



Hans-Peter Beck (Herausgeber)  
**ReserveBatt - Momentanreserve mit  
Hochleistungsbatterien - Systemdienstleistungen für  
den stabilen und sicheren Betrieb des  
Energieversorgungssystems**  
Abschlussbericht

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

**efzn**

Energie-Forschungszentrum  
Niedersachsen



TU Clausthal

**ReserveBatt – Momentanreserve  
mit Hochleistungsbatterien –  
Systemdienstleistungen für den  
stabilen und sicheren Betrieb des  
Energieversorgungssystems**

Abschlussbericht

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Hrsg.)

Band 76



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8840>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

## Inhaltsverzeichnis

1	Überblick Gesamtvorhaben .....	1
2	Darstellung Aufgabenstellung, der Voraussetzungen, der Planung und des Ablaufs des Gesamt- und der Teilvorhaben .....	5
2.1	Aufgabenstellung Gesamtsystem/Maschinenmodell – EFZN/TU Clausthal .....	5
2.1.1	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
2.1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
2.2	Aufgabenstellung Batteriesystem – AKASOL.....	7
2.2.1	Ziele .....	7
2.2.2	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2.3	Aufgabenstellung Batteriesicherheitstechnik – STÖBICH Technologies .....	8
2.3.1	Ziele .....	8
2.3.2	Anforderungen .....	8
2.4	Aufgabenstellung Faseroptisches Sensorsystem– Fraunhofer HHI.....	9
2.5	Aufgabenstellung Intelligentes Leistungsmodul – Infineon Technologies .....	10
2.5.1	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	11
2.5.2	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	11
2.5.3	Stand der Technik, an den angeknüpft wurde .....	12
2.5.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
2.6	Aufgabenstellung Wechselrichtersystem – KEBA Industrial Automation Germany .....	13
2.6.1	Aufgabenstellung.....	13
2.6.2	Planung und Ablauf .....	15
2.6.3	Stand der Technik.....	18
3	Ergebnisse Gesamtsystem/ Maschinenmodell – EFZN/ TU Clausthal .....	20
3.1	Konzeption Momentanreserve und Schlüsselkomponenten .....	20
AP 1.1	Lastenheft für das Gesamtsystem, Normen, TAB, Eckdaten.....	20
AP 1.4	Konzepterstellung für die Regelung und Steuerung .....	22
3.2	Modellierung des Gesamtsystems .....	24
AP 2.1	Batteriemodell.....	24
AP 2.2	Leistungselektronik-Modell.....	40
AP 2.3	Maschinen- und Netzmodell .....	41
AP 2.4	Gesamtsimulation .....	46
3.3	Aufbau der Komponenten und des Gesamtsystems .....	47

AP 3.1	Aufbau der Komponenten nach AP1, Aufbau Gesamtsystem für die Laborumgebung	47
AP 3.2	Aufbau der Komponenten nach AP1, Aufbau Gesamtsystem für die Feldumgebung	47
3.4	Alterungsmodell für Lithium-Ionen-Batterien für hochdynamische Belastungen	56
AP 4.1	Physikalisch-chemisches Modell	56
AP 4.2	Ereignisbasiertes Modell	58
3.5	Laboruntersuchungen Batterien	68
AP 5.1	Performanceuntersuchungen auf Zell-, Modul- und Batterieebene	68
AP 5.2	Adaption Sensorik zum Strom-, Temperatur und Dehnungsmessung	83
AP 5.3	Alterungsuntersuchungen auf Zell- und Modulebene	83
AP 5.4	Test und Verifikation Sicherheitskonzept	90
3.6	Laboruntersuchungen Gesamtsystem	91
AP 6.1	Erstellung Anforderungskatalog für das Gesamtsystem und Testprozedur	91
AP 6.2	Inbetriebnahme	91
AP 6.3	Untersuchung der Komponenten und des Gesamtsystems in der Laborumgebung	91
3.7	Felduntersuchungen Gesamtsystem	92
AP 7.1	Integration in die NSHV des EnergieCampus	92
AP 7.2	Untersuchung der Komponenten und des Gesamtsystems in der Feldumgebung, Betriebsoptimierung	94
3.8	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, Geschäftsmodelle, Use-Cases	120
AP 8.1	Kosten-Nutzen-Analyse/Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	120
AP 8.2	Use-Cases / Geschäftsmodelle	124
4	Ergebnisse Batteriesystem – AKASOL	130
4.1	Entwicklung des modularen Batteriesystems	130
4.2	Optimierungspotenzial des Batteriesystems	133
4.3	Auslegung hinsichtlich Energieinhalt und Leistungsfähigkeit	134
4.4	Sicherheitsrelevante Sensorik / Schutzeinrichtungen	135
4.5	Brandschutzkonzept und Nachweis der Propagationsfestigkeit	136
4.6	Zusammenfassung und Fazit	140
5	Ergebnisse Batteriesicherheitstechnik– STÖBICH Technology	141
5.1	Konzeption Schlüsselkomponenten - Sicherheitskonzept	141
5.1.1	Brandschutz auf Zellebene (Modulintern)	141
5.1.2	Brandschutz auf Moduleben (Modulextern)	143
5.1.3	Brandschutz auf Gesamtsystemebene (Außerhalb des Racks)	146
5.1.4	Betrachtung des Kühlmittels aus Sicht des Brandschutzes	148

5.1.5	Zusammenfassung Brandschutz- und Hochwasserkonzept .....	149
5.1.6	Brandschutzvergussmasse .....	151
5.2	Aufbau der Komponenten .....	155
5.3	Test und Verifikation Sicherheitskonzept .....	157
5.3.1	Brandversuch >>Pouch-Zelle<< .....	157
5.3.2	Brandversuch >>Prismatische-Zelle<< Versuchsplanung.....	162
5.3.3	Entwicklung und Bau spezieller Infrastruktur / Equipment .....	164
5.3.4	Brandversuch >>Prismatische-Zelle<< Versuchsaufbau.....	168
5.3.5	Brandversuch ohne Brandschutz.....	170
5.3.6	Brandversuch mit Brandschutz .....	183
5.3.7	Vergleich der Brandversuche – Fazit .....	197
5.3.8	Weiterentwicklung des Brandschutzkonzepts .....	201
6	Ergebnisse Faseroptisches Sensorsystem – Fraunhofer HHI .....	202
6.1	Einführung .....	202
6.2	Sensorik .....	203
6.2.1	Optisch integrierter Stromsensor.....	203
6.2.2	Faseroptische Sensorik .....	222
6.3	Messsystem .....	224
6.3.1	Funktionsweise .....	225
6.3.2	Aufbau .....	226
6.3.3	Vermessung .....	226
6.3.4	Software .....	227
6.4	Batterien und Sicherheit .....	228
6.4.1	Integration .....	229
6.4.2	Vorversuche.....	234
6.4.3	Sicherheitsversuche.....	246
7	Ergebnisse Wechselrichtersystem - KEBA Industrial Automation Germany .....	254
7.1	Gesamtkonzept und Lastenheft des Wechselrichtersystems .....	254
7.2	Auslegung des Wechselrichtersystems .....	256
7.2.1	Hardwarekonzept und Design des leistungselektronischen Systems. ....	256
7.2.2	Konzept für die Netzanbindung.....	257
7.2.3	Konzept für das Kühlsystem .....	259
7.2.4	Wirtschaftliche Betrachtung .....	260
7.3	Prototypische Realisierung des Wechselrichtersystems: Pilot 1.....	260
7.3.1	Umsetzung und Integration.....	260

7.3.2	Anforderungskatalog und Testprozedur .....	262
7.3.3	Qualifizierung und Messungen.....	263
7.4	Prototypische Realisierung des Wechselrichtersystems: Pilot 2.....	269
7.4.1	Änderungen zum Piloten 1.....	269
7.4.2	Umsetzung und Integration.....	270
7.4.3	Qualifizierung und Messungen.....	274
8	Ergebnisse Intelligentes Leistungsmodul – Infineon Technologies .....	280
8.1	Intelligentes Leistungsmodul – Konzepte und Umsetzung .....	280
8.2	Simulationsmodell des intelligenten Leistungsmoduls .....	286
8.3	Laboruntersuchungen des intelligenten Leistungsmoduls .....	287
8.4	Unterstützung bei der Integration in das Gesamtsystem .....	292
9	Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	295
10	Relevante Ergebnisse Dritter .....	296
10.1	Praktische Ergebnisse .....	296
10.2	Forschungsergebnisse .....	296
11	Erfolgte Veröffentlichungen .....	297
12	Literaturverzeichnis .....	298