

ATZ

offhighway

04 Oktober 2018 | 11. Jahrgang

ELEKTRIFIZIERTE ANTRIEBE

Effizient und leistungsstark

HYDRAULIK

Speicherzylinder für Raupenlaufwerk

MOTOREN

Downsizing-Dieselpattform mit drei Zylindern

SIMULATION

Zustandsbasierte Instandhaltung von mobilen Maschinen



Weltweit größtes Elektrofahrzeug im Mineneinsatz

Im Steinbruch La Tschanner im schweizerischen Péry-La Heutte ist seit Januar 2018 der eDumper, ein gigantischer Muldenkipper, im Einsatz. Er wurde in 18 Monaten vom Dieselfahrzeug zum weltweit größten Elektrofahrzeug umgebaut. Im Auftrag von Vigier haben Kuhn Schweiz und Lithium Storage zusammen mit den Forschungspartnern Berner Fachhochschule BFH, der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs NTB und der Empa diesen Muldenkipper entwickelt.



© Andreas Sutter | Lithium Storage

(Luchs) getaufte eDumper gut für drei Weltrekorde. Zum einen ist er das größte und stärkste batteriebetriebene Elektro-Radfahrzeug der Welt, zum andern kommt die größte je für ein Elektrofahrzeug hergestellte Batterie zum Einsatz und zum dritten war noch nie ein vergleichbares Fahrzeug in der Lage, am Arbeitsort eine so große Menge CO₂ einzusparen. In den kommenden zehn Jahren soll der eDumper beim Transportieren von mehr als 300.000 t Kalk- und Mergelstein voraussichtlich jährlich bis zu 1300 t CO₂ weniger erzeugen als die Dieselsonne.

Der eDumper, ein Umbau des Dieseltreibenden Muldenkippers Komatsu HD 605-7, ist ein rein batterieelektrisch angetriebenes Fahrzeug. Möglich wird eine solche Entwicklung erst mit heutigen Hochleistungsspeichern auf Lithium-Basis, die sich mehrere Tausend Mal laden und entladen lassen. Im beschränkten Einbaureaum muss genügend Energie mitgeführt werden, denn flüssige Treibstoffe wie Diesel oder Benzin haben im Vergleich mit der elektrischen Speicherchemie rund zehnfach mehr Energieinhalt pro Gewichtseinheit.

Um die Idee eDumper umzusetzen, mussten für die Auslegung des elektrischen Antriebs geeignete Entwicklungspartner gefunden werden. Der Umbau wurde von Kuhn Schweiz in Lommis, Kanton Thurgau, und Heimberg, Kanton Bern, vorgenommen. Der Einbau der auf der Basis industrieller Produkte der neuesten Generation speziell angefertigten Komponenten Synchron-Antriebsmotor von Oswald Motoren, Getriebe von Puls Getriebe, Batterien von Lithium Storage und Umrichter von Aradex ins Chassis des Komatsu HD 605-7 erfolgte im Herbst 2017. Den zusätzlichen 200-kW-Motor lieferte Brienzer Motoren. Er sorgt für den Antrieb der Hydropumpen für die Lamellen-Bremsanlage, den Kipptrieb, die Servounterstützung und die Vorspannung der Hilfsbremsanlage. Das gesamte 600-kWh-Batteriepaket, bestehend aus vier Blöcken, musste anstelle des Dieseltanks und vor dem neuen Elektromotor im Motorraum installiert werden.

ENERGIEFLUSSMODELLIERUNG

Damit der neue Fahrtrieb, die Hilfsaggregate und die Batterie des eDumper optimal für die Anwendung im Steinbruch dimensioniert werden konnten,

mussten die Energieflüsse, die Maximal-kennzahlen und das Lastdispositiv des Fahrzeugs erfasst und analysiert werden. Durch Aufsummierung der Leistung über die Zeit bezogen auf ein Referenzprofil konnte die zu erwartende Antriebsenergiebilanz der Berg- und Talfahrt abgeschätzt werden. Dazu wurde ein bestehendes dieseltreibendes Fahrzeug mit einer kalibrierten Drehmoment- und Drehzahlerfassung an der Antriebswelle, mit GPS zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung sowie mit Neigungsmesser und einer Raddrehzahlsensorik ausgerüstet. Beim wiederholten Befahren einer Referenzstrecke im geplanten Einsatzort wurden die Messdaten erfasst, **BILD 1**.

AUTOREN



Dr.-Ing. Gerhard Rizzo
ist Senior Research Engineer an der Interstaatlichen Hochschule für Technik NTB in Buchs (Schweiz).



Dr. sc. Alejandro Santis
ist Senior Researcher an der Berner Fachhochschule Biel BFH (Schweiz).



Dipl.-Ing. Marcel Held
ist Senior Engineer an der Empa Dübendorf (Schweiz).



Dipl.-Ing. Marius Bachofen
ist Projekt-Manager bei der Lithium Storage GmbH in Illnau (Schweiz).

MOTIVATION

Im Steinbruch generiert ein beladenes, talwärts laufendes Förderband elektrische Energie. Daher kam die Frage auf, ob es auch möglich wäre, dass die bisher in (Brems-)Wärme umgesetzte Energie eines oben am Berg beladenen Dumpers bei seiner Talfahrt rekuperiert und in einer Batterie gespeichert werden könnte? Das Fahrzeug müsste dazu elektrisch fahren und die mit gut 120 t und 180 Höhenmetern gewonnene Energie für die nächste Bergfahrt – ohne Fracht in der Wanne nur halb so schwer – einsetzen.

Mit 58 t Leergewicht und 65 t Zuladung ist der auf den Namen Lynx

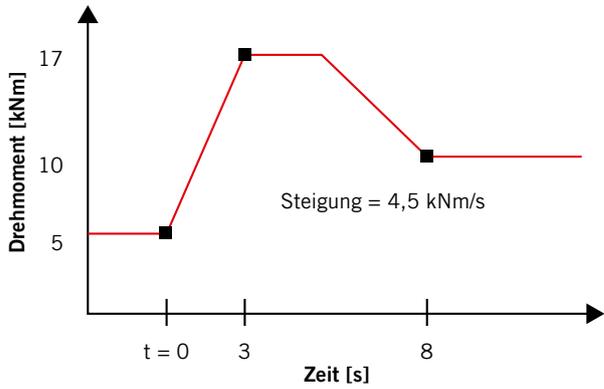


BILD 1 Vereinfachte Darstellung des erfassten Anfahr Drehmoments
(© Berner Fachhochschule Biel BFH)

PERFORMANCE-VERGLEICH DER BATTERIEZELLEN

Aufgrund der Kundenanforderungen sollte die Batterietechnologie sicher und zuverlässig sein und zudem eine möglichst hohe Energiedichte aufweisen sowie eine möglichst lange Lebensdauer bieten, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Ziel dieser ersten Untersuchungen war es, die beste Zellentechnologie aus

Sicht der kurz- und langfristigen Performance zu identifizieren. Hierfür wurde eine Reihe experimenteller Untersuchungen mit zwei unterschiedlichen Zellentypen durchgeführt. Im Fokus stand das elektrische Verhalten der Zellen bei 25 °C sowie bei hohen (45 °C) und tiefen Temperaturen (0 und 10 °C).

Für die Charakterisierung wurde ein elektrisches Lastprofil entwickelt, das die Fahrtbedingungen bestmöglich widerspie-

ELEKTRISCHE UND THERMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Unter dem Gesichtspunkt der Lebensdauermaximierung sind Batteriebetriebstemperaturen von 20 bis 25 °C essenziell. Zur Auslegung des thermischen Managementsystems wurde ein Batteriepaket der Konfiguration 24s2p (24 Zellen seriell, 2 Zellen parallel) unter kontrollierten Bedingungen thermischen und elektrischen Messungen unterzogen. Dazu wurde mit Messungen am Fahrzeug aus anderen Arbeitspaketen ein zweites realistischeres Belastungsprofil entwickelt. Um die Temperaturentwicklung bei den simulierten Fahrten zu charakterisieren, sind an verschiedenen Stellen im Batteriepaket 26 Temperatursensoren platziert worden. Während der Messungen wurden Temperaturdaten erfasst und mit einer Infrarot-Kamera Bilder aufgenommen. Für die Auswertung führte man einen sogenannten Plus-Energie-Faktor ein, der den Autarkiegrad des Fahrzeugs wiedergibt. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss zweier Luftkühlssysteme auf diesen Plus-Energie-Faktor. Die Ergebnisse halfen dabei, den Temperaturgradienten entlang der Kühlungsstrecke zu quantifizieren und das Thermomanagementsystem in anderen Arbeitspaketen auszulegen.



BILD 2 Montage Batteriestack (total 16 Stacks pro Batterie)
(© Lithium Storage)

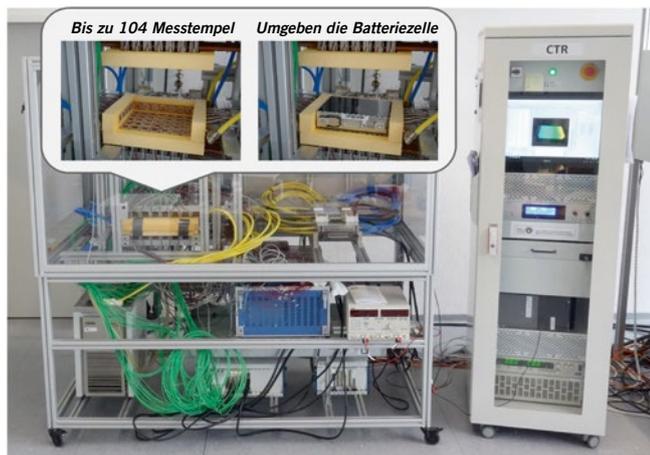


BILD 3 Batteriezellprüfstand (CTR) der NTB zur Messung der lokalen Temperatur- und Wärmestromverteilung
(© Interstaatliche Hochschule für Technik NTB)

THERMOMANAGEMENT

An der NTB wurde das Thermomanagement der Batterien konzipiert. Hierfür steht an der Buchser Hochschule ein Versuchsstand zur Verfügung, mit dem die Oberflächentemperatur und der abgegebene Wärmestrom einer Batterie zelle unter realen Lastbedingungen örtlich aufgelöst bestimmt werden kann [1], **BILD 3**. Darüber hinaus ermöglicht dieser

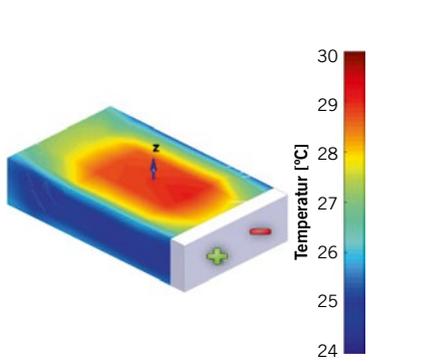


BILD 4 Temperaturverteilung auf der Oberfläche einer Lithium-Ionen-Zelle, wie sie im eDumper zum Einsatz kommt (© Interstaatliche Hochschule für Technik NTB)

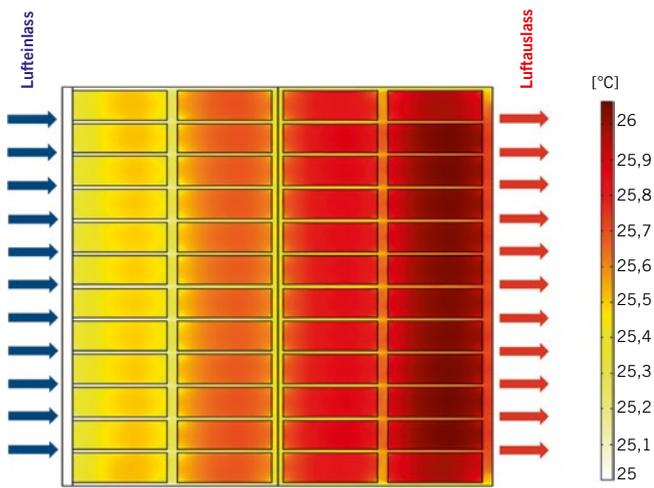


BILD 5 Temperaturverteilung der Kühlluft bei horizontaler Durchströmung der senkrecht stehenden Batteriemodule (© Interstaatliche Hochschule für Technik NTB)

Cell-Test-Rig (CTR) die Vermessung der Wärmekapazität von Batteriezellen. Diese grundlegenden Eckdaten sind die Voraussetzung für die Dimensionierung eines adäquaten Thermomanagements.

Hat man sich für eine Kühlstrategie entschieden, kann deren Einfluss auf die Temperaturverteilung an der Zelloberfläche ebenfalls mithilfe des CTR bestimmt werden. Ziel muss es sein, Temperaturgradienten sowohl an den einzelnen Batteriezellen als auch über die gesamte Batterie möglichst klein zu halten. Nur so kann eine ausreichende Lebensdauer des Batteriesystems gewährleistet werden. Genau dies ist aber die Herausforderung – insbesondere bei einer so großen Lithium-Ionen-Batterie, wie sie im eDumper verbaut ist. In **BILD 4** ist die Oberflächentemperaturverteilung einer eDumper-Zelle unter Last zu sehen, bei der lediglich die schmalen Seitenflächen gekühlt würden. Sehr auffällig ist hierbei die Temperaturüberhöhung in der Mitte der großen Zellflächen. Dies galt es unter allen Umständen zu vermeiden.

Nachdem die thermische Charakteristik der verbauten Lithium-Ionen-Zellen bekannt war, betrachtete die NTB-Arbeitsgruppe das Batteriemodul. Um die Anforderung einer möglichst homogenen Temperaturverteilung zu erreichen, muss auch das Kühlsystem eine entsprechend gleich verteilte Wärmezu- und -abfuhr sicherstellen. Lithium Storage hat sich für eine Luftkühlung der Batteriezellen entschieden. Die Herausforderung bestand darin, die Luftverteilung innerhalb eines Batteriemoduls und schließlich innerhalb der daraus aufgebauten Batterie so zu gestalten, dass sich in allen Kühlkanälen dieselbe Strömungsgeschwindigkeit und

damit einhergehend derselbe Wärmeübergang einstellt.

An der NTB konnte mithilfe von Strömungssimulationen nachgewiesen werden, dass im Gegensatz zur ursprünglich geplanten Kühlvariante eine horizontale Durchströmung der senkrecht stehenden Batteriemodule über die gesamte Batterie die besten Ergebnisse liefert. Zwar erwärmt sich die Kühlluft in Strömungsrichtung, **BILD 5**. Die Erwärmung liegt pro überströmtem Batteriemodul jedoch unter 0,5 K, sodass eine wesentlich bessere Temperaturhomogenität erreichbar wird. Um die Berechnungen zu verifizieren, wurde eine der vier Batterien mit insgesamt 48 Oberflächentempersensoren und diversen Strömungssonden ausgestattet. Im Prüfstandtest konnten die zuvor durch Simulation ermittelten Resultate weitgehend bestätigt werden.

Momentan befindet sich der eDumper im Feldversuch. Erste Messergebnisse lie-

gen vor und müssen noch im Detail ausgewertet werden. Bereits während der sehr kalten Wintermonate und bei den aktuellen Sommertemperaturen zeigte sich, dass die geforderte Temperaturhomogenität von maximal 5 °C – über eine Batterie gemessen – ohne aktives Thermomanagement nicht zu erreichen ist. Erwartungsgemäss zeigten die Messungen, dass der extern zuzuführende thermische Energieaufwand, um den nach längerem Stillstand ausgekühlten eDumper in angemessener Zeit auf Betriebstemperatur zu bringen, im Winter beträchtlich sein wird. Insbesondere die kalten Lithium-Ionen-Batterien mit ihren nicht unerheblichen thermischen Massen benötigten eine über die Eigenerwärmung durch den Betriebsstrom hinausgehende Aufwärmung. Zudem kann schon jetzt gesagt werden, dass auch der Wärmeeintrag von der Umgebung einen deutlichen Einfluss auf die Temperaturverteilung innerhalb der Batterie nimmt.

Nummer	Gefahrenquelle	Gefährdung
G1	Rauch/Gasaustritt in Umgebung	Rauchvergiftung Fahrer
G2		Rauchvergiftung Umstehende
G3		Druck auf Fahrer
G4	Verpuffung	Druck auf Umstehende
G5	Batterie außen heiß	Verbrennung Fahrer
G6		Verbrennung Umstehende
G7	Batterie brennt	Rauchvergiftung Fahrer
G8		Rauchvergiftung Umstehende
G9	Batterie brennt	Verbrennung Fahrer
G10		Verbrennung Umstehende
G11	Fahrzeug brennt	Rauchvergiftung Fahrer
G12		Rauchvergiftung Umstehende
G13	Fahrzeugteile unter Hochspannung	Stromschlag Fahrer
G14		Stromschlag Umstehende

TABELLE 1 Gefahrenquellen und Gefährdungen (© Empa Dübendorf)

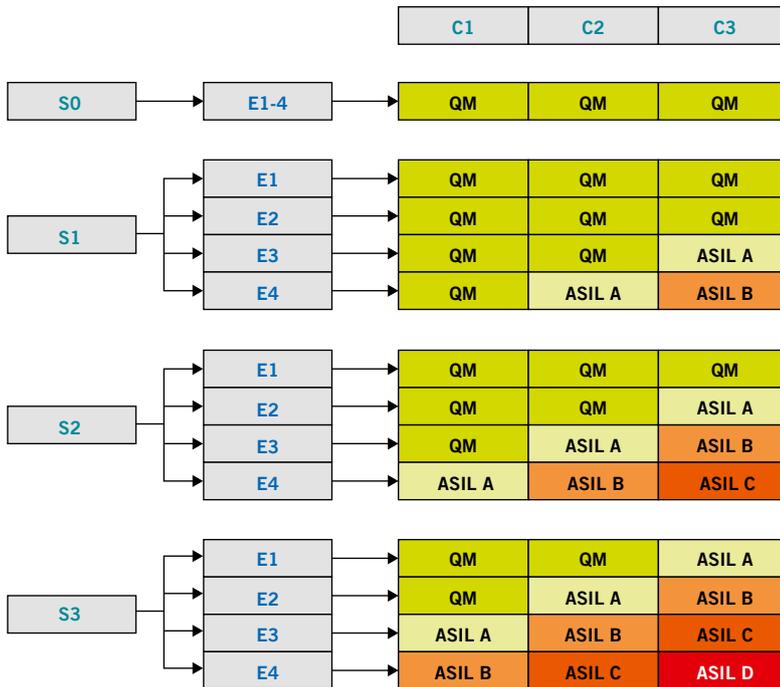


BILD 6 ASIL, Bestimmung nach ISO 26262 (© Empa Dübendorf)

SICHERHEITSANALYSE

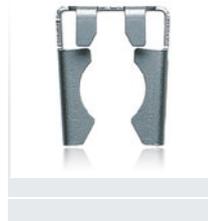
Die Sicherheitsanalyse bezieht sich auf Personengefährdungen, die zusätzlich durch die Verwendung einer Batterie als Energiequelle entstehen, **TABELLE 1**. Sie erfolgt in Anlehnung an die ISO 26262 „Road vehicles – Functional safety“. Dazu wurden die folgenden elf Betriebsarten definiert: Fahren in der Ebene oder bergauf (B1), Fahren bergab (B2), Fahrzeug (Fz) wird beladen (B3), Fz wird entladen (B4), Fz speist Energie ins Netz (B5), Fz nimmt Energie vom Netz (B6), Fz ist parkiert (B7), Fz in Wartung (B8), Fz-Stillelegung (B9), Fz Unfall Fahrbetrieb (B10), Fahrer handlungsfähig, Fz Unfall Fahrbetrieb (B11, Fahrer nicht handlungsfähig).

Zwei Worst-Case-Szenarien werden definiert, die Personengefährdungen durch Rauch, mechanischen Druck, thermische Einwirkung oder Elektrizität hervorrufen könnten. In Szenario 1 wird angenommen, dass eine Zelle in einem Batteriemodul katastrophisch ausfällt, das heißt thermisch durchgeht. Dies kann zur Entwicklung von potenziell toxischem Rauch und zu einer Erwärmung des Batteriegehäuses führen. Denkbar ist auch eine Verpuffung, bei der die Konzentration der entstehenden Gase innerhalb der Explosionsgrenzen liegt und diese durch einen Funken entzündet werden. Im schlimms-

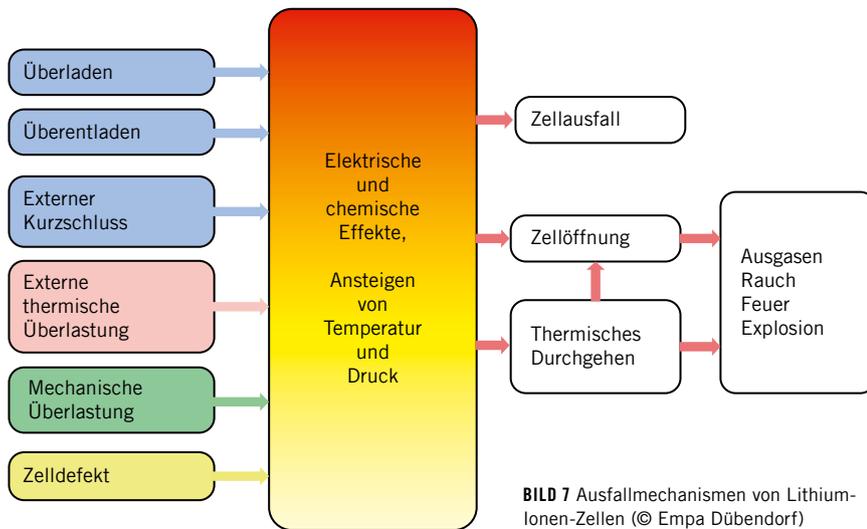
ten Fall breitet sich das thermische Durchgehen einer Zelle auf Nachbarzellen aus, mit dem Endeffekt, dass das ganze Batteriemodul und auch das Fahrzeug Feuer fängt. Außerdem wird angenommen, dass die Batterie als Energiequelle nicht mehr aktiv ist. Im zweiten Szenario werden Gefährdungen durch elektrischen Strom untersucht, die durch die Batterie, die mit Spannungen bis 750 V betrieben wird, verursacht werden könnten.

Die potenziellen Gefährdungen werden dann für alle Betriebsarten untersucht und ihr Risiko beurteilt. Die Risikobewertung teilt potenzielle Gefährdungen in den Kategorien Expositionswahrscheinlichkeit (Exposure), Schadensschwere (Severity) und Kontrollierbarkeit (Controllability) in drei oder vier Stufen ein. Dabei wird wie folgt bewertet: S0 Keine Verletzungen, S1 Leichte bis mittlere Verletzungen, S2 Schwere Verletzungen, Überleben wahrscheinlich, S3 Lebensgefährliche Verletzungen, Überleben unwahrscheinlich, E1 Sehr niedrige Wahrscheinlichkeit, E2 Niedrige Wahrscheinlichkeit, E3 Mittlere Wahrscheinlichkeit, E4 Hohe Wahrscheinlichkeit, C1 Einfach beherrschbar, C2 Normalerweise beherrschbar, C3 Schwierig oder nicht beherrschbar. Basierend auf diesen Klassifizierungen werden entsprechend **BILD 6** jeweils die

Sicherungsringe | Formfedern | Stanzteile | Feinstanzteile | Ventile | Drahtbiegeteile
 Systemtechnik | Dreh-/Frästeile | Druckgussteile | Rohrbiege-/Rohrumformteile | Parksperrensysteme



HÖCHSTE PRÄZISION IN METALL.
www.hugobenzing.de



THERMISCHES DURCHGEHEN UND AUSBREITUNG

Das Batterie-Management-System (BMS), das die Lithium-Ionen-Zellen überwacht, misst kontinuierlich sämtliche Zellspannungen, Temperaturen in den Zellstacks, regelt die Ströme beim Laden und Entladen, berechnet den Ladezustand und kontrolliert das Balancing der Zellen beim Laden. Zusammen mit Leistungsschaltern, Sicherungen und einer Isolationsüberwachung sorgt das BMS für einen sicheren Betrieb der Batterie. Damit können die elektrischen Mechanismen Überladen, Überentladen und externer Kurzschluss verhindert oder unter Kontrolle gehalten werden,

BILD 7. Durch eine Heizung/Kühlung sowie ein den mechanischen Belastungen im Betrieb angepasstes Gehäuse lassen sich externe thermische und mechanische Überlastungen vermeiden. Einzig zellinterne Defekte können durch konstruktive Maßnahmen und das beste BMS nicht gehandhabt werden. Solche Defekte sind zwar selten, dennoch müssen sie wegen der möglicherweise katastrophalen Auswirkungen in Betracht gezogen werden. Insbesondere ist die Ausbreitung bei einem thermischen Durchgehen einer Zelle zu untersuchen.

Dazu wird eine Anordnung mit Zellen in einem Gehäuse aufgebaut. Die Geometrie dieser Anordnung, insbesondere die horizontalen und vertikalen Abstände und die Zellverbinder, stimmen mit der Originalbatterie überein, **BILD 8.** In Zelle Z1 wird mittels Nagelpenetration ein Kurzschluss erzeugt, der zu einem thermischen Durchgehen führt. Der Test hat gezeigt, dass der aus Zelle 1 ausströmende Rauch eine Temperatur von über 600 °C aufweist, während das Gehäuse von Zelle 1 etwa 270 °C warm wird, **BILD 9.** Das thermische Durchgehen bewirkte aber keinen Brand und keine Ausbreitung auf die Nachbarzellen.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Steinbruch La Tschärner im schweizerischen Péry-La Heutte ist seit Januar 2018 der eDumper, ein gigantischer Muldenkipper, in Betrieb. Er wurde innerhalb von 18 Monaten vom Dieselfahrzeug zum weltweit größten Elektrofahrzeug umgebaut. Mit seinen 58 t Leergewicht und 65 t Zuladung transportiert der eDumper Gestein vom Berg ins Tal.

ASIL (Automotive Safety Integrity Levels) für die betrachteten Gefährdungen bestimmt. Dazu zählt man die Zahlen nach den Buchstaben (zum Beispiel S3/E4/C3) zusammen und erhält in diesem Fall 10 Punkte. Da es sich um den schlimmsten Fall handelt (in allen drei Kategorien die höchste Punktzahl), steht diese Bewertung für ASIL D. Bewertungen von A bis D (10 bis 7 Punkte) erfordern spezielle Maßnahmen, QM steht für Qualitätsmanagement.

Die Auswertung ergibt für die Gefährdungen G9 und G11 im Betriebszustand B11, bei der der Fahrer nicht mehr handlungsfäh wäre, eine Bewertung ASIL A. Ebenfalls mit ASIL A werden die Gefährdungen G13 und G14 in den Betriebszuständen B1 bis B6 bewertet. Für alle anderen Kombinationen ist die Bewertung QM. ASIL A bedeutet, dass die empfohlene

Ausfallwahrscheinlichkeit kleiner als 10^{-6} pro Stunde sein soll, was einer Ausfallrate von 1000 FIT (Failure in time) entspricht. Für die Gefährdungen G9 und G11 muss demnach die Ausfallrate für die Ausfallart „zufälliges thermisches Durchgehen“ einer Zelle, die einen Brand der Batterie auslösen könnte, ermittelt werden. Zudem ist zu eruieren, ob ein solches Durchgehen einer Zelle sich auf weitere Zellen ausbreitet.

Unter der konservativen Annahme einer Ausfallrate von 1 ppm/Jahr für qualitativ hochstehende Zellen ergibt sich für die Batterie mit 1440 Zellen eine Ausfallrate von 164 FIT, womit die Anforderung nach ASIL A erfüllt wird. Für die Gefährdungen G13 und G14 wird ASIL A erfüllt, indem die permanente Isolationsüberwachung eine Ausfallrate kleiner als 1000 FIT aufweist.

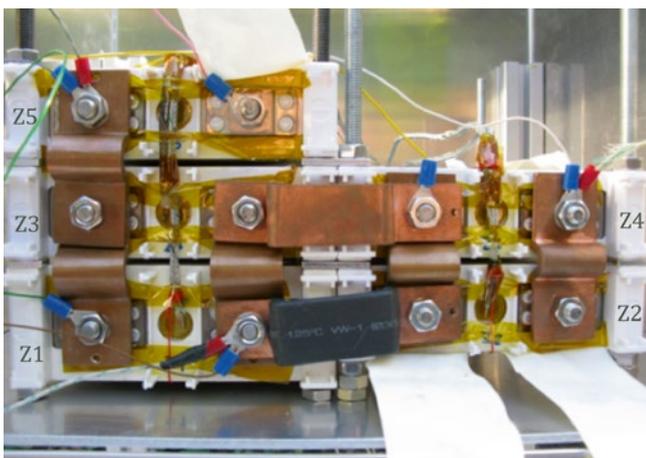


BILD 8 Zellenanordnung für den Ausbreitungstest (© Empa Dübendorf)

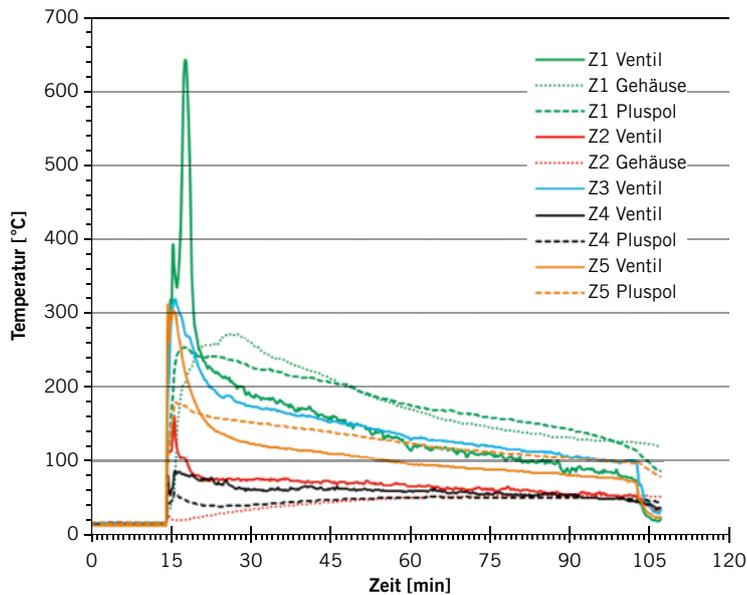


BILD 9 Temperaturen beim Ausbreitungstest, Zellen nach dem Ausbreitungstest
(© Empa Dübendorf)

Mit dem rekuperierten Strom fährt er leer hinauf. Im Idealfall ist sogar ein Plus-Energie-Betrieb möglich.

Anhand von Messfahrten mit einem dieselbetriebenen Fahrzeug erfolgte die energetische Auslegung des neuen Konzepts und die Erstellung des Lastprofils der Batterie. Ein messtechnischer Performance-Vergleich ermöglichte die Auswahl der geeignetsten Batteriezellen.

Mithilfe eines Prüfstands zur Messung der örtlichen Auflösung des Wärmestroms und der Oberflächentemperatur einer Batteriezelle unter realen Lastbedingungen konnte das Thermomanagement der Batterie ausgelegt werden. Ein ausgeklügeltes Sicherheitskonzept stellt einen zuverlässigen Betrieb unter rauen Einsatzbedingungen sicher.

LITERATURHINWEIS

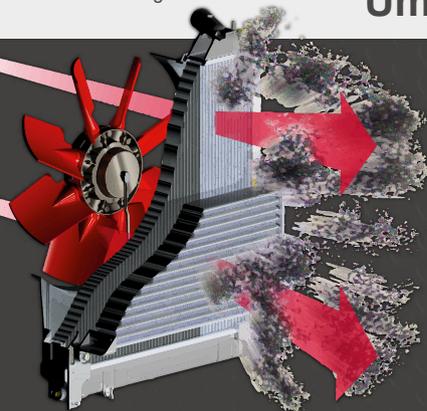
[1] Christen, R.; Rizzo, G.; Gadola, A.; Stöck, M.: Test Method for Thermal Characterization of Li-Ion Cells and Verification of Cooling Concepts. In: Batteries 1 (2017), Nr. 3, S. 1–12



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.emag.springerprofessional.de/atz-offhighway-worldwide

Umschaltventilatoren zur Kühlerreinigung



**mehr
Kühlung**



**mehr
Leistung**

