



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 30.10.2020

---

## CO2 freier E-Dumper mit elektrischem Energiespeicher

Das weltweit grösste batteriebetriebene Elektrofahrzeug

---



Quelle, alle Bilder: Andreas Sutter eMining AG



**Datum:** 30.11.2019, vers. 0.1; Nachtrag 30.02.2020 vers. 1.11; Nachtrag 30.10.2020 vers. 3.9

**Ort:** Biel-Bienne

**Subventionsgeberin:**

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das  
Bundesamt für Energie BFE  
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Co-Finanzierung:**

Ciments Vigier S.A.  
Zone industrielle Rondchâtel  
CH – 2603 Péry – La Heutte  
[www.vigier-ciment.ch](http://www.vigier-ciment.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

Lithium Storage GmbH  
Dorfbach 36  
8308 Illnau

Kuhn Schweiz AG  
Bernstrasse 125  
3627 Heimberg

Ciments Vigier S.A.  
Zone industriel Rondchâtel  
2603 Péry-La Heutte

Berner Fachhochschule BFH-TI  
Quellgasse 21  
2501 Biel

Empa  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB  
Werdenbergstrasse 4  
9471 Buchs

**Autoren:**

Andreas Sutter, Kloosweg 23, CH-2502 Biel-Bienne [andreas.sutter@gmx.ch](mailto:andreas.sutter@gmx.ch) (Redaktion und A14)

Prof. Dr. Peter Affolter, Dozent Berner Fachhochschule Biel BFH (Koordinator für die Fachhochschulen und EMPA, zudem u.a. Anhängen 1 und 12), Prof. Dr. Maximilian Stöck, Dozent an der Interstaatlichen Hochschule für Technik, NTB (Bericht gemäss Anhängen 2, 5, 6, 8); Prof. Dr. Andrea Vezzini (5.14.3); Marius Bachofen, Dipl. Maschinenbauingenieur ETH Zürich, Projekt-Manager, Lithium Storage GmbH (wissenschaftlicher Ansprechpartner seitens ARGE E-Dumper), Johannes Lohmeier, E.Ing. (FH) (5.14.4); Dr. Gerhard Rizzo, Senior Research Engineer, Interstaatliche Hochschule für Technik, NTB (Anhänge 6 und 7), Dr. Alejandro Santis, Wissenschaftlicher Mitarbeiter BFH (Anhänge 3, 4 und 5), Marcel Held, Dipl. Elektroingenieur, Dozent ETH Zürich, Senior Engineer, EMPA (Anhänge 9, 10 und A11), Christian Follin, BFH (Anhang 1), Andreas Meier, BFH (Anhang 1), Roger Strässle, NTB (Anhänge 2 und 5), Rouven Christen, NTB (Anhänge 2, 5, 6 und 7), Alfred Gadola, NTB (Anhänge 2, 5 und 10) Gerhard Rizzo (Anhänge 6 und 7), Mathias Schön, NTB (Anhang 8), Daniel Aeppli, EMPA (Anhang 10), Thomas Baumgartner, BFH, Automobiltechnik (Anhang 12), Ludovic Lauber und Daniel Luder, beide BFH (5.14.3); Lukas Blaser und Konrad Zaugg, beide eMining AG (Anhang 13)

**BFE-Projektbegleitung:**

Men Wirz, [men.wirz@bfe.admin.ch](mailto:men.wirz@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501449-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Der vorgeschlagene Umbau eines 10-jährigen Komatsu HD 605-7 zum E-Dumper Nr. 1 ist gelungen. Der von der Vigier Belegschaft respektvoll «Lynx» (dt. Luchs) getaufte E-Dumper verbraucht pro Tag weniger als 300 KWh, spart dabei jährlich über 50'000 Liter Dieseltreibstoff und damit 130'000 Kg CO<sub>2</sub>. Er leistet, je nach Fahrprofil, 10 – 20 Prozent mehr Tonnenkilometer als das typengleiche konventionelle Fahrzeug. Die grösste Herausforderung beim Umbau waren der Bau der weltgrössten Batterie auf einem Pneufahrzeug, der Zeit- und Kostendruck sowie schlussendlich die Lade-/Entladeinfrastruktur. Die Evaluation der Hauptkomponenten, Batterie, Motor mit höchstem Drehmoment in gedrängten Platzverhältnissen, Mulde, Getriebe, Wechselrichter, Steuerung usw. gelang aufgrund der Labor- und Feldversuche der von den Fachhochschulen erforschten Grundlagen sowie einer intensiven nationalen und internationalen Zusammenarbeit von Industrie, Labors, Fachhochschulen und zahlreichen Fachspezialisten. Mit der Konzeption (Wahl der Zellchemie, «Architektur» und Management der Zellen), dem Bau und der Erprobung im Umfeld der Steingrube «La Tscharner» wurden von allen Beteiligten Grenzen überschritten und Höchstleistungen abgefordert, technologisch, fachlich, zeitlich und finanziell. Das Projektteam war gefasst auf einen umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand für die Wahl der Zellchemie, Zellstruktur und Architektur der Batterien, Anforderungen punkto Sicherheit, Vibrationen, Moderation der Temperatur, Feuchtigkeit beim Herzstück des geplanten Energie PLUS – Fahrzeugs, das mit seinen voll beladenen Talfahrten den Batterien mehr Strom zuführen sollte, als es für die Bergfahrt ins Abbaugelände benötigt. Das weltweit erste Projekt, das dank der Mitfinanzierung der Schweizerischen Eidgenossenschaft gestartet wurde, fand eine hohe Beachtung in mehreren hundert Berichten in Fachmedien.

Dass ein Energie PLUS Betrieb, quasi ein perpetuum mobile immer noch nicht erreicht wird, tut diesem Erfolg keinen Abbruch. Mit dem E-Dumper kommen alle Vorteile des batterie-elektrischen Betriebs zum Tragen. Bis dato überfordert war die Ladeinfrastruktur. Ein E-Dumper kann nicht einfach wie ein Tram oder ein Elektrobus an einer zentralen und geschützten Stelle aufgeladen oder entladen werden. Im Winter und an Wochenenden müssen die Batterien beheizt, im Vollbetrieb und im Sommer gekühlt werden. Der feine Gesteinsstaub erfordert staubdichte Konstruktionen und Einbauten. Die Ladeinfrastruktur und die dazu benötigten Leistungskomponenten standen erst ab Ende 2020 zur Verfügung und sie kosten ein Mehrfaches als ursprünglich veranschlagt. Deren Kühlbedarf und bei tiefen Minustemperaturen Beheizung, immer unter Berücksichtigung von starken Vibrationen im rauhen Gelände, ständiger Feuchtigkeit, Staub und - als Folge - deren Verklumpung hatte zahlreiche kostenintensive Nachbesserungen zur Folge.

Die drei grössten Vorbehalte gegenüber der Elektromobilität sind: Reichweite, Ladeinfrastruktur sowie Lithium-Batterien als Speicher, punkto Oekologie (Herkunft der Bestandteile, Graue Energie und Entsorgung), Leistung und Lebensdauer.

Lithium-Batterien sind derzeit die effizientesten Stromspeicher unter Berücksichtigung der Faktoren: Herkunft des Stroms: Da hauptsächlich aus Rekuperation, spielt dies beim E-Dumper eine untergeordnete Rolle. Graue Energie: die Pouches und Zellen stammen aus China, deren Bau zu den vier Batterien erfolgte in der Schweiz. Die Leistung der Batterien des E-Dumper hängt von der Zellchemie und der Grösse der Batterien ab. Mit den besten 2017 verfügbaren Zellen, den Westart NCM 125 Ah wird eine Leistungsdichte von 160 Wh pro Kg erreicht; die Grösse der Batterien wurde nach deren maximalen Belastung in der Rekuperationsphase von – 1000 KW, dem maximalen C-Faktor von 1,5 (Strom gegenüber der Kapazität der Zellen) und der gewünschten Einsatzdauer (nämlich minimal 1 Schicht von 8 Stunden mit über 20 Fahrzyklen pro Ladezyklus).

Es bleiben die Fragen nach der Lebensdauer, zu der das Projekt interessante Antworten und Erkenntnisse gebracht hat. Die Kurzantworten als Zusammenfassung:



- Einzelne der 1536 Zellen fielen bereits bei der Montage auf, mussten aber aus Zeitnot trotzdem verbaut und dann später ausgewechselt werden.
- Für 5 Pouches in Serie pro Zelle und bei Parallelverschaltungen ist ein Batteriemangement zu vernünftigen Kosten überfordert; dies gilt sowohl für die je zwei parallel verbauten Zellen in den Stacks, als auch für die vier parallel über eine DC-Sammelschiene betriebenen Batterieblöcke.
- Bei sorgfältigem Logging der Batteriedaten, effizientem Temperaturmanagement für alle 1536 Zellen, Einschichtbetrieb (pro Tag) und topografischen Gegebenheiten, wie im Steinbruch «La Tscharner» im Berner Jura gegeben, werden die Batterien 12 bis 15 Jahre betrieben werden können und auch dann noch eine Restkapazität von rund 80 Prozent der ursprünglichen Kapazität und die Zellen einen Wert von geschätzten 20 Prozent aufweisen.
- Bereits heute (2020) könnten für einen E-Dumper Nr. 2 vergleichbarer Bauart bei exakt gleicher Architektur 20 Prozent mehr Batterie-Leistung zu tendenziell niedrigeren Kosten verbaut werden.

Beim E-Dumper Nr. 1 «Lynx» wie ihn die Mitarbeiter von Vigier getauft haben, fallen drei Dinge auf: Die grüne Farbe auf Wunsch der Betreiberin. Die nicht existenten Abgase und Lärmemissionen. Die komplett anders aufgebaute LademuLde. Die sogenannte Gummimulde australischer Provenienz wurde evaluiert, weil die ursprüngliche Stahlmulde nicht mehr mit den heissen Abgasen beheizt werden konnte. Die Stahl(-gerippe), Nylon(-stränge), Gummi(-matten)-Mulde muss ist federnd, absorbiert harte Schläge der tonnenschweren Steinbrocken, ist etwas leichter und kann etwas mehr laden, steigert somit die Produktivität und die Wertigkeit des E-Dumpers zusätzlich.

Bisher wurde ein einziger Prototyp gebaut. Die Abrechnung zeigt rund dreifache Kosten im Vergleich mit einer konventionellen Dieselmachine. Dank vielseitiger Erkenntnisse, vor allem bei den nachträglichen Verbesserungen, kann ein (internes) Projektziel, ein Umbau einer mindestens gleichwertigen batterieelektrisch betriebenen Maschine zu etwas mehr als doppelten Kosten veranschlagt werden. Die oekologischen Ziele werden dabei erreicht. Elektrische 110 – 160 Tonnen Dumper zu mit Diesel Maschinen vergleichbaren Kosten während ihrer Lebensdauer (TCO Betrachtung) können bei einer Serienfertigung prognostiziert werden. Nach einer anfänglichen Begeisterung, vor allem in den Fachmedien, wird die Serienfertigung allerdings kaum im europäischen Raum den Durchbruch schaffen. Das grösste Interesse beobachten wir derzeit aus Kanada, Australien, Chile und China.

## Résumé

L'expérience montre que la recherche et le développement se concentrent sur la disposition des systèmes de traction et d'approvisionnement en énergie. Les partenaires académiques déterminent les paramètres de performance et de longévité pour le cas spécifique du E-Dumper, en se basant sur les modèles de longévité du centre de compétences ESReC, testés sur les installations dudit centre. Dans le domaine stationnaire, c'étaient jusqu'à présent essentiellement des systèmes d'alimentation électrique de secours et des systèmes sans coupure pour des ordinateurs hautement performants et des équipements de salles d'opération qui faisaient appel à l'énergie emmagasinée dans une batterie de 630 kWh. C'est quasiment en tant que produit annexe du développement ultrarapide de la mobilité électrique avec des batteries haute tension, mais également grâce aux expériences réalisées avec des batteries à courant continu de toutes les catégories de tension, que l'énergie est désormais exploitable en différé ; le procédé peut même être optimisé de manière à ce que l'énergie stockée puisse alimenter en différé le réseau de distribution d'électricité.



Le besoin en E-Dumpers d'une capacité de 100 tonnes en Suisse est évalué à un à deux véhicules par année. La production de 10 à 12 machines permettrait d'économiser 5 millions de litres de diesel et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 13 millions de kg en 10 ans. L'industrie suisse développe des locomotives, funiculaires, trolleybus, machines de chantier, véhicules agricoles et militaires, ainsi que des voitures électriques et des avions. La recherche, le développement et la commercialisation de véhicules de transport lourds et de machines de chantier à traction électrique se situe dans la droite ligne de cette longue tradition. Le E-Dumper Komatsu HD 605-7 électrifié (d'un poids total de 115 tonnes) transporte 65 tonnes de pierre à chaux et de marne depuis la zone d'extraction située en hauteur jusqu'au système de transport à implantation fixe. L'énergie emmagasinée dans les batteries est mise en œuvre pour le trajet à vide en amont. Les moteurs électriques offrent des couples de plusieurs milliers de newtonmètres (Nm) et une plage de vitesse de rotation nettement plus élevée. En ce qui concerne le besoin en énergie, l'on ne saurait sous-estimer les nombreux systèmes de traction auxiliaires (p.ex. hydromotrices). Dans le cadre de la récupération de l'énergie de freinage, les courants (de charge) sont extrêmement élevés pour les véhicules lourds.

La plus grande batterie jamais intégrée dans un véhicule - Aucune pièce d'usure perdue – aucun frais de maintenance - Construit en Suisse

## Summary

*The current trend is to exploit the advantages of electric drive systems. Car makers have developed electric cars, usually fitted with lithium-ion batteries and successfully launched on the market. Today's trolley buses have batteries as a backup energy source. Ferries recharge their batteries when docked. It is therefore appropriate to develop the first energy neutral vehicle for specific terrain with large height differences.*

*A diesel-powered dumper is used to transport lime- and marlstone from a higher-lying mining area down to the cement factory at Ciments Vigier SA in Péry. The dumper is being fully electrified by Lithium Storage GmbH and Kuhn Group S.A. by replacing the diesel engine with an electric motor and a 630 kWh battery system. The project is supported financially by the SFOE through its pilot and demonstration programme.*

*The E-Dumper acts as a semi-autarkic vehicle by storing braking energy in the batteries while hauling limestone downhill. The recuperated energy is subsequently used to displace the vehicle from the valley to the hill. Electric motors deliver torques of thousands of newton metres (Nm) and a wide range of speeds. In terms of the energy requirement, the numerous accessory systems (e.g. hydraulic pumps) must also be considered. Extremely high charging currents are produced by the kinetic energy recovery system which operates on the downhill section.*

*The development in Switzerland of transportation equipment weighing many tonnes is breaking new ground. Current demand for e-Dumpers is one to two vehicles per year. Once 10 - 12 machines have been produced, the reduction in diesel consumption during their life cycle of 10 years or more would be 5 million litres and the reduction in CO<sub>2</sub> amounts to 13 million kg.*



## Take-home messages

- Elektrische Grossfahrzeuge verbrauchen einen Viertel der Energie im Vergleich mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor; je nach Herkunft des Stroms, und bei optimaler Nutzung der Batterien. Unter Einbezug des Aufwandes für die Rohstoffbeschaffung für die Batterieherstellung bzw. des Verlustes bei der Herstellung von Mineralölprodukten und deren Aufbereitung und Transport, fällt der Vergleich in Bezug auf den Primärenergieverbrauch noch wesentlich besser zu Gunsten batteriebetriebener Fahrzeuge aus.
- Steinbrüche sind in der Regel höher gelegen, womit je nach Höhendifferenz sogar ein Null-Energie-Betrieb denkbar wird. Der Fahrbetrieb mit doppeltem Gewicht talwärts bzw. Fahrt bergwärts mit halbem Gewicht ist ein Spezialfall. Elektrofahrzeuge nutzen jedoch Energieressourcen deutlich effizienter, wenn alle Komponenten auf den elektrischen Betrieb abgestimmt werden.
- Batterien sind aktuell die am besten geeigneten Energieträger für netzunabhängige Elektrofahrzeuge, die weniger Energie und keine fossilen Brennstoffe brauchen. In naher Zukunft gibt es für die CO2 Reduktionsziele keine andere Antwort als die Batterie Elektrik. Die 720 KWh (nutzbar 630 KWh) – Batterie kann, in einem 65-Tonnen Dumper verbaut, über ein Megawatt leisten und kann im Einschichtbetrieb 10 – 15 Jahre genutzt werden. Die Batterie muss jedoch nicht möglichst gross sein, sondern dem speziellen Einsatz entsprechend angepasst; insbesondere sollte die Maximal-Anzahl an Vollladezyklen ausgenützt werden, damit der Batterie-Produktionsaufwand vollständig amortisiert werden kann.
- Elon Musk hat bereits vor 5 Jahren erkannt, dass für die Akzeptanz der Elektromobilität die unumgänglichen Ladeprozesse und dazu eine flächendeckende Ladeinfrastruktur eine entscheidende Rolle spielen werden. Die Schnelladesysteme für Hochvoltbatterien haben gegenüber den weiteren Leistungskomponenten beim Bau von Elektrofahrzeugen noch ein hohes Entwicklungspotenzial. Für den E-Dumper steht sie bis heute nicht zu einem akzeptablen Preis und serienreif zur Verfügung.
- Anstelle einer Stahlmulde hat sich der Einsatz einer Gummi-Mulde bewährt: Sie vermindert das Verkleben des Gesteinsmehls, federt die vertikalen Schläge auf das Chassis ab und erlaubt eine flexiblere Beladung mit höheren Gewichten. Unter Ausnutzung der übrigen Vorteile des voll elektrischen Betriebs ergibt dies eine Produktivitätssteigerung von 12 bis über 20 Prozent im Vergleich mit Dieselfahrzeugen mit Stahlmulden. Und: Gummi/Nylon/Stahl-Mulden bringen auch auf den Diesel betriebenen Dumpfern eine Produktivitätssteigerung und können deren Nutzungsdauer verlängern.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
Résumé .....	5
Summary .....	6
Take-home messages .....	7
Inhaltsverzeichnis .....	8
Abkürzungsverzeichnis .....	11
1 Einleitung .....	12
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	12
1.2 Pionierleistung aller beteiligten Partner .....	13
2 Motivation, Ziele, Vorgaben .....	14
2.1 Motivation für Bau des weltgrössten batterie-elektrischen Pneufahrzeugs .....	14
2.2 Projektziele .....	15
2.2.1 Die Wirtschaftlichen und die Ökologisch/Politischen Ziele des Projektes .....	15
2.2.2 Die wissenschaftlich-technischen Ziele des Baus der grössten Fahrzeugbatterie .....	15
2.2.3 Bereitstellung zusätzlicher Grundlagen für den Bau .....	16
3 Vorgehenskonzept – Anlagenbeschrieb .....	17
3.1 Anforderungen der Bestellerin .....	17
3.2 Übersicht der Hauptkomponenten und der Lieferantinnen .....	18
3.3 Die Suche nach dem idealen Stromspeicher .....	20
3.4 Originale, modifizierte und neue Bauteile .....	20
3.4.1.1. Chassis .....	20
3.4.1.2. Antriebsstrang .....	20
3.4.1.3. Bremsanlage .....	21
3.4.1.4. Kühlanlage .....	21
3.4.1.5. Energiespeicher .....	21
3.4.1.6. Fahrzeug – Elektrik .....	21
3.4.1.7. Die neue Mulde .....	22
3.4.1.8. Steuerung .....	23
3.4.1.9. Laden 23	
3.4.1.10. Interfaces zum Fahrer .....	23
3.5 Grid-Anbindung .....	24
4 Methodik, Arbeitsschritte .....	24
4.1 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten .....	27
4.2 Energiebilanz; Messungen auf einer typengleichen Maschine .....	29
4.3 Wahl der Chemie einer geeigneten Speicherzelle .....	30
4.4 Dimensionierung und Architektur der Batterie(n) .....	31
4.5 Evaluation eines Elektromotors .....	33
4.6 Steuerung, Anzeigen, BMS und Programmierung .....	35
4.7 Ersatz für die Beheizung der Stahlmulde .....	36
4.8 Inverter und DC-Verteilung .....	37
4.9 Anforderungen an die Aufhängung der Batterien .....	37
4.10 Thermische Stabilisierung der Batterien .....	37
4.11 Sicherheitstests mit den Zellen .....	38
4.12 Unterbringung der Kühl- und Rückkühlanlage .....	38



4.13	Zerlegen der 10-jährigen Maschine .....	39
4.14	Revision Chassis, Kabine, Vorderachse, Hydraulik .....	40
4.15	Revision der Hinterachse .....	41
4.16	Einbau der elektrischen Komponenten .....	41
4.17	Neue Lackierung, neue Bereifung.....	42
4.18	Fahrttests ohne Mulde .....	42
4.19	Zusammenbau, erste Testphase, Transport nach Péry – La Heutte.....	43
4.20	Fahrttests im Gelände mit Mulde .....	44
4.21	Fahrttests im Steinbruch mit Batterietests und 100 KW Ladeinfrastruktur .....	44
4.22	Risikoanalyse, Abnahme .....	45
4.23	Optimierung im Hinblick auf einen Energie PLUS – Betrieb .....	45
5	Ergebnisse und Diskussion .....	<b>46</b>
5.1	Bestimmen der Anforderungen an das elektrische System .....	46
5.2	Energieflussmodellierung .....	48
5.3	Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem.....	50
5.4	«Architektur» der Batterien.....	52
5.5	Simulation der Luftkühlung der Batterie E-Dumper.....	52
5.6	Befestigung der Batterien.....	53
5.7	Performance-Vergleich der Batteriezellen .....	53
5.8	Elektrische und thermische Charakterisierung.....	54
5.9	Initialkapazität der Batterien.....	55
5.10	Mechanische Spezifikationen E-Dumper .....	56
5.11	Thermische Vermessung der Batterie .....	58
5.12	Thermomanagement.....	59
5.13	Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem.....	61
5.14	Prognose zur Nutzungsdauer Batterie Westart NCM 125/150 Ah.....	63
5.14.1	Vorgaben, Umfeld.....	63
5.14.2	Angaben der Herstellerin Shenzhen Westart Technology Co. Ltd.....	64
5.14.3	Performance-Vergleich zweier Batteriezellen .....	65
5.14.4	State of Health .....	66
5.14.5	Messungen nach 2 Betriebsjahren .....	68
5.14.6	Prognose der Einsatzdauer der vier Batterien: 12 - 15 Jahre .....	69
5.15	Sicherheitsanalyse .....	70
5.15.1	Massgebende Normen: .....	70
5.15.2	Mechanische Anforderungen an den E-Dumper .....	70
5.15.3	Systemgrenzen der Batterie-Sicherheitsanalyse .....	71
5.15.4	Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung .....	71
5.15.5	Brandversuche .....	74
5.15.6	Druckentlastung Batteriegehäuse .....	77
5.15.7	Steuerung .....	77
5.15.8	Modifizierte/nicht modifizierte Bereiche aufgrund der Sicherheitsanalyse.....	78
5.15.8.1	Chassis .....	78
5.15.8.2	Antriebsstrang.....	78
5.17.8.1	Bremsanlage.....	79
5.17.8.4	Kühlanlage.....	79



5.17.8.5	Energiespeicher .....	80
5.17.8.6	Fahrzeug - Elektrik .....	80
5.17.8.7	Mulde 80	
5.17.8.8	Steuerung / Interfaces zum Fahrer .....	81
5.17.8.9	Laden / Entladen .....	81
5.17.8.10	Batterie Management .....	82
5.17.8.11	Sicherheit und Komfort .....	82
6	Schlussfolgerungen und Fazit .....	<b>83</b>
7	Ausblick und zukünftige Umsetzung .....	<b>85</b>
8	Nationale und internationale Zusammenarbeit .....	<b>87</b>
9	Kommunikation .....	<b>88</b>
10	Publikationen, Ausstellungen und Awards .....	<b>91</b>
11	Linkverzeichnis .....	<b>91</b>
	Speicherort gesamtes Dokument inkl. Anhängen: .....	<b>91</b>
	<a href="https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38412">https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38412</a> .....	<b>91</b>
	Videos: .....	<b>91</b>
	.....	<b>91</b>
12	Anhang .....	<b>92</b>



## Abkürzungsverzeichnis

CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	
E-Dumper	Elektrifizierter Komatsu HD 605-7	
BFE	Bundesamt für Energie	
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungsanstalt	
BFH – CSEM – ESReC	Berner Fachhochschule – Energy Storage Research Center	
BFH – DTC	Berner Fachhochschule – Dynamic Test Center	
NTB	Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs und St. Gallen	
LFP	Lithium Eisen Phosphat – Zellen	
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide (auch: NCM oder LNMC)	
LTO	Lithium Titanatspinell	
LCO	Lithium Cobalt Oxid	
NCA	Lithium -Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide	
LMO	Lithium Mangan -Oxid	
AC	Wechselstrom	
W – kW – MW	Watt – Kilowatt – Megawatt	
3pAC	3 Phasen Wechselstrom	
TCO	Total Costs of Ownership	
ABS	Antiblockiersystem	
GPS	Global Positioning System	
NMEA 0183	NMEA 0183 ist ein Standard, für die Kommunikation zwischen GPS-Empfänger und PCs	
SPS	Speicher Programmierbare Steuerung	
BMS	Battery Management System	
FEM	Finite Elemente Methode	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
CE	Coulometrische Effizienz	



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Das Thema Klimawandel stand vor 2020 zuoberst auf der politischen Agenda. Hauptstossrichtung ist und bleibt die Reduktion des CO<sub>2</sub> – Ausstosses bis 2050. Das Konzept E-Dumper von 2016 hatte das Ziel, für Vigier Ciment einen klimaneutralen Gesteintransport zu konzipieren und dazu in einem zweiten Schritt für den Transport im Abbaugelände «La Tschärner» einen Dumper Komatsu HD 605–7 für den Batterie elektrischen Betrieb umzubauen. Diesem war bereits vor 10 Jahren die Installation einer Strom produzierenden Förderanlage vorausgegangen. Nun schien die erweiterte Lösung faszinierend, auch auf den flexiblen Routen, auf denen Kalk und Mergel im Steinbruch talwärts transportiert wird, kinetische Energie zu rekuperieren und die gespeicherte Energie für Bergfahrten zu nutzen.

*«Ohne Zement kein Beton. Beton steht für Langlebigkeit und Stabilität, Kunst, Kreativität, Innovatives Design und nachhaltige Ökologie»<sup>1)</sup>*. Die Zementherstellung von jährlich über 4 Mia. Tonnen generiert 4-8 Prozent des weltweiten CO<sub>2</sub> – Ausstosses. Über die Hälfte davon ist prozessbedingt: wenn Kalk und Mergel in Zementklinker verwandelt werden, entsteht Kohlendioxyd; knapp die Hälfte davon beim Erzielen der Ofentemperaturen von bis zu 1400 Grad Celsius. Vigier Ciment bemüht sich um die Reduktion des CO<sub>2</sub> – Ausstosses, u.a. mit Recycling von Altstoffen im grossen Ausmass, Sanierung des eigenen Wasserkraftwerks, Bau einer Förderanlage, die elektrische Energie produziert.

*«Vigier Ciment ist Pionier der Schweizerischen Portland-Zementherstellung. In Péry-La Heutte setzen sich die Mitarbeitenden mit Leidenschaft für innovative Lösungen ein.»<sup>1)</sup>*





## 1.2 Pionierleistung aller beteiligten Partner

Der Betrieb der Dumper, die im Steinbruch La Tscharner Kalk- und Mergelgestein vom rund 180 Meter höher gelegenen Abbaugelände in Péry – La Heutte (teilweise auf Gemeindeboden von Orvin) bis zur fest installierten Brecheranlage transportieren, brachte die Verantwortlichen der Firma Ciments Vigier S.A. als Betreiberin, die Firma Kuhn Schweiz AG, als Technologiebetrieb für den Verkauf und die Wartung von Baumaschinen u.a. des japanischen Herstellers Komatsu sowie die auf grosse Hochspannungs-Lithium-Batterien spezialisierte Firma Lithium Storage GmbH auf die Idee, mittels Elektrifizierung die grossen bei Talfahrt anfallenden Energiemengen in Batterien zu speichern und für die Bergfahrt mit leerer Mulde zu nutzen.

Zu Beginn des Projektes (2015) waren wesentliche Komponenten für den Bau eines Prototyps noch nicht bekannt oder noch nicht auf dem Markt verfügbar. Elektromotoren haben, sobald sie sich bewegen, ein wesentlich höheres und weitgehend linear verlaufendes Drehmoment sowie einen sehr weiten Drehzahlbereich, weshalb der Einsatz eines mehrstufigen Getriebes vorerst nicht vorgesehen war. Bewusst hingegen war den Ingenieuren, dass für die verschiedenen Hilfsantriebe und insbesondere die nicht zur Verfügung stehende Abwärme, geeignete Ersatzmassnahmen eingeplant werden mussten.



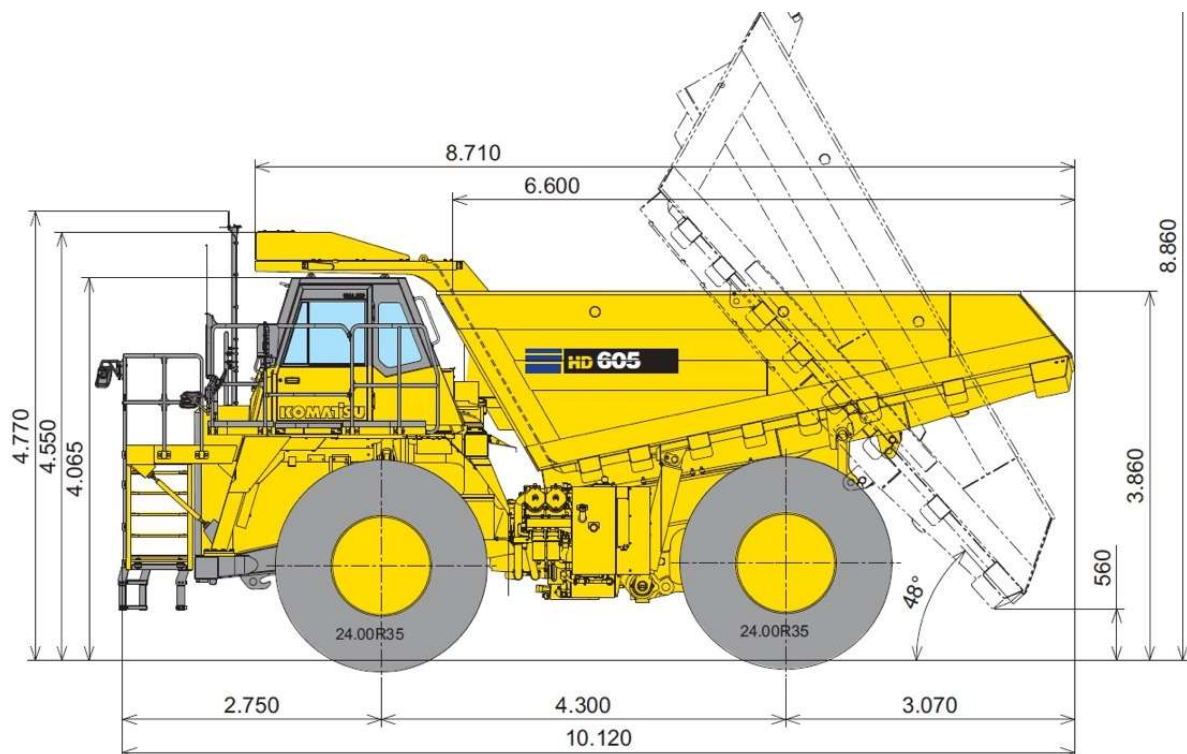


## 2 Motivation, Ziele, Vorgaben

### 2.1 Motivation für Bau des weltgrössten batterie-elektrischen Pneufahrzeugs

Für die Zementherstellerin Vigier ergibt sich die Möglichkeit, das bereits bestehende Förderband mit einer Flotte von E-Dumpfern zu ergänzen und diese als Generatoren einzusetzen. Auf den Transportwegen talwärts wird die kinetische Energie rekuperiert und für die Rückfahrt in das rund 200 Meter höher gelegene Abbaugebiet genutzt.

Sicht Politik:	Beitrag zum Ziel der Klimaneutralität 2050 Nutzen aller Vorteile der E-Mobilität
Sicht Vigier:	Beitrag zur ökologischen Optimierung des Zement-Herstellungsprozesses; Kostenoptimierung
Sicht Kuhn:	Neue Märkte mit konkurrenzlosen Maschinen erschliessen
Sicht Lithium Storage:	Engineering – Leistungen anbieten und diese mit dem Import/Verkauf von Zellenverkauf finanzieren Bau der grössten Batterie in einem Radfahrzeug
Sicht EMPA:	Produktesicherheit erhöhen und dokumentieren
Sicht BFH, NTB:	Umsetzen der Energie-Strategie des Bundesrats; Aus- und Weiterbildung; Ausbau der Kompetenzzenter; Batteriesysteme entwickeln und optimieren
Sicht Medien:	Fachzeitschriften stürzen sich auf Weltrekorde und Innovationen





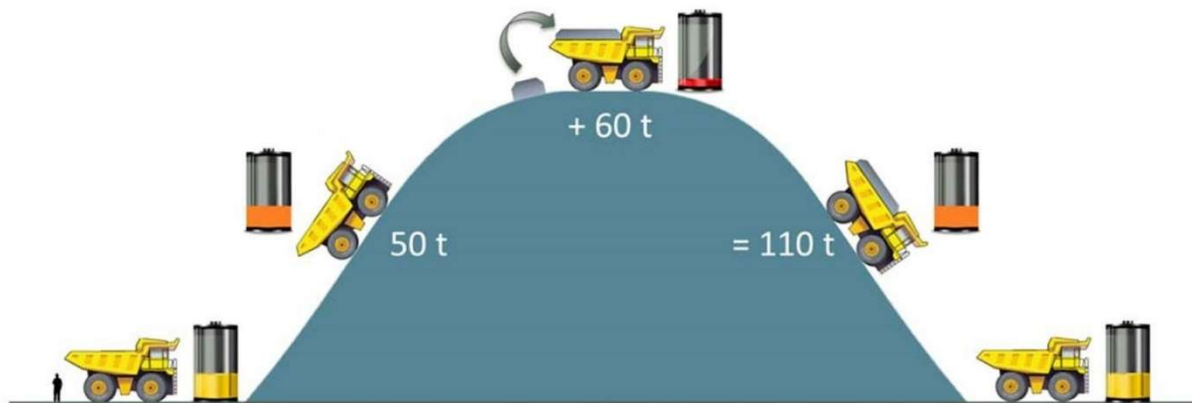
## 2.2 Projektziele

### 2.2.1 Die Wirtschaftlichen und die Ökologisch/Politischen Ziele des Projektes

Die Elektrifizierung der Mobilität ist ein Beitrag zur Energiewende. Die Reduktion des fossilen Energiebedarfs in den Industrieländern ist ab 2020 für die Bereiche Schwerverkehr, Baumaschinen, aber auch Binnenschiffsantriebe eine Notwendigkeit. Zement ist nach Wasser das weltweit zweitgrösste Konsumgut, bis 2019 in etwa gleichauf mit der Gesamtmenge an Kunststoffen. CO<sub>2</sub> spielt bei der Herstellung, aber auch beim Bau und nicht zuletzt bei der Bemessung des Anteils grauer Energie von Kraftwerken, Brücken, Tunneln, Strassen- und Schienenbauten, Schleusen, Kanälen, Fabrik- und Häuserbau eine wesentliche Rolle. Alternativen gibt es kaum: zur Diskussion stehen Holz und ölbasierte Kunst- und Verbundstoffe.

Vigier Ciments S.A. eine Tochter des französischen VICAT-Konzerns ist bestrebt, die CO<sub>2</sub> Produktion bei der Zementherstellung zu verringern. Elektrifizierte Dumper von 110 Tonnen kosten rund das Doppelte, jedoch im Betrieb weniger als die Hälfte gegenüber den Fahrzeugen mit fossilem Treibstoff. Ein traditionelles Fahrzeug kostet rund CHF 1 Mio. Die erstmaligen Forschungs- und Entwicklungs- und Konstruktionsmehrkosten für jeden Prototypen betragen darüber hinaus noch einmal rund CHF 1,5 Mio. Deshalb wurden die Gesamtprojektkosten für den Bau einer ersten Maschine mit deutlich über CHF 3 Mio. veranschlagt und schlussendlich auch abgerechnet.

Mit der Elektrifizierung von Komatsu-Baumaschinen wird deren Lebensdauer erheblich verlängert. Die nicht amortisierbaren Mehrkosten für die Entwicklung des Prototyps liegen bei über CHF 1,6 Mio. Der gesamte Entwicklungsaufwand bedeutet in schweizerisches Knowhow investiertes Geld.



### 2.2.2 Die wissenschaftlich-technischen Ziele des Baus der grössten Fahrzeugbatterie

*Um das Knowhow mit dem Bau von mit grossen Batterien versorgten elektrischen Antrieben in der Schweiz zu entwickeln und um die Chancen, den Bau künftiger Einheiten (von 60 – 200 Tonnen) in der Schweiz zu erhöhen, wurden Gelder der Öffentlichen Hand beantragt. Der von den Forschungspartnern geschätzte diesbezügliche Aufwand wird nachhaltig in Forschung, Ausbildung und Entwicklung durch Schweizerische Hochschulen, der EMPA sowie Fachhochschulen investiert. Batterien für Grossfahrzeuge sind erst mit Lithium-Zellen überhaupt sinnvoll, waren jedoch vor dem Projektstart noch wenig erforscht und erprobt. Seitens der Betreiber, Anwender, aber auch im Projektteam bestand ursprünglich eine beträchtliche Unsicherheit betreffend Leistung und Lebensdauer von grossen Lithiumbatterien.*



*Für die Umrundung der Welt mit der Solar Impulse von Bertrand Piccard mussten 2009/10 für die zweite Hälfte verbesserte Lithium-Batterien eingesetzt werden. Auf der ISS werden die Nickel-Wasserstoff-Zellen (und die Nickel-Cadmium-Zellen im russischen Teil) erst 2019/20/21 durch Lithium-Ionen-Akkus ersetzt. Die Grösse der Batterie wird dabei, im Gegensatz zur Konzeption von Personenwagen, bei dem vor allem die Reichweite optimal sein soll, bestimmt durch die sehr hohen Lade- und Rekuperationsströme, die die einzelnen Batteriezellen verkräften sollen. Dabei ist das Wärme- bzw. Kälteverhalten bei saisonalen Schwankungen von plus/minus 30 Grad Celsius einer der Forschungsschwerpunkte der BFH, Bern University of Applied Sciences, Division of Electrical- and Communication Engineering.*

*Die Herausforderungen beim Bau von grossen Batterien für den mobilen Einsatz waren noch kaum bekannt. Erstens muss sowohl die Statik betreffend Stacks, Gehäuse und Halterung den Umweltbedingungen im Steinbruch standhalten, zweitens müssen die chemischen Prozesse in den je 384 Einzelzellen à je 125 Ah vorausberechnet und im Rahmen der Vorgaben stabil gehalten werden. Drittens können erst Messungen auf den Fahrstrecken im Regelbetrieb und nach einer mehrmonatigen Einsatzdauer im Schichtbetrieb sowohl im Sommer als auch im Winter die theoretischen Prognosen erhärten.*

*Der direkteste Weg, um skeptische Fahrzeugbauer, Händler, Kunden und Betreiber von Grossfahrzeugen von den Leistungen von Elektrofahrzeugen, der Lebensdauer der Batterien und den tatsächlichen Einsparungen von Energie, Schadstoffausstoss und Betriebskosten zu überzeugen, ist der Bau, der Probetrieb und schlussendlich die Integration der E-Fahrzeuge in den Regelbetrieb.*

### **2.2.3 Bereitstellung zusätzlicher Grundlagen für den Bau**

*Ein weiterer Bereich betrifft die Hilfsantriebe, also die Nebenaggregate (z.B. die Kippvorrichtung, die Muldenheizung, den Kabinenkomfort) sowie die Steuerung, dabei vor allem die dreifach redundante Bremsanlage, die ihrerseits, zumindest teilweise, zugleich die Quelle der Energierückgewinnung darstellt. Elektromotoren entwickeln sehr hohe Drehmomente, ab der ersten Bewegung der Achse. Die weiten Drehzahlbereiche gegenüber Dieselmotoren können den Einsatz von Getrieben überflüssig machen. Für die Hilfsantriebe sollten separate Elektroantriebe vorgesehen werden.*

Vorerst nicht für die Planung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geplant waren vier weitere, je zwei technische und zwei ökonomische Herausforderungen im Zusammenhang mit der Entwicklung des E-Dumper Nr. 1:

- I. Ein Dieselmotor hat einen Wirkungsgrad von rund 33 bis maximal 45 Prozent. Beim Verbrennungsvorgang von bis zu 2000 Grad entsteht nebst der nutzbaren mechanischen Antriebsenergie rund 2/3 Abwärme. Diese wird bei der konventionellen Maschine teilweise zum Beheizen der Stahlmulde sowie für die Beheizung der Kabine verwendet. Der Rest wird in Kühlregistern vernichtet oder über die Abgasanlage an die Umgebung abgegeben. Um das Verkleben des Transportgutes in der Mulde zu vermeiden und die Batterie und die Kabinen zu beheizen, mussten Alternativen gefunden werden.
- II. Bei den ersten Berechnungen wurde ein kleiner Energieüberschuss erwartet. Verschiedene Faktoren, abweichende Fahrprofile, die tatsächlichen Fahrbahneigenschaften, die Verformung der Räder und insbesondere der Kettenbetrieb sowie der Mehrbedarf an Energie für die Nebenaggregate, wie Servolenkung, Servobremsen, Hubvorrichtung, Heizung, Kühlung, Pumpenbetrieb der Ölkreisläude und Kühlmittel usw. führten rasch zur Erkenntnis, dass der Betrieb zwar rund 4 Mal energieeffizienter vonstatten geht, jedoch nicht genügend kinetische Energie bei den



Talfahrten zur Verfügung stehen würde, um täglich rund 8 Stunden zu fahren. Vielmehr braucht es alle zwei Tage - besser täglich - und während der betriebsfreien Zeiten eine elektrische Ladeinfrastruktur mit 80 KW pro Maschine. Die wenigen Produkte auf dem Markt waren zu wenig leistungsfähig, den Umweltbedingungen im Bergbau nicht gewachsen und nicht auf eine Netzspannung von 500V, wie im Bergbau üblich, ausgelegt.

- III. Erst, wenn ein Prototyp eine gewisse Zeit erprobt wird, können genauere Aussagen punkto Produktivität, Rentabilität, aber auch Stärken und Schwächen gemacht werden. Die zur Verfügung stehenden Geldmittel reichten nicht aus für den Bau des Prototypen, vielmehr mussten die beteiligten Firmen, aber auch die Hochschulen einen gewissen Mehraufwand in Kauf nehmen, den der erste Kunde nicht bereit war, abzugelten.
- IV. Um einen Prototypen zu vermarkten, können die geringeren Betriebskosten, die geringeren Wartungskosten, der nun berechenbare Betriebsaufwand sowie die nachweisbaren (Mehr-)Leistungen ins Feld geführt werden. Die nicht amortisierten Kosten des Baus des Prototypen und die Kosten für die noch anstehenden Optimierungen für die weiteren Maschinen können nicht auf die Kleinserie überwältzt werden. Da es sich nach wie vor um geringe Stückzahlen für alle Komponenten handelt, wird es schwierig sein, die Kosten auf ein so tiefes Niveau zu senken, dass ein Nachbau (inkl. einige Optimierungen) in der Schweiz kostendeckend ausgestaltet werden kann.

Die im Laufe der Projektentwicklung anfallenden Fragestellungen, für die die Fachhochschulen in Zusammenarbeit mit den Ingenieuren und Fachpersonen der beteiligten Partner wichtige Antworten in Form von Lösungswegen vorgeschlagen bzw. bewertet, priorisiert und schlussendlich auf ihre Praxistauglichkeit beurteilt haben, betrafen meist mehrere Teilaspekte der ursprünglich definierten Forschungsmodul und darüber hinaus auch noch zusätzliche, ursprünglich noch nicht traktandierete Fragestellungen (Zulassungsprozedere, Werkhaftung, Alternativen zu beheizten Stahlmulden, Grid-Anbindung, Messmethodik im Gelände, Quellencode zum BMS usw.). Lösungsvorschläge entstanden im Rahmen eines iterativen Entwicklungsprozesses, vor allem seitens der Industriepartner, jedoch im stetigen Dialog mit den Fachhochschulen und ihren Exponenten.

## 3 Vorgehenskonzept – Anlagenbescrieb

Eine Maschine Komatsu HD 605–7, die bereits 10 Jahre mit einem Dieselaggregat gefahren war, sollte, zusätzlich zum ordentlichen Refit – Programm zu einer batterie-elektrisch betriebenen Maschine umgebaut werden.

### 3.1 Anforderungen der Bestellerin

Der Auftrag lautete dahingehend, einen als Serienmodell typengeprüftes 110 Tonnen – Muldenkipper für den Betrieb im Steinbruch “La Tschanner” zu elektrifizieren. Erwartet wurde zudem, dass das Fahrzeug kaum mit Strom nachgeladen werden musste. Vielmehr sollte die kinetische Energie der Talfahrten in auf dem Fahrzeug mitgeführten Batterien gespeichert werden und diese für die Berfahrten wiederverwendet werden. Die massgebende Grösse für die Wahl der Batterie-Chemie und die Dimensionierung der Batterie war die bei der Talfahrt maximal anfallende vom Motor via Wechselrichter in das Gleichstromsystem zurückgespiesene Energie.



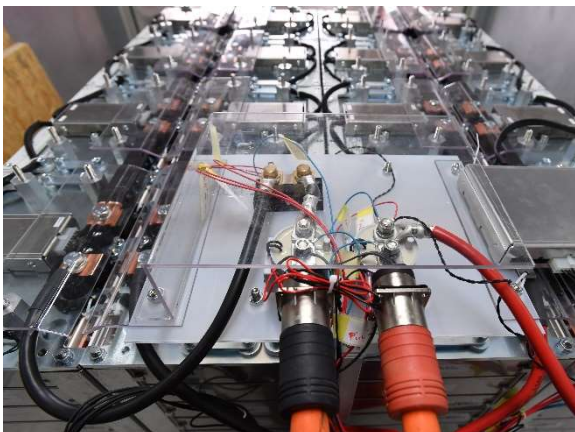
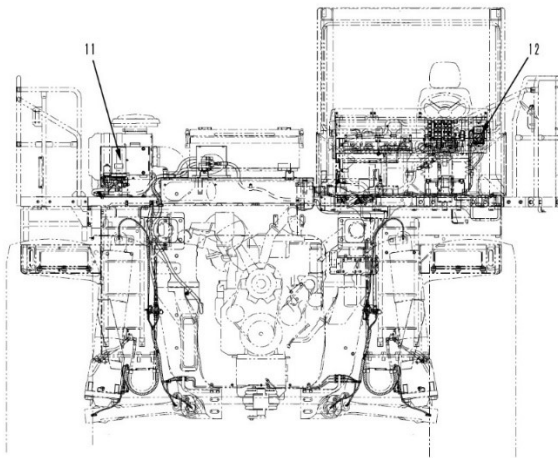
Dies hatte u.a. auch zur Folge, dass der vorgesehenen Ladestation, die gemäss den ursprünglichen Erwartungen vor allem Überschussenergie ins Stromnetz zurückspeisen sollte, keine besondere Beachtung geschenkt wurde. Die Ladestation sollte also vor allem die Batterie entladen und ausserdem, beim Einsatz auf einem anderen Geländeprofil, die Maschine auch nachladen können. Es war allen Beteiligten klar, dass für einen 110 Tonnen Dumper nicht einfach der Dieselmotor durch einen elektrischen Antrieb und anstelle des Dieseltanks eine Batterie montiert werden kann. Viele der technischen Rahmenbedingungen waren ausserdem vorgegeben, insbesondere der Fahrzeugtyp, das maximale Leergewicht, das Gesamtgewicht, die Antriebsachse über ein Differenzial, die Lamellen-Bremsanlage auf der Hinterachse, Länge, Breite und Höhe der Volumina, die für den Antriebsstrang und für die Batterien zur Verfügung standen. Zudem machte die Betreiberfirma Ciments Vigier einige Auflagen, wie z.B. Einstieg von vorne, Maximalhöhe der Maschine (Tunnelprofil der Zufahrtsstrasse), Steigfähigkeit, Geschwindigkeit, identische Lade- und Entladeeigenschaften wie die Dieselmotoren, Sommer- und Winterbetrieb, Sicherheit und Komfort für den Fahrer sowie die grüne Farbe, die sich vom Baumaschinen gelb unterscheiden sollte.

### **3.2 Übersicht der Hauptkomponenten und der Lieferantinnen**

Der Umbau wurde von Kuhn Schweiz AG, Heimberg (Hauptsitz) und Kuhn AG in Lommis, Kt. Thurgau, vorgenommen; die Revision der Hinterachse erfolgte in Heimberg, Kt. Bern. Die weiteren Lieferantinnen der speziell angefertigten Komponenten der neusten Generation:

- Synchron-Antriebsmotor: Oswald Motoren GmbH
- Getriebe: Puls Getriebe GmbH
- Zellen für die Batterien: Lithium Storage GmbH, Illnau beliefert von Westart Ltd. Shenzen
- Batteriebau und DC-Schrank: Schaltag AG
- Antriebswechselrichter und Hilfslader: Aradex AG
- Motor für die Hydropumpen: Brienzer Motoren AG
- Steuerungen: Komatsu, Murphy und Siemens
- Kabel: Huber und Suhner AG
- Stecker: Rauscher & Stöcklin AG
- Lademuße: Duratray Ltd. Australia
- Ladeinfrastruktur: Lithium Storage GmbH, Illnau beliefert von REFU GmbH, Deutschland

Der Zusammenbau aller Komponenten in das Chassis des Komatsu HD 605-7 erfolgte im Herbst 2017. Ein zusätzlicher 200-kW-Motor ist für den Antrieb der Hydropumpen für die Lamellen-Bremsanlage, den Kippantrieb und die Servounterstützung sowie die Vorspannung der Hilfsbremsanlage vorgesehen. Das gesamte 630-kWh-Batteriepaket (nominal 720 kWh), bestehend aus vier Blöcken, musste mittels 3-D Simulationen anstelle des Dieseltanks und vor dem Elektromotor ins Chassis hineingepasst werden.



*Bilder: Dieselmotor (o.l. und m.l.), Motorraum (o.r.), Elektromotor mit Getriebe (m.r.), Batterie auf dem Teststand (u.l. und Motor beim Einbau von unten (u.r.)*

Während der Entwicklungsphase wurden die geeignete Batterie-Chemie, der Antriebsstrang mit den spezifischen Drehmoment – Anforderungen, der Motor mit mehreren Segmenten, aber auch die kompakten Antriebwechselrichter und nicht zuletzt die in Kontinental-Europa noch nicht bekannte australische Gummi-Mulde evaluiert (die bis anhin jedoch in Norwegen eingesetzt wurde).



### 3.3 Die Suche nach dem idealen Stromspeicher

*Erforscht und entwickelt werden sollte die Speicherung kurzfristig anfallender elektrischer Energie in Batterien und deren Belastung bei der Nutzung, in der Anfahrtsphase der vollbeladenen E-Dumper, bei Zwischensteigungen und insbesondere im vollbeladenen Zustand bei Talfahrt. Nebst der Konstruktion geeigneter Batteriekonfigurationen sollte das Verhalten der Elektromotoren/-Generatoren im Bereich tiefster Drehzahlen, die Bereitstellung und Verteilung genügend hoher Ströme sowie ein diesen Bedingungen angepasster Antriebsstrang erforscht, konzipiert, und entwickelt werden. Der Motor aus einer Baureihe der Firma Oswald Motoren GmbH, eigentlich für sehr grosse Blechstanzenmaschinen konzipiert, musste von Grund auf entsprechend seines Einsatzgebiets konzipiert werden, was beträchtliche Entwicklungs- und Materialkosten zur Folge hatte.*

Nach den ersten Messungen der Fachhochschulen auf den Fahrtrassen mit einer baugleichen Dieselmotorschlepper Komatsu HD 605-7, stellte sich heraus, dass die höchsten Energieflüsse vor den Kurven bei den Talfahrten und beim bergwärts Anfahren in vollbeladenem Zustand entstehen, nämlich bis zu 1000 KW und bis zu 300 Nm. Zudem stellte sich bei diesen Messungen heraus, dass die elektrischen Komponenten die gesamte bei den Talfahrten anfallende Energie praktisch verlustfrei dem Antrieb auf der Hinterachse zur Verfügung stellen müssten, damit für den Normalbetrieb nicht nachgeladen werden müsste.

Dazu standen drei Typen Lithium-Zellen zur Auswahl: LTO, NCM (NMC) oder LFP. Die LTO sind etwas schwerer, haben eine geringere Zellspannung und kosten auch mehr, können jedoch deutlich höhere Ströme bewältigen. Näher untersucht und im Labor einem Härtetest ausgesetzt wurden je drei Zellen der Chemie NCM (oder NMC) und LFP. Es resultierten Vorteile zu Gunsten der Westart NCM 125 Ah. Der höhere Preis liess sich auch rechtfertigen, da die Zellen über einen Metall-Mantel verfügen, was eine etwas einfachere Kühlung und Beheizung erlauben würde. Von der Qualitätzelle, aufgebaut aus 5 Pouches à 25 Ah bei 3.8 V wurde auch eine etwas höhere Lebensdauer erwartet.

Um die gemessenen Energieflüsse zu bewältigen, dabei den maximalen C-Faktor (je nach Batteriechemie 1,3 bis 6) nicht zu überschreiten, als auch um die im Normalbetrieb benötigte Energiemenge aus den Batterien zur Verfügung zu haben, mussten für NCM - Batterien 600 KWh vorgesehen werden.

### 3.4 Originale, modifizierte und neue Bauteile

#### 3.4.1.1. Chassis

- Das Chassis wird integral übernommen, die Aufhängungen für die Batterien belasten den Chassisrahmen zusätzlich; im Bereich Antrieb (Motor und Getriebe) werden mit dem Dieselantrieb vergleichbare Torsionkräfte erwartet.
- Das statische Leergewicht wird weiter nach vorne verschoben (Motor in der Mitte etwas leichter, Batterien mit hohem Gewicht weiter vorne).
- Die Kippvorrichtung wird integral übernommen, deren Antrieb via Hilfs - Elektromotor und neuer Hydraulikpumpe gespiesen.

#### 3.4.1.2. Antriebsstrang

- Die Hinterachse mit Lamellenbremsen, Planetengetrieben, Differenzial, inkl. Kardanwelle wird integral übernommen.
- Der Dieselmotor wird durch einen Elektromotor mit kleinerem Gewicht ersetzt; die Bremsleistung mittels Rekuperation wird erhöht.



- Das 6-Gang-Getriebe wird durch ein 2-Gang Planetengetriebe 1:2.3 ersetzt; ein Gangwechsel im Fahren unter Vollast ist erwünscht, jedoch derzeit noch nicht möglich.

#### **3.4.1.3. Bremsanlage**

- Die Bremsanlage (Lamellenbremse mit Ölkreislauf und Rückkühlung in einem luftgekühlten System) wird integral übernommen.
- Mit Öldruck entspannte Federn lösen die Lamellenpakete (wie bisher); für diese zusätzliche Bremsvorrichtung steht dem Fahrer ein zweites Bremspedal zur Verfügung.
- Der Öldruck und der Kühlkreislauf wird durch einen 120KW Hilfsmotor angetrieben.
- Neu ist die Bremsleistung im Fahrbetrieb mittels Rekuperation der Energie über den Motor als Generator und laden der Batterien via Aradex-Inverter beträchtlich höher als im Betrieb mit Dieselmotor; Phase 1 dieses Bremsvorgangs wird mittels loslassen des Leistungspedals ausgelöst.

#### **3.4.1.4. Kühlanlage**

- Die Kühlanlage für den Dieselmotor (Glycol/Wasser über Luftkühler) fällt weg.
- Die Kühlanlage für Turbolader und Ölschmiersystem des Motors fallen weg.
- Die Ölkühler für den hydraulischen Antrieb der Kippvorrichtung, Bremsunterstützung und Lenkung bleibt.
- Der Rückkühler des Kühlkreislaufs der Lamellenbremsen bleibt erhalten.
- Neu müssen Elektromotor, Getriebe, Wechselrichter und ev. Batterien gekühlt werden.
- Die Kühlanlage wird mit neuen Pumpengruppen von vorne Mitte nach oben rechts auf dem Fahrzeug montiert.
- Das Fahrzeug wird vorbereitet und die allfällige überschüssige Abwärme der Batterie - Luftkühlanlage mittels Glycol/Wasser rückzuführen, allenfalls zu beheizen.

#### **3.4.1.5. Energiespeicher**

- Der Dieseltank fällt weg.
- neu werden 4 Batterien montiert, zwei auf tiefer Ebene im Zentrum, eine darüberliegend und eine seitwärts rechts.
- Die Batterien werden bei Bedarf beheizt oder gekühlt.
- Die Batterien sind mit Wärmesensoren ausgerüstet.

#### **3.4.1.6. Fahrzeug – Elektrik**

- Die 24V - Batterien werden ersetzt
- Die 24V – Batterien werden über zwei DC-DC-Wandler (630 auf 28V) geladen
- Die 24V – Anlage wird integral übernommen
- Die 24V – Anlage speist den Hilfskompressor für die Bremsanlage
- Der 24V dient zusätzlich für die Relais – Steuerung beim Ladeprozess



### 3.4.1.7. Die neue Mulde

- Die Stahlmulde wird durch eine Stahl/Nylon/Gummimulde ersetzt.
- Die Gummimulde hat eine Stahl-Aufbordung vorne, die auch als Überrollschutz funktioniert.
- Die Ladekapazität bleibt gleich (65 Tonnen), kann aber auch höher sein.
- Die Heizung der Mulde (via Abgasstrom) fällt weg.





#### 3.4.1.8. Steuerung

- Der elektrische Antrieb/Energiefluss wird mit einer Murphy - Steuerung geregelt.
- zur Auswertung von Sensorsignalen, Anzeigen für den Fahrer sowie Steuerung der Fahrzustände wird eine zusätzliche SPS installiert.
- ABS und ASR werden übernommen und (später) mit der elektrischen Energieflussregelung verknüpft.

#### 3.4.1.9. Laden

- Das Fahrzeug muss nicht betankt werden, die Abgasanlage nicht mehr gewartet werden.
- stattdessen werden die Batterien bei Talfahrt mittels Rekuperation geladen.
- die Batterien können mit Landstrom über ein DC-Ladekabel geladen werden (max. 100kW).
- die Batterien können den Überschussstrom über dasselbe Kabel ins Netz einspeisen.

#### 3.4.1.10. Interfaces zum Fahrer

- Murphy inkl. zusätzliche Anzeige, zudem übergeordnete SPS
- Rückfahrkamera; zusätzliche seitliche Kamera (wegen eingeschränkter Sicht nach r/h)
- Seitliche Abstands-Messung /-Anzeigen
- Automatische Kommunikation Fahrer - Fahrzeug – Grid
- Die Daten von Ladeanzeige und Waage werden mit dem Energiemanagement verknüpft.





### 3.5 Grid-Anbindung

- Neue Anlage, bidirektional konzipiert für 2 E-Dumper inkl. Drosseln und Kompensation
- Die zu erwartende Leistung von 100kW wird mittels Wechselrichter 600VDC – an das 230/400VAC – Netz abgegeben. Drei Möglichkeiten wurden geprüft (A: DC – Leitung bis zum Mittelspannungstrafo, B: 400VAC – Leitung bis um Tunnelausgang, wo sich ein 15 kV AC – 400VAC Trafo hoher Leistung befindet und C: 600VDC bis Wechselrichter, 400VAC / 500VAC – Trafo auf der Höhe des E-Dumper – Standplatzes; Einspeisung ins 500VAC – Netz, bestehend). Lösung C wurde realisiert, hat sich aber eher nicht bewährt.
- Das Kabel E-Dumper – Grid führt Plus und Minuspol sowie N, zudem zwei Pilotkontakte, die bei Trennung des 100A Steckers die gesamte Verbindung stromlos schalten.
- Ende Oktober 2020 wurde die Ladeinfrastruktur komplett umgebaut. Die Refudrive 100 wurden durch noch leistungsfähigere bidirektionale Aradex Inverter ersetzt. Seither können die Batterien sowohl kontrolliert gezykelt werden, als auch täglich geladen werden.



*Im Vordergrund:  
Komatsu HD  
605-7 mit  
konventionellem  
Dieselantrieb,  
grüner E-Dumper  
gleicher Grösse  
nach der Ankunft  
bei der  
Brecheranlage im  
Steinbruch «La  
Tscherner» noch  
ohne Aufbordung  
der Stahl- /  
Nylon- /  
Gummimulde*

Bis auf die Farbe und die australische Gummimulde sieht der E-Dumper, von der Belegschaft auf den Namen «Lynx» (dt. Luchs) getauft, denn auch beinahe gleich aus. Er ist jedoch der Diesel-Version nicht nur ebenbürtig, sondern sogar überlegen, sobald die Ladeinfrastruktur optimiert wurde.

## 4 Methodik, Arbeitsschritte

Alle am Projekt beteiligten Partner inkl. die drei Fachhochschulen und die EMPA besprachen das Vorgehen im Team. Die wesentlichsten Herausforderungen wurden parallel angegangen und die Forschungs- und Entwicklungsaufträge jeweils dem Projektfortschritt angepasst.

**Die Arbeitsphasen (I bis VII) und Arbeitsschritte 1 - 24**



## I. Vorbereitung, Planung (06.07.2015 – 30.05.2016)

1. Messen der zu erwartenden Drehmomente auf dem Antriebsstrang auf einer typengleichen Diesel-Maschine (Tscharner)
2. Wahl der Chemie einer geeigneten Speicherzelle (Biel-Bienne)
3. Dimensionierung und Architektur der Batterie(n)



*Planung in Heimberg*



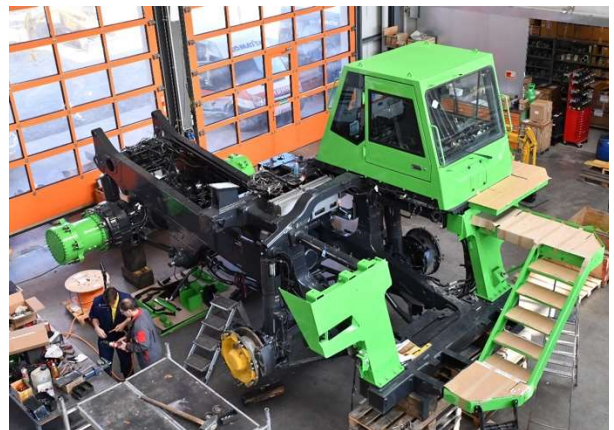
*Fachhochschulvertreter in Lommis*

## II. Konstruktion (01.09.2016 – 30.11.2017)

4. Evaluation eines Motors mit den maximalen Aussenmassen, Drehzahlumfang und Anfahrtdrehmoment; Entscheid zur Entwicklung eines Planetengetriebes
5. Steuerung, Anzeigen, BMS und Programmierung
6. Ersatz für die Beheizung der Stahlmulde
7. Inverter und DC-Verteilung
8. Anforderungen an die Aufhängung der Batterien
9. Thermische Stabilisierung der Batterien
10. Sicherheitstests mit den Zellen
11. Unterbringung der Kühl- und Rückkühlanlagen



*Einbau Synchron-Motor von Oswald*



*Werkhalle in Lommis*



### III. Refit: Umbau, Revision (01.09.2016 - 30.11.2017)

- 12. Zerlegen der 10-jährigen Maschine (Lommis)
- 13. Revision Chassis, Kabine, Vorderachse, Hydraulik (Lommis)
- 14. Revision Hinterachse (Heimberg)

### IV. Zusammenbau, 1. Testphase, Transport (30.11.2017 – 31.01.2018)

- 15. Einbau der elektrischen Komponenten (Lommis)
- 16. Neue Lackierung, neue Bereifung (Lommis)
- 17. Fahrttests ohne Mulde (Lommis)
- 18. Transport nach Péry – La Heutte; Aufbau Gummimulde



*Transport über die A1/A5/A6 auf Tieflader*



*Maximale Ausnutzung des Tunnelprofils*

### V. Inbetriebnahme (30.11.2017 – 28.02.2018)

- 19. Fahrttests im Gelände mit Mulde mit Hilfslader
- 20. Fahrttests im Steinbruch mit Batterietests und 100 KW Ladeinfrastruktur



*Aufsetzen der Krone auf die Gummimulde*



*Erste Fahrten in der Zementfabrik*



## **VI. 2. Testphase, Optimierung, Konzeption Nr. 2 (01.03.2018 – 30.11.2019)**

- 21. Risikoanalyse, Abnahme
- 22. Optimierung im Hinblick auf einen Energie PLUS – Betrieb

## **VII. Bewährung im Bergbau, 3. Testphase und Nachbesserungen**

- 23. Nachbesserungen Ladeinfrastruktur, DC-DC, Getriebe, Heizung
- 24. Evaluation alternativer Komponenten im Hinblick auf eine Kostenoptimierung



### **4.1 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten**

Die Forschungs- und Entwicklungsbereiche im Zusammenhang mit dem Projekt wurden dem Bundesamt für Energie als Forschungsmodule C. 1 – 10 vorgeschlagen und werden gemäss nachfolgender Tabelle in den Anhängen 1 bis 14 dokumentiert.





<b>C</b>	<b>Forschungsmodul</b>	<b>Anh.</b>	<b>Dokumentation</b>	<b>Autoren</b>
C1	Energieflussmodellierung	A1	Energieflussmodellierung	BFH Christian Follin, Andreas Meier
C2	Fahrzeugtest und Homologation	-	Abnahmeprotokoll E-Dumper Nr. 1 (nicht öffentlich)	Vigier, Kuhn Konrad Zaugg, Lukas Blaser
C3	Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem	A2	Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem	NTB EMS Max Stöck, Roger Strässle, Rouven Christen, Alfred Gadola
		A8	Batterieträger E Dumper NTB	NTB EMS Max Stöck, Mathias Schön
		A11	Druckentlastung Batteriegehäuse	EMPA Marcel Held
C4	Bestimmen der elektrischen Anforderungen an die Batterie	A12	Energieanalyse E-Dumper	BFH Thomas Baumgartner
C5	Mechanische, elektrische und thermische Charakterisierung geeigneter Batterietechnologien unter Berücksichtigung von Alterungseffekten	A3	Batterieuntersuchungen Charakterisierung	BFH CSEM Alejandro Santis
C6	Entwickeln eines Lebensdauermodelles	A4	Batterieuntersuchungen, Profilltests und Lebensdauerabschätzung	BFH CSEM Alejandro Santis
		A13	Batterie Kapazitätsmessungen	eMining Lukas Blaser
		A14	Batterie Lifetime Westart NCM 125/150 Ah	Westart
C7	Sicherheits- und Risikoanalyse	A9	Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung	EMPA Marcel Held
		A10	Brandversuche Westart Zellen	EMPA Marcel Held, Daniel Aeppli
C8	Begleitung Engineering Batteriesystem	A6	Thermische Vermessung Batterie E-Dumper	NTB EMS Gerhard Rizzo Max Stöck, Rouven Christen, Alfred Gadola



		A7	Simulation der Luftkühlung	NTB Rouven Christen, Gerhard Rizzo
		A11	Druckentlastung Batteriegehäuse	EMPA Marcel Held
C9	Test von Modulen und des Gesamtsystems	A5	Mechanische Spezifikationen E Dumper	NTB EMS Max Stöck, Roger Strässle, Rouven Christen, Alfred Gadola
C10	Projektkoordination, Kommunikation	-	Protokolle, Zwischenberichte, Schlussbericht und Abrechnung	
		-	Medienmitteilungen	
			Preisverleihungen	

## 4.2 Energiebilanz; Messungen auf einer typengleichen Maschine <sup>2</sup>

Zusammen mit der Berner Fachhochschule und der Fachhochschule der Nordwestschweiz wurden die spezifischen Maschinendaten anhand einer baugleichen Dieselmachine empirisch ermittelt, indem die Kardanwelle mit Dehnmess-Sensoren versehen wurde, diese auf einem deutschen Prüfstand kalibriert wurde. Nach unserem Wissen gibt es anderswo keinen vergleichbaren Prüfstand. Anschliessend fanden in der Grube Dutzende von Messfahrten statt. Anhand von parallel erstellten Videoaufnahmen und der synchron aufgezeichneten geodätischen Daten wurden die gemessenen Werte dann in Drehzahl und Drehmoment-Werte umgerechnet. Erst mit dieser – im übrigen erstaunlich hohen Werten konnte ein geeigneter Motorenlieferant gesucht und mit Oswald GmbH auch gefunden werden. Es wurde für einen Synchronmotor mit vier Segmenten entschieden, der von vier Wechselrichtern der Fa. Aradex gespeist wird. Diese müssen in der Lage sein, auch den Energierückfluss in die Batterien zu bewältigen. Gemäss den Messergebnissen generiert der vollbeladene E-Dumper bei seiner Talfahrt bis über ein Megawatt rekuperierbare Energie, was theoretisch eine noch Batterie mit bis 1 MWh Kapazität erfordern würde, um grössere Temperaturschwankungen und damit eine beschleunigte Alterung der Zellen zu vermeiden.

In der Praxis wird die maximale Leistung begrenzt und die beim Bremsvorgang ein Teil der überschüssigen Energie mittels der konventionellen Lamellen-Bremsanlage vernichtet werden müssen oder die Fahrweise entsprechend angepasst werden.

Nach dieser Mess-Serie wurde vermutet, dass die rein rechnerische positive Energiebilanz, nämlich

Ohne Nebenverbraucher: Bergfahrt leer: 38.7 KWh, Talfahrt beladen: 41.2 KWh = PLUS 2.5 KWh

Mit Nebenverbrauchern: Bergfahrt 50.1 KWh, Talfahrt beladen: 41.2 KWh = minus 19.5 KWh

Unter Berücksichtigung der Energieverluste beim Rekuperationsvorgang und der Wiederverwendung der in den Batterien der gespeicherten Energie noch rund 50 % höher ausfallen würde. Die rund minus 30 KWh haben sich im praktischen Betrieb schlussendlich bewahrheitet.

<sup>2</sup> Ergebnisse Kapitel 4.2.4 Anhang 1



### 4.3 Wahl der Chemie einer geeigneten Speicherzelle <sup>3</sup>

Um die hohen Energiemengen bei Talfahrt zu rekuperieren, müssten entweder LTO-Batterien oder eine genügend grosse LFP – oder NMC – Batterie eingesetzt werden, um C=1,3 (C=1 rekuperierter Strom entspricht der nominalen Batteriekapazität) nicht zu überschreiten.

#### Grobe Bewertung verschiedener Lithium-Ionen-Zellen bezüglich Energiefluss, Energiedichte, Leistungsdichte, Stabilität, und Kosten

Chemie	Typ	C-Faktor	Gewicht	Leistung	Kontakte	Sicherheit	Kosten
$LiFePO_4$	LFP	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Green	Green
$LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$	NMC	Green	Green	Green	Green	Green	Green
$Li_4Ti_5O_{12}$	LTO	Green	Yellow	Green	Green	Green	Red
$LiCoO_2$	LCO	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red
$LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$	NCA	Green	Green	Green	Yellow	Red	Yellow
$LiMn_2O_4$	LMO	Green	Red	Green	Red	Green	Green

Wegen der höheren Zellspannung und des geringeren Gewichts wurden in einem aufwändigen Verfahren an der Berner Fachhochschule die am besten geeigneten (und auch kurzfristig verfügbaren) Zelltypen LFP und NMC der BFH untersucht und verglichen. LTO hätte punkto Langlebigkeit eventuell noch bessere Resultate ergeben, hatte aber drei Nachteile, nämlich niedrigere Zellspannung, höheres Gewicht sowie höhere Kosten pro Kilowattstunde.

<sup>3</sup> Ergebnisse Kapitel 5.2, 5.3, 5.7 und Bericht Anhang 3



#### 4.4 Dimensionierung und Architektur der Batterie(n) <sup>4</sup>

*Das Ziel war nicht unbedingt, einen Weltrekord aufzustellen, sondern ein Batteriesystem zu bauen, das die Ansprüche eines elektrifizierten Dumpers mit einem Gewicht von über 110 Tonnen, in rauher Umgebung und mit Steigungen bis zu 12 Prozent und mehr zu erfüllen vermag. Voraussetzung für die optimale Dimensionierung der Batterien, die Systemspannung, die Dimensionierung der Wechselrichter bis zum u.a. Kabelquerschnitt waren umfangreiche Vorarbeiten notwendig. Praktisch alle Forschungsuntersuchungen und Messungen, bzw. (aus Zeitgründen) Simulationen und auch Annahmen lieferten wesentliche Entscheidungsgrundlagen.*

*Um alle Auflagen der Maschinenbaurichtlinien zu erfüllen, wurde bereits in der Planungs- und Konzeptionsphase stets auch das Risikopotenzial abgeschätzt und bei absehbaren Risiken ab einer mittleren Eintretenswahrscheinlichkeit mit geeigneten Massnahmen reagiert.*

Für die Systemspannung und Batteriegrösse lieferten erste Berichte und Präsentationen zur Energieflussmodellierung (Ergebnisse Anhang 1 «Energieflussmodellierung»), für die elektrische und thermische Charakterisierung (Ergebnisse Anhang 4 «Batterietests Update inkl. Temperaturprofile; Phase II: Profiltests und Lebensdauerabschätzung»), die thermische Vermessung (Ergebnisse Anhang 3 «Batterieuntersuchungen, Update inkl. Temperaturprofile, Phase 1 Charakterisierungstests»), die Luftkühlung (Ergebnisse Anhang 7 «Simulation Luftkühlung Batterie E-Dumper), die mechanischen Anforderungen an Gehäuse und Aufhängung (Ergebnisse Anhang 2 «Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem» und 8 «Batterieträger E-Dumper»), die Sicherheit der Batterie (Ergebnisse Anhänge 9 «Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung des Batteriesystems e-dumper» und 11 «Druckentlastung Batteriegehäuse») wichtige Basisdaten.

*Die Grenzen in Bezug auf Gewicht und maximalen Dimensionen waren vom Fahrzeugtyp vorgegeben. Die Minimalanforderungen waren massgeblich bestimmt von den zu erwartenden Rekuperationsströmen bei voller Beladung und maximalem Gefälle sowie vor Kurven und Engpässen (von bis über 1 MW).*

*Aufgrund der Empfehlungen der FH Bern, der FH der Nordwestschweiz, der EMPA und weiteren empirischen Vorarbeiten bei Kuhn, Lithium Storage und der Schaltag wurde entschieden für ein Hochvolt - Batteriesystem mit 630 Volt DC und 4 parallel geschalteten Batterieblöcken mit je 180 kWh und 125 Ah Zellen mit NMC – Chemie der chinesischen Fa. Westart. In jeder Batterie sind 384 Zellen verbaut (2P12S x 16). Die Zellen wurden zudem im Anschluss von der EMPA auf ihre Robustheit und Sicherheit getestet (Anhang 10 «Brandversuche Westart Zellen»), was wiederum die Architektur (Zellanordnung) sowie die Anforderungen punkto Aufhängung, Dämpfung und Temperaturstabilisation beeinflusste (Anhänge 5 «Mechanische Spezifikationen» und 6 «Thermische Vermessung Batterie E-Dumper»).*

*Zwei der vier identischen Batterien wurden zwischen den Fahrzeug-Längsstreben anstelle des Dieselmotors, eine darüber liegend und eine seitlich angehängt, anstelle des Dieseltanks angeordnet.*

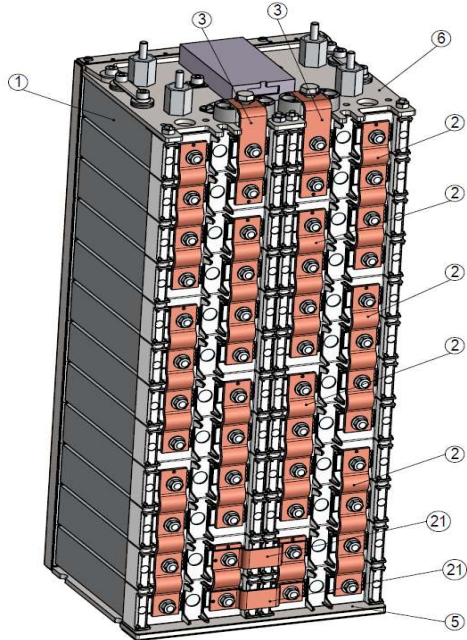
*Mit dieser Anordnung musste das gesamte Kühlsystem für die Lamellenbremsanlage und die Fahrzeughydraulik verlegt werden. Freier Raum stand dazu in Fahrrichtung rechts gegenüber der Fahrerkabine zur Verfügung.*

---

<sup>4</sup> Ergebnisse Kapitel 5.3, 5.4, 5.5, 5.8 und Bericht Anhänge 1 - 14



Eine Luft / Wasser Beheizung und Kühlung der Batterien mit je 2x4 Lüftern wurde vorbereitet und 2019 auch realisiert sowie nachträglich verstärkt.



POS	BENENNUNG	Menge
1	WeStart-125AH-cell-Assembly	24
2	Conductor-S-4-53(55)	10
3	Conductor-L-2-53(55)	2
4	Lifting-Lug	2
5	Welding-Battery-Casing-Bottom	1
6	Welding-Battery-Casing-Top	1
7	Spacer-02a	1
8	Gewindestange-M8x683	4
9	Nut-M08 (48 stainless, 4 normal)	4
10	Washer_M08x24x2	16
11	Socket-Head-Screw-M8x16	6
12	Stiftschraube-M8x10	5
13	Assembl-Isolator-Block-07c	2
14	Kabelbride	2
15	Socket-Head-Screw-M8x10	6
16	Spring-Washer_M10x20x1.6-BN20192	2
17	Hex-Screw-M10x20	2
18	Battery-Casing-26a	1
19	Washer_M08x16x1.6	2
20	Conductor-S-2-53(55)	2
21	Conductor-H-2-73	2
22	Isx_b04_340_slave_klein	1
23	Gewindestift-M8x60	4
24	Abstandshülse-02a	4
25	M8 auf M4 Mutter	2
26	Lens-Screw-M4x10-Torx	2

Battery Stack Dumper 02

64 pcs 16.08.2017  
Lithium Storage GmbH

M 1:4

Anordnung der Westart NCM 125 Ah – Zellen in 16 Stacks 2P12S



Zusammenbau der 1'536 Zellen zu 4 Batterien bei der Schtagg AG



## 4.5 Evaluation eines Elektromotors <sup>5</sup>

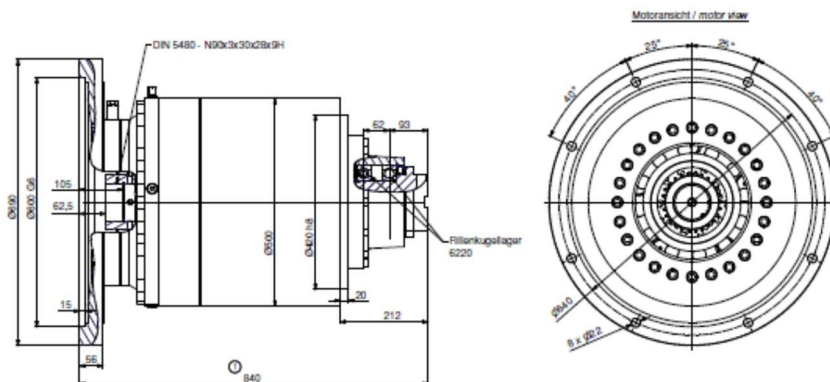
### mit den maximalen Aussenmassen, Drehzahlumfang und Anfahrtdrehmoment; Entscheid zur Entwicklung eines Planetengetriebes

Um sowohl Steigungen von 15 Prozent im Gelände als auch Fahrten von 40 Km/h auf den Pisten zu allen Jahreszeiten zu ermöglichen, entwickelte die deutsche Firma Puls Getriebe GmbH ein zweistufiges Planetengetriebe.

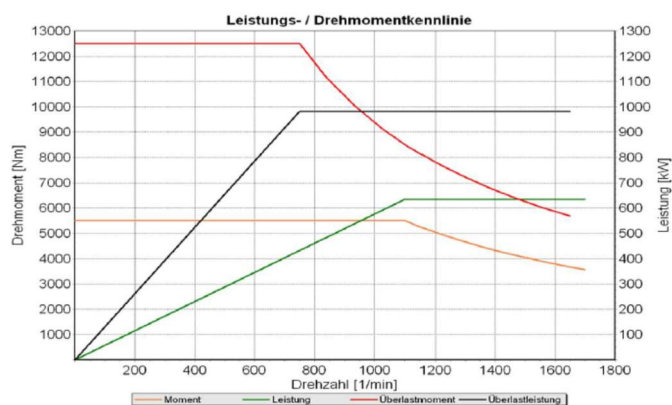
Zwei Herausforderungen musste die designierte Lieferantin des Antriebsmotors meistern:

- Die relativ geringen Einbaugegebenheiten, die ohne Befestigungsflanschen mit einem Durchmesser horizontal gemessen, zwischen den Holmen von maximal 85 cm.
- Das grosse Anfahrtdrehmoment auf der Antriebsachse unter Einbezug eines Schaltgetriebes von 1:3.55 von bis zu 10 KNm; letzterer kurzzeitig im Überlastbereich. Hierbei gilt es vor allem, eine Entmagnetisierung zu vermeiden, d.h. in der Praxis, die Räder in Bewegung zu bringen.

Oswald Motoren GmbH konstruiert eine Spezialversion auf der Basis einer bereits bestehenden Synchron-Motoren-Generation und verstärkt diese indem mehrere Segmente in ein Gehäuse verbaut werden und zudem Magnete höherer Koerzivität eingesetzt werden.

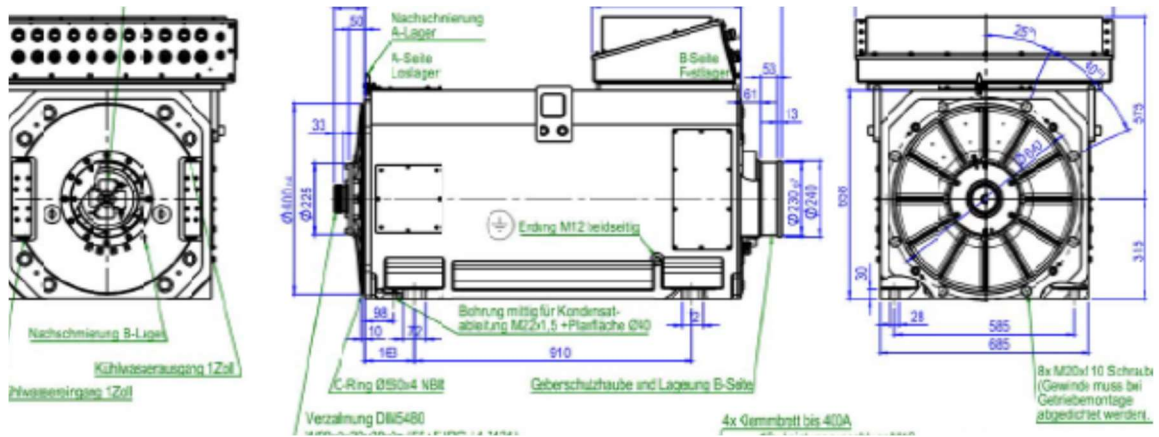


Puls-Planetengetriebe 1:1 oder 1:3.44; Seitenansicht und Kupplungsring gegenüber Motor

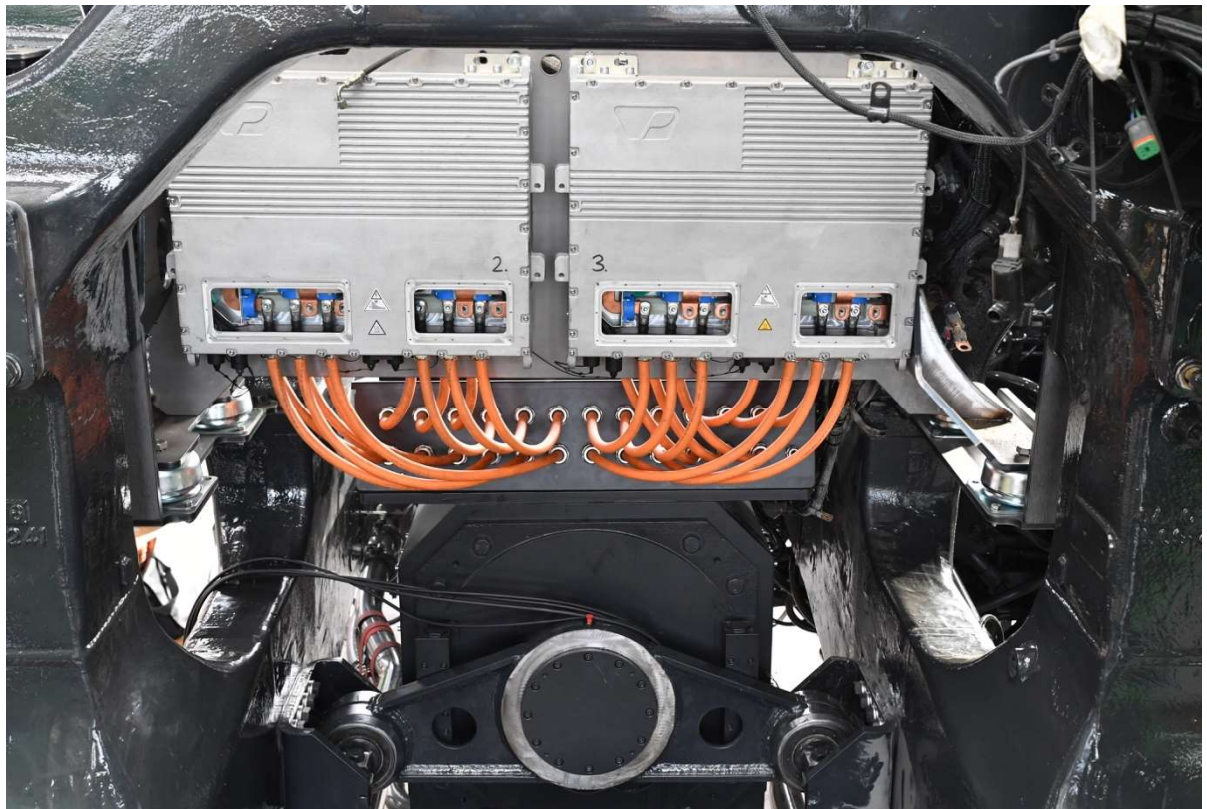


Leistungs- und Drehmomentverlauf Oswald Motor

<sup>5</sup> Ergebnisse Kapitel 5.2, 5.10, 5.17



Dimensionen Oswald Motor



Einbau Oswald Motor mit max. 1'200 KW Leistung, angesteuert von 4 Aradex Invertern



## 4.6 Steuerung, Anzeigen, BMS und Programmierung

Im Vergleich mit traditionellen Pb Akkus brauchen Lithium Batterien ein Batterie-Management-System (BMS). Damit werden die Lade- und Entladevorgänge gesteuert und die einzelnen Zellen, bzw. Zellpaare überwacht und deren aktueller Zustand mit den Nachbarzellen verglichen und ausbalanciert.

Anhand der Sensoren auf den Zellpaaren (Temperatur, Spannung) und an den Plus und Minus-Polen der Batterien (v.a. Strom) wird eine Vielzahl von Daten an das zentrale Rechensystem geliefert.

Für den E-Dumper hat die Fa. Esoro ein spezielles Programm entwickelt.

Name	Wert	Einheit	Balken
bat_on_command	1		
bat_is_on	1		
current_act	3.10	A	
voltage_act	772.00	V	
state_of_charge	100	%	
inst_Temperature_avg	15.00	°C	
inst_Temperature_max	16.50	°C	
inst_Temperature_min	13.50	°C	
balancing_active	1		
dc_link_voltage_minus	2.30	V	
dc_link_voltage_plus	771.70	V	
error_present	0		
warning_present	0		
average_cell_voltage	4038.00		
highest_cell_ID	7		
highest_cell_voltage	4050.00		
lowest_cell_ID	153		
lowest_cell_voltage	4032.00		
current_limit_charge	350.00	A	
current_limit_discharge	750.00	A	
voltage_limit_max	770.00	V	
voltage_limit_min	595.20	V	
full_charged	0		
BMS_ID	1		
state	10		
AP_cmd_DO_B1_Lue...	3	%	
AP_cmd_digOut_B2	--		
PassedCharge	-6900	mAh	
TimeToEmpty	65535	min	
TimeToFull	0	min	

Name	Wert	Einheit	Bar
BMC_Status	--		
CCU_total	140.00	A	
DCU_total	300.00	A	
SOC_initial	0	%	
Bat_cooling_request	0		
Bat_heat_request	0		
Ladestecker	1		
Refu_Opt_State	4		
Refu_Strom	-11.80		



Das BMS steuert eine gleichmässige Lastverteilung auf Batterien, Stacks und Zellen



## 4.7 Ersatz für die Beheizung der Stahlmulde

Auslöser zur Entscheidung war die Suche nach einem Ersatz für die Muldenbeheizung durch den Abgasstrom des Diesellagers. Der Heizbedarf, um am Muldenboden Vereisungen und Verklumpungen zu vermeiden, wurde auf 200 KW geschätzt. Diese Leistung in Form von Leistungsverlusten wegen des im Vergleich schlechten Wirkungsgrades von Verbrennungsmotoren, stand mit dem Elektroantrieb nicht mehr zur Verfügung. Geprüft wurden Rüttelglieder mit Excentern, Widerstandsheizungen, Pelletierelemente und Beheizung am Entladepunkt.

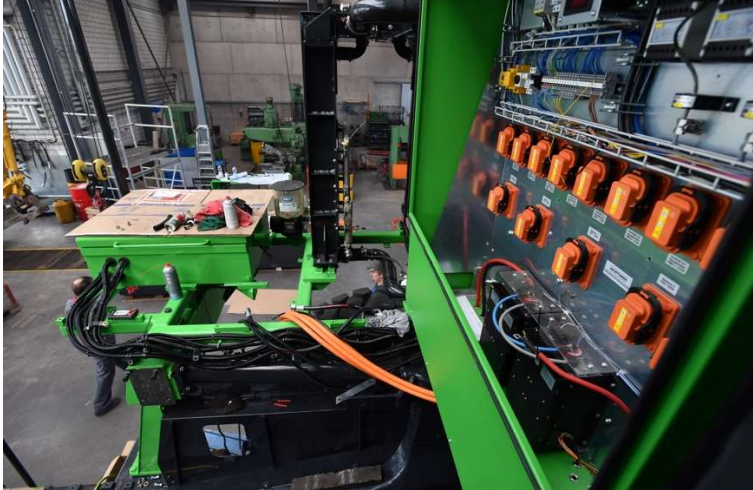
Die ideale Lösung bot sich mit der australischen Duratray aa«Gummimulde» an, die die Verklumpungen wegen des flexiblen Bodens aus Kautschuk vermeiden lässt und zudem noch weitere Vorteile bietet, wie Dämpfung der vertikalen Schläge auf das Fahrzeug, etwas geringeres Gewicht und etwas höhere Beladung. Die unvermeidbare Kehrseite ist die Preis und war bei diesem Projekt die lange Lieferfrist von 6 Monaten ab Bestellung (und Bezahlung). Die Mulde wurde zeitgleich mit dem elektrifizierten Fahrzeug nach Péry geliefert und dort zusammengebaut. Die Krone (zugleich der Abrollschutz in Fahrtrichtung) mit der Beschriftung über der Fahrerkabine konnte wegen des zu geringen Tunnelprofils erst im Steinbruch «La Tschärner» aufgesetzt werden.



*Die Stahl- Gummi- Nylonmulde in einem Stahlkorb macht eine Heizung mit Abgasen überflüssig*



## 4.8 Inverter und DC-Verteilung



630V – DC – Lastkabel von Batterie über DC-Box zu 2 der 4 Aradex Inverter

## 4.9 Anforderungen an die Aufhängung der Batterien <sup>6</sup>



Auflage von 2 Batterieblöcken im Chassis

Batterie Nr. 4 seitlich anstelle des Dieseltanks

Trotz der stolzen Masse des e-Dumpers, ist der Raum im Chassis beschränkt. Das Fahrzeug wurde rund 20 cm verlängert. Trotzdem fanden nur 2 Batterien ihren Platz, die 3. Wurde darüberliegend montiert und die vierte seitlich angehängt. Die Platte mit dem eMining – Logo dient als Aufprallschutz gegen abrollende Gesteinsbrocken.

## 4.10 Thermische Stabilisierung der Batterien <sup>7</sup>

In diesem Zusammenhang mussten weitere Knacknüsse bewältigt werden, wie z.B. Batterieheizung bei Stillstand im Winter oder Kühlung bei Talfahrt im Sommer, Klimatisierung der Fahrerkabine,

<sup>6</sup> Ergebnisse Kapitel 5.6, 5.10, 5.12, 5.13, 5.17 und Bericht Anhänge 2, 9

<sup>7</sup> Ergebnisse Kapitel 5.5, 5.8, 5.11, 5.12, 5.13, 5.17.5, 5.17.8.11 und Bericht Anhänge 2, 3, 7, 8



Rundumsicht für den Fahrer, Unterbringung (aufgrund der minimalen) Biegeradien der 630V DC-Leitungen.



*Vor dem Einbau sind die je 2x4 Hochleistungslüfter und die Wärmetauscher sichtbar*

#### **4.11 Sicherheitstests mit den Zellen<sup>8</sup>**

Vor dem Einbau werden die Zellen gezykelt. Um eine maximale Sicherheit zu gewährleisten, wurde untersucht, wie sich die Zellen bei einem Kurzschluss verhalten. Insbesondere interessiert, wie sich die Nachbarzellen einer defekten oder zerstörten Zelle verhalten.

Bei keinem der Versuche hat eine Kettenreaktion stattgefunden. Bei einem Kurzschluss entsteht jedoch eine Gaswolke und ein erheblicher Temperaturanstieg. Die Fahrer verfügen in der Kabine bei einem unwahrscheinlichen Ereignis eines Kurzschlusses über eine Atemschutzmaske und können die Kabine über die Fronttreppe verlassen.

#### **4.12 Unterbringung der Kühl- und Rückkühlanlage<sup>9</sup>**

Da die Batterien vor dem Elektromotor den gesamten zur Verfügung stehenden Platz einnehmen, musste die Kühleranlage in die erste Etage gezügelt werden und fand ihren Platz neu auf der gegenüberliegenden Seite der Fahrerkabine. Die gesamte Kühlleistung der Dieselmotoranlage wurde bei Prototypen beibehalten, um eine Talfahrt auch ohne Rekuperation zu ermöglichen.

---

<sup>8</sup> Ergebnisse Anhänge 3, 11, 12, 13

<sup>9</sup> Ergebnisse Kapitel 5.2, 5.13, 5.17.8 und Bericht Anhang 6



*Neue Kühleranlage mit voller Leistung auch beim elektrischen Betrieb*

#### **4.13 Zerlegen der 10-jährigen Maschine**

Bei den Arbeitsschritten 12 – 14 handelt es sich um das Refit-Programm für Komatsu – Dumper. Beim E-Dumper nicht weiter verwendet wurden:

- Der Dieselmotor (der zwischenzeitlich eine Wasserpumpe in Nordafrika antreibt)
- Das Getriebe
- Die Stahmulde
- Der Dieseltank

Die Gesamtrevision wurde (aus Platzgründen) in Lommis, Thurgau vorgenommen, während die Hinterachse und die 24V-Steuerung in Heimberg revidiert wurden.



#### 4.14 Revision Chassis, Kabine, Vorderachse, Hydraulik



*Die gesamte Fahrelektrik wurde komplett ausgebaut und mit einem Murphy-Controller und einer modernen SPS von Siemens ergänzt.*



*Die Maschine wird in Lommis in ihre Einzelteile zerlegt*



#### 4.15 Revision der Hinterachse



*Revision in Heimberg bei Thun*

#### 4.16 Einbau der elektrischen Komponenten



*Montage in aller Komponenten in Lommis*



#### 4.17 Neue Lackierung, neue Bereifung



*Lackiererei in Lommis*

#### 4.18 Fahrtests ohne Mulde



*Erste Ausfahrt in Lommis*



*Fahrttests ohne Mulde sind risikohaft, da die Maschine mit den Batterien stark kopflastig wird.*

#### **4.19 Zusammenbau, erste Testphase, Transport nach Péry – La Heutte**

Eine der grössten Herausforderungen war – nicht unerwartet – der Zeit- und Kostendruck, da die Maschine in Lommis (TG) zerlegt und weitgehend fertiggebaut ursprünglich im Spätherbst 2017 nach Péry – La Heutte hätte transportiert werden sollen.



Da die australische Gummimulde erst im Januar 2018 in Péry-La Heutte eintreffen würde, wurde der Transport auf Februar 2018 verschoben. Einschränkungen auf der sich im Bau befindlichen Nordumfahrung der A1 in Zürich wurden eingeplant, die A16 war ebenfalls eine Baustelle, zum ersten Mal stecken blieb der Sondertransport allerdings bereits in Wengi am zu klein dimensionierten und mit der Bahnlinie zusätzlich verengten Kreisell. Dann allerdings kam der Transport zügig um 4 Uhr morgens in Péry-La Heutte an und wurde anschliessend mit der bereitstehenden Gummimulde bestückt. Erst mit der aufgesetzten Mulde konnten Probefahrten unter realen Bedingungen durchgeführt werden.



## 4.20 Fahrtests im Gelände mit Mulde



Ohne Mulde, und mit Batterien im vorderen Bereich war die Maschine bisher zu kopflastig. Bremstest waren unter diesen Umständen nicht möglich. Vor der Werkhalle wurden dem E-Dumper nun die Stahl – Nylon – Gummimulde aufgesetzt, allerdings noch ohne die obere Aufbordung. Diese konnte erst nach der Passage des 2,3 Kilometer langen Erschliessungstunnels aufgesetzt und verschraubt werden, da das Tunnelprofil nicht ausgereicht hätte, um den E-Dumper in voller Höhe passieren zu lassen. Eindrücklich, wie erstmals auch die Batterieleistung nachgemessen und nachgewiesen werden konnte.

## 4.21 Fahrtests im Steinbruch mit Batterietests und 100 KW Ladeinfrastruktur

100KW werden mittels bidirektionalem Gleich- / Wechselrichter an das vorhandene Netz angeschlossen. Das 400V Netz ist jedoch nicht für diese Leistung ausgelegt. Ausserdem muss der Wechselrichter galvanisch getrennt angeschlossen werden, was sich nur mittels einem Trenntrafo bewerkstelligen lässt. Dieser dient zugleich, um die 400V Schnittstelle des Wechselrichters an das üblicherweise im Bergbau vorhandene 500V anzugleichen.

Vorab wurden drei Möglichkeiten evaluiert:

- Eine sehr lange DC – Leitung 630V bis zum Mittelspannungstrafo beim Tunnelportal (ca. 400m)
- Eine lange AC-Leitung DC – Leitung bis zum Mittelspannungstrafo (ca. 400m)
- 400VAC / 500VAC – Trafo auf der Höhe des E-Dumper – Standplatzes; Einspeisung ins bestehende 500VAC – Netz

Aus Kostengründen wurde die dritte Lösung realisiert, hat sich aber eher nicht bewährt, da das gewählte Produkt REFUdrive 100KW die rauen Umweltbedingungen im Tschanner nicht dauerhaft erträgt. Vorab wurde ein 30 KW Hilfslader auf der Basis eines ARADEX Wechselrichters installiert. Dieser dient derzeit als Ladegerät.

Das Kabel E-Dumper – Grid führt Plus und Minuspol sowie N, zudem zwei Pilotkontakte, die bei Trennung des 100A Steckers die gesamte Verbindung stromlos schaltet. Auch diese Lösung hat sich nur teilweise bewährt, da die W-LAN Verbindung sehr instabil ist.

Im Hinblick auf eine Nummer 2 oder gar 3 E-Dumper wird eine neue Lösung ausgearbeitet.



## 4.22 Risikoanalyse, Abnahme<sup>10</sup>

Beim elektrifizierten Komatsu HD 605-7 handelt es sich um ein zertifiziertes Serienfahrzeug; demnach muss nach einem Umbau nicht ein erneuter Zertifizierungsprozess durchgeführt werden. Vielmehr genügt es, dass dem Kunden, der das Fahrzeug, ein Prototyp, in einem der Öffentlichkeit nicht zugänglichen Gelände einsetzt, bewiesen wird, dass der Umbau nach den einschlägigen Ingenieur-Regeln erfolgt ist und alle relevanten Normen, wie Sicherheit, insbesondere beim Antrieb und Bremssystem sowie den neu installierten elektrischen Komponenten eingehalten werden.



*Beladen mit Kalkstein auf 980 m.ü.M.*

## 4.23 Optimierung im Hinblick auf einen Energie PLUS – Betrieb

Die theoretischen Berechnungen ergaben einen Energieüberschuss von +/- 20 KWh pro Fahrt. Die Messungen anhand des fertig gestellten Fahrzeugs ergaben ein Defizit von rund 30 KWh pro Fahrt. Dies hatte nach einer ersten Analyse verschiedene Ursachen:

- Die Fahrprofile entsprechen in der Praxis nicht dem theoretischen, vielmehr muss, je nach Zusammensetzung des Abbaumaterials bzw. dessen Lage im Steinbruch, auch eine kurze Gegensteigung im voll beladenen Zustand bewältigt werden.
- Der Untergrund entspricht nicht demjenigen, der den Berechnungen zugrunde lag; beim Betrieb mit Geländeketten wird beträchtlich mehr Energie benötigt und weniger zurückgewonnen
- Die Hilfsaggregate benötigen wesentlich mehr Batteriestrom, als angenommen

---

<sup>10</sup> Ergebnisse Kapitel 5.2, 5.15, 5.16, 5.20, 5.21, 5.22, 5.24 und Bericht Anhang 12



## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Bestimmen der Anforderungen an das elektrische System

- Datum: 31.01.2017 – 01.02.2017 und April 2017
- Studie: Berner Fachhochschule, Technik und Informatik
- Autoren: Christian Follin, Andreas Meier
- Anhang 1: **Energieflussmodellierung**

Alle Messungen wurden am selben Fahrzeug (Komatsu HD 605-7) mit auf den Hinterrädern montierten Schneeketten durchgeführt. Die Umgebungstemperatur lag dabei zwischen 6°C bis 12°C (Tauwetter) bei meist bedecktem Himmel und sporadischem Regen. Alle Fahrten fanden auf Naturstrassen statt, welche sich in einem nass-sumpfigen, teilweise vereisten Zustand befanden.

#### Bergfahrt

In einem ersten Schritt werden die Leistung sowie der Energiebedarf der Bergfahrten analysiert. Abb. 7 Kapitel 4.1.1 Dokumentation Arbeitspaket C1 «Energieflussmodellierung»; Anhang 1 zeigt exemplarisch das Drehmoment, die Fahrzeuggeschwindigkeit gemäss GPS-Empfänger sowie die berechnete Leistung aus Drehmoment und Kardanwellen Drehzahl, einer Fahrt am 01.02.2017 von 09h55 bis 10h06 Uhr.



Die Geschwindigkeit des unbeladenen Fahrzeuges während der Bergfahrt liegt bei 15 km/h bis 20 km/h. Der Energiebedarf für eine Route von der Entladestation/Steinbrecher (Punkt A) bis zu der Stelle (Punkt F) wo das Fahrzeug beladen wird, beträgt 36.4 kWh  $\pm$  0.8 kWh.

### **Talfahrt**

Gemessen wurden das Drehmoment, die Fahrzeuggeschwindigkeit gemäss GPS-Empfänger sowie die berechnete Leistung aus Drehmoment und Kardanwellen, die Drehzahl einer Talfahrt im vollbeladenen Zustand (67t gemäss dem Fahrer von Vigier) am 01.02.2017 von 10h09 bis 10h23 Uhr. Energiebedarf für eine Talfahrt (vom Punkt wo das Fahrzeug beladen wird bis hin zur Entladestation) beträgt im Mittel -21.2 kWh bei einer Standardabweichung von  $\pm$  2.4 kWh. Dieser Wert enthält nur die Energie, welche über die Kardanwelle mittels Motorbremse umgewandelt wird. Im Mittel wurde dabei bei aktiver Motorbremse mit -188 kW  $\pm$  75 kW gebremst.

### **Drehmomentverlauf während dem Anfahren am Hang und vollbeladenem Fahrzeug**

Die Messung erfolgte bei einem Anfahrvorgang am Berg mit 11° Steigung und vollbeladenem Fahrzeug. Diese Messung stellt aufgrund der Steigung und Beladung ein Extremereignis dar. Vor dem Anfahr-Ereignis (drehen der Räder) liegt eine Kraft von 5 kNm an der Kardan-Welle an. Während dem Anfahren steigt das Drehmoment mit 4.5 kNm/s, bis nach 4.1 s ( $\pm$ 0.1s) das maximale Drehmoment von 17.1 kNm erreicht ist.

3.8 s (+0, -0.5s) nach dem Anfahr-Ereignis wird die Grenze von 120 Umdrehungen pro Minute bei einem Drehmoment von 16.5 kNm überschritten. Oberhalb dieser Drehzahl liefert der vorgesehene Elektromotor gemäss Hersteller dauerhaft sein Nenndrehmoment. Die Drehzahländerung liegt dabei bei 1.36 1/s<sup>2</sup> pro Sekunde, was einer Beschleunigung des Fahrzeuges von 0.56 m/s<sup>2</sup> entspricht.

### **Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen:**

- Das elektrische System muss für die maximalen Energiebedarfswerte bei einer Anfahrt des E-Dumpers im voll beladenen Zustand (ca. 115 Tonnen) und in einer Steigung von u.U. über 12 Prozent im Betrieb mit Geländeketten und bei Umgebungstemperaturen von minus 20 bis plus 30 Grad Celsius ausgelegt werden. Das sind (hochgerechnete) 850 KW Leistung von vier parallel geschalteten Batterien auf vier parallel geschaltete Antriebswechselrichter plus DC – DC für das 24 V System.
- Dasselbe elektrische System muss bei Talfahrt im vollbeladenen Zustand bis zu 1 MW rekuperieren können, was bei nominal 630 KWh einem kurzzeitigen C-Faktor von 1.5 entspricht (Voraussetzung: die vier Batterien werden gleichmässig belastet und geladen).
- Bei einem Energie PLUS Betrieb und um die Batterien zu zykeln, muss die Ladestation mind. 30 KW DC (besser 100 KW) bei 600 - 650 V DC wechselrichten und ins Netz 400 V 3P einspeisen können.
- Beim Normalbetrieb mit 20 Fahrten à 20 – 30 KWh Bedarf müssen täglich 400 KWh innert 8 Stunden nachgeladen werden können; das bedingt 50 KW Ladestrom;
- Ideal wären 80 bis 100 KW, um bei Mehrschichtbetrieb und aus anderen Gründen mittags oder in Pausen die Batterien wieder für mind. 2 Stunden Betrieb nachladen zu können.
- Für den Betrieb mit 2 identischen (oder ähnlichen) E-Dumpfern sind insgesamt 120 bis 150 KW Lade- und Entladeleistung notwendig.



## 5.2 Energieflussmodellierung

Datum: April 2017

Ort der Studie: BFH Labor FEE Vauffelin / Steinbruch Tschärner

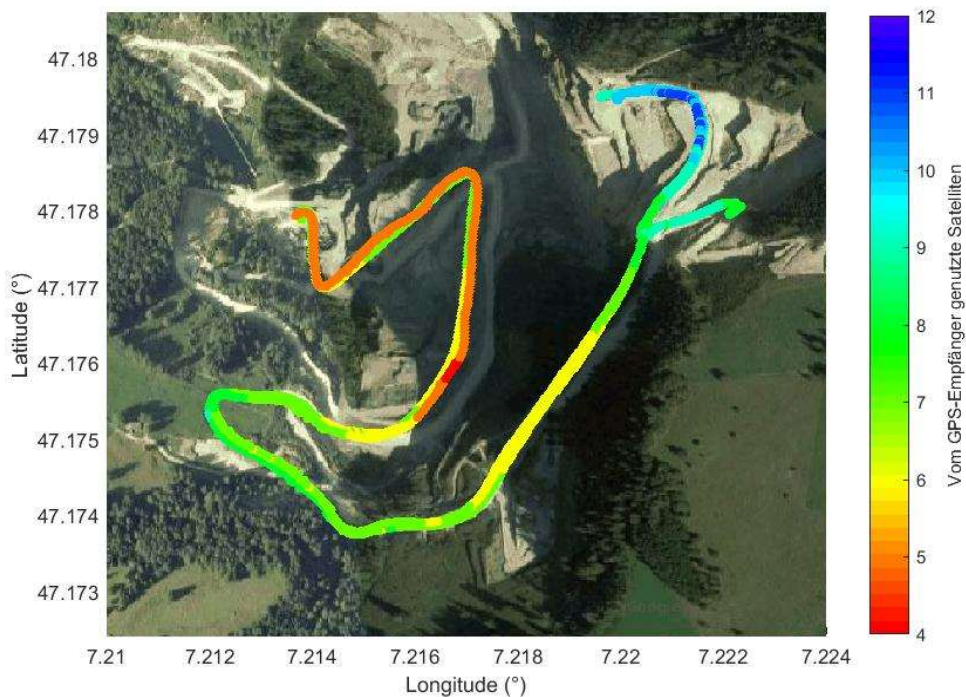
Autoren: Christian Follin, Andreas Meier

Bern University of Applied Sciences, Department Engineering and Information Technology (BFH-TI); Institute for Energy- and Mobility Research

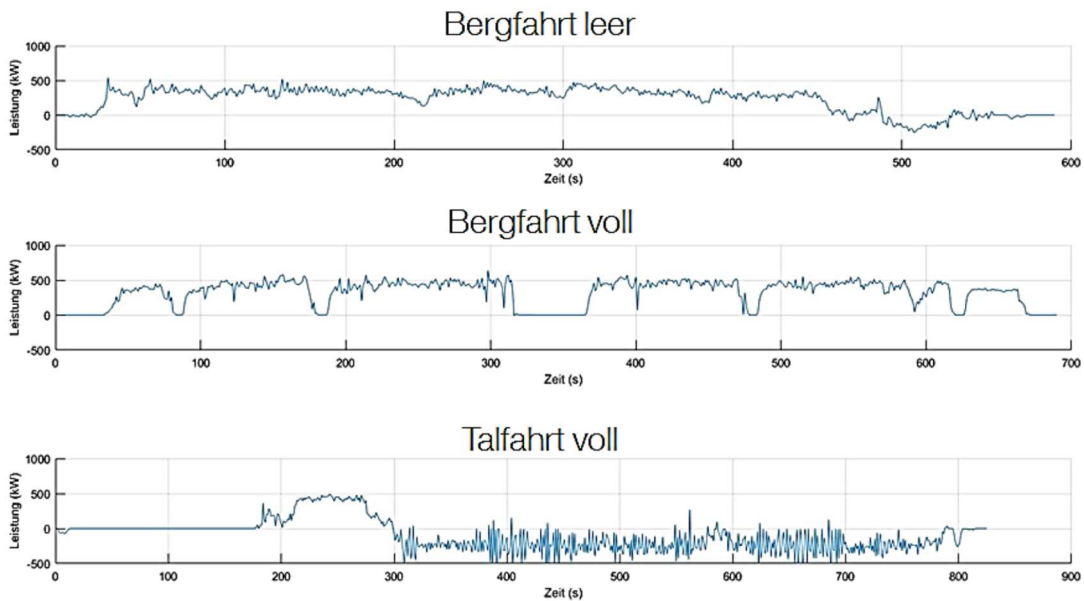
Anhang 1: Energieflussmodellierung

*Damit der neue Fahrtrieb, die Hilfsaggregate und die Batterie des E-Dumpers optimal für den Betrieb im Steinbruch Tschärner dimensioniert werden können, müssen die Energieflüsse und die Kennzahlen, sowie das Lastdispositiv des aktuellen Fahrzeugs erfasst und analysiert werden. Zudem kann mit diesen Daten, durch Aufsummierung der Leistung über die Zeit, bezogen auf ein Referenzprofil, die zukünftige Antriebsenergiebilanz der Berg- und Talfahrt abgeschätzt werden.*

Zu diesem Zweck wurde ein bestehendes, Diesel betriebenes Fahrzeug mit einer kalibrierten Drehmoment-, Drehzahlerfassung an der Antriebswelle, GPS zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung, Neigungsmesser und Raddrehzahlsensorik ausgerüstet und Messdaten durch Abfahren der Referenzstrecke im Einsatzort erfasst und ausgewertet

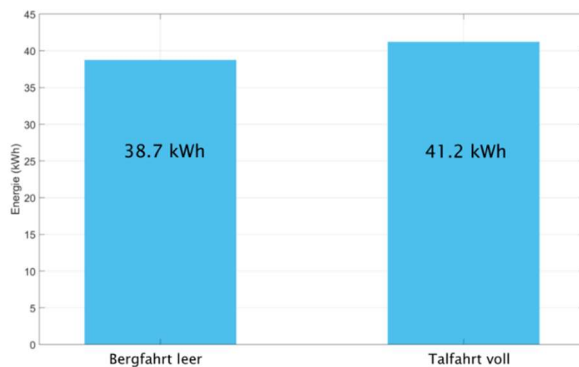


*Fahrprofil vom Abbaubereich bis zur Brecheranlage im Steinbruch «La Tschärner»*



Messungen an der Kardanwelle bei drei unterschiedlichen Beladungs- und Fahrzuständen

Energie-Bedarf-Rechnungen anhand von 4 Messfahrten mit der Dieselmachine ohne Berücksichtigung des Energieverbrauchs der Nebenaggregate. Die blauen Balken repräsentieren die mechanischen Energien an der Kardanwelle.



Vergleich der Antriebsenergie von Berg- und der rekuperierbaren Bremsenergie der Talfahrt ohne Berücksichtigung der Nebenaggregate

Bergfahrt leer: im Schnitt 38.7 KWh	Talfahrt beladen: - 41.2 KWh
-------------------------------------	------------------------------

### Mit Energiebedarf der Nebenaggregate

Bergfahrt leer: im Schnitt 50.1 KWh

Talfahrt beladen: - 30.6 KWh

### Die Schlussfolgerungen:

Das Ergebnis pro Zyklus: es werden 19.5 kWh pro Fahrt Batteriestrom benötigt

Beim Anfahren bergwärts und einer Hangneigung von bis zu 12 Prozent (11 Grad) lagen die maximalen Drehmomente zwischen 14 bis 17 kNm.

Bei einer Talfahrt können (gemessen an der Kardanwelle und zurückgerechnet auf die rekuperierbare elektrische Energie) der Batterie 25.5 KWh +/- 4.2 KWh zugeführt werden.



Eine Bergfahrt wird demnach 20 KWh mehr Energie pro Fahrzyklus benötigen, als durch die Talfahrt wieder zurückgewonnen werden kann, womit die Idee eines Energie PLUS Betriebs nicht bestätigt werden kann.

Nachdem das Fahrzeug fertig gebaut war, konnten diese Werte gemessen werden. Im Durchschnitt fehlen beim Standard-Profil bis zu 30 KWh pro Fahrt.



### 5.3 Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem

*Datum:* 05.04.2017

*Studie:* Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Institut für Entwicklung mechatronischer Systeme

*Autoren:* Prof. Dr. Max Stöck (Technische Mechanik), Roger Strässle (Normenwesen), Rouven Christen (Auswertung Messdaten), Alfred Gadola (Messtechnik)

*Anhang 2:* Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem

Für die Auslegung des Batteriespeichers wurde eine Evaluation der Umgebungs- und Einbauanforderungen durchgeführt. Auf Basis einer Literaturstudie über gesetzliche Anforderungen, Stand der Technik und „Best Practice“ bzgl. Umweltbedingungen für den Betrieb elektrischer Geräte von Bau- und Nutzfahrzeugen und eigenen transient dynamischer Messungen am E-Dumper vor Ort



**konnten alle relevanten Kenngrössen bestimmt und die folgenden konstruktiven** Parameter festgelegt werden: Einbaulage, max. Grösse, Zugänglichkeit und notwendige mechanische Festigkeit der E-Dumper Batterie. Ziel dieses Arbeitspakets war es, relevante Kenngrössen zu bestimmen um die mechanisch konstruktiven Parameter wie Einbaulage, max. Grösse, Zugänglichkeit und mechanische Festigkeit für die Batterien festzulegen.

### **Projektergebnisse und Empfehlungen:**

Beschleunigungen und Batterie-Festigkeit: Anhand der Auswertung der Messungen direkt am arbeitenden HD 605-7 Dumper, konnte eine spektrale Leistungsdichte (Dauerfestigkeit) und Abschätzungen über Maximalbelastungen (Kurz- und Zeitfestigkeit) erstellt werden (Siehe Kapitel 5 Hauptbericht «Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem»; Anhang 2). In den Normen werden Versuche für starke Shock-(50g aus Transportnormen) und Random-Tests (3.14 grms aus Fahrzeugnormen) beschrieben. Es wird empfohlen bei der Entwicklung der Batterie die 50g Shock-Tests für den Transport zu beachten.

Auslegung der Batterie im FEM und Nachweis gemäss FEM: Für die FEM- Simulation werden die verschiedenen Belastungen (siehe unten) einzeln statisch simuliert und ausgewertet.

Nachweis der Festigkeit kritischer Komponenten auf dem Shaker: Nach der Auslegung/Überprüfung der Batterie mit FEM und FKM sollten kritische Teile hergestellt und auf einem Shaker untersucht/nachgewiesen werden. Für Versuche werden Random- (aus Messdaten erstellt) und Shock-Tests (50g 6 ms gemäss Transportnormen) empfohlen.

### **Weitere Empfehlungen aus der Normen-Recherche:**

Quetschen: Seitlich angebaute Batterien können im Falle eines Steinschlages gequetscht werden. In Kapitel 7 Hauptbericht «Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem»; Anhang 2) werden zwei verschiedene Steinschlag-Stufen beschrieben. Es sollte ebenfalls darauf geachtet werden, dass alle Komponenten um und an der Batterie begehbar sind.

Thermische Betrachtung: Um eine maximale Lebensdauer der Zellen zu gewährleisten, sollten diese aktiv gekühlt bzw. beheizt werden können. Es wird ebenfalls empfohlen das thermische Verhalten der Batterie im abgeschalteten Zustand zu beobachten (z.B. Treibhauseffekt, Stillstand an Wochenenden)

Druckausgleich: Mögliche Druckänderungen in der Batterie, die durch thermische-, Wetter- und Höhenänderungen oder Feuer zustande kommen, müssen ausgeglichen werden können.

Dichtheit: Das Gehäuse sollte die IP6k6k IP6k9k Schutzklasse aufweisen. Dies bedeutet Tauch und Kärcher Dampfreiniger dicht. Wird das Gehäuse gequetscht, sollte die Batterie dennoch dicht bleiben.

Schutz bei Gasbildung: Beim Austritt von Zellenchemie soll gemäss Kapitel 10 Hauptbericht «Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem»; Anhang 2 darauf geachtet werden, dass sich keine gefährlichen Gasansammlungen bilden können.

Schutzmassnahmen im Brandfall: Im Havariefall muss unbedingt dafür gesorgt werden, dass keine Personen zu Schaden kommen:

- Es dürfen keine offenen Feuer sichtbar sein (Brand muss im Batteriegehäuse bleiben)
- Gase sollen über eine Berstscheibe kontrolliert an einen sicheren Ort abgeführt werden
- Falls Personen beim Flüchten über die Batterie laufen müssen, dürfen diese Oberflächen nicht übermässig warm werden
- Die Fluchtwege müsse freibleiben

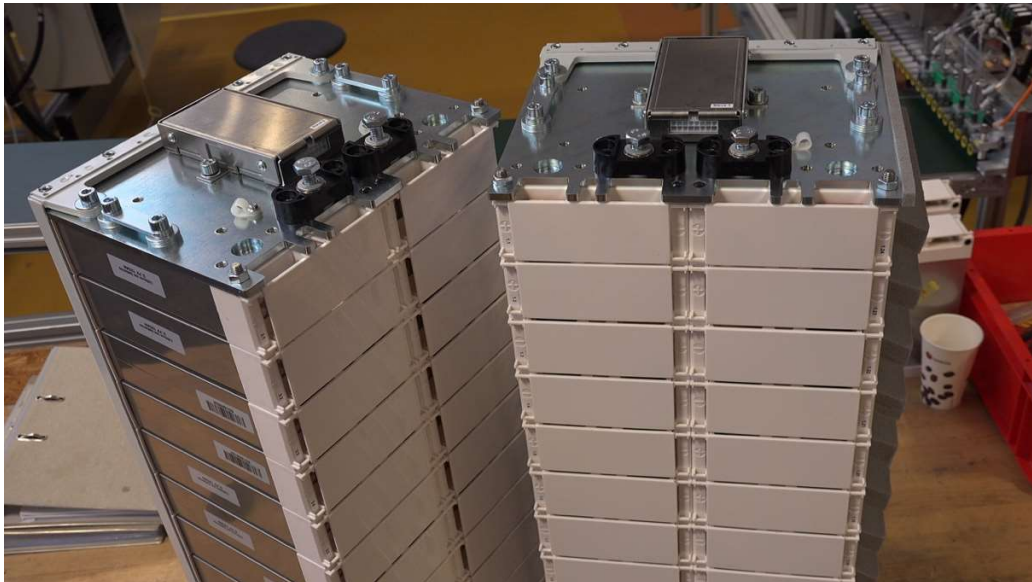


Für den rechnerischen Festigkeitsnachweis können die verschiedenen Belastungen über der Lebensdauer gemäss der Schadensakkumulation nach der FKM-Richtlinie zusammengefasst und entsprechende Sicherheitsfaktoren berechnet werden.

## 5.4 «Architektur» der Batterien

Nachdem die wichtigsten Parameter punkto Mechanik, elektrischer und thermischer Belastung geklärt waren, ging es darum, das Innenleben der Batterien auszugestalten. Stefan Rittler, Rittler Motor Company, spezialisiert auf elektrische Mobilitätslösungen, erarbeitete die 3-D Simulationen und designte die 16 in Serie verschalteten Stacks mit je 24 2P12S angeordneten 125 Ah NCM Zellen.

Das Batterie Management System, BMS, wurde vom Team Esoro, Innovation, Engineering, Prototyping übernommen. Es liefert die relevanten Daten an das Murphy (Energiemanager), zu Händen des Fahrers, des Fahrmanagers und des Fernwartungssystems.



64 Stacks zusammengebaut in 4 Batterien bei der Schaltag AG

## 5.5 Simulation der Luftkühlung der Batterie E-Dumper

Dauer: 11.04.2017

Ort der Studie: NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs Institut für Entwicklung Mechatronischer Systeme EMS

Autoren: Rouven Christen, Gerhard Rizzo

Anhang 7: **Simulation der Luftkühlung**

Die Strömungsverteilung im Batteriepack ist – auch trotz zusätzlichen Massnahmen – stark ungleichverteilt. Eine entsprechende inhomogen Temperaturverteilung während des Betriebs ist zu erwarten.

Die horizontale Durchströmung mehrerer Batteriepacks hintereinander zeigt ein deutlich homogenes Strömungsfeld.



Auch das Temperaturfeld ist bei horizontaler Durchströmung gleichförmiger:

- Übereinander liegende Zellen weisen praktisch keinen Temperaturgradienten auf.
- In Strömungsrichtung kommt es – aufgrund der Erwärmung der strömenden Luft – zu einem Temperaturunterschied von 0,5 K pro überströmter Zelle.

Am Strömungseintritt und im nicht durchströmten Zwischenraum zwischen zwei Zellen kommt es zu einem wesentlichen Druckabfall. Dieser sollte durch Leitbleche am Eintritt und durch Strömungsführungsbleche reduziert werden.

Die NTB empfiehlt eine Anordnung von jeweils 2 Batteriepacks hintereinander mit vorgeschaltetem Kühlregister. Um die Anströmung am Eintritt möglichst gleichverteilt zu gewährleisten, sollten mehrere Axiallüfter vorgesehen werden.

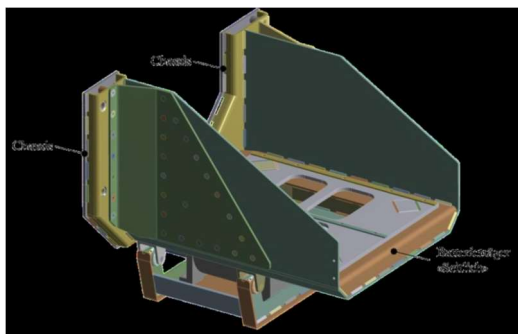
## 5.6 Befestigung der Batterien

Dauer: 11.04.2017

Ort der Studie: NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs Institut für Entwicklung Mechatronischer Systeme EMS

Autoren: Mathias Schön

Anhang 8: Batterieträger E-Dumper



Beispiel:

Batterie seitlich. Die Berechnung der Belastung des Batterieträgers in einem FEM Modell erfordert einen ausserordentlich hohen Rechenaufwand. Gerechnet wurden für alle Träger je vier Lastfälle. **Dafür benötigen 12 CPUs pro Lastfall rund 20 Stunden Rechenzeit.**

## 5.7 Performance-Vergleich der Batteriezellen

Dauer: 01.12.2016 – 10.02.2017

Ort der Studie: BFH-CSEM Energy Storage Research Centre

Autoren: Dr. Alejandro Santis

Anhang 3: Batterieuntersuchungen, Charakterisierung der Zellen

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 (LFP und NCM bzw. NMC) durchgeführt. Im Fokus stand das elektrische Verhalten der Zellen bei 25 °C sowie bei hohen (45 °C) und tiefen Temperaturen (0 °C und 10 °C). Für die Charakterisierung wurde ein elektrisches Lastprofil entwickelt, das die Fahrtbedingungen bestmöglich widerspiegelt. Die Auswirkungen auf die Lebensdauer der Zellen wurden in einem langfristigen Experiment untersucht. In den Ergebnissen zeigte sich ein klarer Unterschied bei der Performance. **Die beste Zellentechnologie von Shenzhen Westart wurde priorisiert.**

Die NTB, interstaatliche Hochschule für Technik Buchs/SG, übernahm daraufhin die thermischen Experimente und die Simulationen, die Empa die Röntgen- und Impedanzspektroskopieanalyse, die Lithium Storage GmbH den Bau eines Batteriepakets und die Fachhochschule BFH die elektrische und thermische Charakterisierung des Batteriepakets.



*Tests bei der BFH in Biel-Bienne*

## 5.8 Elektrische und thermische Charakterisierung

Dauer: 06.03.2017 – 24.05.2017

Ort der Studie: BFH-CSEM Energy Storage Research Centre

Autoren: Dr. Alejandro Santis, [alejandro.santis@bfh.ch](mailto:alejandro.santis@bfh.ch)

Anhang 3, 4 **Elektrische und thermische Charakterisierung;  
Temperaturprofile**

Bei den ersten Zellentests geht es um einen Performancevergleich und eine Tauglichkeitsanalyse zwischen NMC/C- und LiFePO<sub>4</sub>/Zellen (sog. NMC- bzw. LFP-Zellen) für den E-Dumper. Das Ziel ist es, Aufschluss darüber geben, ob unter gleichen Lade- und Entladebedingungen der Einsatz der NMC-Zellen von Westart mehr Vorteile bringt als der Einsatz der LFP-Zellen von Sinopoly.

Unter dem Gesichtspunkt der Lebensdauermaximierung sind Batteriebetriebstemperaturen von 20 °C bis 25 °C essenziell. Zur Auslegung des thermischen Managementsystems wurde ein Batteriepaket der Konfiguration 24s2p unter kontrollierten Bedingungen thermischen und elektrischen Messungen unterzogen. Dazu wurde mit Messungen am Fahrzeug aus anderen Arbeitspaketen ein zweites realistischeres Belastungsprofil entwickelt.



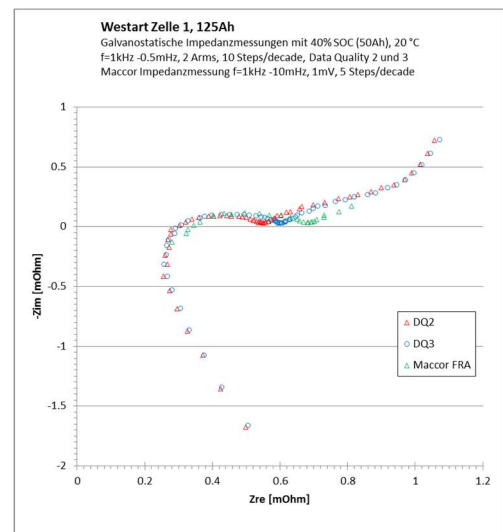
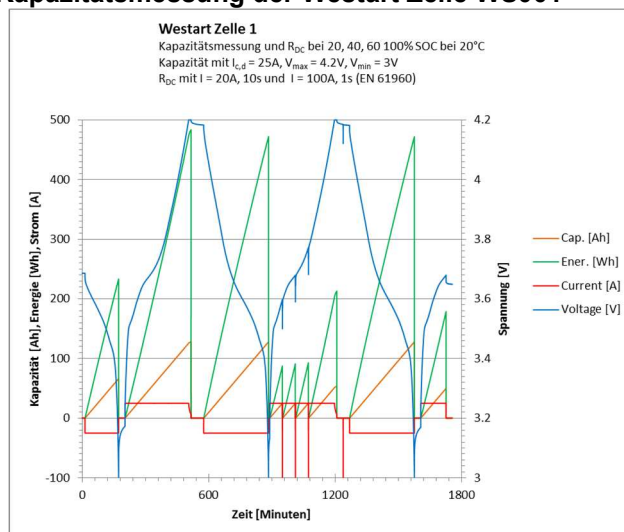
Um die Temperaturentwicklung bei den simulierten Fahrten zu charakterisieren, sind an verschiedenen Stellen im Batteriepaket 26 Temperatursensoren platziert worden. Während der Messungen wurden Temperaturdaten erfasst und mit einer IR-Kamera Bilder aufgenommen. Für die Auswertung führte man einen sogenannten Plus-Energie-Faktor ein, der den Autarkiegrad des Fahrzeugs wiedergab. Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss zweier Luftkühlensysteme auf diesen Plus-Energie-Faktor. Die Ergebnisse halfen dabei, den Temperaturgradienten entlang der Kühlungsstrecke zu quantifizieren und das Thermomanagementsystem in anderen Arbeitspaketen auszulegen.

### Pro-Argumente für die WS-Zelle (NMC):

1. Höhere Kapazitätswerte der WS-Zelle bei 0 °C und 45 °C relativ zur gemessenen Kapazität bei 25 °C
2. deutet auf stabileres Verhalten
3. Im Allgemeinen höhere Energiewerte der WS-Zelle bei 0 °C und 45 °C relativ zur gemessenen Kapazität bei 25 °C deutet auf stabileres Verhalten
4. Im Allgemeinen höhere Energieeffizienzwerte der WS-Zelle bei 0 °C und 45 °C relativ zur gemessenen Kapazität bei 25 °C
5. Geringere Eigenerwärmung bei den Charakterisierungsmessungen
6. Kapazitätsabnahme der WS-Zelle bei den Profilmessungen (10 °C) ist nahezu Null
7. CE-Werte der WS-Zelle sind nahezu 1.0000

## 5.9 Initialkapazität der Batterien

### Kapazitätsmessung der Westart Zelle WS001



**Gemessene Kapazität/Energie bei 20°C: 128.174Ah / 472.029Wh (Quelle: Empa, März 2017)**



Aus der Vermessung mehrerer Einzelzellen im Labor, lässt sich damit die Initial - Gesamtleitung der 4 Batterien errechnen.

472.029Wh \* 2p \* 12\*16 \*4 in der Neumaschine, gemessen von 3.0 bis 4.2V, ergeben brutto neu eine Kapazität **von 725.037kWh**

Im Fahrzeug genutzt wird jedoch nur der Bereich von 3.33V bis 4.0V (begrenzt durch verbaute Komponenten im HV Bus). Dieser Range entspricht **87% der Bruttokapazität** (kompletter Range), **also 630.78kWh** (die tatsächlich genutzt werden können).

## 5.10 Mechanische Spezifikationen E-Dumper

Dauer: 21.02.2017

Ort der Studie: Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs; Institut für Entwicklung Mechatronischer Systeme EMS

Autoren: Prof. Dr. Max Stöck, Roger Strässle (Normenwesen), Rouven Christen (Auswertung der Messdaten), Alfred Gadola (Messtechnik)

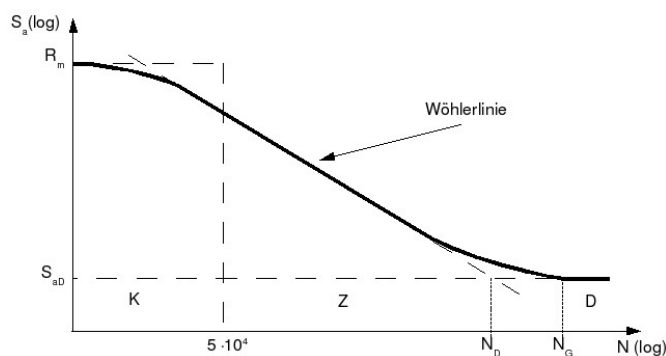
Anhang 5 **Mechanische Spezifikationen E-Dumper**

Der Messaufbau erfolgte, um eine Auswertungsgrundlage (unter Einbezug der Kuhn Maschinendaten) zu erhalten für folgende Szenarien:

- Vibrationen für Dauerfestigkeit beim Fahren
- Vibrationen für Zeitfestigkeit (Schock, z.B. beim Beladen)
- Crasheszenario

Und um dazu Gegenmassnahmen zu bewerten, zu formulieren und verbauen.

Auswertungsgrundlage für Auslegung mit FEM/ FKM und zum Vergleichen mit Normen



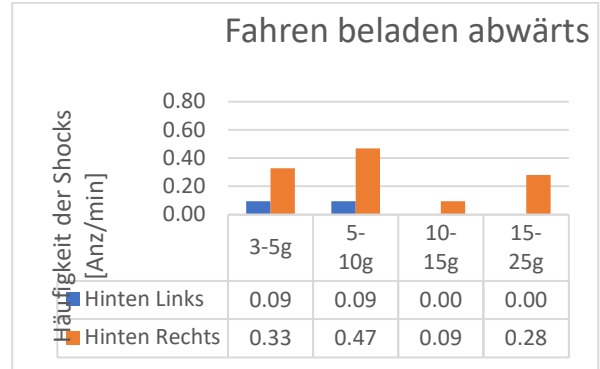
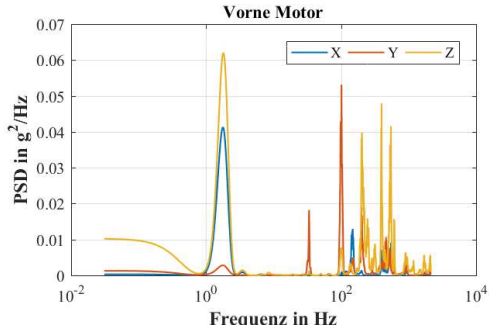
K: Kurzzeitfestigkeit (bis ca. 50'000 Lastwechsel)

Z: Zeitfestigkeit ( $5 \cdot 10^4 - 10^6$  Lastwechsel)

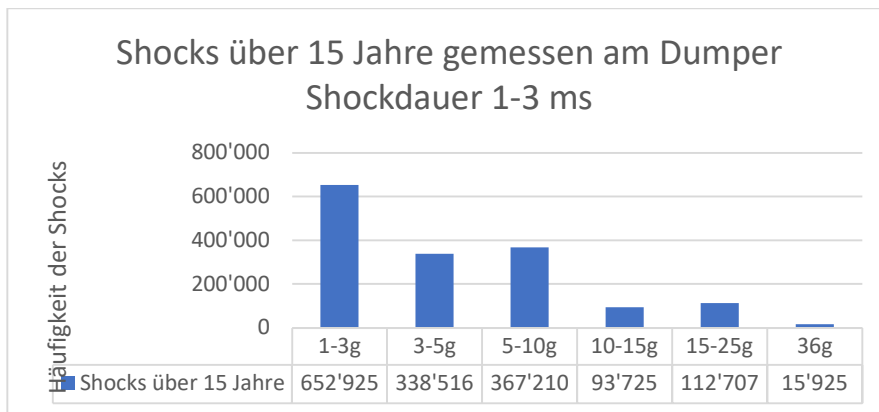
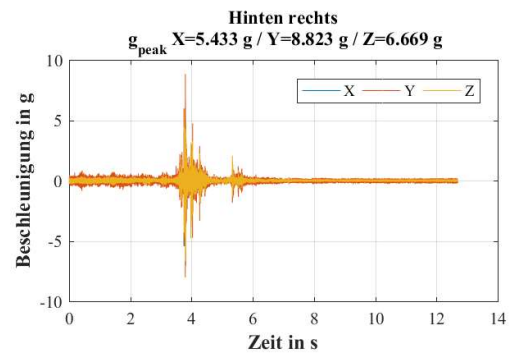
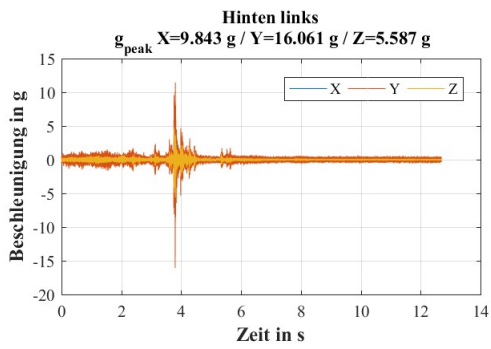
D: Dauerfestigkeit (Je nach Material ND > 106)



**Beispiel Fahren:**



**Beispiel Beladen:**



Messungen der Beschleunigungen, die auf das Chassis und somit auf die Batterien einwirken



## 5.11 Thermische Vermessung der Batterie

Datum: 15.08.2017

Ort der Studie: NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs Institut für Entwicklung Mechatronischer Systeme EMS

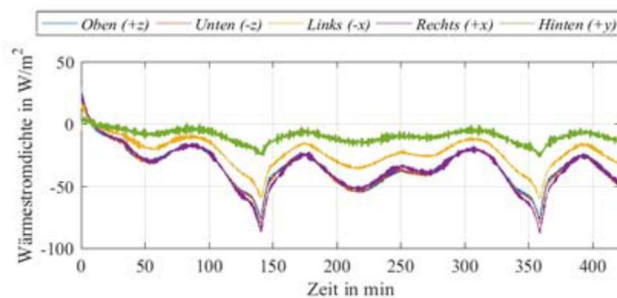
Autoren: Gerhard Rizzo, Rouven Christen, Prof. Dr. Max Stöck

Anhang 6: **Thermische Vermessung E-Dumper Batterie**

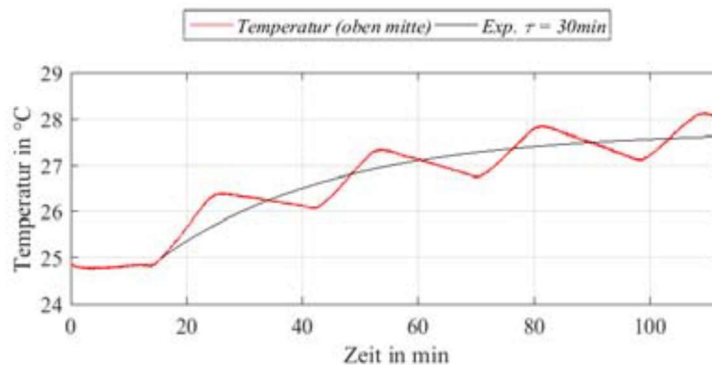
### Messaufgabe zur thermischen Charakterisierung der WS NCM125 AH Zelle

- I. Temperaturverteilung innerhalb der E-Dumper Batterie unter Last
  - a. Zentrische Oberflächentemperatur ausgewählter Li-Ionen Zellen sind zu erfassen
  - b. Lufttemperatur vor und nach dem Kühlregister sind zu bestimmen
  - c. Lufttemperatur unmittelbar vor Eintritt in die Strömungsspalte der Batteriepacks und am Austritt sind zu messen
- II. Verteilung der Luftströmung über die Strömungskanäle
  - a. Messung der Strömungsverteilung in den Zu- und Abluftkanälen unmittelbar vor Eintritt in den jeweiligen Strömungsspalt
  - b. Quantitative Bestimmung der Luftverteilung der Strömungskanäle untereinander (sofern messtechnisch mit vertretbarem Aufwand möglich)
- III. Druckverlust/-differenz über Kühlregister, Lüfter und Strömungskanal
- IV. Protokollierung von Batteriespannung und Lade-/Entladestrom:

**mittels zyklischer Belastung mit 0,5C (Constant Current)**

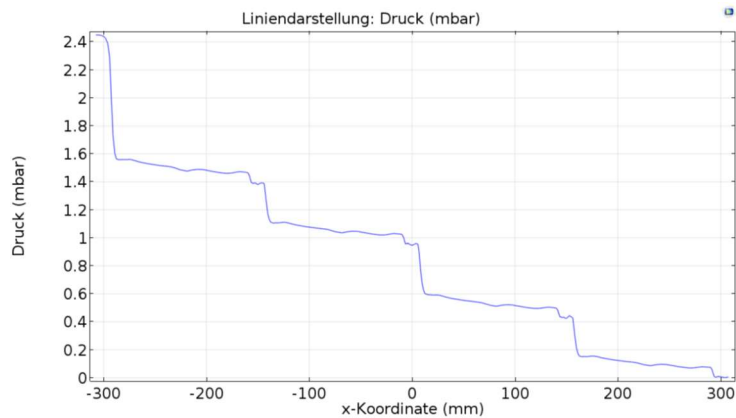


**unter Belastung mit realem Stromprofil E-Dumper**





### **Druckverteilung unter Belastung mit horizontaler Luftspalte 6mm**



## **5.12 Thermomanagement**

An der NTB wurde das Thermomanagement der Batterien konzipiert. Hierfür steht an der Buchser Hochschule ein weltweit einzigartiger Versuchsstand zur Verfügung, mit dem die Oberflächentemperatur und der abgegebene Wärmestrom einer Batteriezelle unter realen Lastbedingungen örtlich aufgelöst bestimmt werden konnten. Darüber hinaus ermöglichte dieser 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 mit Hilfe des CTR an der NTB bestimmt werden. Ziel musste 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 war aber die Herausforderung – insbesondere bei einer so grossen Lithium-Ionen- Batterie, wie sie im E-Dumper verbaut werden sollte. In einer Simulation ist die Oberflächentemperaturverteilung einer E-Dumper-Zelle unter Last dargestellt, 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.

### ***Thermische Charakterisierung und Modellierung einer Li-Ionen Zelle, eines Batteriestacks und einer Batterie des E-Dumpers Komatsu HD 605-7***

Das thermische Verhalten einer WS NCM125 AH Zelle wurde mittels konstanter Zyklenlast und einem realen Fahrprofil auf dem Zellprüfstand der NTB charakterisiert. Hierbei zeigte sich, dass die Wärmeabgabe aus dem Zellinneren vor allem über die beiden grossen Seitenflächen der Li-Ionen Zelle erfolgt. Am Boden war gar kein Wärmübergang festzustellen und an der schmalen linken und rechten Stirnseite ein deutlich kleinerer Wärmestrom. Damit ist klar, dass eine homogene Temperierung der Zelle – welche ein Garant für eine lange Lebensdauer ist – nur durch Kühlung der beiden grossen Oberflächen zu gewährleistet ist.

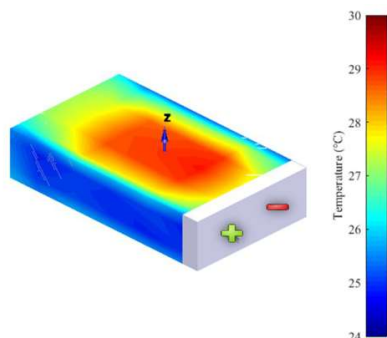


Mit Hilfe eines CFD Modells wurde sowohl ein Batteriestack als auch eine E-Dumper Batterie simuliert. Hierbei zeigte sich, dass die Strömungsverteilung in einem Stack, das von unten angeströmt wird und die kühlende Luft dann senkrecht dazu über die Li-Ionen Zellen strömt eine erhebliche Ungleichverteilung entlang des Stack aufweist. Besser sieht es bei einer querdurchströmten Batterie aus.

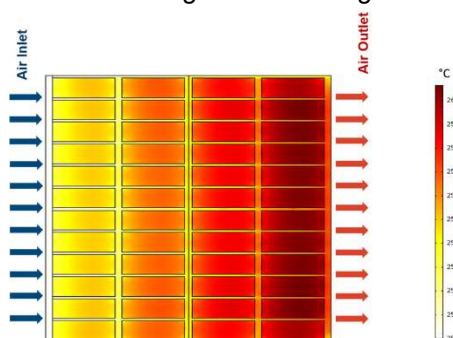


#### *Batteriezellprüfstand (CTR) der NTB zur Messung der lokalen Temperatur- und Wärmestromverteilung*

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, musste auch das Kühlsystem eine entsprechend gleich verteilte Wärme-Zu- und -abfuhr sicherstellen. Die Firma 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 mit Hilfe 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. Die Erwärmung liegt pro überströmtem Batteriemodul jedoch unter 0,5 K, so dass eine wesentlich bessere Temperaturhomogenität erreichbar wird. Um die Berechnungen zu verifizieren, wurde eine der vier Batterien mit insgesamt 48 Oberflächentemperatursensoren und diversen Strömungssonden ausgestattet. Im Prüfstandtest konnten die zuvor durch Simulation ermittelten Resultate weitgehend bestätigt werden.



*Temperaturverteilung auf der Oberfläche einer Li-Ionen-Zelle, wie sie im E-Dumper zum Einsatz kommt*



*Temperaturverteilung der Kühlluft bei horizontaler Durchströmung der senkrecht stehenden Batteriemodule*



Messergebnisse liegen vor und konnten im Detail ausgewertet werden. Bereits während der sehr kalten Wintermonate und bei den Sommertemperaturen zeigte sich, dass die geforderte Temperaturhomogenität von maximal 5 °C – über eine Batterie gemessen – ohne aktives Thermomanagement nicht zu erreichen wäre. Erwartungsgemäss zeigten die Messungen, dass der extern zuzuführende thermische Energieaufwand, um den nach längerem Stillstand ausgekühlten E-Dumper 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 konnte schon damals gesagt werden, dass auch der Wärmeeintrag von der Umgebung einen deutlichen Einfluss auf die Temperaturverteilung innerhalb der Batterie nehmen würde.



### 5.13 Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem

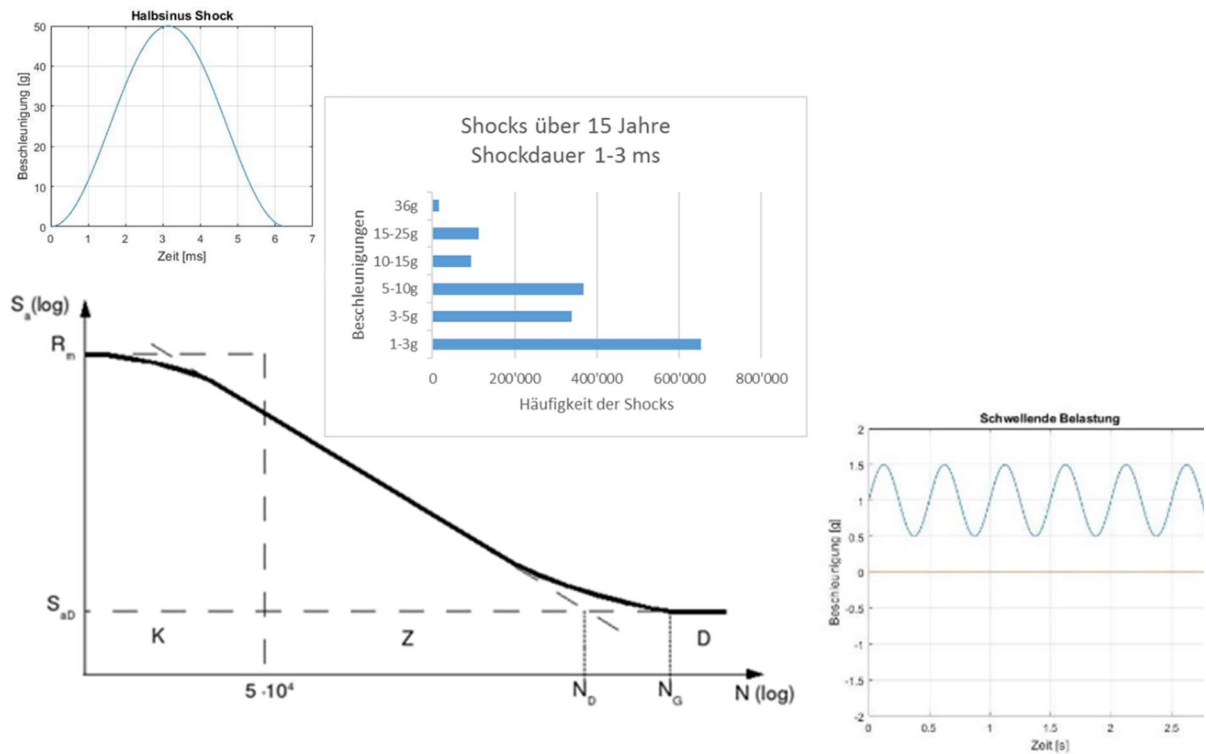
Dauer: Juni 2017  
Ort der Studie: NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs Institut für Entwicklung Mechatronischer Systeme EMS  
Autoren: Prof. Dr. Max Stöck, Roger Strässle, Rouven Christen, Alfred Gadola  
Anhang 2: **Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem**

Evaluation der Anforderungen aus mechanischer Beanspruchung eines Batteriesystems (Vibration und Dichtheit) abgeleitet aus gesetzlichen Vorgaben, dem Stand der Technik und Messungen am realen Einsatz des E-Dumpers Komatsu HD 605-7.

Für die Auslegung des Batteriespeichers wurde eine Evaluation der Umgebungs- und Einbauanforderungen durchgeführt. Auf Basis einer Literaturstudie über gesetzliche Anforderungen, Stand der Technik und „Best Practice“ bzgl. Umweltbedingungen für den Betrieb elektrischer Geräte von Bau- und Nutzfahrzeugen und eigenen transient dynamischer Messungen am E-Dumper vor Ort



könnten alle relevanten Kenngrössen bestimmt und die folgenden konstruktiven Parameter festgelegt werden: Einbaulage, max. Grösse, Zugänglichkeit und notwendige mechanische Festigkeit der E-Dumper Batterie.



Für den rechnerischen Festigkeitsnachweis können die verschiedenen Belastungen über der Lebensdauer gemäss der Schadensakkumulation nach der FKM-Richtlinie zusammengefasst und entsprechende Sicherheitsfaktoren berechnet werden.



## 5.14 Prognose zur Nutzungsdauer Batterie Westart NCM 125/150 Ah

### 5.14.1 Vorgaben, Umfeld

Die Komatsu HD 605–7 haben unter Einschichtbetrieb / 6 Tageweche eine Lebenserwartung von mind. 10 (bis 15) Jahren. Über die Zeitdauer von 10 Jahren ist auch ein Vollservicevertrag zwischen Kuhn (Schweiz) AG und Ciments Vigier AG vorgesehen. In diesem Vertrag nicht eingeschlossen sind:

- Die Batterie(n)
- Die Ladeinfrastruktur

Für die Batterie wird demnach eine mind. ebenbürtige Lebensdauer erwartet. Dies lässt sich mit verschiedenen Massnahmen auch erreichen, nämlich einer geeigneten Batteriechemie, ein Betrieb in einem Temperaturbereich zwischen 5 und 25 Grad Celsius, der Batterie angepassten Lade-/ Entladeströme inkl. Vermeiden von Tiefentladung und häufiger Überladung und einer entsprechenden Dimensionierung der Batterien, um in diesem Zeitraum 4 – 5'000 Vollladezyklen nicht zu überschreiten.

Die Batterien werden hauptsächlich durch Rekuperation während der Talfahrten geladen. Die Batterien werden alle Nächte bzw. minimal alle 2 Tage ab Netz wieder auf bis zu SOC 100% geladen. Mit den 5x25 Ah Pouches d.h. 125 AH Zellen ist die Rekuperation bei 600 KW abgeriegelt; die überschüssige Energie muss durch das Bremssystem (hydraulische Lamellenbremsen) vernichtet werden.

Eine Aussage zur Lebensdauer der weltgrössten Batterie ist Teil der Projektaufgabe. Nach rund 18 Monaten Betrieb erwartet die Betreiberin eine schlüssige Prognose zu der zu erwartenden Einsatzdauer der eingesetzten NCM - Batteriezellen von Westart.

Die Importfirma Lithium Storage GmbH bzw. die Herstellerfirma Westart gewährten 24 Monate Garantie. Die Wartung der Batterien für die Einsatzjahre 3 bis 10 des E-Dumpers Nr. 1 werden nicht durch Serviceverträge abgedeckt. Für E-Dumper Nr. 2 wünscht Vigier, dass eine Offerte mit einem Vollservice – Vertrag inkl. Batterien offeriert wird. Eine alternative Lösung über eine Versicherung wurde geprüft und verworfen.

Es gilt demnach, die von Westart postulierten Daten (5757 Volladezyklen bis zu einem SOC der Batterien von 80%) zu verifizieren.

Folgende Daten *stehen zur Verfügung*:

- Die von der Herstellerfirma Westart an einzelnen vom chemischen Aufbau identischen Zellen NCM150-3.7 V gemessenen und extrapolierten Werte<sup>11</sup>
- Evaluation der „richtigen“ Zellchemie; LFP und NCM – Zellen im Vergleichstest bei der BFH<sup>12</sup>
- Batterieuntersuchungen, Profiltests und Lebensdauerabschätzung<sup>13</sup>
- State of Health Messungen 2018, 2019, 2020<sup>14</sup>

Daraus leiten wir eine erhärtete Prognose in Bezug auf die voraussichtliche Einsatzdauer der vier Batterien des E-Dumpers ab.

<sup>11</sup> Siehe 5.14.2 «Battery Lifetime NCM 150Ah»

<sup>12</sup> Anhang 3 «Batterieuntersuchungen Charakterisierung» der BFH

<sup>13</sup> Anhang 4 «Batterieuntersuchungen Profiltests und Lebensdauerabschätzung» der BFH

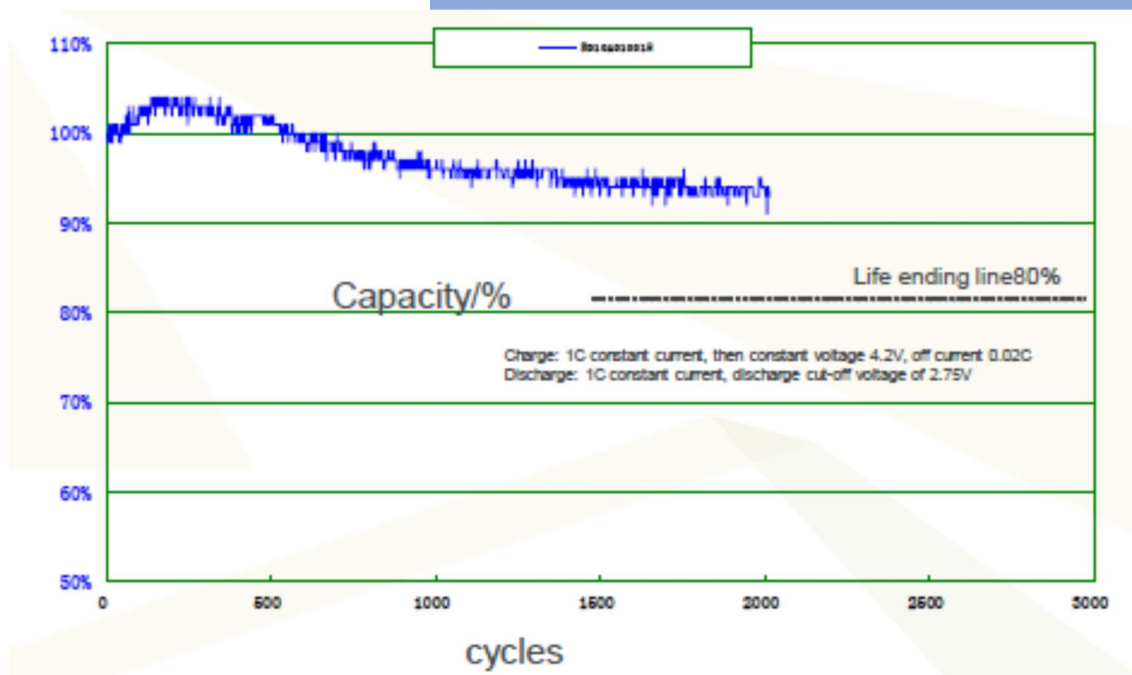
<sup>14</sup> Anhang 13 «Batteriekapazitätsmessung» Emining, Konrad Zaugg und Lukas Blaser



#### 5.14.2 Angaben der Herstellerin Shenzhen Westart Technology Co. Ltd.



**Westart NCM 125AH – 3.7V**  
**LAB test data: 2015 cycles**  
**Capacity 93%**  
**Estimated Lifetime 5757 cycles**  
**Capacity 80%**



Westart hat bis 2000 Zyklen gemessen, die Grafik zeigt den SOC-Status die 80% Linie der ursprünglichen Kapazität und leitet daraus rechnerisch eine Prognose von 5757 Volladezyklen ab.

Vigier fuhr im Steinbruch La Tscherner mit dem E-Dumper Nr. 1 14,7 Fahrten pro Tag während 223 Tagen im Jahr:  $14,7 \times 223 \times 62.5 = 204'881 \text{ kWh} = 360 \text{ Volladezyklen} = \text{in } 10 \text{ Jahren } 3607 \text{ Zyklen}$ . Damit wird die Grenze der Lebensdauer, definiert mit einem SOC von mind. 80% der ursprünglichen Kapazität, zu drei Vierteln erreicht.

Bei korrekter Fahrweise (nicht überschreiten von  $C=1.5$ ) erreichen die 4 Batterien diese Einsatzdauer mit einer Reserve von 2'150 Zyklen, was weiteren 5.97 Einsatzjahren bei gleichbleibender Belastung entspricht. Die Zellen haben nach 10 Jahren noch einen Restwert von in der Größenordnung 20% des aktuellen Beschaffungswertes und könnten z.B. für Grid – Storage eingesetzt werden.



### 5.14.3 Performance-Vergleich zweier Batteriezellen

#### (Sinopoly LFP und Westart NCM)

Dauer: Dezember 2017

Ort der Studie: BFH-CSEM Energy Storage Research Centre

Autoren: Dr. Alejandro Santis, alejandro.santis@bfh.ch; Ludovic Lauber, Daniel Luder, Prof. Dr. Andrea Vezzi

#### **Vorgehen zum Forschungsmodul:**

Aufgrund der besonderen Betriebsbedingungen des E-Dumpers und der Kundenanforderungen soll die Batterietechnologie sicher und zuverlässig sein sowie eine möglichst hohe Energiedichte aufweisen. Zusätzlich soll sie eine möglichst lange Lebensdauer bieten, um deren Wirtschaftlichkeit zu steigern.

*Ziel dieser Untersuchungen war es, die beste verfügbare Zelltechnologie aus Sicht der kurz- und langfristigen Performance zu identifizieren. Hierzu wurde eine Reihe experimenteller Untersuchungen mit zwei unterschiedlichen Zelltypen durchgeführt. Im Fokus stand das elektrische Verhalten der Zellen bei 25 Grad Celsius sowie bei hohen Temperaturen (45 Grad Celsius) und insbesondere auch bei tiefen Temperaturen (0 Grad Celsius). Für die Charakterisierung wurde ein praxisrelevantes elektrisches Lastprofil entwickelt, welches Fahrbedingungen in der Steingrube simulierte. Die Auswirkungen dieses Lastprofils auf die Lebensdauer der Zellen wurden anhand eines langfristigen Experiments untersucht.*

#### **Ergebnis und weiteres Vorgehen:**

*Die daraus resultierenden Ergebnisse zeigten einen klaren Unterschied <sup>15</sup>in Bezug auf Performance zu Gunsten der Shenzhen Westart 125Ah NCM-Zelle. Nach der Auswahl der besten verfügbaren Zelltechnologie wurde diese für die weiteren F&E-Arbeiten am Projekt weiterverwendet:*

- NTB: thermische Experimente und Simulationen
- EMPA: Röntgen- und Impedanzspektroskopie
- Lithium Storage: Konzeption und Bau der Batterien
- BFH: elektrische und thermische Batteriepack-Charakterisierung

Aufgrund dieser weiteren Lebensdauer relevanten Untersuchungen sowie Praxistests kann eine präzise Prognose über den Alterungsprozess, bzw. die in 10, 12 und 15 Jahren zu erwartende Kapazität der Westart NCM – Zellen im definierten Betriebseinsatz gemacht werden.

---

<sup>15</sup> Anhang 4 «Batterieuntersuchungen» der BFH



#### 5.14.4 State of Health

Gemessen wurden die Entladeleistungen in einem SOC-Bereich zwischen 96 bis 100 Prozent (Durchschnitt 4.25 Prozent) und 1 bis 12 Prozent (Durchschnitt 99 Prozent) Total 593.06 KWh. Das ergibt eine Kapazität von **625.92 KWh**.

Dauer: 13.09.2018 – 15.09.2018

Ort der Studie: Steinbruch Tscharner, Péry-La Heutte

Autoren: Marius Bachofen, Dipl. Ing. ETH, Johannes Lohmeier E.Eng (FH)  
Elektrotechnik

Zelltyp / Batterie: **Westart 125 Ah; 4 x 16 x 2P12S**

##### Auftrag

Gemäss Protokoll der zweiten Abnahme des E-Dumpers vom 21.08.2018 08:30 – 11 :00 im La Tscharner unter Anwesenheit von: seitens Vigier Thierry Gaschen, Stefan Helbling, Bernhard Kernen, Arnaud Rossé, Yann Bessire; seitens Kuhn Franz Kissling, Konrad Zaugg, Lukas Blaser und seitens Lithium Storage Marius Bachofen und Andreas Sutter wurden Pendenzen festgehalten. Pendezenz Nr. 3 umfasst: Batterie – Kapazitätsnachweis: Die 4 Batterien müssen einzeln geladen und entladen werden mit 0.3C. Diese Messungen sollen an einem Wochenende stattfinden, mit einem weiteren Wochenende als Reserve. → August/September 2018

##### Messmethodik

Die Batterien wurden einzeln nacheinander gezykelt. Jede Batterie wurde vor dem Ladezyklus entladen, bis die Zellspannung einer Zelle jeder der gemessenen vier Batterien bei 75A Entladestrom (=0.3C) den minimalen Schwellenwert von 3.0V unterschritten hatte. Geladen wurde anschliessend während rund drei Stunden mit 75A (0.3C) auf eine Zellspannung von 4.0V, gleich einer Batteriespannung von 768V, was einem Batteriefüllstand (SoC) von 90 Prozent dieses Zelltyps entspricht. Danach wurden die Messungen auf einer Zeitachse im 0.1s interpoliert, die Stützwerte der gemessenen mAh mit der entsprechenden mittleren Spannung multipliziert und das Produkt aufintegriert.

Die direkte Multiplikation der Spannung mit dem Strom und Integration über die Zeit hat auf 500Wh die gleichen Werte ergeben. Die Werte unterhalb der 5% Schwelle und oberhalb der 90% Schwelle wurden nicht gemessen (um die Batterien nicht unnötig zu strapazieren).

Die BFH hat parallel dazu die Entladezyklen ausgewertet.

##### Ergebnisse

Das Gesamtergebnis der 4 baugleichen Batterien, mit je 192 in Serie und 2 parallel verbauten WS NCM 125Ah – Zellen erfüllt im empfohlenen Leistungsbereich die berechnete und geforderte Kapazität (Energieinhalt) von 600 KWh.

Um die Batterien über die angestrebte Lebensdauer von 10 Jahren (im 6 Tage Einschichtbetrieb) einsetzen zu können, aber auch um die Rekuperationsfähigkeit des E-Dumpers nach einer «vollen» Ladung zu erhalten, werden die Batterien mit Netzstrom nur bis 90 Prozent geladen und nie unter 5 Prozent entladen. Die tatsächliche, d.h. 100 Prozent Kapazität der Batterien liegt entsprechend höher.

Aufgrund der Messungen der Berner Fachhochschule resultieren bessere und vor allem zuverlässigere Werte. Gemessen wurden die Entladeleistungen in einem SOC-Bereich zwischen 96 bis 100 Prozent (Durchschnitt 4.25 Prozent) und 1 bis 12 Prozent (Durchschnitt 99 Prozent) Total 593.06 KWh. Das ergibt eine Kapazität von **625.92 KWh**.



**Bemerkung:** Obschon die Gesamtkapazität über 600 KWh liegt, soll die leicht unterdurchschnittliche Kapazität der Batterie Nr. 2 beobachtet werden und falls künftige Messungen keine Angleichung an die Kapazitäten der anderen 3 Batterien zeigen ein Zellenpaar (oder ein Stack) ersetzt werden.

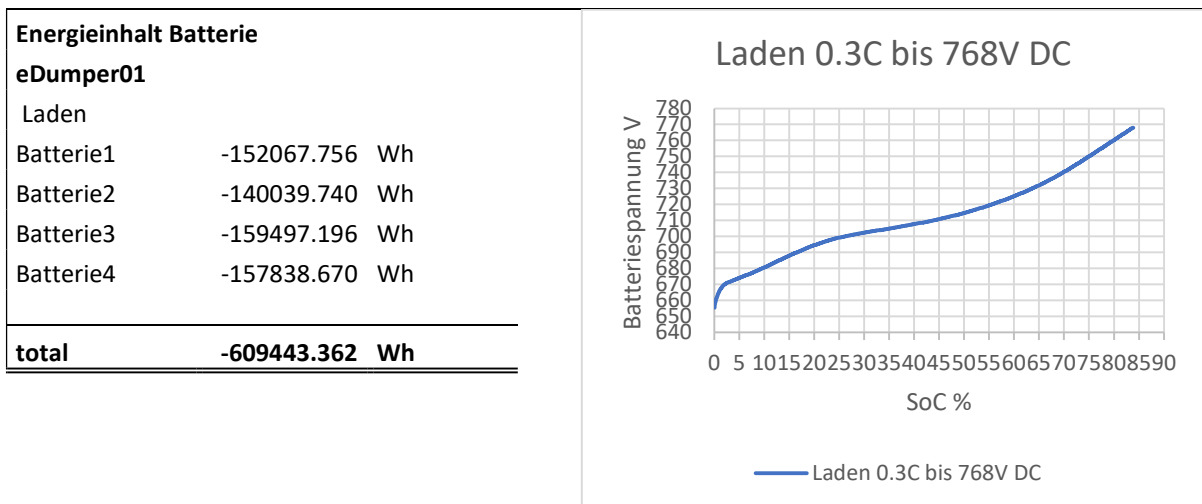
**Tabelle:** Auszug Messprotokoll

<b>Zellspannung:</b>		<b>minimal</b>	<b>nominal</b>	<b>oberer Wert</b>	<b>maximal</b>	
	Volt	3,0	3,7	4,0	4,2	
<b>Batterie:</b>		2P192S	4 Stück			
<b>Batteriespannung:</b>		minimal	nominal	oberer Wert	maximal	
	%	5%	65%	90%	100%	
	Volt	576	710	768		
<b>Lade- /Entladegerät:</b>		Refu 100 KW				
Entladestrom	A:	75A				
	C-Faktor:	0.3				
<b>Messreihe / Ergebnisse:</b>		Batterie 1	Batterie 2	Batterie 3	Batterie 4	
Datum:		13.09.2018	14.09.2018	15.09.2018	15.09.2018	
Uhrzeit: von		22:08	13:49	12:00	15:27	
Datum:		14.09.2018	14.09.2018	15.09.2018	15.09.2018	
bis		01:04	16:33	20:45	23:59	
<b>Ergebnis nach Ladephase Wh</b>		152067.756	140039.75	159497.196	157838.67	
<b>Messreihe / Ergebnisse:</b>		Batterie 1	Batterie 2	Batterie 3	Batterie 4	
Datum:		13.09.2018	14.09.2018	15.09.2018	15.09.2018	
Uhrzeit: von		22:08	13:49	12:00	15:27	
Datum:		14.09.2018	14.09.2018	15.09.2018	15.09.2018	
bis		01:04	16:33	20:45	23:59	
<b>Ergebnis nach Ladephase KWh</b>		146,9	134,7	158,3	153,16	<b>593,06</b>
SOC %		96 - 2	100 - 12	100 - 1	100 - 2	
SOC 100 % in Wh						<b>625.920844</b>



### 5.14.5 Messungen nach 2 Betriebsjahren

Die Batterien können wechselseitig ausmaskiert werden, was keine Messungen im Fahrbetrieb erlaubt (Fahrten mit nur 1 oder 2 Batterien sind nicht möglich).



<b>Energieinhalt Batterie</b> <b>eDumper01</b>	<b>Batterie Nr. Beginn Ende (ca.)</b>
entladen	Batterie1 13.09.2019 22:08 14.09.2018 01:04
Batterie1           145042.032 Wh	Batterie2 14.09.2019 13:49 14.09.2018 16:33
Batterie2           133361.281 Wh	Batterie3 15.09.2019 12:00 15.09.2018 15:27
Batterie3           156336.767 Wh	Batterie4 15.09.2019 20:45 15.09.2018 23:59
Batterie4           150787.931 Wh	Ladeende bei SoC 87%
<b>total</b> <b>585528.011 Wh</b>	

### Messungen 13.09.2020 bis 15.09.2020

nach 2350 Betriebsstunden, 380 Vollladezyklen = 12.6% der erwarteten Zykluslebensdauer (mind. 3000 Vollladezyklen in 10 – 12 Jahren):

<b>Batterie</b>	<b>Kapazität</b>	<b>Kapazitätsänderung nach 380 Zyklen</b>	<b>Speichereffizienzänderung</b>	<b>Bei SOC</b>
<b>1</b>	133.1 KWh	Minus 9.4%	Minus 2.30 %	6-98% bzw. 98-7%
<b>2</b>	140.9 KWh	Plus 4.6 %	Plus 1.76 %	4-100% bzw. 100-4%
<b>3</b>	130.0 KWh	Minus 17.9 %	Minus 1.07 %	98-11% bzw. 11-98%
<b>4</b>	131.2 KWh	Minus 14.3 %	k.A.	11-98% bzw. 97-11%
<b>1 - 4</b>	<b>535.3 KWh</b>	<b>Minus 9.8 % 1/- 2.35%</b>	<b>Minus 0.53 % +/- 4.5%</b>	



**Kommentar:** Bei der Serienschaltung von Einzelzellen wird die Gesamtkapazität der Batterie durch den Effekt limitiert, dass die Zelle welche beim Entladevorgang die tiefste Zellspannung aufweist, die ganze Batterie limitiert. Das heisst sobald eine Zelle des ganzen Packs das untere Spannungslimit von 3.1V erreicht hat, die ganze Batterie den Zustand «entladen» anzeigt, obwohl alle anderen Zellen noch über nutzbare Kapazität verfügen. Dieser Effekt wird dadurch abgemindert, dass die einzelnen Zellpaare untereinander «gebalanced» werden. Durch diesen Vorgang werden alle Zellen bei jedem Volladevorgang auf dasselbe Spannungsniveau angehoben.

Dieser Angleichvorgang (der erst bei voller Ladung zum Tragen kommt) konnte in den letzten Monaten vor der Messung aufgrund der installierten (nur beschränkt funktionierenden) Ladestation nicht ausgeführt werden. Dies begünstigte ein «absacken» einer einzelnen Zelle im ganz entladenen Zustand und erklärt somit das beobachtete Phänomen, dass die Kapazität scheinbar stark abgenommen hat.

Weiterhin war der effektive Entladestrom um rund 6% höher, was den Entladeschlussvorgang bei der Messung ebenfalls beschleunigt.

**Folgerung:** Grundsätzlich kann unter Berücksichtigung der genannten Effekte und des Batteriealters gesagt werden, dass sich der Energiespeicher des eDumpers am 15.09.2020 in einem guten Zustand befindet.

#### **5.14.6 Prognose der Einsatzdauer der vier Batterien: 12 - 15 Jahre**

Beim aktuellen Fahrprogramm bei Ciment Vigier kann mit einer Lebensdauer der Westart Zellen von 12 bis 15 Jahren gerechnet werden, womit ein Batteriesatz bis zur nächsten grossen Maschinenrevision ausreichen wird. Voraussetzung sind keine forcierten Fahrbedingungen (fahren bei 40 Grad und mehr, tiefentladen der Zellen usw.). Die Standard-Einstellungen erlauben solche Fahrzustände jedoch nicht.

Im Hinblick auf das Angebot für Maschine Nr. 2 für Vigier haben wir versucht, eine Prognose für die voraussichtliche Lebensdauer anhand der Erfahrungen und der gemessenen Werte zu machen.<sup>16</sup>

**Bemerkung 1:** Die Zellen haben nach 10 Jahren noch einen Restwert von in der Grössenordnung 20% des aktuellen Beschaffungswertes und könnten z.B. für Grid – Storage eingesetzt werden.

**Bemerkung 2:** Ein Wechsel von einer oder mehreren Zellen innerhalb des Lebenszyklus von 10 Jahren kann aufgrund eines Wechsels innerhalb der Garantie-Zeit nur geschätzt werden. Eine Westart-Zelle, so wie derzeit noch in kleiner Stückzahl vorrätig, kostet rund CHF 300. Bei 1'536 verbauten Zellen sollte innerhalb der 10 – 13 Betriebsjahre trotz Qualitätstests nach der Herstellung und vor dem Einbau mit einigen wenigen Ausfällen gerechnet werden. Kostenmässig fällt der Ein- und Ausbau sowie der Transport höher ins Gewicht, als die Kosten der Zellen.



## 5.15 Sicherheitsanalyse

### 5.15.1 Massgebende Normen:

- DIN EN 62660-2: Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostrassenfahrzeugen - Teil 2: Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung
- SAE J 2464: Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing
- UN 38-3: Transport of dangerous goods - Teil 3: Lithium metal and lithium ion batteries
- ECE-R 100: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Bauweise und die Betriebssicherheit
- ECE-R 16: Fahrzeuge mit Sicherheitsgurten, Rückhaltesysteme, Kinder-Rückhaltesysteme und ISOFIX-Kinder-Rückhaltesysteme
- DIN EN ISO 3449: Erdbaumaschinen – Schutzaufbauten gegen herabfallende Gegenstände – Prüfungen und Anforderungen
- VW 80'000: Volkswagen - Elektrische Eigenschaften und elektrische Sicherheit von Hochvolt-Komponenten - Anforderungen und Prüfungen
- DC-10611 Rev-A: Electrical/Electronic Component Environmental Testing specifications
- ISO 12405-2: Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems
- ISO 12405-3: Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems
- ISO 16750-3: Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment

### 5.15.2 Mechanische Anforderungen an den E-Dumper

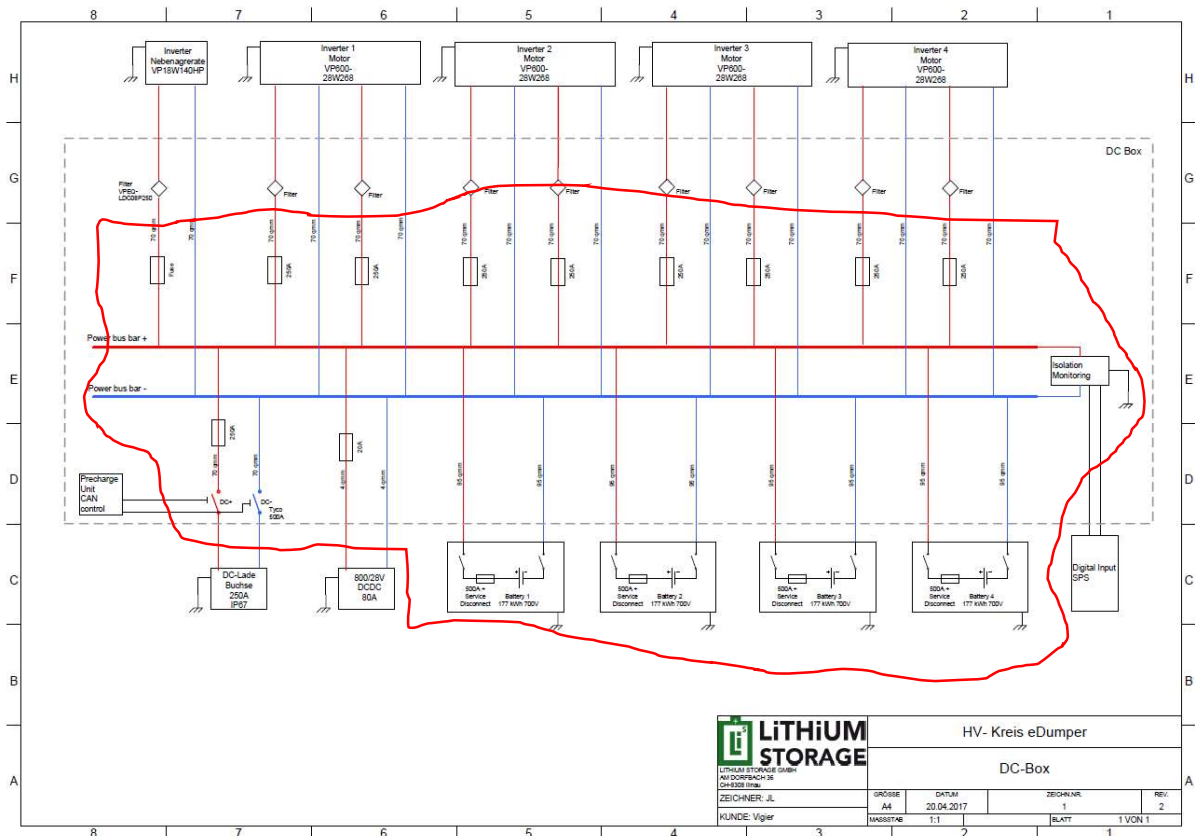
Datum:	März 2017
Ort der Studie:	NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs Institut für Entwicklung Mechatronischer Systeme EMS
Autoren:	Alfred Gadola, Prof. Dr. Max Stöck
Anhang 5:	<b>Mechanische Anforderungen an den E-Dumper</b>

Die Sicherheitsanalyse bezieht sich auf Personengefährdungen, die zusätzlich durch die Verwendung einer Batterie als Energiequelle entstehen, und erfolgt in Anlehnung an die Norm 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 Stilllegung (B9), Fz Unfall Fahrbetrieb (B10, Fahrer handlungsfähig), Fz Unfall Fahrbetrieb (B11, Fahrer nicht handlungsfähig).

### 5.15.3 Systemgrenzen der Batterie-Sicherheitsanalyse



**Batterie im Gehäuse inkl. DC-Box mit Sicherungen, Contactors, ISO-Monitor, Anschlüsse bis Precharge Unit, DC Ladebuchse, DC/DC, Inverter 1-4.**

### 5.15.4 Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung

Datum: Juni/ August 2017

Ort der Studie: EMPA Materials science and Technology

Autoren: Marcel Held

Anhang 9: **Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung des Batteriesystems E-Dumper**

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, d.h. thermisch durchgeht. Dies kann zur Entwicklung von potentiell 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 durch einen Funken entzündet werden. Im schlimmsten 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 750V betrieben wird, verursacht werden könnten.

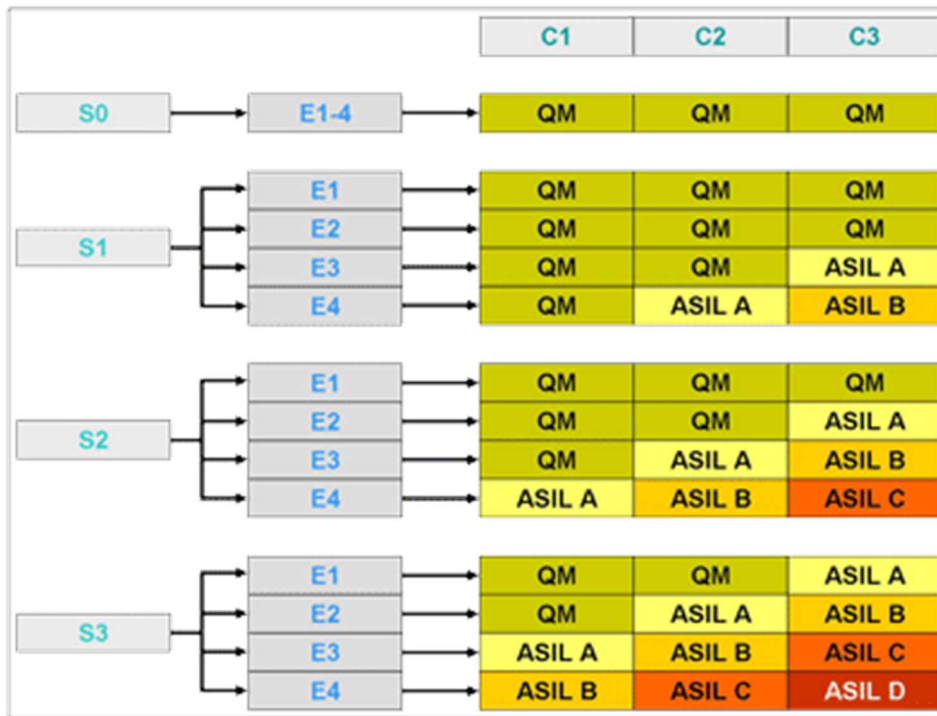
**Tabelle: Gefahrenquellen und Gefährdungen**

Nr.	Gefahrenquelle	Gefährdung
G1	BM x Rauch/ Gasaustritt in Umgebung	Rauchvergiftung Fahrer
G2	BM x Rauch/ Gasaustritt in Umgebung	Rauchvergiftung Umstehende
G3	BM x Verpuffung	Druck auf Fahrerkabine
G4	BM x Verpuffung	Druck auf Umstehende
G5	BM x heiss	Verbrennung Fahrer
G6	BM x heiss	Verbrennung Umstehende
G7	BM x brennt	Rauchvergiftung Fahrer
G8	BM x brennt	Rauchvergiftung Umstehende
G9	BM x brennt	Verbrennung Fahrer
G10	BM x brennt	Verbrennung Umstehende
G11	Fz brennt durch BMx Brand	Rauchvergiftung Fahrer
G12	Fz brennt durch BMx Brand	Rauchvergiftung Umstehende
G13	Fz Teile unter Hochspannung	Stromschlag Fahrer
G14	Fz Teile unter Hochspannung	Stromschlag Umstehende

Die potenziellen Gefährdungen werden dann für alle Betriebsarten untersucht und ihr Risiko beurteilt. Die Risikobewertung teilt potentielle 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 Tabelle 2 jeweils die ASIL (Auto motive 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.



### ASIL, Bestimmung nach ISO 26262



Die Auswertung ergibt für die Gefährdungen G9 und G11 im Betriebszustand B11, bei der der Fahrer nicht mehr handlungsfähig 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.

Dazu wurde von der EMPA 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, siehe Bild 9. 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. Das thermische Durchgehen bewirkte aber keinen Brand und keine Ausbreitung auf die Nachbarzellen.



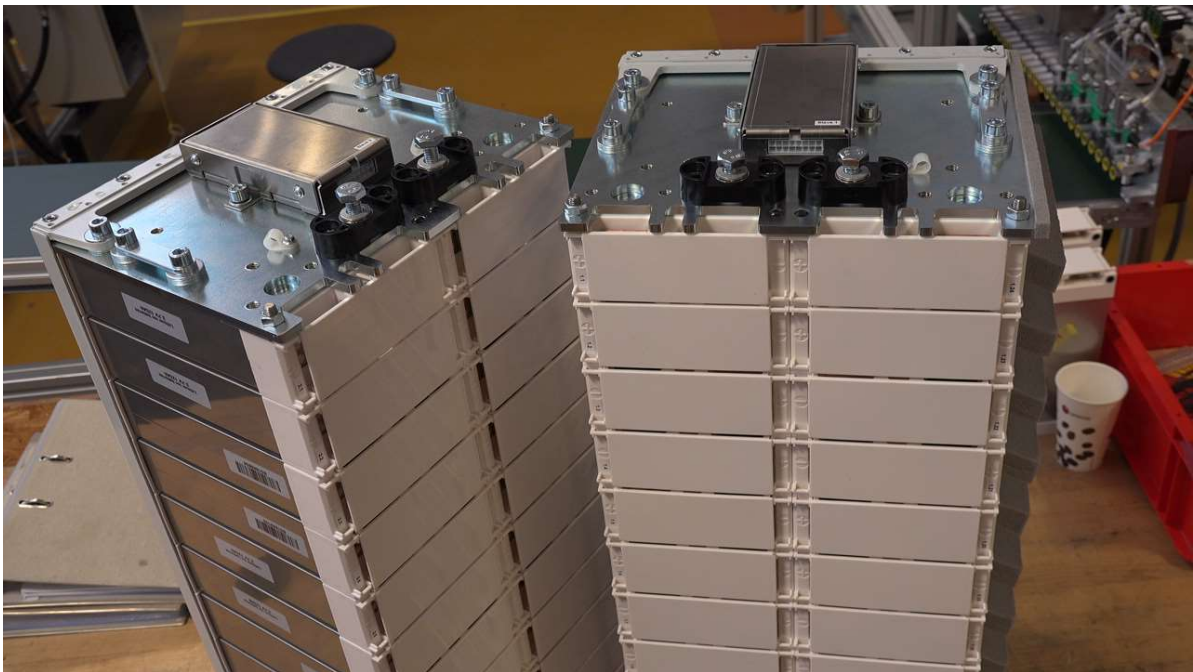
### 5.15.5 Brandversuche

Datum: 21.09.2017

Ort der Studie: EMPA Materials science and Technology

Autoren: Marcel Held

Anhang 10: **Brandversuche Westart Zellen**



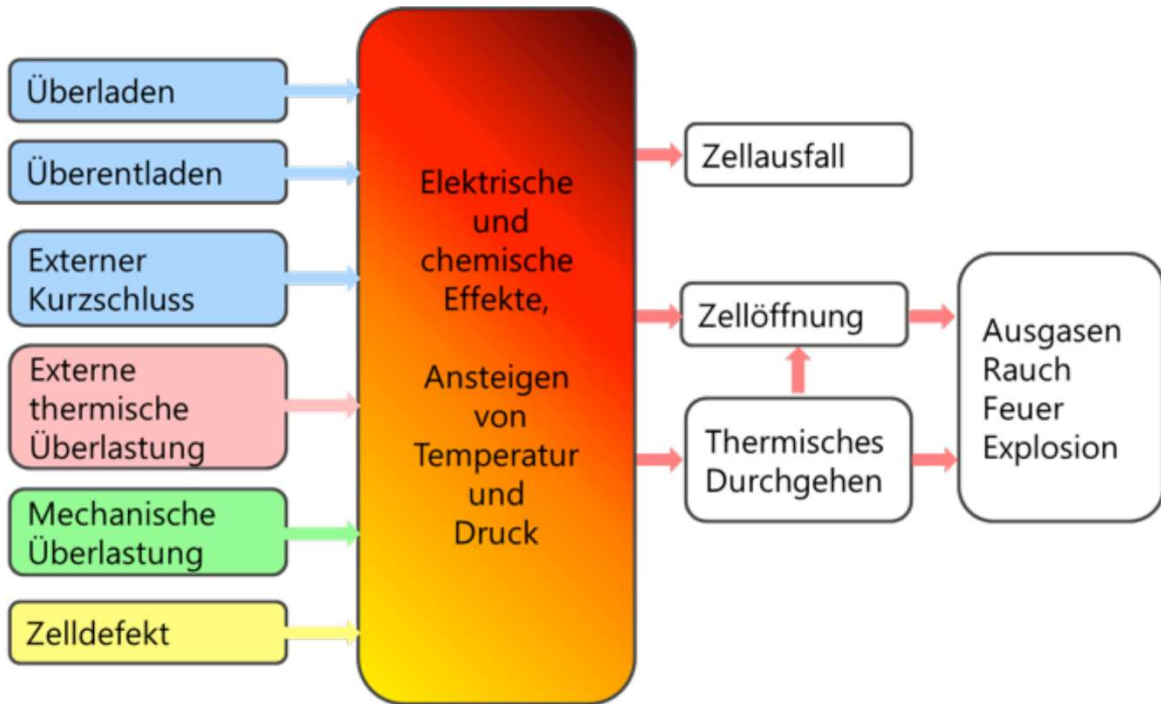
#### ***Thermisches Durchgehen und Ausbreitung***

Das Batterie-Management-System (BMS), das die Lithium-Ionen-Zellen überwacht, misst kontinuierlich sämtliche Zellspannungen, Temperaturen in den Zellstacks, begrenzt 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. 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.



### Ausfallmechanismen von Lithium-Ionen-Zellen



Zellenanordnung für den Ausbreitungstest

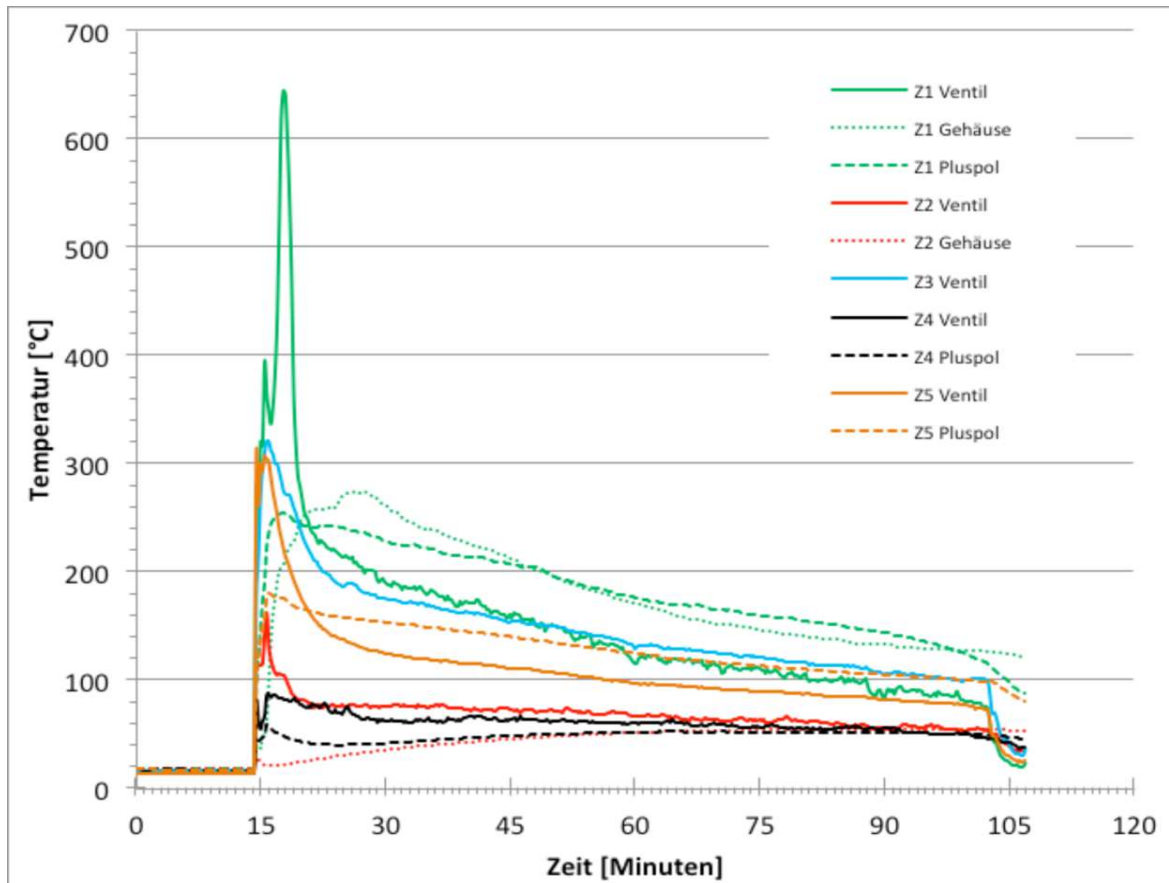


Montage Batteriestack (16 Batteriestacks pro Batterie) bei der Schaltag AG

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, siehe Bild 9. 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. Das thermische Durchgehen bewirkte aber keinen Brand und keine Ausbreitung auf die Nachbarzellen.



### Temperaturen beim Ausbreitungstest, Zellen nach dem Ausbreitungstest



Gemessene Temperaturverläufe während des Tests: Gasaustritt bei den Überdruckventilen mit 640 Grad, Gehäuseflächen und PLUS Pol 280 Grad, jedoch kein Bersten und keine Kettenreaktion auf die Nachbarzellen



### 5.15.6 Druckentlastung Batteriegehäuse

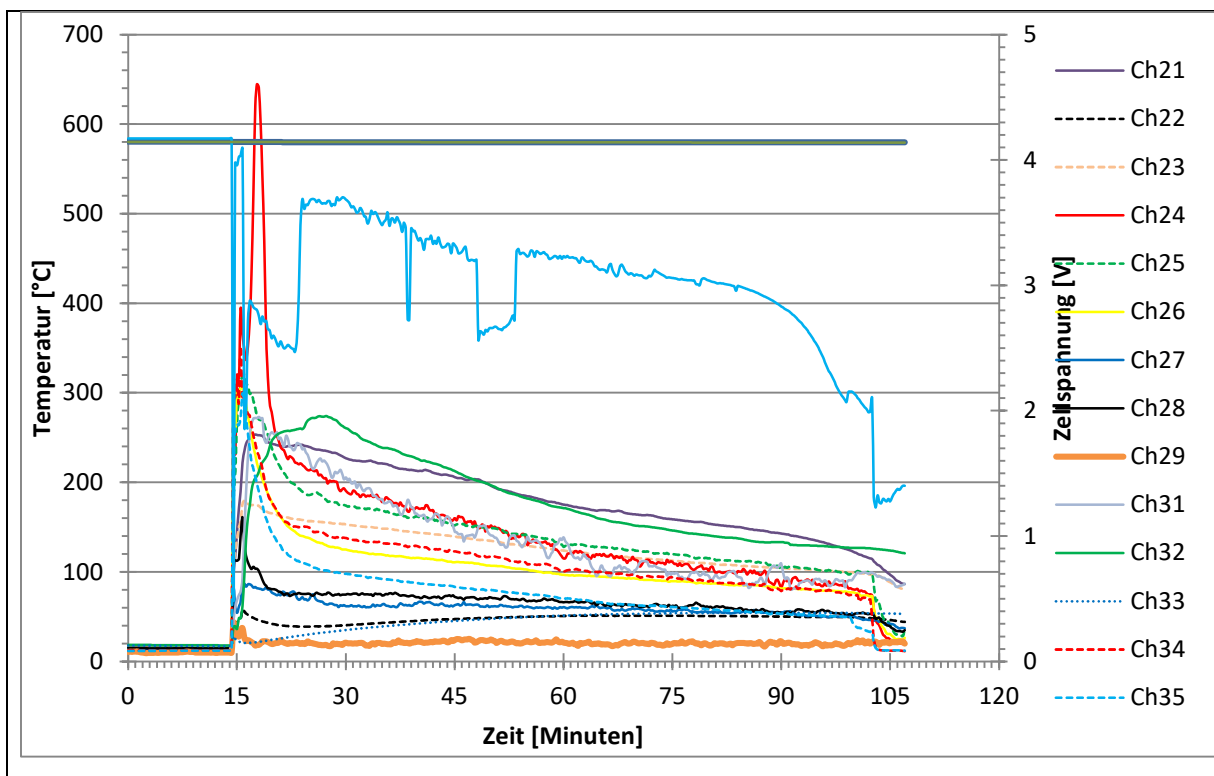
Datum: 12.09.2017

Ort der Studie: EMPA Materials Science and Technology

Autoren: Marcel Held

Anhang 11: Druckentlastung Batteriegehäuse

Messungen bei Kurzschluss Zelle 1; Quelle EMPA



### 5.15.7 Steuerung

Die Vorteile der Elektromobilität können dann optimal genutzt werden, wenn die Steuerung der Gesamtanlage und der einzelnen Teilaggregate reibungslos funktioniert.

Im E-Dumper kommen zum Einsatz:

- Die ursprüngliche von Komatsu, inkl. ABS, ASR und Überwachung der Fahrzeuganlage
- Eine übergeordnete SPS von Siemens
- Ein Murphy für die Steuerung der Elektroanlage und Interface zu Fahrer und Ladeinfrastruktur und Batteriemangement (BMS)

Praktisch alle Teilkomponenten verfügen über eigene Steuerungen. Es galt also, die verschiedenen Protokolle und Schnittstellen auf einander abzustimmen. Die dafür zur Verfügung stehenden Spezialisten sind allesamt Kleinstfirmen oder Einzelpersonen. Ein Glücksfall war die Kompetenz von Lukas Blaser, Kuhn AG, der im Rahmen seiner Weiterbildung das E-Dumper Projekt und

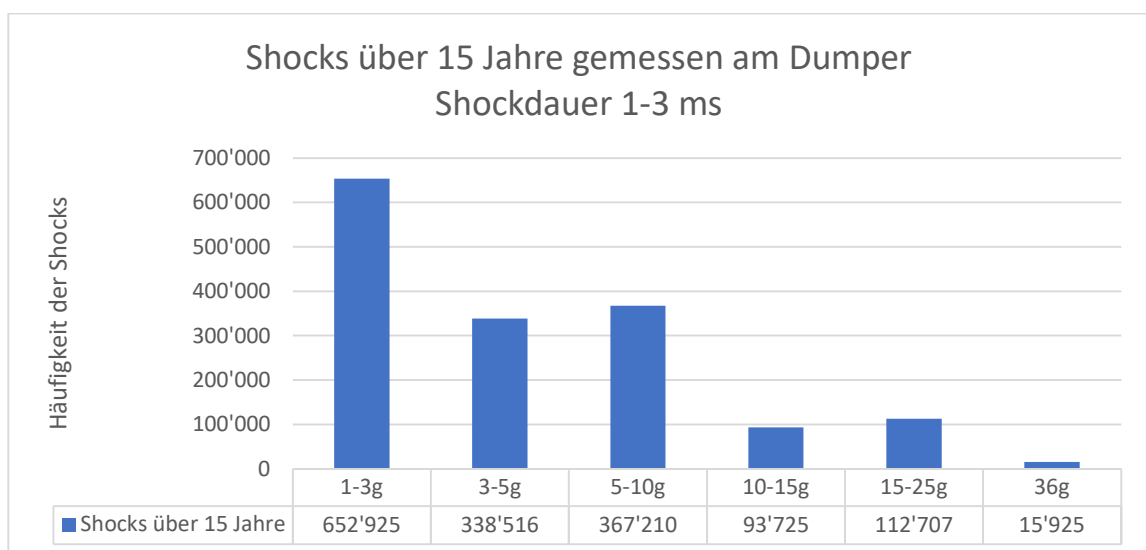


insbesondere dessen Steuerung analysieren und optimieren konnte, sowie Johannes Lohmeier, Lithium Storage GmbH, der erstens den Dialog mit den anderen IT-Spezialisten sicherstellen konnte, selbst aber auch die in der Murphy-Steuerung zu parametrisierenden Werte den aktuellsten Projektfortschritten anzupassen. Die Quellencodes einiger Schlüsselkomponenten wurden jedoch nicht herausgegeben und führten mehrfach zu aufwändigen Interventionen, wenn es darum ging, logische Schritte in den Alltagsroutinen anzupassen. Als bisher nicht gelöste Knacknuss erwies sich der REFUdrive 100 als Lade-/Entladegerät, in dessen internen Prozess offensichtlich ein Bug versteckt ist. Da aber der Entwickler dieser spezifischen Software bereits nicht mehr bei der Lieferfirma arbeitet, konnte der Bug nie behoben werden.

### 5.15.8 Modifizierte/nicht modifizierte Bereiche aufgrund der Sicherheitsanalyse

#### 5.15.8.1 Chassis

- Das Chassis wird integral übernommen, die Aufhängungen für die Batterien belasten den Chassisrahmen zusätzlich; im Bereich Antrieb (Motor und Getriebe) werden mit dem Dieselantrieb vergleichbare Torsionkräfte erwartet.
- Das statische Leergewicht wird weiter nach vorne verschoben (Motor in der Mitte etwas leichter, Batterien mit hohem Gewicht weiter vorne)
- Die Kippvorrichtung wird integral übernommen, deren Antrieb via Hilfs - Elektromotor und neuer Hydraulikpumpe gespiesen.



#### 5.15.8.2 Antriebsstrang

- Die Hinterachse mit Differenzial und Planetengetriebe wird bis und mit Kardanwelle integral übernommen
- Der Dieselmotor wird durch einen Elektromotor mit kleineren Gewicht ersetzt; die Bremsleistung mittels Rekuperation wird erhöht
- Das 6-Gang-Getriebe wird durch ein 2-Gang Planetengetriebe 1:3.5 ersetzt; ein Gangwechsel im Fahren unter Vollast ist erwünscht, jedoch nicht mit Sicherheit möglich.

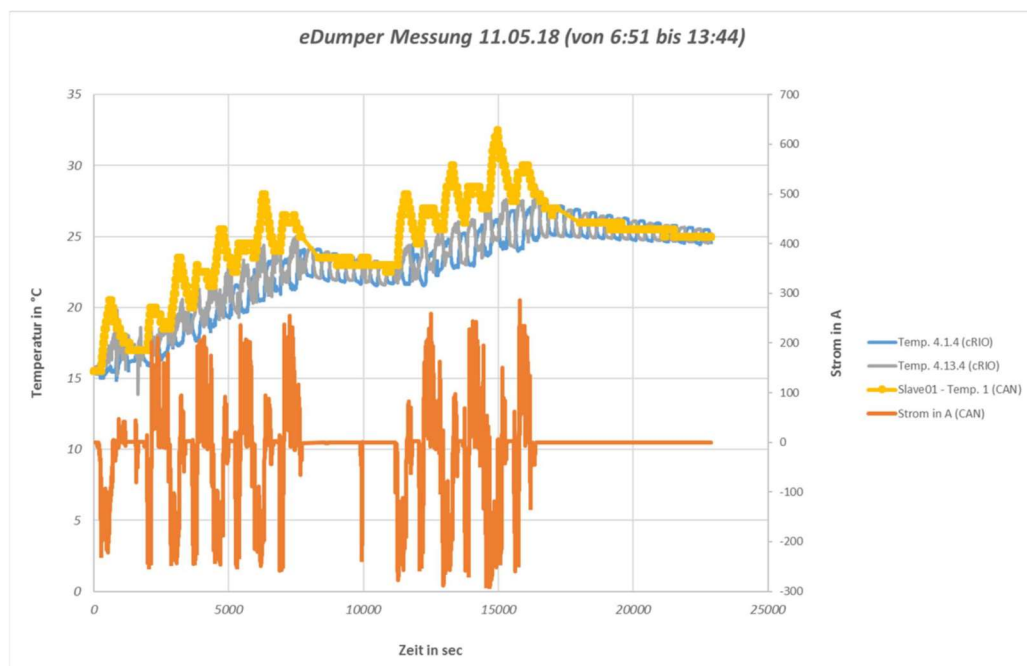


### 5.17.8.1 Bremsanlage

- Die Bremsanlage (Lamellenbremse mit Ölkreislauf und Rückkühlung in einem Luftgekühlten System) wird integral übernommen
- Mit Öldruck entspannte Federn lösen die Lamellenpakete (wie bisher); für diese zusätzliche Bremsvorrichtung steht dem Fahrer ein zweites Bremspedal zur Verfügung
- Der Öldruck und der Kühlkreislauf wird durch einen 120KW Hilfsmotor angetrieben
- Neu ist die Bremsleistung im Fahrbetrieb mittels Rekuperation der Energie über den Motor als Generator und laden der Batterien via Aradex-Inverter beträchtlich höher als im Betrieb mit Dieselmotor; Phase 1 dieses Bremsvorgangs wird mittels Loslassen des Leistungspedals ausgelöst.
- Die im BMS Parameter garantieren im Dauerbetrieb die volle Performance der Maschine. Limitiert ist diese im Betriebszustand Motor als Generator, nämlich bei Talfahrt, vollbeladen beim Anbremsen vor einer Kurve; hier wurden Leistungen von – 1000 KW und mehr gemessen, was bedeutet, dass auf die Lamellen-Bremsanlage nicht ganz verzichtet werden kann.
- Die mit den Lamellen-Bremsen beeinflusste Fahrgeschwindigkeit führt jedoch zu einem Energieverlust und wird nach Möglichkeit vermieden (das erhitzte Kühlöl wird im Ölkühler rückgekühlt).

### 5.17.8.4 Kühlanlage

- Die Kühlanlage für den Dieselmotor (Glycol/Wasser über Luftkühler) fällt weg
- Die Kühlanlage für Turbolader und Ölschmiersystem des Motors fallen weg



- Die Ölkühler für den hydraulischen Antrieb der Kippvorrichtung, Bremsunterstützung und Lenkung bleibt erhalten
- Der Rückkühler des Kühlkreislaufs der Lamellenbremsen bleibt erhalten
- Neu müssen Elektromotor, Getriebe, Wechselrichter und ev. Batterien gekühlt werden



- Die Kühlanlage wird mit neuen Pumpengruppen von vorne Mitte nach oben rechts auf dem Fahrzeug montiert
- Das Fahrzeug wird vorbereitet und die allfällige überschüssige Abwärme der Batterie - Luftkühlanlage mittels Glycol/Wasser rückzuführen, allenfalls zu beheizen

#### **5.17.8.5      Energiespeicher**

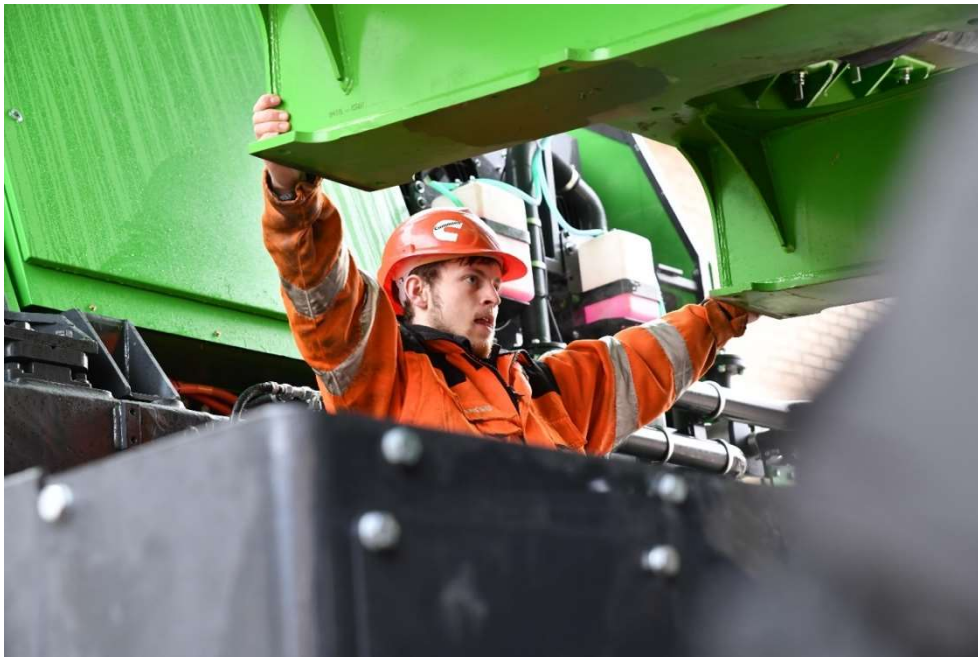
- Der Dieseltank fällt weg
- Neu werden 4 Batterien montiert, zwei auf tiefer Ebene im Zentrum, eine darüber liegend und eine seitwärts rechts
- Die Batterien werden luftgekühlt
- Die Batterien sind mit Wärmesensoren ausgerüstet

#### **5.17.8.6      Fahrzeug - Elektrik**

- Die 24V - Anlage wird integral übernommen  
Die 24V – Batterien werden über einen 5KW DC-DC-Wandler geladen

#### **5.17.8.7      Mulde**

- Die Stahlmulde wird durch eine Stahl/Nylon/Gummimulde ersetzt
- Die Gummimulde hat eine Aufbördung vorne, die auch als Überrollschutz funktioniert
- Die Ladekapazität wird leicht erhöht (65-70 Tonnen)
- Die Heizung der Mulde (via Abgasstrom) fällt weg





#### 5.17.8.8 Steuerung / Interfaces zum Fahrer

- Der elektrische Antrieb wird mit einer Murphy - Steuerung geregelt; der bisherige Bordcomputer wird durch eine SPS ersetzt. Dies zur Auswertung von Sensorensignalen, Anzeigen für den Fahrer sowie Steuerung der Fahrzustände inkl. WLAN und LTE Verbindung. Die Betriebsdaten werden damit in Echtzeit an Vigier/Kuhn übermittelt.
- Zusätzliche Rückfahrkamera und seitliche Abstands-Messanzeigen
- Automatische Kommunikation Fahrer - Fahrzeug – Grid
- Die Ladeanzeige / Waage wird übernommen
- ABS und ASR werden übernommen

#### 5.17.8.9 Laden / Entladen

- Die Batterien werden zu zwei Dritteln bei Talfahrt mittels Rekuperation geladen; die Batterien können auch mit Landstrom über ein DC-Ladekabel geladen werden (max. 100KW) und die Batterien könnten den Überschussstrom über dasselbe Kabel über einen bidirektionalen Wechselrichter ins Netz einspeisen
- Die zu erwartende Leistung von 100KW wird mittels Wechselrichter 600VDC – an das 230/400VAC – Netz abgegeben. Drei Möglichkeiten wurden geprüft (A: DC – Leitung bis zum Mittelspannungstrafo, B: 400VAC – Leitung bis um Tunnelausgang (wo sich ein 15 KVAC – 400VAC Trafo hoher Leistung befindet und C: 600VDC bis Wechselrichter, 400VAC / 500VAC – Trafo auf der Höhe des E-Dumper – Standplatzes; Einspeisung ins 500VAC – Netz, bestehend); die Lösung C. wird realisiert
- das Kabel E-Dumper – Grid führt Plus und Minuspol sowie N, zudem zwei Pilotkontakte, die bei Trennung des 100A Steckers die gesamte Verbindung stromlos schaltet.
- Da in der Regel kein Überschuss zu erwarten ist, wird grundsätzlich nur geladen. Für Servicearbeiten an der Batterie (Zyklisierung der Batterien) wird die Entladefunktion beibehalten. Derzeit ist noch nicht entschieden, welche definitive Lösung installiert wird.
- Dass ein Energie PLUS Betrieb – quasi ein perpetuum mobile - immer noch nicht erreicht wird, tut diesem Erfolg keinen Abbruch. Mit dem E-Dumper kommen alle Vorteile des batterieelektrischen Betriebs zum Tragen. Bis dato überfordert sind wir mit der Ladeinfrastruktur. Ein E-Dumper kann nicht einfach wie ein Tram oder ein Elektrobus an einer zentralen und geschützten Stelle aufgeladen oder entladen werden. Im Winter und an Wochenenden müssen die Batterien beheizt, im Vollbetrieb und im Sommer gekühlt werden. Die dazu benötigte Technik wird erst ab 2020 zur Verfügung stehen.
- Im Vordergrund steht eine zentrale Ladeinfrastruktur auf der Basis eines Aradex Wechselrichters mit den erforderlichen Drosseln und einer einfachen Kommunikation mit dem Grid und den E-Dumpfern. Die voraussichtlich rund 80 KW reichen aus, um zwei E-Dumper sequenziell zu laden.



#### **5.17.8.10 Batterie Management**

Das Batterie Management System, BMS, wurde vom Team Esoro, Innovation, Engineering, Prototyping übernommen. Es liefert die relevanten Daten an das Murphy (Energiemanager), zu Händen des Fahrers, des Fahrmanagers und des Fernwartungssystems.

Das Batterie-Management-System (BMS) ist ein wesentliches Bauteil, das die Langlebigkeit der Batterien mitbestimmt. Es überwacht die Lithium-Ionen-Zellen kontinuierlich und sämtliche Zellspannungen sowie die 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, Unterentladen und externer Kurzschluss verhindert oder unter Kontrolle gehalten werden.

Das BMS kommuniziert mit dem Murphy – Kontroll- und Anzeigegerät in der Fahrerkabine. Ursprünglich war auch eine Kommunikation mit dem Ladegerät installiert, die jedoch nur mit dem 100KW – Gleichrichter funktioniert, der zwischenzeitlich ersetzt wurde. Die C-Raten-Limiten sind Temperatur abhängig eingestellt:

- Die C-Raten Limits für Batterietemperaturen von 0°C bis 30°C sind für den Ladevorgang (vollbeladene Talfahrt) auf max. 3C gesetzt, um die Bedingungen für eine Lebensdauererwartung der Batterien von mind. 3000 Vollladezyklen bis sogar 5'000 möglichen Zyklen nicht in Frage zu stellen.
- Über 30 Grad: L:1.5C CCL 0.5C
- über 38°C: DCL 0C CCL 0C (= Abschaltung)

Die Gesamtkapazität der Batterien wurde gemäss den zu erwartenden Lade- und Entladeströme dimensioniert. Die tatsächlich dan gemessenen Ströme sind weitgehend vom Fahrprofil und vom Fahrverhalten des jeweiligen Fahrers abhängig. Die speziell geschulten Fahrer versuchen mittels ihrem Fahrverhalten 3C – Zustände zu vermeiden und, falls sie doch aufzutreten drohen, die Lamellenbremsanlage einzusetzen. Diese Energie kann dann allerdings nicht rekuperiert werden, sie wird über die Kühler abgegeben. Da dies über die bereits beim Dieselfahrzeug vorhandene, jedoch umgebaute Anlage erfolgt, kann sie auch nicht für die Kabinenheizung eingesetzt werden.

#### **5.17.8.11 Sicherheit und Komfort**

- die Fahrerkabine wird mit einer Wärmepumpe gekühlt/beheizt, programmierbar mit Vorwärmfunktion am Morgen
- Radio / CD / Funk / Rückfahrkamera bleibt erhalten
- Im Kabinenbereich werden zwei Atemmasken für den Fall einer Gasentladung von Batteriezellen eingerichtet
- die Fahrzeugbeleuchtung und Kabinenbeleuchtung werden übernommen
- Die Wannenaufbordung fungiert als Überrollschutz
- Für die Inbetriebnahme mit Begleitpersonal werden neben der Kabine Befestigungen angebracht
- Das Fahrzeug wird mit LED – Scheinwerfern ausgerüstet



Einweihungsfeier im "La Tschärner"

## 6 Schlussfolgerungen und Fazit

Das Projekt konnte mit einer Verzögerung von bloss 4 Monaten gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan erfolgreich durchgezogen werden. Im Gesamtsystem erwiesen sich Berechnung, Evaluation der Teilkomponenten und Konstruktion, grösstenteils auf Anhieb, als erfolgreich.

Die Messreihe der BFH zeigte früh auf (siehe Konklusionen Anhang 1), dass wegen diverser Faktoren ein Energie PLUS – Betrieb in der Praxis nicht erreicht werden kann. Der E-Dumper benötigt täglich netto gut 300 KWh elektrische Energie aus dem Netz, anstelle von 230 Lt. Diesel und lädt in der Regel in der Mittagspause auch noch etwas nach..

Der Zeitbedarf für Messungen, Forschung und Konstruktion war extrem knapp bemessen, weil Schlüsselkomponenten erst aufgrund der ersten Anforderungsprofile evaluiert und bestellt werden konnten.

Der E-Dumper wurde gebaut für 10 - 12 Betriebsjahre bis 2030; ein Wartungsvertrag über 10 Jahre sichert Ciments Vigier S.A. seine Werterhaltung. Aufgrund der Angaben der Batterie-Herstellerin und der empirischen Werte der ersten 24 Monate können sogar 12 bis 14 Jahre prognostiziert werden. Er hat damit allein wegen der Treibstoff und CO<sub>2</sub> – Einsparungen einen mehr als doppelten Wert gemäss TCO - Berechnung, gegenüber einem neuen, konventionell mit einem Dieselmotor angetriebenen Fahrzeug.



Der Umbau der ersten Maschine kostete bis und mit einem Jahr Testbetrieb TCHF 3'600. Der Marktwert einer gleichwertigen liegt in der Schweiz bei rund TCHF 2'200 bei 15'000 Betriebsstunden innert 12 Jahren mit einem Batteriesatz.

In 12 Jahren werden somit von einem E-Dumper 600'000 Liter Diesel weniger verbraucht, Wert: CHF 900'000, ohne Rekuperation entspräche das 5,9 GWh ; der E-Dumper braucht jedoch bloss 1,8 GWh ; Wert : CHF 90'000 (aktuelle Strompreis-Mix nachts, bzw. Dieselpreise ab Säule ohne die Minderkosten für die Kompensation von 1'560 Tonnen nicht ausgestossenes CO<sub>2</sub> zu berücksichtigen). Mit jedem weiteren E-Dumper multiplizieren sich diese Zahlen zu Gunsten der Umwelt.

Das Interesse der Medien und der internationalen Fachwelt war sehr gross und dauert an. Derzeit hat sich weder Ciment Vigier noch andere Grubenbetreiber für die Bestellung eines weiteren Exemplars entschieden

Im Vorfeld des Projektes konnten nicht alle Herausforderungen bewertet und Lösungen abgeschätzt werden; klar unterschätzt wurde zunächst die Tatsache, dass die Stahlmulden (im Winter) mit den Abgasen des Dieselmotors beheizt werden müssen um ein Verkleben/Anfrieren des Transportgutes mit der Stahlwanne zu verhindern, wurde in der Konsequenz unterschätzt. Alle alternativen Varianten mittels einer elektrischen Heizung, Rüttel-elementen, eingeschweissten zusätzlichen Längsprofilen oder einnieten von gebrauchten Förderband-Streifen waren nicht zielführend. Erst die Idee von Konrad Zaugg, eine australische Gummimulde, die er in Norwegen gesehen hatte, als Alternative einzusetzen war schlussendlich die passende Lösung. Diese konnte aber erst im Februar 2018 nach Péry-La Heute geliefert werden, erfüllte jedoch seither die Erwartungen. Ab Batterie hätte die benötigte Heizenergie nicht zugeführt werden können. Derzeit wird ernsthaft darüber nachgedacht, auch die Dieselmotoren, die noch einige Jahre im Tscharnen eingesetzt werden, ebenfalls auf Gummimulden umzurüsten.

*Der Abbau von Kalk- und Mergelgestein in der Grube Tscharnen bestimmt nicht die Dumper – Flotte. Derzeit wird das Gestein dort abgebaut, wo die vollbeladenen Dumper zu Beginn des Transports im vollbeladenen Zustand eine Steigung zu bewältigen haben. Deshalb ist das Ziel eines PLUS- Energie – Fahrzeugs nicht erreichbar. Derzeit fehlen pro Fahrt rund 5 KWh für den reinen Fahrbetrieb; rund 5 KWh werden zudem für die diversen Zusatzverbraucher (Heizung, Kühlung, Bremsdruck, Lenkung, Kippvorrichtung) verbraucht.*

*Die 24V – Anlage braucht Spitzen von bis über 5 KW während längerer Dauer (Servosteuerung, Hilfspumpe, Wärmepumpen usw.). Der DC-DC 630V – 24V musste nachträglich verstärkt werden.*

*Das Thermomanagement der Batterien wurde vorbereitet, jedoch wurde sowohl der zusätzliche Wärmebedarf (im Winter, um die Batterien an einem Wochenende auf einer Mindesttemperatur von 5 Grad Celsius zu halten) als auch der Kühlbedarf (im Sommer bei hohen Aussentemperaturen und Dauereinsatz, um die Batterien auf höchstens 30 Grad Celsius zu halten) erst spät realisiert. Sowohl Heizung wie Doppelkühlung sind nun montiert. Die Erfassung und Limitierung der Parameter erfolgt zuverlässig und sind dem Betrieb dienlich. Die Aktuatoren (Heizung/Kühlung muss für andere klimatische Bedingungen (>35°C) eine grössere Leitung aufweisen*

*Die Netzintegration, die viel zu spät angedacht und angepackt wurde. Die derzeitige Abhängigkeit von der Lieferantin REFU Electronic GmbH und die Tatsache, dass bidirektionale Wechsel-/und Gleichrichter mit 100 KW Leistung auf dem Markt kaum zu finden sind, führten zu einer langen Optimierungsphase, die noch andauert. Zu wenig Beachtung wurde auch der Qualität des in der Steingrube "La Tscharnen" installierten Stromnetzes geschenkt. Kurze Totalausfälle sind an der Tagesordnung und die Spannung und Frequenz des Netzes schwanken beträchtlich (über 20*



Prozent). Die Lieferantin der REFUdrive hat Nachbesserung der Installation noch im Jahr 2018 und dann eine Entscheidung, ob die Geräte im Frühjahr 2019 allenfalls ausgetauscht werden müssen. Um einen reibungslosen Betrieb des E-Dumpers zu gewährleisten wurde zudem eine zweite 30KW – Ladestation basierend auf einem Aradex Vectopower installiert, die eigentlich für E-Dumper Nr. 2 vorgesehen war.

Um ein Fahrzeug serienreif zu entwickeln, müsste die Anstossfinanzierung auf mehrere Fahrzeuge ausgedehnt werden. Da bis zu 40 Prozent der nicht amortisierbaren Mehrkosten durch die Schweizerische Eidgenossenschaft mitfinanziert werden, braucht es weitere Mäzene, selbst wenn der Prototyp bereits Serienreife erreicht, was schlussendlich eine Produktion weiterer Exemplare in der Schweiz zu verunmöglichen droht.

Das Verfahren für eine Mitfinanzierung ist nicht praxisnahe. Bei der Konzeption, Konstruktion und dem Bau eines Prototypen ändert die Planung in Bezug auf Zeit, Struktur, Konzeption und Kosten häufig, mehrmals und nicht voraussehbar. Beispiele: Während das Zusammenwirken von Motor, Getriebe, Wechselrichtern und Batterien nach kurzer Entwicklungszeit sich rasch als erfolgreich erwies, waren der Energiefluss auf den Fahrstrecken und das Versagen der Ladeinfrastruktur nicht voraussehbar, bzw. konnten erst nach einem längeren Betrieb im realen Umfeld auch erkannt werden. Nun müssten diese Erkenntnisse zu Korrekturen führen, was einen Zusatzaufwand bedeutet.

## 7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

*Trotz internationalem Interesse konnte bis 30.10.2020 keine Bestellung für eine typengleiche Nr. 2 vereinbart werden. Bei einer Einsatzzeit von 12 – 14 Jahren beträgt der Wert eines elektrifizierten E-Dumpers auf der Basis eines Komatsu HD 605-7 CHF 2,15 Mio. In der Schweiz können maximal 2 Exemplare parallel umgebaut werden. Eine Bestellung wird für nach 2020 erwartet. Die nur leicht modifizierte 2. Maschine könnte somit frühestens Ende 2021 ausgeliefert werden.*

*In der Schweiz benötigt die Zementindustrie pro Jahr 1-2 Exemplare des baugleichen Typs. Die dritte Maschine, sofern sie bis Ende Q.1 2022 bestellt wird, dürfte deshalb ins Ausland verkauft werden. Aufgrund der Erfahrungen können kleinere Maschinen nicht mit derselben Technik umgebaut werden und würden ausserdem zu teuer. Hingegen kann die ganze Stromversorgungstechnik durchaus für grössere Maschinen, wie z.B. Starrrahmenmuldenkipper) mit Payload 100 Tonnen Klasse oder sogar darüber, eingesetzt werden.*

*Von besonderem Interesse ist dabei die Entwicklung einer Antriebsachse mit 2 eingebauten Motoren, Bremsen inkl. ASR undn ABS. Bisher hat sich jedoch noch kein potenzieller Hersteller definitiv bereit erklärt, die Entwicklungskosten einer solchen integrierten Achse zu übernehmen. Diese werden auf mehrere Millionen Euro geschätzt.*

*Immer strengere Umweltauflagen werden eines Tages die aus heutiger Sicht knapp gedeckten Produktionskosten rechtfertigen. Da diese jedoch heute noch nicht anwendbar sind, wird sich die Industrie hüten, die Zusatzkosten zu eigenen Lasten voreilig und freiwillig zu übernehmen. Die Mehrkosten der Prototypen können somit noch eine Weile nicht auf eine Serienproduktion überwältzt werden. Es sei denn, es werden gleich mehrere Maschinen bestellt, die dann in einem Lohnkosten günstigeren Land umgebaut werden könnten. Für dieses durchaus denkbare Szenario ist allerdings der Knowhow – Transfer und der administrative Zusatzaufwand weder geplant noch kalkuliert worden.*



*Bei einer reinen TCO – Wert-Berechnung darf eine umgebaute Komatsu HD 605-7 die doppelten Kosten (gegenüber der Dieselverson) nicht überschreiten. Allein eine CO2 Abgabe von bis zu CHF 130 pro to würde den Wert eines E-Dumpers um CHF 200'000 steigern.*

*Im Ausland haben die Maschinen im Schichtbetrieb in der Regel höhere Betriebszeiten pro Jahr und damit eine entsprechend geringere Lebenserwartung (v.a. wegen der Batterie-Alterung und den noch verbleibenden Verschleisssteilen, wie Lager, Bremsen und Rissen in der Metallkonstruktion. Die elektrische Version kann wegen der Ladezeiten bloss im Zweischichtbetrieb eingesetzt werden oder aber die Batterien müssten auf der Fahrstrecke oder zumindest bei den Entladepunkten und/oder in den Betriebspausen mit Schnellladern mit, je nach Fahrplan, 150-450 KW, nachgeladen werden.*

*Bei einem wesentlich anderen Geländeprofil, bei dem relativ weniger Bremsenergie rekuperiert werden kann, reduziert sich die Einsatzdauer wegen der von den Platzverhältnissen limitierten Batteriekapazität. Ähnlich wie beim elektrischen PKW-Betrieb kann eine künftig noch höhere Batteriekapazität einen Lösungsansatz darstellen. Bei der heute zur Verfügung stehenden Batteriechemie drängen sich jedoch Versorgungssysteme entlang der Fahrstrecken oder auch hier zumindest an den Wendepunkten als Alternativen zu den bereits verfügbaren dieselektrischen Systemen auf. Versorgungsleitungen, wie Oberleitungen und seitliche Schienen eignen sich in Bergwerken nur beschränkt und finden bei den Betreibern wenig Akzeptanz.*

*Für die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur im Steinbruch «La Tschanner» braucht es für den Dauerbetrieb, wie ihn Ciment Vigier praktiziert, eine Ladeleistung von mind. 50 KW, besser 80 KW pro Maschine. Für den Einsatz bei +/- 30 Grad Celsius, dem Staub, Wasser und den Vibrationen, die gemessen wurden, musste diese Ladeinfrastruktur nachträglich weiterentwickelt werden. Wie oben erwähnt, müssen für den 2- oder 3-Schicht – Betrieb Schnelladesysteme entwickelt werden und Grid seitig dazu Mittelspannung zur Verfügung stehen.*

Für die Schnellade-Infrastruktur ist die Verbindung mittels Hochleistungskupplungen eine Gefahrenquelle für das Personal. Dazu müsste eine Servovorrichtung entwickelt werden, pneumatische Bolzen oder Pantografen eingeplant werden (wie für die Gelenk-Elektrobusse im Agglomerationsverkehr). Induktive Ladesysteme oder Schleppkabel eignen sich im Bergbau-Betrieb kaum.

Realistisch gesehen, wird deshalb vor allem auch der Betrieb mit Wechselbatterien in Betracht gezogen. Diese hat einen weiteren Vorteil: Die Reservebatterien können, sofern sie in genügender Anzahl beschafft werden, zu Zeiten mit Elektrizitäts-Überschuss sehr kostengünstig oder gar gratis geladen werden. In diesem Kontext tauchen allerdings auch wieder Ideen (und sogar Prototypen) mit H2-Brennstoffzellen auf. Was sich, trotz im Vergleich mit Batterien wenig energieeffizienten Betrieb, im Mittelstreckenbereich für 18-Tonnen LKWs wahrscheinlich bewährt wird, könnte durchaus auch im Bergbau und in der Zementindustrie eingesetzt werden. Bei Letzterer aber eher bei der Verteilung der Endprodukte.

Für die Entwicklung künftiger Grossbatterien empfehlen wir, Parallelschaltungen von Zellen und Batterieblöcken möglichst zu vermeiden. Hersteller, Projektverantwortliche und vor allem auch Betreiberinnen von elektrischen Maschinen sollten darauf dringen, dass das einschlägige Knowhow des Batteriemangements offen, transparent und vor allem nachvollziehbar sowie vertraglich gesichert dokumentiert und aktualisiert wird.



## 8 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Der Prototyp eines 110 Tonnen Fahrzeugs beruht auf Schweizerischem Knowhow. Drei schweizerische Fachhochschulen haben wertvolle Erkenntnisse zum Bau beigesteuert. Die Originalmaschine ist japanischer Provenienz. Die Batterie-Zellen stammen aus China, wurden aber im Zürcher Oberland von der Fa. Schaltag AG zusammengebaut, das Steuergerät stammt aus den USA und wurde von einem deutschen Ingenieur in der Schweiz programmiert und sowohl der Antriebsmotor, als auch die Antriebswechselrichter wurden aus Deutschland importiert. Der Hilfsmotor, Kabel und Stecker wurden in der Schweiz hergestellt. Und der gesamte Zusammenbau erfolgte in Lommis (Fahrzeug) und Heimberg (Hinterachse).

Und schlussendlich gehört die auftraggebende Ciments Vigier S.A. zum Schweizerischen Konzern Vigier, seinerseits eine Tochter der französischen Vicat-Gruppe. Die Kuhn (Schweiz) AG ist eine Tochterfirma der Österreichischen Kuhn Gruppe.

Die weiteren Exemplare von elektrischen Komatsu – Dumpfern werden von der Firma eMining AG gebaut, einer weiteren Tochter der Kuhn-Gruppe.

Trotzdem: Ohne die Anstoss-Finanzierung des Bundesamtes für Energie, wäre dieses Projekt nicht zustande gekommen. Das Geld hat massgeblich dazu beigetragen, dass die Fachhochschulen NTB und BFH sowie die EMPA Aufträge erhalten haben. Mehr als die Hälfte des Aufwandes sind Lohnkosten der Fa. Kuhn (Schweiz) AG, die sich damit im Wettbewerb mit anderen Firmen, die ebenfalls Dumper anbieten, einen Wissensvorsprung sichert.



Medieninteresse anlässlich der Einweihungsfeier

## 9 Kommunikation

*Die Kommunikation wurde entlang der folgenden Prinzipien durchgezogen:*

- Das Projekt E-Dumper leistet einen Beitrag zur Umsetzung der nationalen Energiestrategie, insbesondere der CO<sub>2</sub> - Reduktion.
- Das Projekt E-Dumper ist ein Beitrag der Zementindustrie zur Energiewende. Zement als weltweit zweitgrösstes Primärgut (nach dem Wasser) ist der wichtigste Baustoff für alle notwendigen Umbauten, die eine nachhaltige Energieproduktion (und ein vernünftiger Energiekonsum) erfordert.
- Das Projekt E-Dumper kann mit seiner Ausstrahlung die Wahrnehmung der Medien, der Politik und der Bevölkerung zu den ökologischen Optimierungsmassnahmen der Industrie und deren Mobilitätsansprüche positiv beeinflussen und sichert darüber hinaus das Knowhow im Rahmen der universitären und der Schweizerischen Berufsausbildung sowie Arbeitsplätze aufgrund von Industriaufträgen im Rahmen der aktuellen Umwälzungen.



*Gummimulde mit 65 Tonnen auf Talfahrt*

**Die Ziele wurden insgesamt deutlich übertroffen:**

Über das Projekt E-Dumper wurde zeitnah und aktuell sowie periodisch und proaktiv informiert. Die wesentlichen Meilensteine des Projektes und die (Bild-) attraktivsten Phasen und Momente wurden in Bild, Text und Ton professionell dokumentiert.

Die Berichterstattung erfolgte in Absprache mit den Projektpartnern sowie des BFE.

Die Wissenschaft (insbesondere aber auch Forschung und Entwicklung in der Schweiz) kann von den Projekterfahrungen nachhaltig profitieren.

Die Chancen stehen gut, dass Komatsu Maschinen ohne Diesel - Motorisierung ausliefert, die Maschinen in Europa endgefertigt und von Komatsu zertifiziert werden.

Die Kernbotschaften wurden international wahrgenommen (insgesamt über 500 Berichterstattungen weltweit):

- Das grösste rein elektrische Baufahrzeug mit der grössten je in ein Pneufahrzeug eingebauten Batterie.
- Die Zementindustrie scheut keinen Aufwand, um ihrerseits den CO<sub>2</sub>-Ausstoss in der Schweiz zu reduzieren.
- Plus Energie ist nicht nur im Häuserbau möglich, allerdings müssen die topografischen Rahmenbedingungen erfüllt sein.
- Mit der intelligenten Elektrifizierung spielt die Schweiz wieder eine Rolle im Grossfahrzeugbau (nach der Rückkehr des Bahnbaus mit Stadler Rail und Hess im Trolleybus-Bereich)
- Die Berner Fachhochschulen in Biel-Bienne forschen seit Jahren erfolgreich im Bereich Elektromobilität und insbesondere Stromspeicher.



*Komatsu HD 605-7 und vollbeladener E-Dumper HD 605-7 vor der Metairie «La Tscharner»*

Die Kommunikationsinstrumente wurden aktiviert und genutzt:

- **Interne Kommunikation:** Die beteiligten Firmen und deren Mitarbeiter wurden regelmässig informiert und bei den Festlichkeiten anlässlich von Meilensteinen mit eingeladen (insbesondere vor dem Rollout in Lommis inkl. die lokalen Behörden und vor der Taufe und zur Namensgebung «Lynx», die im Rahmen einer Umfrage bei den Vigier – Mitarbeiterinnen erkoren wurde.
- **Internet:** Zwei Internetseiten über das Projekt stehen zur Verfügung: [emining.ch](http://emining.ch).
- **Social Media :** Die sozialen Medien werden von der Projektleitung und von einzelnen Fachspezialisten und den Ingenieuren der mitbeteiligten Forschungspartner genutzt.
- **Medienmitteilungen, Pressekonferenzen:** Zu den wesentlichen Meilensteinen (Projektstart, Preisverleihung, Rollout, Einweihung, Projektabschluss wurden je eine Medienmappe organisiert.
- **Bilddokumentation:** Während der gesamten Projektdauer wurden professionelle Fotos erstellt.
- **Videodokumentation:** Der Projektfortschritt wurde in Bild und Ton festgehalten. Über das gesamte Projekt (Forschung, Konstruktion, Tests, Einsatz in der Grube La Tscharner) gibt es kurze Dokumentarfilme.
- **Wissenschaftliche Publikationen:** Die Forschungspartner publizierten/dokumentierten ihre Forschungsergebnisse in Aufsätzen, Semesterarbeiten, Diplomarbeiten, wissenschaftlichen Beiträgen.
- **Internationale Anfragen/Berichterstattung:** Über den Projektverlauf wurde international (über 500 Mal) berichtet. Für Anfragen stand und steht der Medienbeauftragte (passiv) zur Verfügung.
- Im Vorfeld der Elektrofahrzeugmesse **eMove360** wurden in München am 16.10.2017 die gleichnamigen Awards für elektromobile Innovationen verliehen. Bei den Fahrzeugen gewinnt eMining für einen elektrisch angetriebenen Dumper den begehrten Award.



- **Im Zusammenhang mit dem eGrand Prix in Bern (Juni 2019) erstellte CNN einen Dokumentarfilm über den E-Dumper «Lynx» mit dem Audi – Fahrer Luca DiGrassi, der weltweit eine erhebliche Beachtung erzielte.**
- **Der E-Dumper wurde an der Baumesse 2018 in Bern und an der Battery-Show in Stuttgart 2019 ausgestellt.**

## 10 Publikationen, Ausstellungen und Awards

- Im Vorfeld der Elektrofahrzeugmesse eMove360 wurden in München am 16.10.2017 die gleichnamigen Awards für elektromobile Innovationen verliehen. Bei den Fahrzeugen gewinnt eMining für einen elektrisch angetriebenen Dumper den begehrten Award.
- Im Zusammenhang mit dem eGrand Prix in Bern (Juni 2019) erstellte CNN einen Dokumentarfilm über den E-Dumper «Lynx» mit dem Audi – Fahrer Luca DiGrassi, der weltweit eine erhebliche Beachtung erzielte.  
[https://www.facebook.com/watch/?v=2202230826541949&external\\_log\\_id=3ebfff586a173c9a699e610606e279ed&q=CNN%20DiGrassi%20eDumper](https://www.facebook.com/watch/?v=2202230826541949&external_log_id=3ebfff586a173c9a699e610606e279ed&q=CNN%20DiGrassi%20eDumper)
- Der E-Dumper wurde an der Baumesse 2018 in Bern und an der Battery-Show in Stuttgart 2019 ausgestellt.

## 11 Linkverzeichnis

Speicherort gesamtes Dokument inkl. Anhängen:

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38412>

Videos:

- Video 8:36 Minuten <https://www.youtube.com/watch?v=sbPH5cTTBDs>
- Video 40 sec <https://www.youtube.com/watch?v=2rhinPKan0A>
- Video 2:44 Minuten <https://www.youtube.com/watch?v=cLaZdxgaSvM>
- Facebook 8:44 <https://www.facebook.com/watch/?v=512305692919830>
- CNN Beitrag anlässlich eGrand Prix Bern 2019  
[https://www.facebook.com/watch/?v=2202230826541949&external\\_log\\_id=3ebfff586a173c9a699e610606e279ed&q=CNN%20DiGrassi%20eDumper](https://www.facebook.com/watch/?v=2202230826541949&external_log_id=3ebfff586a173c9a699e610606e279ed&q=CNN%20DiGrassi%20eDumper)



## 12 Anhang

- Anhang 1: Energieflussmodellierung
  - Anhang 2: Bestimmen der Umgebungs- und Einbauanforderungen an das Batteriesystem
  - Anhang 3: Batterieuntersuchungen Charakterisierung
  - Anhang 4: Batterieuntersuchungen, Profiltests und Lebensdauerabschätzung
  - Anhang 5: Mechanische Spezifikationen E-Dumper
  - Anhang 6: Thermische Vermessung
  - Anhang 7: Simulation der Luftkühlung
  - Anhang 8: Batterieträger
  - Anhang 9: Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung des Batteriesystems E-Dumper
  - Anhang 10: Brandversuche Westart Zellen
  - Anhang 11: Druckentlastung Batteriegehäuse
  - Anhang 12: Energieanalyse E-Dumper
  - Anhang 13: Batteriekapazitätsmessung eMining
  - Anhang 14: Battery Lifetime Westart NCM 150 Ah
-