



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Erprobung und Pilotbetrieb – Ersatz Dieselge- nerator auf Tragwagen Xs_tief der SBB

Eignung der Salzbatterie auf Bahnbaustellen

Schlussbericht

Steffen Wienands (Kontakt) / Daniel Fuhrer / Ueli Kramer
SBB CFF FFS, Infrastruktur, Hilfikerstrasse 3, 3000 Bern 65
Kontakt: steffen.wienands@sbb.ch

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmverantwortung:

Stany Rochat (BAV)

Projektnummer: 154

Bezugsquelle:

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor oder sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 06.12.2024

Inhalt

Kurzzusammenfassung	2
Résumé exécutif	2
Executive Summary	3
Zusammenfassung	4
Résumé	6
Ausgangslage	8
Ziel der Arbeit	8
1. Projektbeschreibung	9
1.1. Systemintegration	9
1.2. Technische Daten Batteriesystem	11
2. Technologie	13
2.1. Salzbatterie	13
2.2. Relevante Kennwerte der Batterien	13
2.3. Sicherheit	14
2.4. Ökobilanz	15
3. Testbetrieb	16
3.1. Test: Energieversorgung des Personalmoduls 30.10.2023	17
4. Ergebnisse	19
4.1. Technologische Reife in der mobilen Bahnanwendung	19
4.2. Batteriesystem und Erprobung	19
4.3. Nötige betriebliche Anpassungen	21
4.4. Sensibilisierung und Schulungsbedarf	22
4.5. Ausschreibungen und Anforderungsdefinitionen	22
5. Diskussion	24
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	25
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	27
Literaturverzeichnis	28

Kurzzusammenfassung

Das Pilotprojekt zur Erprobung von Salzbatterien (NaNiCl_2) auf den SBB Tragwagen Xs_tief hat das Potenzial dieser Technologie zur Reduktion von Emissionen und Lärmbelastungen im Bahnbetrieb untersucht. Die Verwendung der Salzbatterie stellte eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Dieselgeneratoren dar, insbesondere für Tunnelarbeiten, wo die emissionsfreie und leise Energieversorgung von Vorteil ist. Außerdem konnten zum damaligen Zeitpunkt Lithium-Ionen-Batterien und Wasserstoff aus Gründen der Arbeitssicherheit nicht im Tunnel eingesetzt werden. Die Salzbatterie wurde insbesondere für die Energieversorgung der Beleuchtung sowie für das Aufladen kleiner Werkzeuge auf Tunnelbaustellen eingesetzt.

Während des Pilotprojekts konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich technologischer Reife der Salzbatterie-Technologie im mobilen Bahnumfeld, des Batteriesystems und der Erfahrungen in der Erprobung, der nötigen betrieblichen Anpassungen bei Einführungen neuer Energiespeichertechnologien in das Bahnumfeld, der Sensibilisierung und des Schulungsbedarfs sowie Erkenntnisse für künftige Ausschreibungen und Anforderungsdefinitionen gesammelt werden.

Der emissionsfreie Betrieb im Tunnel wurde besonders geschätzt. Batteriespeicher bieten eine nachhaltige und emissionsfreie Alternative zu fossilen Kraftstoffen in mobilen Bahnanwendungen. Die verwendete Salzbatterie-Technologie stellte das Projekt jedoch vor signifikante Herausforderungen. Die Technologie ist gemäss aktuellem Stand der Entwicklungen und aufgrund der Erfahrungen für zukünftige batterieelektrische Schienenfahrzeuge oder Baustellengeräte der SBB keine Option. In diesen Bereichen wird die SBB auf etablierte Lithium-Ionen-Technologien setzen, die über die technologische Reife verfügen, der Bahntauglichkeit gerecht werden und auch aus Sicht Zuverlässigkeit, Energieeffizienz und Verluste ein optimales Gesamtsystem darstellen.

Résumé exécutif

Le projet pilote visant à tester les batteries au sodium (NaNiCl_2) sur les wagons porteurs Xs surbaissés des CFF a permis d'étudier le potentiel de cette technologie pour la réduction des émissions et nuisances sonores liées à l'exploitation ferroviaire. L'utilisation de batteries au sodium représentait une alternative prometteuse aux générateurs diesel traditionnels, notamment pour les travaux dans les tunnels, où un approvisionnement énergétique ne générant ni émission ni bruit est privilégié. De plus, pour des raisons de sécurité au travail, le recours dans les tunnels à des batteries lithium-ion ou à l'hydrogène n'était pas envisageable à l'époque. La batterie au sodium était en premier lieu utilisée pour assurer l'approvisionnement énergétique de l'éclairage et la recharge de petits outils sur les chantiers dans les tunnels.

Le projet pilote a permis de recueillir des informations précieuses sur différentes thématiques, comme la maturité technologique des batteries au sodium dans l'environnement ferroviaire mobile, le système de batteries et les expériences acquises lors de l'essai, les adaptations opérationnelles nécessaires lors de l'introduction de nouvelles technologies de stockage d'énergie dans l'environnement ferroviaire, la sensibilisation et les besoins en formation. Il a également permis de tirer des enseignements pour les futurs appels d'offres et la définition des exigences.

Le fait que les batteries au sodium ne produisent aucune émission a été particulièrement apprécié dans l'optique d'une utilisation dans les tunnels. Les accumulateurs d'énergie constituent une alternative durable zéro émission aux combustibles fossiles pour les applications ferroviaires mobiles. La technologie des batteries au sodium utilisée a toutefois confronté le projet à un certain nombre de défis conséquents. Selon l'état actuel de son développement et sur la base des expériences acquises, cette technologie n'est pas envisageable pour les futurs véhicules ferroviaires à batterie électrique ni pour les machines de chantier des CFF. Dans ces domaines, les CFF misent plutôt sur des technologies éprouvées au lithium-ion, qui ont atteint leur maturité technologique, sont adaptées aux conditions ferroviaires et représentent un système global optimal du point de vue de la fiabilité, de l'efficacité énergétique et des pertes en cours d'exploitation.

Executive Summary

The pilot project to test salt batteries (NaNiCl_2) on the SBB Xs_tief container wagons investigated the potential of this technology to reduce emissions and noise pollution in railway operations. The use of the salt battery represents a promising alternative to conventional diesel generators, especially for tunnelling work where the emission-free and low-noise energy supply is advantageous. In addition, lithium-ion batteries and hydrogen could not be used in the tunnel at the time for occupational safety reasons. The salt battery was used in particular to supply energy for lighting and to charge small tools on tunnelling sites.

The pilot project delivered key insights into the technological maturity of salt battery technology in the mobile railway environment. The battery system and the experience gained during testing, along with the necessary operational adjustments when rolling out new energy storage technologies in the railway environment were also highlighted. The project also raised awareness and set out training requirements, while providing insights for future tenders and requirement definitions.

The emission-free operation in the tunnel proved a compelling proposition. Battery storage systems offer a sustainable and emission-free alternative to fossil fuels in mobile railway applications. However, the salt battery technology used posed significant challenges for the project. According to the current state of development and based on experience, this technology does not constitute an option for future battery-electric rail vehicles or SBB construction site equipment. In these areas, SBB will rely on established lithium-ion technologies that are technologically mature, suitable for railway applications and represent an optimal overall system in terms of reliability, energy efficiency and losses.

Zusammenfassung

Die Ausgangslage für das Pilotprojekt zur Erprobung von Salzbatterien auf den SBB Tragwagen Xs_tief ist geprägt von den Herausforderungen, die der Einsatz konventioneller Dieselgeneratoren auf Nacht- und Tunnelbaustellen mit sich bringt. Diese Generatoren sind mit erhöhten Lärmemissionen und Abgasen verbunden, die sowohl für die Anwohner als auch für die Mitarbeitenden eine erhebliche Belastung darstellen. Die Entwicklungen im Bereich der Batteriespeicher bieten Möglichkeiten, Lärmemissionen und Abgase zu vermeiden oder zu reduzieren, und stellen tragfähige Alternativen zum Dieselgenerator dar.

Im Rahmen dieses Projekts wurden Batteriespeicher mit Natrium-Nickelchlorid-Batterietechnologie, auch bekannt als Salzbatterie, auf zwei Tragwagen der Gattung Xs_tief implementiert und als nachhaltige Energiequelle für mobile Anwendungen im Bahnbetrieb erprobt. Die Salzbatterie wurde gewählt, um neben den bekannten Blei- und Lithium-Ionen-Batterien eine weitere Speichertechnologie zu erproben. Zudem war es eine der wenigen Technologien, welche die erhöhten Sicherheitsanforderungen im Tunneleinsatz erfüllen konnte.

Das Projekt zielt darauf ab, wichtige Erfahrungen mit emissionsfreier und lärmärmer, autarker Baustellenstromversorgung im Betrieb im Bahnumfeld zu sammeln und das erforderliche Wissen für zukünftige Projekte zu erarbeiten. Außerdem sollten Erkenntnisse gewonnen werden über die notwendigen Betriebsanpassungen, den Sensibilisierungsbedarf, die Mitarbeiterschulungen und die Einführung eines solchen Systems sowie über Anforderungen für zukünftige Projekte oder Ausschreibungen mit Batteriespeichern. Auch die technologische Reife der Salzbatterie-Technologie im Bahnumfeld sollte ergründet werden. Die hohe Sicherheit der Salzbatterie ermöglichte damals auch den vergleichsweise frühen Einsatz von Batterietechnologien im Tunnel, wo erhöhte Sicherheitsanforderungen gelten.

Die Umsetzung umfasste mehrere Schritte, beginnend mit der Umsetzung und Integration des Speichersystems auf den Tragwagen. Die Salzbatterien wurden zusätzlich zu den bestehenden Dieselgeneratoren installiert, wobei der Dieselgenerator als Rückfallebene erhalten blieb. Jedes Batteriesystem besteht aus fünf Modulen mit einer Gesamtkapazität von 46.5 kWh installiert bzw. etwa 40 kWh nutzbar.

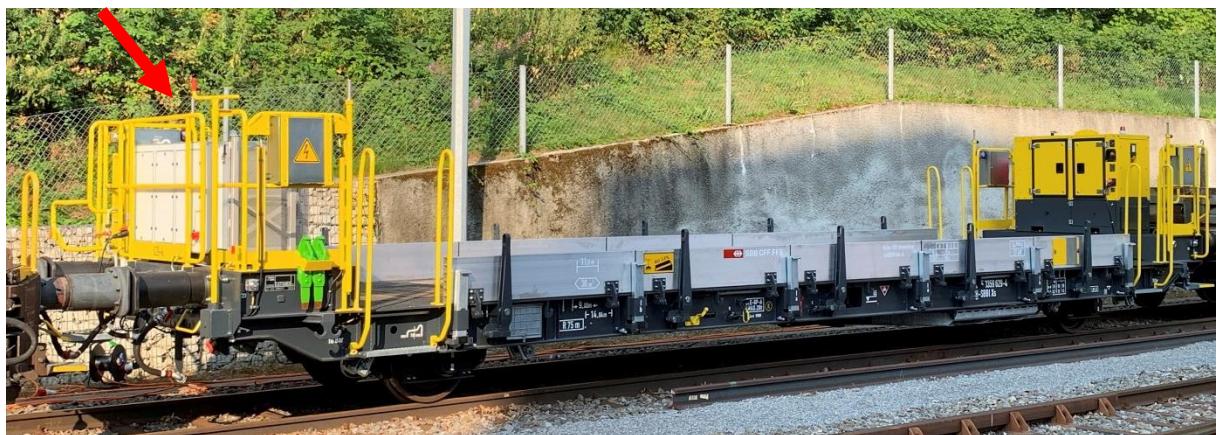


Abbildung 1: Tragwagen Xs_tief mit installiertem Salzbatterie-System (im Bild am linken Wagenende rot markiert).

Seit April 2022 stehen die beiden Tragwagen Xs_tief mit den verbauten Salzbatterien für die Betriebserprobung zur Verfügung. Die Tragwagen mit Salzbatterie-System werden insbesondere für die Materiallieferung, die Energieversorgung der Nacht- oder Tunnel-Beleuchtung (LED-Scheinwerfer 24 VDC) und für das Aufladen kleinerer elektrischer Betriebsmittel wie Schwingstopfer oder Schienenbohrmaschinen verwendet.

Das Pilotprojekt, die Tests und die Erprobungen haben bestätigt, dass Batteriespeicher eine tragfähige Alternative zu bestehenden fossilen Lösungen darstellen. Insbesondere für Tunnel- und Nacharbeiten wird die emissionsfreie und lärmarme Energieversorgung sehr geschätzt. Diese Vorteile führen zur Akzeptanz des Technologiewandels. Und sie führen dazu, dass Anpassungen in Betriebsprozessen und die damit entstehenden Herausforderungen angegangen werden.

Die während einer Schicht zur Verfügung stehende Energiemenge ist mit dem Batteriespeicher deutlich begrenzter als mit einem Dieselgenerator. Die rechtzeitige und sorgfältige Planung und Bereitstellung gewinnt an Bedeutung – sie ist eine Voraussetzung. Die Ladeleistung ist begrenzt, einerseits durch

systembedingte Beschränkungen, die auf die Leistungsfähigkeit des Dieselgenerators und die Art der Installation zurückzuführen sind, andererseits aber auch durch die geringeren Ladeleistungen der Salzbatterie-Technologie. Zudem hat die Salzbatterie einen konstanten Stromverbrauch, um die Betriebstemperatur von 270°C aufrecht zu erhalten. Diese Faktoren führen dazu, dass die Batterie unmittelbar vor dem Einsatz vorkonditioniert und über einen langen Zeitraum (etwa 12 Stunden) voll geladen werden muss. Es zeigte sich, dass es essenziell ist, in den Teams Mitarbeitende zu haben, welche die Verantwortung für die Vorbereitung, die rechtzeitige Vorkonditionierung und das Aufladen übernehmen und so sicherstellen, dass die Batterie zu Beginn der Schicht voll einsatzfähig ist. Die Umstellung der Betriebsprozesse birgt Herausforderungen, ist aber machbar.

Allerdings traten auch signifikante Herausforderungen auf. Ein kritischer Punkt war die hohe Ausfallquote der Batteriemodule während des Pilotprojekts. Bereits innerhalb der ersten zwei Jahre fielen fünf von zehn Modulen aus. Dadurch wurde die Verfügbarkeit des gesamten Systems deutlich beeinträchtigt. Die ersten vier ausgefallenen Module wurden während der Garantiezeit ausgetauscht. Nach Aussage des Batterielieferanten war der Defekt auf Fertigungsfehler beim Batteriehersteller zurückzuführen. Es ist unklar, inwiefern Stöße beim Kuppeln, harte Schläge ungefederter Ladeflächen und Vibrationen im Bahnumfeld einen Einfluss auf die Defekte hatte. Die hohe Ausfallrate wirft Fragen zur Zuverlässigkeit der Technologie, insbesondere im Bahnumfeld auf.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist der hohe Energieverbrauch der Salzbatterien. Um die notwendige Betriebstemperatur von etwa 270°C aufrechtzuerhalten, benötigt jedes Modul kontinuierlich eine Heizleistung von etwa 115 W. Dies summiert sich für das gesamte System, bestehend aus fünf Modulen, auf rund 700 W. Sofern die Batterie nicht an ein Ladegerät angeschlossen ist oder genutzt wird, führt dies schliesslich zu einer Selbstentladung von etwa 1,25% der gespeicherten Energie pro Stunde. Dieser hohe Heizbedarf stellt einen bedeutenden Nachteil dar und wirkt sich auch deutlich auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Andere Batterietechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien zeigen diese Nachteile nicht und haben deutlich höhere Gesamtwirkungsgrade. Dies könnte die wirtschaftliche Effizienz der Salzbatterie-Technologie in Frage stellen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Projekt wertvolle Erkenntnisse über die Implementierung von Batteriespeichern in den Bahnbetrieb, und spezifisch der Salzbatterie-Technologie, geliefert hat. Batteriespeichertechnologien zeigen ein grosses Potenzial, um eine nachhaltige und emissionsfreie Lösung für mobile Anwendungen zu bieten. Seit Beginn des Projekts hat sich der Markt der Batteriespeichertechnologien deutlich weiterentwickelt. Dazu sind nun auch andere Batteriespeichertechnologien für den Tunneleinsatz denkbar. Die SBB wird den Ersatz der fossilen Energieträger im Bahnumfeld auch für mobile Anwendungen weiter vorantreiben. Dies sowohl im Bereich der batterieelektrischen Baustellengeräte, als auch im Bereich der batterieelektrischen Schienenfahrzeuge. Trotz der Technologieoffenheit der SBB ist die Salzbatterie gemäss aktuellem Stand der Entwicklungen und aufgrund der Erfahrungen vorerst keine Option. Die SBB wird in diesen Bereichen auf etablierte Lithium-Ionen-Technologien setzen. Diese bieten eine bessere Energieeffizienz und geringere Verluste im Betrieb, was ein optimales Gesamtsystem darstellt. Sie weisen mittlerweile auch eine technologische Reife auf, die der Bahntauglichkeit (Stöße, Vibrationen, Einsatz im Tunnel) gerecht wird.

Die gesammelten Erfahrungen aus diesem Pilotprojekt sind eine wertvolle Grundlage für die weitere Entwicklung, die Optimierung und die Einführung von umweltfreundlichen Energieversorgungslösungen – abseits der Salzbatterie-Technologie – im Bahnbetrieb.

Résumé

La situation initiale du projet pilote visant à tester les batteries au sodium sur les wagons-porteurs Xs surbaissés des CFF est fortement marquée par les défis que pose l'utilisation de générateurs diesel conventionnels lors de travaux de nuit ou dans les tunnels. Ces générateurs induisent un niveau élevé d'émissions sonores et de gaz d'échappement, qui représentent une nuisance importante pour les riverains et le personnel. Les développements dans le domaine des accumulateurs permettent d'éviter ou de réduire ces émissions sonores et gaz d'échappement, et constituent ainsi des alternatives viables au générateur diesel.

Dans le cadre de ce projet, des accumulateurs utilisant des batteries au sodium-chlorure de nickel, également appelées «batteries au sodium», ont été installés sur deux wagons-porteurs Xs surbaissés, puis testés à titre de source d'énergie durable pour des applications mobiles de l'exploitation ferroviaire. La batterie au sodium a été sélectionnée pour tester une technologie de stockage complémentaire aux batteries au plomb et au lithium-ion bien connues. Il s'agissait en outre de l'une des rares technologies pouvant satisfaire aux exigences de sécurité accrues pour l'utilisation dans les tunnels.

L'objectif de ce projet consistait à recueillir d'importants enseignements en matière d'alimentation électrique autonome, zéro émission et à faible niveau sonore pour les chantiers ferroviaires, et à développer les connaissances nécessaires à de futurs projets. Il devait également permettre d'en apprendre davantage sur les adaptations nécessaires de l'exploitation, le besoin de sensibilisation, les formations du personnel, l'introduction d'un tel système et les exigences posées aux futurs projets ou appels d'offres relatifs à des accumulateurs. Il convenait par ailleurs de vérifier la maturité de la technologie des batteries au sodium dans l'environnement ferroviaire. Le degré élevé de sécurité de ce type de batteries avait permis à l'époque une utilisation relativement précoce de ces dernières dans les tunnels soumis à des exigences de sécurité accrues.

La mise en œuvre s'est articulée autour de plusieurs étapes, à commencer par l'installation et l'intégration du système de stockage sur le wagon-porteur. Les batteries au sodium ont été installées en plus des générateurs diesel existants, ces derniers étant conservés comme solution de secours. Chaque système de batterie se compose de cinq modules d'une capacité totale de 46,5 kWh installés ou d'environ 40 kWh utilisables.



Illustration 2: wagon-porteur Xs surbaissé avec batterie au sodium (indiquée par la flèche rouge à l'extrême gauche du véhicule).

Depuis avril 2022, les deux wagons-porteurs Xs surbaissés équipés de batteries au sodium peuvent être utilisés pour les essais d'exploitation. Ils interviennent notamment dans la livraison de matériel, l'approvisionnement énergétique de l'éclairage de nuit ou de tunnel (projecteurs LED 24 VDC) et la recharge de petits équipements électriques tels que les bourroirs vibrants ou les perceuses de rails.

Le projet pilote, les tests et les essais ont confirmé que l'accumulateur était une alternative viable aux solutions fossiles existantes. L'approvisionnement énergétique zéro émission et peu bruyante est très appréciée, notamment pour les travaux de nuit et dans les tunnels. Ces avantages favorisent l'acceptation du changement technologique. En outre, ils amènent les personnes à moins appréhender les adaptations des processus d'exploitation et les défis en résultant.

La quantité d'énergie fournie par un accumulateur pendant un tour de service est nettement inférieure à celle d'un générateur diesel. Une planification et une mise à disposition méticuleuses et suffisamment

tôt sont donc déterminantes et se posent en condition préalable. La capacité de charge est limitée, d'une part par des contraintes intrinsèques dues à la puissance du générateur diesel et au type d'installation, et d'autre part du fait d'une moindre capacité des batteries au sodium. De plus, la batterie au sodium présente une consommation d'électricité constante pour maintenir la température opérationnelle de 270°C. Elle doit donc être préconditionnée juste avant l'utilisation et chargée entièrement, ce qui peut durer environ 12 heures. Il est donc essentiel que, dans les équipes, des collaborateurs ou collaboratrices soient chargés d'assumer la responsabilité de la préparation, du préconditionnement en temps et en heure et de la recharge pour garantir ainsi la pleine disponibilité de la batterie au début du tour. L'adaptation des processus d'exploitation est complexe, mais elle reste faisable.

Il a fallu par ailleurs faire à un certain nombre de défis de taille. L'un des aspects critiques concernait le taux de défaillance élevé des modules de batterie constaté au cours du projet pilote. Cinq modules sur dix sont tombés en panne dès les deux premières années, ce qui a fortement compromis la disponibilité du système dans son ensemble. Les quatre premiers modules défaillants ont été remplacés pendant la période de garantie. Selon le fournisseur de la batterie, le problème était dû à des défauts de fabrication. On ignore l'impact des chocs d'attelage, des coups violents de plates-formes de chargement non amorties et des vibrations de l'environnement ferroviaire sur les défauts. Toujours est-il que ce taux de défaillance élevé soulève des questions quant à la fiabilité de la technologie, en particulier dans l'environnement ferroviaire.

Un autre aspect essentiel réside dans la forte consommation d'énergie des batteries au sodium. Pour maintenir la température opérationnelle nécessaire d'environ 270°C, chaque module a besoin d'une puissance de chauffage continue de près de 115 W, soit quelque 700 W pour le système global composé de cinq modules. Si la batterie n'est pas raccordée à un chargeur ou lorsqu'elle n'est pas utilisée, il en résulte une autodécharge d'à peu près 1,25% de l'énergie accumulée par heure. Ce besoin élevé en chauffage constitue un inconvénient majeur entraînant des répercussions significatives sur le rendement global. D'autres batteries, comme les batteries lithium-ion, ne présentent pas ces inconvénients et affichent un rendement global nettement plus élevé. Cela pourrait remettre en question l'efficacité économique des batteries au sodium.

En résumé, ce projet a permis d'acquérir de précieuses connaissances sur l'implémentation d'accumulateurs et, notamment, de la technologie des batteries au sodium, dans l'exploitation ferroviaire. Les accumulateurs affichent un grand potentiel garantissant une solution durable zéro émission pour des applications mobiles. Depuis le début du projet, le marché des accumulateurs a considérablement évolué. D'autres technologies sont désormais envisageables pour une utilisation dans les tunnels. Les CFF continueront à promouvoir le remplacement des énergies fossiles dans l'environnement ferroviaire, y compris pour les applications mobiles. Et ce, aussi bien dans le domaine des engins de chantier à batterie électrique que dans celui des véhicules ferroviaires à batterie électrique. Malgré l'ouverture technologique dont font preuve les CFF, la batterie au sodium n'est pas encore une option au vu de l'état actuel de son développement et des expériences recueillies. Dans ces domaines, les CFF miseront sur les batteries lithium-ion qui ont fait leurs preuves. Celles-ci assurent une meilleure efficacité énergétique et des pertes réduites lors de l'exploitation, ce qui constitue un système global optimal. De plus, elles présentent actuellement une maturité technologique adaptée à l'environnement ferroviaire (chocs, vibrations, utilisation dans les tunnels).

L'expérience acquise dans le cadre de ce projet pilote représente une base déterminante pour la poursuite du développement, l'optimisation et l'introduction de solutions écologiques d'approvisionnement énergétique autres que les batteries au sodium dans le domaine de l'exploitation ferroviaire.

Ausgangslage

Auf den SBB Tragwagen Xs_tief sind konventionelle Dieselgeneratoren der Grösse 8 kVA verbaut. Diese dienen der lokalen Energieversorgung von Verbrauchern auf dem Fahrzeug, insbesondere für die Beleuchtung auf Nacht- oder Tunnelbaustellen sowie für das Aufladen akkubetriebener Handwerkzeuge. Zu Beginn des Projekts wurden die Betriebsstunden auf 1000 Stunden pro Jahr geschätzt – die Anzahl effektiver Betriebsstunden stellte sich aber als deutlich geringer heraus. Die Lärmemissionen und Abgase, die mit dem Dieselgenerator verbunden sind, stellen eine Belastung für Anwohner:innen und Mitarbeitende dar. Insbesondere aufgrund der eingeschränkten Be- und Entlüftung in Tunnelanlagen, was zur Anreicherung von Abgasen führt.

Die Entwicklungen im Bereich der Batteriespeicher bieten Möglichkeiten, Lärmemissionen und Abgase zu vermeiden oder zu reduzieren, und stellen tragfähige Alternativen zum Dieselgenerator dar. Derzeit sind jedoch nur flexible, modulare Lösungen auf dem Markt erhältlich, die für die spezifische Anwendung angepasst werden können. Es gibt keine fest installierten Produkte für Bahnanwendungen.

Im Rahmen dieses Pilotprojekts wurde auf zwei Baustellenfahrzeugen der Gattung Tragwagen Xs_tief der Dieselgenerator um einen Batteriespeicher mit Natrium-Nickelchlorid-Technologie, auch ZEBRA-Batterie oder umgangssprachlich Salzbatterie genannt, ergänzt. Dadurch entsteht ein effizientes und robustes Hybridsystem, das auch bei ausgebliebener Nachladung weiter betrieben werden kann, was in der Pilotphase aufgrund der Anpassungszeit der Mitarbeitenden vorkommen kann. Zudem unterstützt dies die Akzeptanz bei der Einführung respektive im Umgang mit neuen rein elektrischen Energieversorgungen.

Das Projekt zielt darauf ab, wichtige Erfahrungen mit emissionsfreier und lärmärmer, autarker Baustellenstromversorgung im Betrieb zu sammeln und das erforderliche Wissen für zukünftige Projekte zu erarbeiten. Es werden auch relevante Informationen in Bezug auf Mitarbeiterschulung, Akzeptanz des Technologiewechsels und Sensibilisierung für eine erfolgreiche Einführung gesammelt.

Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieses Projekts werden verschiedene Ziele verfolgt:

1. **Technologische Reife in der mobilen Bahnanwendung:** Das Projekt soll aufzeigen, ob die Natrium-Nickelchlorid-Technologie den strengen Bahnanforderungen gewachsen ist.
2. **Batteriesystem und Erprobung:** Erfahrungen mit dem Batteriesystem im Einsatz sammeln. Prüfen, ob dieses System für die vorgesehenen Einsätze das richtige ist (Dimensionierung, Handling, usw.).
3. **Nötige betriebliche Anpassungen:** Know-how über nötige betriebliche Anpassungen wie z.B. Ladeinfrastruktur gewinnen.
4. **Sensibilisierung und Schulungsbedarf:** Akzeptanz bei den Anwender:innen in einem kleinen Umfeld erarbeiten. Dazu Erkenntnisse für die erfolgreiche Einführung einer neuen Technologie sammeln (nötiger Schulungsbedarf, Arbeitsplanung, Arbeitsabläufe).
5. **Ausschreibungen und Anforderungsdefinitionen:** Erkenntnisse für künftige energieeffiziente Ausschreibungen sammeln. Erfahrungen ableiten, um die an zukünftige Systeme zu stellenden Anforderungen zu konkretisieren.

Die Erfahrungen werden direkt in weitere Beschaffungsprojekte übernommen und gelten als Referenz. Ohne eine Pilotierung und die entsprechenden Erfahrungen werden in absehbarer Zeit die etablierten Dieselgeneratoren nicht wegfallen. Somit werden dank dieses Piloten die relevanten Grundlagen für eine erfolgreiche Umstellung in Richtung eines emissionsfreien, leisen und energieeffizienten Baustellenbetriebs erwartet.

1. Projektbeschreibung

Da im Jahr 2019 auf dem Markt noch keine baustellentauglichen Batterie-Speichersysteme verfügbar waren, ist bei der SBB die Idee gereift, ein eigenes Batteriesystem zur Betriebserprobung und Erfahrungssammlung in Auftrag zu geben.

Die Gründe für das Interesse an einem Batterie-Speichersystem sind folgende:

- Keine Lärmemissionen
- Keine Abgase und Feinstaubemissionen
- Reduktion der CO₂-Emissionen

Um neben den bekannten Blei- und Lithium-Ionen-Batterien eine weitere Speichertechnologie zu erproben, wurde die Natrium-Nickelchlorid-Batterie, auch ZEBRA oder umgangssprachlich – und im Folgenden – auch «Salzbatterie» genannt, gewählt. Bei dieser Speichertechnologie sind die geringen Umweltauswirkungen im Schadensfall und die Unbedenklichkeit gegenüber den erhöhten Sicherheitsanforderungen im Tunneleinsatz ein Vorteil. Insbesondere zum damaligem Zeitpunkt waren die Lithium-Ionen-Lösungen noch nicht so gut verfügbar wie heute.

Auf der Suche nach einem geeigneten Erprobungsträger haben sich die Wagen der neuen Niederflur-Tragwagen Xs_tief angeboten, die zu der Zeit in Entwicklung und Ablieferung waren. Zudem zeigte sich der Lieferant der Tragwagen sehr daran interessiert, in diesem Bereich Erfahrungen zu sammeln.

Die bestehenden Tragwagen Xs_tief mit den verbauten Dieselgeneratoren wurden zur Energieversorgung von Beleuchtung und zum Aufladen von Werkzeugen genutzt. Dieser Anwendungsfall sollte ebenfalls mit der Salzbatterie abgedeckt werden. Die Dimensionierung der Salzbatterie orientierte sich an den Leistungs- und Energiewerten des bestehenden Dieselgenerators. Auch eine hohe Autarkiezeit sollte dadurch erreicht werden. Der Tragwagen Xs_tief mit Salzbatterie sollte insbesondere bei Tunnel- und Nachtarbeiten genutzt werden, um die Lärmemissionen und Abgase zu reduzieren.

Ein positiver Nebeneffekt dieser Batteriesysteme sind die elektronischen Umrichter und die Datenaufzeichnung mit Fernzugriff, mit denen ohne Zusatzaufwand ein Messmittel für Energieverbrauchsmessungen zur Verfügung steht. Diese Möglichkeit hat später wertvolle Dienste für die Auswertung geleistet.

1.1. Systemintegration

Mit der Lieferung der beiden Salzbatterie-Systeme wurde die Firma innovenergy in Meiringen (CH) beauftragt. innovenergy hat viel Erfahrung mit der Verwendung von Salzbatterien im stationären Bereich auf der verfügbaren Technologie.

Zur Spezifikation des zu liefernden Systems wurde ein Anforderungskatalog erstellt. Das Systemdesign und der Bau der Energiemodule ist durch innovenergy erfolgt. Unterstützung wurde bei der Festigkeitsberechnung des Rahmens für die besonderen Anforderungen des Bahnbetriebs beigezogen.

Die beiden Batteriesysteme wurden von innovenergy an den Wagenbauer Ferriere Cattaneo in Giubiasco (CH) geliefert. Die beiden Tragwagen Xs_tief 829-4 und 830-2 aus der Serie der neuen Tragwagen erhielten anstelle der Schwerlastplatte am Wagenende 2 die beiden Salzbatterien aufgebaut. Der vorhandene Dieselgenerator am Wagenende 1 bleibt als Rückfallebene auf dem Tragwagen erhalten.



Abbildung 3: Tragwagen Xs_tief mit Salzbatterie-System am linken Wagenende.

Die Erweiterung des Tragwagens Xs_tief mit dem Salzbatterie-System wurde von Ferriere Cattaneo aufgrund einer Risikoanalyse nach RTE 49100 als nicht relevante Änderung eingestuft. Daher war keine neue Betriebsbewilligung des Bundesamtes für Verkehr erforderlich.

Zwei Tragwagen Xs_tief sind seit April 2022 mit dem Salzbatterie-System ausgerüstet und stehen für die Betriebserprobung bereit.



Abbildung 4: Salzbatterie-System auf Tragwagen Xs_tief in Front- und Rückansicht.

1.1.1. Systembeschreibung

Das Salzbatterie-System besteht aus fünf einzelnen Salzbatterie-Modulen (Natrium-Nickelchlorid-Technologie) vom Typ I&O 48TL200 mit je einer Kapazität von 9.3 kWh (48 V, 200 Ah). Das gesamte Salzbatterie-System verfügt also über eine Kapazität von rund 46 kWh. Hersteller der Batterie-Module ist die Firma FIAMM FZSoNick in Stabio (CH).

Jedes Salzbatterie-Modul nimmt im Normalbetrieb durchschnittlich eine Leistung von 115 W auf, um die Betriebstemperatur zur Salz-Schmelze auf konstant 270°C zu halten. Für das Gesamtsystem macht dies gemäss Herstellerangabe 575 W aus, gemessen wurden etwa 700 W. Die zulässige Umgebungs-temperatur bewegt sich zwischen -20°C und +60°C. Das Gehäuse der Module ist gemäss IP55 staub- und spritzwasserdicht.

Das Batterie-Management-System (BMS) steuert die Heizgeräte und übt die Sicherheitsfunktionen der Batterie aus. Die Batterie ist wartungsfrei. Die Kommunikation für den Fernzugriff erfolgt über ein GSM-Modem. Die Benutzerschnittstelle liefert den Batteriestatus und die Betriebsdaten über eine 7-Segment-Anzeige und Leuchtdioden.

Die DC-Ausgänge der Batterien haben eine Nennspannung von 48 V und sind über eine Stromschiene miteinander verbunden. Diese Stromschiene liefert die Eingangsspannung für die drei Wechselrichter vom Typ 48/5000/70-50 mit einer nominalen Wirkleistung von 5 kW pro Wechselrichter. Hersteller der Wechselrichter ist die Firma Victron Energy. Jede Phase wird von einem einzelnen Wechselrichter erzeugt. Die 3-phägige Ausgangsspannung von 3x400 VAC 50 Hz steht an einem CEE16-Anschluss (AC-OUT) zur Verfügung. Das erzeugte Netz ist ein inselfähiges TT-Netz, das auch als USV genutzt werden kann. Der Personen- und Sachschutz erfolgt mit einem RCD vom Typ B.

Geladen wird das System entweder über einen CEE16-Anschluss von der Ringleitung des Wagens oder über einen Depot-Anschluss. Die Wechselrichter funktionieren dann als Ladegerät. Als Besonderheit können die Wechselrichter/Ladegeräte gleichzeitig die Batterien laden und die Last mit Strom versorgen.



Abbildung 5: Aufnahme des Gehäuses der drei Victron-Wechselrichter des Typs 48/5000/70-50 sowie Verkabelung. Gehäusebau zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht fertiggestellt.

Für den Wagenhersteller Ferriere Cattaneo war es der erste Kontakt mit einer batterieelektrischen Anwendung und insbesondere mit dieser Technologie. Die Vorteile, aber auch die Herausforderungen durch die Neuartigkeit wurden erkannt. Besonders für den Wagenhersteller ist diese neue Technologie eine Herausforderung, die aber auch als Chance gesehen wurde, um neue Ansätze zu erproben und sich auf zukünftige Anforderungen, speziell für den Bereich Untertagarbeiten, auszurichten. In diesem frühen Technologie-Erprobungsstadium war die erhöhte Sicherheit der Salzbatterie eine wichtige Hilfe. Weiter half auch die physische Nähe zwischen Produktion und Wagenhersteller, da beide im Tessin angesiedelt sind und dadurch über direkte Kontakte ein vertrauensvolles Verhältnis etabliert werden konnte.

1.2. Technische Daten Batteriesystem

Das verbaute Batteriesystem nennt sich saliAKMO. Es besteht aus fünf FIAMM FZSoNick 46TL200 und drei Wechselrichter des Typs Victron MultiPlus-II 48/5000/50-70, einem Steuerungssystem Victron Venus GX und einem Modem des Typs GX GSM.

Tabelle 1: Technische Daten des Batterie-Systems.

Parameter	Wert
Speicherkapazität	46.5 kWh (5x 9.3 kWh)
Leistung kontinuierlich	3 x 5 kW (5 kW pro Phase)
Ausgangsspannung	3x 400 VAC
Anschlüsse IN	CEE16
Anschlüsse OUT	CEE16 24 VDC
Erwartete Lebensdauer	>4500 Vollzyklen (80% DOD, gemäss Hersteller)
Gewicht	800 kg
Grösse	1645 x 800 x 1005 mm Batteriegehäuse

Aufwärmen

Wird die Batterie nicht benötigt, kann sie ausgeschaltet werden. Sie kühlst dann über mehrere Stunden bis auf Umgebungstemperatur ab. Vor dem erneuten Betrieb der Batterie muss sie wieder auf Betriebstemperatur gebracht werden.

Das Aufwärmen auf die Betriebstemperatur von 270°C dauert etwa 14 Stunden. Im Anschluss ist die Batterie betriebsbereit und kann aufgeladen werden. Die Leistungsaufnahme während dem Aufwärmen beträgt 380 W pro Salzbatterie-Modul, d.h. 1.9 kW für das gesamte System.

Laden

Die Ladung startet automatisch, wenn die Betriebstemperatur erreicht ist. Die Ladedauer hängt von der aktuellen Verfügbarkeit des Ladestroms und dem ursprünglichen Ladezustand ab. Bei voller Ladeleistung dauert eine vollständige Ladung etwa 12 Stunden.

Anfangs wurde die Ladeleistung auf maximal 7 A beschränkt. Dies wurde aufgrund von Systembeschränkungen, d.h. Beschränkungen beim Aufladen ab Dieselgenerator, sowie von Seiten Sicherungsschutz (Dauerbelastung) festgelegt. Die gemessene Ladezeit mit der systembedingten Beschränkung beträgt rund 20 Stunden, beginnend bei einem SOC von 10%.

Später wurde die Begrenzung auf 12 A Ladeleistung für ausreichend empfunden und, um kürzere Ladezeiten zu ermöglichen, angepasst. Der maximal zulässige Ladestrom wird also nicht voll ausgeschöpft.

Heizbedarf bzw. Selbstentladung

Für ein 9.3 kWh Modul werden durchgängig rund 115 W Heizleistung benötigt. Für das Gesamtsystem führt dies zu etwa 700 W (gemessene) dauerhafte Heizleistung. Sofern die Batterie nicht aufgeladen und nicht genutzt wird, entlädt sie sich selbst mit rund 1.2% pro Stunde. Die Batterie ist in diesem Fall nach etwas mehr als drei Tagen komplett entladen.

2. Technologie

Die Gründe, weshalb die Salzbatterie-Technologie für dieses Projekt gewählt wurde, wurden bereits in Kapitel 1 erwähnt. Sie wurde insbesondere aufgrund der hohen Sicherheit gewählt, um das Batteriesystem auch im Tunnel einsetzen zu können. Zudem sollten auch weitere Speichertechnologien erprobt werden.

Im folgenden Kapitel soll die Salzbatterie-Technologie an sich genauer analysiert und auch für zukünftige Projekte mit Lithium-Ionen-Batterien verglichen werden. Lithium-Ionen-Batterien sind zwischenzeitlich deutlich weiterentwickelt worden und im Bahnbereich und für Tunnelarbeiten etablierter, als sie es zu Beginn dieses Projekts waren.

2.1. Salzbatterie

Die gegen Ende der 1970er Jahre entwickelte Natrium-Nickelchlorid-Batterie wird auch ZEBRA-Batterie, Salzschorf-Batterie oder umgangssprachlich oft «Salzbatterie» genannt.

Das Kathodenmaterial besteht hauptsächlich aus Nickel und Natriumchlorid, die Anode meist aus Natrium. Als Separator und Elektrolyt wird keramisches β -Aluminimumoxid eingesetzt, das Natrium-Ionen zwischen Anode und Kathode passieren lässt aber keine Elektronen.

Es handelt es sich um eine Hochtemperatur-Batterie, die bei rund 270-350°C betrieben wird. Die hohe Temperatur sorgt dafür, dass die Elektroden, also Anoden- und Kathodenmaterial, in geschmolzenem, flüssigem Zustand vorliegen und der Separator eine hohe Leitfähigkeit für die Natrium-Ionen erreicht.

2.2. Relevante Kennwerte der Batterien

Um die Eigenschaften der Natrium-Nickelchlorid-Batterie (NaNiCl_2) zu beurteilen, wird sie mit den aktuell marktdominierenden Batterietechnologien, d.h. zwei Vertretern der Lithium-Ionen-Batterien (LIB), verglichen. Bei den Kennwerten handelt es sich um typische Kennwerte der jeweiligen Technologie, nicht um die Kennwerte eines einzelnen Systems. Sowohl im Segment der Batteriespeicher für stationäre als auch für mobile Anwendungen sind die Batterietechnologien Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid und Lithium-Eisenphosphat stark vertreten. Die Bleisäure-Batterie, die eher für Anwendungen der unterbrechungsfreien Stromversorgung oder als Starterbatterie Verwendung findet und nicht für eine hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen ausgelegt ist, wird nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung relevanter Batterie-Kennwerte unterschiedlicher Batterietechnologien: Nickel-Natriumchlorid-Batterien (NaNiCl_2), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC). [1] [2] [3] [4] [5]

		NaNiCl₂	LFP	NMC
Energiedichte	<i>Modul/Pack</i>	ca. 85 Wh/kg	ca. 110 Wh/kg	ca. 150 Wh/kg
Leistung	<i>C-Rate Laden</i>	1/8	3	2
	<i>C-Rate Entladen</i>	1/3	3	3
Temperatur	<i>T_{min} Laden</i>	-20°C	0°C	0°C
	<i>T_{min} Entladen</i>	-20°C	-20°C	-20°C
	<i>T_{max}</i>	60°C	55°C	55°C
Kosten	<i>System, stationär</i>	ca. 950 CHF/kWh	ca. 700 CHF/kWh	ca. 700 CHF/kWh
Lebensdauer	<i>Zyklen</i>	4500	6000	5000
	<i>Jahre</i>	15	12	12

Der Vergleich soll dazu dienen, die Technologie einzuordnen. Entsprechend sind die Kennwerte als Richtwerte zu verstehen, die exakten Werte können je nach Anwendung und Integration variieren. Die Werte basieren auf Herstellerangaben von am Markt verfügbaren Systemen.

Der Vergleich der Energiedichten unterschiedlicher Zelltechnologien ist herausfordernd, da auch die Bezugsebene (Zelle, Modul, Pack, System) vergleichbar sein muss. NaNiCl₂-Batterien weisen jedoch eine deutlich geringere Energiedichte als NMC oder LFP auf, wodurch der Einsatz der NaNiCl₂-Batterie in mobilen Anwendungen erschwert wird. Die Ladeleistung liegt bei rund 1/8 C, d.h. dass die Batterie etwa 8 Stunden für einen kompletten Ladeprozess benötigt. Dies ist ein klassischer Ladeleistungswert für NaNiCl₂-Batterien. Eine Lade-C-Rate von 2 bedeutet hingegen, dass die Batterie in 30 Minuten voll geladen werden kann. Auch die Entladeleistung der NaNiCl₂-Batterie ist mit 1/3 C recht gering. Es handelt sich also um eine Energie- und keine Leistungsbatterie. Aufgrund der benötigten Betriebstemperatur von rund 270°C und dem damit verbundenen permanenten Aufheizen kann die Batterie sowohl bei tieferen als auch bei höheren Außentemperaturen betrieben werden. Preislich liegt das Batteriesystem etwa Faktor 1.5 höher als herkömmliche Lithium-Ionen-Batterien.

Die kalendarische Alterung, also die Alterung über die Zeit der NaNiCl₂-Batterie, ist gering. So kann sie mit 15 Jahren eine hohe Lebensdauer erreichen. Allerdings ist die erzielbare Zyklenzahl mit 4500 Zyklen deutlich geringer als bei LFP oder NMC.

Der Heizbedarf von 115 W Dauerleistung pro 9.3 kWh Modul ist beträchtlich und beeinflusst den Gesamtwirkungsgrad. Der Wirkungsgrad der Batterie ist aufgrund der zusätzlichen Wärmeerzeugung bei tiefen Leistungen besser als bei hohen. Die zusätzliche Wärme muss bei hohen Leistungen abgeführt werden.

Eine Lithium-Ionen-Batterie weist eine Selbstentladung von etwa 3% pro Monat auf. Integriert in ein Batteriespeichersystem, Stand-By-Verbräuche von etwa 10 W sind üblich. Ein Abschalten ist lediglich ratsam, wenn der Speicher über mehrere Wochen oder Monate gelagert werden soll. Der energetische Wirkungsgrad (=Gesamtwirkungsgrad), also das Verhältnis aus entnommener Energie zu geladener Energie, liegt bei Speichersystemen mit LIB bei 90-95%. Der Gesamtwirkungsgrad der Salzbatterie hängt massgeblich von den Heizverlusten und damit von der Anwendung bzw. dem Betrachtungsrahmen ab. Er ist aber aufgrund der hohen Heizverluste deutlich geringer.

2.3. Sicherheit

Die NaNiCl₂-Batterie weist eine hohe inhärente Sicherheit auf. Sie ist nicht explosiv oder entflammbar. Die Sicherheit dieser Technologie ist somit höher zu bewerten als für LFP-Batterien oder auch NMC-Batterien. Sowohl NMC- als auch LFP-Batterien können nach einem deutlichen Stressereignis thermisch durchgehen, dies auch zeitverzögert. Die austretenden Gase sind dabei entflammbar. Dennoch ist wichtig zu betonen, dass auch LFP- und NMC-Batterien als sichere Technologien gelten und in unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt werden. Auch eine vermeintlich sichere Salzbatterie kann bei falscher Integration (z.B. offener Stromsammelschiene) gefährlich werden. Das Wichtigste bei allen Systemen ist die professionelle Integration.

Beim Start des Projektes im Jahr 2019 war aber ein wesentliches Element bezüglich der Realisierbarkeit die erhöhte inhärente Sicherheit der Salzbatterie. Die Möglichkeit, diese Technologie auch im Tunnel einsetzen zu können, war ein wesentliches Kriterium für die Wahl dieser Batterietechnologie.

2.4. Ökobilanz

Die Bewertung der Ökobilanz ist sehr komplex und vielschichtig. Zudem ist die Anzahl der Studien, welche die Ökobilanz der Produktion einer NaNiCl₂-Batterie umfassend untersuchen, überschaubar.

In einer 2021 veröffentlichten Lebenszyklusanalyse verglichen A. Accardo et al. [6] die Umweltbelastungspunkte einer NMC-Batterie mit jenen einer NaNiCl₂-Batterie:

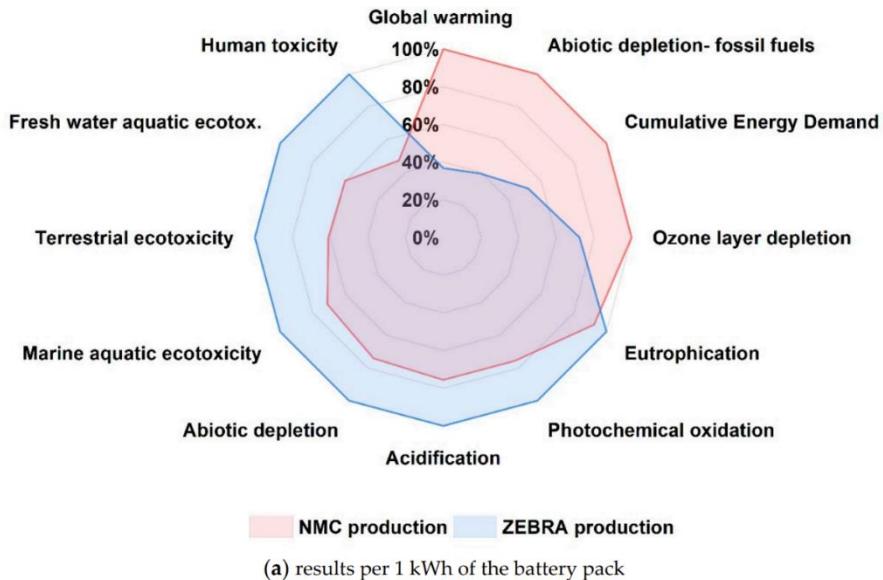


Abbildung 6: Vergleich der auftretenden Umweltbelastung bei der Produktion eines NMC111- und eines NaNiCl₂ (ZEBRA) 1 kWh-Batteriepacks. Es werden mehrere Parameter bezüglich der Umweltbelastung im Verhältnis zueinander dargestellt, wobei die Werte, je weiter aussen sie in der Grafik dargestellt werden, umso höher (negativer) bewertet sind.

Der Vergleich zeigt für die meisten Parameter eine bessere Bilanz für NMC111. Für die Parameter Treibhauspotenzial (Green Warming Potential = GWP), Abiotischer Ressourcenverbrauch – Fossile Brennstoffe (Abiotic depletion – fossil fuels), Kumulativen Energiebedarf (Cumulative Energy Demand) und Ozonabbaupotenzial (Ozone layer depletion) wird eine bessere Bilanz für die NaNiCl₂-Batterie ausgewiesen. Es wird darauf hingewiesen, dass der Energiemix für die Produktion sich insbesondere auf das GWP auswirkt.

Für die Produktion der NMC111 wurde eine Herstellung in China angenommen, für die Herstellung der Salzbatterie eine Herstellung in der Schweiz. Die Produktion für NMC111 wurde mit 130 kg CO₂eq/kWh vergleichsweise hoch angesetzt. Bei der Salzbatterie hat die Produktion von Nickel sowie der Elektrizitätsbedarf für die Produktion der Batterie einen signifikanten Einfluss in allen Kategorien. Zudem werden die Technologien in der Anwendung in einem leichten Nutzfahrzeug verglichen. Unter Einbezug der Verluste im Betrieb schrift die NMC111-Batterie in allen Umweltbelastungsparametern besser als die NaNiCl₂-Batterie ab.

Für das Speichersystem Salt-E Dog [7] (NaNiCl₂) von Anton Bauer gibt der Hersteller GWP-Werte der Produktion von 63 kg CO₂eq/kWh an. Dies entspricht etwa Werten von aktuell in Europa hergestellten NMC-Batterien.

Eine Studie von Longo et al. weist GWP-Emissionen der Produktion von NaNiCl₂-Batterien von etwa 110 kg CO₂eq/kWh aus. Auf Basis der verwendeten Grundmaterialien für NaNiCl₂ kommt das SBB interne LCA-Tool zu ähnlichen Emissionswerten für die Herstellung (133 kg CO₂eq/kWh).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Emissionswerte der Produktion über die unterschiedlichen Studien eine hohe Schwankungsbreite aufweisen. Dies ist auch der limitierten Anzahl von Studien zu diesem Thema geschuldet. Die Produktionsemissionen sowie auch die weiteren Kennzahlen zur Ökobilanzierung von NaNiCl₂-Batterien und NMC-Batterien sind insgesamt in einem ähnlichen Bereich anzusiedeln.

3. Testbetrieb

Die beiden Tragwagen mit den Salzbatterie-Systemen stehen seit April 2022 für die Betriebserprobung zur Verfügung.

Die Betriebserprobung gestaltete sich aufwändiger als erwartet. Der Wagen wird wegen der tiefen Ladehöhe im Betrieb sehr geschätzt. Da die Energieversorgung dieser Wagen jedoch kaum genutzt wird, ist auch die Betriebserprobung unter realen Bedingungen erschwert. Die Anzahl der Einsätze des Wagens wurde zu Beginn des Projekts überschätzt.

Mit der gezielten Suche nach Anwendungsfällen konnten einige betriebliche Erfahrungen gesammelt werden:

Im November 2023 wurden Messungen der Autarkiezeit der Batterie durchgeführt, um die Verwendbarkeit zur Energieversorgung eines Personalmoduls (klimatisierter Aufenthaltsraum) im Gotthard-Basis-tunnel zu ermitteln. Mit statischen Tests konnten die betrieblichen Kennwerte ermittelt und verifiziert werden. Dieser Wagen wird Ende 2024, Anfang 2025 nach Basel verschoben. Dort wird der Prototyp mit Kabelabrolleinrichtung mit Salzbatterie getestet.

Der zweite Tragwagen Xs_tief mit Batteriesystem wurde von April 2023 bis Mai 2024 in Brig in einzelnen Schichten sporadisch eingesetzt. Mit der Zeit wurde der Tragwagen mit Salzbatterie-Modul, auch aufgrund zunehmender Beliebtheit, immer mehr eingesetzt. Von Mai 2024 bis November 2024 wurde dieser in Brig dauerhaft eingesetzt und voll in Planung und Einsatz aufgenommen. Mit diesem Wagen wurde Anfang 2024 eine Betriebserprobung im Simplon-Tunnel während einzelner Schichten durchgeführt.



Abbildung 7: Tragwagen Xs_tief. Typischer Betrieb der LED-Beleuchtungsanlagen mit Salzbatterie-System.

Beim Tragwagen Xs_tief, der im Gotthard-Basis-tunnel eingesetzt wurde, wurde anfangs angedacht, die Batterie zur Energieversorgung des Personalmoduls zu verwenden.

Beim Personalmodul handelt es sich um einen eigenen Wagen. Der Tragwagen Xs_tief und das Personalmodul werden in der Planung jedoch nicht immer als Einheit angedacht. In dem unter Kapitel 3.1 beschriebenen Test konnte aber gezeigt werden, dass die Batteriekapazität der Salzbatterie für die Energieversorgung des Personalmoduls über eine ganze Schicht nicht ausreicht.

Der Tragwagen mit Salzbatterie-System wird nun für die Materiallieferung, die Energieversorgung der Beleuchtung (LED-Scheinwerfer 24 V) und für das Aufladen kleinerer elektrischer Betriebsmittel wie Schwingstopfer oder Schienenbohrmaschinen verwendet. Ab Februar 2025 soll der Tragwagen mit Salzbatterie-System bei der Vorarbeit im Simplon als Einheit mit neu bestellten elektrischen Betriebsmitteln eingesetzt werden.

3.1. Test: Energieversorgung des Personalmoduls 30.10.2023

Im Folgenden wird beispielhaft ein spezifischer Test des Batteriespeichersystem beschrieben:

Am 30.10.2023 wurde die Energieversorgung des Personalmoduls (Heizung/Kühlung) durch die Salzbatterie im Interventions- und Erhaltungszentrum (EIZ) Erstfeld getestet. Es gab bis anhin keine Angaben zu den elektrischen Leistungen der Verbraucher auf dem Personalmodul wie Heizung, Klimaanlage, Beleuchtung usw. Ziel war es also, die Verbraucher des Personalmoduls zu messen. Weiter sollte festgestellt werden, ob die Energiekapazität des Batteriespeichers ausreichend ist, um das Personalmodul für eine ganze Schicht, inklusive Schichtvorbereitung, mit Energie zu versorgen.

Abbildung 8 zeigt den Verlauf des Ladezustands der Salzbatterie über den Schichtverlauf. Die Schicht dauerte etwa von 8:35 bis 17:40 Uhr. Die Batterie startete mit einem Ladezustand von 100%.

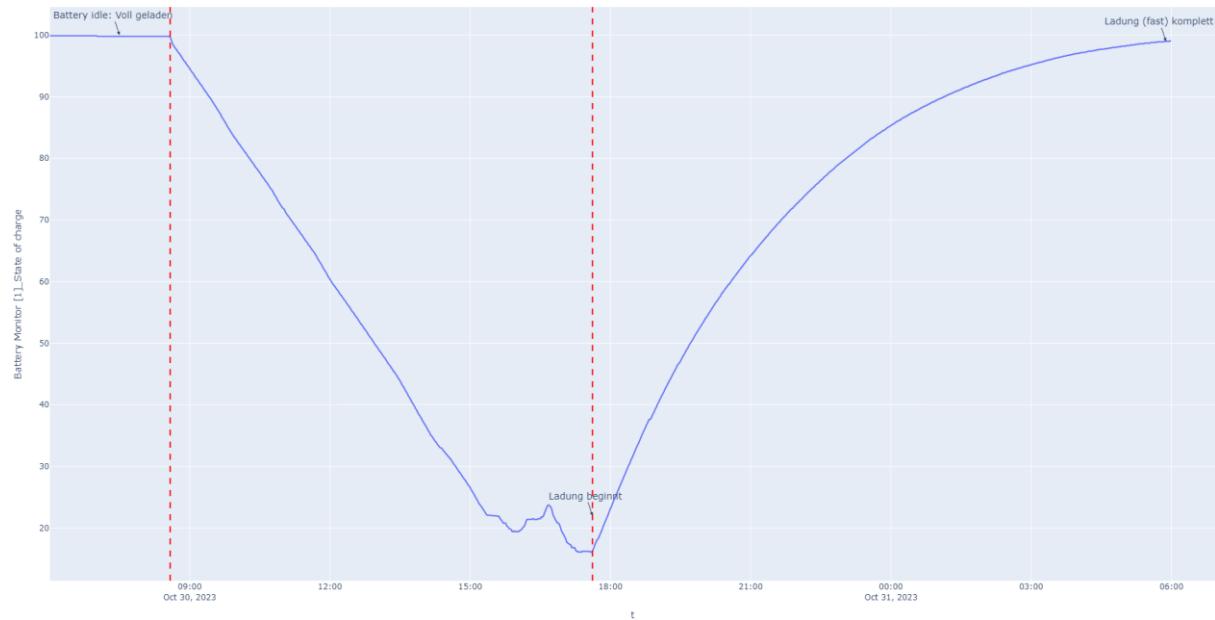


Abbildung 8: Ladezustand der Salzbatterie über den Schichtverlauf am 30.10.2023 in Erstfeld.

Über die Schicht zeigt sich ein konstanter Leistungsbezug bis etwa 15:20 Uhr. Es konnte festgestellt werden, dass die Salzbatterie die benötigten Leistungen bereitstellen kann. Allerdings schritt die Entladung rapide voran, was in der Abbildung gut erkennbar ist.

Die Salzbatterie bestand den Stresstest gut, was die Voraussetzung für den späteren Test im Einsatz während der realen Schicht ist.

Um 15:30 Uhr wurde der 8 kVA Dieselgenerator eingeschaltet, um festzuhalten, welche Spannung und Stromstärke AC-IN-seitig erzeugt wird. Es konnte ein sauberer 50 Hz-Sinus mit 410 V und 8 A pro Phase verzeichnet werden.

Nach diesem Test sollte noch überprüft werden, wo das Limit des Dieselgenerators liegt. Dabei handelt es sich um einen Benchmarking-Test, kein reales Szenario. Ab 16:30 Uhr wurden vorsichtig gestaffelt die Verbraucher des Personalmoduls hinzugeschaltet. Ab zirka 17:00 Uhr konnte der Dieselgenerator die benötigte Leistung nicht mehr liefern und schaltete ab.

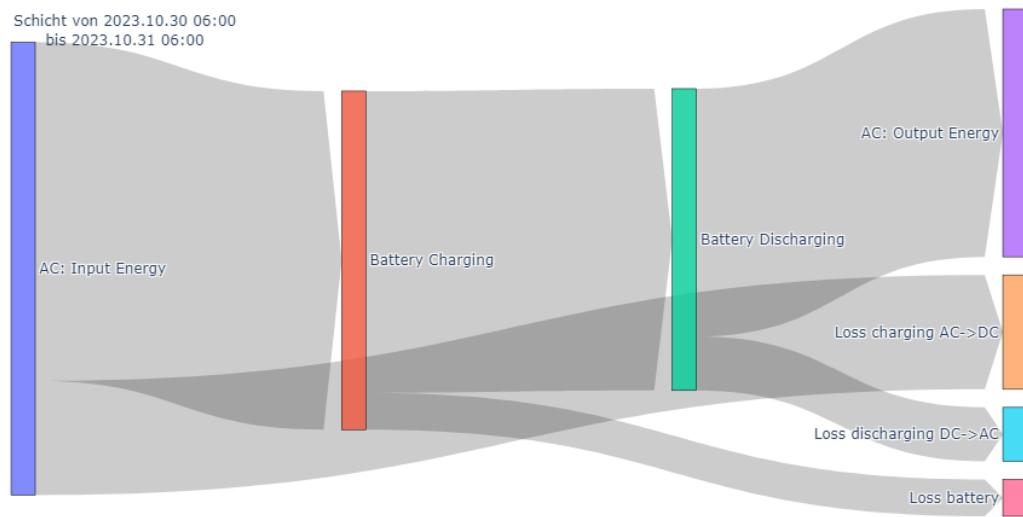


Abbildung 9: Sankey-Diagramm der Energieflüsse in und aus der Salzbatterie.

Um die Energieflüsse während des Einsatzes inklusive Ladeprozess besser nachvollziehen zu können, wurde ein Sankey-Diagramm erstellt. Dazu wurden die Energiemengen ab 30.10.2023 um 6:00 Uhr bis zum 31.10.2023 um 6:00 Uhr berücksichtigt.

AC-seitig wurden für das Aufladen 60.9 kWh bezogen (AC: Input Energy). Davor wurde die Batterie mit 45.5 kWh aufgeladen (Battery Charging). Es wurden 15.4 kWh Ladeverluste (Loss Charging AC -> DC) verzeichnet. Aus der Batterie wurden 33.3 kWh wieder AC für die Energieversorgung bezogen (AC: Output Energy). Dabei traten 7.3 kWh Verluste beim Entladen (Loss Charging AC -> DC) und knapp 5 kWh allgemeine Batterieverluste (Loss battery) auf.

Die Verluste für das Heizen des Batteriesystems dürften sich dabei auf die unterschiedlichen Verluste aufteilen. Über einen 24-Stunden-Zeitraum zeigte die Salzbatterie einen Gesamtwirkungsgrad von etwa 55%. Dieser Wert scheint, auch im Vergleich zu anderen Messungen, etwa im Durchschnitt zu liegen.

Die Anwendung des Energiesystems als Ersatz eines Dieselgenerators zur Klimatisierung des Personalmoduls im Erhaltungszug des GBT/CBT wurde geprüft. Die verfügbare Leistung der Salzbatterie ist für die Versorgung des Personalmoduls ausreichend. Allerdings genügt die gespeicherte Energie für eine Schicht im Tunnel knapp nicht. Dies auch, da die Zugvorbereitung ausserhalb des Tunnels sowie der erhöhte Heizbedarf im Winter mitberücksichtigt werden müssen.

4. Ergebnisse

4.1. Technologische Reife in der mobilen Bahnanwendung

Die mobile Energieversorgung im Bahnbetrieb stellt hohe Anforderungen an das Material z.B. bezüglich Vibrationen, Stößen und Temperaturen. Es war ein erklärtes Ziel dieses Pilotprojekts, die Betriebstauglichkeit und Robustheit der Salzbatterie-Technologie festzustellen.

4.1.1. Sicherheitsniveau

Es konnte festgestellt werden, dass das Sicherheitsniveau der Salzbatterie-Technologie hoch und daher auch für den Einsatz für Untertagarbeiten im Tunnel als ausreichend einzustufen ist.

Die Salzbatterie ist eine Hochtemperatur-Batterie mit rund 270°C Betriebstemperatur. Die Integration sowie die Trennabstände sind jedoch gut gewählt, sodass hinsichtlich Temperaturabstrahlung keine Gefährdung für die Mitarbeitenden besteht.

4.1.2. Stöße und Vibrationen

Im Innern der Salzbatterie dient ein Festkörper-Elektrolyt aus Keramik als Separator. Obwohl die Batterie-Technologie ursprünglich aus der Automobilindustrie stammt, wurde die Tauglichkeit von Keramik im Bahnumfeld aufgrund der vorherrschenden Stöße beim Kuppeln, harter Schläge, ungefederter Laufflächen und Vibrationen von Anfang an kritisch betrachtet.

Vier der zehn eingesetzten Salzbatterie-Module musste bereits im Rahmen der Garantie ausgetauscht werden. Als Fehlerursache wurde ein Zellenschluss als Folge eines Fertigungsfehlers genannt. Im Sommer 2024 wurde der Defekt eines weiteren Batteriemoduls gemeldet. Es ist unklar, inwiefern Defekte auf Schäden der Keramik aufgrund von Stößen und Vibrationen zurückzuführen sind. Insbesondere die Auswirkung von Stößen beim Verschieben der Tragwagen, bei denen die Batteriemodule ausgeschaltet, abgekühlt und die Salzschmelze in einem festen Zustand vorliegt, sind kritisch zu betrachten.

4.2. Batteriesystem und Erprobung

Insgesamt sind die Teams mit den Tragwagen Xs_tief mit Salzbatterie-System zufrieden. Das System wird insbesondere an solchen Standorten oft und gerne eingesetzt, an denen die Vorteile der ausbleibenden Abgas- und Läremissionen während des Betriebs der Baustelle ausgespielt werden können, vor allem beim Einsatz im Tunnel.

Die Salzbatterie wurde so ausgelegt, dass sie den zuvor verbauten Dieselgenerator ersetzen kann. Dieser wurde insbesondere für die Energieversorgung der Beleuchtung auf der Baustelle und für das Aufladen kleiner Werkzeuge genutzt. Diesen Anwendungsfall kann die Salzbatterie gut erfüllen. Mit der gespeicherten Energie lässt sich eine Baustelle mehrere Nächte hindurch betreiben. Die durch die LED-Leuchten bezogene Leistung ist im Verhältnis zur installierten Leistung gering. Die vorhandene Leistung ist mehr als ausreichend für die Energieversorgung der Beleuchtung der Baustelle. Das Energiesystem muss, sofern eine Nachladung erforderlich ist, zurück an den Standort gebracht werden.

Für die Energieversorgung des Personalmoduls für Heizen und Klimatisierung im Erhaltungszug des GBT/CBT ist der Batteriespeicher etwas knapp dimensioniert. Die Energie ist ausreichend für die Schicht im Tunnel, inklusive Zugvorbereitung. Insbesondere im Winter reicht die Energie jedoch nicht aus.

4.2.1. Defekte Batteriemodule

Auf zwei Tragwagen Xs_tief wurden jeweils fünf Salzbatterie-Module zu einem Batteriespeichersystem verbaut. Obwohl die Batterien anfangs mehrheitlich im Leerlauf betrieben wurden, mussten bereits nach kurzer Zeit vier (auf jedem Tragwagen zwei) der zehn eingesetzten Module ausgetauscht werden. Sie wiesen einen Defekt auf. Seitens innovenergy wurde als Fehlerursache ein Zellenschluss als Folge eines Fertigungsfehlers genannt. Diese vier Module wurden im Rahmen der Garantie ersetzt.

Im Sommer 2024 nach knapp zwei Jahren Betrieb fiel ein weiteres Modul aus. Ein Defekt wird nicht automatisch vom System erkannt und gemeldet. Über das Dashboard ist der Ausfall des Moduls nicht erkennbar. Da eines von fünf Modulen defekt war, standen den Mitarbeitenden zu dieser Zeit nur noch 80% der Energiekapazität zur Verfügung. Der Defekt des Batteriemoduls wurde erst zeitverzögert durch eine erweiterte Datenanalyse festgestellt.

Insgesamt fielen über die zwei Jahre Betriebszeit bereits 50% der installierten Module aus. Diese Defekte – und die Zeit bis sie wieder behoben sind – stellen selbstverständlich auch eine deutliche Einschränkung in der Verfügbarkeit des Batteriesystems und damit des Betriebs dar.

4.2.2. Energieverbrauch

Da es sich bei der Natrium-Nickelchlorid-Batterie bzw. Salzbatterie um eine Hochtemperatur-Batterie handelt, die bei rund 270-350°C betrieben wird, muss diese Temperatur auch aufrechterhalten werden. Sofern die NaNiCl₂-Batterie regelmässig geladen/entladen wird, ist die Wärmeproduktion auf Wirkungsgradverlusten ausreichend. Wird sie jedoch nicht genutzt, muss Wärme über ein Heizsystem zugeführt werden, um die Batterie auf Betriebstemperatur zu halten. Für ein 9.3 kWh Modul werden durchgängig rund 115 W Heizleistung benötigt. Für das Gesamtsystem führt dies zu zirka 700 W (gemessene) dauerhafte Heizleistung. Sofern die Batterie nicht an eine Stromversorgung angeschlossen ist, verbraucht die Batterie daher rund 1.25% ihrer gespeicherten Energie pro Stunde, um die Temperatur aufrecht zu erhalten.

Der Energieverbrauch ist beträchtlich! Dies hat einen deutlichen Einfluss auf die Effizienz des Systems und damit auch auf die Umweltverträglichkeit [8] und stellt einen wesentlichen Schwachpunkt der Technologie dar.

4.2.3. Personen- und Sachschutz

Die Prüfung des Salzbatterie-Systems durch einen sachverständigen Mitarbeiter hat erhebliche Mängel im Bereich Personen- und Sachschutz sowie der Dokumentation gezeigt. Die Mängel wurden durch den Lieferanten behoben und die normenkonforme und sichere Ausführung anschliessend durch einen unabhängigen Elektro-Sicherheitsberater mit einer «Expertise über die elektrische Sicherheit» bestätigt. Dies ist ein Beispiel von vielen, wie noch nicht etablierte Technologien auf ihrem Weg in die Praxis fachlich fundiert begleitet werden müssen.

4.2.4. Dichtigkeit und Kondenswasser

Das beim Aufwärmen sichtbare Kondenswasser im Innern der Batteriemodule wird vom Hersteller als bedenkenlos eingestuft, wird jedoch kritisch verfolgt. Gemäss innovenergy ist dies aufgrund der Temperaturunterschiede von Umgebung und Batteriespeicher nicht vermeidbar.



Abbildung 10: Kondenswasser an der Steuerungselektronik des Batteriemoduls 48TL200.

Ursprüngliche Bedenken hinsichtlich der Dichtigkeit bei den Wechselrichtern konnten durch eine gute Integration gelöst und ausgeräumt werden.

4.3. Nötige betriebliche Anpassungen

Es erfordert einen gewissen Aufwand, relativ starre, betriebliche Prozesse für die erfolgreiche Implementierung neuartiger Technologien anzupassen. Standorte, die besonders von den Vorteilen der neuen Technologie profitieren könnten (keine Abgase, geringere bis keine Lärmemissionen) zeigten eine hohe Flexibilität, diesen Wandel zu ermöglichen. Die Anpassungen der Betriebsprozesse sind machbar.

4.3.1. Technologiewandel ganzheitlich gestalten

Der Wechsel auf neue Energieträger muss ganzheitlich angedacht werden. Mit den Einschränkungen hinsichtlich Energiekapazität kann der Wandel nicht ohne flankierende Massnahmen, z.B. zu Energieeffizienz, umgesetzt werden. Für eine erfolgreiche Transformation müssen auch die Verbraucher dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. So würde z.B. die Beleuchtung mit Glühlampen (ohmsche Verbraucher) anstatt mit LED zu deutlich erhöhten Energieverbräuchen führen – die Batterie müsste wesentlich grösser dimensioniert werden.

4.3.2. Ladeinfrastruktur

Eine leistungsfähige Ladeinfrastruktur ist für das Nachladen der Batterien unerlässlich, unabhängig von der verwendeten Batterietechnologie. Die Salzbatterie wird über einen CEE16-Stecker ab der Hausinstallation oder Elektrant geladen. Die Verfügbarkeit einer Anschlusssteckdose CEE16 zum Laden der Batterie ist nicht überall gegeben. Die Ladeinfrastruktur für Batteriespeicher an den einzelnen Örtlichkeiten muss überprüft und ergänzt werden. Dies wird im separaten SBB Projekt «Ladeinfrastruktur» behandelt. Damit wird sich auch die Situation bzgl. Lademöglichkeiten ab Elektranten (16 A) verbessern.

Die notwendige Infrastruktur für den Betrieb von Batteriespeichern und bauliche Anpassungen sind unabhängig von der gewählten Batterie-Technologie.

4.3.3. Verantwortlichkeit und Planung der Energieversorgung

Die Planung und Bereitstellung der benötigten Energie pro Baustelle und Schicht gewinnt mit der Nutzung von Batteriespeichern an Bedeutung. Die Energiekapazität des Batteriemoduls ist limitiert, der Einsatz und dessen Energiebedarf müssen genau geplant werden. Zuvor war die nutzbare Energie durch den grosszügigen Dieseltank kaum eingeschränkt. Mit dem Technologiewechsel ändern sich Arbeitsplanung und -vorbereitung deutlich! Der rechtzeitigen und sorgfältigen Planung und der Bereitstellung der benötigten Energie pro Baustelle und Schicht kommen in Zukunft ein höheres Gewicht zu.

Die Herausforderung im Umgang mit den Batteriespeichern liegt vorwiegend bei der Betreuung des Salzbatterie-Systems: Damit die Batterie betriebsbereit ist, muss sie rechtzeitig geheizt und geladen werden. Dazu braucht es in den Teams Mitarbeitende, die für die Vorbereitung, das rechtzeitige Heizen und Laden und die allgemeine Betriebsbereitschaft der Batterie verantwortlich sind.

Dieser Punkt gilt für die Salzbatterie-Technologie umso mehr, da sie, aufgrund der vergleichsweise hohen Selbstentladung für den Heizvorgang und der geringen Leistungsaufnahme, unmittelbar vor dem Einsatz vorkonditioniert und über einen langen Zeitraum voll aufgeladen werden muss.

Die Ladeleistung der Salzbatterie ist begrenzt. Bei voller Ladeleistung dauert eine volle Ladung etwa 12 Stunden. Eine kurzfristige Schnellladung ist einerseits aufgrund der Beschränkungen durch die Batterietechnologie und andererseits auch aufgrund der vorliegenden Integration und der spezifischen systembedingten Beschränkung nicht möglich.

Da der Energiebedarf zur Aufrechterhaltung der Temperatur hoch ist, lohnt es sich, das Batteriesystem herunterzufahren und abzukühlen, sofern es über einen Zeitraum von mehreren Wochen nicht benötigt wird. Dies erfordert eine zusätzliche, langfristige Planung, auch weil die Wiederinbetriebnahme, also das Wieder-Aufheizen der Batterie, rund 14 Stunden benötigt. Dies ist die gemessene Aufwärmzeit, beginnend bei einer Aussentemperatur von 25°C. Die Batterie wird während des Aufheizvorgangs um zirka 17°C pro Stunde erwärmt.

Es lässt sich festhalten, dass von Einsatz zu Einsatz mehr Erfahrungen und Gespür für das Batteriesystem gesammelt werden. Die Qualität der Kapazitäts- und Verbrauchsplanung nimmt mit der Zeit zu.

Die nötigen Unterhaltsabschnitte sowie Kontrollintervalle der unterschiedlichen Komponenten und Hersteller müssen dem Verantwortlichen bekannt sein und nachgeführt werden.

4.3.4. Zustandsüberwachung

Das Dashboard erlaubt eine schnelle visuelle Kontrolle der Batterieparameter. Mittels einer Software können detailliertere Analysen vorgenommen werden. Der Umgang mit diesen Werkzeugen muss für die Betreuung und Überwachung geübt werden.

Das Erkennen von Fehlerzuständen oder Defekten gestaltet sich allerdings schwierig. Ein Ausfall von Teilkomponenten oder ein Fehlerzustand generiert nicht automatisch einen Alarm oder eine Fehlermeldung. So wurde der Defekt eines einzelnen Batteriemoduls erst nachträglich bemerkt – die Schicht musste mit um 20% reduzierter Batteriekapazität (nur vier von fünf Modulen) durchgeführt werden.

4.4. Sensibilisierung und Schulungsbedarf

Mit der Betriebserprobung in einem begrenzten Umfeld sollten Erkenntnisse im Rahmen der Einführung neuer Technologien für den emissionsfreien Baustellenbetrieb gewonnen werden. Der Fokus lag darauf, Akzeptanz zu schaffen und Schulungsbedarf im Rahmen des Technologiewechsels zu ermitteln. Es konnten wertvolle Erkenntnisse für eine erfolgreiche Einführung gesammelt werden.

4.4.1. Akzeptanz

Diskussionen mit Mitarbeitenden vor Ort haben gezeigt, dass es vor allem der Nutzen von abgasfreien Baustellen im Tunnel ist, der die Betroffenen zur Unterstützung und zur positiven Einstellung bewegt. Weniger eine Affinität oder ein Interesse für die neuartige Technik.

Die Vorteile der fehlenden Abgas-, Feinstaub- und Lärmemissionen können insbesondere im Bereich Untertagebau bzw. im Tunnel ausgespielt werden. In besonders gut ausgebauten unterirdischen Infrastrukturen sind die lokalen Emissionen eher zweitrangig.

Die Mitarbeitenden auf ihren Baustellen haben sich an die heutigen Umstände der Arbeit gewohnt. Die Umstellung ist und bleibt eine Veränderung aufgrund der zahlreichen, bereits erwähnten Aspekte. Es zeigt sich aber, dass nach Etablierung der neuen emissionsarmen, leisen und einfach handhabbaren rein elektrischen Systeme ein Zurück nicht mehr erwünscht ist, da die Vorteile nach ersten positiven Erfahrungen überwiegen.

4.4.2. Schulungsbedarf, Anleitungen

Ein Technologiewechsel stellt grosse Herausforderungen an das betroffene Personal. Unsicherheit und Ablehnung von Änderungen müssen mit Schulung und Unterstützung sorgfältig begegnet werden.

Die umfangreiche Instruktion am Fahrzeug, bei der die Technik, die Sicherheit, der Umgang und die wichtigsten Bedienkomponenten vorgestellt wurden, hat sich als sehr nützlich erwiesen. Dabei sind mindestens die für das Batteriesystem verantwortlichen Personen, deren Stellvertreter sowie die zuständigen Poliere einzubeziehen. Die Themen Planung und Betrieb wurden im Einzelaustausch mit den Betreuern vertieft.

Die Bedienung ist möglichst einfach gestaltet. Einfache Bedienung ist auch eine Anforderung, um intuitive Bedienung und Betrieb zu gewährleisten. Dies gilt sowohl für die Hardware als auch für die Software: Das Dashboard ist z.B. auch via Smartphone abrufbar. So kann es als Kontrollorgan leicht in die Planung integriert werden.

Als Bedienungshilfe werden kurze Checklisten geschätzt, anhand derer auf einfache Art die Bedien-schritte zur sicheren Erreichung des Zielzustands gezeigt werden. Auch eine kurze Instruktion am Fahr-zeug ist unentbehrlich.

Im Vordergrund stehen immer die Sicherheit und die Erfüllung des effektiven Arbeitsauftrages der Mitarbeitenden.

4.5. Ausschreibungen und Anforderungsdefinitionen

Ein weiteres Ziel war es, für die zukünftige Beschaffungen von Energieversorgungseinheiten im Bau-stellenbetrieb griffige Anforderungen zu definieren.

4.5.1. Konstruktion

Die Masse des Batteriesystems ist auch wegen der Fahrdynamik des Wagens eine wichtige Grösse. Die maximale Last auf den Fahrzeughämen des Xs_tief musste eingehalten werden. Mit der Entwicklung und dem Bau des Salzbatterie-Systems konnte erst begonnen werden, als die maximal zulässige Masse des Systems im Rahmen einer lauftechnischen Simulation des Gesamtfahrzeugs festgelegt war. Das hat eine direkte Wechselwirkung mit der mechanischen Konstruktion.

Im Laufe des Systemdesigns hat sich gezeigt, dass die Anforderungen des Bahnbetriebs beim Lieferanten unterschätzt oder zu wenig bekannt waren. Der mechanischen Stabilität des Rahmens und der Einhausung von Generatoren sind grosse Beachtung zu schenken, wenn die Geräte fest mit dem Wagen verbunden und damit Teil des Wagens sind. Dazu mussten nachträglich Festigkeitsnachweise des Batterieträgers beauftragt und erbracht werden.

Nachträglich betrachtet wurde der Pilot zu kompakt gebaut. Es gibt keine Möglichkeit für Erweiterungen wie Absicherungen, Abgänge, Module oder auch die geeignete Positionierung eines Notaus o.ä. Bei einer weiteren Umsetzung würde einer unterhalts- und betriebsfreundlicheren Gestaltung mehr Beachtung geschenkt.

Zudem war auch stets das Thema Gewicht im Vordergrund. Das System tangierte die Grenzen und so mussten Lösungen gefunden werden. Aus diesem Grund ist die Energiedichte des Gesamtsystems wichtig.

4.5.2. Personen- und Sachschutz

Dass die Tragwagen mit den Batteriesystemen im Tunnel eingesetzt werden sollten, war ein relevanter Faktor für die Wahl der Salzbatterie-Technologie. Aufgrund der hohen Sicherheit war der Einsatz im Tunnel unbedenklich. Die Anforderungen für den Einsatz von anderen Batterietechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien in Untertagearbeiten wurden in den vergangenen Jahren weiter geschärft und werden ebenfalls in zukünftige Ausschreibungen aufgenommen.

Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass insbesondere bei Neuprojekten oder Piloten die Ausführung des Personen- und Sachschutzes noch genauer vorgeben und überprüft werden muss. Hier ist insbesondere Wert auf eine klare Rollenverteilung zwischen Auftraggeber, Vertreiber, Produzent, Installateur und Betreiber zu legen.

4.5.3. Witterung

Das Speichersystem ist auf dem Tragwagen über längere Zeit (Abstellung) der Witterung ausgesetzt. Witterungseffekte wie Wind, Schnee und Eis müssen berücksichtigt werden. So ist z.B. darauf zu achten, dass Kontroll- oder Statusanzeigen wie Displays auch bei schlechter Witterung noch gut erkennbar sind, oder den Notaus-Schalter so zu gestalten, dass er eisgeschützt ist.

Für die Gehäuseverkleidung wurde aus Gründen des Gewichts ein Lochblech statt ein Vollblech verwendet. Dies kann zu Regenwasser im Gehäusekasten führen.

5. Diskussion

Die Ergebnisse des Pilotprojekts zur Erprobung von Salzbatterien auf den SBB Tragwagen Xs_tief werfen ein differenzierteres Licht auf die Potenziale und Herausforderungen dieser Technologie im Bahnbetrieb. Die Ausgangslage, die durch die Nutzung konventioneller Dieselgeneratoren geprägt ist, zeigt das Potenzial und die Notwendigkeit einer Umstellung auf emissionsfreie Energiequellen, insbesondere aufgrund der hohen Lärmemissionen und Abgase, die in Tunnelanlagen problematisch sind.

Für dieses Projekt wurde die Natrium-Nickelchlorid-Batterietechnologie, im Folgenden auch Salzbatterie genannt, ausgewählt. Dies einerseits aufgrund der hohen Sicherheit und des unproblematischen Einsatzes im Tunnel, andererseits auch, um gezielt alternative Speichertechnologien zu Bleisäure- und Lithium-Ionen-Batterien zu erproben. Die Implementierung der Salzbatterien in zwei Tragwagen Xs_tief seit April 2022 hat wertvolle Erkenntnisse über die technologische Reife und Anwendbarkeit in mobilen Bahnanwendungen geliefert.

Der Testbetrieb lief aufgrund der tatsächlich geringen Nutzung der Batterien nur langsam an. Das Pilotprojekt konnte zeigen, dass Batteriespeicher eine tragfähige Alternative zum Dieselgenerator darstellen. Die Tragwagen Xs_tief eignen sich in Kombination mit der Salzbatterie besonders gut für die Energiebereitstellung für LED-Beleuchtung sowie das Aufladen kleinerer elektrischer Betriebsmittel wie Schwingstopfer oder Schienenbohrmaschinen. Der emissionsfreie und lärmarme Betrieb wird insbesondere für Tunnel- oder Nachtarbeiten geschätzt. Die positiven Erfahrungen im Tunnelbau können als Anreiz dienen, die Unterstützung für den Technologiewechsel trotz anfänglicher Herausforderungen zu fördern.

Allerdings traten während der Betriebszeit auch signifikante Probleme auf, insbesondere in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Batteriemodule. Im Zeitraum von zwei Jahren fielen bereits fünf von zehn Salzbatterie-Modulen aus und mussten ersetzt werden. Der Bahnbetrieb stellt unter anderem aufgrund von Stößen und Vibrationen, z.B. hervorgerufen durch Kuppeln, hohe Anforderungen an eine mobile Energieversorgung. Inwiefern die hohe Ausfallrate der Salzbatterie-Module auf Beschädigungen durch Stöße oder Vibrationen zurückzuführen ist, konnte nicht geklärt werden. Innovenergy nannte einen Zellenschluss als Folge eines Fertigungsfehlers als Fehlerursache für die ersten vier defekten Module. Da bei Ausfall von Teilkomponenten keine Fehlermeldungen ausgegeben werden, wurde der Ausfall eines weiteren Moduls erst zeitverzögert und eher zufällig erkannt. Der Ausfall der Module schränkt auch die Verfügbarkeit des Batteriesystems ein.

Die Erprobung hat auch gezeigt, dass die Integration von neuen Technologien in bestehende Betriebsabläufe eine Herausforderung darstellt, die sorgfältig geplant und umgesetzt werden muss. Es ist entscheidend, dass die Schulungs- und Sensibilisierungsmassnahmen weiter ausgebaut werden, um Unsicherheiten und Widerstände gegenüber der neuen Technologie abzubauen. Besonders hervorzuheben ist die Notwendigkeit, für das Batteriesystem verantwortliche Personen zu benennen, die das System betreuen und die rechtzeitige Planung und Bereitstellung inklusive Aufladen und Vorkonditionierung sicherstellen. Dies gilt umso mehr bei der Verwendung der Nickel-Natriumchlorid-Technologie, da sie aufgrund der vergleichsweisen hohen Selbstentladung (Heizen) und durch die geringe Leistungsaufnahme über einen längeren Zeitraum unmittelbar vor dem Einsatz vorkonditioniert werden muss.

Es erfordert einen gewissen Aufwand, die betrieblichen Prozesse für die erfolgreiche Implementierung neuartiger Energietechnologien anzupassen. Mitarbeitende, die besonders von den Vorteilen der neuen Technologie profitieren – hier sind die fehlenden Abgas-, Feinstaub-, und Lärmemissionen zu benennen – zeigen eine erhöhte Flexibilität, diesen Wandel zu ermöglichen. Die Anpassungen der Betriebsprozesse sind machbar.

Insgesamt zeigt das Pilotprojekt, dass die Salzbatterien das Potenzial haben, eine nachhaltige und effiziente Alternative zu Dieselgeneratoren im Bahnbetrieb zu bieten. Dennoch sind weitere Anstrengungen erforderlich, um die technischen Herausforderungen zu bewältigen und die notwendigen Anpassungen in der Infrastruktur und den Betriebsabläufen vorzunehmen. Die gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse werden entscheidend sein, um die Grundlage für zukünftige Projekte zu schaffen und die Transformation hin zu emissionsfreien Baustellenbetrieben erfolgreich zu gestalten.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist der hohe Energieverbrauch der Salzbatterien. Um die notwendige Betriebstemperatur von etwa 270°C aufrechtzuerhalten, benötigt jedes Modul kontinuierlich eine Heizleistung von zirka 115 W. Für das gesamte System summiert sich dies auf etwa 700 W, was zu einer signifikanten Selbstentladung von rund 1,25% der gespeicherten Energie pro Stunde führt, wenn die Batterie nicht aktiv genutzt werden. Der für das Heizen zusätzliche Energiebedarf ist beträchtlich! Dieser

hohe Energieverbrauch hat direkten Einfluss auf die Effizienz des Systems und stellt einen wesentlichen Nachteil dar, insbesondere wenn die Batterien nicht regelmäßig eingesetzt werden. Die Notwendigkeit, Wärme zuzuführen, um die Temperatur aufrechtzuerhalten, führt zu zusätzlichen Kosten und zu einem erhöhten ökologischen Fussabdruck. Der Gesamtwirkungsgrad liegt unter anderem aufgrund des Heizbedarfs deutlich tiefer als bei vergleichbaren Batteriespeichern mit Lithium-Ionen-Batterietechnologie. In einzelnen Versuchsmessungen wurden Gesamtwirkungsgrade von etwa 50% festgestellt. Hierbei muss angemerkt werden, dass sowohl die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades als auch die Berechnung des ökologischen Fussabdrucks sehr herausfordernd sind, da die Systemgrenzen unterschiedlich definiert werden können – die Heizleistung hängt insbesondere von der Dauer des Tests und den Leerlaufzeiten ab.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Pilotprojekt zur Erprobung von Salzbatterien auf den SBB Tragwagen Xs_tief hat gezeigt, dass Batteriespeichertechnologien für mobile Anwendungen im Bahnumfeld grundsätzlich eingesetzt werden können. Dabei sind insbesondere die typischen Herausforderungen vom Bahnumfeld wie z.B. harte Schläge ungefederter Ladeflächen und Stöße beim Kuppeln zu beachten. Batteriespeicher stellen eine tragfähige Alternative zu Dieselgeneratoren dar und bieten, neben der Dekarbonisierung, viele Vorteile wie die Reduktion von Emissionen und Lärmelastungen.

Die Erprobung der Salzbatterie lieferte wertvolle Erkenntnisse über die technologischen Möglichkeiten und Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Sicherheit und Robustheit im Einsatz. Mithilfe der Salzbatterie-Technologie konnten wir in diesem Pilotprojekt in einem frühen Stadium der Batteriespeicher im Bahnumfeld wertvolle Erkenntnisse beim Einsatz im Tunnelbau sammeln.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass spezifisch die Nachteile der Salzbatterie wie z.B. der sehr hohe Heizbedarf und der damit verbundene geringe Gesamtwirkungsgrad signifikante Einschränkungen für unsere Anwendungen darstellen. In der mobilen Anwendung und dem zusätzlichen Betreuungsaufwand umso mehr. Im mobilen Bahnbetrieb wird aufgrund der hohen Selbstentladung und des hohen Energieverbrauchs die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien oder zukünftig auch Natrium-Ionen-Batterien bevorzugt. Die Salzbatterie ist daher gemäss aktuellem Stand der Entwicklungen aufgrund der Erfahrungen vorerst keine Option. Entwicklungssprünge im Bereich der Salzbatterie, die dazu führen, dass sich das System im Bahnumfeld gegenüber anderen Technologien durchsetzen könnte, werden in den nächsten zehn Jahren nicht erwartet.

Die in diesem Pilotprojekt gemachten Erfahrungen werfen Fragen für die zukünftige Nutzung der Tragwagen Xs_tief mit Salzbatterie auf. Ein Entscheid steht noch aus, ein Rückbau der Salzbatterien ist aber nicht ausgeschlossen. Gründe dafür sind die geringe Robustheit und Zuverlässigkeit, die hohe Ausfallquote und der damit erhöhte Betreuungsaufwand sowie zusätzliche Kosten. Zudem kann das System nicht einfach durch die Linie übernommen werden. Auch weil das System nicht skaliert werden wird, bleibt es ein kompliziertes Einzelsystem. Die erhöhte Komplexität im Betrieb und die zu Beginn des Projekts überschätzten Anwendungsfälle sind bei diesem Entscheid ebenfalls zu berücksichtigen.

Die SBB wird den Ersatz der fossilen Energieträger im Bahnumfeld weiterhin vorantreiben und dabei auf etablierte Lithium-Ionen-Technologien setzen. Diese bieten eine bessere Energieeffizienz und geringere Verluste im Betrieb, was ein optimales Gesamtsystem darstellt. Sie weisen darüber hinaus eine technologische Reife auf, die der Bahntauglichkeit (Schutz gegen Schäden durch Vibrationen oder Stöße, Sicherheit im Tunnel usw.) gerecht wird.

Die in diesem Pilotprojekt gemachten Erfahrungen sind für die weiteren Beschaffungsprojekte im Bereich der batterieelektrischen Baustellengeräte und der batterieelektrischen Schienenfahrzeuge wertvoll. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt fliessen sowohl in die Beschaffungsprojekte und die damit verbundenen Anforderungen, als auch in die zukünftige Einführung der batterieelektrischen Systeme ein. Im Bereich der Baustellengeräte werden bereits kleine mobile Batteriespeicher als Ersatz für kleine Dieselgeneratoren eingesetzt (e-Genset S). Schon in wenigen Jahren steht die Einführung neuer Batteriespeichersysteme, die auf Schienenfahrzeugen eingesetzt werden, an: Neue Bahnwagen mit Batteriespeichern für die Energieversorgung von Maschinen auf dem Wagen, die zukünftigen Baudienstrakturen, aber auch die neuen Streckenlokomotiven mit Last-Mile-Batteriemodul von SBB Cargo werden bereits in wenigen Jahren bei der SBB eingeführt.

Schulungsprogramme und die Bereitstellung einer adäquaten Ladeinfrastruktur müssen integraler Bestandteil zukünftiger Projekte sein, um eine erfolgreiche Implementierung sicherzustellen. Ein regelmässiger Wartungsplan und eine kontinuierliche Überwachung des Batteriezustands sind notwendig, um Ausfälle frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Zudem ist eine Art «Fernwartung» für die erfolgreiche Durchdringung von Batteriespeichern essenziell.

Die gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse bilden die Grundlage für zukünftige Projekte und tragen zur erfolgreichen Transformation hin zu emissionsfreien Bahn- und Baustellenbetrieben bei.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
BMS	Batterie-Management-System
CBT	Ceneri-Basistunnel
DC	Direct Current (Gleichstrom)
ESS	Energy Storage System
GBT	Gotthard-Basistunnel
LCA	Lebenszyklusanalyse
LED	Leuchtdiode
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LFP	Lithium-Eisenphosphat-Batterietechnologie
LS	Leitungsschutzschalter
MNS	Mit Notstrom / USV (System ist inselfähig.)
NaNiCl ₂	Natrium-Nickelchlorid-Technologie, umgangssprachlich auch Salzbatterie
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid-Batterietechnologie
RCD	Residual Current Device (Fehlerstrom-Schutzschalter), FI(-Schalter)
RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn
SOC	State of Charge
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Literaturverzeichnis

- [1] D. Sauer, J. Kowal, L. Willenberg, C. Rahe, M. Teuber, J. Drillkens, F. Ringbeck und C. Schäper, "Speicherung der elektrischen Energie", Springer Verlag, Nov 2019.
- [2] S. Oberholzer, «Energiespeichertechnologien - Kurzübersicht 2021,» Bundesamt für Energie BFE, 2021.
- [3] M. Armand, N. Ortiz-Vitoriano, J. Olarte, A. Salazar und R. Ferret, «Salt Batteries: Opportunities and applications of storage systems based on sodium nickel chloride batteries,» EU Parliament ITRE, 2023.
- [4] «48TL200 Installation & Operating Instructions Technical manual,» FZSoNick, 2017.
- [5] «Sodium Nickel Technology for Energy Backup Applications,» FZSoNick, 2017.
- [6] A. Accardo, G. Dotelli, L. Musa und E. Spessa, «Life Cycle Assessment of an NMC Battery for Application to Electric Light-Duty Commercial Vehicles and Comparison with a Sodium-Nickel-Chloride-Battery,» Januar 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1160>.
- [7] A. Bauer, «Salt-E Dog,» 2024. [Online]. Available: https://www.antonbauer.com/wp-content/uploads/2023/07/AB-SaltE-Dog-Brochure_screen.pdf.
- [8] F. ISI, «Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+,» 2023.
- [9] S. Longo, V. Antonucci, M. Cellura und M. Ferraro, «Life cycle assessment of storage systems: the case study of a sodium/nickel chloride battery,» Dezember 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652613006677>.
- [10] G. Hammond und T. Hazeldine, «Indicative energy technology assessment of advanced rechargeable batteries,» 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010873>.