die Durchbiegung der Zellen korrigiert werden. Wölbung und Welligkeit können nur durch den Klebefilm selbst ausgeglichen werden. Dazu muss er etwa doppelt so dick sein wie die die maximalen Unebenheiten der Zellen. Beim Pressen der Bi-Packs muss beachtet werden, dass die Flächenpressung an keinem Punkt die zulässigen Werte übersteigt.

In Zusammenarbeit von ads-tec und Continental wurden verschiedene Stempel und Unterlagen zum Pressen im Prozessprüfstand eingesetzt. Zum Erkennen der Luftpinschlüsse wurden die Zellen nicht direkt auf Kühlbleche zu Bi-Packs geklebt. Stattdessen wurden 1 mm starke Makro-

Ion-Scheiben einseitig mit Klebefilm beschichtet und mit einigen Klebestreifen an einem Kühlblech angebracht. Dieses wurde anschließend mit zwei Zellen zu einem Bi-Pack verpresst. Nach dem Lösen der Klebestreifen konnten die Scheiben mit den Zellen abgenommen und bewertet werden. Abbildung 161 zeigen Klebeverbindungen mit unterschiedlichem Wet-Out.



Abbildung 161: Wet Out bei verschiedenen Unterlagen

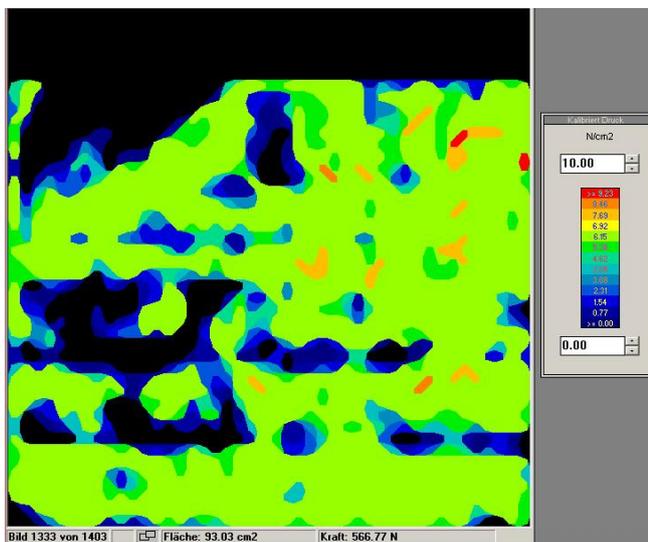


Abbildung 162: Wet-out Fläche nach der ersten Optimierung

Zur Verifikation des Prozessschrittes „Fügen“ (Anpressen zweier Soft-Pack Zellen), kam die sich aus den Vorversuchen bewährte Sensorfolie zum Einsatz. Sie ermöglicht, den Verlauf und die Belastungswerte in den Verbindungsebenen (Soft-Pack Zelle vs. Klebeschicht) während des Prozessablaufs zu erfassen und aufzuzeichnen. Im Rahmen dieser Versuche wurde deutlich, dass eine harte Oberfläche für eine 100% Anbindung der Soft-Pack Zelle an den Kleber nicht geeignet ist. Im nächsten Schritt

wurde die Auflageoberfläche mit verschiedenen Materialien beklebt und Wet-Out-Aufnahmen erstellt.

Die besten Ergebnisse (Abbildung 162) wurden mit plan geschliffenen Aluminiumplatten erzielt, die mit einer 2mm dicken Schicht Neopren beklebt sind. Dabei drücken die Aluminiumplatten die durchgebogenen Zellen eben. Die Neoprenbeschichtung hat zwei Funktionen: Sie dient der elektrischen Isolierung der Platten. Vor allem aber verteilt sie den Druck gleichmäßig auf die gewölbten und welligen Zellen.

c) Maschinenfähigkeit und Taktzeit

Zum Nachweis der Maschinenfähigkeit wurden nach den Versuchsreihen zum Beschichten der Kühlbleche und dem Andrücken der Zellen in Kooperation von ads-tec und Continental auf der Anlage Bi-Packs gefertigt und anschließend auf einer Koordinatenmessmaschine vermessen. Erste Versuchsreihen wurden im Förderzeitraum durchgeführt. Auf den Versuchsergebnissen basierend wurden von ads-tec konstruktive Verbesserungen am Demonstrator vorgenommen, siehe Punkt d).

Im Rahmen der Prozessfähigkeitsuntersuchungen wurde auch die Taktzeit des Prozesses ermittelt. Als kritisch für die Taktzeit hat sich die Schwenkbewegung zum Auflegen der zweiten Zelle erwiesen. Sie wird mit einem pneumatischen Schwenkantrieb durchgeführt. Um eine Verbesserung zu erzielen, wurde die Schwenkeinheit auf Gewicht optimiert.

Das manuelle Be- als auch Entladen fließt nicht in die Taktzeitbetrachtung mit ein. Die aufgenommenen Werte beschränken sich rein auf die automatisierten Abläufe. Die ersten Versuche führten zu einer Taktzeit von 1 min 30 s. Über Software-Optimierungen ließ sich die Taktzeit auf 1 min verkürzen. Die geforderten 20 Sekunden pro Bi-Pack ließen sich nicht realisieren. Durch weitere Maßnahmen, die z.T. nach Projektende FUEL umgesetzt wurden, konnte eine Reduzierung der Taktzeit auf 40 Sekunden erzielt werden.

d) Verbesserungen am Prozessprüfstand

Als Ergebnis der Versuchsreihen wurde der Prozessprüfstand zur Bi-Pack-Montage von ads-tec konstruktiv verbessert. Dazu wurde eine Nachrüstbaugruppe zum Bekleben der Kühlbleche konstruiert. Sie ist in Abbildung 163 dargestellt.

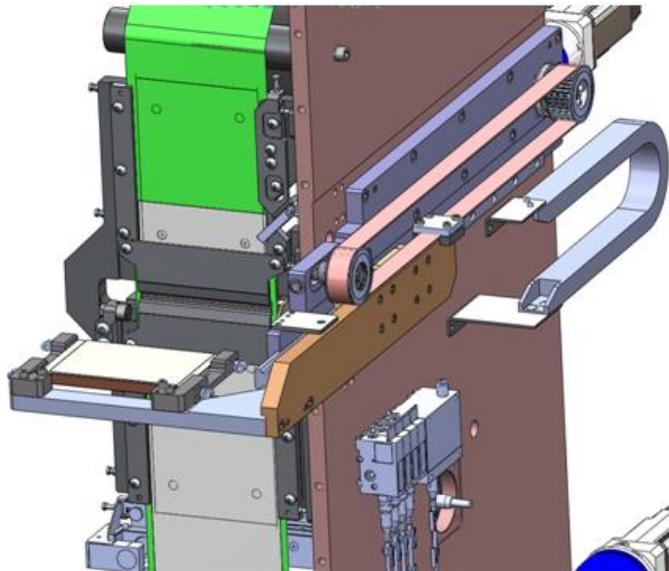


Abbildung 163: Verbesserter Prozessprüfstand Kleben

Durch diese Baugruppe konnte eine Reihe von Verbesserungen erreicht werden: Das Verkürzen des Wegs von der unteren Rolle zur Andrückeinheit sorgt für gleichmäßigere Bandspannung oben und unten. Die seitliche Führung des Bandes führt zu engeren Toleranzen. Die Führung des Bandes verhindert die Torsion des Bandes durch Bahnkantensteuerung. Federnd gelagerte Andrückschuhe führen zu gleichmäßiger Druckverteilung beim Andrücken des Klebebands. Stützrollen verhindern das Durchbiegen der Kühlblechaufnahme. Optimierte Feinverstellungen ermöglichen die Einhaltung enger Toleranzen. Die näher an die Klebestelle gesetzte Bahnkantensteuerung führt zu direkterer Regelung. Weiterhin verbessern Rückhaltebleche den Abzugswinkel des Liners vom Klebefilm.

Die Verfahrensverbesserungen erwiesen sich als geeignet. Ein einwandfrei beklebtes Kühlblech ist in Abbildung 164 zu sehen. Es ist luftblasenfrei und auch toleranzgenau beklebt.

Im Prozessschritt „Ausrichten und Fügen“ der zwei Soft-Packzellen zu einem Bi-Pack bewährten sich die Aufnahmen in Verbindung mit den Sensoren zur Positionsüberwachung sowie Initiierung des Vakuums zur Fixierung der Soft-Pack Zellen. Die Prozessfähigkeit konnte noch nicht erreicht werden, siehe Abbildung 169, jedoch ist hiermit zu rechnen, sobald kleine konstruktive Anpassungen an den Anschlägen vorgenommen werden. Die Implementierung und die darauffolgenden Versuche sind aktuell in der Umsetzung.



Abbildung 164: Optimal beklebtes Kühlblech, frei von Luftblasen

Prozessprüfstand und Prozessablauf

Abbildung 165 zeigt die Gesamtansicht des aktuell verfügbaren Prozessprüfstands. Wesentliche Komponenten stellen das X-Z-Portal zum Kühlblechhandling, der Schaltschrank sowie die beiden Schubladen (Abbildung 166) zum Einlegen der Zellen dar. Beide Schubladen sind baugleich ausgeführt, die Dopplung erlaubt eine kürzere Taktzeit. Die Auflagen für die Zellen sind aus Kunststoff gefertigt, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Im linken Bild liegt nur eine Zelle in der Schublade, die weiße Fläche ist ein Luftlager der Fa. Festo, worüber die Zellen angesaugt werden, um sie zu fixieren. Nachdem die Zellen eingelegt sind, schließt der Bediener die Schublade. So muss er nie in den Arbeitsraum des Portals fassen. Hierdurch ist es möglich, dass das Portal während des Beladen einer Schublade weiterfährt und die Zellen in der anderen Schublade verarbeitet werden.

Unter der Makrolonklappe sieht man die Aufnahme für die Kühlbleche (Y-Achse). Der Bediener legt das Kühlblech ein, anschließend wird es automatisch beklebt.



Abbildung 165: Gesamtansicht Prozessprüfstand



Abbildung 166: Schubladen zum Einlegen der Li-Ionen-Zellen

In Abbildung 167 ist gezeigt, dass vor dem Einlegen der Zellen ihr DMC gescannt wird. Die Prozessparameter werden bei der Verarbeitung jeder Zelle gemessen und in einer Datenbank abgelegt.



Abbildung 167: Scannen des DMC der Zellen vor dem Einlegen



**Abbildung 168: Portal zum Kühlblech-
handling / Pressen**

Das in Abbildung 168 veranschaulichte Portal erfüllt zwei Funktionen. Nach dem Bekleben des Kühlblechs greift es dieses (s. Greifer aus grünem Kunststoff) und legt es auf einer Zelle ab. Nachdem das Kühlblech aufgelegt ist, wird die zweite Zelle auf das Kühlblech geschwenkt. Das Portal kommt anschließend erneut zum Einsatz: Es presst die Zellen und das Kühlblech zusammen. Dazu ist die Z-Achse als servo-pneumatische Achse ausgeführt. Es handelt sich dabei um einen Pneumatikzylinder mit Wegmesssystem, der über Differenzdrücke sowohl positions- als auch kraftgeregelt fahren kann.

Schlussfolgerung

Die Versuche mit dem Prozessprüfstand zur Bi-Packmontage zeigen, dass der prinzipielle Einsatz als Fertigungsverfahren in der Herstellung von Bi-Packs möglich und sinnvoll ist. Auf Basis der Versuchsreihen konnten konstruktive Verbesserungen umgesetzt werden. Für eine spätere Serienmaschine sind noch Detaillösungen zu überarbeiten. Eine Aussage zur Langzeitstabilität der einzelnen konstruktiven Umsetzungen kann auf Basis der während der Laufzeit von FUEL gewonnenen Ergebnisse noch nicht getroffen werden. Daher laufen die Arbeiten nach FUEL weiter.

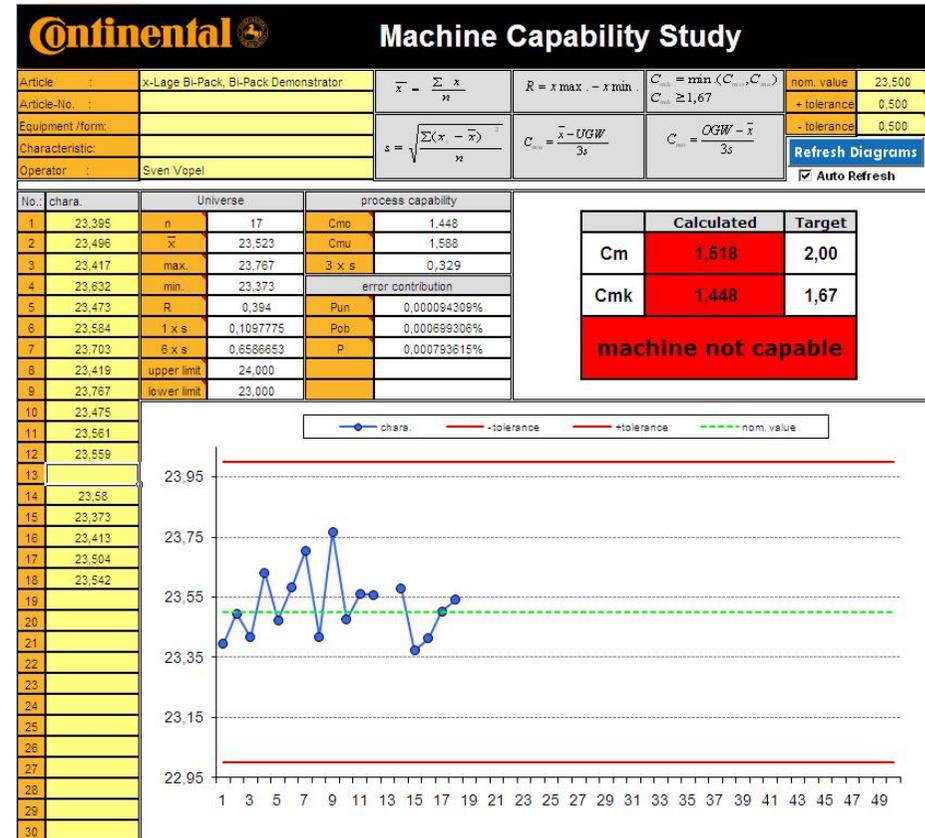
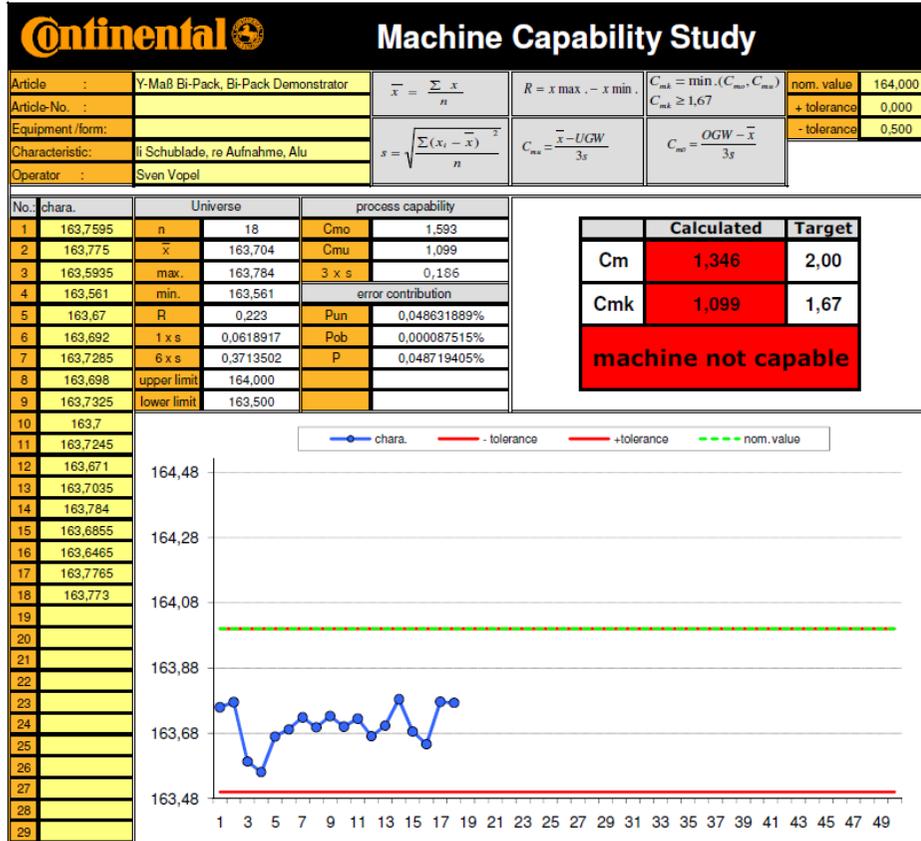


Abbildung 169: Auszug aus den Prozessfähigkeitsuntersuchungen zur Y-Lage (links) und X-Lage (rechts)

5.3.2 Validierung Zell-Modulmontage

Mit dem Demonstrator „Zellmodulmontage“ (Abbildung 170) werden Zellmodule hergestellt.



Abbildung 170: Demonstrator „Zellmodulmontage“

Zur Verifizierung der Lithium-Ionen-Einzelzellen dient die Prüfeinrichtung in Abbildung 183. Diese dient zur Erfassung von zellspezifischen mechanischen und elektrischen Messgrößen. Für die Verfolgung der einzelnen Zellen im Hinblick auf die Erfüllung der elektrischen Spezifikation im Verbund im zusammengebauten Energiespeicher wurde ein „Light“ Rückverfolgbarkeitssystem auf Basis des MES-Systems geplant (Manufacturing Execution System) und umgesetzt.

Um die Verarbeitung der Zellen im Projekt zu gewährleisten, waren zunächst die Voraussetzungen zu definieren, die ein beschädigungsfreies Handling der Zellen sicherstellen. Hierzu wurden Festlegungen zu mehreren Kriterien erarbeitet.

- *Anlieferungsqualität der Zellen:* Hierzu zählen Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit der Zellkörper, die Sicherstellung der Position der Siegelnaht sowie die Position der Ableiterpaare in Relation zum Zellkörper.
- *Verpackungsdefinition der Trace:* Im Vordergrund stehen die Voraussetzungen an Handhabbarkeit, Steifigkeit, Positionsgenauigkeit der Zellen in der Verpackung, Lageorientierung der Zellen in den Verpackungseinheiten, ferner der beschädigungsfreie Transport der Zellen.
- *Identifikation der Zellen durch einen Identifikationscode:* Dazu wurden Codierungsart, Eingangsgrößen sowie Größe und Position des Identifikationscode definiert.
- *Definition zellspezifischer Messgrößen:* Sowohl mechanische Größen (mechanischen Messgrößen, Toleranzlagen, mechanische Belastung der Zellen beim Handling) als auch elektrische Parameter (Polarität, OCV⁵² und RDC⁵³) wurden festgelegt.

Für den Testablauf wurde unter Berücksichtigung der Kernprozesse ein Flowchart erstellt, das den Ablauf einer Testeinrichtung für eine mögliche Einsatzmöglichkeit in der Serienfertigung abbildet (Abbildung 171). Die Kernprozesse dabei bestehen in der mechanischen Vermessung der Zelle, elektrischen Tests der Zelle sowie in der Rückverfolgbarkeit der Eingangs- und Prüfdaten über das MES-System.

Unter Berücksichtigung der im Flowchart dargestellten Kernprozesse und der Einbeziehung der vorliegenden Eingangsparameter wurde bei TAEM ein Demonstrator für das Projekt FUEL aufgebaut (Abbildung 183). Dabei wurde ein flexibler Kuka Roboter eingesetzt. Dieser ermöglichte eine freie Gestaltung der geplanten Abläufe sowie die Sicherstellung der gesetzten Ziele bezüglich der Simulation bei späterer Industrialisierung.

⁵² OCV: Leerlaufspannung

⁵³ RDC: DC Innenwiderstand (Ermittlung nach dem $\Delta U/\Delta I$ – Verfahren)



Prozessfluss

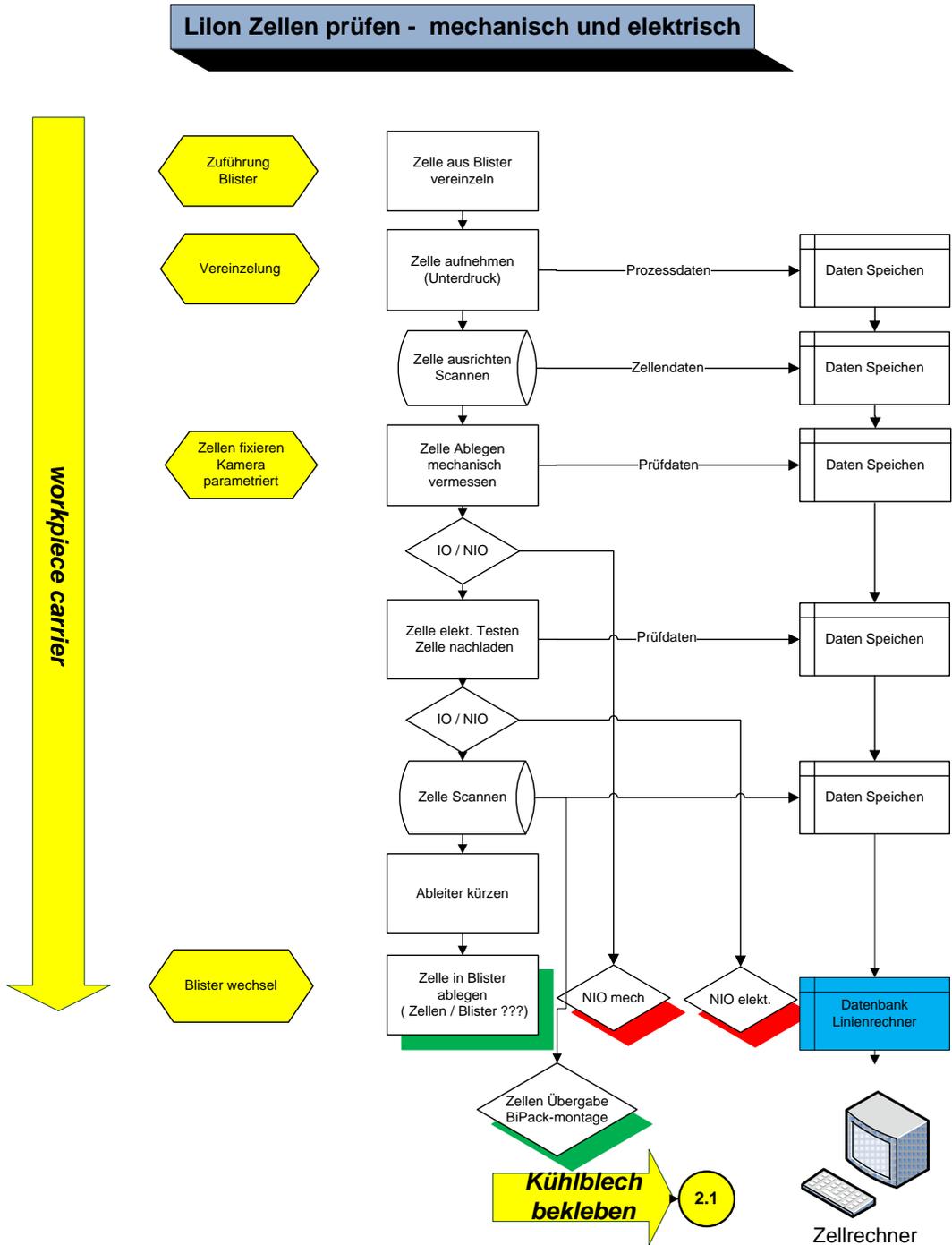


Abbildung 171: Flowchart zum Prozessablauf „Li-Ionen-Zellen prüfen“

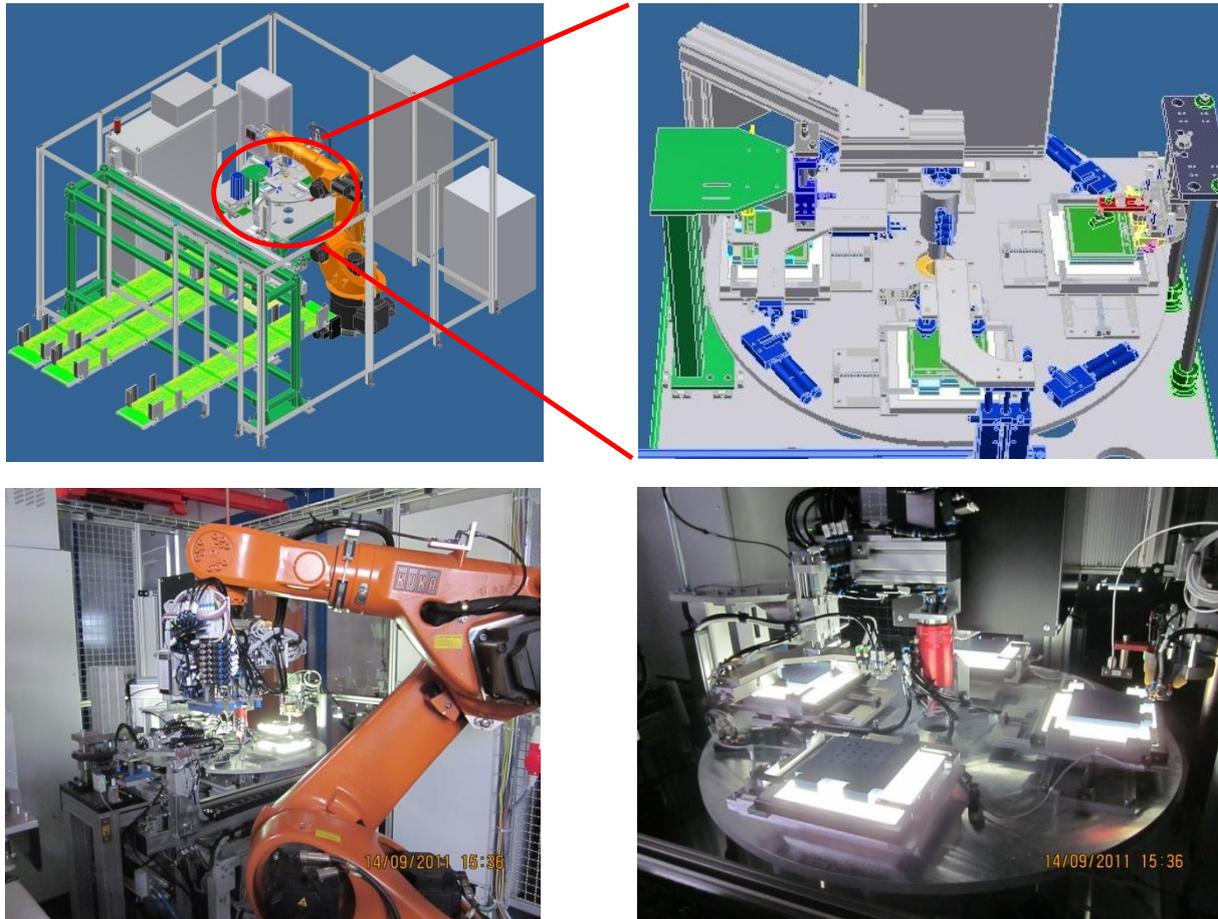


Abbildung 172: „Demonstrator“ zur Verifikation der Lithium-Ionen-Einzelzellen (oben: 3D Planung, unten Realisierung in FUEL)

Der eigentliche Prüfablauf bei der Verifikation der Einzelzellen besteht aus mehreren Schritten:

Schritt 1: Blister zuführen und Zellen beschädigungsfrei aus Blister entnehmen

Für die Zuführung der einzelnen Zellen wurde der vom Zellenlieferanten eingesetzte Transport-Blister gewählt. Bedingt durch die nicht stabile Ausführung der Blister mussten im Laufe der Projektdurchführung Maßnahmen definiert werden, die eine sichere Vereinzelung der Blister und Zellen gewährleisten. Durch eine entsprechende Ausführung der Zuführung wurde eine Autonomie von 30min erreicht, die dem Projektziel entsprach.

Um Beschädigungen der Zellen auszuschließen, musste der max. Ansaugdruck durch Vakuum verifiziert werden (zur Fixierung der Zellen bei Handling und Transport wurde Vakuum gewählt). Durch den Einsatz von

Injektoren konnte eine Verifizierung des Unterdrucks (Ansaugdruck) ermittelt werden, bei dem die Zelle nicht beschädigt wird. Über die Einbindung der Injektoren in die Steuerung wurde eine Überwachung vom voreingestellten Unterdruck sichergestellt. Zur Verhinderung einer Überbelastung der Zellkörper (max 4N/cm²) wurden gefederte/gummierte Sauger gewählt, die eine Überlast verhindern.

Für den Transport der Zelle inkl. Roboterhandling erfolgten spezielle Untersuchungen mit Dummy-Zellen. Ein Ziel dabei war, sicherzustellen, dass die Zelle auch im Fall eines NOTAUS im Greifer verbleibt. Der Unterdruck an den Injektoren wurde – um ein sicheres Greifen der Zellen bei Beschleunigungen und den wirkenden Massenkräften abbilden zu können – so variiert, dass die Zelle bei einer Roboterleistung von 50-100% sicher und beschädigungsfrei im Handling verbleibt. Eine besondere Herausforderung dabei stellte der sogenannte „Hart-Stopp“ (NOTAUS) der Anlage dar, welche durch geeignete Wahl der Injektoreinstellungen erfüllt werden konnte.

Schritt 2: Zellenidentifikation - Dateninhalt scannen, Verifizierung der Eingangsgrößen

Für die Abbildung der Identifikation der Zellen wurde eine Matrix erstellt, die in einem Data Matrix Code (DMC) vereinheitlicht wurde. Der Inhalt des DMC sollte die Eingangsgrößen der Zelle darstellen, die vom Lieferanten der Zelle auf die Zelle aufgebracht werden. Dabei ist die laufende Nr. der Zelle die Führungsgröße für die Rückverfolgbarkeit der Zelle für alle nachfolgenden Prozesse (Abbildung 173).

Während der Projektlaufzeit konnte vom Lieferanten der Zellen die geplante Matrix nicht umgesetzt werden. Daher wurden von TAEM selbst DMC Labels als DMC Code erzeugt und auf die Zellen aufgebracht, um die Rückverfolgbarkeit darstellen zu können. Als Führungsgröße wurde die laufende Nummer gewählt, zu der in allen Prozessen die Einzelteile, Unterbaugruppen und Prozessparameter zugeordnet werden. Diese können bis zum fertigen Energiespeicher rückverfolgt werden.

Die Vorgehensweise wurde mit dem Projektpartner ads-tec diskutiert und bei den Demonstratoren „Bi-Pack kleben“ und „Ableiter kontaktieren“ erfolgreich umgesetzt. Um die Kette zu schließen, wurde die Vorgehensweise am Demonstrator „Bi-Pack stacken“ durch die TAEM in den Ablauf integriert. Zu jeder SEMI-, bzw. FIN-Stufe wurde ein XML-Muster definiert,

welches sowohl die Stammdaten als auch die Prozessergebnisse enthält. Für die Datensammlung und Auswertung wurde bei der TAEM ein File-Server mit entsprechender Reporting Software installiert (Abbildung 174 - Abbildung 176). Das auf XML-Basis arbeitende reduzierte Traceability-System (Light-MES) ist für die Belange des Forschungsprojekts FUEL völlig ausreichend. Für eine spätere Serienproduktion sind zusätzlich zur Tracability auf Einzelteilbasis auch statistische Auswertungen der gesammelten Daten erforderlich. Daher ist der Umstieg auf das bei Continental eingesetzte Standard-MES-System vorgesehen.



	Typ ¹	Ser. Number ²	Capacity ³ [Ah]	OCV ⁴ [V]	Ri (AC) ⁵ [mΩ]	Ri (DC) ⁶ [mΩ]	Date ⁷
Code Content i. e.	LGM02	00JC26M1027	6.134	3.754	1.33	2.22	20101102
Characters	5	11	5	5	4	4	8

Abbildung 173: Zelle Scannen



Abbildung 174: Daten Scannen

FUEL Report

Material: Zelle montiert Id: 01011316846

Continental
Nürnberg

01011316846 (Zelle montiert)

- 01011316854 (Zelle verklebt)
 - 01011316853 (Zelle getestet)
 - 01011316847 (Zelle)
 - 01011316852 (Zelle getestet)
 - 01008324078 (Zelle)
 - 01011316851 (Klebefolie)
 - 01011316850 (Kühlblech)
- 01011316842 (Kühler)
 - 01011316841 (Gehäuse)

Komponente:

Id	Materialnummer	Materialname	Created
01011316846	5840000000001	Zelle montiert	01.11.2010 13:0...

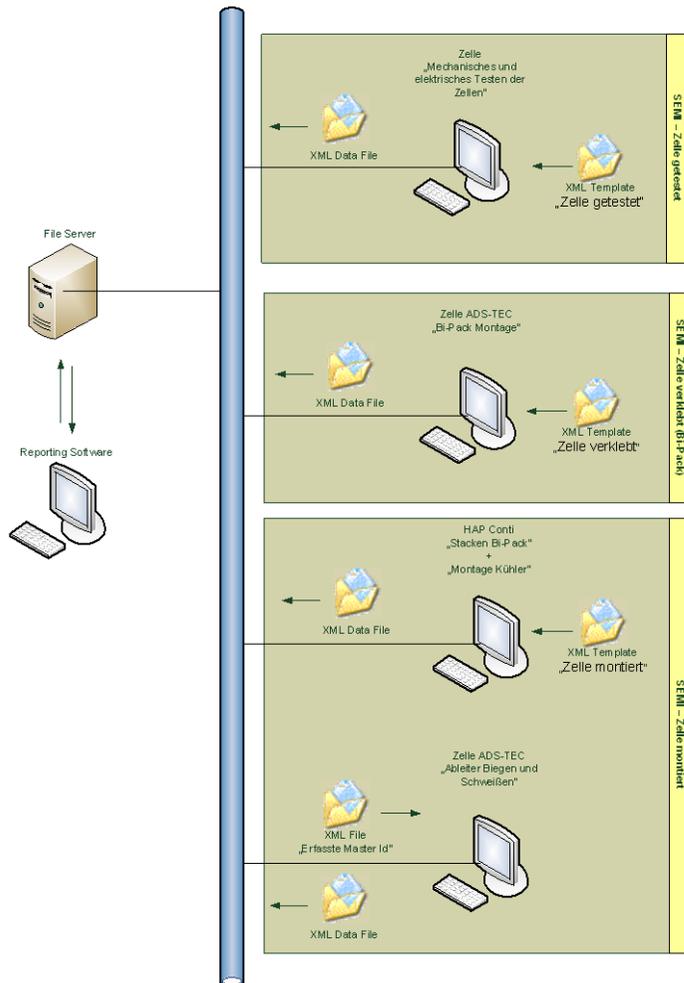
Operations:

Nr	Beschreibung	Arbeitsstation	Time Stamp
10	Bi-Pack in Gehäuse stacken	Handarbeitsplatz HAP-1	01.11.2010 15:03:45
20	Kühler montieren	Handarbeitsplatz HAP-2	01.11.2010 15:08:45
30	Ableiter Biegen	Zelle ADS-Tec	01.11.2010 15:08:45
40	Ableiter Schweißen	Zelle ADS-Tec	01.11.2010 15:13:45

Tests:

Nr.	Description	Value	Einh.	UL	LL	P/F
10	Drehmoment	0,5	N	0,8	0,2	P
20	Einschraubtiefe	0,5	mm	0,8	0,2	P
30	Drehwinkel	0,5		0,8	0,2	P
40	Drehmoment	0,5	N	0,8	0,2	P
50	Einschraubtiefe	0,5	mm	0,8	0,2	P
60	Drehwinkel	0,5		0,8	0,2	P

Abbildung 175: Auszug aus einer Reporting-Datei (Traceability auf Einzelteilbasis)



Mechanische und elektrische testen der Zelle

Zelle getestet	Vorgangsnummer	Arbeitsplatz	Vorgangsbezeichnung	Komponentenzuordnung	Zurückgegebene Messwerte	Bemerkung	Visualisierung
	10	Zelle B&O	Zelle mechanisch prüfen	RAV: Charger/Einzelteil-Id vom Lieferanten	Bemessung der Messpunkte I-n (Ohm) Luftdruck Greifer [bar]	Zellen werden entnommen und mechanisch vermessen/geprüft	
	20	Zelle B&O	Zellen elektrisch prüfen	-	Spannung [V] Innenwiderstand AC [uOhm] Innenwiderstand DC [uOhm] Poking Luftdruck Greifer [bar]	Zellen werden elektrisch getestet	

Montage zweier Zellen zu einem Bi-Pack

Zelle verklebt (Bi-Pack)	Vorgangsnummer	Arbeitsplatz	Vorgangsbezeichnung	Komponentenzuordnung	Zurückgegebene Messwerte	Bemerkung	Visualisierung
	10	Zelle ads.tec	Klebefolie auf Kühlblech aufbringen	RAV: Charge Klebefolie RAV: Charge Kühlblech	Anpresskraft [N] Vorschub [mm/min]	Klebefolie wird auf das Kühlblech aufgebracht Charge von Kühlblech und Klebefolie wird erfasst	
	20	Zelle ads.tec	Zelle A mit Kühlblech und Zelle B verkleben	SEMI: Zelle B	Anpresskraft [N] Luftdruck Greifer [bar]		

Montage der BiPacks in ein Gehäuse

Zellen montiert	Vorgangsnummer	Arbeitsplatz	Vorgangsbezeichnung	Komponentenzuordnung	Zurückgegebene Messwerte	Bemerkung	Visualisierung
	10	Handarbeitsplatz HAP-1	Bi-Pack in Gehäuse stacken	RAV: Gehäuse SEMI: Zelle verklebt (Bi-Pack)	-	Trace-Id auf Gehäuse aufbringen Charge Gehäuse erfassen Biegen auf die Trace-Id auf dem Gehäuse werden nun n Bi-Packs erfasst	
	20	Handarbeitsplatz HAP-2	Kühler montieren	RAV: Kühler	Für jede Schraubposition müssen der > Drehmomente [Nm] > Einschraubtiefe [mm] > Drehwinkel [°] erfasst werden.	Kühler wird auf das Gehäuse geschraubt	
	30	Zelle Ableiter Biegen und Schweißen (ads.tec)	Ableiter Biegen	-	-	Ableiter werden gebogen	
	40	Zelle Ableiter Biegen und Schweißen (ads.tec)	Ableiter Schweißen	-	Für jede Schweißposition müssen der > Schweißstrom [A] > Schweißenergie [J] > Schweißzeit [s] erfasst werden.	Ableiter werden verschweißt. Die zurückgegebenen Messwerte wurden nach Fluidsprache mit dem Lieferanten definiert.	

Abbildung 176: File-Server und Reporting System zur Speicherung aller Stamm- und Prozessdaten

Schritt 3: Zelle ausrichten und in einer Aufnahme positionieren

Die Position der Zellen im Blister weist eine sehr hohe Toleranz auf. Daher war es notwendig, für die Prozesse „mechanische und elektrische Prüfung“ die Zelle in einer Ausrichtstation auszurichten. Die vom elektrischen Tester geforderte Positionsgenauigkeit von $\pm 0,5\text{mm}$ konnte nur durch die Integration einer Ausrichtstation erreicht werden.

Da die elektrischen Prüfkontakte der Prüfstation in x und y Richtung fixiert sind, ist es für die Ausrichtstation maßgebend, die \pm -Ableiterkontakte der Zelle auf der Rundtischaufnahme in x- und y-Richtung entsprechend den Toleranzvorgaben zu positionieren (s. Abbildung 177). Für die Ausrichtgenauigkeit der Zelle in der Ausrichtstation wurde eine Maschinenfähigkeitsanalyse der Ableiterposition auf der Rundtischaufnahme durchgeführt. Das Ergebnis bestätigte die Richtigkeit des gewählten Ausrichtprinzips.



Abbildung 177: Positionierung der Zelle in der Ausrichtstation

Schritt 4: Zelle optisch vermessen (Kamera)

Mit der optischen Vermessung der Zelle sollte der Anlieferungszustand der Zelle in ihrer mechanischen Kenngrößen verifiziert werden. Dabei wurde die TAEM Zellenzeichnung (Abbildung 179) mit den entsprechenden Toleranzangaben zugrundegelegt. Aus der Zeichnung wurden die Messpunkte für die mechanische Prüfung definiert, die für die Systemintegration und nachfolgende Prozessschritte als relevant erachtet wurden.



Abbildung 178: Optische Vermessung der Zelle

Um die Eignung des Messmittels für die Aufgabe zu bestimmen, wurden Messmittelfähigkeiten nach DIN für ein automatisch eingesetztes Messmittel analysiert. In die Messmitteluntersuchung wurden alle 12 Messpunkte und alle 4 Nestpositionen auf dem Rundtisch einbezogen (Abbildung 180).

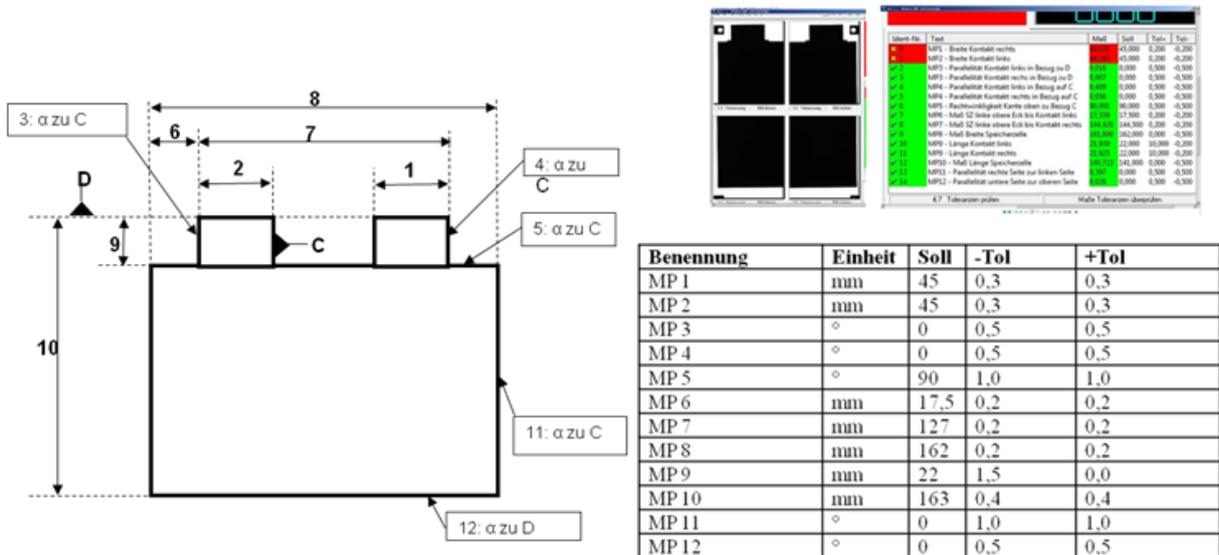


Abbildung 179: Ergebnis der mechanischen Prüfung (Kamera)

MSA TYP 1 - Cgk >1,33												
Meßpunkte	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
Toleranz	0,4	0,4	1	1	1	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	1	1
	mm	mm	Winkel °	Winkel °	Winkel °	mm	mm	mm	mm	mm	Winkel °	Winkel °
Nest1	5,30	7,05	2,09	3,04	2,66	1,87	3,98	1,72	8,37	4,83	7,48	6,89
Nest2	9,44	8,71	2,60	2,00	3,39	1,80	5,24	2,12	9,50	4,41	7,48	3,33
Nest3	4,78	7,05	3,13	2,31	3,38	2,96	4,77	2,61	7,44	5,87	2,70	5,83
Nest4	6,27	6,80	2,49	2,14	3,97	1,92	3,51	2,10	9,48	3,99	3,58	1,50

MSA TYP 3												
Meßpunkte	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12
Toleranz	0,4	0,4	1	1	1	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	1	1
	mm	mm	Winkel °	Winkel °	Winkel °	mm	mm	mm	mm	mm	Winkel °	Winkel °
%GRR=	2,71	5,16	8,74	5,46	4,27	8,67	3,85	7,52	4,90	8,18	4,30	6,29

Result % R&R	0-10% acceptable >10-30% limited acceptable > 30% not acceptable
--------------	--

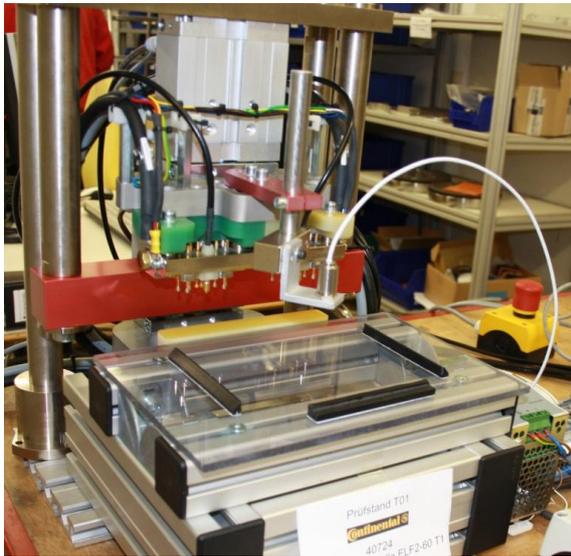
Abbildung 180: Ergebnis der Messmittelfähigkeits-Untersuchung

Schritt 5: Zellelektroden kontaktieren und elektrische Größen überprüfen

Für die Verifizierung der elektrischen Kenngrößen wurde eine Prüfeinrichtung in das System integriert, die speziell für die Prüfung von Lithium-Ionen-Zellen ausgelegt ist. Mit der Vorgabe der Prüfparameter (Leerlaufspannung und Polarität, DC- und AC-Innenwiderstand, State-of-Charge, s. Abbildung 181, Abbildung 182) sollten die Zellen elektrisch auf die im Anlieferungszustand vorhandene Spannung überprüft und gegebenenfalls auf die für den Betrieb relevante Spannung nachgeladen werden.



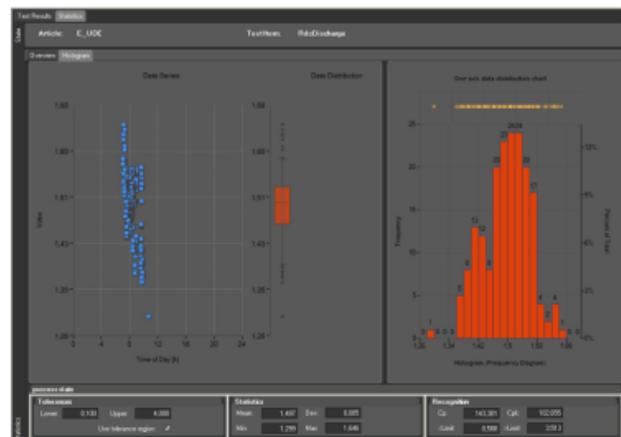
Abbildung 181: Zellelektroden kontaktieren, Überprüfung el. Größen



Test Results

IO 2 NIO 3 01008324011 Testcycle 7.641 s

State	No.	Description	Min.Tol.	Value	Max.Tol.	Result	OK Counter	NOK Counter
✓	1	Voltage Polarity	1	1	1	OK	0	0
✓	2	Zellen Temperatur [°C]	20	20	30	OK	5	0
✓	3	Umgebungstemperatur [°C]	15	15	35	OK	5	0
✓	4	Ladepulsungspannung [V]	3.2	3.2	4	OK	5	0
✓	5	AC Innenwiderstand [mΩ]	0.3	0.3	1.5	OK	2	3
✓	6	DC Innenwiderstand Entladepuls 1 [mΩ]	0	0	8	OK	5	0
✓	7	Strom Entladepuls 1 [A]	2	2	22	OK	5	0
✓	8	DC Innenwiderstand Entladepuls 2 [mΩ]	0	0	8	OK	5	0
✓	9	Strom Entladepuls 2 [A]	2	2	22	OK	5	0
✗	10	Vollgradent Entladepuls 1 [mV/s]	0	0	10	Disabled	0	0
✗	11	Vollgradent Entladepuls 2 [mV/s]	0	0	10	Disabled	0	0
✗	12	DC Innenwiderstand Ladepuls 1 [mΩ]	0	0	8	Disabled	0	0
✗	13	Strom Ladepuls 1 [A]	-4	0	16	Disabled	0	0
✗	14	DC Innenwiderstand Ladepuls 2 [mΩ]	0	0	8	Disabled	0	0
✗	15	Strom Ladepuls 2 [A]	2	0	22	Disabled	0	0
✗	17	Vollgradent Ladepuls 1 [mV/s]	0	0	10	Disabled	0	0
✗	18	Vollgradent Ladepuls 2 [mV/s]	0	0	10	Disabled	0	0
✓	18	Ladepulsung Zielspannung [kOV][V]	3.2	3.2	4	OK	0	0



Prüfumfang elektrisch

1. Spannung u. Polarität
2. DC Innenwiderstand
3. AC Innenwiderstand
4. Umgebungs- / Prüfling temp. Vergleich

Abbildung 182: Ergebnis der elektrischen Prüfung

Ein weiteres Ziel bestand in der Verifizierung der elektrischen Parameter in Abhängigkeit von der Umgebungs- bzw. Zelltemperatur. Für die Verifizierung der elektrischen Parameter in Abhängigkeit von der Lagerungszeit wurden zusätzliche Tests eingeplant.

Schritt 6: Bei Bedarf auf die Sollkenngrößen laden

Schritt 7: Messergebnis überprüfen und mit den Vorgaben im Prüfplan vergleichen

Schritt 8: Zellen selektieren nach i.O. bzw. nicht i.O.

Die nachfolgenden Fotos des Demonstrators (Abbildung 183 und Abbildung 184) verdeutlichen das automatisierte Handling der Zellen und die Prüfung.



Abbildung 183: Demonstrationsanlage zum Test der Zellen

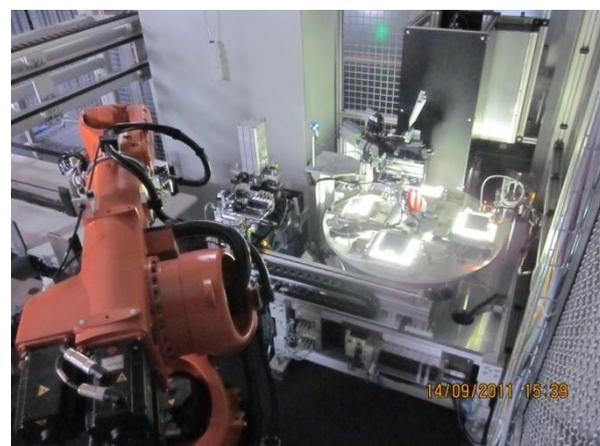


Abbildung 184: Automatisierung der Prüfung der Zellen

Testreihen mit dem Prozessprüfstand Zellkontaktierung

Nach dem Aufbau des Demonstrators zur Zellkontaktierung wurden zunächst die Einzelkomponenten in Betrieb genommen und getestet. Für erste Schweißversuche zur Zellkontaktierung wurden aus wirtschaftlichen und Sicherheitsgründen nicht komplette Batteriemodule, sondern Dummies verschweißt. Dafür wurde ein Schweißdummy entworfen (s. Abbildung 185), der mit Ableitern bestückt im Werkstückträger montiert werden kann.

Mit diesem Werkstückträger wurden im Arbeitspaket AP3 bisher 500 Ableiterpaare gebogen und geschweißt. Dabei konnten die Anforderungen an die Festigkeit und den elektrischen Widerstand der mit dem neuen Verfahren erstellten Schweißverbindungen gut erfüllt werden.

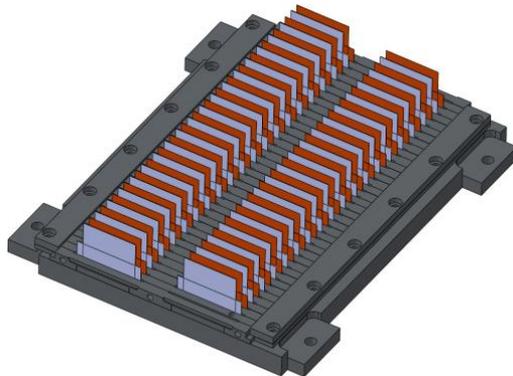


Abbildung 185: Dummy für Schweißversuche

Bei den Schweißversuchen wurde in folgenden Punkten Verbesserungspotential festgestellt: Das sehr weiche Aluminium 99,5 der Ableiter verklebt schon nach wenigen Schweißungen die Riffelung im Amboss. Die Biegebewegung auf einer Ebene führt teilweise zu fehlerhaften Biegungen. Mit einem größeren Hub des Schweißgeräts kann das Gerät unter dem Modul besser verfahren werden und direktere Wege fahren.

Auf Basis dieser Versuchsergebnisse wurden am Prozessprüfstand zur Zellkontaktierung verschiedene konstruktive Verbesserungen durchgeführt: Mehrere Varianten für alternative Riffelungen der Ambosse wurden angefertigt und getestet. Für die Hubbewegung des Biegemechanismus wurde der Zylinder durch eine Servoachse ersetzt. Dadurch kann der Biegevorgang auf zwei Ebenen erfolgen. Auch für die Hubbewegung der Sonotrode wurde eine Servoachse nachgerüstet. Mit dem so verbesserten

Demonstrator wurden von ads-tec und Continental weitere Versuche zur Zellkontaktierung durchgeführt.

Prozessprüfstand Zellmodulmontage: Schweißstand

Ein Foto des Schweißprüfstands ist in Abbildung 186 zu sehen. Der Werkstückträger für ein Zellmodul mit den eingelegten Bipacks und den bereits gebogenen Zelleleitern ist in Abbildung 187 links zu sehen. Die rechte Abbildung zeigt das Ergebnis der Ultraschall-Rollnaht-Schweißung. Zum Schweißen wird der Kunststoffadapter aufgesetzt (Abbildung 188).



Abbildung 186: Schweißstand zur Zellmodulherstellung

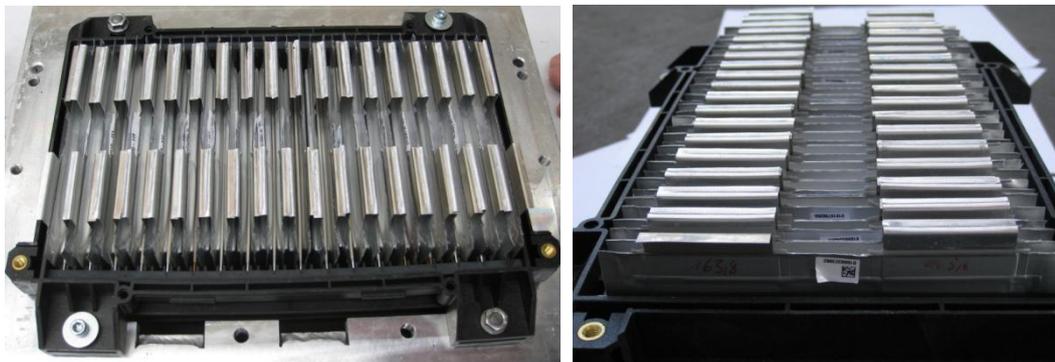


Abbildung 187: Zellmodul mit gebogenen Zelleleitern vor und nach der US-Rollnahtverschweißung im Schweißstand



Abbildung 188: Zellmodul im Werkstückträger

Stand Validierung der Zellmodulmontage bei Projektende

Die Hauptaufgabe der Modulmontage war die Ermittlung von Bestückungskonzepten, die in einer Serienfertigung als sicheres Konzept abgebildet werden können. Dabei war eine Implementierung eines Rückverfolgbarkeitskonzeptes (s. Abschnitt 5.3.2.1) eine der Teilaufgaben. Bedingt durch Verzögerungen im Projektfortschritt konnten durch den Verbundpartner ads-tec zwar Layout-Varianten entwickelt werden, die einen möglichen Serienablauf darstellen. Die Umsetzung und Validierung konnte während der Projektlaufzeit von FUEL nicht mehr stattfinden.

Um dennoch die Montageabläufe simulieren zu können, wurde eine Hand-Stack-Einrichtung umgesetzt (s. Demonstrator in Abbildung 189). Diese Einrichtung wurde auf Basis der von Firma ads-tec entwickelten Werkstückträger ausgerichtet. Die Abläufe wurden entsprechend angepasst. Bedingt durch die Realisierung einer Hand-Stack-Einrichtung zur Verifizierung der Abläufe, war die Prozessfähigkeit bzgl. Fügekräfte und Positionsgenauigkeit nur bedingt nachweisbar.

Die Hand-Stack-Einrichtung wurde wie die anderen im Projekt umgesetzten Demonstratoren mit einem Rückverfolgbarkeitssystem ausgerüstet. Dieses schließt die Kette der Rückverfolgung der einzelnen Batteriezelle bis zu einem komplettierten Energiespeicher. Jede Zelle wird einzeln eingescannt und dem Platz im Batterieblock zugeordnet. Der Batterieblock erhält selbst eine Identifikation, der die einzelnen Zellen zugeordnet werden. Die Batterieblock-Identifikation dient bei nachfolgenden Prozessschritten als Leitfaden für die weitere Rückverfolgbarkeit.

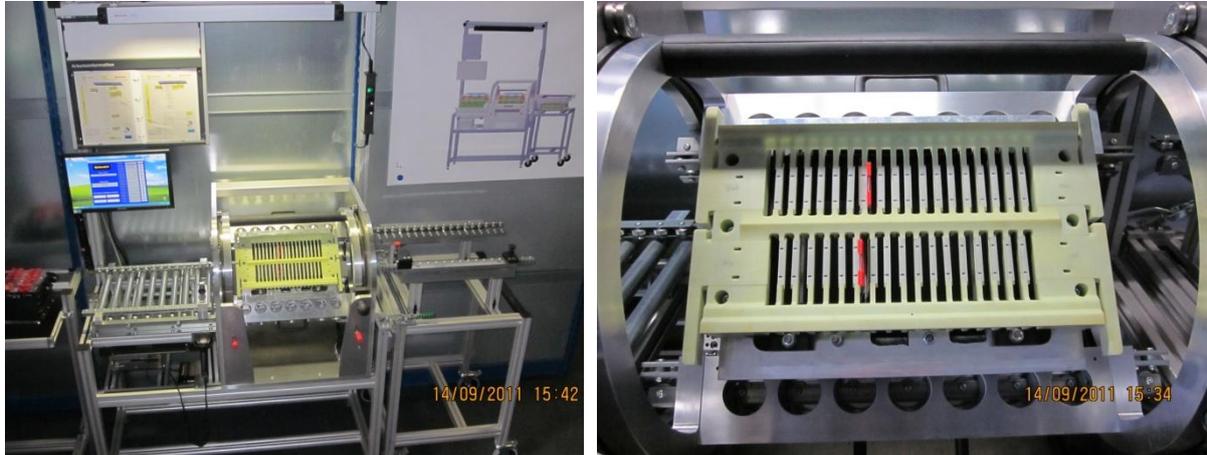


Abbildung 189: Hand-Stackvorrichtung

5.3.3 Validierung Flexboard-Montage

Aufgrund der Verzögerungen in der konstruktiven Lösungsfindung für die Baugruppe Flexboard/CSE lagen die Zeichnungen und Bauteile etwas verspätet vor, so dass Prinzipversuche zur Montageabfolge erst im Projektjahr 2011 erfolgen konnten. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abschnitt 5.2.4 dokumentiert.

Die Automatisierbarkeit konnte im Rahmen von FUEL nicht nachgewiesen werden, da auf Grund der engen Termine bei den anderen Demonstratoren der Aufbau eines Demonstrators für die automatisierte Flexboardmontage nicht möglich war. Jedoch werden für eine Automatisierung alle Vorbereitungen in erfolversprechender Weise erfüllt. Gute Zugänglichkeit und exakte Positioniermöglichkeiten sind in der Konstruktion erkennbar und bieten optimale Voraussetzungen für den Erfolg.

Vorbemerkungen zu den nachfolgenden Versuchs- & Messreihen zur Validierung von Baugruppen und Funktionen

Die in Arbeitspaket 1 entwickelten Baugruppen und Funktionen können erst nach dem erfolgreichen Nachweis aller Anforderungen und Eigenschaften als verwendbar für Nutzfahrzeuganwendungen freigegeben werden. Dieser Erprobungsnachweis bildet auch die Basis für eine spätere Straßenfreigabe des Energiespeichers in der Verwendung im Fahrzeughybridsystem.

Die Planung sah vor, dass zunächst einzelne Bauteile u. Baugruppen getestet werden und nachfolgend die Erprobung des Gesamtsystems „Energiespeicher“ erfolgt. Diese Erprobung erfolgte im Kontext der Design-Verifikation (abgekürzt DV). Im Falle von unbefriedigenden Testergebnissen wurde eine Iterationsschleife vorgesehen. Das Ziel war die sogenannte „Design-Bestätigung“ des Energiespeichers, seiner Baugruppen sowie aller geforderter Funktionen.

5.3.4 Validierung thermo-mechanische Komponenten

Im Vordergrund standen die Prüfung der Eignung der einzelnen mechanischen Baugruppen des Energiespeichers für die Anwendung im Hybrid-NKW, die Erprobung der Dimensionierung von Leiterquerschnitten, mechanischen Verbindungselementen etc. der endmontierten Baugruppen sowie die Erprobung und Validierung des Kabelbaum-Designs (sowohl innerhalb des Speichers als auch als Verbindung zwischen zwei Energiespeichern).

In einem ersten Schritt wurde die mechanische Festigkeit aller Einzelkomponenten anhand von Festigkeitssimulationen geprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 5.1.1 (thermische und mechanische Simulationen) beschrieben. Sie flossen ein in die fertigungsoptimierte Auslegung von Batteriegehäuse und Tragrahmen in Leichtbauweise ein.

5.3.5 Validierung elektro-mechanische Komponenten

Ziel dieses Validierungsschrittes war die Untersuchung und Qualifikation der Elektromechanik-Bauteile hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit in Energiespeichersystemen für Hybridnutzfahrzeuge.

Schütze

Schütze zweier Hersteller wurden getestet. Die Schütze mussten dabei einer Anzahl Öffnungen unter Last entsprechend den Anforderungen aus dem Over-Current-Concept widerstehen. Zusätzlich wurde untersucht, wie lange die Schütze unterschiedlich hohe Ströme tragen können und welche Effekte auftreten (bleiben z.B. die Schütze auf Grund der hohen Lorenzkraft geschlossen, bis die Sicherung auslöst etc.).

Die eingesetzte Messschaltung zeigt Abbildung 190. Darin bedeuten: E „Generator zur Einspeisung“, Z „Impedanz“, Dr „Draufschalter“, 1 „Messstelle zur Strommessung I über einen Shunt“ und 2 „Messstelle zur Spannungsmessung U“ über einen Spannungsteiler. Bei 450 V und anschließend bei 900 V wurden Ströme zwischen 600 A und 3000 A eingestellt. Der jeweilige Strom wurde für 750 ms angelegt. Anschließend wurde das Schütz unter Last geöffnet. Bei 2000 A wurde so oft geschaltet, bis das Schütz klebte. Die gewonnenen Ergebnisse sind für verschiedene Prüfbjekte exemplarisch in Tabelle 11 zusammen gefasst.

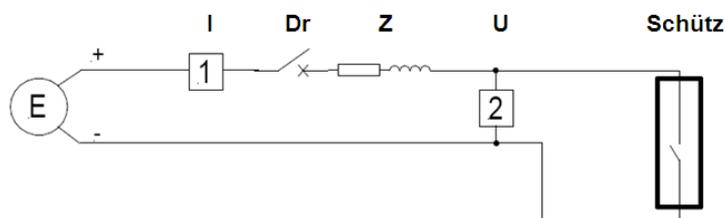


Abbildung 190: Messschaltung zum Test der Schütze

Bezeichnung: Schütz EV 200 (Kilovac)
Anschluss: Kupferwinkel, M8
Thermoelemente: A: Anschlussbolzen, B: Seite, C: Boden

Prüfobjekt-Nr.	Prüfstrom [A]	Stromflusszeit [s]	Oszillogramm/ ASCII-File: 409_	Thermoelement A,B,C	maximale Temperatur [°C]	Bemerkungen
2a	400	600	2390	7,2,0	190	-
2b	900	600	2393	7,2,0	116	-
2c	1300	600	2488	0,1,5	220	nach 6 min Qualm am Anschluss
2d	1900	40,3	2489	0,1,5	177	Unterbrechung
2e	2800	12,1	2491	0,1,5	131	Unterbrechung
2f	3500	4,0	2493	0,1,5	87	Unterbrechung
2g	4000	2,75	2494	0,1,5	62	Unterbrechung

Tabelle 11: Messergebnisse verschiedener Schütze

Besonders wichtig ist das Verhalten der Schütze beim Schalten unter Last. Dabei wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

Schütz 1 (EV):

- Bei 450V kann das Schütz bis Ströme von maximal 2000A 2x aufschalten.
- Bei 900V kann das Schütz bis zu Ströme von 700A aufschalten.
- Wenn die Ströme über diesen Werten liegen, dann berstet das Schütz (Abbildung 191).



Abbildung 191: Explodiertes Schütz nach mehrmaligem Schalten unter Last (450V/2000A)

Schütz 2 (OMRON):

- Bei 450V kann das Schütz bis Ströme von maximal 3000A gefahrlos öffnen.
- Bei 450V kann das Schütz bei Strömen von 2000A und 3000A gefahrlos 5 x öffnen.
- Bei 900V kann das Schütz Ströme bis zu 1500A aufschalten.
- Bei 900V kann das Schütz bei einem Strom bis zu 1000A 5x mal geöffnet werden.

Ableiter

Mehrere, verschiedene Ableiter und Verschweißungen wurden auf Ihre Stromtragfähigkeit hin untersucht. Die Temperaturentwicklung bei verschiedenen Stromstärken wurde dabei untersucht. Des Weiteren wurde untersucht, wie lange die Ableiter unterschiedlich hohe Ströme tragen können und welche Effekte auftreten. Mit den Ableitern wurde ein Schadgas-test durchgeführt und geprüft, ob sich der Übergangswiderstand änderte.

Sicherung

Mehrere verschiedene Sicherungen wurden auf Ihre Stromtragfähigkeit hin untersucht. Speziell wurde dabei die Temperaturentwicklung bei unterschiedlichen Strömen untersucht. Des Weiteren wurde betrachtet, wie

lange die Sicherungen unterschiedlich hohe Ströme tragen können und welche Effekte auftreten. Auch die Sicherungen wurden mit den ZF Vibrations- und Schockprofilen beaufschlagt und mit dem ZF Schadgastest belastet.

Vorladewiderstand

Es wurden verschiedene Vorladewiderstände (Abbildung 192, Pos. 31-33) mit dem aktuellen Vorladeprofil belastet, um festzustellen, welche die geringste Temperaturerhöhung und damit die geringste Verlustleistung aufweisen.

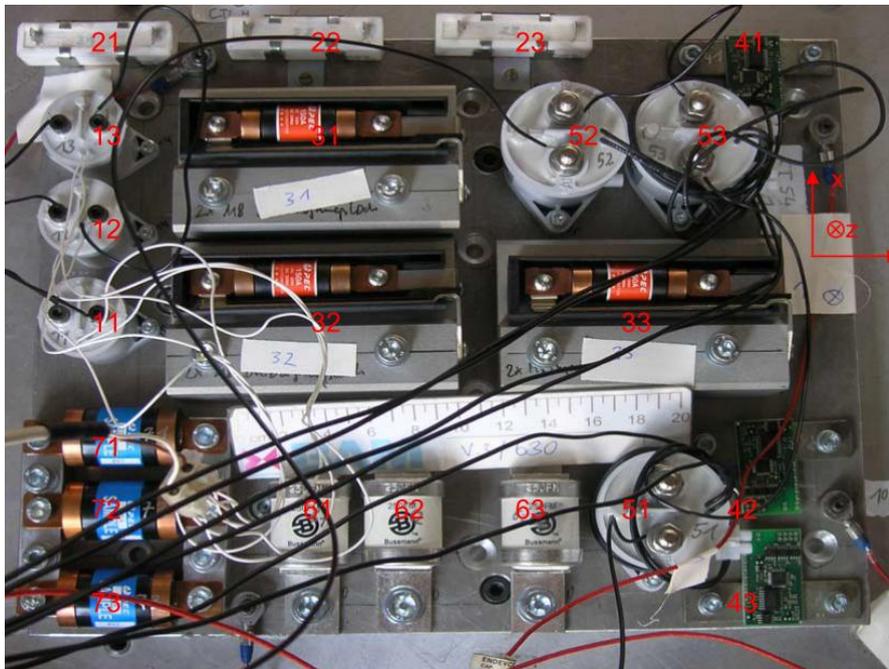


Abbildung 192: Zur Anordnung der Prüfstücke auf der Adapterplatte und Definition der Prüfaxen x, y, z

Stromsensormodul

Entwicklungsbegleitende Test wie Umwelttests (Vibration, Shock, THC, Shipping, Handling, HTHE⁵⁴), EMV-Tests sowie entwicklungsbegleitende Elektronik- und Software-Tests wurden durchgeführt.

⁵⁴ HTHE (High Temperature Heat Exchanger): Wärmeaustauschsystem

Komplette E-Modul (inkl. Sicherung, Schütze, Widerstand)

Das gesamte Modul (Abbildung 193) wurde einer mechanischen Belastungssimulation unterzogen mit einer anschließenden Befundung der einzelnen Komponenten. Dazu wurden mehrere Module aufgebaut. Eines wurde einer mechanischen Belastungssimulation unterzogen (Schock und Vibration). Mit einem weiteren Modul wurde ein Schadgastest über 21 Tage Dauer durchgeführt.

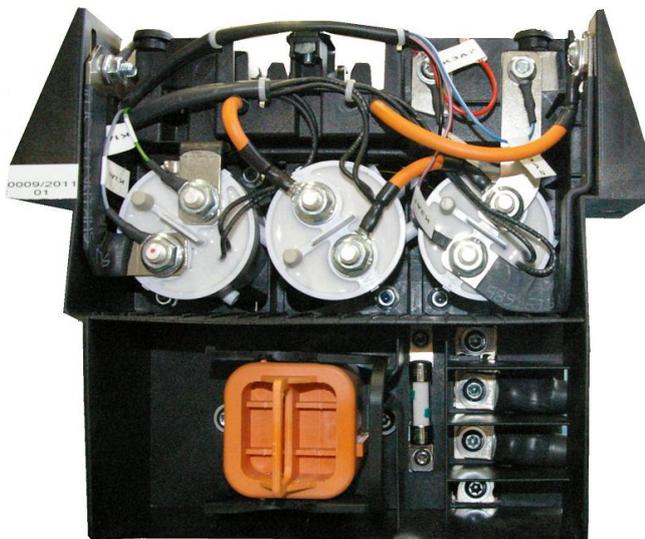


Abbildung 193: Komplettes E-Modul (Elektro-Mechanik-Modul)

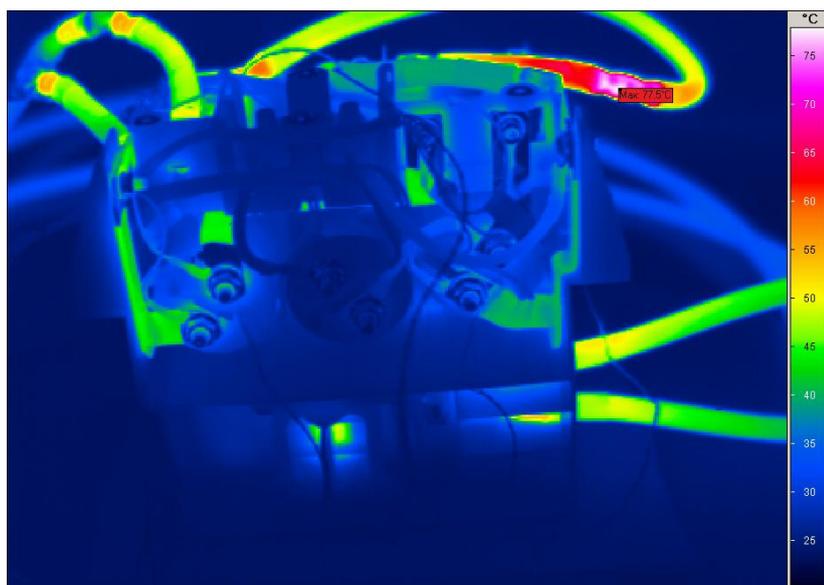


Abbildung 194: Wärmeverteilung im E-Modul

Anschließend erfolgte die Befundung der einzelnen Komponenten (elektrische Tests). Diese elektrischen Tests wurden vor den mechanischen durchgeführt. Die elektrischen Einflüsse zeigten keine Auswirkung auf die mechanischen Messgrößen. Im Rahmen der elektrischen Tests wurde ebenfalls die Wärmeverteilung untersucht (s. Abbildung 194).

Verbindungstechniken Stromschienen

Die Verbindung zweier Stromschienen mittels einer Verschraubung wurde getestet. Dazu wurden verschiedene Festdrehmomente unterschiedlichen Strombelastungen unterzogen (untersucht wurden Temperaturentwicklung, Spannungsabfall und Lösemomente). Mit Hilfe einer Wärmebildkamera ließen sich die Hot-Spots gut auffinden. Ferner konnte analysiert werden, ob die Anbindung fehlerhaft ist und daher dort ein Hot-Spot entsteht.

Vorladeschaltung

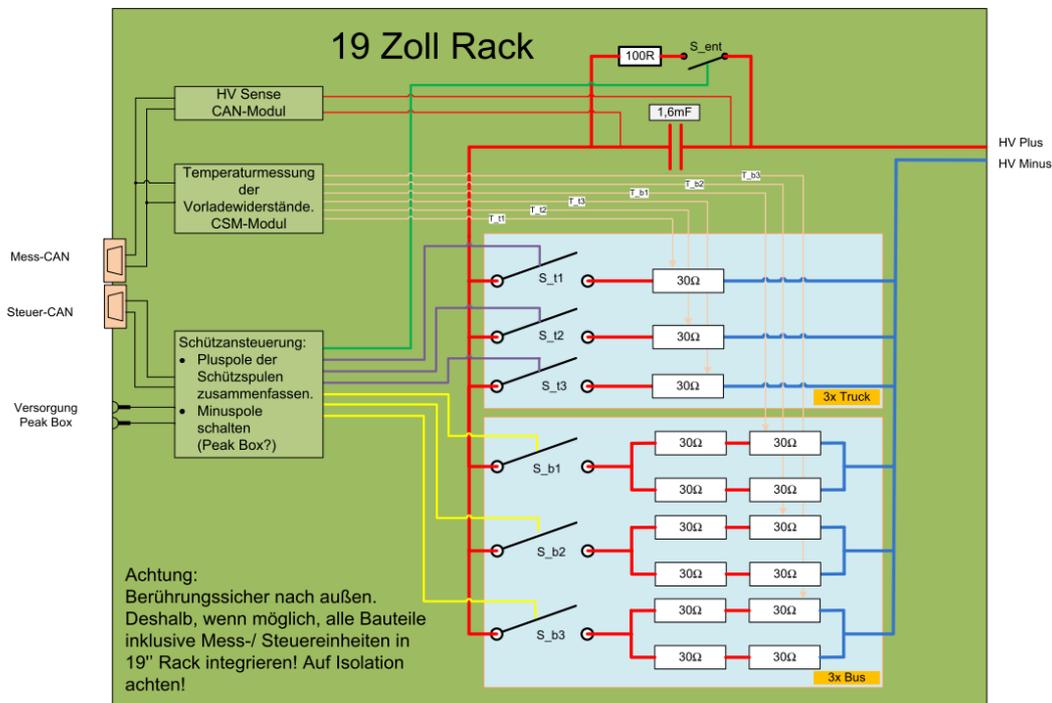


Abbildung 195: Lebensdauertest der Vorladeeinheit

Die Vorladung sollte hinsichtlich ihrer Lebensdauer geprüft werden. Hier besteht die Anforderung, dass der LKW und der Bus die Vorladung über den Widerstand mit den jeweiligen Schützen im Minutentakt durchführen

müssen, bis die Lebenserwartung erfüllt ist. Da ELF2-60 (Verteiler-LKW) und ELF2-120 (Hybridbus) unterschiedliche Vorladeeinheiten besitzen, mussten diese separat aufgebaut und getestet werden. Dieser Test mit der in Abbildung 195 skizzierten Schaltung dauerte 30Tage.

5.3.6 Validierung Zelldesign

Im Zuge der Erprobung und Validierung des Serien-Zelldesigns wurden vier verschiedene Zell-Elektrolyte bezüglich des Potentials für die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Zellen im Hinblick auf Leistungsoptimierung, Alterungsverhalten, Lebensdauer, Produktion und Kosten gemeinsam mit dem Verbundpartner ZF untersucht.

Als Prüflinge wurden Zellen gleichen Aufbaus verwendet. Außenmaße, innerer Aufbau (Schichtdicken, Lagenanzahl und Separator) und Ableiter wurden nicht verändert, lediglich die Elektrolytzusammensetzung wurde von Prüfling zur Prüfling variiert. Die Untersuchungen wurden an Prüflingen (Zellen) mit Optimierung der Leistungsdichte für den Hybridantrieb (z.B. für Nutzfahrzeuge) verwendet.

Testübersicht

Die komplette Untersuchung der Zellen umfasste folgende Tests:

- Leistungsbestimmung (verschiedene Temperaturen, Ladezustände - SOC)
- Arbeitspunktbestimmung (optimaler SOC für den Hybridantrieb in Lade- und Entladerichtung)
- zyklische Lebensdaueruntersuchung (100% Lade- und Entladezyklen, 20% DOD Hochstromzyklen)
- Innenwiderstandsbestimmung
- Kaltstartversuche
- Kalendarische Lebensdauer (Alterung ohne zyklischem Betrieb)

Kaltstartversuche

Die Kaltstartversuche dienten der Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Zellen bei tiefen Temperaturen, um den Verbrennungsmotor beim Start über den Anlasser in Bewegung zu setzen.

Die Versuchsdurchführung umfasste folgende Tests der Zellen:

- Diagnostetest (Kapazitätsbestimmung + Innenwiderstandsmessung) und SOC Einstellung auf Zielladezustand 30% bei 20°C.
- Leistungspuls: 3x 1,5V für 5 Sekunden (bei -25°C) mit 10 sec Pause zwischen den einzelnen Startpulsen. Die 5 Sekunden Leistungswerte wurden über die Istwerte von Spannung und Strom am Ende der Pulse ermittelt.

Das Ergebnis der drei vergleichbaren Leistungspulse ist für zwei Zellen und vier Elektrolyte in Abbildung 196 dargestellt. Elektrolyt 4 ist in der Lage, die höchsten Leistungen zu liefern, die Kaltstartleistung fällt bei mehreren Kaltstartversuchen aber stärker ab als bei den anderen betrachteten Elektrolyten.

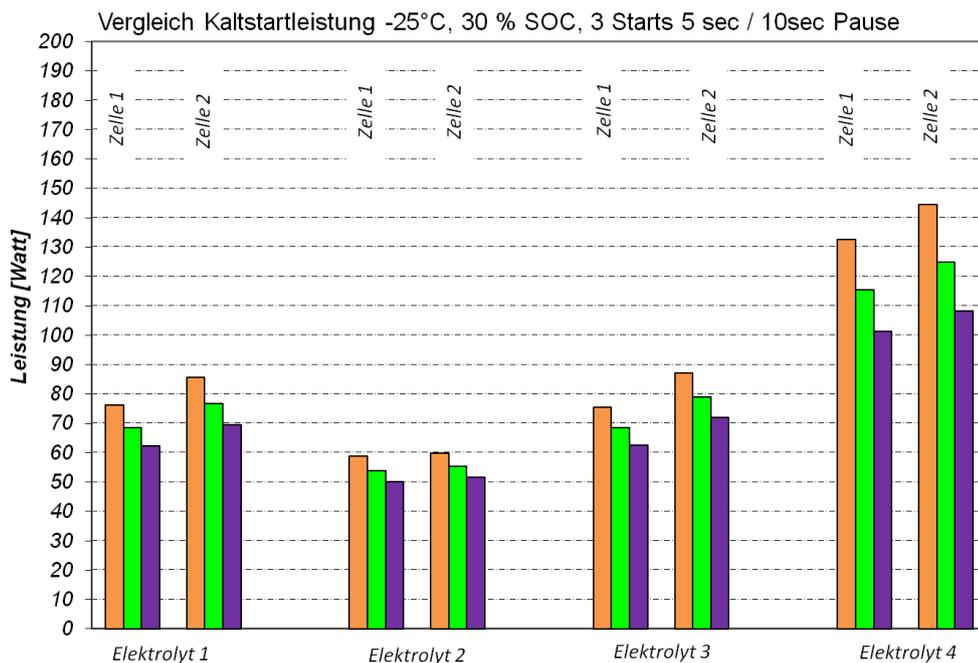


Abbildung 196: Vergleich des Kaltstartverhaltens von Zellen mit unterschiedlichen Elektrolyten

Kalendarische Alterung

Ziel der Prüfung war die Darstellung der Kapazitätsveränderung der Zelle über der Zeit bei verschiedenen Lagerungsparametern. Dies sind der Ladezustand (100%, 60% und 30% SOC) sowie die Lagerungstemperatur (70°C, 60°C, 50°C und 25°C). Zur Analyse ihrer Einflüsse wurde die folgende Vorgehensweise gewählt: Es wurden jeweils 2 Zellen aus jeweils

einer Variante unter gleichen Bedingungen (d. h. gleicher Ladezustand und gleiche Temperatur) gelagert. Im definierten Abstand von 14 Tagen wurden die Zellen auf Innenwiderstand und Kapazität überprüft. Das Testende wurde erreicht, wenn die Restkapazität weniger als 50% der Anfangskapazität betrug (Abbildung 197).

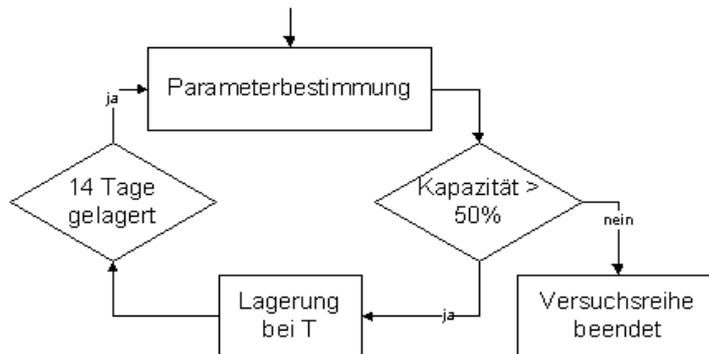


Abbildung 197: Ablaufdiagramm kalendarische Alterung

Abbildung 198 zeigt das Ergebnis: Die Alterungskurven der vier untersuchten Elektrolyte (je zwei Exemplare) wurden ausgehend von den Anfangsparametern 60% Restkapazität und Lagerung bei 60°C aufgenommen. Die geringsten Alterungseffekte resultierten bei Elektrolyt 4.

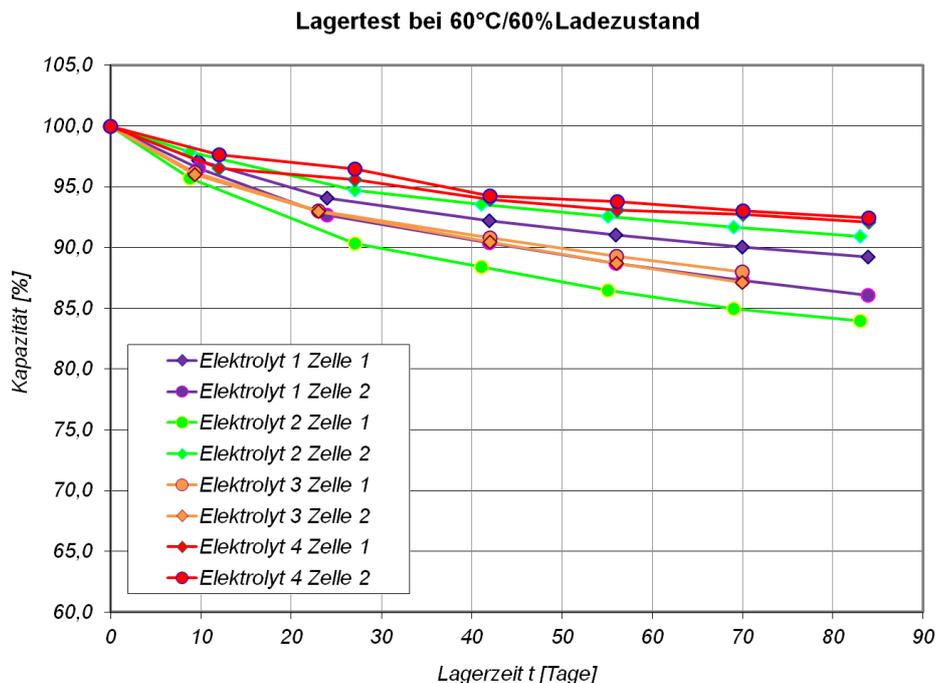


Abbildung 198: Vergleich vom kalendarischen Alterungsverhalten von Zellen mit unterschiedlichen Elektrolyten

Leistungsbestimmung

Ein effektives und vergleichbares Verfahren zur Leistungsbestimmung wurde an den Zellen mit verschiedenen Elektrolyten angewandt. Um eine möglichst große Ergebnismatrix zu erhalten und maximalen Nutzen aus den Messungen zu ziehen, wurden über den kompletten Betriebsbereich (Temperatur, Ladezustand, Leistung) der Zelle Strompulse in Lade- und Entlade-Richtung gefahren.

Die unten stehende Testmatrix (Tabelle 12) beschreibt alle Testfälle. Es wurden umfassende Bewertungen bei Temperaturen von -30°C bis +60°C sowie der Ströme von 2A bis 300A bei Ladezuständen von 10%-90% SOC durchgeführt. Die Ladeentspannung, sowie die Strompulse, wurden durch den bei tiefen Temperaturen zunehmenden Innenwiderstand variabel gewählt. Ein Beispiel für die aufgenommenen Daten ist in Abbildung 199 dargestellt: Im Diagramm sind die Entladekurven bei 60% SOC / 20°C und 200A bzw. 300A dargestellt. Bei Elektrolyt 2 ist der prozentuale Abfall der Spannung am geringsten.

Temperatur [°C]	-30 / -20		-10 / 0		10 / 20 / 40 / 60	SOC
Strom [A]	LAD	ELA	LAD	ELA	LAD/ELA	10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90%
	2	10	5	10	25	
	4	20	10	30	50	
	6	30	20	50	75	
	8	40	30	70	100	
	10	50	40	90	125	
	12	60	50	110	150	
	14	70	70	130	175	
	16	80	90	150	200	
	18	90	110	170	225	
	20	100	130	190	250	
	22	110	150	210	275	
	24	120	170	230	300	
min. Spannung [V]	2				2,5	
max. Spannung [V]	4,2					

Tabelle 12: Übersicht Leistungsmessungen

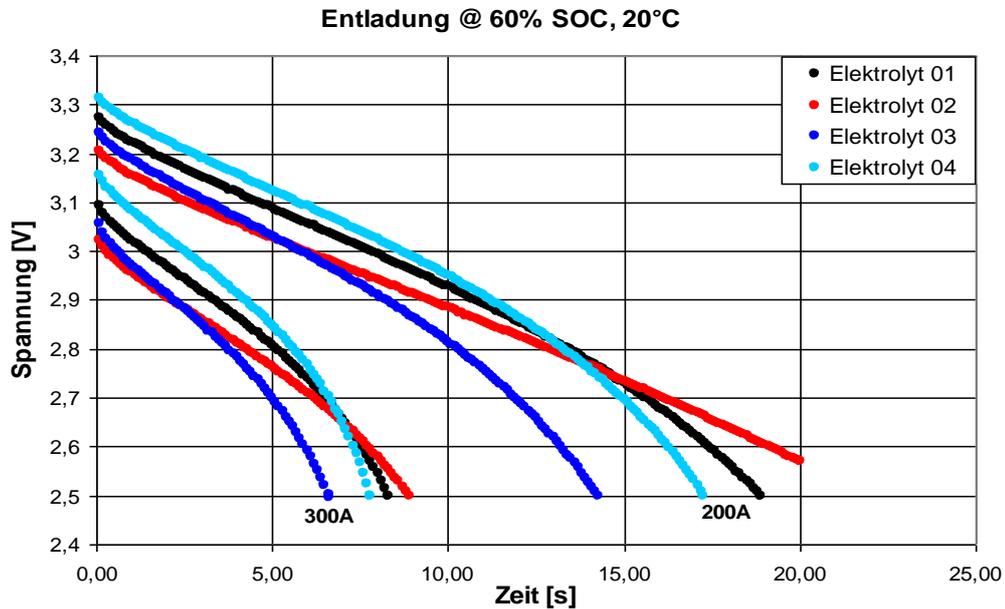


Abbildung 199: Entladeverlauf von Versuchszellen mit verschiedenen Elektrolytvarianten

Die Entladeverläufe in Abbildung 199 veranschaulichen, dass die Zelle mit dem Elektrolyt 4 über die Zeit am längsten den Strom bis zum Erreichen der Abschaltspannung tragen kann, im mittleren Spannungsniveau liegt diese Zelle im Vergleich mit den anderen 3 Zellen tiefer. Dieser Kurvenverlauf deutet auf einen höheren Innenwiderstand gegenüber den anderen Zellenvarianten hin, aber auch auf eine besser nutzbare Kapazität. Hier spielt eventuell auch die Eigenerwärmung im Zellinneren eine Rolle.

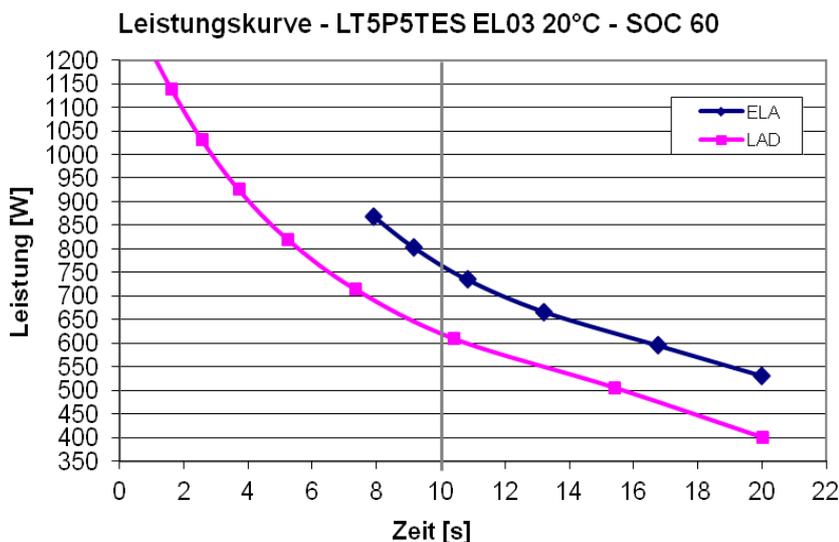


Abbildung 200: Leistungsverlauf (Lade- und Entladeleistung) der Zelle mit Elektrolyt Nr. 3

Aus den zeitabhängigen Spannungsverläufen wurden anhand des Mittelwerts der Spannung Leistungskurven für die Lade- und Entladerichtung ermittelt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist am Beispiel der Zelle mit dem Elektrolyt 3 in Abbildung 200 zu sehen.

Arbeitspunkt

Der optimale Arbeitspunkt der Zelle ist der, bei dem die Lade- und Entladeleistung den gleichen Wert aufweisen, so dass in diesem Betriebspunkt beim Laden und Entladen jeweils die gleiche Leistung der Zelle entnommen oder auch zugeführt werden kann. Der optimale Arbeitspunkt ist daher der Schnittpunkt der im Diagramm dargestellten Leistungskurven (Abbildung 201).

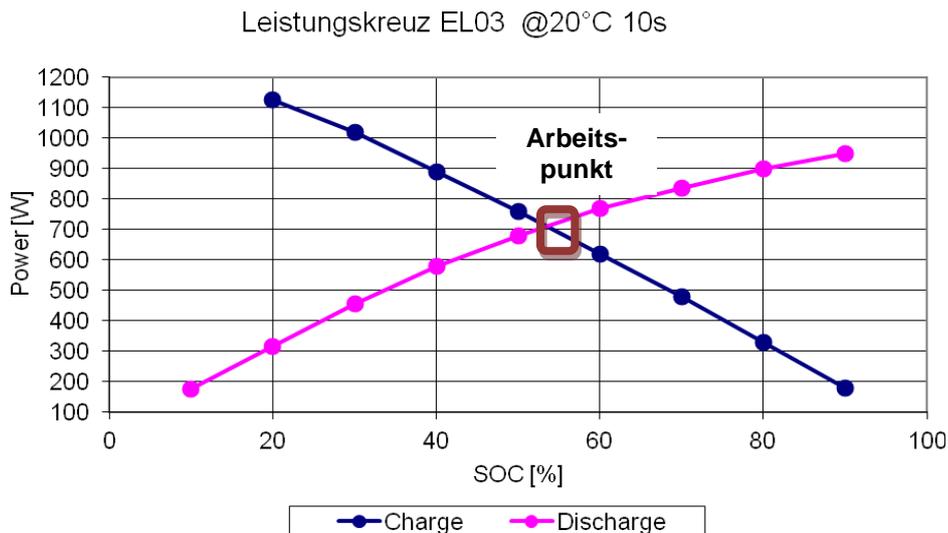


Abbildung 201: Ermittlung des Arbeitspunktes (Zelle mit Elektrolyt Nr. 3)

Innenwiderstandstest

Der Innenwiderstand von Li-Ionen Zellen ist stark temperaturabhängig und ist essenziell wichtig für die Auslegung des Gesamtsystems. Dabei wurden Versuche über den gesamten Temperatur- und Ladezustandsbereich durchgeführt, um die Abhängigkeit der Innenwiderstände von diesen beiden Parametern darzustellen. Insbesondere die tiefe Temperatur führt zu sehr starker Zunahme des Innenwiderstandes gegenüber der Nenntemperatur bei 25°C, wie in Abbildung 202 dargestellt.

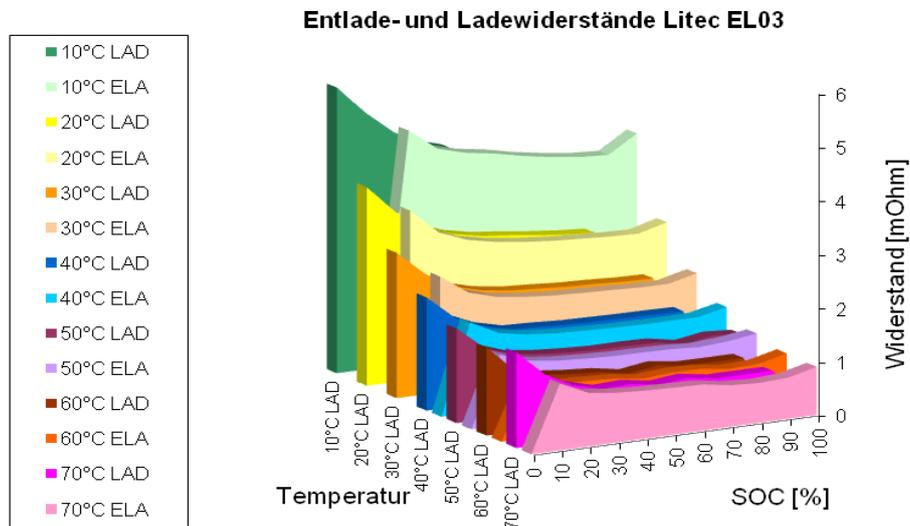


Abbildung 202: Innenwiderstandsverlauf in Abhängigkeit vom Ladezustand und Temperatur (Zelle mit Elektrolyt Nr. 3)

Dauerzyklen (zyklische Alterung)

Beim Zyklentest werden 100% Zyklen (Spannungsbereich von U_{\min} bis U_{\max}) mit vorgegebener Stromstärke von 1 C/h (Ladung/Zeit) bei einer Umgebungstemperatur von 25°C ausgeführt. Dabei wird bei jeder Entladung die Kapazität ermittelt. Der Verlauf der zyklischen Alterung der Prüflinge mit den vier verschiedenen Elektrolytvarianten ist in Abbildung 203 dargestellt.

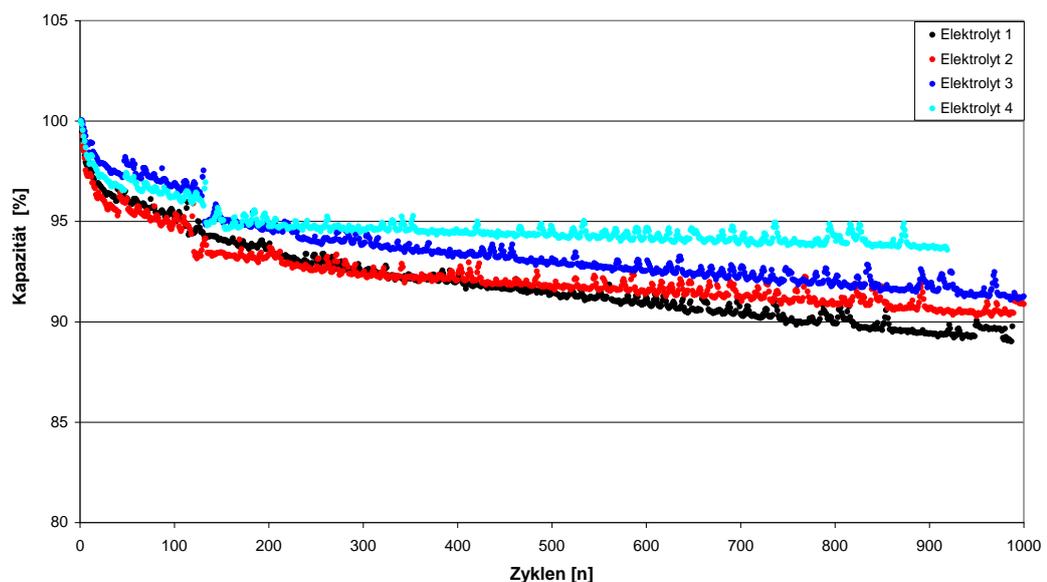


Abbildung 203: Vergleich der zyklischen Alterung der vier Elektrolytvarianten bei 1000 Zyklen mit 100% Entladetiefe

Interessanterweise wurde festgestellt, dass der Prüfling mit dem Elektrolyt 4 eine wesentlich langsamere Alterung über die zyklische Belastung aufweist. Dieses Ergebnis korreliert mit dem der kalendarischen Alterung. Offensichtlich hat die Zelle eine bessere Ausbildung der Grenzschicht (SEI) zur Anode oder die Grenzschicht setzt den Lithium-Ionen weniger Widerstand entgegen und lässt dadurch wenig zyklische Alterung zu.

5.3.7 Validierung Kühlsystem

Wegen des hohen Temperatureinflusses auf die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit des Energiespeichers besitzt das Thermo-Management und damit das Kühlsystem eine entscheidende Rolle (s. auch Anmerkungen zum Redesign in Abschnitt 4.2.3 dieses Berichts).

Für die Erprobung der Leistungsfähigkeit des Energiespeichers wird der Speicher mit verschiedenen Lastprofilen beaufschlagt und die resultierende Erwärmung bestimmt. Als Lastprofile werden sowohl synthetische Fahrzyklen als auch reale, am Fahrzeug vermessene Strom- bzw. Leistungsprofile verwendet. Da die Verlustleistung des Speichers über der Lebensdauer zunimmt, wurden diese Versuche sowohl mit Profilen durchgeführt, die der Verlustleistung eines neuen Speichers entsprechen, als auch mit solchen, die der Verlustleistung eines Speichers gegen Ende seiner Nutzungsdauer entsprechen.

Neben der Bestimmung der maximalen Erwärmung wurden die thermischen Widerstände innerhalb des Speichers ermittelt. Dazu sollten Versuche an gesamten Energiespeichersystemen durchgeführt werden. Weiterhin auch an Teilsystemen, um Details zu untersuchen. Die Erprobung des Kühlsystems erfolgte schwerpunktmäßig entwicklungsbegleitend, um technische Lösungen für die Kernfragestellungen zum Thermo-Management und der dafür erforderlichen Software zu erhalten.

Ziel der Test- und Validierungsphase war es, einen Nachweis der Funktionsfähigkeit des Produktdesigns des externen Kühlsystems mittels einer Erprobung an stationären und mobilen Prüfständen zu erbringen, so dass während der Test- und Validierungsphase zur Erprobung der neuen Produktionstechnologien und -verfahren ein sicherer Betrieb der Demonstratoren gewährleistet war. Die Arbeiten wurden von ZF durchgeführt.

Bedingt durch die Terminverzögerungen infolge Redesigns und der Notwendigkeit der Neuauslegung des Kühlsystems konnte dieses Arbeitspaket im Förderzeitraum nicht durchgeführt werden. Stattdessen musste die Erprobung der Demonstratoren mit einem aus den ZF Vorentwicklungsprojekten vorhandenen Kühlsystem durchgeführt werden. Die Arbeitsumfänge werden nach dem Aufbau der FUEL Demonstratoren des Kühlsystems jedoch auch nach dem Ende des Förderprojekts fortgeführt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit dem Kühlkonzept (Stand BF2) die Anforderungen an 7,5t Verteiler-LKWs erfüllt werden konnten. Jedoch stellt die Hybrid-Stadtbusanwendung wegen der vielen Start-Stopp-Zyklen besondere Herausforderungen. Diese konnten nur zum Teil mit den in FUEL verfügbaren BF2-Demonstratoren erfüllt werden. Wie in Abschnitt 4.2.3 geschildert, ist hier eine vertiefte Betrachtung nach dem Ende des Förderprojekts FUEL erforderlich.

5.3.8 Validierung Software

Der Schwerpunkt der hier durchzuführenden Arbeiten lag auf der Erprobung der Software-Funktionen im Zusammenspiel zwischen Hard- und Software des Energiespeichers. Hier fanden Batterie-Funktionstests statt (z.B. Leistungstests, Lade-/Entladezyklen, elektrische Belastungstests, Sicherheitsfunktionen).

Weitere Schwerpunkte lagen in der Funktionsprüfung der seriellen Verschaltung von zwei Speichersystemen für den Hybridbus. Mittels der implementierten Master-Slave-Steuerungsfunktion erfolgt das Laden und Entladen bei beiden Speichersysteme synchron.

Die Erprobung der Softwarefunktionen wurde entwicklungsbegleitend durchgeführt. Die Umsetzung erfolgte nach Plan. Über die Planung herausprojektierten ZF und Continental gemeinsam eine HiL-Testumgebung, um damit den gesamten Energiespeicher als Simulationsmodell mit verschalteter Steuerung als Testgrundlage für die Funktionserprobung nutzen zu können.

Für gewisse Anwendungen im Nutzfahrzeugbereich ist eine Erhöhung der Batterieleistung sowie des Energieinhalts für bspw. lange, rein elektrische Fahrten in einer Umweltzone von großem Vorteil. Hierzu bietet sich die Parallel-Schaltung von Batterien an. Jedoch ist dies ohne Berücksichti-

gung weiterer Anforderungen und evtl. Änderungen am Batteriedesign nicht möglich, wodurch eine Einflussnahme auf die Produktionstechnologien und -verfahren nicht auszuschließen ist. Hierzu müssen parallelgeschaltete Demonstratoren in stationäre und mobile Prüfstände eingebaut und erprobt werden. Die Erprobung parallel verschalteter Energiespeicher konnte wegen der erwähnten Projektverzögerungen nicht während der Laufzeit des Förderprojekts durchgeführt werden.

5.3.9 Demonstration: Speicher-Gesamtsystem

Abschließend sollte die Erprobung und Validierung der Testanforderungen (z.B. Lebensdauer- und Abuse-Tests) für die Prüfung der Gesamt-Energiespeicher erfolgen. Hierzu war auch Test-Equipment für Sonderprüfungen (Steinschlag-, Tauchwasser-, Schadgas-, Korrosions- und Schimmeltests) zu entwickeln und zu erproben. Um statistisch relevante Daten zu erhalten, war der Aufbau von insgesamt 60 Energiespeichern bei Projektbeginn vorgesehen, wobei im Zuge des Projektverlaufs eine Reduktion auf 1/3 erfolgte. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Erprobung der Batterien im Gesamthybridsystem, d.h. den dazu erforderlichen Integrations-, Funktions- und Regressionstests.

Die Umsetzung der Erprobung des FUEL-Energiespeichers wurde aufgrund der erwähnten Verzögerungen im Arbeitspaket 1 (mehrere Iterationen bei der Komponentenentwicklung für die NKW-Energiespeicher) verzögert gestartet. Im Projektjahr 2010 erfolgte alternativ die Erprobung des Vorläufer-Energiespeichers BF1 (Entwicklungsstand Machbarkeitsphase) – die erarbeiteten Erkenntnisse wurden im Wesentlichen für die weitere FUEL-Entwicklung genutzt. Die Erprobung der Batterie im Gesamthybridsystem sowie die Funktions- und Integrationstests erfolgten überwiegend beim Partner ZF in Friedrichshafen, wobei Mitarbeiter von Continental vor Ort unterstützten. Testauswertungen und Dokumentation wurden entwicklungsbegleitend erstellt und liegen als Grundlage für eine nachfolgende Optimierungsschleife bereit. Die wichtigsten Erprobungsergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

Um den Nachweis der Nutzfahrzeugtauglichkeit der Produktionstechnologien und -verfahren zu erbringen, müssen die bei Projektbeginn spezifizierten Funktionalitäten geprüft werden. Hierfür sind mehrere Arbeitsschritte notwendig. Zum einen müssen spezielle Testverfahren definiert werden und zum anderen müssen die Demonstratoren in verschiedenen

stationären und mobilen Prüfständen eingebaut und erprobt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass die nutzfahrzeugtypischen Anforderungen der verschiedenen Applikationen (Verteiler LKW und leichte/schwere Stadtbusse) überprüft werden können.

Aufgrund der kurzen Laufzeit des Verbundprojekts und damit verbunden eines kurzen Erprobungszeitraums musste eine parallele Erprobung der Demonstratoren stattfinden. Nur somit konnte annähernd die geforderte Lebensdauer von 50.000 Betriebsstunden mit einer hohen Aussagewahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Daher wurden mehrere mobile Prüfstände (vier Fahrzeuge im Projekt Verteiler-LKW, zwei Fahrzeuge im Projekt leichter Stadtbus und ein Fahrzeug im Projekt schwerer Stadtbus) und mehrere stationäre Prüfstände für die Erprobung der Demonstratoren benötigt.

Ziel war es, am Ende des Erprobungszeitraums den Nachweis der Nutzfahrzeugtauglichkeit der angewandten Produktionstechnologien und -verfahren für den Aufbau der Demonstratoren zu erbringen.

5.3.9.1 Definition von Testverfahren für stationäre und mobile Prüfstände

Es wurden Testverfahren für die Erprobung der BF1- und BF2-Demonstratoren im stationären und mobilen Prüfstand definiert. Durch die Verwendung des Kühlsystems aus den ZF Vorentwicklungsprojekten mussten Erprobungsumfänge, welche für den mobilen Prüfstand geplant waren, in die Testplanung der stationären Prüfstände aufgenommen werden. Folgende Tabelle 13 zeigt einen Ausschnitt der Testplanung für die BF1-120 Demonstratoren am stationären Prüfstand.

Bezeichnung 1	Bezeichnung 2	Temperatur Kühlmittel	Temperatur Umgebung	SOC Ladezustand	Dauer ca.	Versuchsaufbau	Bemerkung 1
Erwärmungslauf		von -30 °C bis 30°C ohne aktive Kühlung	Passive Klimakammer wird über Batteriegehäuse beeinflusst, Messung über zusätzlichen Temp.-Sensor notwendig	Start SOC 50% SOC Bereich 40 -60 %		DC-Batt	Derating Stromprognose gem. Batterie CAN
Erwärmungslauf		von -30 °C bis 30°C ohne aktive Kühlung		Start SOC 50% SOC Bereich 40 -60 %		DC-Batt	Stromprognose 10 s Wert gem. Batterie CAN
Erwärmungslauf		von -30 °C bis 30°C ohne aktive Kühlung		Start SOC 50% SOC Bereich 40 -60 %		DC-Batt	Stromprognose 1 s Wert gem. Batterie CAN
Erwärmungslauf		von -30 °C bis 30°C ohne aktive Kühlung		Start SOC 50% SOC Bereich 40 -60 %		DC-Batt	Zyklus Sort 1 Derating Stromprognose gem. Batterie CAN
Warmlaufstest		-20°C; passiver Kühlmittelumlauf	Aktive Kühlung der Klimakammer auf -20°C	Start SOC 50% SOC Bereich 40 -60 %		DC-Batt	Derating Stromprognose gem. Batterie CAN; Erwärmung überhaupt noch möglich?
Kaltstart		-30°C...0°C	-30°C	30, 40, 50, 60%	10s	DC-Batt	Stromprognose 1 s Wert gem. Batterie CAN
Maximalleistung	Laden / Entladen	-10; 0;...; 60°C	25°C	40, 50, 60%	1 und 10s	DC-Batt	Eventuell SOC 20-90%
Anzahl mögl. Vorladungen		RT	RT	50%		EB6	
Erwärmungslauf	Sort 1; 2; Strecke 41	Reale Bedingungen		40-60%	600s	DC-Batt/EB6	
Sort 1			25°C	40-60%	60s	DC-Batt/EB6	"Dreieckverlauf"
Sort 2			25°C	40-60%	60s	DC-Batt/EB6	"Trapezverlauf"
Realer Zyklus	Strecke 41 Stuttgart	-10; 0;...; 30°C	-10; 0;...; 30°C	40-60%	600s	DC-Batt/EB6	
Tiefemperatur	Sort 1	bis 20°C ohne	0; 10°C	40-60%	60s	DC-Batt/EB6	"Dreieckverlauf"
Hochtemperatur	Sort 1	30°C	40; 50°C	40-60%	60s	DC-Batt/EB6	"Dreieckverlauf"
Lebensdauer	Cycle 10...90% SOC	25°C	25°C	10...90%	>100h	DC-Batt	"Totläufer"

Tabelle 13: Testplanung BF1-120 Demonstratoren am stationären Prüfstand (Ausschnitt)

Einbau von Elektrik und Messtechnik in die Prüfstände

Dieses Arbeitspunkt umfasste die Erstellung der Verkabelung und den Einbau von Elektrik und Messtechnik in die stationären und mobilen Prüfstände, sowie die Umbauarbeiten bei der Erprobung der BF1- und BF2-Demonstratoren. Folgende Arbeitsschritte wurden hierzu durchgeführt:

Planung der Verkabelung der Prüfstände und Erstellung eines Verkabelungsplans, Ausmessen der Leitungslängen im Prüfstand, Fertigung von Kabelbäumen und anschließender Verlegung, Einbau der Messtechnik (bspw. Strom- / Spannungssensoren) sowie Inbetriebnahme und sicherheitstechnische Freigabe der Prüfstände. In Abbildung 204 ist ein Messtechnik-Schrank am stationären Prüfstand abgebildet. Mittels der Messtechnik war es möglich, batteriespezifische Daten aufzuzeichnen und auszuwerten.



Abbildung 204: Messtechnik am stationären Prüfstand

5.3.9.2 Stationäre Prüfstandserprobung der Demonstratoren für Stadtbusse

Die BF1-120 Demonstratoren wurden am stationären Prüfstand teilweise erprobt. Aufgrund Lieferverzögerungen der Demonstratoren konnte die Erprobung erst ca. 6 Monate später beginnen und musste infolge Überstrom frühzeitig abgebrochen werden. Abbildung 205 zeigt den Aufbau der BF1-120 Demonstratoren in einer Klimakammer am stationären Prüfstand.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Erprobung der BF1-120 Demonstratoren beschrieben.

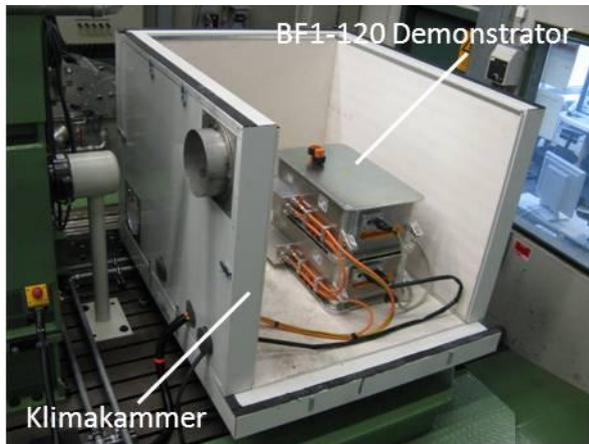


Abbildung 205: BF1-120 Demonstrator am stationären Prüfstand

a) Ermittlung des maximalen Ladestroms

Versuchsziel war die Ermittlung des maximal möglichen Ladestromes in Abhängigkeit der (mittleren) Zelltemperatur und dem SOC. Vor dem Versuch wird die Batterie bis zum Erreichen der gewünschten (Beharrungs-) Temperatur über den Kühlmittelkreislauf abgekühlt. In einem kontinuierlichen Lade- / Entladezyklus zwischen 40% und 60% SOC wurde der maximal mögliche Strom ermittelt. Dieser wird begrenzt durch die Stromprognose für 10 s vom BMS, das Erreichen der zulässigen Zellspannung von 4,2 V sowie Temperaturderating durch das BMS.

Durch die Eigenerwärmung der Zellen ist die Temperatur nicht statisch, so dass die Zuordnung von Temperatur, SOC und dem sich ergebenden Maximalstrom immer zufällige Momentaufnahmen sind. Es wurden daher mehrere Versuchsdurchläufe gefahren und die Ergebnisse gemittelt. Bei Temperaturen unter -10°C nimmt der Innenwiderstand der Batterie so stark zu, dass keine praktisch relevanten Ladeströme mehr darstellbar sind. Betrachtet wird daher nur der Bereich ab -10°C .

In Abbildung 206 ist der maximal mögliche Ladestrom im SOC Bereich von 40-60% über der Temperatur dargestellt. Folgende Punkte sind während der Versuchsdurchführung zusätzlich aufgefallen:

- Die 10s-Stromprognose des BMS konnte bei tiefen Temperaturen nicht annähernd erreicht werden. Typisch konnten 20-25 % hiervon dargestellt werden, ansonsten würde es zu einer Überschreitung der Spannungsgrenze der einzelnen Zellen kommen.

- Die Einzelzellspannungen lagen im Leerlauf (typisch 40-180 mV) und unter Last (typisch 100-600 mV) weit auseinander (auch nach längeren Symmetrierungsphasen). Da der Ladestrom in dem Moment begrenzt wird, wo die erste Zelle die Maximalspannung erreicht, führt diese Asymmetrie zu einer frühzeitigen Begrenzung des Ladestromes. Die große Spannungsdifferenz der Einzelzellspannungen während der Belastung lässt auf starke Abweichungen der einzelnen Innenwiderstände der Zellen, sowie auf eine inhomogene Temperaturverteilung im Demonstrator schließen.

Die Ursachen hierfür könnten hohe Toleranzen bei der Zellfertigung (Abweichung der Innenwiderstände) und unterschiedliche thermische Anbindung (inhomogene Temperaturverteilung) der Zellen im Demonstrator sein. Die Einzelzelltemperaturen drifteten im Versuch bis zu 8K auseinander.

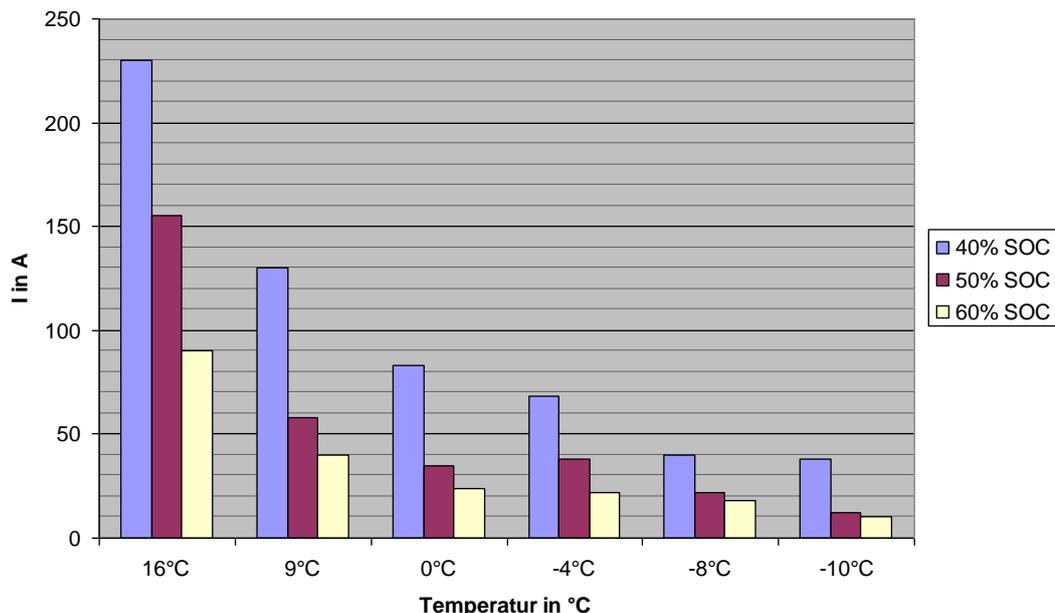


Abbildung 206: Maximale Ladeströme über Zelltemperatur (4,2V / Zelle)

b) Maximaler Dauerstrom (Beharrung / Derating)

Versuchsziel war die Ermittlung des maximal möglichen Dauerstromes in Abhängigkeit von der Kühlmitteltemperatur. Vor dem Versuch wird die Batterie bis zum Erreichen der Raumtemperatur über den Kühlmittelkreislauf abgekühlt.

In einem kontinuierlichen Lade- / Entladezyklus zwischen 40% und 60% SOC wurde der maximal mögliche Strom ermittelt. Der Startstrom wurde mit ca. 120A gewählt. Dieser wurde dynamisch durch das Temperaturderating des BMS begrenzt, bis sich ein Beharrungszustand (=Dauerstrom) einstellte. Es wurden die Kühlmitteltemperaturstützstellen 0°, 20°, 40° und 50°C untersucht. In Abbildung 207 ist der maximal mögliche Dauerstrom über der Kühlmitteltemperatur dargestellt. Die Verläufe wurden zwischen den Kühlmitteltemperaturstützstellen interpoliert.

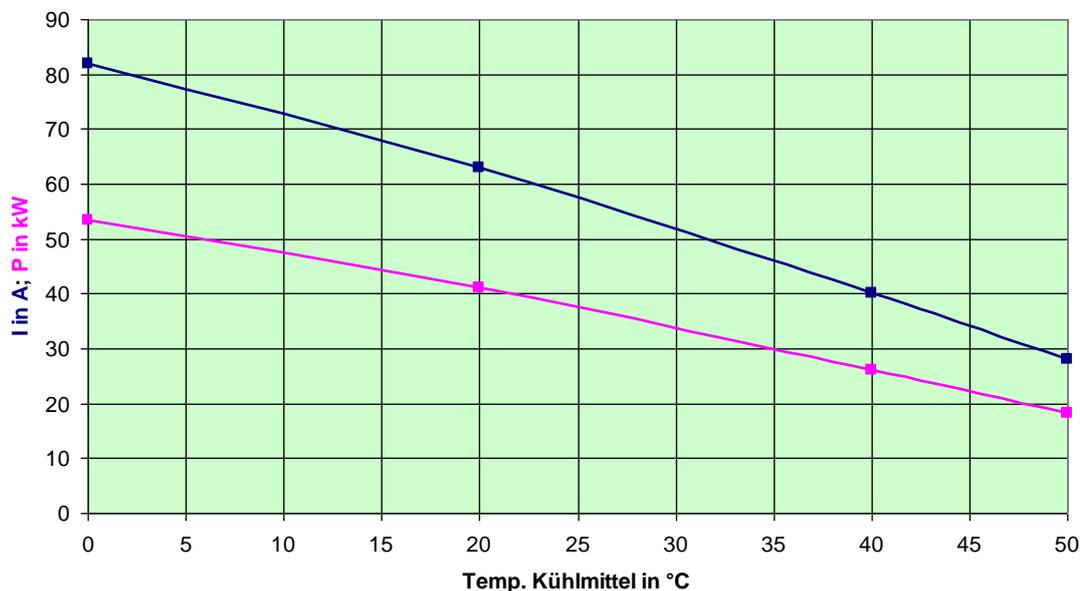


Abbildung 207: Maximaler Dauerstrom (Derating/Beharrung ohne Temperierung der Umgebungsluft)

Die sich durch das Temperaturderating des BMS ergebende mittlere Zelltemperatur liegt bei 52°C. Aufgrund der unzureichenden Wärmeleitung zwischen der Wärmequelle (Lithium-Ionen-Zelle) und der Wärmesenke (Kühlmedium) und des daraus resultierenden hohen ΔT muss mit zunehmender Kühlmitteltemperatur der Batteriestrom sehr stark verringert werden, um den Demonstrator thermisch nicht beschleunigt zu altern oder gar eine Übertemperaturabschaltung auszulösen. Die Wärmeleitung muss bei der Weiterentwicklung zwingend verbessert werden.

c) Innenwiderstand

Versuchsziel war hier die Ermittlung des Innenwiderstandes in Abhängigkeit von der mittleren Zelltemperatur. Der Innenwiderstand wurde durch die Auswertung von Stromsprüngen ermittelt. Hierbei wird die Spannungs-

änderung unmittelbar (ca. 100 ms) nach dem Stromsprung betrachtet. Der Innenwiderstand berechnet sich aus $R_i = dU/dI$ (Differentialquotient). Die Stromsprünge wurden innerhalb verschiedener Versuchsreihen ermittelt. In Abbildung 208 ist der Verlauf des Innenwiderstands des BF1-120 Demonstrators pro Zelle über der mittleren Zelltemperatur dargestellt.

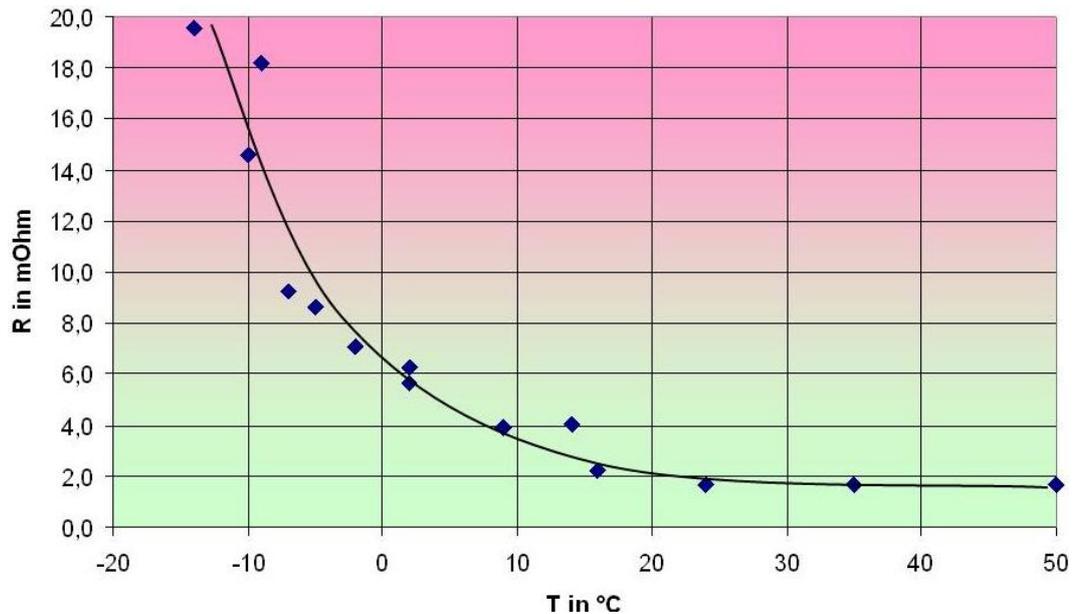


Abbildung 208: Innenwiderstandsverlauf als Funktion der Temperatur pro Zelle des BF1-120 Demonstrators

Der Innenwiderstand nimmt mit abnehmender Temperatur exponentiell zu, wodurch die Leistungsfähigkeit des Demonstrators sehr stark eingeschränkt wird. Mit zunehmender Temperatur zeichnet sich ein asymptotischer Verlauf entlang der Abszisse ab. Der optimale Betriebstemperaturbereich (Kompromiss aus Leistungsfähigkeit und Lebensdauer) liegt zwischen 25°C und 40°C. Um diesen Bereich gewährleisten zu können, muss der Demonstrator bei niedrigen Umgebungstemperaturen erwärmt (Eigen erwärmung oder Fremdheizung) und bei hohen Umgebungstemperaturen gekühlt werden. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an die Wärmeleitung in den Energiespeichern (insbesondere zwischen den Li-Ionen-Zellen als Wärmequelle und dem Kühlmittel als Wärmesenke), die mit den FUEL BF1- und BF2- Demonstratoren nicht in vollem Umfang umgesetzt werden konnten.

d) Temperaturverlauf durch Eigenerwärmung

Versuchsziel war die Ermittlung der Zeitdauer der Eigenerwärmung in Abhängigkeit der mittleren Zelltemperatur. In einem kontinuierlichen Lade- / Entladezyklus zwischen 40% und 60% SOC mit maximal möglichem Strom wurde die Eigenerwärmung des Demonstrators ermittelt. Der Maximalstrom wird begrenzt durch die Stromprognose für die nächsten 10s vom BMS, das Erreichen der zulässigen Zellspannung von 2,5V bzw. 4,2V sowie das Temperaturderating durch das BMS. In Abbildung 209 ist der gemessene Temperaturverlauf dargestellt.

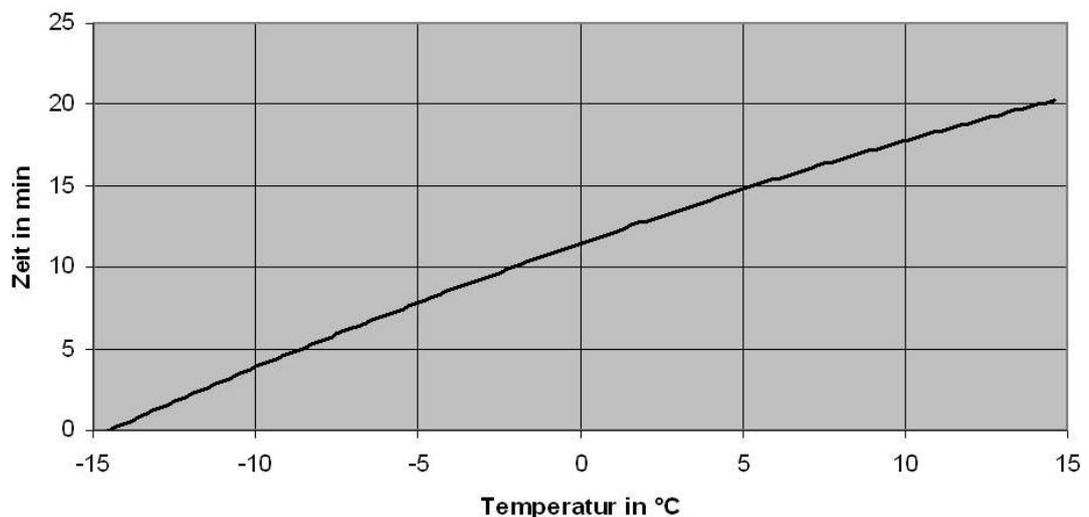


Abbildung 209: Eigenerwärmung BF1-120 Demonstrator (Erwärmung mit I_{max} zwischen 40% und 60 % SOC)

Es ist eine Zeitdauer von ca. 20 min notwendig, um den Demonstrator von ca. -12°C auf $+15^{\circ}\text{C}$ zu erwärmen. Für Stadtbusanwendungen ist diese Zeitdauer sehr kritisch zu betrachten, da für Anfahrvorgänge das elektrische Hybridsystem zwingend benötigt wird und somit längere Wartezeiten entstehen, bis das Fahrzeug betrieben werden kann. Im Rahmen der Weiterentwicklungen nach Projektende FUEL muss die Zeitdauer verkürzt werden.

Aufgrund eines Überstroms am stationären Prüfstand (siehe Abbildung 210), welcher durch eine fehlerhafte Ansteuerung des DC-Stellers verursacht wurde, musste die BF1-120 Demonstrator Erprobung vorzeitig beendet werden. Der Demonstrator wurde zur Befundung und Reparatur an den Verbundpartner Continental gesendet.

Der Prüfstand wurde nach dem Ausfall des BF1-120 Demonstrators für die Erprobung des BF2-120 Demonstrator umgebaut und die Inbetriebnahme erfolgreich abgeschlossen. Zu Beginn der Erprobung stand die Prüfung der Wärmeleitung im Fokus.

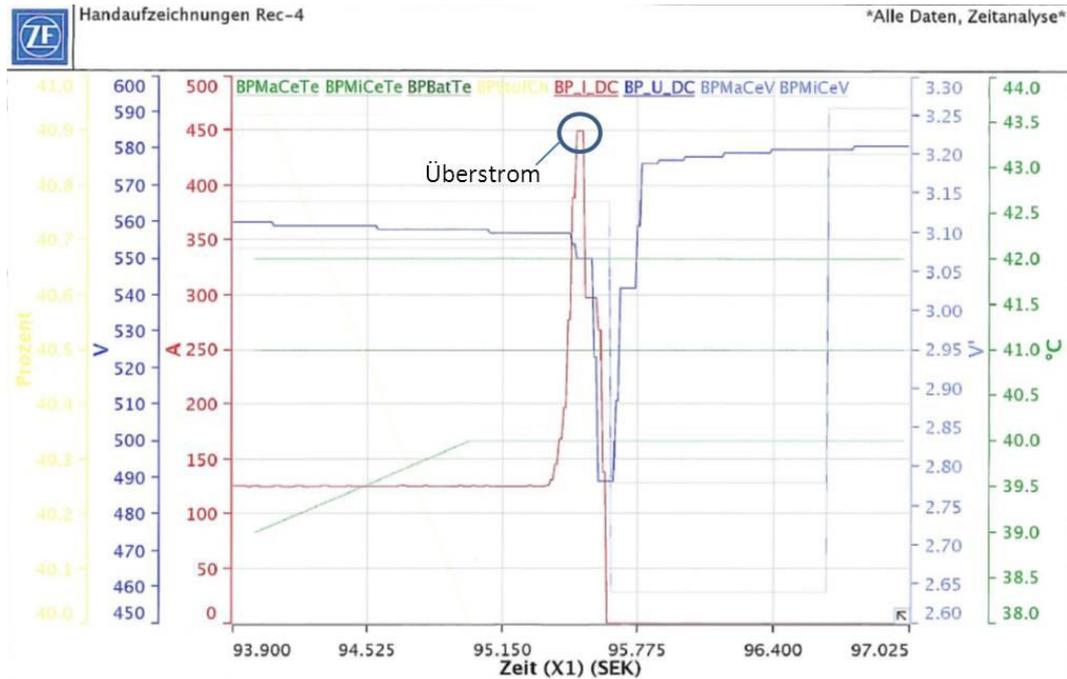


Abbildung 210: Überstrom am stationären Prüfstand bei der BF1-120 Demonstrator Erprobung

e) Batterie-interne Wärmeleitung

Versuchsziel war die Ermittlung der batterieinternen Wärmeleitung und des Temperaturunterschieds ΔT zwischen Zelle und Kühlmedium. In einem kontinuierlichen Lade- / Entladezyklus zwischen 40% und 60% SOC mit einem Strom von 78,8 A_{eff} wurde der Erwärmungsverlauf der Zellen bis hin zur Beharrungstemperatur ermittelt. Die Kühlmittelvorlauftemperatur betrug ca. 20°C. Hierbei wurden folgende Randbedingungen des Demonstrators eingehalten: Stromprognose für 1s vom BMS, Erreichen der zulässigen Zellspannung von 2,5 bzw. 4,2 V sowie Temperaturderating durch das BMS. In der Abbildung 211 ist der Erwärmungsverlauf der Lithium-Ionen-Zellen dargestellt.

Bei einer kontinuierlichen Belastung des Demonstrators im Neuzustand mit 78,8 A_{eff} stellt sich ein ΔT zwischen der mittleren Zelltemperatur und dem Kühlmedium von ca. 33 K ein. Um eine akzeptable Lebensdauer zu

erreichen, muss der Demonstrator im Betriebstemperaturbereich von 25°C bis 40°C betrieben werden. Bei der batterieinternen Wärmeleitung der BF2-120 Demonstratoren muss die Kühlmittelvorlauftemperatur demnach unterhalb von 7°C liegen, was technisch im Fahrzeug nicht darstellbar ist. Bei einer Weiterentwicklung muss die batterieinterne Wärmeleitung zwingend verbessert werden.

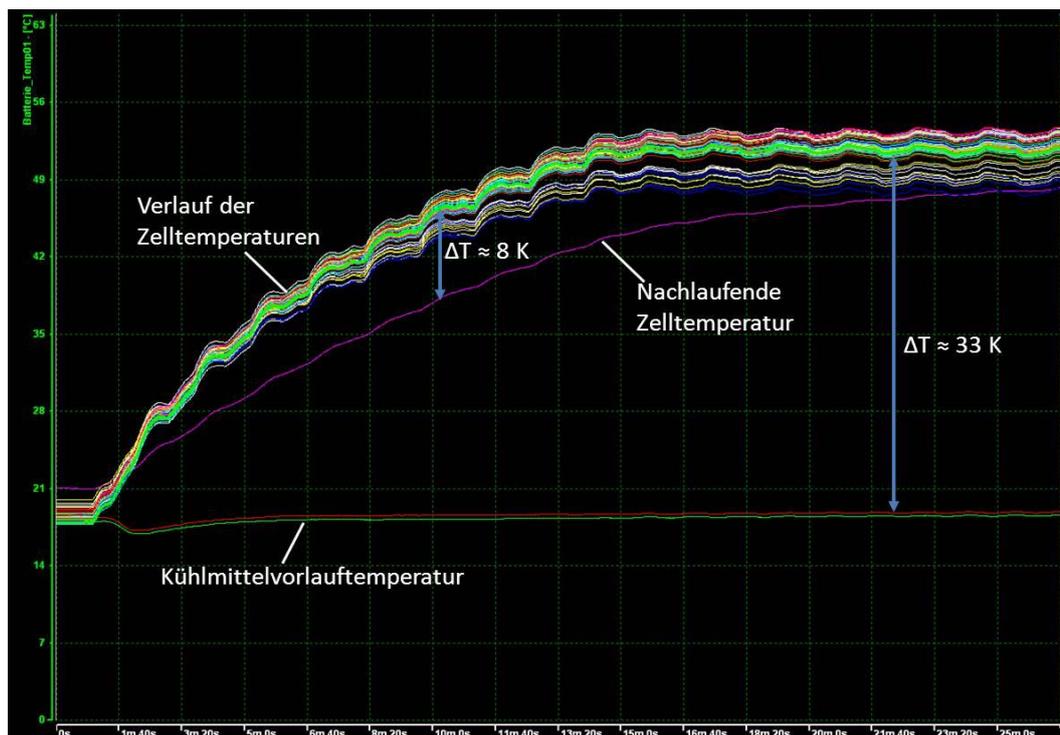


Abbildung 211: Verlauf Zelltemperaturen BF2-120 Demonstrator

5.3.9.3 Mobile Prüfstanderprobung der Demonstratoren für schwere Stadtbusse

Der mobile Prüfstand nach Abbildung 212 wurde für die Erprobung der BF2-120 Demonstratoren vorgesehen. Dieser wurde umgebaut und ein BF2-120 Demonstrator integriert. In Abbildung 213 ist der Umbau des mobilen Prüfstands sowie die Integration des Demonstrators in den Fahrzeuginnenraum dargestellt.

Bei der Inbetriebnahme des mobilen Prüfstands kam es zu einem Kurzschluss in der Slave-Batterie des BF2-120 Demonstrators. Der Demonstrator musste ausgebaut und zur Befundung und Reparatur an den Verbundpartner Continental gesendet werden. Ursache für den Kurzschluss war eine konstruktive Schwachstelle, wobei eine Luftstrecke zwischen

einer Verschraubung einer Stromschiene und einer Crimpung eines HV-Kabels aufgrund von Fertigungstoleranzen zu gering ausgeführt war und es hierdurch zu einem Überschlag kam (Abbildung 214). In Abbildung 215 ist der Kurzschlusspfad schematisch dargestellt.



Abbildung 212: Mobiler Prüfstand zur Erprobung der BF2-120 Demonstratoren

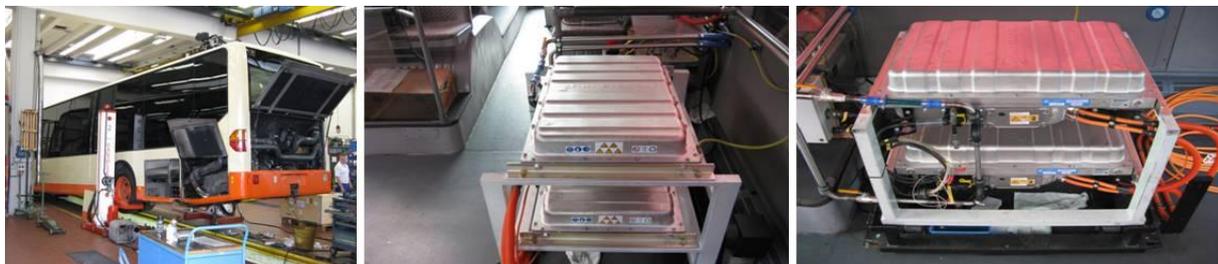


Abbildung 213: Umbau des mobilen Prüfstands und Integration der BF2-120 Demonstratoren

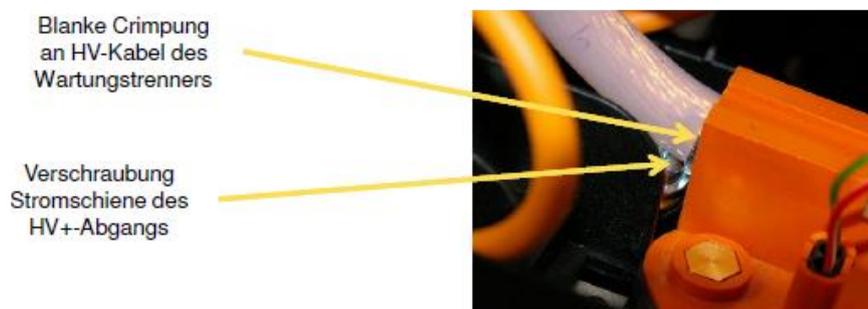


Abbildung 214: Ursache des Kurzschlusses

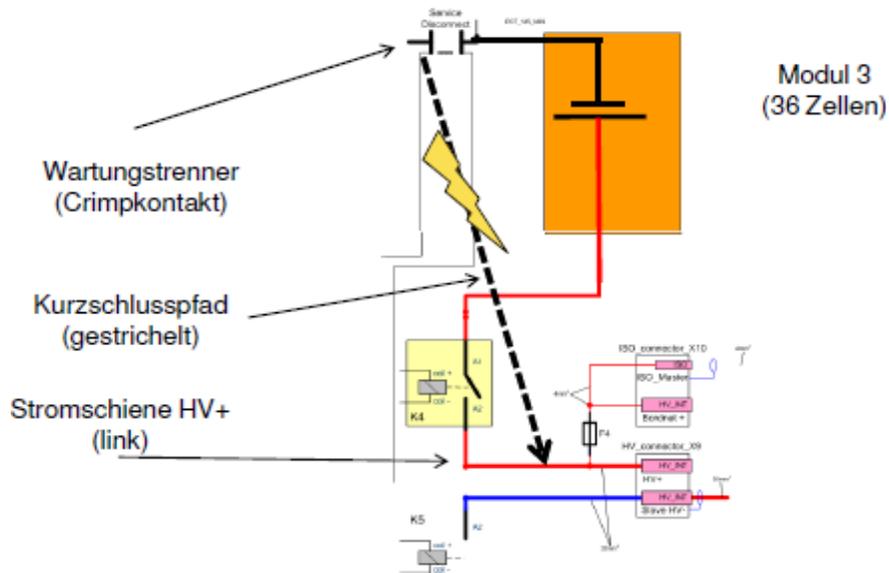


Abbildung 215: Kurzschlusspfad

5.3.9.4 Mobile Prüfstanderprobung der Demonstratoren für leichte Stadtbusse

Für die Erprobung der BF2-Demonstratoren für leichte Stadtbusse wurden zwei mobile Prüfstände beschafft. Ein mobiler Prüfstand wurde mit einem BF2-60 Demonstrator und der andere Prüfstand mit einem BF2-120 Demonstrator aufgebaut, um die beiden Systeme bzgl. der Dynamik und Kraftstoffeinsparung miteinander vergleichen zu können.

Die Hybridkomponenten wurden mittels eines Geräteträgers auf das Fahrzeugdach montiert. In Abbildung 216 ist die Anordnung der Hybridkomponenten des Systems mit einem BF2-120 Demonstrator dargestellt. Die beiden Prüfstände wurden während des Förderzeitraums für die Erprobung umgebaut und die Inbetriebnahme erfolgreich durchgeführt. Die Erprobung konnte wegen der beschriebenen Projektverzögerungen nicht bis zum Ende des Förderprojekts FUEL durchgeführt werden.



Abbildung 216: Anordnung Hybridkomponenten auf dem Fahrzeugdach

5.3.9.5 Mobile Prüfstanderprobung der Demonstratoren für Verteiler LKWs

Für die Erprobung der BF1-60 und BF2-60 Demonstratoren für Verteiler LKW wurden drei mobile Prüfstände vorgesehen. Die Prüfstände wurden zuerst für Erprobung der BF1-60 Demonstratoren umgebaut. Aus Sicherheitsgründen wurden die Demonstratoren in einen crash-sichereren Bereich auf die Ladefläche verbaut. Abbildung 217 zeigt zwei der drei mobilen Prüfstände und den Einbauort des Demonstrators auf der Ladefläche.



Abbildung 217: Mobile Prüfstände zur Erprobung der BF1-60 und BF2-60 Demonstratoren

Die erste Inbetriebnahme eines BF1-60 Demonstrators im mobilen Prüfstand konnte aufgrund von EMV-Problemen nicht erfolgreich durchgeführt werden. Aufgrund von HV-leitungsgebundenen Störungen aus dem Wechselrichter und der zu hohen Störempfindlichkeit der Überwachungselektronik (CSCs) der Lithium-Ionen-Zellen kam es zu häufigen Ausfällen des Demonstrators. Die HV-leitungsgebundenen Störungen haben die Messsignale der CSCs verfälscht, sodass fälschlicherweise eine Zellunter- bzw. Zellüberspannung oder eine Überschreitung der maximalen Zelltempera-

tur vom Steuergerät diagnostiziert wurde. Durch diese Fehldiagnose wur-
 den die Hauptschütze des Demonstrators (gegebenenfalls auch unter
 Strom) geöffnet, so dass ein Betrieb im Prüfstand nicht möglich war, ohne
 den Demonstrator zu schädigen.

Als ad-hoc Maßnahme wurde vom Verbundpartner Continental eine Fil-
 terbox entwickelt und ZF zur Verfügung gestellt, welche im HV-Kreis zwi-
 schen dem Demonstrator und dem Wechselrichter integriert ist. Diese
 wurde so dimensioniert, dass die Störungen im relevanten Frequenzbe-
 reich gefiltert werden und ein relativ zuverlässiger Betrieb des Demon-
 strators möglich war. In Abbildung 218 ist die EMV-Filterbox dargestellt. Im
 Anschluss wurde die hoch stöempfindliche Überwachungselektronik
 (CSCs) von Continental weiterentwickelt, sodass ein Betrieb ohne eine
 EMV-Filterbox möglich war. Nach Abschluss der Umbauarbeiten konnten
 die Demonstratoren in den mobilen Prüfständen in Betrieb genommen und
 mit Erprobung der BF1-60 Demonstratoren begonnen werden.

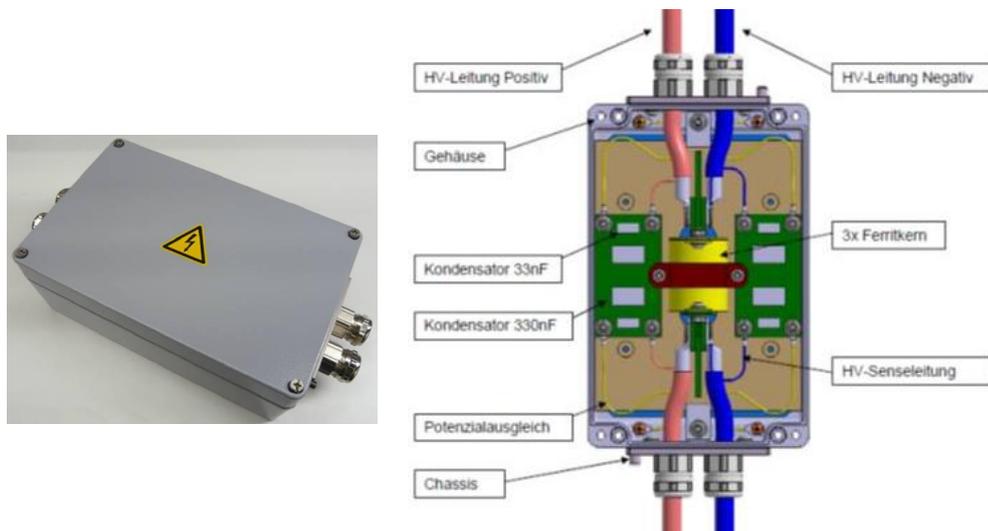


Abbildung 218: EMV-Filterbox

Auffallend war, dass die Zelltemperatur nicht im Betriebstemperaturbe-
 reich von 25-40°C gehalten werden konnte. In Abbildung 219 ist der Tem-
 peraturverlauf der maximalen Zelltemperatur während einer Testfahrt dar-
 gestellt. Die maximale Zelltemperatur betrug 53°C bei einer Vorlaufftem-
 peratur des Kühlmediums von ca. 20°C. Bei gleichbleibender Belastung
 müsste die Vorlaufftemperatur des Kühlmediums <7°C betragen, um den
 Demonstrator nicht oberhalb 40°C zu betreiben, was sich – wie bereits
 oben erwähnt - im Fahrzeug nicht darstellen lässt.

Nach einer umfassenden Analyse des Verbundpartners Continental konnte die Ursache für die unzureichende batterieinterne Wärmeleitung ermittelt werden. Zum einen wurden Materialien mit einer schlechteren Wärmeleitfähigkeit verwendet als vorgesehen und zum anderen bildeten sich Luftspalte zwischen Bauteilübergängen bedingt durch Verunreinigungen im Produktionsprozess und durch hohe Fertigungstoleranzen der Bauteile. Durch Nachbearbeiten der Bauteile, Verbesserung des Produktionsprozesses und Verwendung der vorgesehenen Materialien konnte durch den Verbundpartner Continental eine leichte Verbesserung der batterieinternen Wärmeleitung erzielt werden. Für den BF2-Demonstrator wurden neue Kühlkonzepte erarbeitet, um die interne Wärmeleitung zu verbessern.

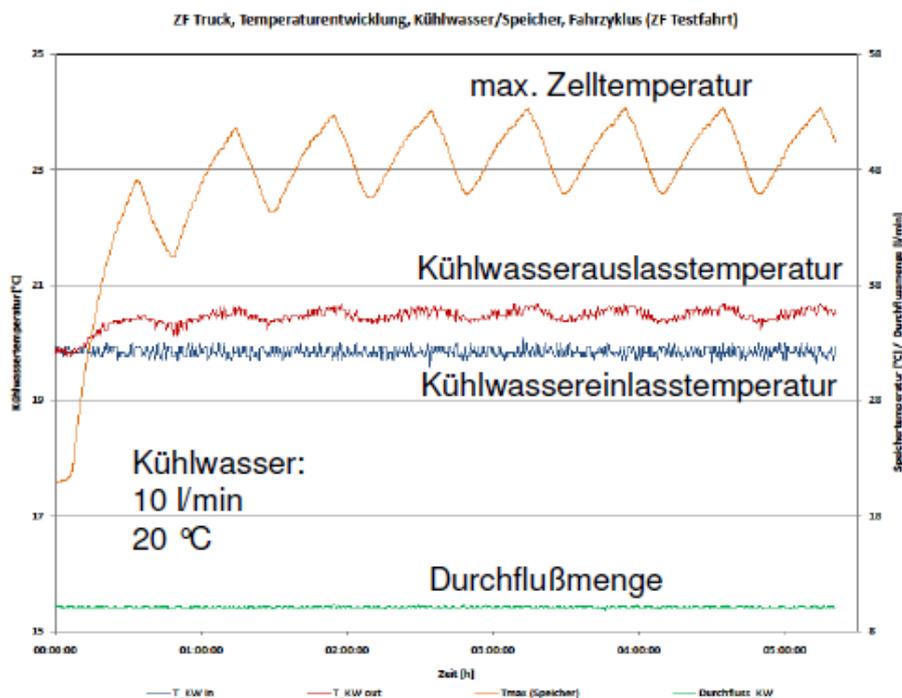


Abbildung 219: Temperaturverlauf BF1-60 Demonstrator

Die weiteren Erprobungsumfänge mit den BF1-60 Demonstratoren verliefen durchwegs positiv. Die mobilen Prüfstände wurden nach Abschluss der BF1-60 Demonstrator Erprobung auf die BF2-60 Demonstratoren umgebaut. In Abbildung 220 ist der Prüfstandumbau für die Erprobung eines BF2-60 Demonstrators abgebildet. Auch hier wurde aus Sicherheitsgründen der Demonstrator wieder auf der Ladefläche verbaut.



Abbildung 220: Prüfstandumbau für die BF2-60 Demonstrator Erprobung

Aufzeichnung und Auswertung von batteriespezifischen Daten mit Ableitung von Batterieprofilen für die Lebensdauer-Berechnung und Simulation

Der Umfang dieses Arbeitspunktes umfasste die Aufzeichnung und Auswertung von batteriespezifischen Daten, wie bspw. Strom-, Spannungs-, SOC- und Temperaturverläufe. Mit den Daten aus der BF1- und BF2-Demonstrator Erprobung konnten Simulationsmodelle verifiziert werden. In Abbildung 221 sind der simulierte (gelb) und der gemessene Spannungsverlauf (magenta) eines BF2-60 Demonstrators dargestellt, welche durch den Verbundpartner Continental ermittelt wurden.

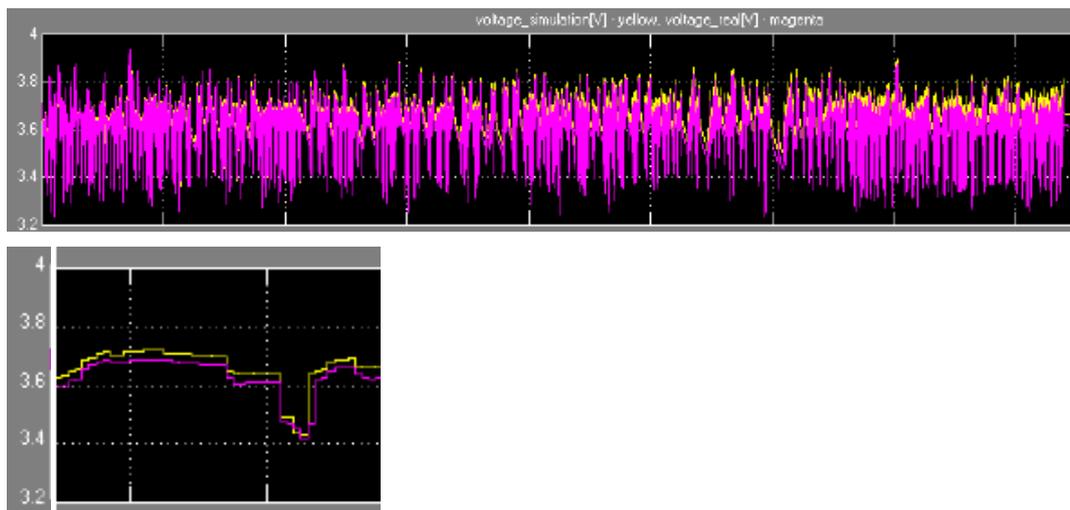


Abbildung 221: Vergleich simulierter (gelb) und gemessener (magenta) Verlauf der Spannung eines BF2-60 Demonstrators bei Belastung (oben: Gesamtmessung, unten: Zoom eines aussagekräftigen Teilintervalls)

Die Modellabweichung liegt größtenteils innerhalb des Bereichs von $\pm 0,1V$. Bei den Abweichungs-Spitzen außerhalb dieses Bereichs handelt es sich um Differenzen, welche bei starken Lastwechseln aufgrund von Signalverzögerungen zwischen Strom und Spannung entstehen. Mittels der sehr guten Genauigkeit der Simulationsmodelle konnten realitätsnahe Lastkollektive zur Lebensdauerberechnung der Demonstratoren erstellt werden.

5.3.9.6 Stationäre Prüfstanderprobung der Demonstratoren zur Prüfung des Ausfallverhaltens, Zusammenspiel mit anderen Komponenten

Die Erprobung konnte nach der Behebung der EMV-Probleme am BF1-60 Demonstrator am stationären Prüfstand gestartet werden. In Abbildung 222 und Abbildung 223 ist der Prüfstandaufbau des Gesamthybridsystems dargestellt. Der Fokus der Erprobung lag auf dem Betriebsverhalten des Demonstrators im Gesamthybridsystem mit Wechselrichter und E-Maschine. Hierbei wurden besonders die folgenden, im Arbeitspaket „Systemintegration Speicherverschaltung“ spezifizierten Funktionsanforderungen geprüft.

- Normal- und Sicherheitsfunktionen
- Leistungsvorhersage bzw. Stromprognose
- Kommunikationsschnittstelle

Die bei der Inbetriebnahme festgestellten Fehler bei der Ladezustands-ermittlung und Kommunikation konnten durch ein Software-Update beseitigt werden. Der stationäre Prüfstand wurde nach der Erprobung des BF1-60 Demonstrators auf den BF2-60 Demonstrator umgebaut. In Abbildung 224 ist der Prüfstandaufbau dargestellt.

Die spezifizierten Funktionsanforderungen konnten zum Teil positiv getestet werden. Eine Auffälligkeit war, dass die Stromprognose zu hohe Lade- bzw. Entladeströme anzeigte, dadurch der Demonstrator überlastet wurde und dies zur Abschaltung führte. Zudem traten SOC-Sprünge auf. Mittels eines erneuten Software-Updates konnten diese Fehlfunktionen behoben werden. Die Erprobung musste unterbrochen werden, da aufgrund von sicherheitskritischen Schwachstellen der Demonstrator an den Verbundpartner Continental zu Umbauarbeiten zurückgesendet werden musste. Die Erprobung konnte im kurzen Zeitraum des Förderprojekts nicht weitergeführt werden.

5.3.9.7 Umwelttests

Weiterhin wurde eine Reihe von grundlegenden Umwelttests mit BF1 und BF2-Mustern durchgeführt. Der Test erfolgte nach DIN EN 60068-2-52 Kb Salznebel zyklisch, Schärfegrad 4. Abbildung 225 (links) zeigt den Prüfling 100317-1 in der 4000 Liter Salznebelkammer vor dem Test. Nach der Prüfung (Bild rechts) konnte an einigen Schraubverbindungen, den Kabelverschraubungen und auf dem verzinktem Deckel Korrosionen festgestellt werden. Der Speicher lieferte auch nach dem Test die volle Funktionalität.

Salzsprühnebeltest BF1-60



Abbildung 225: Salzsprühnebeltest BF1-60: Energiespeicher vor und nach dem Test

Vibrationstest BF2-60

Folgende Vibrationstests eines Energiespeichers (Abbildung 226) in X-Achse wurden durchgeführt:

- Resonance search test pre shock test, performed at room temperature according to IEC 60068-2-6: 2007-12 Environmental testing Part 2-6: Test Fc: Vibration sinusoidal.
- Shock tests, performed at room temperature according to IEC 60068-2-27: 2008-02 Environmental testing Part 2-27: Test Ea: Shock.
- Resonance search test post shock test, performed at room temperature according to IEC 60068-2-6: 2007-12 Environmental testing Part 2-6: Test Fc: Vibration (sinusoidal).
- Random vibration test, performed with temperature cycles according to IEC 60068-2-64: 2008-04 Environmental testing Part 2-64: Test Fh: Vibration, broadband random (mit Temperaturüberlagerung von -40°C bis 60°C).

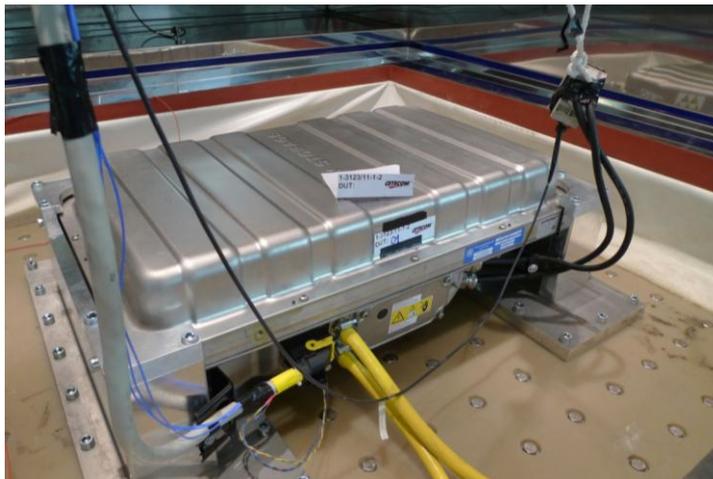


Abbildung 226: Vibrationstest BF2-60

Als Ergebnis der Vibrationstests war festzuhalten: Der Shocktest wurde bestanden, Resonanzuntersuchungen vorher und nachher zeigten keine Resonanzverschiebungen. Der Vibrationstest wurde nach 21h abgebrochen, da mehrere Überwachungssensoren eine Resonanzverschiebung aufwiesen. Solche deuten meistens auf Veränderung im mechanischen Aufbau hin wie etwa das Lösen von Verschraubungen, Risse im Material etc.

Weitere Tests mit dem BF2-60 Energiespeicher in der Klimakammer

- a) Lagerung bei hoher / niedriger Temperatur: Der Speicher wurde für 24h bei -40°C gelagert. Vorher und nachher wurden Funktionstests durchgeführt. Der Speicher hat den Test bestanden. Anschließend er-

folgte die Lagerung bei 70°C für 48h. Auch dieser Test wurde be-
standen.



Abbildung 227: BF2-60 Energiespeicher in der Klimakammer

- b) Lagerung bei hoher Luftfeuchte: Der Aufbau ist schematisch im nach-
folgenden Diagramm gezeigt.

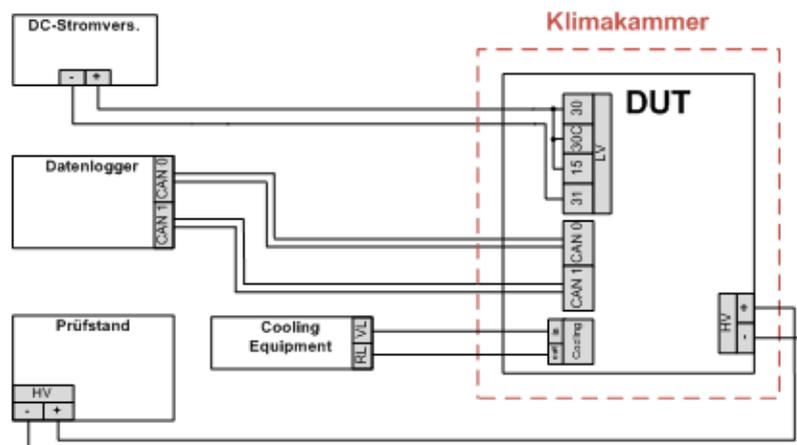


Abbildung 228: Versuchsaufbau BF2-60 Energiespeicher und hohe Luftfeuchte

Zunächst erfolgte die Lagerung des Speichers bei 30°C und 93%rH
für 20Tage und 23h, anschließend der Betrieb der Batterie unter Voll-
last. Auch dieser Test wurde bestanden. Es kam zu keiner messbaren
Beeinflussung des Isolationswiderstands durch den Test.

- c) IP Test am BF2-60 Gehäuse: Das Gehäuse wurde nach DIN 40050
auf Eindringen fester Körper mittels Arizonastaub IP 6KX sowie auf
Eindringen von Wasser mittels Dampfstrahler IP X9K mit verschiede-
nen Auftreffwinkeln getestet.



Abbildung 229: IP Tests am BF2-60 Energiespeichergehäuse (links: Dampfstrahlen unter einem Winkel von 30°, rechts: geringe Mengen eingedrungenen Wassers)

Ein Eindringen von Staub konnte nicht beobachtet werden. Daher wurde dieser Tests bestanden. Beim Dampfstrahltest trat eine geringe Menge Wasser an verschiedenen Stellen in das Gehäuse ein. Eine abschließende Bewertung des Tests ist mit dem Gehäuse allein nicht möglich, da über die Funktionalität des Energiespeichers nach dem Test keine Aussage getroffen werden kann. Die Menge an eingedrungenem Wasser dürfte aber nicht ausreichen, um die Funktion des Energiespeichers zu beeinträchtigen. Daher kann das Ergebnis als positiv betrachtet werden.

5.3.9.8 Abuse-Tests

a) Kurzschlussstest BF1-60

Mit der Versuchsanordnung in Abbildung 230 wurden bei Raumtemperatur zwei Testfälle (entsprechend Testvorschrift SAND 2005-3123 chapter 5.2) durchgeführt:

- Kurzschlussmessung bei vollgeladener Batterie (95% SOC), externer Kurzschlusswiderstand $\leq 5 \text{ m}\Omega$, Batteriemanagementsystem aktiv und Sicherung in Betrieb, der Sicherheitsschalter über das BMS gesteuert. Es wurde ein Kurzschlussstrom von über 3000 A gemessen. Der Überstromschutz löste wie erwartet aus, das Testergebnis war positiv.
- Beim zweiten Test wurde im Gegensatz zum ersten eine nicht vollgeladene Batterie verwendet (10% SOC), ferner wurde der externe Kurzschlusswiderstand mittels zusätzlichen Widerstands

auf $110\text{ m}\Omega$ erhöht, ansonsten wurde nichts geändert. Der Kurzschluss (Kurzschlussstrom über 1000 A) wurde 6 Sekunden gehalten, dann öffnete der Sicherheitsschalter. Auch hier löste der Überstromschutz wie erwartet aus, das Testergebnis war positiv.



Abbildung 230: Versuchsanordnung Kurzschlussstest (BF1-60)

b) Überladung BF1-60

Der Energiespeicher wurde bei Raumtemperatur mit 25 A von 100% SoC auf 150% SoC überladen (vgl. Testvorschrift SAND 2005-3123 Chapter 5.1). Die Überspannungsabschaltung wurde deaktiviert. Die Tests wurden jeweils mit einem neuen und einem vorgealterten Speicher durchgeführt. Als Testergebnis war festzuhalten: Es traten keine Auffälligkeiten auf, kein Masseverlust, ferner war keine Temperaturreaktion feststellbar.

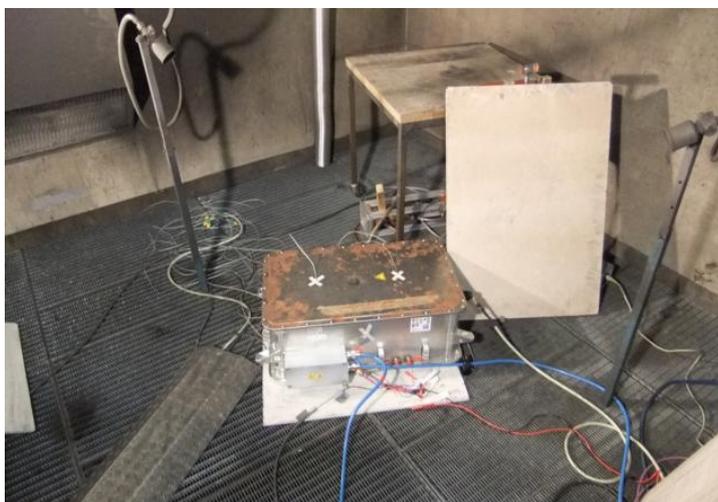


Abbildung 231: Versuchsanordnung Überladungstest (BF1-60)

c) Nagel-Eindringversuch BF1-60

Der Test wurde an einer Batterie bei Raumtemperatur und maximalen SOC von 95% durchgeführt (Testvorschrift SAND 2005-3123 Chapter 3.2). Als Eindringobjekt wurde ein geschärfter Stahlnagel mit 20mm Durchmesser gewählt, die Eindringtiefe betrug 100mm. Als Ergebnis wurden ein Temperaturanstieg um 7K am Penetrationsort, leichte Rauchentwicklung und der Austritt von Elektrolyt festgestellt. Das Versuchsergebnis ist sehr positiv zu werten.



Abbildung 232: Eindringen eines Nagels in den Energiespeicher (BF1-60)

6 Ausblick auf die Verwertungsplanung

Mit FUEL erarbeiteten sich die Projektpartner Continental, ZF und ads-tec die Basis für neues Know-how an Produktionstechnik zur Herstellung von Energiespeichersystemen für Hybrid-Nutzfahrzeuge. Die am Ende des Förderprojektes verfügbaren Demonstratoren und Verfahrensabläufe führten zum Nachweis der technischen Durchführbarkeit sowie der generellen Umsetzbarkeit der Verfahren. Für die Industrialisierung sind weitere Arbeiten nach FUEL erforderlich. Die gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen lassen sich auf Produktionsprozesse von Li-Ionen-Speichern für andere Anwendungen (etwa für PKW oder Industrieanwendungen) übertragen.

Das von den Verbundpartnern verfolgte Ziel ermöglicht den Beteiligten nach Abschluss der Förderprojektes eine technische Weiterentwicklung der erreichten Arbeitsergebnisse bis hin zu einer Industrialisierung für verschiedenste Kundenprojekte, mit dem Ziel einer Serienfertigung von Energiespeichern für Nutzfahrzeuge am Standort Deutschland. In allen Märkten sind die deutschen Automobilzulieferer und Maschinenbauer nach wie vor wichtige Partner der globalen Automobilindustrie. Somit stellt FUEL für die beteiligten Firmen ein Sprungbrett zu entsprechendem Markpotential für nachhaltiges Wachstum an deutschen und weltweiten Standorten dar.

Obwohl nicht alle ursprünglich geplanten Ziele (infolge des erforderlichen Redesigns zum BF3 Stand) während der kurzen Projektlaufzeit von FUEL erreicht werden konnten, ist das Projekt FUEL als großer Erfolg zu werten. Daher führen die Verbundpartner die noch nicht abgeschlossenen Arbeiten seit dem Projektende von FUEL auf eigene Kosten weiter.

7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Continental war in FUEL mit mehreren rechtlichen Einheiten eingebunden. Die Federführung und Koordination übernahm Hr. Stefan Bonnekessel von TAEM (Temic Automotive Electric Motors GmbH) in Berlin. Weitere Unternehmensteile wurden über Unteraufträge eingebunden: Continental Automotive GmbH in Regensburg übernahm die Entwicklung der Steuerungselektronik und die Hardware-Entwicklung. Zu den Schlüsselaufgaben der Continental Engineering Services and Products GmbH in Nürnberg zählte die Entwicklung und Beistellung der Elektromechanik-Komponenten.

Zur Durchführung der umfangreichen Arbeiten für FUEL wurde im Rahmen von Fremdbeauftragungen (entsprechend dem Projektantrag) mit einer Reihe weiterer Firmen kooperiert:

- a) Im Bereich Baugruppen- und Funktions-Entwicklung wurden von Continental externe Dienstleistungen eingebunden, um den zusätzlichen Bedarf an Experten-Kompetenz über den Bestand an eigenen Mitarbeitern abdecken zu können. Dies betrifft folgende Themen:
- Anforderungs-Management (u. a. zur Lastenhefterstellung): über Fa. Hays AG, Frau Schievelbein.
 - Moderierung und Erstellung der Fehlermöglichkeit- und Einfluss-Analyse: Fa. Bertrandt Ingenieurbüro GmbH, Herr Tüllmann.
 - Ausarbeitung von Software-Teilstrukturen, -Anforderungs-Management in der Konzeption und Umsetzung des komplexen Master-Slave Software für die serielle Verschaltung von zwei Energiespeichern: Fa. Embeddeers GmbH, Fa. Tieto Deutschland GmbH, Fa. Berner & Mattner GmbH.
 - Die Ausarbeitung des System-Risiko Analyse und des Sicherheitsplanes (funktionale Sicherheit) erfolgte mit Unterstützung eines Experten: Fa. Reutax AG, Herr Leist.
 - Unterstützung in der herstellbarkeitsoptimierten Auslegung eines Leichtbaugehäuses: Fa. FF Fluid Forming GmbH.
 - Die Auslegung von Kühlplatten für die Zellmodule übernahm Fa. Behr GmbH & Co. KG.

- Für Zusatzprüfkapazitäten sowie die Bereitstellung von Sonderprüfanlagen wurde das Prüflabor Phönix Testlab GmbH beauftragt.
 - Weiterhin wurde im Rahmen der Halbleiterentwicklung mit der Hochschule Ingolstadt zusammen gearbeitet.
- b) Im Bereich Anlagen und Materialbeschaffungen war die Expertise folgender Firmen erforderlich:
- Die Testausstattung, Prüfstände, Klimaschränke für die 900V Energiespeichersysteme für Nutzfahrzeuganwendungen wurde über die Firmen Gigatron (Leistungsprüfstände), Heiden (Laborgeräte und Prüfstände) sowie Huber (Klimaschränke) beschafft.
 - Werkzeuge zur Herstellung des Leichtbaugehäuses und der Kühlerplatten sowie erste Muster/Demonstratoren dieser Komponenten wurden von den Firmen Behr und Schickling bezogen.

Wie bei der Darstellung der Arbeitsergebnisse von ads-tec erwähnt, wurde zur Durchführung der umfangreichen Arbeiten auch auf die Expertise von Dritten zurückgegriffen:

- Mit dem Laserhersteller Rofin wurden Beratungsgespräche zum Laserschweißen von Kupfer und Aluminium durchgeführt. Dort wurden im Auftrag von ads-tec Proben gefertigt.
- Mit dem Bayrischen Laserzentrum wurden Beratungsgespräche zum Laserschweißen von Kupfer und Aluminium durchgeführt. Dort wurden im Auftrag von ads-tec Proben gefertigt.
- Mit dem Ultraschall-Schweißgeräte-Hersteller Branson wurden Beratungsgespräche zum Ultraschallschweißen von Aluminium und Kupfer durchgeführt. Dort wurden im Auftrag von ads-tec Proben gefertigt.
- Mit dem Ultraschall-Schweißgeräte-Hersteller Steckmann Ultrasonics wurden Beratungsgespräche zum Ultraschallschweißen von Aluminium und Kupfer durchgeführt. Dort wurden im Auftrag von ads-tec Proben gefertigt.
- Mit dem Ultraschall-Schweißgeräte-Hersteller Telsonic wurden Beratungsgespräche zum Ultraschallschweißen von Aluminium und Kupfer durchgeführt.
- Die Firma Festo-Didaktik hat bei ads-tec eine Schulung zur Gefahrenanalyse durchgeführt. Daran haben insbesondere die an der

Entwicklung der Prozessprüfstände beteiligen Mitarbeiter (Konstruktion, Elektroplanung, Software) teilgenommen.

- Die Firma Wanders-Engineering hat für die FMEA der Prozessprüfstände einen Moderator gestellt.
- Mit dem Klebstoffhersteller Biolink wurden Beratungsgespräche durchgeführt. Er liefert Rollen mit zugeschnittenem Klebeband zur Inbetriebnahme des Prozessprüfstands zur Bi-Pack-Fertigung.
- Mit den Firmen FMS und Fife Tidland wurden Beratungsgespräche zum Abwickeln von Rollenware und zur Bahnkantensteuerung geführt. Sie liefern Komponenten für den Prozessprüfstand zur Bi-Pack-Fertigung.
- Mit dem Dosiersystem-Hersteller Viskotek wurden Beratungsgespräche zum Auftragen von flüssigen Klebstoffen durchgeführt.
- Die Firma Festo hat einen servopneumatischen Antrieb vorgestellt. Ein solcher Antrieb wird im Prozessprüfstand zur Bi-Pack-Fertigung verwendet.
- Mit den Firmen Balluff und Kistner wurden Beratungsgespräche zu verschiedenen Erkennungsaufgaben geführt. Sie liefern Sensoren für die Prozessprüfstände.
- Die Firma Schäfer in Wolfschlugen wurde besucht. Sie stellt Etikettiermaschinen her. Es fand ein Erfahrungsaustausch zum Thema Bahnregelung statt.
- Es wurde eine Schulung durch die Firma Beckhoff durchgeführt. Sie liefert die Steuerung für die Prozessprüfstände.
- Es wurden Beratungsgespräche mit der Firma Denios durchgeführt. Denios stellt Brandschutzcontainer her, wie sie von ads-tec für den Demonstrator zur Zellkontaktierung empfohlen werden.
- Mit der Firma TDS wurden Beratungsgespräche zur spanenden Bearbeitung komplexer Teile durchgeführt.
- Mit der Firma ASQTEC wurde gemeinsam eine Lösung zum CNC gesteuerten Dosieren von verschiedenen Klebstoffen erarbeitet. ASQTEC liefert Mehrachsprotale, die bei ads-tec mit verschiedenen Dosier-Systemen zu experimentellen Klebeständen aufgerüstet wurden. ASQTEC und ads-tec planen auch nach Ablauf des Förderprojekts FUEL weitere Kooperationen zur Entwicklung innovativer Klebesysteme.

8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit von FUEL wurden keine Fortschritte anderer Stellen bzw. Forschungsverbunde zur Batterietechnik für Nutzfahrzeug-Hybridanwendungen bekannt. Eine Anpassung der FUEL Zielsetzung und des Lösungsansatzes war daher nicht erforderlich.

Mit Blick auf die Entwicklung von Kühlkonzepten für Energiespeicher ist das Knowhow von Firma Akasol zu nennen. Informationen dazu:

<http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/14503/Continental-und-Akasol-entwickeln-Hochvolt-Lithium-Ionen-Batteriesysteme.html>

Im Hinblick auf die Produktionstechnik sind die Arbeiten im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts DeLIZ zu erwähnen: In diesem Projekt beschäftigt sich das IWS Dresden mit der Herstellung von Artungleichen Verbindungen, insbesondere Kupfer-Aluminium-Verbindungen im Anwendungsfeld von Lithium-Ionen-Batterien. Als Verfahren wird dort neben dem Laserstrahlschweißen insbesondere das Laserinduktionswalzplattieren untersucht. Dabei wird ein Band aus Kupfer und Aluminium mit einer sehr hohen Festigkeit verbunden. Mit diesem Band als Hilfswerkstoff kann die Verbindung zweier Ableitertabs über zwei gleichartige Verbindungen statt über eine ungleichartige hergestellt werden. Weitere Informationen zu diesem Verfahren (<http://www.iws.fraunhofer.de/presse/2011/pr1107.html>, eingesehen am 01.07.11)

9.1 Berichte, Vorträge und Veröffentlichungen

Das Thema FUEL wurde auf folgenden Kongressen vorgestellt:

- 12. VDA Technischer Kongress 2010 (24. - 25. März 2010) in Ludwigsburg
- 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung des PTKA (9. - 10. März'10)
- IAA Nutzfahrzeug Vorpressestermin am 21.07 – 22.07.2010 in Friedrichshafen
- IAA Nutzfahrzeuge Hannover, 23. – 30. September 2010
- Statuskolloquium „Produktion für Elektromobilität“ am 25.11.2010 in Dresden
- Elektrobuss Konferenz der VDV Akademie am 21.02 – 22.02.2011 in Berlin
- Hannover Messe Industrie, Stand des BMBF, 4. – 8. April'11
- Wiener Motorensymposium, 5. - 6. Mai'11
- VDI Getriebekonferenz in Friedrichshafen, 7. – 8. Juni'11
- Asea Media Event in Frankfurt, 21. Juli'11
- Lebenswelt Elektromobilität in Mannheim, 9. – 10. September'11

Weiterhin flossen die Arbeitsergebnisse in die Berichte der fachbezogenen Presse ein (u. a. Nutzfahrzeugpresse⁵⁵, Journal of Power Sources etc.). Insbesondere ist hier die gemeinsame Publikation von Continental und Festo zu nennen:

- Zeitschrift E-Mobility 02/2011, „Automatisch ins Zeitalter der Elektromobilität“

9.2 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen von FUEL wurden von den Verbundpartnern folgende Schutzrechte angemeldet:

⁵⁵ Nutzfahrzeugpresse: u.a. Lastauto&Omnibus, Omnibusrevue, Busfahrt,
[http://www.transaktuell.de/index.php?id=13&tx_ttnews\[tt_news\]=660386&tx_ttnews\[backPid\]=4&chash=9db4d3c2ac](http://www.transaktuell.de/index.php?id=13&tx_ttnews[tt_news]=660386&tx_ttnews[backPid]=4&chash=9db4d3c2ac)

Continental:

Internes Akten- zeichen (EM)	Zugangs- datum	Titel
2010E00843 DE	07.07.2010	Verfahren zur Kaltstartverbesserung
2010E01128 DE	08.09.2010	Modulares Fluidkühler mit gesteckte Kühlfinne und HV Isolation
2010E01135 DE	08.09.2010	Fluidkühler mit durchgehende Kühlfinne, Kühlung anhand Luft oder mit einer nicht leitende Flüssigkeit
2010E01212 DE	27.09.2010	Wärmeableitung von Batteriepacks mit Flachzellen
2010E01388 DE	01.11.2010	Fügen von Soft-Pack Lithium-Ionen Batteriezellen und Kühlkörper mit gewölbten Oberflächen
2010E01389 DE	01.11.2010	Elektrochemisches Energiespeichersystem mit kapazitivem Pulsspeicher
2010E01465 DE	08.11.2010	Gestapelter Zellaufbau mit gestapelten Blechkühlfinnen
2010E01542 DE	26.11.2010	SOC Bestimmung mit Referenzzelle
2011E00573 DE	29.03.2011	Dichtungssystem für beidseitig kühlmitteldurchströmte Kühlfinnen
2011E00574 DE	29.03.2011	Wannenkühler zur Kühlung von HEV-Lithium-Ionen Batterien
2011E00601 DE	04.04.2011	Gehäuse aus Stanz und Biegeteile
2011E00813 DE	18.05.2011	Umsetzung eines Energiespeichergehäuses mit zwei identischen Halbschalen
2011E00856 DE	27.05.2011	Kabeldurchführung durch ein dünnwandiges Gehäuse eines Energiespeichers
2011E00901 DE	08.06.2011	Elektromechanik- Box; EM- Box
2011E00932 DE	16.06.2011	Wiederlösbare Kontaktierung von Zell-Tabs

ads-tec:

Internes Akten- zeichen (EM)	Zugangs- datum	Titel
A 43 502/lmu	06.07.2010	Verfahren zur Bildung einer Trageinheit für Pouchzellen
A 43 503/lmu	06.07.2010	Verfahren zum Aufbringen einer Materialschicht auf einen flächigen Träger

10 Referenzen

- [1] Jaksch, Hans-Dieter (1993), Batterielexikon, Primär- und Sekundärsysteme, Ladetechnik, Fertigung, Messtechnik, München: Pflaum Verlag, Deutschland
- [2] Anderson, Anna S. (2000), Lithium Iron Phosphates as Cathode Materials in Lithium Batteries, UPPSALA University, Sweden
- [3] Euler, K. J. (1982), Batterien und Brennstoffzellen Aufbau, Verwendung, Chemie. Springer Verlag, Berlin, Deutschland
- [4] Kiehne, H. A. (2003), Battery Technology Handbook, second edition, Expert Verlag Renningen-Malsheim, Deutschland
- [5] Berndt, Dietrich (1993), Maintenance Free Batteries, Lead Acid, Nickel/Cadmium, Nickel/Hydride, A Handbook of Battery Technology, Research Studies Press Ltd. Taunton, Somerset, England
- [6] Dr. F. Trueb, Lucien und Dr. Rüetschi (1998), Batterien und Akkumulatoren, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, Deutschland
- [7] Kiehne, Hans – Albert (2003), Batterien, Band 57, 5. Auflage, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, Deutschland
- [8] Wenzl, Heinz (2002), Batterietechnik, Band 582, 2. Auflage, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, Deutschland
- [9] Besenhard, Jürgen O (1999), Handbook of Battery Materials, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Deutschland
- [10] Van Schalkwijk, Walter A. und Scrosati, Bruno (2002), Advances in Lithium-Ion Batteries, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA

11 Abkürzungen

ASIL	Automotive Safety Integrity Level
BMC	Battery Management Controller
BMS	Battery Management System
CAN	Controller Area Network
CSC	Cell Supervising Circuitry
CSE	Cell Supervising Electronics
DDK	Dynamische Differenzkalorimetrie
ELA	Entladen der Zelle
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOL	End of Life (im Kontext Energiespeicher: Lebensdauer)
EOL	End of Line (im Kontext Montageverfahren: Bandendeprogrammierung)
FEM	Finite Elemente Methode
FMEA	Failure Modes Effects Analysis
FMEDA	Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis
FSI	Functional Safety Integrity
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
FUEL	Future Goes Electric
HCU	Hybrid Control Unit
HiL	Hardware in the Loop
HV	High Voltage (450V / 900V)
HW	Hardware
IFS	Institut für Füge und Schweißtechnik der Technischen Universität Braun- schweig
LAD	Laden der Zelle
LV	Low Voltage (24V NKW, 12V PKW)
MCAL	Modular Calender Access Library
MCB	Master Control Board
NKW	Nutzkraftwagen
OCV	Leerlaufspannung
PCB	Printed Circuit Board
P-FMEA	Prozess-FMEA
PKW	Personenkraftwagen
QM	Quality Management
RAC	Innenwiderstand Wechselspannungsmessung (dynamischer Innenwider- stand)

RDC	Innenwiderstand Gleichspannungsmessung (statischer Innenwiderstand)
SAFT	Shear Adhesion Failure Temperature (Scherkraft-Versagenstemperatur)
SEI	Grenzschicht zur Anode
SOC	State of Charge
SOF	State of Function (Leistungsfähigkeit)
SOH	State of Health
SSI	System Safety Integrity
SW	Software
TCU	Transmission Control Unit
UDS	Unified Diagnostic Services
UML	Unified Modelling Language
US	Ultraschall
WIG	Wolfram-Inertgas (Schweißverfahren)

12 Glossar

- BF1 Musterstand FUEL Energiespeicher (Machbarkeitsstudie von ZF und Continental, Umsetzung zu Beginn von FUEL)
- BF2 Musterstand FUEL Energiespeicher (Konzeption, Entwicklung, Umsetzung und Erprobung während der Laufzeit des Förderprojektes FUEL; dieser Stand stellt das Projektziel von FUEL dar)
- BF3 Nächster Musterstand, der von den Partnern nach dem Ende des Projektes FUEL entwickelt wird

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht	
3a. Titel des Berichts BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ Lithium-Ionen-Batterien für Hybridnutzfahrzeuge: Entwicklung von Produktions- & Testverfahren sowie Aufbau des Demonstrators & Validierung		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Vorname Name) Continental: S. Bonnekessel, S. Abraham, A. Nimpsch, S. Schubert, A. Höß ZF: M. Wagner, K. Egger Ads-tec: A. Greif, T. Dittert		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2011
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum 30.09.2011
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) a) Temic Automotive Electric Motors GmbH Sickingenstrasse 42 – 46 D-10533 Berlin b) ZF Friedrichshafen AG Graf-von-Soden-Platz 1 D-88046 Friedrichshafen c) ads-tec GmbH Senefelderstraße 19 D-73760 Ostfildern-Ruit		7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53175 Bonn		9. Ber. Nr. Durchführende Institution keine
		10. Förderkennzeichen 02PO2630, 02PO2631, 02PO2632
		11a. Seitenzahl Bericht 289
		11b. Seitenzahl Publikation
		12. Literaturangaben 10
		14. Tabellen 13
		15. Abbildungen 233
16. Zusätzliche Angaben keine		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, Hannover, 30.09.2011		
18. Kurzfassung <p>Insbesondere im innerstädtischen Stopp & Go-Betrieb zeigt die permanente Belastung von Hybridantrieben bei Nutzfahrzeugen wesentlich höhere Effizienz (absolut geringerer Dieserverbrauch) als beim PKW. Energiespeichersysteme für Hybrid-Nutzfahrzeuganwendungen unterscheiden sich von den gängigen PKW-Energiespeichern primär in den erheblich unterschiedlichen Anforderungen in Leistungs- und Belastungsspektrum. Diese unterschiedlichen Anforderungen betreffen primär die Leistungs-kategorie, die Spannungslage, die Anzahl an Belastungszyklen, die siebenfachen Vibrationsanforderungen und die Lebensdauer der zu fertigenden Produkte. Batterie-Einsätze im externen Fahrzeuganbau erfordern zusätzliche Vorkehrungen an das Energiespeichersystem, um die deutlich verschärften Umweltbedingungen zu verkraften.</p> <p>Bei Projektstart von FUEL waren keine für eine spätere Serienfertigung von Nutzfahrzeug-Energiespeichern geeigneten Produktionstechniken verfügbar. Gesamtziel des Projektes FUEL war daher die Entwicklung neuartiger Produktionstechnik zur Herstellung von mechanischen und elektromechanischen Baugruppen mit technischen Funktionen sowie spezifischen Produktions- und Testverfahren für den Aufbau von Baugruppen und Demonstratoren für Li-Ionen-Energiespeichersysteme. Der Schwerpunkt lag vor allem bei der Entwicklung der Produktionstechnik für die Anwendung eines neuen Zellformates (so genannte Soft-Packs), speziellen Baugruppen und den Testverfahren für die Erprobung von Produktionstechnologieträgern bzw. Demonstratoren entsprechend den Anforderungen von Hybrid-Nutzfahrzeugen.</p> <p>Zur Bearbeitung der Themen wurde das Projekt FUEL in drei Teilprojekte gegliedert: „Baugruppen u. Funktionsentwicklung“, „Produktionstechnik“ und „Test und Validierung“. Die in den drei Teilprojekten erarbeiteten Methoden bilden eine breite technische Orientierung, die in der vor FUEL durchgeführten Machbarkeitsphase in dieser Form nicht möglich war.</p> <p>Insgesamt wurden in FUEL signifikante Fortschritte auf allen relevanten Themengebieten erzielt, allerdings besteht infolge der Komplexität vor allem bei der Hybridanwendung des Stadtbuseinsatzes noch Klärungsbedarf. Das Konsortium geht deswegen davon aus, dass auch nach dem erfolgreichen Abschluss von FUEL ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu Energiespeichern für die Anwendung in Hybrid-Nutzfahrzeugen besteht.</p>		
19. Schlagwörter Hybrid-Nutzfahrzeuge, Lithium-Ionen-Energiespeicher, Soft-Pack-Zelle, Zellmodule, Batteriemangement, Produktionsverfahren		
20. Verlag		21. Preis kostenlos

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report	
3a. Report Title BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ Lithium-Ion batteries for hybrid commercial vehicles applications: development of production and testing processes including realisation and validation of demonstrators		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Continental: S. Bonnekessel, S. Abraham, A. Nimpf, S. Schubert, A. Höß ZF: M. Wagner, K. Egger Ads-tec: A. Greif, T. Dittert		5. End of Project 30.06.2011
		6. Publication Date 30.09.2011
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		7. Form of Publication
8. Performing Organization(s) (Name, Address) a) Temic Automotive Electric Motors GmbH Sickingenstrasse 42 – 46 D-10533 Berlin b) ZF Friedrichshafen AG Graf-von-Soden-Platz 1 D-88046 Friedrichshafen c) ads-tec GmbH Senefelderstraße 19 D-73760 Ostfildern-Ruit		9. Originator's Report No. None
		10. Reference No. 02PO2630, 02PO2631, 02PO2632
		11a. No. of Pages Report 289
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 10
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53175 Bonn		14. No. of Tables 13
		15. No. of Figures 233
16. Supplementary Notes None		
17. Presented at (Title, Place, Date) Technische Informationsbibliothek Hannover, Hannover, 30.09.2011		
18. Abstract Compared to passenger cars, hybrid commercial vehicles offer significantly higher efficiency (lower Diesel consumption) in particular in urban stop & go operation. Energy storage systems for hybrid commercial vehicles differ very much from those for passenger cars. Extreme differences, for instance, concern the requirements for power and stress. Key parameters are the power classes, voltage level, number of load cycles, seven times higher vibration requirements and product life time. Mounting battery packs at external parts of the chassis in addition required further precaution measures to fulfill the significantly tightened environment requirements. At start of the FUEL project, no production techniques were available that offered the potential for later series production of energy storage systems for hybrid commercial vehicles. Main objective of FUEL therefore was the development of novel production techniques for mechanical and electro-mechanical assemblies including technical functions; further considering specific production and test processes for demonstrators of Li-Ion energy storage systems for hybrid commercial vehicles. The focus lay on the development of production techniques to apply the new cell format, the so-called Soft-Pack and dedicated assembly and test procedures for the demonstrators to validate the developed techniques in terms of the dedicated requirements for hybrid commercial vehicles. The project was divided into the sub-projects: "assembly and function development", "production techniques" and "test and validation". Results worked out in all three areas offer a broad technical orientation, which was not available from the feasibility studies carried out before FUEL. Overall, significant progresses were achieved in all relevant areas. However, due to the high complexity and the strong commercial hybrid vehicle requirements, still there is some need to clarify dedicated issues, in particular for applying the new batteries to hybrid city buses. Thus, despite the positive finalization of the FUEL project, the consortium assumes quite high research and development demands in the field of energy storage systems for hybrid commercial vehicles.		
19. Keywords Hybrid commercial vehicles, Li-Ion energy storage, Soft-Pack cell, cell modules, battery management system, production techniques		
20. Publisher		21. Price free