

Projekt Abschlussbericht – Eea 922 Bi-Mode

Autor(en)	Weisser Sven (P-O-UHR-RLS-ENG-ST)
Status	Freigegeben
Version	V4.1
Letzte Änderung	11. November 2022
Letzte Änderung durch	Weisser Sven (PP-UHR-RLS-ENG-ST)
Urheberrecht	Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen und schriftlichen Genehmigung der SBB.
Ablage	https://sbb.sharepoint.com/sites/eea-922-bi-mode/FreigegebeneDokumente/00_Admin/10_Projektabschluss/20220815_Eea922_ProjektAbschlussbericht_v4.1.docx



Datum	Autor	Änderungsinhalt	Seite / Kapitel	Version
24/08/2022	Sven Weisser	Dokumentenerstellung	Alle	V1.0
14/09/2022	Sven Weisser	Revision und Freigabe	Alle	V4.0
11/09/2022	Sven Weisser	Bereinigung und Aktualisierung Finanzen	Kapitel 7.3	V4.1

Inhaltsverzeichnis

1.	Executive Summary in Deutsch	4
2.	Résumé en français	5
3.	Executive Summary in English	6
4.	Ausgangslage	7
5.	Projektübersicht	7
5.1.	Bedarfsanalyse Rangierfahrzeuge	8
5.2.	Projektziele	10
5.2.1.	Prognostiziertes Einsparpotenzial	10
5.2.2.	Innovative Elemente des Projekts	11
5.2.3.	Erwarteter Praxisbeitrag	11
5.3.	Vorgehensplanung	11
5.4.	Projektorganisation	13
5.5.	Schnittstellen und Synergiepotenziale	14
5.6.	Vorgaben und Rahmenbedingungen	15
6.	Fahrzeug und Technik	16
6.1.	Verfügbarer Bauraum	17
6.2.	Messkampagne	18
7.	Ergebnisse und Inhalte der Studie	20
7.1.1.	System Anforderungsspezifikation	21
7.1.2.	Fahrzeug Konzept	21
7.1.3.	Evaluation des Batterie Konzept	22
7.1.4.	Technologieträger	24
7.1.5.	Bauliche Massnahmen	25
7.2.	Änderungen, Abweichungen und Problemstellungen	27
7.3.	Kosten & Finanzierung	30
8.	Projekt Ergebnis & Abschluss	33
9.	Offene Punkte	33
10.	Anhänge	35
10.1.	Abkürzungsverzeichnis	35
10.2.	Abbildungsverzeichnis	36
10.3.	Tabellenverzeichnis	36

Zweck des Dokument

Nach Abschluss des Projektes wird ein Projektreview mit den Projektbeteiligten durchgeführt. Im Rahmen dieser Nachbetrachtung wird das Projekt rekapituliert und gegenüber den positive sowie negative Erfahrungen ausgewertet. Die Ergebnisse der Nachbetrachtung werden in der vorliegenden Projektabschlussdokumentation festgehalten, dessen Ziel die weiterführende und projektübergreifende Nutzung der gewonnen Erfahrungen anstrebt.

Geltungsbereich

Die vorliegende Projektabschlussdokumentation wurde zu Gunsten der Projektabwicklung des Werk Biel durchgeführt. Weiterführend zählt dieser Bericht als integraler Bestandteil des im Projekt abgeschlossenen Subventionsvertrag des BAV «Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr».

Mitgeltende Dokumente

Datum	Bezeichnung/Beschreibung	Version	Ersteller
26.01.2020	Projektauftrag Eea922	V2.0	SBB
10.02.2020	Bedarfsanalyse Rangierfahrzeuge bei SBB P-OP-UHR	V1.0	SBB
18.06.2020	Technisches Lastenheft Eea 922	V1.0	SBB
17.06.2020	Kommerzielles Lastenheft; Engineering Umbau Ee 922	V1.0	SBB
25.02.2021	Angebot Nr. OF20010955-001; Eea922 / Machbarkeitsstudie	V1.0	SRS
03.05.2021	R0001_V3.0; Messungen zum Energieverbrauch	V3.0	SBB
04.05.2021	P-215_Batteriebetriebene_Rangierlok_Ee922_ESöV2050	V2.0	SBB
16.06.2021	BAV Subventionsvertrag; Projekt Nr. 215	V1.0	BAV
15.11.2021	P-215_Zwischenbericht_Batteriebetriebene_Rangierlok	V2.0	SBB
28.02.2022	P-215_Projektbeschreibung_Batteriebetriebene_Rangierlok	V1.0	SBB
16.02.2022	Angebot Nr. OF20013601; Prototyp Nachrüstung Eea922	V0.9	SRS
29.03.2022	Konzeptstudie; Traktionsbatterie Refit der Ee922	V2.0	SRS
04.05.2022	Kosten / Leistungsreduktion; MVP Eea922_923_V2_SBB	V2.0	SRS
09.06.2022	Sitzungsprotokoll; Eea922 Statusmeeting	V1.0	SBB
07.11.2022	Projekt Nr. 215 – Addendum Projektabschlussbericht	V1.0	SBB

Allgemeine Information

Auf Grund der im Projekt verabschiedeten Vertraulichkeitserklärung, werden die im Rahmen der Machbarkeitsstudie erarbeiteten Inhalte, in diesem Projektabschlussbericht mit der etwaigen Discretion bereitgestellt. Zum Schutz des jeweiligen geistigen Eigentums wird auf die mitgeltenden Dokumente verwiesen, dessen Zugang gegenüber der Öffentlichkeit in Bezug auf sensible Informationen limitiert wird.

Für die in diesem Dokument ausgewiesenen Inhalte, wie auch die daraus resultierenden Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren des Berichts, sowie die im Rahmen der Zusammenarbeit involvierten Vertragsparteien der Studie verantwortlich.

1. Executive Summary in Deutsch

Die SBB hat sich mit der Ambition «Klimaneutrale SBB» das Ziel gesetzt, bis 2030 die Treibhausgasemissionen gegenüber 2018 zu halbieren und bis 2040 weitgehend klimaneutral zu werden. Beim Fahrzeug Ee 922 handelt es sich um ein bereits elektrisches Rangierfahrzeug (ab Fahrleitung), das sich für die Ausrüstung mit einer Traktionsbatterie eignet. Die Fahrzeuge sind in einem mechanisch guten Zustand und verfügen über die entsprechenden technischen Schnittstellen, um eine Batterie integrieren zu können.

Zusammen mit der Stadler Service AG wurde ein erfolgreicher Umbau der Ee922 auf batterieelektrischen Antrieb angestrebt, welcher der SBB Personenverkehr zweierlei bedeutender Nutzen erbringen sollte: Einerseits würden die in die Jahre gekommenen und stark beanspruchten Dieselloks in den Werkstätten und Serviceanlagen durch nachhaltige und überholte Eea922-Loks ersetzt. Andererseits würde eine Flottenharmonisierung der Rangierloks erzielt.

Das durch die SBB erstellte Funktionale Anforderungsprofil der Eea922 diente in Form des technischen Lastenhefts als Basis für die Durchführung einer Machbarkeitsstudie. Die in der Studie enthaltenen Liefer- und Leistungsobjekt wurden in gegenseitigem Einvernehmen zur Wahrung der Vertraulichkeit, in Form des kommerziellen Lastenhefts vertraglich vereinbart. Darin aufgeführt wurden die Varianten, welche es in Bezug auf die Batterietechnologie, die Einbauvarianten und die übergreifenden Komponenten, Systeme und Schnittstellen zu erarbeiten galt.

Mit dem Abschluss der Studie wurde der Machbarkeitsbeleg zur Durchführung des Pilotumbaus erbracht. Ebenfalls bestätigt wurde die mögliche Integration der Hardware und Softwarekomponenten zum Schnittstellenprojekt des Batterieschwarm im Bahnstromnetz (BIENE) der Infrastruktur. Desgleichen konnte der Übertrag des Fahrzeugumbaukonzepts für die Eem923 der SBB Cargo bestätigt werden. Der jeweilige Kostenausweis zur Umrüstung der Ee922 & Eem923 wurde durch die Ausstellung der Offerten seitens Stadler im Frühjahr 2022 erbracht.

Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit wurde seitens Cargo, frühzeitig der Beschluss gefällt das Refit-Projekt der Eem923 nicht weiter zu verfolgen. Auch die für den SBB Bereich der Rangierlokomotiven und Spezialfahrzeuge (RLS) unerwartet hoch bemessenen Kosten eines Prototyps haben das Projekt zum Erliegen gebracht. In einem Versuch die Eea922 dennoch zu realisieren, wurde von Stadler eine im Umfang und leistungsreduzierte Variante einer batteriebetriebenen Rangierlok vorgestellt und mit einem Richtpreis bewertet.

Im Sommer 2022 wurde nach Abwägung sämtlicher Alternativen; das Projekt Eea922, die Neubeschaffung von Fahrzeugen und der Ausbau parallellaufender Elektrifizierungsprojekte, das Vorhaben von Seiten RLS eingestellt. Begründet wird der Beschluss durch die fehlende Wirtschaftlichkeit in Anbetracht der enormen Investitionskosten sowie den aus der Studie gewonnen Erkenntnissen betreffen des Kosten-Nutzen Vergleichs und den Informationsdefiziten der Standortbedarfsprofile.

Der Umbau des Fahrzeugs wird weiterhin als sinnvoll und zielführend erachtet und soll zukünftig nach der Etablierung von Traktionsbatterien im Bahnbereich erneut aufgegriffen werden. Ebenso wird erwartet, dass sich die während der Corona Pandemie vorherrschende Marktsituation im Blick auf die Rohstoff- und Materialverfügbarkeit entspannt und somit die Wirtschaftlichkeit des Umbaus zusätzlich begünstigt.

2. Résumé en français

Les CFF ont l'ambition de viser la "neutralité climatique" avec comme objectif, d'ici 2030, de réduire de moitié les émissions de gaz à effet de serre par rapport à 2018, et d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2040. Le véhicule Ee 922 est un véhicule de manœuvre électrique (provenant de la ligne de contact), qui convient à l'intégration d'une batterie de traction. Les véhicules sont en bon état et disposent des interfaces techniques adéquates pour pouvoir intégrer une batterie.

En collaboration avec Stadler Service AG, l'objectif est de parvenir à l'intégration réussie de batterie de traction dans les Ee922, ce qui apportera deux principaux avantages pour le trafic voyageurs des CFF : d'une part, les locomotives diesel vieillissantes, fortement sollicitées pour les manœuvres dans les ateliers et centres d'entretien, seront remplacées par la solution durable de locomotives Eea922 révisées. D'autre part, une harmonisation de la flotte des locomotives de manœuvre sera réalisée : au lieu de 14 types de véhicules différents jusqu'à présent, seuls 4 types de véhicules électriques ou à batterie, seront utilisés à l'avenir.

Le profil d'exigences fonctionnel de l'Eea922, établi par les CFF sous forme de cahier des charges technique, a servi de base à la réalisation d'une étude de faisabilité. Les objets de livraison et de prestation contenus dans l'étude ont été convenus d'un commun accord sous la forme d'un cahier des charges commercial afin de garantir la confidentialité. Celui-ci contenait les variantes à élaborer, notamment la technologie des batteries, les variantes de montage et les composants, systèmes et interfaces transversaux.

L'étude a apporté la preuve de la faisabilité d'une modification pilote. L'intégration de composants et logiciels nécessaires au projet « essaim de batteries dans le réseau électrique ferroviaire » (acronyme allemand = BIENE) pour l'infrastructure, a également été confirmée. De même, il a été confirmé que le concept de transformation peut être transposé aux Eem923 de CFF Cargo. Les coûts de transformation des Ee922 et Eem923 ont été communiqués au travers d'offres par Stadler au printemps 2022.

Dans un souci de rentabilité, Cargo a décidé de ne pas poursuivre le projet de transformation de l'Eem923. Aussi, pour le service CFF « locomotives de manœuvre et véhicules spéciaux » (RLS), les coûts d'un prototype, plus élevés que ceux pratiqués dans le secteur, ont également mis un terme au projet. Dans une tentative de réaliser malgré tout l'Eea922, Stadler a présenté une variante de locomotive de manœuvre alimentée par batterie, dont l'étendue et la puissance ont été considérablement réduites, et a évalué un prix indicatif.

En été 2022, après avoir évalué toutes les alternatives : le projet Eea922, l'acquisition de nouveaux véhicules et le développement de projets d'électrification parallèles, le projet a été abandonné par CFF RLS. Cette décision est motivée par l'absence de rentabilité compte tenu des coûts d'investissement exorbitants ainsi que par les conclusions de l'étude comparative des coûts-bénéfices et le manque d'informations concernant les profils d'utilisations des sites.

La transformation du véhicule est toujours considérée comme judicieuse et conforme à l'objectif. Cette transformation doit être reprise à l'avenir une fois que la technologie de batteries de traction soit établie dans le domaine ferroviaire. On s'attend également à ce que la situation du marché des Etablierung qui prévalait pendant la pandémie Corona se détende, ce qui favorisera encore la rentabilité de la transformation.

3. Executive Summary in English

With its "Climate-neutral SBB" ambition, SBB has set itself the goal of halving greenhouse gas emissions by 2030 compared to 2018 and becoming largely climate-neutral by 2040. The Ee 922 vehicle is an already electric shunting vehicle (from catenary) that is suitable for equipping with a traction battery. The vehicles are in good mechanical condition and have the required technical interfaces to be able to integrate a battery.

Together with Stadler Service AG, the aim was to successfully convert the Ee922 to battery-electric propulsion, which would provide the SBB Passenger Traffic with two significant benefits: On the one hand, the aging and heavily used diesel locomotives in the industrial plants and service facilities would be replaced by sustainable and overhauled Eea922 locomotives. On the other hand, a fleet harmonization of all shunting locomotives would be achieved.

The Eea922 functional requirements profile prepared by SBB in the form of the technical specifications served as the basis for conducting a feasibility study. The objectives and deliverables contained in the study were contractually agreed by mutual consent to maintain confidentiality, in the form of the commercial specifications. It listed the variations that had to be developed in terms of battery technology, installation variants and the primary components, systems and interfaces.

With the completion of the study, the proof of concept for the implementation of the pilot conversion was provided. Also confirmed was the possible integration of the hardware and software components to the interface project of the SBB Infrastructure battery swarm in the traction power network (Batterieschwarm im Bahnstromnetz BIENE). Similarly, the transfer of the vehicle conversion concept for SBB Cargo's Eem923 was confirmed. The respective cost statement for the retrofit of the Ee922 & Eem923 was provided by the issuance of the Stadler offers in spring 2022.

Regarding the economic efficiency, Cargo decided at an early stage not to pursue the Eem923 refit project any further. The unexpectedly high cost of a prototype for SBB's marginal number of locomotives and special vehicles (RLS) also brought the project to a standstill. In an attempt to realize the Eea922 nonetheless, Stadler presented a variant of a battery-powered shunting locomotive with a reduced scope and output and evaluated it with a target price.

In the summer of 2022, after considering all alternatives; the Eea922 project, the procurement of new vehicles and the expansion of parallel electrification projects, the project was discontinued by RLS. The decision is justified by the lack of economic viability in view of the enormous investment costs as well as the findings obtained from the study concerning the cost-benefit comparison and the information deficits of the site requirement profiles.

The conversion of the vehicle is still considered sensible and purposeful and will be taken up again in the future once traction batteries have become established in the railway sector. Likewise, the market situation prevailing during the Corona pandemic is expected to ease with regard to raw material cost and material availability, thus additionally favoring the economic viability of the rebuild.

4. Ausgangslage

SBB Produktion Personenverkehr (SBB PP) besitzt rund 60 Rangierlokomotiven, etwa die Hälfte davon werden heute mit Diesel betrieben. Die Rangierloks stellen die Personenzüge in den Bahnhöfen und Gleisfeldern zusammen, wobei die dieselbetriebenen Fahrzeuge vor allem im Rangierdienst auf den nicht elektrifizierten Gleisarealen der Instandhaltungswerke und -anlagen eingesetzt werden.

Beim Fahrzeug Ee 922 handelt es sich um ein bereits elektrisches Rangierfahrzeug (ab Fahrleitung), das sich optimal für die Ausrüstung mit einer Traktionsbatterie eignet (nach dem Umbau hat die Lok die Bezeichnung Eea 922, wobei a für Akkumulator resp. Traktionsbatterie steht). Die Fahrzeuge sind mit knapp 12 Jahren in einem mechanisch guten Zustand und verfügen über die entsprechenden technischen Schnittstellen, um eine Batterie einbauen zu können.

Ein erfolgreicher Umbau der Ee922 auf batterieelektrischen Antrieb bringt der SBB zweierlei Nutzen: Einerseits werden die alten, instandhaltungsintensiven Dieselloks in den Industriewerken mit den emissionsfreien Eea922-Loks ersetzt. Andererseits wird eine Flottenharmonisierung der Rangierloks erreicht: Statt bisher rund 14 verschiedene Fahrzeugtypen sollen in Zukunft nur noch 4 elektrisch, resp. batterieelektrische Fahrzeugtypen eingesetzt werden.

Das Flottenkonzept für Dieselfahrzeuge sieht für einen Grossteil der thermischen Antriebe eine Umrüstung auf batterieelektrische Energieversorgung vor. Verschiedene Vorarbeiten wurden bereits durchgeführt. Dies sind die Haupteckdaten aus den Studien:

- Durch die Elektrifizierung kann nicht nur ein Beitrag zur CO₂-Reduktion geliefert werden, sondern auch die Mitarbeitergesundheit und Sicherheit wird gesteigert. Auch werden die Lärmbelastungen von Anwohnern nahe den Bahnhöfen und Baustellen reduziert.
- Die Lebenszykluskosten von rein elektrischen Fahrzeugen sind tiefer aufgrund niedrigeren Energiekosten (Gesamteffizienzsteigerung) und deutlich reduziertem Wartungsaufwand.
- Frühzeitig einen Prototyp auf die Schiene zu setzen, ermöglicht es mit geringen Investitionskosten, den Nutzen zu maximieren. Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Emissionsfreiheit gewährleistet werden muss, hat ebenfalls ein funktionierendes, holistisches Konzept für Batteriefahrzeuge vorzuliegen. Im Vorfeld sämtliche Synergien und Schnittstellen zu definieren und zu erproben, schafft Klarheit und Sicherheit bei der zukünftig Hochskalierung im Fall von Flottenbeschaffungen und grossflächigeren Umbauten.

5. Projektübersicht

Die SBB hat sich mit der «Ambition 2040» das Ziel der Klimaneutralität gesetzt. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen halbiert und bis 2040 um über 90% gesenkt werden. Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, spart die SBB Energie, setzt auf erneuerbare Energien und ersetzt klimaschädliche technische Gase.

Im Hinblick auf die Reduktion der CO₂-Emissionen ist das Bestreben der SBB, die Nutzung fossiler Treibstoffe im Fahrzeugbereich zukünftig gänzlich auszumerzen. Thermische

Rangierlokomotiven und Spezialfahrzeuge sind dabei die Haupttreiber des Dieserverbrauchs. Mit dem Projekt Eea 922 Bi-Mode soll das Knowhow im Schwerpunktthema «Dimensionierung Batteriesysteme» aufgebaut werden.

Der Projektumfang beinhaltet vorausgehend die Erstellung eines Bedarfsprofils, sowie einer technischen Anforderungsspezifikation, welche als Grundlage für die Durchführung einer Machbarkeitsstudie, dem Engineering (ENG) und dem Pilotumbau zur Integration einer Traktionsbatterie dient. Als Gegenstand der Untersuchung wurde das elektrische Rangierfahrzeug des Typ Ee 922 identifiziert, das sich für die Nachrüstung mit einer Traktionsbatterie eignet.

Aus Sicht der SBB im Bereich des Unterhalt Rollmaterial (UHR) steht primär der Kompetenzaufbau im Bereich Umbau, Betrieb und Instandhaltung von Batteriefahrzeugen im Fokus. Ergänzend zur Reduktion des CO₂-Ausstosses und des Dieserverbrauchs wird ebenfalls eine Flottenhomogenisierung durch das Projekt angestrebt. Zudem werden die aufgebauten Kompetenzen als Synergieeffekte in anderen Projekten im Handlungsfeld Dieseltraktion und Flottenbeschaffung genutzt. Sei dies beim Umbau von Fahrzeugen oder auch bezüglich technischer Schnittstellen für das Management von Batteriespeichern.

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit dem SBB Kompetenzzentrum für Energiespeicher (CoCE) lanciert, wobei die Projektverantwortung dem Bereich der RLS obliegt (Kapitel 5.4. Projektorganisation). Im Verlauf der Studienphase wurde dann die Einbindung der Stadler Rail Service AG (SRS) zu Zwecken des Machbarkeitsnachweises erfolgt. Mit Vertragsabschluss zur Bestellung der Studie wurde die Durchführung dieser, sowie die Erstellung des Prototyps in der Verantwortung der SRS vereinbart, wobei die nachfolgenden Betriebs- und Typentests wie auch der Serie Umbau der SBB zugesprochen wurde.

Aufbauend auf der im Jahr 2019 durchgeführten Standortuntersuchung wurde ein Bedarf für neun (9) Batteriefahrzeuge an den Bahnproduktionsstandorten Basel, Bern, Brig und Genf identifiziert. Hinsichtlich der Dimensionierung der Traktionsbatterie wurde eine Messkampagne gestartet, welche den Energieverbrauch einer dieselbetriebenen Rangierlokomotive im «Worst Case», Standort Olten, sowie im «Best Case» Standort Zürich Altstetten (RZA) aufgezeichnet hat. Dazumal wurde parallel eine Analyse zur Bestimmung der Nebenverbraucher der Ee 922 durchgeführt, wodurch die nötige installierte und nutzbare Kapazität des Fahrzeugs bestimmt wurde. Eine Leistungsäquivalenz hinsichtlich der Anzugskraft im Batteriemodus ggü. dem Fahrleitungsbetrieb wurde für das Konzept des Prototyps vorausgesetzt.

5.1. Bedarfsanalyse Rangierfahrzeuge

Vor dem Hintergrund, die Zustände der Rangierfahrzeugflotten zu verbessern und den Klimazielen der SBB gerecht zu werden, wurde Ende 2019 durch den Bereich UHR eine fahrzeugspezifische Untersuchung der Instandhaltungsstandorte gestartet. Dabei galt es den aktuellen Bedarf, sowie die Auslastung besser zu verstehen und Handlungsfelder zu definieren. Fahrzeuge der Bahnproduktion (BP) wurden auf Grund ihres jungen Alters in dieser Untersuchung explizit nicht berücksichtigt.

Bei der Analyse wurden verschiedene Kriterien wie bspw. die Anzahl der Manöver, Anhängelasten, verfügbare Infrastrukturen und die Topologie der Anlagen berücksichtigt. In den letzten

Jahren konnte ebenfalls festgestellt werden, dass mehr und mehr Zweiwegefahrzeuge eingesetzt wurden, dessen Einsatz desgleichen als Gegenstand dieser Untersuchung dienten. Allerdings wurde hierbei schnell offensichtlich, dass das Einsatzspektrum auf Grund ihrer Inkompatibilität mit Gleisfreimelde-Einrichtungen, begrenzten Geschwindigkeiten und der beschränkten Bremskapazität mit ungebremsster Anhängelast zu Restriktionen führt.

Aus der Untersuchung resultierende Erkenntnisse zeigen den Handlungsbedarf, welcher sich kurz-, mittel- und langfristige in divergierende Umsetzungsvorschläge aufteilt. Ein Einsatz von neuen oder umgebauten Fahrzeugen benötigt mehrere Monate, bis ein Einsatz im operativen Bereich möglich ist. Aus diesem Grund muss vorzeitig eine Übergangslösung für den Ersatz der veralteten Fahrzeugflotten gefunden werden, welche den potenziellen Wartungsrückstand und die zunehmende Störanfälligkeit kompensieren. Kurzfristig ist unter Einbezug technischer Kontrollen die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge zu gewährleisten. Des Weiteren gilt es an den im Bericht identifizierten potenziellen Einsatzstandorten für die Verwendung von Zweiwegefahrzeugen, den Ersatz der alten Dieselfahrzeuge anzustossen.

Mittelfristig musste der Standort- und Fahrzeugbedarf seitens BP in gleicher Form zur UHR geklärt werden. Dadurch sollten Synergien zwischen den Bedarfsträgern gedeckt werden. Dies zum einen im Hinblick auf die Flottenhomogenisierung und zum anderen der erwarteten Portfolioentwicklung. Der Bedarf für Rangierfahrzeuge wird auf Grund des Einsatzes von Zweiwegefahrzeugen und Neubeschaffungen von Triebzügen absehbar sinken, wodurch die Fahrzeuge für den Einsatz durch die UHR relevant werden.

Langfristig kristallisiert sich aus dem Bericht ein deutliches Konzept heraus, dass langfristig eine zweiachsige Lokomotive mit Traktionsbatterie und eventuell einem Pantographen favorisiert. Die zukünftige CO₂ neutrale Rangierlokomotive der SBB stellt sich in seinen Grundzügen wie folgt dar:

- 2-Achsiges Fahrzeug mit 45 Tonnen Gesamtgewicht oder 2 Lokomotive in Mehrfachtraktion zur Erlangung der Gewichtsanforderungen.
- 100% Batteriefahrzeug oder Bi-Mode; Batterie und Pantograph, für Manöver sowohl mit als auch ohne Fahrleitung und der Möglichkeit zur Schnellladung über die Fahrleitung.
- Die Funktion der Mehrfachtraktion ermöglicht den Einsatz bei aussergewöhnlichen Manövern wie beispielsweise überhöhte Anhängelasten und Bremskapazitäten.
- Integration einer Funkfernsteuerung für den Betrieb mit einem Einzelbediener
- Leistungsfähiger Luftkompressor von mindestens 2'000 L/min zu Sicherstellung der notwendigen Bremskapazität.
- Die Dimensionierung der Batteriekapazitäten variiert stark in Abhängigkeit der Einsatzstandorte. Hierzu muss mittels einer verlässlichen Betriebsdatenanalyse, Klarheit geschaffen werden.

Die Ergebnisse dieser Bedarfsanalyse haben zur Budgetierung der Entwicklung einer Rangierlokomotive mit Pantographen und Batterie geführt. Das hierfür prädestinierte Fahrzeug Ee922 wurde als Untersuchungsgegenstand dieses Prototyps in der Leitung bewilligt und mit dem Projekt «Batteriebetriebene Rangierlok – Ee922 Bi-Mode» freigegeben.

5.2. Projektziele

Die für das Projekt definierten Ziele wurden im übergeordneten Projektauftrag mit den dazugehörigen zu erarbeitenden Leistungen und Ergebnissen zusammengefasst und nachgängig wie folgt definiert.

Ziele:

- Kompetenzaufbau im Bereich Umbau, Betrieb und Instandhaltung von Batteriefahrzeugen
- Reduktion des CO₂-Ausstosses und Dieserverbrauch der Rangierfahrzeugflotten
- Grundstein bilden zur Flottenhomogenisierung mittels der Erweiterung des Einsatzspektrums von Bestandsfahrzeugen
- Erstellung eines einfachen, holistischen Konzepts zur Umrüstung resp. Refit
- Erfahrungsträger für weiterführende Batterie- und Schnittstellenprojekte bilden

Liefer- und Leistungsobjekte:

- Erstellung eines Bedarfsprofils der UHR und BP Standorte und Betriebsprofile
- Erstellung einer technischen Anforderungsspezifikation eines Batteriefahrzeugs
- Erstellung eines Fahrzeugintegrationskonzept
- Kooperation mit der SRS zur Umsetzung des Prototyps und Typenzulassung
- Durchführung umfangreicher Funktions- und Betriebstests zu Validierungszwecken

5.2.1. Prognostiziertes Einsparpotenzial

Mit dem Projekt wird ein (1) Fahrzeug umgebaut. Dieses Fahrzeug wird ein Dieselfahrzeug in einem Werk ersetzen und so direkt mehrere Tausend Liter Diesel pro Jahr einsparen. Ebenso bedeutet dieses Fahrzeug eine bedarfsgerechte Dimensionierung, welche gleichzeitig die Unterhalts- wie auch die allgemeinen Betriebskosten der Flotten senken wird.

Ausgehend vom Rangierbedarf von SBB PP liegt das Potential für die Einsparung bei einem Teilersatz der alten Dieselfahrzeuge durch die Eea 922 bei einem Treibstoffvolumen von bis zu 50'000 Liter Diesel pro Jahr. Präzisere Angaben lassen sich nach Überarbeitung der Einsatzpläne machen.

Mit den aus dem Projekt gewonnenen Resultaten können die Fahrzeuge des Typs Eem 923 (siehe Kapitel 5.5. ff.) bis spätestens 2030 umgebaut werden. Dabei würden weitere 20'000 Liter Diesel pro Jahr eingespart werden.

Auch wenn die oben genannten Einsparungen an Diesel im Vergleich mit dem Umbau grosser Traktionsfahrzeuge eher bescheiden ausfallen, steuert dieses Projekt einen äusserst wichtigen Beitrag im Knowhow-Aufbau von Schlüsselkompetenzen bei und vereinfacht weitere Umbauprojekte – wie jenes für das schwere Rangierfahrzeug Am 843 - mit markantem Einsparpotential an fossilen Treibstoffen.

Weiter wird durch die Einführung eines batterieelektrischen Fahrzeuges mit Möglichkeit von Traktionierung unter Fahrleitung ermöglicht, dass ab Bahnstrom geladen werden kann, der ab 2025 100% erneuerbar sein wird. Die Elektrifizierung führt zu einem enormen Effizienzsprung gegenüber einem rein thermischen Fahrzeug und somit weiterer Reduktion vom Primärenergiebedarf.

5.2.2. Innovative Elemente des Projekts

Erstmals wird bei einem bestehenden Fahrzeug eine Batterie nachgerüstet

- Anbindung an das Bahnstromnetz und intelligente Vernetzung. Start zur Entwicklung des «grössten Schweizer Schwarmspeicher»
- «smart charge» und somit die Maximierung Batterielebensdauer
- Konkrete Umsetzung von Anforderungen an die SecondLife Nutzung der Batterien
- Umfassende Anwendung Kreislaufwirtschaftskonzept und Nachhaltigkeitsvorgaben

5.2.3. Erwarteter Praxisbeitrag

Weiterer Umbau von gleichen Fahrzeugen nach gemachten positiven Erfahrungen.

- Erfahrungen in den genannten innovativen Elementen, insbesondere in der Vernetzung der Fahrzeuge (Schwarmspeicher)
- Erfahrungen im Umgang in der Praxis und Tauglichkeit der Konzepte
- Erfahrungen für zukünftige Beschaffung in der Anwendung von neu erarbeiteten LCC-, KWL (Kreislaufwirtschaft) - und Nachhaltigkeitskonzepten
- Know-how Transfer zu anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)

5.3. Vorgehensplanung

Aufbauend auf die Ergebnisse der Bedarfsanalyse wurde das Projekt Eea922 Bi-mode innerhalb der RLS lanciert. Zielsetzung war es gemäss den darin bereits identifizierten Handlungsfeldern ein Prototypenfahrzeug für den «Last-Mile» Betrieb schnellstmöglich zu entwickeln und auf die Schiene zu setzen. Analog zu dem im Jahr 2017 gestarteten RLS-Projekt der Taf200 war es das anfängliche Bestreben, einen Prototyp unter der Einbindung externer Partner zu entwickeln und so weit auszureifen, sodass eine nachfolgende Serie eigens durch die SBB abgewickelt werden könnte.

Im Rahmen der Vorabklärung wurden in ersten Gesprächen mit dem Fahrzeughersteller, Stadler, sowie dem Schlüssellieferanten der ABB das Vorhaben und dessen Zielsetzung geklärt. In den daraus resultierenden Gesprächen haben sich frühzeitig einige, für das Projekt gravierende Änderungen herauskristallisiert. Mit dem Start einer Messkampagne zur Dimensionierung der Traktionsbatterie, einer Untersuchung des verfügbaren Bauraums und den «Best Practice» Einflüssen aus dem Taf200 Projekt, hat sich das Konzept von einem «Last-Mile» Betrieb zu einem vollständig autonomen Batteriebetrieb mit einer Leistungsäquivalenz zur Traktion mit Fahrleitung als machbar entwickelt. Weiterführend wurde die Entscheidung gefällt, unter der neuen Prämisse eine Machbarkeitsstudie in Zusammenarbeit mit Stadler durchzuführen. Das schematische Vorgehensmodell der Eea922 wird in Abbildung 1, nachfolgend aufgezeigt.

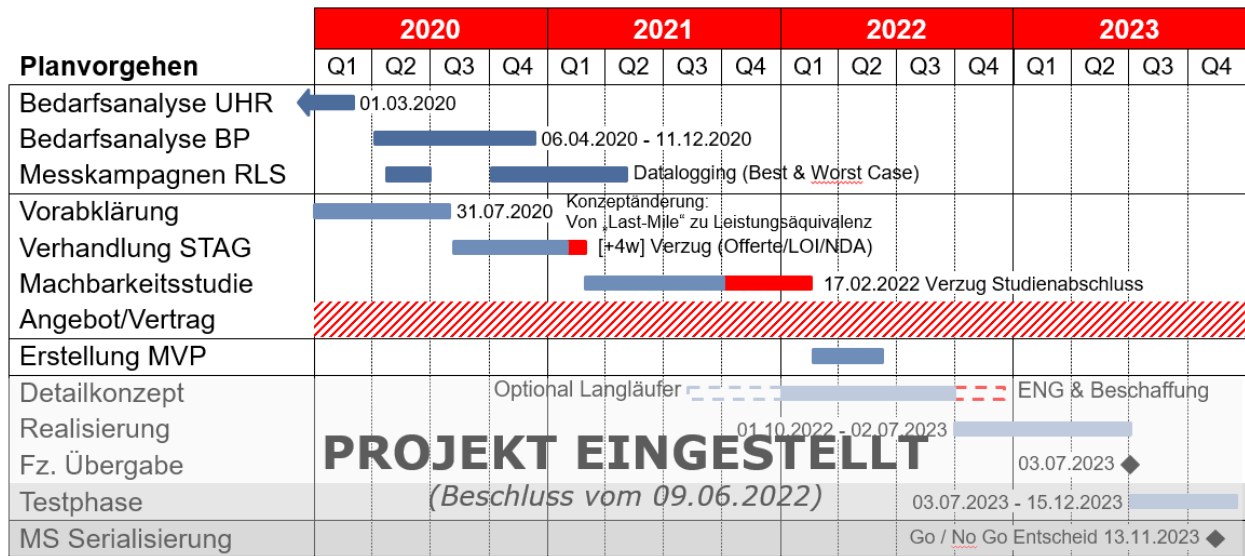


Abbildung 1: Schematisches Vorgehensmodell Projekt Eea922

Als Plattform der Zusammenarbeit mit Stadler diene die Bestellung einer Machbarkeitsstudie dessen Inhalt auf Basis eines technischen und kommerziellen Lastenhefts basiert. Das SBB Kompetenzzentrum für Energiespeicher (CoCE) hat gemeinsam mit einem externen Partner die technische Fahrzeug-Anforderungsspezifikation der Eea922 erstellt, welche in gleicher Geltung mit dem kommerziellen Lastenheft den Leistungsumfang der Studie definiert. Hierbei hatten die Vertragsverhandlungen auf Grund der Vertraulichkeit der Inhalte sowie der Erstellung einer Absichtserklärung, der angestrebten nachgelagerten Serienfahrzeuge, bereits eine Verzögerung zum Start der Machbarkeitsstudie von knapp 4 Wochen erzeugt.

Über den Verlauf der Studie wurde der Fortschritt mittels regelmässigen Bausitzungen gegenüber dem Terminplan verifiziert und durch einen vertraglich vereinbarten Zwischenbericht validiert (siehe Abbildung 2). Das Planvorgehen der Studie sah eine Dauer von 6-10 Monate vor, wobei in erster Instanz die Klärung des Bauraums und der Batterietechnologie priorisiert wurde.

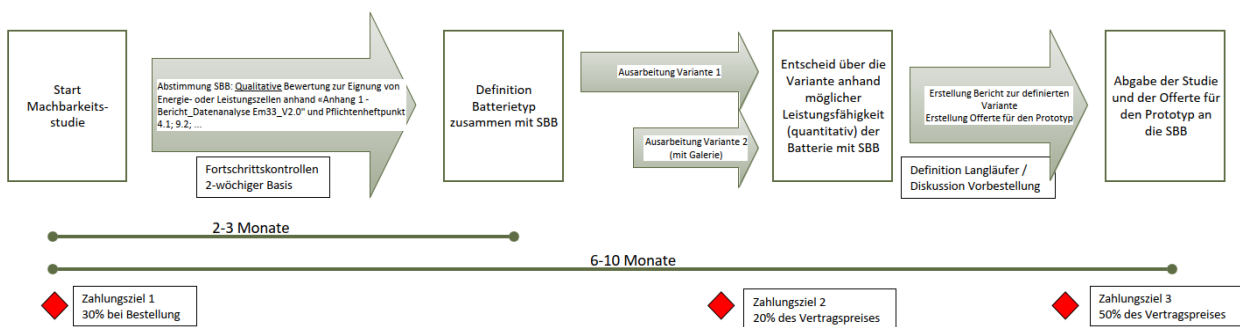


Abbildung 2: Zeitschiene Machbarkeitsstudie Eea922

Eine detailliertere Gliederung der Untersuchungsgegenstände kann der nachfolgenden Tabelle zur Unterteilung der Studienphasen entnommen werden.

Nr.	Kat.	Tätigkeit
1	Mechanisch	Grobbauraum Batterie definieren
2	Mechanisch	Einbau der Batterie
3	Mechanisch	Einbau der Peripherie
4	Mechanisch	Umplatzierung der bestehenden Komponenten
5	Mechanisch	Gewichtsbetrachtung
6	Mechanisch	Umbaukonzept Batterie und Komponenten
7	Batterie	Lastspielanalyse und Bedarfsanalyse
8	Batterie	Lieferantenbetrachtung
9	Batterie	Randbedingungen (Energie und Leistung) definieren
10	Batterie	Evaluation Batterietyp
11	Batterie	Kühlung
12	Batterie	Integration und Konzept
13	Elektrisch	Anpassung SR, Laden HBU und Anpassung der Leittechnik
14	Elektrisch	Integration Traktionsbatterie in Hauptstrom
15	Elektrisch	Lademöglichkeiten
16	Elektrisch	Elektrisches Steuerstromkonzept
17	Elektrisch	Leittechnikkonzept
18	Elektrisch	Software/Diagnose-Konzept
19	Gesamt	Gewährleistung
20	Gesamt	Zulassungskonzept
21	Gesamt	Dokumentation
22	Gesamt	Offertenerstellung

Tabelle 1: Phasenplan der Machbarkeitsstudie

Den Abschluss der Machbarkeitsstudie konnte Mitte Februar 2022 mit der Übergabe des Studienberichts und der Offerte für das Prototypen-Fahrzeug erreicht werden. Obwohl die Inhalte des Studienberichts mit vereinzelt Ausnahmen und Klärungsbedürfnissen freigegeben werden konnten, kam es im Blick auf die Offerte zu umfänglicheren Abklärungen. Schlussendlich war unter diesen Voraussetzungen das Projekt wirtschaftlich nicht mehr tragbar. Dadurch wurde seitens SRS eine im Umfang reduzierte, weiterführende Untersuchung eines «Minimum Viable Product – MVP» mit reduzierten Leistungsanforderungen (siehe Kapitel 7.2. ff.) gestartet, welches sich ebenfalls als nicht wirtschaftlich erwies.

Nach fast vier (4) weiteren Monaten und gegenseitigen Absprachen und Untersuchungen wurde dann Anfang Juni 2022 der Beschluss RLS intern gefällt, das Projekt einzustellen. Mit diesem Entscheid wurde ebenfalls der BAV Subventionsvertrag aufgelöst, was für das Projekt mit der Erstellung des Lessons Learned, sowie dem Projektabschlussbericht das vorzeitige Ende bedeutet.

5.4. Projektorganisation

Um agil und möglichst unbürokratisch zu bleiben, wurde das Projektteam kleingehalten. Benötigte Kompetenzen und Ressourcen wurde bedarfsgetrieben eingebunden. Die Verantwortung und Leitung des Projekts wurde in Form einer Doppelspitze aufgesetzt. Aufgeteilt wurde die Führung in einen allgemeinen Projektleiter, unterstützt durch einen technischen Projektleiter. Hintergrund dazu war die anfängliche Fahrzeug- und Produktunkenntnis des benannten Projektleiters sowie dem Ziel der Kompetenzerweiterung des technischen Projektleiters. Aus Abbildung 3 werden die übergeordneten Verhältnisse und Strukturen des Kernteams ersichtlich.

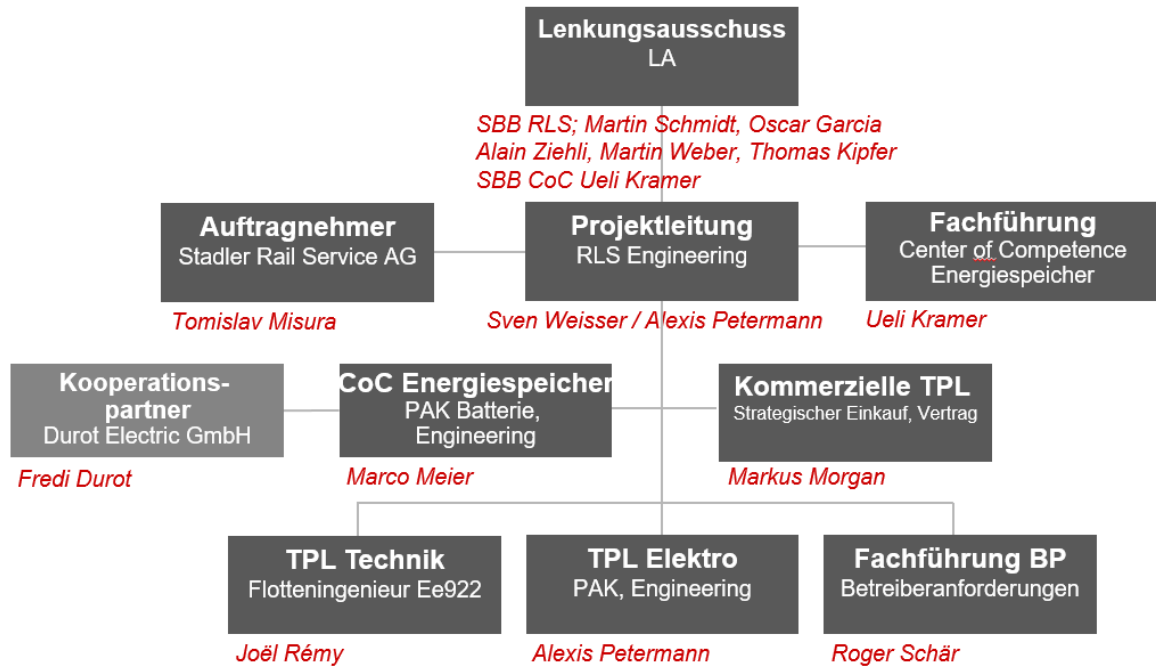


Abbildung 3: Organigramm Projekt Eea922

Für eine ausführlichere Übersicht der Verantwortlichkeiten kann das im Projekt erstellte Aufgaben, Kompetenzen, Verantwortungen (AKV) Register hinzugezogen werden.

5.5. Schnittstellen und Synergiepotenziale

Mit dem Projekt Eea922 wurden Interdependenzen und Abhängigkeiten gleichzeitig bedient. Die Schnittstellen und Synergiepotenziale, welche das Vorhaben direkt tangiert haben, werden nachfolgend samt dem jeweiligen Bezug aufgeführt.

Taf200; mit diesem RLS internen Projekt wurde im Werk Biel der erste Grundstein für batteriebetriebene Rangierlokomotiven der SBB gelegt. Als Basisfahrzeug für den Umbau diente eine aus dem Jahr 1964 stammende dieselelektrische Tm III. Das Konzept beinhaltet den Ersatz des Dieselmotors durch eine Batterie, wie auch der Integration diverser Umrichter, einer neuen pneumatischen Tubo-Tafel und der gänzlich neuen Steuerung, sowie Leittechnik des Fahrzeugs. Das Projekt diente nicht nur als Beleg der Machbarkeit und Treiber für die Initialisierung der Eea922, sondern auch als Kompetenzträger und Referenz für «Best Practices» während der Konzeption.

Datalogging RLS; im Rahmen dieses Projekts wird eine flottenübergreifende Implementierung von Datenloggern auf verschiedenen Fahrzeugen umgesetzt. Dabei wird ein Ansatz zum Fernmonitoring der Flotten zu Zwecken der Früherkennung von Störungen und Diagnose verfolgt. Es gilt weiterführend über den Aufbau einer breitgefächerten Datenerhebung, die standortabhängigen, betrieblichen Einsatzspektren der Fahrzeuge genauer zu definieren, um zukünftig mögliche präventive Instandhaltungsmassnahmen ableiten zu können. Mit Hilfe dieses Projekts wurden die benötigten Grunddaten im Zusammenhang mit der Dimensionierung des «Best- & Worst-Case» Szenarios aufgebaut.

Eem923; hierbei handelte es sich um die «grosse Schwester» der Ee922. Gänzlich im Besitz der SBB Cargo, stehen diese Fahrzeuge im Dienst des Güterverkehrs und sind bereits für den Betrieb mit und ohne Fahrleitung ausgerüstet. Die Fahrzeuge werden Diesel-Elektrisch angetrieben und sind auf Grund dessen gegenüber der Ee922, voluminöser aufgebaut. Das Potenzial eines grösseren Bauraums, sowie die Offertenanfrage der Cargo an die SRS zur Erstellung eines Prototyps hatte im Laufe der Machbarkeitsstudie eine divisionsübergreifende Schnittstelle erschaffen.

BIENE (**B**atterieschwarm im Bahnstrom**n**etz); das Projekt der SBB Infrastruktur befasst sich mit der Integration und Bewirtschaftung von Batterien auf Schienenfahrzeugen und hat hierzu den zukünftigen Energiebedarf im Batteriebetrieb auf Basis der heutigen Dieselflotte ermittelt. Das verfolgte Ziel eines zentralen Lademanagement dient vor allem den Fahrzeugbesitzern und -nutzern und sichert dabei die Batteriekapazität für nächste Einsätze und ermöglicht ein batterieschonendes Laden sowie einer Optimierung der Lebenszykluskosten. Ein zusätzliches hohes Nutzenpotenzial des Lademanagement ist dann gegeben, wenn die Kapazität selten und kurz benötigt wird, beispielsweise in Überlastsituationen und zur Abdeckung extremer Lastspitzen.

5.6. Vorgaben und Rahmenbedingungen

In den für das Projekt vereinbarten Rahmenbedingungen wurde vorausgesetzt, dass die aktive Einbindung und Unterstützung des CoCE über den Projektverlauf gewährleistet wird. Dessen Verantwortlichkeit dabei die Definition sämtlicher konzeptioneller Ansprüche und Anforderungen an die Batterietechnologie umfasst. Das CoCE stellte ebenso die Schnittstelle zu den übergreifenden Projekten wie bspw. BIENE, als auch zu den zentral verantworteten Anlaufstellen für finanzielle Subventionen in Form des SBB Klima Fonds und des BAV Programm zur «Energiestrategie des öffentlichen Verkehrs» (ESÖV).

Als vorausgesetzter Inhalt sämtlicher Verhandlungsgegenstände dienten ausschliesslich der Phasen der Konzeption, des Prototypenbaus und dessen Funktions- und Betriebstests. Die Option eines möglichen nachgelagerten Serienumbaus wurde explizit von dem Projekt ausgenommen. Davon ausgenommen waren vertragliche Bindungen für die Lieferung von Sonderentwicklungen und geschützten Informationen, dessen Bindung sich in die Serie übertragen hätten.

Die Durchführung des Prototypenfahrzeugs wie auch der Serie obliegt ausschliesslich dem Werk Biel. Im Verlauf der Studie wurde für den Prototypen jedoch ein abweichender Beschluss zum Umbau in den Hallen der SRS gefasst. Die nachfolgende Inbetriebsetzung und Zulassung erfolgt durch die SRS, wobei die Bereitstellung des Trassenzugangs und des Bedienpersonals seitens SBB gestellt wird.

Im Hinblick auf die Messkampagnen wurde im Projekt die Kompatibilität der Eea922 mit den von der SBB verwendeten Geräten und Schnittstellen zur Datenerfassung vorausgesetzt. Eine Transition zum Stadler eigenen Produkt RDS (Rail Data Services) wurde im Voraus ausgeschlossen, es sei denn, dass dessen Integration in Verbindung mit der Gewährleistung stünde. Unter dieser Voraussetzung wäre eine RDS-Integration ohne Kostenfolgen von durchzuführen.

6. Fahrzeug und Technik

Bei der Ee922 handelt es sich um eine 2-achsige Rangierlokomotive des Fahrzeugherstellers Stadler, welche zwischen 2009 und 2015 von der SBB Produktion Personenverkehr in Betrieb genommen wurden (Abbildung 4). Die Flotte teilt sich in eine Erst-Serie von 21 Fahrzeugen und eine nachbestellte Zweit-Serie von vier (4) Fahrzeugen auf.



Abbildung 4: Ee922 Rangierlokomotive

Die Fahrzeuge erfüllen in ihrer Grundausstattung, bedingt durch ihr Alter aber auch den technischen Spezifikationen die Voraussetzungen, um den in Kapitel 8.1 beschriebenen Anforderungen an den Bedarf gerecht zu werden. Die nachfolgend aufgeführten Leistungskennzahlen und Fahrzeugeigenschaften sind massgebend für den Umbau, da diese unbeeinträchtigt bleiben müssen.

Gesamtgewicht:	45 Tonnen
V_{MAX} (Geschleppt):	100 km/h
V_{MAX} (Eigenfahrt):	40 km/h
Zugkraft:	120 kN
Leistung _{RAD} :	750 kW
Achsfolge:	Bo'
Länge über Puffer:	8'800 mm
Fahrstrom:	25 kV, 50 Hz tauglich
Kompressorleistung:	< 2'000 L/min

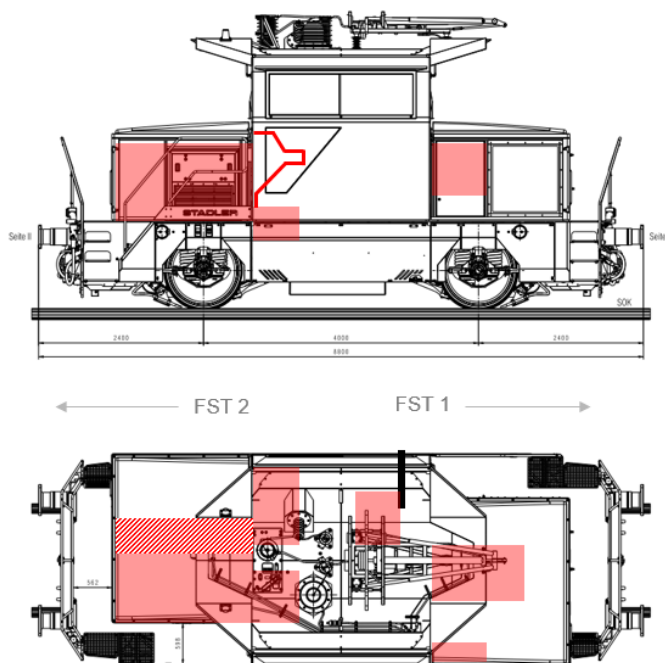
Die Ee922 findet ihren Einsatz vornehmlich im Bereich der Bahnproduktion und im Unterhalt. In der Bahnproduktion wird sie für das Rangieren verwendet und sorgt dafür, dass Personenzüge

in den Stosszeiten länger und ausserhalb dieser kürzer werden. Im Unterhalt verschiebt sie Rollmaterial, das sich in Industriewerken und Serviceanlagen befindet. Zu den Einsatzstandorten zählen unter anderem Zürich, Basel, Brig, Bern und Luzern. Am Standort in Basel können die Fahrzeuge sowohl im schweizerischen als auch im französischen Netz betrieben werden.

6.1. Verfügbarer Bauraum

In Anlehnung, an die für das Projekt begünstigenden Leistungskennzahlen wurden im Rahmen der Vorstudie bereits Untersuchungen zum verfügbaren Bauraum angestellt. Die in Abbildung 5, schematisch aufgeführten Freiflächen spiegeln das im Fahrzeug verfügbare Bauraumpotenzial wider. Im Vorderbau auf Fahrzeugseite eins (1) wurden auf Grund der bestehenden Komponentenordnung anfänglich nur begrenzte Freiflächen identifiziert.

Anders sah es im Vorderbau des Führerstands (FST) 2 aus. Mit einem Versatz der Klimaanlage resp. über den bereits angedachten Ersatz des Gerätes wären knapp 2.6 m³ geschaffen. Auch der sich unterhalb der Führerpult (FST 2) rechtsseitig befindliche Personalschrank birgt viel Potenzial. Kleinere jedoch offensichtliche Freiräume konnten in der Kabine ausgemacht werden, welche im Zusammenspiel mit den prägnanteren Bauräumen, Summa Summarum ein Gesamtvolumen von ca. 4,7 m³ bereitstellen würde.



Gesamtverfügbares Bauraum

- Klimaanlage: 2.6 m³
 - Personalausstattung: 1.0 m³
 - Fz. Seite I: 0.7 m³
 - Fussraum (je 0,16m³): 0.32 m³
 - HBU: 0.15 m³
 - Bedienpult: vernachlässigbar
- ca. 4,7 m³**

Nicht berücksichtigt sind Ballastgewichte und der Tilgermassen-Ausbau

Ein Versatz der Starterbatterien, der Klimaanlage und des Druckluftbehälters gilt es zu berücksichtigen.

Abbildung 5: Gesamtverfügbares Bauraumpotenzial

Bei dieser Betrachtung wurde die Ballast- und Tilgermassen explizit nicht berücksichtigt. Die Ballastgewichte müssen auf Grund des Komponenten- und folglich Gewichtzuwachs reduziert bzw. gänzlich entfernt werden. Die Nutzung der dadurch entstehenden Freiräume ist jedoch mit dem Ziel eines einfachen und holistischen Konzepts zur Umrüstung (Kap. 7.1.2) nicht vereinbar. Bei den Tilgermassen handelt es sich um systemrelevante Baugruppen, welche für den stabilen Sinuslauf bei höheren Geschwindigkeiten von Bedeutung sind.

6.2. Messkampagne

Die Messkampagne zur Erfassung von Betriebsdaten wurde kurz nach Abschluss zu dem in Kapitel 8.1 (Bedarfsanalyse Rangierfahrzeuge UHR) beschriebenen Vorgehen gestartet. Mit dem Vorsatz, die Betriebs- und Verbrauchsdaten am Standort Olten (Worst Case) und Zürich Altstetten (Best Case) zu erfassen, sodass eine Ableitung in Bezug auf die Dimensionierung der Traktionsbatterie möglich wird. Als Messgegenstand wurde die im Einsatz befindliche Em3/3 in Olten mit einem Strom und Spannungssensor ausgestattet, welche über den Datalogger den tatsächlichen Verbrauch des Antriebs erfasst hat (siehe Abbildung 6).

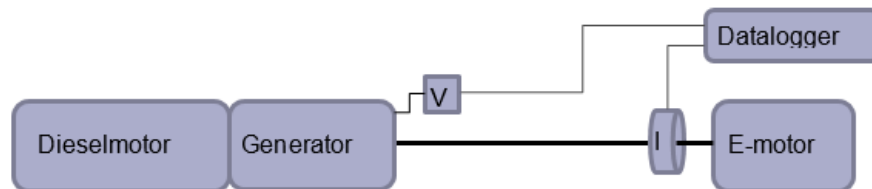


Abbildung 6: Integration Em3/3 Datalogger

Zudem wurde das Fahrzeug mit einer GPS-Antenne ausgestattet, wodurch die Fahrzeugbewegungen und Verweildauern auf dem Werksareal und im Rangierbahnhof ersichtlich wurden. Die Daten wurden bei der Erfassung auf 1 [s] gemittelt, sodass die Kompatibilität mit anderen Loggern und Abstraten gewährleistet werden konnte. Da sich in den Rohdaten, sporadisch fehlende Werte auffinden liessen und diese mit der Zeit-variablen zu Konflikten in der Auswertung geführt hätten, wurden diese fehlenden Datenpunkte durch den vorherigen Wert ersetzt.

Auf Grund der derzeitigen Corona-Lage und den daraus resultierenden Einschränkungen im Betrieb wurde die Messperiode auf 40 Arbeitstage zur Bestimmung des Worst Case Szenarios beschränkt. Die im mitgeltenden Bericht zur Datenerhebung, ausgeführten Analysen werden über nachstehenden Abbildungen aufgezeigt. Nachdem die Corona Massnahmen des Bundes gelockert wurden, wurde erneut eine Messkampagne gestartet, welche die tägliche Energie im «Regelbetrieb» erfasst und in die Statistik zur Dimensionierung übernommen wurde.

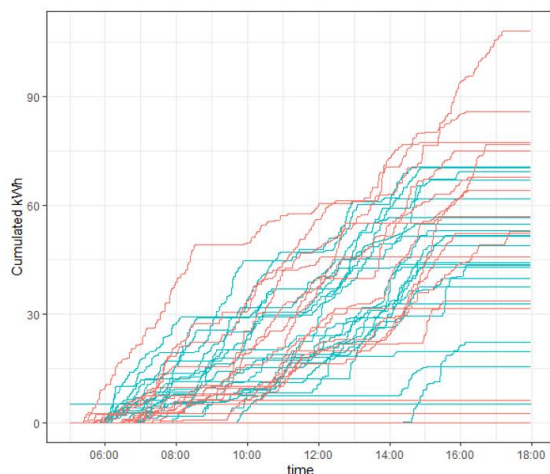


Abbildung 7: Täglicher Energieverbrauch Em3/3

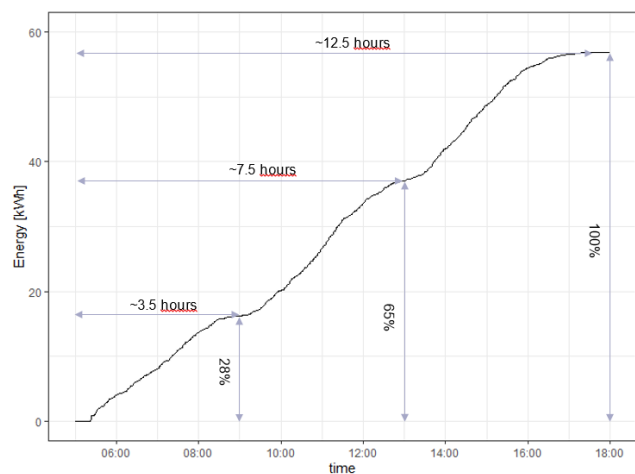


Abbildung 8: Mittlerer Energieverbrauch Em3/3

Über täglichen Verbrauch sowie die den dazugehörigen Positionsdaten konnte das Betriebsprofil der Rangierlok über den Verlauf der Messungen ganzheitlich erfasst werden. Daraus resultierend

hat sich für die Traktion ein maximaler Energiebedarf von 108 kWh, ein minimaler Energiebedarf von 3 kWh und ein durchschnittlicher Bedarf von 56 kWh ergeben. Zur Verdeutlichung und dem Verständnis des Fahrzeugeinsatzes wurden die täglichen Verbräuche gemittelt und auf die Zeitschiene eines Arbeitstags übertragen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zwei Ladegelegenheiten von je 45 Minuten an den Sattelpunkten ermittelt. Ebenso wurde ersichtlich, dass nach acht (8) Stunden Betrieb, im Schnitt 63% des täglichen Energiebedarfs verbraucht wurde.

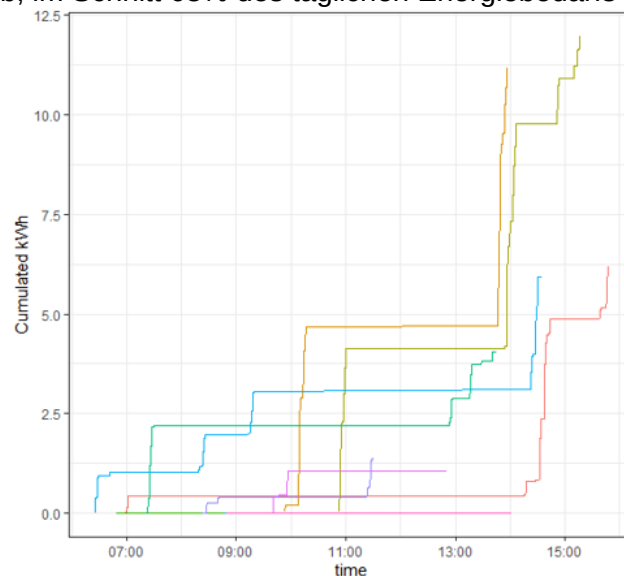


Abbildung 9: Energieverbrauch unterhalb der Fahrleitung

Bei der in Abbildung 9 ausgewiesenen Untersuchung wurde die Verweildauer der Lok unterhalb der Fahrleitung sowie der Energieverbrauch während dieser Zeit analysiert. Der Eintritt in Bereiche, die mit Fahrleitung ausgestattet sind, erfolgt immer dann, wenn das Fahrzeug vom Werksareal in den Rangierbahnhof fährt. Bei dieser Untersuchung liess sich die erwartete Korrelation in der Umlaufplanung zwischen der verbrauchten Energie pro Tag und der verbrauchten Energie unter Fahrleitung nicht aufzeigen. Folglich wurden diese Dauern und Energiebezüge lediglich in ihrer Wertigkeit für mögliche, sporadische Zeitfenster zur Zwischenladung berücksichtigt.

Weiterführende Messungen und Analysen zur Dauerleistung und Anzahl der Schwerlastbetriebe haben ergeben, dass die maximalbenötigte Leistung von 300 kW – 350 kW vornehmlich für weniger als fünf (5) Sekunden bezogen wurde. Vereinzelt haben sich jedoch Fälle ausgewiesen, wobei dieser maximale Leistungsbezug bis zu 25 Sekunden angehalten hat (siehe Abbildung 10).

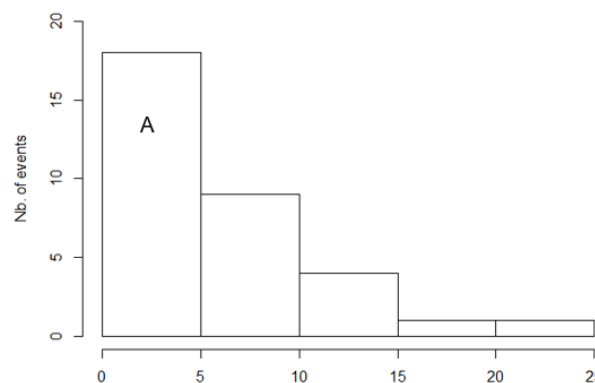


Abbildung 10: Anzahl der Maximallastfälle über die Zeit

Mit der Messkampagne wurde lediglich der tatsächliche Fahrstrom gemessen, was für die Dimensionierung nicht vollständig ausreichend war. So wurde über die Bestandsdaten der 25 Ee922 Fahrzeuge, eine Auswertung der Nebenverbräuche im Betrieb durchgeführt. Zusammengefasst wurde bei der Auslese der Energiezähler ein rechnerischer Nebenverbrauch von 40 kWh pro Tag ermittelt. Kombiniert mit den Ergebnissen der Messkampagne wurde somit ein maximaler Energiebedarf von 150 kWh nutzbare Kapazität ermittelt. Aus der analogen Standortuntersuchung in Zürich Altstetten wurde die minimal benötigten Leistungskennzahlen bestimmt. Die für die Dimensionierung aufgestellte These besagte, dass der tägliche Energiebedarf aller Standorte, einer logarithmischen Normalverteilung folgt, wobei der überwiegende Bedarf in der unteren Hälfte der Kapazität liegt (siehe Abbildung 11).

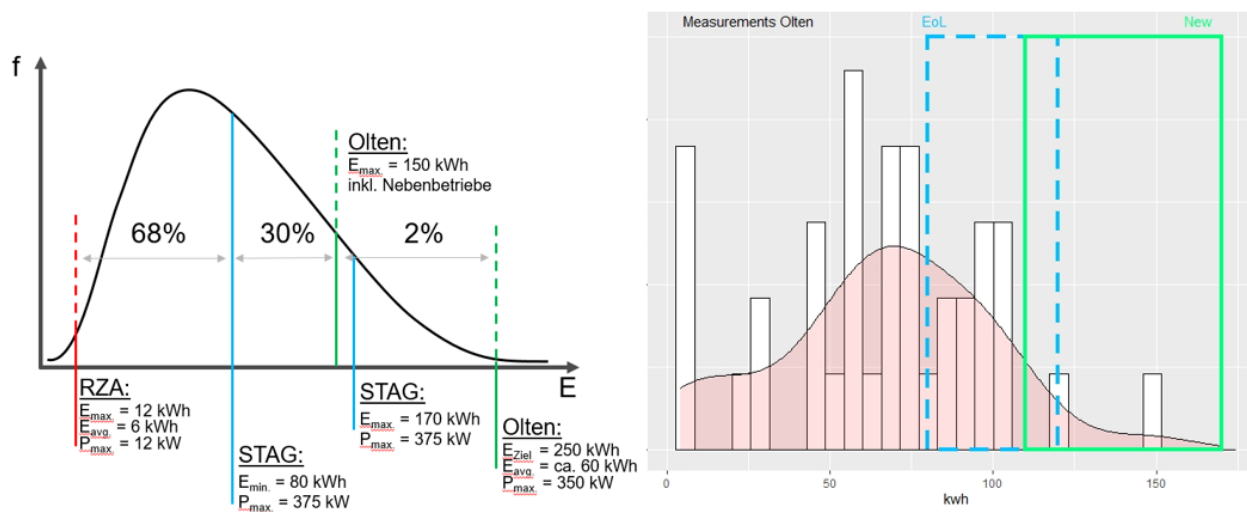


Abbildung 11: Logarithmische Normalverteilung des Best- und Worst-Case Leistungsprofils

Die Untersuchungen wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudie zusammen mit Stadler (hier STAG) diskutiert und haben zu folgenden Ergebnissen und Beschlüssen geführt.

- Das Kapazitätsziel von 250 kWh zur 100%igen Deckung des Tagesbedarfs am Lebensende der Batterie (EoL) kann nicht umgesetzt werden.
- Mit einer maximalen installierten Kapazität von 170 kWh können 99% des Betriebsbedarf im Neuzustand und 96% EoL gedeckt werden. In Abhängigkeit der Batterietechnologie wurde eine installierte Kapazität von 150 kWh angestrebt.
- Eine 24h Autarkie des Fahrzeugs ist an keinem Standort zwingend notwendig. Übermässige Lastfälle können mittels eines definierten Nachladekonzept kompensiert werden
- EoL Kapazität der Batterie kann mittels adaptiven Ladezyklen und intelligentem Batterie-Management System (BMS) beeinflusst und verlängert werden.

7. Ergebnisse und Inhalte der Studie

In diesem Kapitel werden die wichtigsten und prägnantesten Ergebnisse und Erkenntnisse der Studie zusammengefasst. Im Allgemeinen wurde bei den Untersuchungen ein Konzept entwickelt, wodurch die Machbarkeit eines Umbaus in Form belegt wurde. Eine ausführliche Detaillierung der Inhalte kann dem mitgeltenden Studienbericht der SRS entnommen werden. Auf Grund

der bereits erwähnten Vertraulichkeitsvereinbarung können nicht alle Inhalte der Studie der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

7.1.1. System Anforderungsspezifikation

Detailliert werden die System Anforderungen an die Batteriebetriebenen Rangierlok im «Technischen Lastenheft Eea 922» beschrieben. Mit der in Kapitel 5.3 ff. beschriebenen Transition vom «Last-Mile» Betrieb, hin zur Leistungsäquivalenz wurden die Anforderungen an den Prototyp und dessen Technologieträger definiert. Das Lastenheft beschreibt einerseits die funktionalen Anforderungen an den Prototypen, einschliesslich einer Priorisierung (MUSS ggü. SOLL) und andererseits wird die organisatorische Umsetzung des Umbaus beschrieben. Zusammen mit dem Kommerziellen Lastenheft bilden diese Dokumente die Grundlage, der in Kapitel 5.3. beschriebenen Vorgehensplanung.

7.1.2. Fahrzeug Konzept

Das eruierte Fahrzeuggrundkonzept des Eea922 Prototyps sieht eine Erweiterung des Stromrichters durch eine Filtereinheit und eine Traktionsbatterie vor. Um eine optimale Temperierung der Batterie zu gewährleisten, soll die Batterie durch ein «Battery Thermal Management System» (BTMS) gekühlt oder geheizt werden. Vorgesehen ist eine duale Ladefunktion, welche sowohl mit Fahrleitung als auch Depotspeisung ermöglicht wird. Eine zentrale Anbindung des Battery Management System (BMS) und somit die Verknüpfung zum Projekt BIENE wurde in der Systemarchitektur berücksichtigt. Ebenso wurde sichergestellt, dass der Umbau die bestehenden Systeme und Funktionen nicht beeinträchtigt. Die Wichtigsten technischen Fahrzeugdaten werden in der nachstehenden Tabelle 2 aufgeführt.

Eigenschaft	Eea922
Aussenabmessungen, Typenskizze	unverändert
Lokgewicht nach Umbau, aktueller Projektstand	±2%, max. 45t
Anfahrzugkraft Oberleitung und Batterie	unverändert
Leistung am Rad, Oberleitung	unverändert (750kW)
Leistung am Rad, Batteriebetrieb (30s)	300kW
Leistung am Rad, Batteriebetrieb (Dauernd) ¹	200kW
Maximale Zugkraft	unverändert
Maximale Geschwindigkeit	unverändert
Ladeleistung Batterieklemme	250kW

Tabelle 2: Eea922 Fahrzeugdaten des Prototyps

7.1.3. Evaluation des Batterie Konzept

In der ersten Phase der Studie wurden die Anforderungen am besten passende Batterietyp eruiert. Die konnten folgendermassen zusammengefasst werden:

- Erfüllung der geforderten Leistungsdaten
- Erfüllung der durch die Lastspiele definierten Energiemengen
- Erfüllung der Energiemengen unter Anbetracht des Bauraums und Gewichts
- Hohe zyklische Lebensdauer unter Berücksichtigung der geforderten Lastspiele
- Lieferant mit überzeugendem String Konzept für modularen Aufbau
- Lieferant mit Erfahrungen in der Bahnindustrie zur Minimierung der Risiken
- Nachhaltigkeitsausweis, inkl. der Ressourcen Gewinnung

Die Traktionsbatterie besteht aus mehreren Zellen, welche seriell und parallel angeordnet werden. Dadurch wird bereits die Gesamtspannung vom System und die Grösse der kleinsten tauschbaren Einheit definiert. Als mögliche Technologieträger der Zellchemie wurden Lithium-Titan-Oxid (LTO), Lithium-Eisenphosphat (LFP), Nickel-Mangan-Cobalt Oxide (NMC) und NANO Akkumulatoren betrachtet. Basierend auf den jeweilig variierenden C-Raten¹, Zyklen-Festigkeiten und Energiedichten wurden in Tabelle 3 aufgeführten Produkte für den Prototyp identifiziert. Weitere Batterielieferanten wurden ebenfalls in Betracht gezogen, jedoch auf Grund der technischen Anforderungen nicht weiter untersucht.

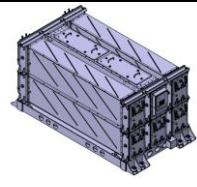
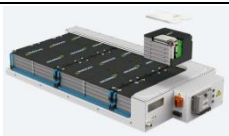
Nr.	Bild	Hersteller	Batteriezellen
1.		ABB	LTO
		<u>Eigenschaften:</u> Eignen sich primär für die Bereitstellung von grossen Peak-Leistungen. Mit vier (4) Strings hätte die Batterie eine nutzbare Kapazität von ca. 84 kWh aufgewiesen.	
2.		Stadler	NMC / Eigenprodukt
		<u>Eigenschaften:</u> Die NMC Zellen zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus. Mit der nutzbaren Kapazität von 134 kWh kann ein Grossteil der benötigten Energie gestellt werden	
3.		AKASOL	NANO NMC / 15AKM46POC
		<u>Eigenschaften:</u> Dank der schlanken und kompakten Bauform könnten mit fünf (5) solcher Module ca. 115 kWh nutzbarer Kapazität bereitgestellt werden. Die Flüssigkühlung lässt hohe Dauerleistung und Ladeleistung zu.	

Tabelle 3: Engere Produktauswahl der Batterie

Im weiteren Verlauf der Machbarkeitsstudie wurden die identifizierten Traktionsbatterien hinsichtlich ihrer Leistungsmerkmale gegenübergestellt und vor dem Hintergrund der Anforderungen verglichen (siehe Tabelle 4). Aus dem vertraglich vereinbarten Variantenentscheid zum Batteriekonzept der Eea922 wurde der Beschluss zur Nutzung des AKASOL Produkts gefällt.

¹ C-Rate bezeichnet den auf die Nennkapazität bezogenen Lade- und Entladestrom

	ABB	AKASOL	Stadler
Länge [mm]	1'600	1'550	2'200
Breite [mm]	484	750	365
Höhe [mm]	475	220	480
Gewicht [kg]	480	362	380
Anzahl Module	4	5	5
Gewicht total [kg]	1'920	1'810	1'900
kWh String Brutto	28	30.6	35.5
Str. Laden 10s [kW]	168	92	124
Str. Entladen 10s [kW]	168	153	124
Str. Entladen cont [kW]	84	77	71
kWh Brutto	112	153	177.5
DoD (100% SoH)	75%	75%	75%
DoD (80% SoH EoL)	95%	95%	95%
kWh Netto	84	114.75	133.125
Wh/kg	58	85	93
Zyklen (Netto-kWh)	20'000	7'000	3'500

Tabelle 4: Batterievergleich der Leistungsmerkmale

Ebenso ausschlaggebend wie die Wahl der Batterietechnologie war die nachgängige Untersuchung zur Bestimmung der Autarkie. Dabei wurde die selektierte Variante gegenüber den täglichen Energieverbräuchen gestellt. Mit einer nutzbaren Kapazität von knapp 115 kWh mussten für den Regelbetrieb zuzüglich der Nebenverbraucher ein Pausenmodell erstellt werden, sodass der Bedarf gedeckt werden kann.

Faktisch wurde über die bezogenen Ist-Mengen der Energiebezüge ersichtlich, dass das Lokpersonal über den Arbeitstag betrachtet regelmässige Pausen einlegt. Auf Grund des Muster-Arbeitstages sind allenfalls zwei Schichten im Einsatz, wobei die Daten regelmässig, gleichbleibende Zeitfenster der Stillstände identifizieren. Bei einem Betriebsmodell mit zwei (2) Pausen mit je 45 Minuten Nachladezeit lassen sich fast 90% der Lastfälle decken. Wird die Pausenzahl auf drei (3) planmässige Stillstände, bei gleichbleibender Gesamtdauer aufgeteilt, so können sämtliche Lastfälle des Worst-Case Szenario gedeckt werden.

Als Schlussfolgerung aus dem Pausenmodell bedeutete, dass eine reduzierte Kapazität, ohne grössere Anpassung zum bestehenden Betriebsablauf problemlos möglich ist. Einzig die Infrastruktur resp. der Abstellplatz des Fahrzeugs muss angepasst werden, sodass die regelmässig auftretenden Stillstände und pausen auch effektiv zum Nachladen genutzt werden können. Diese Abstellplätze sehen zu Zwecken der Effizienzsteigerung eine Ausstattung mit Oberleitung vor, wobei alternativ eine Ladung mittels Depotspeisung möglich wäre.

Um die Lebensdauer der Zellen zu optimieren, wird eine Temperierung der Batterie vorgesehen. Der optimale Bereich hinsichtlich einer minimalen Alterung und maximalen Leistungsfähigkeit der Zellen ist im Bereich von 20°C bis 25°C gegeben. Etwas höhere Temperaturen schränken die Leistungsfähigkeit der Batteriezellen nicht ein, führen aber zu einer erhöhten kalendarischen Alterung. Die definierte Zelltemperatur soll bei allen Umgebungstemperaturen gehalten werden können, wofür ein aktives BTMS vorgesehen wurde. Ausschlaggebend für dessen

Dimensionierung ist die Dauer der Ladeleistung bei konstanter Aussentemperatur und die minimale Aussentemperatur bei einem abgestellten Fahrzeug. Das thermische Rechenmodell kann dem beiliegenden Studienbericht entnommen werden.

Nach dem Einsatz auf der Rangierlok ist die Batterie nicht direkt unbrauchbar. Lediglich ihre Eigenschaften über die Belastbarkeit in Bezug auf die Leistung und die speicherbare Energiemenge genügen nicht mehr für den Einsatz auf der Lok. Die Batterie kann jedoch nach wie vor zur Energiespeicherung genutzt werden. Die Möglichkeiten hierzu sind vielfältig. Das CoCE befasst sich in separaten Projekten mit Systemlösungen, welche für eine SecondLife-Anwendung dieser Batterien gesorgt hätte.

7.1.4. Technologieträger

Der elektrische Antrieb der Lok mit Oberleitung bleibt bestehen. Grundsätzlich wird das Fahrzeug um sämtliche notwendige Komponenten erweitert und bestehende angepasst, sodass ein autarker Betrieb mittels Traktionsbatterie ermöglicht wird.

Als neue resp. erweiternde Komponenten wurden die nachfolgenden Systeme identifiziert:

- Ersatz des Hilfbetriebeumrichter
- Ersatz des Batterieleitgerät
- Umbau der Voltage Limiting Unit (neue Funktionalität)
- Integration einer Filterbox
- Einbau der Traktionsbatterie
- Installation eines Trenntrafo und Ladeschnittstelle zu Zwecken der Depotspeisung
- Integration zusätzlicher Kühlsysteme (BTMS)

Als anzupassende Komponenten wurde die nachfolgenden Systeme identifiziert:

- Stromrichteranpassung bestehend aus Netzstromrichter und Motorumrichter
- Anpassung der Fahrmotoren
- Anpassung der Leittechnik und Fahrzeugsteuerung im Fahrzeugleitgerät (FLG)
- Überholung der Klimaanlage zur baulichen Platzgewinnung
- Umbau des Kompressors zu baulichen Platzgewinnung
- Umpositionierung von Bestandskomponenten (Starterbatterien; Bremswiderstände; u.ä.)

Als weiterer übergreifender Technologieträger wurde die Mehrfachtraktion separat hervorgehoben. Dabei können Lokomotiven zur Steigerung der Anzugkraft miteinander verbunden werden und jeweils vom vordersten Führerstand aus bedient und überwacht werden. Als Vorgabe aus dem technischen Lastenheft wurden die Anforderungen an die Funktionalität einer Mischtraktion vollständig erfüllt. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass bei einer Fahrt ohne Oberleitung mit Traktionsbatterie die Eea922 führend vor die Ee922 vorgespannt werden muss.

Mit dem vorhandenen CAN-Netzwerk ist es möglich, die Lokomotiven mit einem zusätzlichen und unabhängigen Lastmanagement-Tool der SBB auszurüsten. Eine entsprechende Softwareanpassung wie auch die Platzierung von Hardwaregeräten im Inventarschrank der Lokomotive wurde bestätigt. Über den CAN-Bus würden die geforderten Daten der SBB Plattform zu Verfügung gestellt und diese könnte wiederum eine Ladung durch die Oberleitung unterbrechen, steuern oder das Netz über den Stromrichter von der Traktionsbatterie stützen und versorgen. Diese

Schnittstelle der Lastmanagement und Laststeuerung (LMLS) in Form des Projekt BIENE wurde nach Bestätigung der Machbarkeit nicht weiter ausdetailliert.

Die mögliche Automatisierung des Pantographen die im Lastenheft geforderte «Dynamische Transition» zwischen Abschnitten mit und ohne Oberleitung wurde aus den Inhalten der Studie herausgenommen. Hierzu wurde die Erkenntnis gewonnen, dass obwohl eine Vielzahl an möglicher Lösungsansätze besteht, der benötigte Aufwand den Rahmen der Untersuchung überstiegen hätte. Zumal seitens SBB hierzu eine separate Fachgruppe besteht, die sich ausschliesslich mit diesem Thema befasst. Nichtsdestotrotz muss dieser Problemstellung aus Sicht der Betreiber ein besonders hohes Mass an Aufmerksamkeit geschenkt werden.

7.1.5. Bauliche Massnahmen

Bedingt durch den Umbau des Fahrzeugs werden die bisherigen Platzverhältnisse deutlich angepasst. Dabei gilt es die in Kapitel 7.1.1. ff. beschriebenen zusätzlichen Komponenten innerhalb des Fahrzeugs zu integrieren, ohne dadurch Einschränkungen an die Funktionalität, Strukturelle Festigkeit sowie den Laufeigenschaften und Rad- bzw. Achslasten zu erzeugen. Unter Berücksichtigung der Leistungsanforderungen wurden zwei (2) Varianten untersucht und als machbar befunden. Zum einen die Integration sämtlicher Komponenten unter der Verwendung von Bestandsbauräumen sowie einem Ausbau der Galerie auf Fahrzeugseite zwei (2). Ein Ausbau der Galerie hätte die Zugänglichkeit der Komponenten erhöht, jedoch kein weiterführendes Potenzial zur Leistungssteigerung gebracht. Ein Ausbau der Galerie hätte ebenfalls Anpassungen der heutigen betrieblichen Abläufe des Rangierpersonals zur Konsequenz. Aus diesen Gründen wurde der Beschluss zur Nutzung des verfügbaren Bauraums gefällt.

Bei dieser Variante wird im Vorbau eins (1) eine zusätzliche Filterbox neben dem Stromrichter platziert, welche auf Grund der elektrischen Charakteristik möglichst nah am Stromrichter sein muss (siehe Abbildung 12). Der Einbau erfordert die Verstärkung des bestehenden Lufteinlasses der Stromrichterkühlung, an welche die Filterbox ebenfalls gekoppelt wird. Auch der Trennschalter zur sicheren Entkopplung der Traktionsbatterie wird auf der Aussenseite des Vorbaus installiert. Ergänzend dazu ist angedacht, die bestehenden Bremswiderstände oberhalb des Stromrichters zu positionieren und die Starterbatterien von Seite zwei auf den Schaltschrank im Vorbau eins (1) zu versetzen.

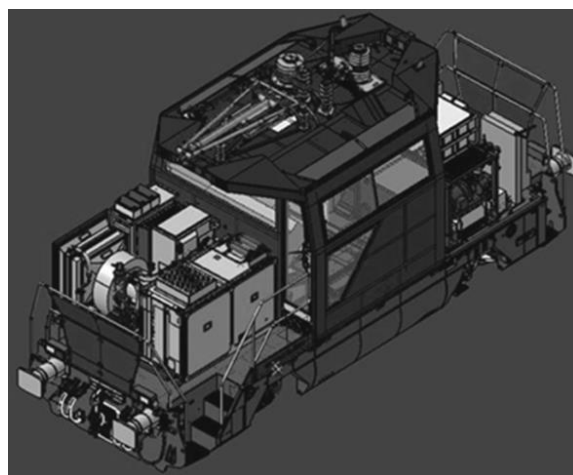


Abbildung 12: Entwurf Vorbau 1

Im Vorbau zwei (2) müssen vorerst der Kompressor und die Klimaanlage zur Platzgewinnung angepasst werden (siehe Abbildung 13). Analog zur Eem923 soll der Lufttrockner und die Filtereinheiten des Kompressors von der heutigen seitlichen Einbaulage aufgetürmt verbaut werden. Die Fahrzeug Klimaanlage würde Aufgrund vorhersehbarer Obsoleszenzen durch eine moderne und kompaktere Anlage mit gleichwertiger Leistung ersetzt werden, was unweigerlich zu einem Umbau des Lufteinlasses auf dem Führerstand führt. Aufbauend darauf ist der Platz geschaffen, das Batteriemodul mittig zwischen der Achse einzubauen. Der Trenntrafo würde dann oberhalb und das BTMS vor der neuen Klimaanlage platziert werden.

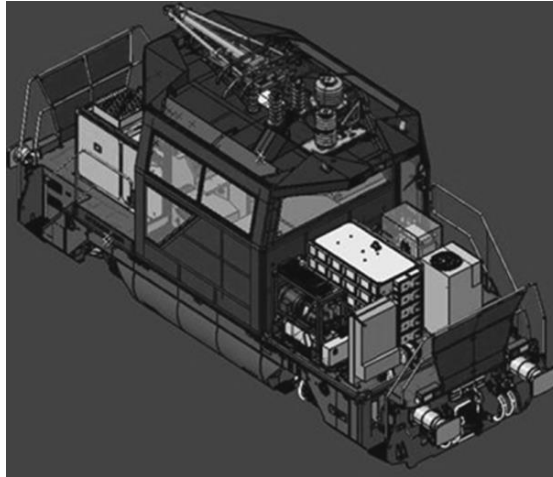


Abbildung 13: Entwurf Vorbau 2

Zur Gewährleistung der Instandhaltbarkeit muss die Konstruktion des Vorbaus selbst angepasst werden. Dabei gilt es die Zugänglichkeit zur pneumatischen Bremstafel, den Filterelementen des Kompressors und den Batteriemodulen sicherzustellen. Hierfür wurde eine Ergänzung zusätzlicher Zugangstüren und die Anhebung der Haube angedacht.

In Anlehnung an die Schwierigkeiten der Komponentenintegration und deren Platzierung musste ebenfalls der Gewichtsverteilung, besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Da keine Großen Komponenten entfernt werden, sondern fast ausschliesslich Komponenten hinzugefügt werden, muss die Gewichtbilanz der Änderung ein Null-Summenspiel des zulässigen Gesamtgewichts wie auch der Rad- und Achslasten ergeben. Lediglich die Ballastmassen der Lok, welche zur Aufballastierung von 40t auf 45t dienen können entfernt oder reduziert werden, um die maximale Achslast von 22.5t nicht zu überschreiten (siehe Tabelle 5). Von Vorteil ist die bereits bestehende Achslastdifferenz der Ee922, wobei Achse 2 bereits vor dem Umbau einer geringeren Belastung ausgesetzt wird, was den Einbau auf Fahrzeugseite zwei mit dem Grossteil der Komponenten unterstützt.

Komponente	Bilanz
Reduktion Ballastgewicht	- 3'600 kg
Einbau der Filterbox	+ 400 kg
Anpassung der Stromrichter-Kühlsysteme	+ 100 kg
Umbau des Kompressors	+/- 0 kg
Austausch der Klimaanlage	+/- 0 kg
Einbau Kabel und Wasserleitungen	+ 200 kg
Einbau der Batteriemodule	+ 2'000 kg
Einbau der Batteriekühlung	+ 300 kg
Anpassung der Hauben und Verschalung	+/- 0 kg
Austarieren der Ballastgewichte	+ 600 kg
Total	+/- 0 kg

Tabelle 5: Provisorische Gewichtstabelle Eea922

7.2. Änderungen, Abweichungen und Problemstellungen

Über den Projektverlauf haben sich diverser Änderungen am Projekteinhalt, wie auch der Ausführung ergeben. Zu den bedeutendsten Änderungen zählen dabei die Skalierung des Anforderungsprofils und der Vertragsschluss zur ausschliesslichen Zusammenarbeit mit der SRS.

Als das Projekt im Januar 2020 mit der Freigabe des Projektauftrags lanciert wurde, war das Einsatzprofil der zukünftigen Eea922 als Last-Mile Fahrzeug definiert. Ähnlich wie bei der im Werk Biel entwickelten Taf200 war das Bestreben in Eigenfertigung das Fahrzeug zu erweitern, sodass mittels kleinsten Energiemengen, kostengünstig einfache Rangierbewegungen ausgeführt werden können. Auf Grund der im Rahmen der Messkampagne identifizierten Betriebsanforderungen zusammen mit dem baulich identifizierten Potenzial wurde zeitnah nach dem Start eine grundsätzliche Konzeptänderung vorgenommen. Die Skalierung der Dimensionierung auf ein Anforderungsprofil, wodurch ein vollständig autonomer Betrieb mit Traktionsbatterie ermöglicht würde, stützte sich auf der These, dass die verfügbaren Bauräume eine leistungsäquivalente Konzeption zulassen würde. Des Weiteren herrschte der ubiquitäre Konsens, dass Varietät und Volatilität der standortbasierten Anforderungsprofile, bei reduzierter Kapazität mittels entsprechender Einsatz- und Umlaufplanung gänzlich kompensiert werden kann.

Im Studienverlauf wurde ebenfalls die Fragestellung untersucht, ob die Eem923 nicht das geeignetere Fahrzeug für den Umbau sei. Zur Deckung des Worst-Case Lastprofils wäre eine maximal nutzbare Kapazität erforderlich, welche den baulichen Rahmen der Ee922 deutlich überstiege hätte. So wurde auf Grund der Anfrage durch die SBB Cargo ebenfalls die Untersuchung des Ausbaus einer Eem923 Gegenstand der Diskussion. Es hat sich gezeigt, dass durch den Wegfall des Powerpack, das eingänglich grössere Fahrzeug prädestiniert für diesen Umbau wäre und sich das Konzept eins-zu-eins umsetzen liesse. Da es sich hierbei um Fahrzeuge der SBB Cargo handelte, welche für den Einsatz bei der RLS auf Grund gravierend höheren Instandhaltungskosten gegenüber der Ee922 nicht als wirtschaftlichen Ersatz abgezeichnet haben, wurden dieser Weg von Seiten des Projekts nicht weiterverfolgt. Die SBB Cargo hat sich den Umbau der Flotte durch die SRS offerieren lassen, jedoch auf Basis einer Kosten-Nutzenanalyse sich dagegen entschieden. Auch der Synergieeffekt einer potenziellen Kostenreduktion durch eine Steigerung

der Stückzahl bei gleichzeitigem Umbau der Eem923 und Ee922 konnte kein wirtschaftlich gerechtfertigtes Ergebnis erzielen.

Mit der zu Beginn des Projekts angedachten Durchführung des Fahrzeugumbaus, in Eigenregie der RLS, war eine Einbindung der Schlüssellieferanten als Dienstleister vorgesehen. Hierbei wurden die SRS und die ABB bei den Gesprächen zur Initialisierung des Last-Mile Betrieb abgeholt und eingebunden. Die Parallel dazu durchgeführte Messkampagne und der nachfolgenden Transition zur autonomen Batterielok hatte dann die Vertragsverhältnisse zu Gunsten einer bilateralen Zusammenarbeit zwischen der SRS und RLS entstehen lassen. Wie in Kapitel 5.3. bereits erwähnt, sind dadurch im Projekt merkliche Verzögerungen entstanden, wobei die Klärung des Vertragsverhältnisses in Bezug auf die Serie und der Vertraulichkeit des Projekts klargestellt werden mussten.

Über den Verlauf der Machbarkeitsstudie wurde der in der Studie ermittelte Bedarf für Batteriefahrzeuge weiterführend dezimiert. Als Hauptbedarfsträger wurde anfänglich der Bahnproduktionsstandort in Basel identifiziert. Die dort im Einsatz befindlichen Ee922 wurden zum Zeitpunkt der Studie durch eine Am843 unterstützt, welche die Bewirtschaftung der nichtelektrifizierten Areale verantwortet. Im Rahmen eines Kleinprojektantrag wurde Ende 2021 der Fahrleitungsausbau dieser Areale bewilligt, wodurch der Bedarf einer Eea922 im Regelbetrieb stark dezimiert wurde.

In weiterführenden Untersuchungen und Gesprächen mit den Betreibern hat sich jedoch herausgestellt, dass die Rechtfertigung einer Batterielok weiterhin besteht. Obwohl der Bedarf im Regelbetrieb reduziert wurde, ist die Produktion während Bahnhofsumbauten, Gleis- und Oberleitungsstörungen und anderen Sondereinsatzszenarien, kontinuierlich auf den Einsatz eines autonomen Fahrzeugs angewiesen. Daraus resultierend haben sich neu Problemstellungen ergeben, welche den Inhalt des Projekts und die Anforderungen an ein Batteriefahrzeug gravierend beeinflussen. Beispielhaft steht hierfür die Funktionalität der dynamischen Transition zwischen Fahrleitungsabschnitten und nicht elektrifizierten Bereichen, welche auf Grund baulicher Tätigkeiten stromlos geschaltet werden. Der heutige Stand der Technik erlaubt es nicht, diesen Wechsel ohne Eingriff des Bedieners vorzunehmen. Da während derartigen Ausnahme- resp. Sonderszenarien von den Betreibern bereits besondere Aufmerksamkeit gefordert wird, darf die Steuerung keine zusätzliche Belastung für den Lokführer bedeuten. Die daraus erfolgenden Anforderungen an Sicherheit für den Betrieb und die Technik, sowie der Einsatzplanung müssen weiterführend untersucht werden.

Die Studie konnte mit der Abgabe des Berichts, sowie der Offerte für den Prototypenbau erfolgreich abgeschlossen werden. Die in dem Bericht ausgearbeiteten Liefer- und Leistungsobjekte bestätigen die Machbarkeit des Umbaus und beschreiben die technischen Ausführungen zur Erfüllung der Anforderungen des technischen Lastenheftes. Die in der Offerte ausgewiesenen Kosten (siehe Kapitel 7.3) haben dabei jedoch die budgetierten Plangesamtkosten um vielfaches überstiegen. Begründen liessen sich diese Kosten durch die Komplexität der geforderten Anforderungen, die Vielzahl der Schnittstellen und angrenzenden Systeme, der im Februar 2022 verhältnismässig hohen Rohstoffpreisen und der zum Zeitpunkt neuartigen Batterietechnologie im Bahnbereich. Zur Senkung der Gesamtkosten wurde mit Stadler die Erstellung eines Minimum Viable Product (MVP) ausgehandelt.

Bei dem MVP handelte es sich dabei um eine abgestimmte Leistungsreduktion der technischen Anforderungsspezifikation. So wurde auf die Integration des Trenntrafos, dem Tausch der Klimaanlage und der Funktion einer Depospeisung verzichtet. Mit dem gleichzeitigen Beschluss, den Kompressorumbau auszusetzen waren die verfügbaren Bauräume nicht mehr ausreichend, was den Ausbau der Galerie zwangsläufig erfordert hätte. Auch im Bereich der Traktionsbatterien wären durch den Wechsel zum kostengünstigeren ABB LTO Produkt, Einbussen in der installierten und nutzbaren Kapazität einhergegangen. Die daraus resultierende Offerte konnte ein deutliches Senkungspotenzial ausweisen, welches jedoch dennoch weit über den erwarteten Plankosten für den Prototyp langen und zugleich die verpflichtende Bindung an den Umbau der Serie durch die SRS bedeutet hätte. Diese Erkenntnisse haben im späteren (siehe Kapitel 8) zur Einstellung des Projekts beigetragen.

7.3. Kosten & Finanzierung

Zu Beginn des Projekts wurden die Plangesamtkosten für ein Last-Mile betriebsfähigen Prototypen, Anfang 2020 mit 980kCHF bemessen. Die Finanzierung hierbei wurde im Rahmen der mittelfristigen Unternehmensplanung (MUP) der RLS budgetiert und für die Studie vollumfänglich gesichert. Mit dem Beschluss Ende 2020 zur Durchführung der Machbarkeitsstudie und darin gebundenen Zusammenarbeit mit der SRS wurde parallel ein Gesuch zur Förderung des Pilotprojekts im Programm der Energiestrategie im öffentlichen Verkehr (ESöV) des Bundesamts für Verkehr (BAV) gestellt und bewilligt.

Die in Abbildung 14 aufgeführte Übersicht spiegelt die in der Initialisierung ermittelten Plankosten des Last-Mile Prototyp mit einer Schätzungsungenauigkeit von +/- 40% wider. Dabei wurde im Rahmen des P215-Projektantrag der batteriebetriebenen Rangierlokomotive eine Übernahme von 40% der nichtamortisierbaren Projektkosten mit einem Gesamtbetrag von bis zu 392 kCHF durch den BAV bewilligt. Die Aufteilung der Kostenbeteiligung wurden im Rahmen des Subventionsvertrags in die Phase 1 (Machbarkeitsstudie) mit insgesamt 20 kCHF und die Phase 2 (Engineering, Pilotumbau und Praxistest) mit insgesamt 372 kCHF aufgeteilt. Die in Zeile zwei (2) ausgewiesenen Studienkosten wurden im Projektauftrag nachgängig zur Schliessung des Subventionsvertrags, um die Bestellung der Leistungen der SRS, im Projektantrag unentgeltlich ergänzt.

	2020	2021	2022	2023
Machbarkeitsstudie (285 kCHF)	54 kCHF	231 kCHF		
• Eigenleistung SBB (Projektleitung)	54 kCHF	20 kCHF		
• Fremdleistung (Stadler)		211 kCHF		
Plankosten der Machbarkeitsstudie wurden im ursprünglichen Budget nicht berücksichtigt. Für die Förderbeiträge sind folgende Kosten berücksichtigt.				
Machbarkeitsabklärung (Anteil Eigenleistung 20 kCHF)		20 kCHF		
Engineering (230 kCHF)			230 kCHF	
• Eigenleistung SBB (Projektleitung)			30 kCHF	
• Fremdleistung (Stadler, Ing. Büro)			200 kCHF	
• Material				
Pilotumbau (650 kCHF)			115 kCHF	515 kCHF
• Eigenleistung SBB (Projektleitung, Knowhow-Aufbau, Schulung)			15 kCHF	215 kCHF
• Fremdleistung (Stadler, Ing. Büro)			–	50 kCHF
• Material			100 kCHF	250 kCHF
Praxistest (100 kCHF)				100 kCHF
• Eigenleistung SBB (Projektleitung, Durchführung Tests, Analyse und Auswertung, Knowhow-Transfer)				30k CHF
• Fremdleistung (Stadler, Ing. Büro)				10k CHF
• Material				60 kCHF
Summe (980 kCHF)	N/A	20 kCHF	345 kCHF	615 kCHF
Förderungsbeitrag		20 kCHF	138 kCHF	234 kCHF
Förderungsbeitrag Total (entspricht 40% von 980 kCHF)				392 kCHF

Abbildung 14: Plangesamtkosten des ESöV Fördergeldantrags

Bezugnehmend auf die der SRS ausgestellten Offerte (OF20013601), wurden die Gesamtkosten des Eea922 Prototypen Fahrzeug mit 7,73 Millionen CHF bemessen. Der Preis setzt sich aus den Einzelpositionen der Einmalkosten mit 6'560 kCHF, den Umbau- resp. Installationskosten mit 240 kCHF und den Materialkosten mit 930 kCHF zusammen.

Enthalten in den Einmalkosten sind das Engineering, das Projektmanagement, die Zulassung, die Typentests, sowie die Aufwendungen Dritter und das Schulungskonzept des Prototyps. In der Einzelposition zum Umbau nicht enthalten waren Leistungen und Kosten hinsichtlich des Trassenzugangs, Energiekosten des Betriebs und Personalkosten der Lokführer zu Zwecken der Zulassung und Testfahrten. Die unentgeltliche Bereitstellung dieser wurde vertraglich von der SRS vorausgesetzt. Bei Materialkosten war der Haupttreiber mit einer Beteiligung von mehr als 30% die Beschaffung der Batterie selbst.

Zusätzlich enthalten in der Offerte waren die indikativen Preise für den serienmässigen Umbau der Fahrzeuge durch Stadler. Bei gleichbleibenden Einmalkosten des Pilotumbaus wurden nachfolgenden Losgrössen der Serie wie folgt bemessen:

- 5 Fahrzeug zu je 1'300 kCHF;
- 10 Fahrzeuge zu je 1'200 kCHF;
- 24 Fahrzeuge zu je 1'150 kCHF;

In der Betrachtung der Fahrzeugpreise bei umgelegter Prototypeninvestition auf die Serie wären die Einzelpreise wie folgt bemessen:

- Prototyp umgelegt (Serie 5 Fz.): 2 '372 kCHF/Fz.
- Prototyp umgelegt (Serie 10 Fz.): 1'794 kCHF/Fz.
- Prototyp umgelegt (Serie 24 Fz.): 1'413 kCHF/Fz.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 7.2. vorgestellten, konzeptionellen Leistungsreduktionen wurde seitens SRS erneut eine Kalkulation aufgestellt. Der Detaillierungsgrad wurde im Vergleich zur ursprünglichen Offerte deutlich geringer gehalten und beinhaltete die verpflichtende Bindung einer Losgrösse von 10 Fahrzeugen, inklusive des Pilotumbaus. Die ermittelten Gesamtkosten beliefen sich dabei auf 10,985 Millionen CHF, welche sich in die Teilposition des Pilotfahrzeugs mit 5'500 kCHF, zuzüglich der Serienkosten von 9 Fahrzeugen mit gesamthaft 5'485 kCHF untergliederte. Das Preisdelta des MVP zur ursprünglichen Variante wäre bei einer Serie von zehn (10) Fahrzeugen bei einer Einsparung von 754 kCHF/Stück gelegen.

Über den Verlauf der Machbarkeitsstudie sind die Kosten der SBB-Eigenleistungen massgeblich gestiegen. Zu den ursprünglichen Planaufwänden sind die kumulierten Kosten aus den Vertragsverhandlungen sowie die Aufwände der Projektleitung, der kontinuierlichen Fortschrittskontrollen, technischer Abklärungen und der Variantenentscheide hinzugekommen. Gesamtheitlich beliefen sich die Investition auf 338 kCHF (siehe Abbildung 15), wobei ein Grossteil des Betrags von den pauschalverrechneten Studienkosten der SRS und die separat budgetierten Aufwände der Bedarfsanalyse RLS (indirekte Kosten) wie auch dem Datalogging der Messkampagne ausmachen.

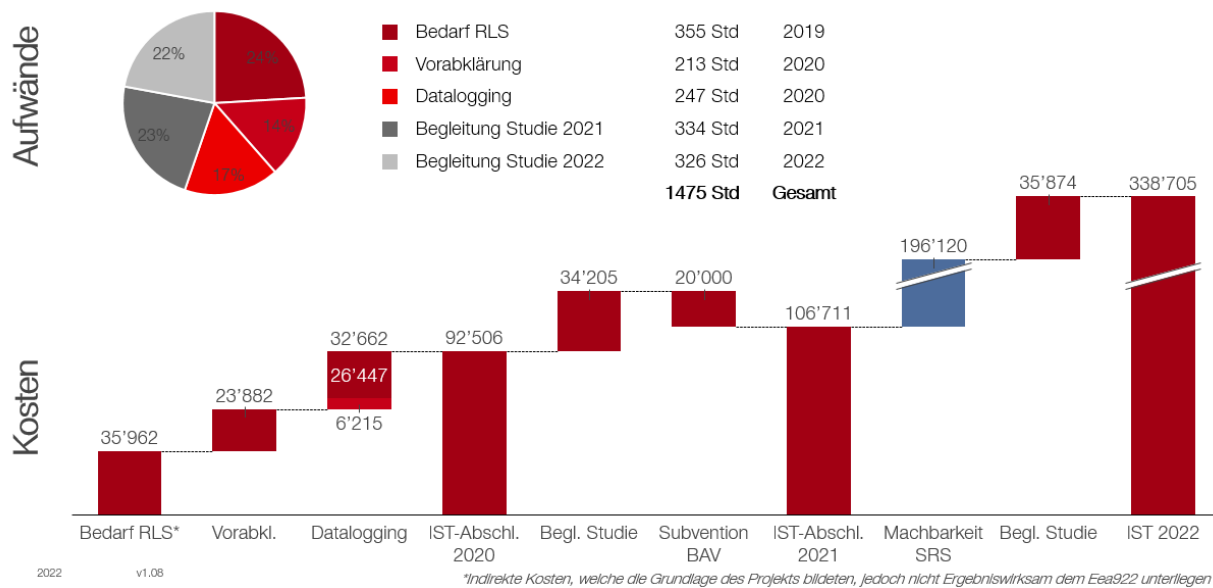


Abbildung 15: Übersicht der Projektaufwände und -kosten der Eea922 (Nachkalkulation; Stand 07.11.2022)

Bei der Betrachtung der im Projekt tatsächlich anfallenden Gesamtkosten, wurden 302 kCHF für die Durchführung der Studie und Abschluss des Projekts aufgewendet, wobei hier der Subventionsbeitrag von 20 kCHF bereits entgegen gerechnet wurden. Im Hinblick auf die Aufwendungen wird ersichtlich, dass der grösste Teil mit knapp 873 Stunden den administrativen Tätigkeiten im Rahmen der Vorabklärungen, Verhandlungen und der abschliessenden Dokumentenerstellung zu verzeichnen sind.

	2020		2021		2022		Gesamtkosten / Phase
	Aufwand (h)	Kosten	Aufwand (h)	Kosten	Aufwand (h)	Kosten	
Bedarfsanalyse	355	CHF 35'962.04					
- Projektleitung	34	CHF 3'427.06					CHF 35'962.04
- ENG Fachspezialisten	321	CHF 32'534.98					
Vorabklärung*	213	CHF 23'881.84					
- Projektleitung	140	CHF 15'685.38					CHF 23'881.84
- ENG Fachspezialisten	47	CHF 5'228.46					
- Strategischer Einkauf	27	CHF 2'968.00					
Datalogging*	247	CHF 26'447.19	42	CHF 4'955.32	7	CHF 812.00	CHF 32'214.51
- ENG Fachspezialisten	247	CHF 26'447.19	42	CHF 4'955.32	7	CHF 812.00	
Begleitung Studie*			292	CHF 29'250.18	319	CHF 35'062.41	
- Projektleitung			216	CHF 24'692.18	273	CHF 30'504.32	CHF 64'312.59
- ENG Fachspezialisten			76	CHF 4'558.00	40	CHF 3'889.09	
- Strategischer Einkauf					6	CHF 669.00	
Materialkosten		CHF 6'215.47					
- Hardware Datalogger		CHF 5'940.78					CHF 6'215.47
- Elektro- und Fahrleitungsmaterial		CHF 274.69					
Dienstleistungen*						CHF 196'120.00	CHF 196'120.00
- SRS Studienkosten						CHF 196'120.00	
Erlöse				-CHF 20'000.00			CHF -20'000.00
- BAV Subvention				-CHF 20'000.00			
Gesamtkosten / Jahr	815 h	CHF 92'506.54	334 h	CHF 14'205.50	326 h	CHF 231'994.41	CHF 338'705.00
Projektwirksame Kosten		CHF 56'544.50		CHF 14'205.50		CHF 231'994.41	CHF 302'744.41
*Nichtamortisierbare Mehrkosten		CHF 50'329.03		CHF 14'205.50		CHF 231'994.41	CHF 296'528.94

Tabelle 6: Aufschlüsselung der Gesamtkosten

Die in obigen Tabelle 6 ausgeführte Aufschlüsselung der Gesamtkosten dient der Verdeutlichung, der in Abbildung 15, holistisch dargestellten Projektkosten. Hierbei explizit hervorgehoben ist die Verknüpfung der Aufwände, im Zusammenhang mit den Kosten und den daraus resultierenden jährlichen sowie phasenspezifischen Kosten. Der im Projekt als Anteil nichtamortisierbarer

Mehrkosten identifizierte Betrag besteht zu knapp 98% aus den bereits erwähnten administrativen Tätigkeiten zur Projektleitung, sowie den technischen Abklärungen zur Machbarkeit und beläuft sich nach Abschluss des Projekts auf 296 KCHF.

8. Projekt Ergebnis & Abschluss

Die im Rahmen der Konzeption erstellten Umbauvarianten belegen, dass die Machbarkeit mit den vorgesehenen Bauteilen und Systemen in verschiedenen Ausprägungen der Leistungsanforderungen möglich sind. Das Fahrzeug des Typ Ee922 hat sich als zielführend und sinnvoll für einen Umbau erwiesen. Jedoch gilt es auf Grund der im Projekt erfahrenen Änderungen und Erkenntnisse, wie auch dem Wandel der betrieblichen Anforderungen, das Anforderungsprofil einer batteriebetriebenen Rangierlok weiter auszubauen. Konkret bedeutet dies, das bestehende Datalogging der Messkampagne fortzusetzen, sodass die Anforderungen an den Regelbetrieb und die der derzeitigen bekannten Sondereinsatzszenarien klarer abgebildet werden können.

Im Hinblick auf die wirtschaftlichen Aspekte kann zum heutigen Stand die Rechtfertigung für einen Umbau nicht gewährleistet werden. Die mit einem Prototyp verbundenen Einmalkosten übersteigen zum Teil den Fahrzeug-Neupreis und sind bedingt durch die geringe Gängigkeit und Verfügbarkeit im Bahnsektor noch mit deutlich zu hohen Initialaufwänden und -kosten für die Zulassung und Typentests, sowie mit den entsprechenden zusätzlichen Risiken verbunden. Auch im Kontext eines Kosten-Nutzen Vergleichs steht der Umbau zweitrangig hinter alternativen Lösungen wie beispielsweise einer Fahrzeug-Neubeschaffung, einem Leasing oder den prognostizierten Projektkosten, aufbauend auf der im Werk Biel bereits realisierten Taf 200.

Zum 09.06.2022 wurde nach ausgiebigen Untersuchungen der Beschluss gefasst das Projekt einzustellen, um zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgegriffen werden zu können. Das Projekt soll in 2-3 Jahren erneut aufgerollt werden und vor dem Hintergrund der Marktentwicklung im Bereich Batteriefahrzeuge, einer erwarteten Entlastung des Rohstoffmarktes, preislich und technisch attraktiveren Batterietechnologien und den im Rahmen der Messkampagne ausgebauten Erkenntnisse neu bewertet werden.

Durch den Abschluss des Projekts werden interne Ressourcen wiederrum frei, welche planmässig in den aktuell parallellaufenden RLS Entwicklungs- und Elektrifizierungsprojekten integriert werden können. Primär liegt der Fokus dabei auf der Weiterentwicklung des bestehenden Prototyps, hin zur serienmässigen Taf 400.

In Anbetracht der Verpflichtungen aus dem Subventionsvertrag ist das Projekt mit der Verfassung dieses Abschlussberichts, den Forderungen pflichtgemäss nachkommen. Das gewonnene Knowhow wurde Rahmen dieses Dokument zusammengefasst und dem BAV zur Veröffentlichung bereitgestellt. Dadurch sollen aussenstehende und weiterführende EVU's von den Erkenntnissen profitieren, sodass das Ziel einer gemeinschaftlich, förderlichen Marktentwicklung zielführend umgesetzt werden kann.

9. Offene Punkte

Mit dem Abschluss des Projekts wurden fortführende Massnahmen und Abklärungen identifiziert, welche zum Teil ergänzend zum Projekt, aber auch übergreifend implementiert und ausgeführt

werden müssen. Ausstehend zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Dokuments sind dabei die nachfolgenden Punkte, mit den jeweilig verantwortlichen Fachbereichen zu nennen.

1. Fachbereich RLS; Untersuchung des Fallbeispiels zur autonomen Produktion während eines 2-stündigen Baustellen-Stop am Produktionsstandort Basel. Zu ermitteln gilt es die Reichweite einer Eea922 unter den gegebenen Sondervoraussetzungen während des Bahnhofumbaus und die Bestimmung möglicher Varianten zur Bedarfsdeckung.
2. Fachbereich CoCE; In der bestehenden Arbeitsgruppe zur Lösung sämtliche Problemstellungen im Hinblick auf die Dynamische Transition, gilt es ein praktikables und zuverlässiges Konzept zu entwickeln. Zielsetzung aus Sicht des Eea922 Projekts wäre dabei ein vom Bediener entkoppeltes System zum automatisierten Heben und Senken des Pantographen.
3. Fachbereich RLS; Ausbau des Grunddatenbestand sämtlicher Flotten, Betriebs- und Einsatzstandorte zur vollständigen Definition und Klassifizierung der variierenden Bedarfsanforderungen.
4. Fachbereich CoCE; Einheitliche Definition zum Umgang mit der Integration der im Projekt LMLS relevanten Hardware und Funktionen. Gemäss des im Projekt BIENE formulierten Abschlussberichts ist die Strategie und Umsetzung noch nicht vollständig festgelegt worden. Erwartungsgemäss wird diese über den zeitlichen Verlauf, mit der Realisierung erster Eigenentwicklungen und Fahrzeug-Neubeschaffungen konkretisiert.

Im weiteren Vorgehen wird das Projekt «Taf 400» RLS intern aufgelegt. Ziel wird es werden, die Erkenntnisse aus dem Eea922 Projekt im Rahmen der Planung, des Fahrzeuganforderungsprofil und der konzeptionellen Ausarbeitung einfließen zu lassen.

10. Anhänge

10.1. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AKV	Aufgaben, Kompetenzen, Verantwortungen
BAV	Bundesamt für Verkehr
BMS	Battery Management System
BP	Bahn Produktion
BTMS	Battery Thermal Management System
C-Rate	Bezeichnet den auf die Nennkapazität bezogenen Lade- und Entladestrom
CoCE	Center of Competence – Energiespeicher
DoD	Depth of Discharge
ENG / Ing.	Engineering / Ingenieur
EoL	End of Life
ESöV	Energiestrategie im öffentlichen Verkehr
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FLG	Fahrzeug Leitgerät
FST	Führerstand
Fz.	Fahrzeug
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-Stunde
LFP	Lithium Eisenphosphat Akkumulator
LTO	Lithiumtitanoxid Akkumulator
MUP	Mittelfristige Unternehmensplanung
MVP	Minimum Viable Product
NANO	Kombinierte Akkumulator Zellchemie aus NMC, LTO und LFP
NMC	Nickel-Mangan-Cobalt Akkumulator
PL	Projektleiter
PP	Produktion Personenverkehr
RLS	Rangierlokomotiven und Spezialfahrzeuge
RZA	Rangierbahnhof Zürich Altstetten
SBB	Schweizerische Bundesbahnen AG
SoH	State of Health
SRS	Stadler Rail Services AG
STAG	Stadler Rail AG
UHR	Unterhalt Rollmaterial

10.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematisches Vorgehensmodell Projekt Eea922.....	12
Abbildung 2: Zeitschiene Machbarkeitsstudie Eea922.....	12
Abbildung 3: Organigramm Projekt Eea922.....	14
Abbildung 4: Ee922 Rangierlokomotive.....	16
Abbildung 5: Gesamtverfügbares Bauraumpotenzial.....	17
Abbildung 6: Integration Em3/3 Datalogger	18
Abbildung 7: Täglicher Energieverbrauch Em3/3.....	18
Abbildung 8: Mittlerer Energieverbrauch Em3/3	18
Abbildung 9: Energieverbrauch unterhalb der Fahrleitung.....	19
Abbildung 10: Anzahl der Maximallastfälle über die Zeit.....	19
Abbildung 11: Logarithmische Normalverteilung des Best- und Worst-Case Leistungsprofils...	20
Abbildung 12: Entwurf Vorbau 1	25
Abbildung 13: Entwurf Vorbau 2	26
Abbildung 14: Plangesamtkosten des ESöV Fördergeldantrags.....	30
Abbildung 15: Übersicht der Projektaufwände und -kosten der Eea922	32

10.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Phasenplan der Machbarkeitsstudie	13
Tabelle 2: Eea922 Fahrzeugdaten des Prototyps	21
Tabelle 3: Engere Produktauswahl der Batterie.....	22
Tabelle 4: Batterievergleich der Leistungsmerkmale	23
Tabelle 5: Provisorische Gewichtstabelle Eea922	27
Tabelle 6: Aufschlüsselung der Gesamtkosten.....	32