

# Lithium-Ionen-Batterien für die Tiefsee

Ein Beitrag von STEFAN MARX

Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion) kommen bei unterschiedlichsten Anwendungen in der Tiefsee zum Einsatz, sie werden für Fahrzeuge verwendet, zur Versorgung von Sensoren oder für Speichersysteme. Dabei kommt es auf höchste Leistungsdichte an, aber auch auf absolute Zuverlässigkeit, denn ein Ausfall wäre teuer. Die Kieler Firma SubCtech hat Lösungen für die Stromversorgung unter Wasser entwickelt.

Lithium-Ionen-Batterien | Stromversorgung | SOH | Alterung | Batteriemanagementsystem  
Li-Ion batteries | power supply | SOH | aging | battery management system

Lithium-ion (Li-ion) batteries are used in a wide variety of applications in the deep sea, for vehicles, to supply sensors or for storage systems. The highest power density is essential, but also absolute reliability, because failure would be expensive. The company SubCtech based in Kiel has developed solutions for underwater power supply.

## Autor

Stefan Marx ist CEO der SubCtech GmbH in Kiel.

marx@subctech.com

Im Wasser gibt es keine Steckdose! Wegen dieser simplen Feststellung hat SubCtech begonnen, Batterien zu entwickeln, anfänglich nur für eigene Tiefseesensoren, z. B. CO<sub>2</sub>-Analyser. Dabei wurden Technologien, Marktanforderungen und eigene Ziele untersucht, die einfach zu benennen waren: Tiefsee, verschiedene Spannungen, verschiedene Ströme, möglichst viel Energie, geringe Kosten, höchste Zuverlässigkeit. Die Wahl fiel auf Li-Ion-Zellen in Titangehäusen. Diese Zellen erwiesen sich durch die breite Verwendung in industriellen und kommerziellen Anwendungen als weit entwickelt und mechanisch belastbar. Langjährige Erfahrungen in der Meerestechnik und in maritimen Technologien haben die Entwicklung zuverlässiger Technik mit Titangehäusen ideal unterstützt. Mit der Übernahme der renommierten Firma Feinwerktechnik Kuchenbecker wurden kürzlich 20 Jahre Erfahrung mit CNC-Titanherstellung in SubCtech integriert.

Nach über zehn Jahren Entwicklung ist SubCtech inzwischen ein führender Hersteller von Unter-Wasser-Batteriesystemen. Hierbei wurden inzwischen mehrere Märkte erschlossen: kleinere Standardbatterien für meeresstechnische Anforderungen, große blockweise modular gebaute Batterien für Fahrzeuge und Batterien für Unter-Wasser-Produktionsstätten der Öl- und Gasindustrie. Neben den Batterien und deren interner Elektronik liefert SubCtech auch weitere Komponenten wie Lade- und Diagnosegeräte oder Wechselrichter, die je nach Bedarf auch in das Druckgehäuse integriert werden.

Die zuletzt ausgelieferten neuen Li-Ion-Fahrzeuggatterien mit einem Druckgehäuse aus Titan haben beeindruckende Daten: 480 mm im Durchmesser, 2 m in der Länge, ein Gewicht von 500 kg, eine Batteriespannung von 430 V und eine Dauerleistung von 38 kW (eine kleinere Batterie ist in

Abb. 1 zu sehen). Da die Batterien für bemannte Fahrzeuge verwendet werden, sind sie nach den Prinzipien der IEC 61508 für höchste Sicherheit entwickelt. Im Zuge dessen werden die Fahrzeugbatterien auch Vibrationstest nach MIL-STD unterzogen.

Die besonderen Anforderungen der Offshore-Öl- und -Gasindustrie haben die Entwicklung von extrem zuverlässigen und sicheren Batterien angestoßen. Ziel ist eine Qualifizierung für einen 25-jährigen oder sogar 30-jährigen Betrieb. Gemäß den Normen API 17F und ISO 13628-6 müssen Batterien schnelle Temperaturwechsel genauso überstehen wie umfangreiche Schock- und Vibrationstests. Für Einsätze in der Tiefsee sind solche Qualifizierungen unumgänglich, da ein erforderlicher Service oder ein Ausfall Kosten in Millionenhöhe verursachen würde.

Der Ansatz von Li-Ion-Rundzellen in Titangehäusen bietet viele Vorteile: So können runde Zellen den Bauraum von Druckbehältern optimal ausfüllen. Dabei bieten die vergleichsweise kleinen Zellen Flexibilität in der Anordnung der Zellen und können je nach Anwendung parallel und/oder in Reihe verschaltet werden. Dies ermöglicht größere Flexibilität in Leistung und Abmessung sowie höhere Energiedichten (kg/Wh) im Vergleich zu druckneutralen Batterien mit prismatischen Zellen oder sogenannten Pouch-Zellen. Die große Anzahl einzelner Rundzellen wird in einem eigens entwickelten Verfahren vibrationsfest verbunden und durch ein leistungsfähiges Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht. Je nach Einsatzprofil der Batterie, können Rundzellen gleicher Bauform mit unterschiedlicher Zellchemie eingesetzt werden, um damit die Batterie auf hohe Spitzenlast, geringe Selbstentladung oder hohe Kapazität zu optimieren.

Druckneutrale Batterien kommen ohne Druck-

gehäuse aus, die Batterien oder Zellen sind dem Umgebungsdruck ausgesetzt und z. B. durch Öl-bäder oder Silikonvergüsse vor dem korrosiven und leitfähigen Meerwasser geschützt. Diese Technik ist prinzipbedingt nur bei prismatischen Li-Pol-Zellen bzw. bei Pouch-Zellen möglich, nicht aber bei Rundzellen. Die Notwendigkeit von Vergüssen, von mehreren Unter-Wasser-Steckern, einer Multiplexerbox und einem Tragegestell sind bei druckneutralen Batterien nachteilig in Bezug auf Kosten, Servicefreundlichkeit, Zuverlässigkeit und Energiedichte.

SubCtech ist in vielen Communitys speziell für Li-Ion-Technologien und Unter-Wasser-Anwendungen vertreten. Regelmäßige Treffen und die Zusammenarbeit mit führenden Instituten, Herstellern, Anwendern und Normungsgremien garantieren die neusten Informationen für Zuverlässigkeit, Sicherheit und Performance. So arbeitet SubCtech an der künftigen Revision 5 der API 17F zum Thema vollelektrische Produktionsstätten (»All Electric Systems«) mit.

Für den Anwender sind diese High-Level-Entwicklungen und der hohe Innovationsstand interessant, da diese Technologien auch bei den Standardbatterien verwendet werden. Standardbatterien (COTS: commercial off-the-shelf) werden in Serie kostengünstiger gefertigt. Aus diesem Grund sind hier auch die Möglichkeiten an Hochstrom oder hoher Kapazität (Energie) begrenzt. Typische Werte sind 14 V, 25 V und 50 V bis 10 A, als besondere Ausführung auch höhere Ströme bis 50 A, mit Gehäusen, die einem Wasserdruck in bis z. B. 6000 m Tiefe standhalten können. Die Batterien werden mit einer dichten Zellpackungsdichte gefertigt, weshalb ohne weitere interne mechanische Unterstützung auch Schock- und Vibrationszertifizierungen nicht angeboten werden.

Zu der immer vorhandenen Schutzschaltung gegen Überladen, Unterspannung, Überstrom, Übertemperatur und Kurzschluss wird bei Standardbatterien zusätzlich eine Control-Elektronik, das Batteriemanagementsystem (BMS), angeboten. Dieses optionale BMS gestattet über die grundlegenden Schutzfunktionen hinaus erweiterte Schutzfunktionen und ein Dateninterface wie RS232/485, CAN oder TCP.

Das BMS überwacht diverse Parameter und meldet diese an das übergeordnete System, z. B. an einen Fahrzeugrechner (AUV, ROV) oder Leit-rechner bei Unter-Wasser-Stationen. Wichtige Charakteristiken sind der Ladezustand (SOC: state of charge) und die Alterung der Batterie (SOH: state of health). Der SOH-Wert wird in Prozent in Bezug zur ursprünglich tatsächlich zur Verfügung stehenden Kapazität (bzw. Energie) angegeben. Ein Wert von 80 % bedeutet, dass 20 % über die Jahre durch Alterung nicht mehr zur Verfügung stehen. Dies ist auch die typische Grenze, um Li-Ion-Batterien zu ersetzen. Die Alterung der Zellen

wird neben der Anzahl der Ladezyklen maßgeblich durch die Betriebsbedingungen bestimmt. So beschleunigen Tiefentladungen, hohe Temperaturen und zu hohe Ströme beim Laden und Entladen die Alterung. Werden diese Faktoren bei der Auslegung der Batterie berücksichtigt und im Betrieb durch ein BMS sichergestellt, so ergeben sich Alterungsraten von ca. 1 bis 2 % pro Kalenderjahr und eine Lebensdauer von mehreren Tausend Ladezyklen.

Stehen nur noch 80 % der ursprünglichen Kapazität zur Verfügung (was einem SOH-Wert von 80 % entspricht), sollen die Batterien ersetzt werden. Grund ist eine Veränderung der Elektrodenstruktur, die zu einem Anwachsen der Elektroden-dicke führt. Dieses passiert aber nicht homogen, sondern in lokal begrenzten kleinen »Hügeln«, den sogenannten Dendriten. Berühren sich zwei Dendriten von zwei benachbarten Elektroden und durchstechen sie dabei den Separator, entsteht ein interner Kurzschluss mit der Gefahr des »Thermal Runaways«. Dabei steigt die Temperatur, der Innendruck erhöht sich, das Sicherheitsventil der Zelle öffnet sich, woraufhin ein giftiges und hochbrennbares Gasgemisch entweicht.



**Abb. 1:** Eine Batterie mit 190 V und 10 kWh, mit einer Ausgangsleistung von 10 kW und einem Titangehäuse für 6000 m

SubCtech sorgt dafür, dass die Li-Ion-Batterien nicht nur die höchste Energiedichte und Zuverlässigkeit haben, sondern auch sicher sind. Batteriebrände sollen sicher verhindert werden. Dazu wird ein mehrstufiges Sicherheitssystem eingesetzt, dezentral in jeder einzelnen Zelle, das in Schutzschaltungen auf Teilmodulebene und einem zentralen BMS besteht.

Die speziellen Industriezellen verfügen bereits über mehrere interne Sicherheitsmechanismen: ein Überdruckventil, eine Kurzschlussicherung, einen Stahlmantel statt einer Aluhülle – und bei den Hochenergiezellen einen speziellen Temperaturschutzmantel um die Elektroden. Auch wenn teilweise bereits No-Name-Zellen diese Eigenschaften haben, so bieten nur hochwertige Industriezellen die geforderten Ausfallwahrscheinlichkeiten von typischerweise 1 zu 10 Millionen, das heißt: bei einigen hundert oder auch tausend Zellen ist das Ausfallrisiko extrem gering.

Neben dem Verhindern ungünstiger Betriebszustände wie Tiefenladung, Überladung oder Übertemperatur ist auch ein Erkennen der langfristigen chemischen Alterung der Zellen wichtig, um das Ende der Lebenszeit der Zellen zu bestimmen. Zu diesem Zweck setzt SubCtech mit der »Prognostics and Health Management«-Technologie (PHM) als Teil des SmartBMS™ bereits seit 2015 eine vorausschauende Diagnosetechnik zur Bestimmung des SOH ein. Auf Basis von Impedanzmessungen wird der SOH-Wert der Batterie bestimmt, womit eine gefahrbringende Alterung rechtzeitig erkannt wird.

Spezifisch an die Anforderungen von Anwendung und Batterie konfiguriert, ermöglicht das SmartBMS™ mit seinen Algorithmen, die Probleme wie Überlastung oder eine falsche Betriebsart frühzeitig zu erkennen, sodass Gefahren gar nicht erst entstehen. Zusätzlich bietet dies Vorteile in

der Verfügbarkeit, da auch der Operator oder das übergeordnete System rechtzeitig über einen anstehenden Service informiert werden. So kann ein Service bereits Monate im Voraus geplant werden, ohne dass es zu einem Ausfall, zu Stillstand oder Beschädigungen kommt.

Da die genauen Anforderungen an die Batterie teilweise erst während der Pilotphase eines neuen Systems unter Wasser ermittelt werden können, verfügt das SmartBMS™ über die Möglichkeit, bei Überschreitungen von Limits zunächst nur Warnungen (warning flags) zu schicken, dann Fehlermeldungen (error flags) statt gleich weitere Maßnahmen zu ergreifen. Diese Limits können passwortgeschützt auch nachträglich und im Einsatz verändert werden, wenn bei ersten Tests einer neuen Anlage nicht die erwarteten Werte auftreten. Gründe können z. B. höhere Anlaufströme von Thrustern oder Pumpen unter Druck sein. Diese Parameter im Betrieb – ganz ohne Bergung und Service an Bord – zu justieren, ermöglicht eine einfache Erprobung bei deutlich verringerten Kosten.

Das Know-how der Spezialbatterien fließt auch in die Standardbatterien ein, die in Serie produziert werden. Bei diesen Batterien stehen Energiedichte und Kosten im Fokus, sodass hier auf die aufwendige mechanische Unterstützung der Rundzellen zugunsten einer höheren Packungsdichte verzichtet wird. Typische Werte sind Kapazitäten von 500 Wh bis 3,4 kWh bei Spannungen von 14 V, 25 V und 50 V und Strömen und Dichtigkeit bis zu 6000 m. Hierfür bietet SubCtech mit dem SmartCharger™ ein wasserdichtes Ladegerät an, das für den harten Bordeinsatz entwickelt wurde. Während des Ladevorgangs mit bis zu 750 W Leistung übernimmt es die Funktion eines BMS. Mit einer Versorgungsspannung von 100 bis 240 VAC können sie mit allen Netzen betrieben werden. Der Ladevorgang ist sehr benutzerfreundlich, die Batterie wird mit dem Ladegerät verbunden und die vollständige Ladung durch eine grüne LED angezeigt.

Für den Bordbetrieb ist wichtig: Die Batterie kann in jedem Ladezustand angeschlossen und wieder abgenommen werden. Damit lässt sich die Bordzeit optimal nutzen, während so viel Energie in die Batterie gebracht wird, wie in der Zeit möglich ist. Dann kann die Batterie auch mit geringerem Ladezustand wiedereingesetzt werden – wichtig für kurze Turnaround-Zeiten, z. B. bei ROV-Einsätzen, um Batterien nur verkürzt nachzuladen.

Für die großen Batterien mit integriertem SmartBMS™ stehen in 19"-Racks eingebaute PowerCharger™ im Angebot und leisten bis zu einigen 10 kW Ladeleistung bei Spannungen bis 600 V und darüber (Abb. 2). Der Ladevorgang wird dabei durch das SmartBMS™ gesteuert, dem alle Batteriedaten in Echtzeit zur Verfügung stehen. Somit kann immer mit der optimalen Leistung ge-



**Abb. 2:** Li-Ion-Fahrzeug- oder -Energiepuffer mit 430 V, 72 kWh und 38 kW Dauerleistung. Das 19"-Ladegerät liefert 3 × 10 kW für drei Batterien parallel. Oberhalb des Ladegeräts ist ein Entladegerät untergebracht

laden werden, sodass die Ladezeiten gegenüber dem bekannten CC/CV-Ladealgorithmus um bis zu 25 % kürzer sind. Auch werden die in der Praxis durch unterschiedliche Leitungslängen auftretenden Spannungsabfälle automatisch kompensiert, z. B. bei AUV-Umbilicals, Einflüssen von Steckern oder Winschen.

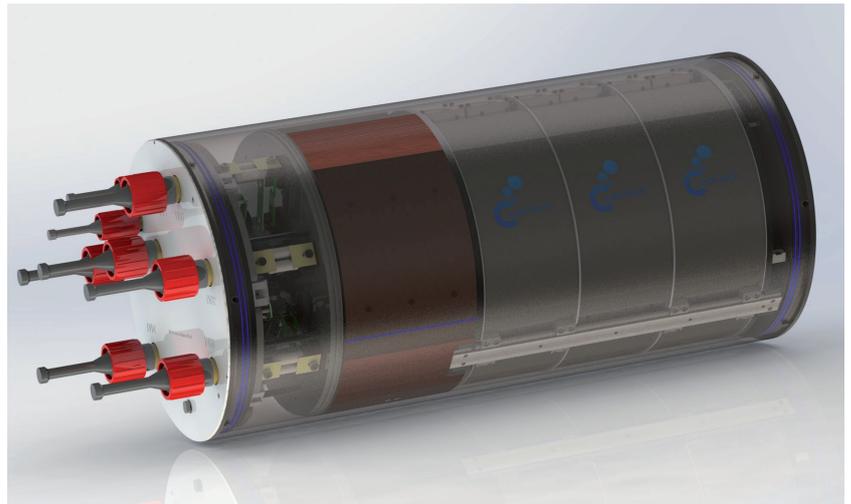
Für den Bordeinsatz ist die Bedienung der PowerCharger™ wieder möglichst einfach gehalten: Ein Button startet den Ladevorgang und stoppt diesen auch. Informationen zum Zustand der Batterie werden auf einem intuitiv zu bedienender Color-Touchscreen übersichtlich angezeigt. Damit ist auch die Bedienung der großen Fahrzeugbatterien sehr einfach, sicher und für den täglichen Bordeinsatz ideal geeignet. Alternativ können auch Ladegeräte in die Batterien integriert werden, sodass diese unter Wasser z. B. an Dockingstationen oder von einem ROV mit bis zu 9 kW geladen werden können.

Die Fahrzeugbatterien wurden in verschiedenen Formfaktoren entwickelt, um Leistung, Energie und Spannung optimal an die Anwendung anzupassen. Gemeinsam ist allen, dass die Batterien in Blöcke unterteilt sind (Abb. 3), die jeweils über ein BMS verfügen, die untereinander vernetzt sind. Die Blöcke haben Spannungen unter 60 V, wiegen unter 30 kg und erleichtern damit Service und Transport.

Fahrzeugbatterien werden optional redundant aufgebaut, sodass ein Fortfahren der teuren Mission oder ein sicheres Zurückkehren an die Oberfläche möglich wird. So können in der Batterie zwei »Power-Channels« enthalten sein, die jeweils 50 % der Kapazität ausmachen. Sollte eine Batterie ausfallen, kann der andere »Power-Channel« das System weiter mit 50 % der verbleibenden Kapazität betreiben.

Ein zentraler Controller (CIM: customer interface module) kann bis zu zwölf getrennte Batterien mit jeweils eigenem SmartBMS™ verwalten. Dabei hat das CIM eine Reihe von Aufgaben: Die Batteriemodule werden gemeinsam balanciert, die Daten werden prozessiert, wobei unter anderem ein gemeinsamer SOC und SOH bereitgestellt wird, und ein flexibles Dateninterface wird ermöglicht. Somit können serielle Daten (RS-232, NMEA-0183) über MODBUS RTU bis hin zu CAN und TCP flexibel genutzt werden. Damit verringern sich die NRE-Projektkosten für neue Systeme signifikant.

Solche Cluster von Batterien werden nicht nur aus Redundanzgründen eingesetzt, sondern auch zum Aufbau von größeren Unterwasserspeichern (ESM: energy storage module). Mit der neuesten 416er-Batterieserie lassen sich bis zu 1 MWh mit bis zu 600 V realisieren – auch in 6000 m Wassertiefe oder mehr.



**Abb. 3:** Modular aufgebaute Li-Ion-Batterie mit eingebautem DC/DC-Konverter für konstante Ausgangsspannung und einem Energieverteiler zum Steuern einzelner Ausgänge

Eine Frage beim Umgang mit Li-Ion-Batterien ist häufig der Transport. SubCtech hat hierfür einen eigenen Gefahrgutexperten, und ist nach IATA, ADR, DGD und anderen Normen zertifiziert, Batterien selbst zu verpacken, die Transportunterlagen zu erstellen (»shippers declaration« und IMO) und Batterien auch zu transportieren. Für einen einfachen Transport liegen Zertifikationen nach UN T38.3 vor, die bereits für eine Reihe von Standardbatterien und auch für größere Batterien zur Verfügung stehen. Ohne die UN-T38.3-Zertifizierung hat SubCtech vom Luftfahrtbundesamt (LBA) die Zulassung für Lufttransporte gemäß IATA A88, was die hohe Qualität der Batterien dokumentiert. Für die USA liegt ebenfalls eine Zulassung für den Import über Luftfracht vom US D.O.T. vor. In anderen Ländern ist eine Importzulassung nicht notwendig.

Zusammengefasst: SubCtech konnte unterschiedliche Li-Ion-Batterien für unterschiedliche Tiefseeanwendungen wie Fahrzeuge (AUV, ROV), Sensorversorgungen (Standardbatterien) oder Speichersysteme (ESM) entwickeln. Höchste Zuverlässigkeit bei höchster Leistungsdichte und Sicherheit sind hier entscheidend, da Ausfälle nicht tolerierbare Folgekosten und auch Verlust von Informationen bedeuten. Mit einem langen Track Record konnte SubCtech nachweisen, dass diese Anforderungen mit Li-Ion-Rundzellen und der dazu gehörenden SmartBMS™-Technologie erfüllbar sind. SubCtech berät dabei in allen Projektphasen und ermöglicht frühzeitig eine ideale Auslegung bzw. ein Systemdesign. Lieferung und Transport über Luft, See und Straße werden unterstützt, und Installationsupport mit Schulungen für komplexe Systeme werden weltweit angeboten.

Mit anderen Worten: Wir können eine Steckdose unter Wasser anbieten. //