

**Feldversuch eHighway an der BAB A1 in Schleswig-Holstein**  
**Netzintegration eines innovativen Speicherunterwerkes zur**  
**Versorgung des eHighways SH Power-Charger**



**Abschlussbericht**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

---

## Abschlussbericht

<b>Förderkennzeichen:</b>	16EM5005-1
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	Netzintegration eines innovativen Speicherunterwerkes zur Versorgung des eHighways SH Power-Charger
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.11.2021 bis 31.12.2024
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.11.2021 bis 31.12.2024

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.
2. Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.
3. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?
4. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind (auch Darstellung der aktuellen Informationsrecherchen nach Nr. 6.1 NKBF 98)?
5. Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?
6. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden):
  - Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.
  - Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).
  - Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen.
  - Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse.

## Inhalt

Zusammenfassung.....	5
1.0 Zielstellung - Speicherunterwerk .....	6
1.1 FAT – Werksabnahme .....	8
2.0 Netzintegration .....	9
2.1 Hardwaretechnische Netzintegration - Transport und Aufstellung.....	10
2.2 Hardwaretechnische Netzintegration – Netzanschluss und Tiefbau .....	11
2.3 Softwaretechnische Netzintegration .....	14
3.0 SAT – Abnahme vor Ort.....	16
4.0 Messtechnik .....	18
5.0 Funktion und Probetrieb .....	21
5.1 Netzschutz – Systemschutz .....	30
5.2 Betriebsbericht Speicherunterwerk (01.01.2024 – 01.12.2024) .....	31
5.3 Wartungskonzept .....	33
6.0 Auswirkungen auf die Netzqualität.....	34
6.1 Messmethodik und Messkonzept .....	34
6.2 Analyse auf der Gleichstromebene .....	35
6.3 Reduzierung der Netzanschlussleistung .....	38
6.4 Analyse und Bewertung der Netzurückwirkungen .....	39
7.0 Technische und wirtschaftliche Bewertung.....	40
7.1 Versorgungsqualität .....	40
7.2 Technische und ökologische Bewertung.....	41
7.3 Eigenbedarfsenergie und Wirkungsgrad.....	42
7.4 Wirtschaftliche Bewertung.....	43
8.0 Zukunftsaussichten und Optimierungsbedarf .....	48

<b>Kontakt Daten</b>		
<b>Verbundpartner</b>	<b>Anschrift</b>	<b>Ansprechpartner</b>
Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH (FuE- Zentrum)	Schwentinestr. 24 24149 Kiel	Geschäftsführer: Björn Lehmann-Matthaei Tel.: +49 431 218-4444 E-Mail: lehmann.matthaei@fh-kiel-gmbh.de
Fachhochschule Kiel Institut für elektrische Energietechnik	Grenzstraße 5 24149 Kiel	Projektleiter: Prof. Hans-Jürgen Hinrichs Tel.: +49 431 210 4195 E-Mail: hans-juergen.hinrichs@fh-kiel.de  Projektingenieur: Jurij Langlits Tel.: +49 43178589901 E-Mail: jurij.langlits@fh-kiel.de

## Zusammenfassung

Das Institut für Elektrische Energietechnik der FH-Kiel hat sich zum Ziel gesetzt, die von den eHighway-Unterwerken ausgehenden NetZRückwirkungen zu analysieren und zu bewerten. Neue technische Lösungsansätze im versorgungstechnischen Bereich für den eHighway sind essentiell, um zukünftig die Ressourcen zu schonen, den Eingriff in die Natur zu minimieren und vor allem – im Falle eines Systemausbaus - Kosten einzusparen. Das neuartige Speisekonzept mittels eines Speichers bringt eine neue, innovative Struktur in die derzeitigen Versorgungskonzepte. Es ermöglicht zudem dem Land Schleswig-Holstein, aufgrund der Gegebenheiten und des Vorhandenseins der elektrischen Infrastruktur, die Energiesektorenbereiche der Mobilität und Energieeinspeicherung näher zu untersuchen. Dabei sollen für die Kopplung der Sektoren verwertbare Ergebnisse erzielt werden.

Ziel des Vorhabens ist es, einen wesentlichen Beitrag im Bereich der Energieeffizienz, Energiezwischenlagerung und Netzstabilität zu leisten. Darüber hinaus eröffnet dieses Vorhaben zu einem späteren Zeitpunkt die gezielte Forschung im Bereich der Speichertechnologien unter realen Bedingungen. Dabei können nicht nur die Speicherlebensdauer, sondern auch das Speicherlade- und Entladeverhalten, sowie seine Auslastung untersucht und Schwachstellen identifiziert werden.

Durch die zusätzliche Erfassung des anlagenbezogenen Energieverbrauchs und die Abgrenzung in verschiedene Anlagenteile, sind skalenabhängige Wirkungsgrade und damit ökologische und ökonomische Betrachtungen für verschiedene Ausbaustufen durchführbar. So sind Emissionsminderungspotenziale der eingesetzten Systeme miteinander vergleichbar und in verschiedenen Ausbaumaßstäben ableitbar.

## 1.0 Zielstellung - Speicherunterwerk

Das Ziel dieses Vorhabens war es ein Speicherunterwerk in den eHighway zu integrieren, in Betrieb zu nehmen, diesen nach Möglichkeiten unter realen Bedingungen zu testen und zu optimieren. Die Grundlage dafür war zunächst die erstellte Konzeption, Leistungsbeschreibung und die EU-weite Ausschreibung des Speicherunterwerkes. Unter anderem wurden Absprachen mit den Projektbeteiligten durchgeführt. Vor allem im Bereich einzelner Hardwarekomponenten sowie die Beschreibung der systemischen und sicherheitstechnischen Schnittstellen für die Netzintegration waren hier essentiell.

Die Ausschreibung ergab nur einen Bieter (Freqcon GmbH). Nach der Überprüfung der Unterlagen wurden einige Abweichungen festgestellt. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten und Mangel an elektrotechnischen Bauteilen (Halbleiter) wurde der angesetzte Angebotspreis um ca. 39.500€ überschritten und die Batteriekapazität von 140kWh auf 120kWh reduziert. Alle sonstigen gesetzten Anforderungen und Vorgaben wurden vom Bieter berücksichtigt. Der Zuschlag wurde anhand von gesetzlichen Bestimmungen Ende März 2022 erteilt.

Das Speicherunterwerk hat dabei folgende Eckdaten:

- 20 Fuß Container in der High Cube Variante
- Speichermedium: 3 x 41 kWh Lithium-Titanat-Batterie (LTO)
- Unterwerksleistung: 1 MW (1000 kW)
- Maximaler Ausgangsstrom zur Oberleitung: 1500 A
- Maximaler Ausgangsstrom Batteriespeicher: 3 x 1000 A
- Gleichspannungsbereich Oberleitung: 500 - 900 V
- Zwischenkreisspannung: 1200 V
- Gleichspannungsbereich Batteriespeicher: 420 - 756 V

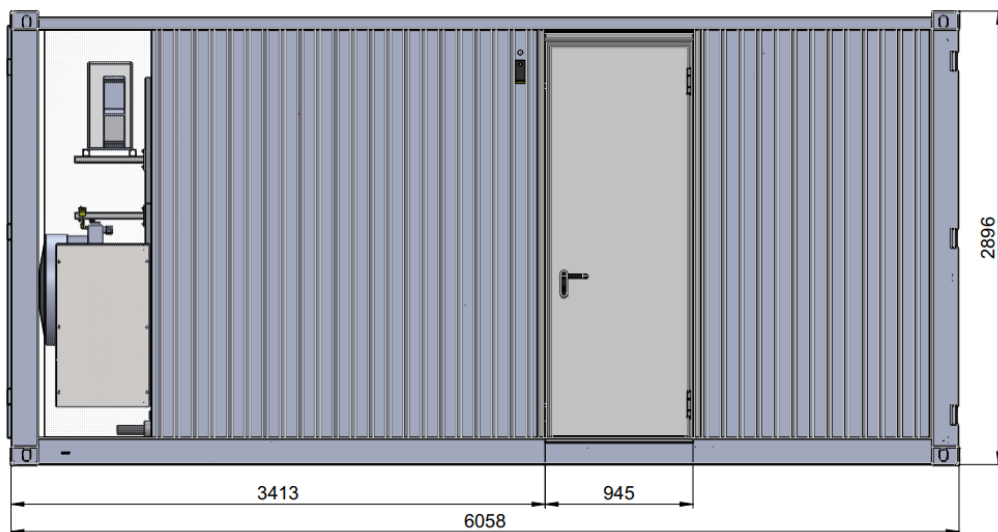


Abbildung 1 Speicherunterwerk Entwurf

Das Batteriemodul aus Lithium-Titanat-Zellen der Firma Alzner vom „Typs WBP-060-4000“ verfügt über einen gesamten Energiegehalt von 4,1 kWh. Die Anzahl der Zyklen ist von der jeweiligen Stromstärke abhängig. Werden die Module mit 1C Stromstärke geladen oder entladen, sind (laut Hersteller) über 20.000 Zyklen möglich. Eine höhere Stromstärke verringert dagegen die Anzahl der Zyklen, so werden bspw. bei einer Stromstärke von 5C - 8C knapp über 10.000 Zyklen vom Hersteller angegeben. Die Voraussetzung für die angegebenen Grenzwerte ist die Einhaltung des Temperaturbereichs von ca. 25°C sowie der Entladetiefe, die mit bis zu 20% der State of Charge angegeben wird. Damit ist die kalendarische Lebensdauer der Batterie vom Nutzungsverhalten und von der Stromstärke im Lade- und Entlademodus abhängig.



Abbildung 2 Batteriemodul WBP-060-4000 (Alzner GmbH)

Die Batteriemodule sind in Batterieschränken vom Typ WTP-700-041 verpackt und in Reihe geschaltet. Jeder Batterieschrank beinhaltet 10 Batteriemodule und zudem einen eigenen

Steuerungsmodul, um den Auslastungsgrad einzelner Module gleichmäßig zu verteilen. Die Aufbauweise ist modular und sorgt somit für die Flexibilität.

Die Kapazität eines Schrankes beträgt 41 kWh mit einer maximalen Leistung von 328 kW und der Nominalen Spannung von 704 V. Durch das EMS und den DC-DC-Charger lässt sich die Spannung variieren (480 V-896 V) und damit auch die Stromstärke anpassen. Die maximale Stromstärke von 8C beträgt 468 A je Strang.

## 1.1 FAT – Werksabnahme

Die Abnahme des Speicherunterwerkes wurde dabei in drei Stufen eingeteilt:

- Werksabnahme - Factory Acceptance Test (FAT) – Abnahme im Herstellerwerk
- Site Acceptance Test (SAT) - Abnahme des Gesamtsystems im Werk und vor Ort
- Funktionsprüfung vor Ort in Bezug auf das systemische Laden und Entladen der Batterien im herkömmlichen eHighway-Betrieb sowie Funktionsprüfung sicherheitsrelevanter Einrichtungen.

Außerdem erfolgte die Abnahme sicherheitsrelevanten Einrichtungen durch einen dritten Unabhängigen (TÜV-SÜD).

Am 15.02.2023 fand der erste FAT-Termin statt. Folgende Punkte wurden dabei bemängelt:

- Erste Inbetriebnahme wurde noch nicht absolviert
- Wärmelauf war ebenfalls noch nicht absolviert
- Das Batteriebalancing wurde nicht durchgeführt
- Schwarzstartmöglichkeit war nicht komplettiert

Am 05.04.2023 fand ein weiteres FAT mit folgenden Mängeln statt:

- Fehlende Steckdose für die Black-Start-Unit (externe Einspeisung mit einem Generator im Falle einer kompletten Entladung der Batterien),
- Das Gitter für das Kühlsystem fehlt, dabei ist Personenschutz zu gewährleisten,
- Nachweis über die isolierte Aufstellung der Gleichspannungsschaltanlage, hierzu ist eine Widerstandsmessung notwendig. Die Bedienungsanleitung ist dabei zu beachten.
- Die Parametrierung der Gleichspannungsschaltanlage ist noch nicht erfolgt, wird vor Ort ausgeführt und in Betrieb genommen.
- Der Schaltplan ist zu revidieren, die Ausführung passt nicht zum Plan (bspw. Relais KF120 für Gerüstschlusschutz taucht im E-Plan auf, allerdings nicht in der Verteilung)

Außerdem waren mehrere kleine mechanischen und elektrischen Mängel zu verzeichnen.



Abbildung 3 FAT

Auf einen weiteren Termin zur Werksabnahme wurde verzichtet. Die angegebenen Mängel wurden dann später vor Ort überprüft.

## 2.0 Netzintegration

In Zusammenarbeit mit dem FuE-Zentrum wurden Gespräche mit der Autobahn GmbH, der Autobahnpolizei und den Rettungskräften durchgeführt und das Vorhaben in Gänze vorgestellt. In Absprache mit der Autobahn GmbH hat man sich auf den Standort zwischen km 50.16 und 50.12 geeignet (Abbildung 4).

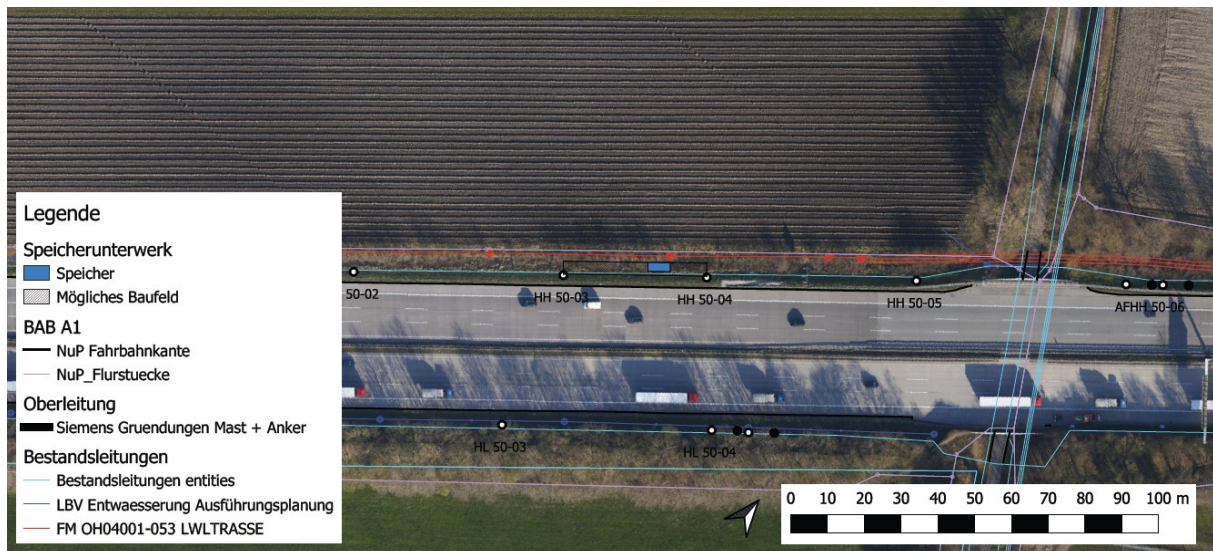


Abbildung 4 Standort Speicherunterwerk

Der Vorteil des gegenwärtigen Standortes wurde strategisch nahe des Einspeisemastes mit dem zugehörigen Masttrennschalter und der Querkupplung gewählt. Vor diesem Hintergrund können nicht nur einige technischen Komponenten (bspw. Masttrennschalter) eingespart, sondern auch Tiefbauarbeiten (bspw. Unterquerung der Autobahn) vermieden werden. Der Nachteil dieses Standortes ist jedoch ein relativ großer Höhenunterschied aufgrund der Hanglage an der Aufstellfläche, welches mit höherem Aufwand an Erdarbeiten mit sich bringt. Ein weiterer Nachteil ist die Zuwegung zum Unterwerk.

## 2.1 Hardwaretechnische Netzintegration - Transport und Aufstellung

Die Planung der Netzanbindung des Unterwerkes beinhaltete unter anderem die genaue Lokation des Speicherunterwerkes sowie die Verlegung der benötigten Energie- und Netzwerkleitungen. Das Unterwerk wurde dabei auf vier Punktfundamente aufgestellt. Für die Installations- und Wartungsarbeiten wurde an den Zugängen des Unterwerkes die Erde verdichtet und befestigt. Durch die projektierten Aussparungen am Unterwerksboden wurden die Energiekabeln, Erdungsleitung und Netzwerkleitung zum Einspeisemast in ca. 80cm Tiefe verlegt und an den Einspeisemast angeschlossen. Der Anschluss der Energiekabeln beinhaltet unter anderem die Verlegung der Kabel entlang des Mastes und den Anschluss an die Sammelschiene der Querkupplung. Die Netzwerkleitung wird an die Schnittstelle des Catenary Monitoring System (CMS) angeschlossen, wodurch die Netzwerkanbindung an den eHighway-Netzwerk gewährleistet wurde.

Für die Aufstellung des Unterwerkes musste der Transport und die Verkehrssicherung organisiert werden. Hierfür musste vorab eine verkehrsrechtliche Anordnung / Genehmigung eingeholt werden. Für die Aufstellung des Unterwerkes musste die gesamte Autobahn gesperrt werden, da das Unterwerk über die Oberleitung gehoben werden musste und der Ladekran hierfür eine bestimmte Ausschwenklänge brauchte (Abbildung 5). Die Aufstellung des Unterwerkes Anfang Juni 2023 musste verschoben werden, da die Genehmigung dafür seitens der Autobahn GmbH nicht erteilt wurde. An der Anschlussstelle Reinfeld waren in dem Zeitraum Juli 2023 Bauarbeiten für die Brückenerneuerung eingeplant, sodass die Autobahn für die Anlieferung der Stahlpfähle im Juli 2023 ebenfalls ganz gesperrt werden musste. Aus diesem Grund wurde uns die verkehrsrechtliche Anordnung nur für diesen Zeitraum erteilt. Zu beachten waren dabei die Anforderungen der Polizei und der Rettungskräfte. Die Aufstellung durfte nachts ab 22:00 Uhr durchgeführt werden. Bei der Anlieferung wurden die Batteriepacks aus dem Rack ausgebaut und erst wieder kurz vor der Aufstellung wieder eingebaut. Dies war die Anforderung seitens des Herstellers, um vor allem die Transportschäden zu meiden (bspw. Vibration bei Transport).





Abbildung 7 Tiefbau, Ringerder, Leerrohr (30.06.2023)

In der nächsten Phase ging es um den Netzanschluss an die Oberleitung. Hierzu musste ein Kabelkanal entlang des Mastes installiert und der Anschluss an die Sammelschiene der Querkupplung erfolgen. Dazu musste eine zusätzliche Positionsplatte mit zwei zusätzlichen Bohrlöchern eingebaut und zwei zusätzliche Kabelabfangschellen verbaut werden.

**Anschluss DC Kabel an Mast HH50-04**

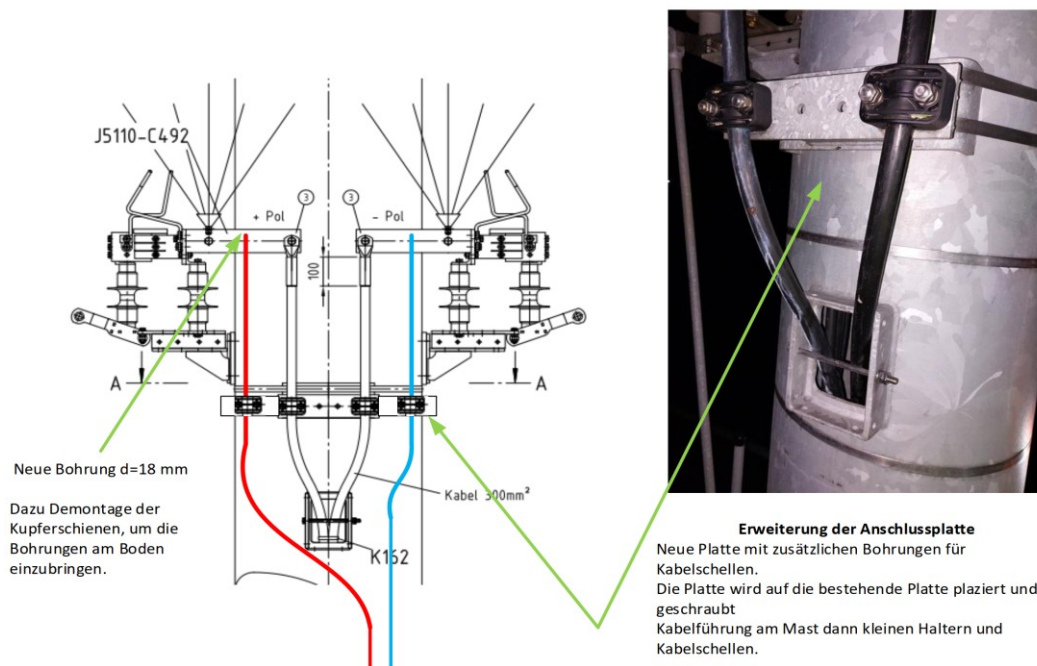


Abbildung 8 DC-Anschluss an die Sammelschiene (Skizze)

Der Kabelkanal entlang des Mastes musste den äußeren Bedingungen (Autobahn) und Wetterverhältnissen entsprechen und standhalten. Befestigt wurde das Ganze mit metallischen Umspannbändern und die Kabel wurden mit Schellen im Kanal und der Führungsschiene abgefangen (Abbildung 9). Außerdem wurde das Erdungskabel an den Mast

angeschlossen, um die Erdverbindung zwischen dem Unterwerk, der Potentialausgleichsschiene, der Unterwerks-Erdungseinrichtung und der Oberleitungsanlage herzustellen. Letztendlich erfolgte der Kommunikationsanschluss mittels einer Ethernet-Leitung an den vorhandenen CMS-Kasten, wodurch der Zugang zum eHighway-Netzwerk gewährleistet wurde. Auf der Unterwerksseite wurden die Kabel in die vorgefertigten Aussparungen eingeführt, mit Kabeldurchführungen abgefangen und durch äußere Einflüsse dicht verschlossen. Im Nachgang erfolgte der Anschluss an die Sammelschiene der Gleichspannungsschaltanlage und an die Minus-Sammelschiene des Umrichters. Die Netzwerkleitungen wurden in den Kommunikationsschrank eingeführt und auf die Klemme gelegt. Nach der Ausführung des Netzanschlusses mussten schlussendlich die Arbeiten für Hangbefestigungen sowie Geländewiederherstellung verrichtet werden (Abbildung 10).



Abbildung 9 Netzanschluss Oberleitung (17.08.2023)



Abbildung 10 Speicherunterwerk am Aufstellungsort

### 2.3 Softwaretechnische Netzintegration

Eine deutschlandweite Ausschreibung im März 2023 ergab keine Gebote, sodass nun die direkte Aufforderung anhand der Leistungsbeschreibung der Firmen erfolgte. Die Firma "G&O Automation" aus Niedersachsen, die sich bereits mit der Netzintegration des Forschungsunterwerkes beschäftigt hat, übernahm den Auftrag. Entsprechend lief die softwaretechnische Netzintegration parallel zu der hardwaretechnischen.

Folgende Arbeiten mussten hierzu umgesetzt werden, dabei bildete die Leistungsbeschreibung unter anderem genaue Anforderungen mit jeweiligen Einzelheiten:

- Einbau Stationscontroller
- Herstellen der Kommunikation nach außen (Guw1/2)
- Einbindung sicherheitstechnischer Parameter
- Steuerungskonzept implementieren
- SCADA-Erweiterung für den Speicherunterwerk
- Erstellung einer Steuerungsoberfläche in „WIN CC oa“ auf der HMI

Das Steuerungskonzept bildete dabei die Grundlage. Der Stationscontroller S7-1500 von Siemens musste mit der P320 Simotion von Freqcon kommunizieren und sowohl die Befehle empfangen als auch abgeben können. Abbildung 11 gibt visuell das Steuerungskonzept der Anlage wieder.

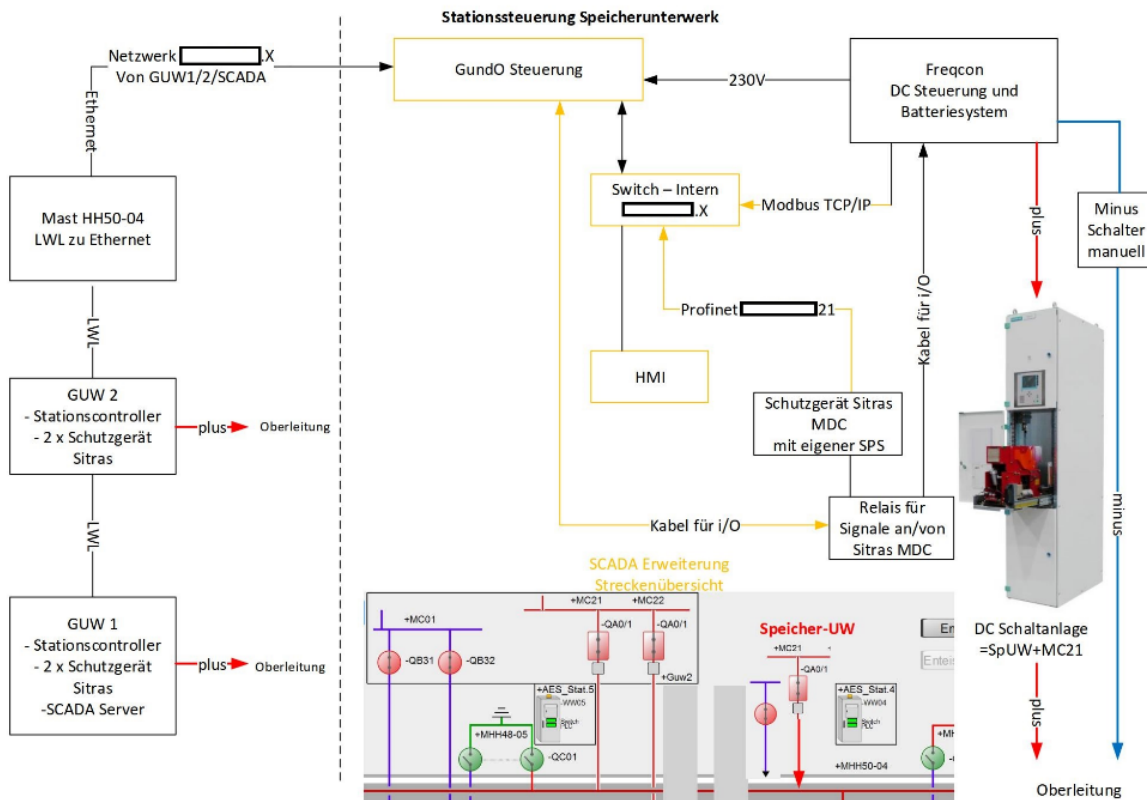


Abbildung 11 Steuerungskonzept Speicherunterwerk

Nach der Implementierung der Steuerung und erfolgreichen Kommunikationstests wurden die Betriebszustände des Unterwerkes detailliert ausgearbeitet und getestet. Diese Tests validierten die Funktionalität und Zuverlässigkeit der Steuerung in verschiedenen Betriebsmodi.

Tabelle 1 Betriebszustände Speicherunterwerk (Auszug)

Nr.	Beschreibung	Ort	Betriebsmittel	Betriebs Zustand	Info	BatUW Bedingung
1	Streckenabgang Ein	Ort oder Fern über Sitras MDC	Streckenabgang +MC21	Betrieb		nur möglich wenn Anlage hochgefahren ist und OL = EIN
2	Streckenabgang Aus	Ort oder Fern über Sitras MDC	Streckenabgang +MC21	Betrieb		Spannung an Sammelschienen Sitras CSG bleibt Zeit XX bestehen; danach wird Anlage automatisch runtergefahren (nicht komplett)
3	DC Schaltanlage - Pronutec Minus Trenner	=BatUW	pronutec Trenner	Betrieb		Streckenabgang +MC21= Ein nur möglich wenn Ternner geschlossen
4	Profinet Verbindung Freqcon zu Stations controller	=BatUW	Freqcon Steuerung	Störung	Bei Kommunikationsverlust – überführen in einen sicheren Zustand	Streckenabgang+MC21 = Aus, kein automatisches Zuschalten, wenn Netzwerk wieder OK; Anlage siehe Punkt zwei

Tabelle 1 zeigt einen Auszug der ausgearbeiteten Betriebszustände des Speicherunterwerkes. Dabei müssen die einzelnen Hauptkomponenten während des Betriebes untereinander und auch nach außen zu den Bestandsunterwerken kommunizieren. Auch bei Störung müssen die Systeme richtig reagieren und bspw. sich automatisch in einen sicheren Zustand überführen. Nach der Ausarbeitung des Systems wurden die Programme miteinander verknüpft und in die Systemsteuerung integriert. Die SCADA-Erweiterung wurde mit den Bestandsanlagen verknüpft und das Interface erweitert, um eine nahtlose Integration und optimierte Überwachung zu gewährleisten.

### 3.0 SAT – Abnahme vor Ort

Das Site Acceptance Test (SAT) umfasst primär die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der gesamten Anlage, insbesondere das Laden und Entladen der Batterien sowie das Testen sicherheitsrelevanter Einrichtungen, insbesondere auf der Umrichterseite. Die Kommunikation zwischen den Hauptkomponenten und der Steuerung wurde bereits im Factory Acceptance Test (FAT) geprüft. Die Inbetriebnahme und Parametrierung der DC-Schaltanlage erfolgten vor Ort. Beim SAT wird zusätzlich die Kommunikation zwischen den Systemen im Betrieb getestet, wobei die ankommenden und abgehenden Signale aufgezeichnet und auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Das Testen der Spannungsregelung sowie das Hoch- und Runtersetzen der Spannung wurde erfolgreich erprobt. Dazu gehört auch die Verteilung der Leistungswerte auf die einzelnen Stränge sowie zwischen den einzelnen IGTB's. Die Prüfung der Sicherheitsketten auf der Seite

des Umrichters erfolgte unter anderem beim FAT. Bei der Prüfung der Sicherheitsketten im Betrieb wird die Hauptsicherheitskette sowie die Auslösung der Über- und Unterspannungsschwellen dazu auch die Sperrung der IGBT's überprüft. Einige Langzeittests inklusive einiger Belastungstests haben die Ergebnisse untermauert. Außerdem wurde das Kühlsystem im Belastungszustand überprüft. Das Überprüfen der Batteriestacks sowie die Kommunikation zwischen dem Batteriemanagementsystem (BMS) und dem Umrichter-Controller war hier ebenfalls Bestandteil. Hierzu gehört auch das Parametrieren und das Einstellen der Limitierungswerte, bspw. State of Charge (SOC) der Minimal - und Maximalwerte.

Die SAT-Prüfung vor Ort erfolgt im herkömmlichen eHighway-Betrieb. Dies konnte allerdings erst nach der softwaretechnischen und hardwaretechnischen Netzintegration durchgeführt werden. Nach dem Transport sind außerdem alle Geräte auf Beschädigungen und Funktionstüchtigkeit zu prüfen und zu validieren. Vor allem im Bereich einzelner Hardwarekomponenten sowie die Beschreibung der systemischen und sicherheitstechnischen Schnittstellen für die Netzintegration war dies essentiell. Dazu gehört auch das Überprüfen der Batterien auf mögliche Leckagen und Kabelverbindungen.

Nach der erfolgreichen Netzintegration wurden alle Geräte auf Beschädigungen und Funktionstüchtigkeit geprüft, und das Speicherunterwerk wurde in den Probetrieb genommen. Im nächsten Schritt wurden die einzelnen Betriebszustände identifiziert und durch gezielte Schalthandlungen herbeigeführt. Die Komponenten wurden schrittweise in Betrieb genommen und gleichzeitig überwacht. Dabei wurden sicherheitstechnische und steuerungstechnische Bedien- und Programmierlücken identifiziert und in das Gesamtkonzept integriert. Der Batteriespeicher musste neu verkabelt werden, da die Verkabelung beim Abtransport entfernt worden war. Diese Aufgabe übernahm der Hersteller „Alzner“. Anschließend wurden die einzelnen Batterieracks in Betrieb genommen und getestet.

Zum Laden und Entladen des Speichers wird ein Umrichtersystem der Firma Freqcon mit insgesamt fünf Leistungsteilen (IGTB's) und einem integrierten Energiemanagementsystem verwendet. Die Ladeeinrichtung musste entsprechend auf den Speicher neu abgestimmt und die Parameter neu eingegeben werden. Das Energiemanagementsystem sorgt dabei für das gleichmäßige Laden und Entladen des Speichers unter Beachtung sicherheitsrelevanter Aspekte, wie Ober- und Untergrenzen der eingestellten Strom- und Spannungswerte sowie gegenwärtiger Temperatur.

Eine Abnahme vor Ort durch einen unabhängigen dritten (TÜV-SÜD) fand am 28.11.2023 statt. Dabei wurden folgende Mängel festgestellt (Auszug aus dem Bericht):

- Die Parametrierung und Inbetriebnahme der Anlage waren zum Zeitpunkt der Abnahmeprüfung noch nicht abgeschlossen. Das Inbetriebnahmeprotokoll für den SAT ist nachzureichen. Eine endgültige Parametrierung erfolgt während der Betriebsoptimierung.
- Einstellwerte und Protokoll der Schutzprüfung des Secheron GS-Schalters sind nachzureichen

Für ein erfolgreiches bestandenes SAT muss zum einen eine vollständige Dokumentation vorliegen und zum anderen einen fehlerfreien Betrieb (herkömmlichen Betrieb) innerhalb eines bestimmten Zeitraumes (ein Monat) stattfinden.

Deshalb lag die Grundlage für das Bestehen des SAT beim Probetrieb (siehe Kapitel 5.0 Funktion).

Das SAT wurde am 23.10.2024 erfolgreich durchgeführt.

## 4.0 Messtechnik

Nach der erfolgreichen softwaretechnischen und hardwaretechnischen Netzintegration des Speicherunterwerkes, wurde die Messtechnik der FH-Kiel in das Unterwerk implementiert und in Betrieb genommen (November-Dezember 2023).

Zur hardwaretechnischen Integration der Messtechnik gehörten insgesamt folgende Hauptkomponenten:

- Messcomputer
- Messkarte
- Verstärker für die Strommessung
- Spannungstastkopf

Für die gleichstromseitige Strommessung wurde neben dem vorhandenen Siemens-Messverstärker ein weiterer Messverstärker (Isolationsverstärker) von der Firma I.E.D. GmbH eingebaut. Dieser hat eine wesentlich höhere Grenzfrequenz von 800 kHz und einen niedrigeren Temperaturfehler (Abbildung 12).

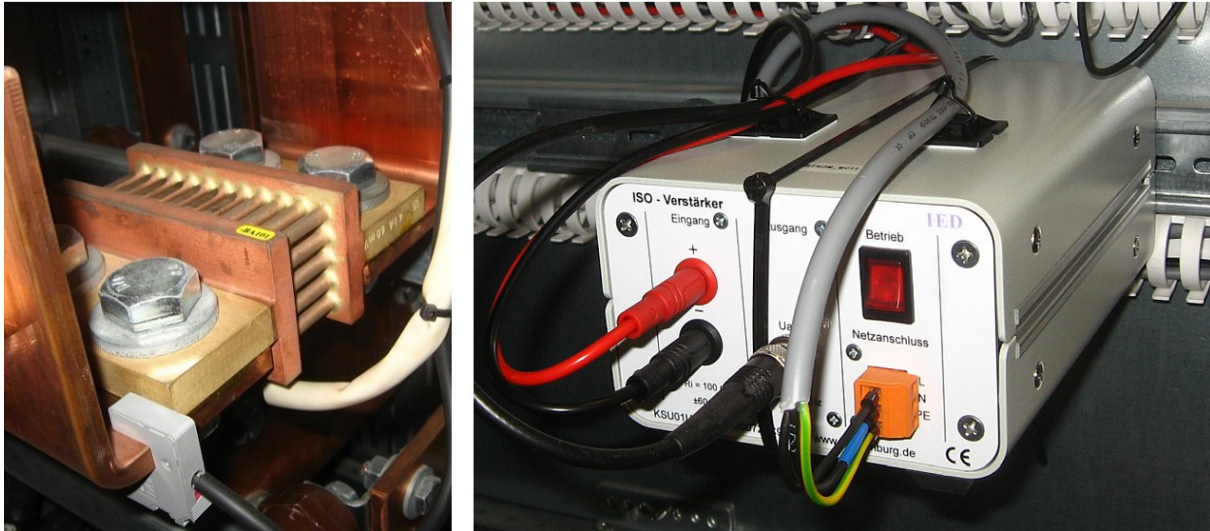


Abbildung 12 Links: Shunt verbaut werksseitig in der GS-Schaltanlage zur DC-Strommessung an der Sammelschiene. Rechts: installierte Strom-Messverstärker von der Firma I.E.D. GmbH

Für die gleichstromseitige Messung der Spannung ist ein Differentialtastkopf der Firma Testec vom Typ TT-SI9010 mit einer Grenzfrequenz von 70 MHz im Gleichrichterabgang installiert worden (Abbildung 13).



Abbildung 13 Spannungstastkopf Typ: TESTEC SI 9010

Alle Ausgangssignale laufen auf die Messkarte des Rackgehäuses in der Messzelle des Speicherunterwerkes. Die Messkarte (USB-Messbox) G05-1034-3 des Herstellers Goldammer hat 12 simultan abtastende Analogeingänge mit 16 Bit Auflösung. Die maximale Abtastrate

beträgt 225 kHz. Der Messbereich (Signaleingang) ist umschaltbar und beträgt  $\pm 10$  V oder  $\pm 5$  V (Abbildung 14).



Abbildung 14 Goldammer Messkarte Typ: GOS-1034-3

Die Messkarte ist mit einem Messrechner über einen USB-Port verbunden und zeichnet damit die Signale auf.

Softwareseitig musste das Messkonzept um das Speicherunterwerk erweitert werden, um auch hier die Auswirkung auf die Netzqualität richtig bestimmen zu können, siehe auch 6.0 Auswirkungen auf die Netzqualität.

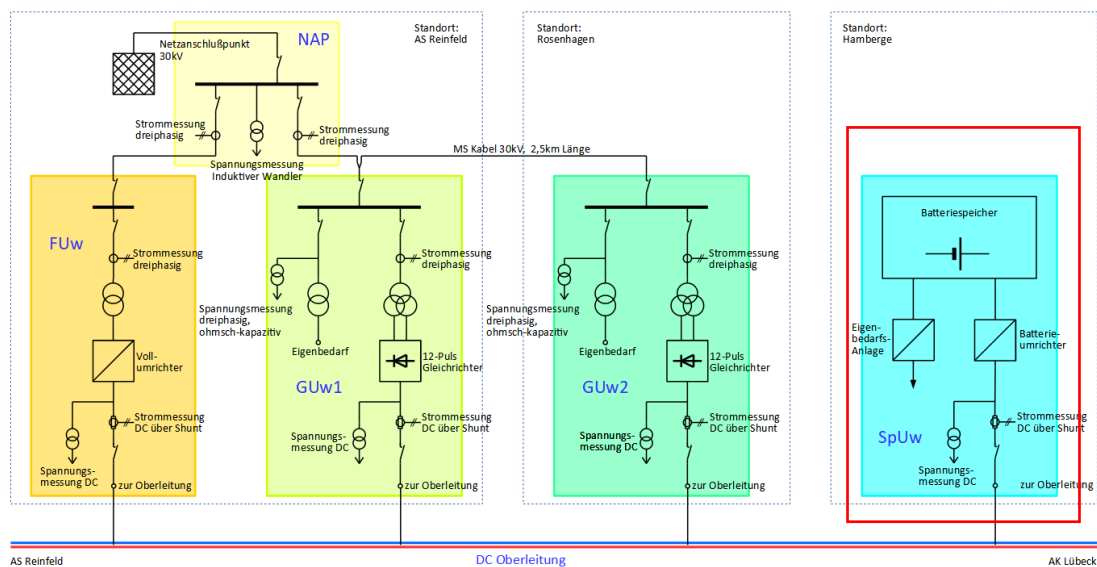


Abbildung 15 Netzstruktur – Messkonzept

## 5.0 Funktion und Probetrieb

Der eingeplante Probetrieb des Unterwerkes musste aufgrund von Lieferengpässen und Krankheitsausfällen seitens des Herstellers um insgesamt 5 Monate nach hinten geschoben werden. Dazu musste vor der ersten Inbetriebnahme seitens des Herstellers mehrere Kleinarbeiten verrichtet werden, die eine zusätzliche Verzögerung der Inbetriebnahme um ca. 3 Wochen nach sich zog. Der offizielle Probetrieb startete somit am 05.12.2023. Leider war in dem Zeitraum Dezember 2023 der Betrieb der OH-LKW sehr eingeschränkt, sodass insgesamt keine Fahrten stattfanden.

Die Funktion und die Oberflächenprogrammierung auf der HMI beinhalten die Hauptkomponenten des Unterwerkes sowie die Temperaturen der Schaltschränke und Batterieschränke. Weiterhin werden die Spannung der Batteriezellen in Volt und die Kapazität der einzelnen Stränge in Prozent visualisiert. Oberhalb befinden sich drei Rubriken (mit blauen Pfeilen gekennzeichnet), Übersicht (Abbildung 16), Reset – für den Fall, dass das Unterwerk im Fehlerfall zurückgesetzt werden muss und Setup – wo die einzelnen Funktionen für die Anlagensteuerung ausgewählt und Parameter eingegeben werden können.

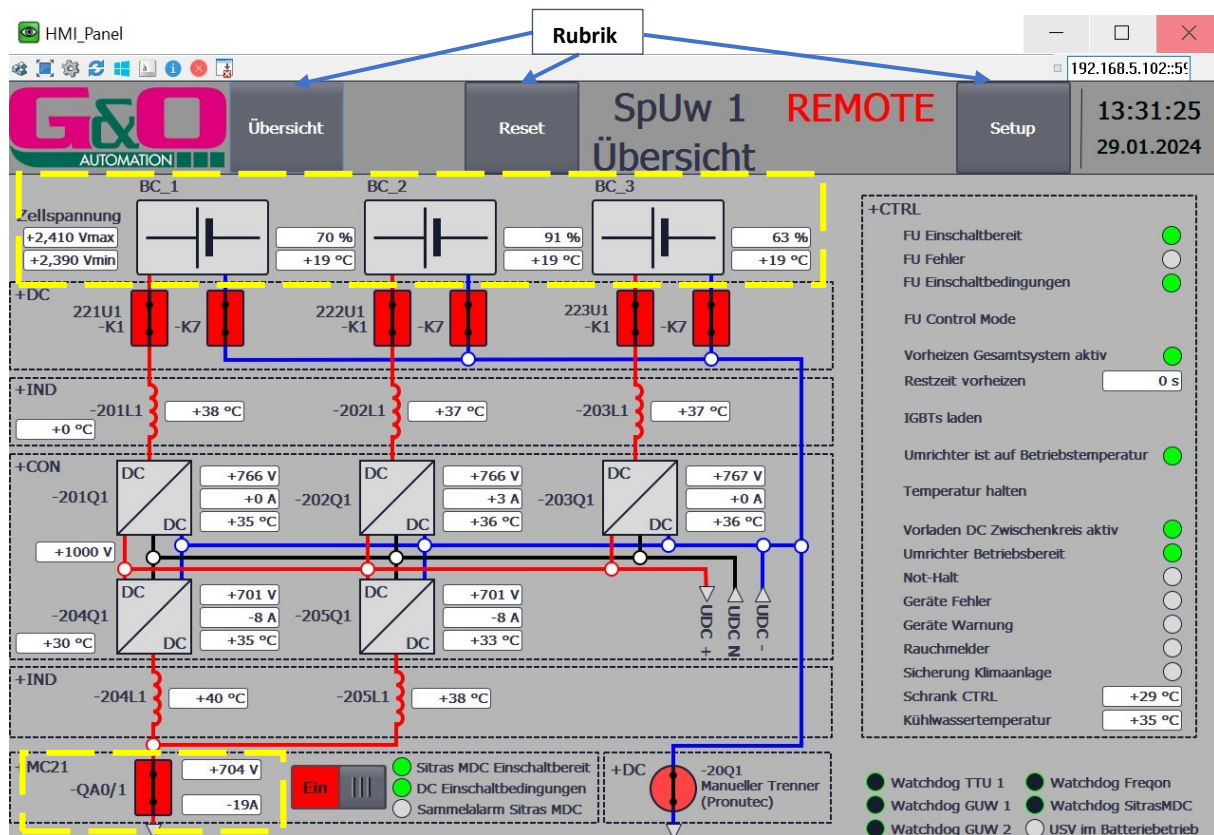


Abbildung 16 HMI-Speicherunterwerk

Abbildung 16 veranschaulicht das Interface vom 29.01.2024 des Speicherunterwerkes. Oben im Bild (gelb umrandet) sind die drei Batteriestacks mit den zugehörigen Parametern aufgeführt. Unten im Bild (gelb umrandet) wird der Leistungsschalter (geschlossen) der Gleichspannungsspannungsschaltanlage abgebildet. Der Strom- und Spannungswert gibt den derzeitigen Anlagenzustand wieder:

- negativer Strom = Unterwerk wird geladen
- positiver Strom = Unterwerk wird entladen
- Nominalspannung = 715-720 V

In der Abbildung 16 befindet sich das Unterwerk im Lademodus. Auch die zugehörige Spannung liegt unter der Nominalspannung, da die Anlage im gegenwärtigen Zustand unter Belastung steht.

Rechts in der Abbildung 16 (schwarz umrandet) sind die Bedingungen für den Betrieb der Anlage aufgeführt. Sobald eine einzelne Lampe rot aufleuchtet wird der Betrieb eingestellt und das Unterwerk überführt sich in einen sicheren Zustand.

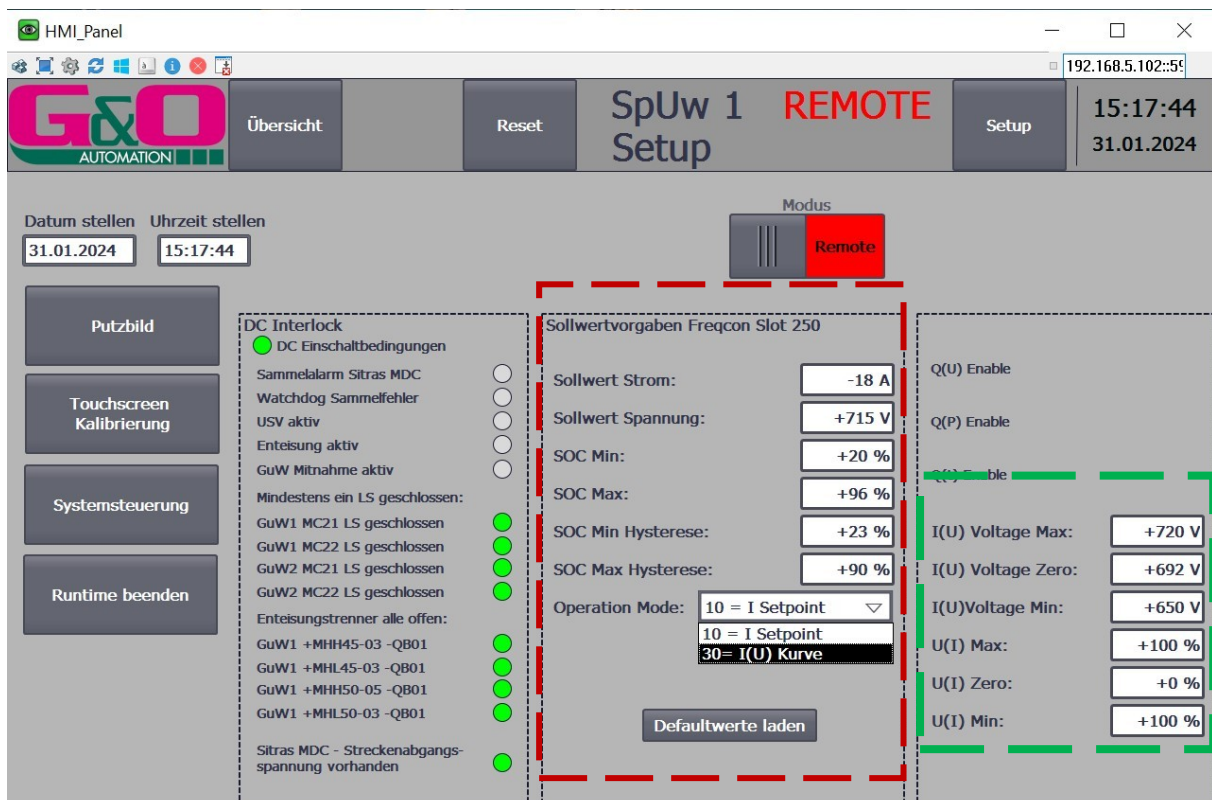


Abbildung 17 Setup

Das Speicherunterwerk arbeitet unter zwei verschiedenen Modi – Rubrik „Setup“ (Operation Mode - Abbildung 17 [rot umrandet]):

- Operation Mode 10 = I Setpoint arbeitet unter der Vorgabe des Strom-Sollwertes, dabei bestimmt das Vorzeichen ob das Unterwerk gerade geladen oder entladen wird.
- Operation Mode 30 = I(U) Kurve, hier wird der Strom in Abhängigkeit der gegenwärtigen Spannung auf der Oberleitung gesetzt. Dabei werden die Grenzen (Strom und Spannung) sowohl nach oben als auch nach unten vorgegeben und das Programm läuft dabei die lineare Kurve ab.

Der zukünftige und herkömmliche Betrieb der Anlage läuft unter der Operation Mode 30, da in dem Fall die Anlage sich dem eHighway-Betrieb anpasst. Dabei wird die Nominalspannung (Voltage Max) auf 720 V gesetzt. Der gesetzte Nullpunkt der Spannung (Voltage Zero) beträgt 692 V, unter diesem Wert fängt die Anlage an die Batterien zu entladen und oberhalb 692V werden die Batterien geladen. Der minimale Spannungswert (Voltage Min) beträgt 650 V. Der Strom pendelt dabei ständig zwischen Null und 100%, je nachdem ob der Speicher im Moment geladen oder entladen wird.

Am 05.12.2023 ging das Speicherunterwerk offiziell in Probebetrieb. Dabei wurde das Unterwerk mehrere Male ein und ausgeschaltet, um das Batterie-Balancing abzuschließen und den Controller neu zu booten. Um das Balancing in Gänze zu vollenden, müssen die Batterieracks bis zu der 100%-Marke aufgeladen werden, dadurch werden die Grenzen nach oben und unten anhand von State of Charge (SOC) neu definiert und korrigiert.

Vor der Inbetriebnahme wurden das Schutzkonzept und die Sicherheitsmechanismen überprüft. Dabei musste das Unterwerk für das Systemcheck ebenfalls mehrmals ein- und ausgeschaltet werden.

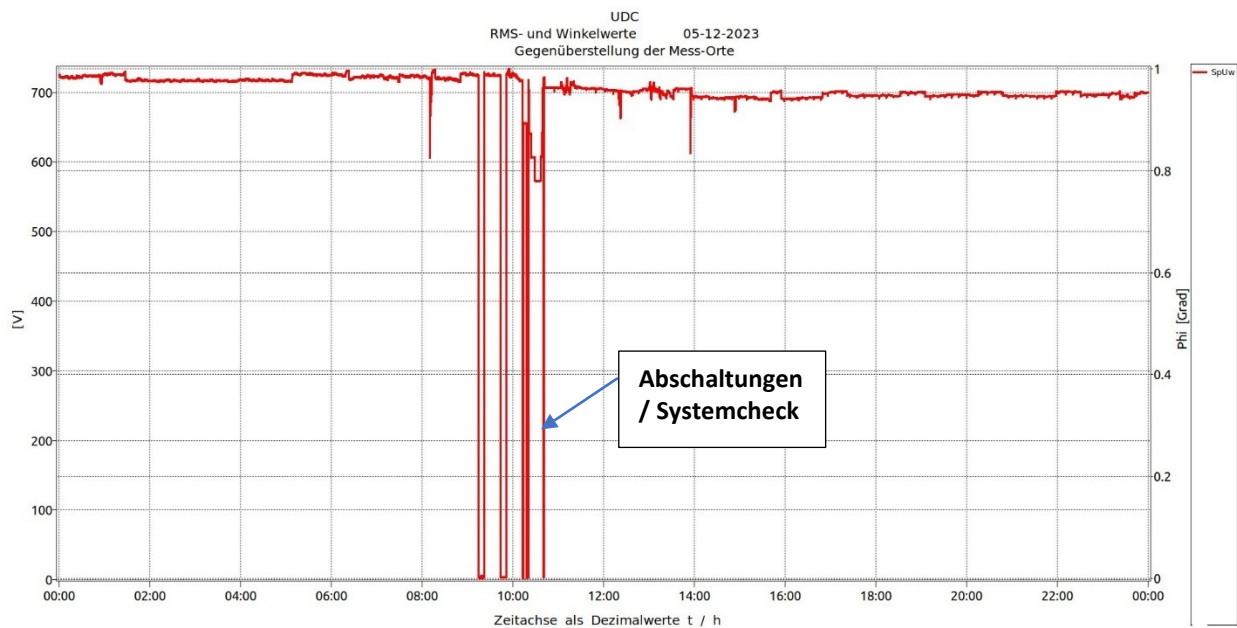


Abbildung 18 Inbetriebnahme \_ Betriebsspannung Speicherunterwerk

Abbildung 18 veranschaulicht die Betriebsspannung (Leerlaufspannung) des Speicherunterwerkes, dabei stellen die abfallenden Peaks die Abschaltungen der Spannung und damit den Sicherheitsüberprüfung dar. Im nächsten Schritt galt es den Strom zwischen der Oberleitung und den Batteriestacks (Laden/Entladen) zu schieben.

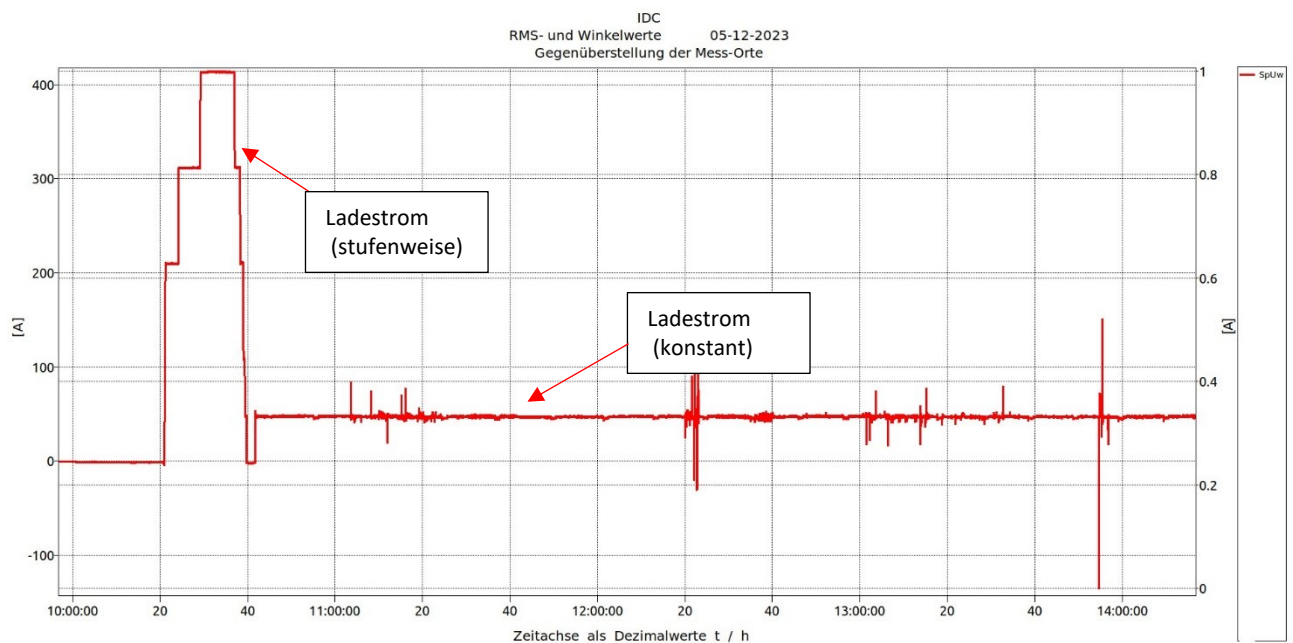


Abbildung 19 Inbetriebnahme \_ Batterie-Ladestrom

Abbildung 19 veranschaulicht den Batterieladestrom, welcher stufenweise nach dem Einpendeln im IGBT erhöht wurde. Daraufhin wurde der Strom entsprechend stufenweise wieder reduziert und auf einen konstanten Wert von 50 A eingestellt. Hiermit wurde die Funktion der "I Setpoint – Strom Sollwertvorgabe (Operation Mode 10)" getestet und validiert. Ein Entladungstest der Batterien war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, da derzeit keine LKW-Fahrten auf der Strecke stattfanden. Das Speicherunterwerk wurde dabei auf den „Operation Mode 10“ (I Setpoint) eingestellt, um das Laden des Unterwerkes weiterhin zu ermöglichen und damit den Eigenbedarf zu decken.

Ein weiterer Versuch fand am 16.12.2023 statt (Abbildung 20). Die Ladeleistung des Unterwerkes ist dabei invertiert (negativ dargestellt). Die gestuften Ladungen bedingen die eingestellte Hysteresekurve. Das bedeutet, dass sobald 95% von SOC erreicht werden, wird automatisch der Ladezyklus eingestellt. Sobald der SOC wieder unter der 90% Marke fällt, beginnt der Ladezyklus und endet wieder bei 95% von SOC. Den Entladungstest konnte man aufgrund fehlender LKWs an diesem Tag ebenfalls nicht durchführen. Ein Entladungsversuch, indem man einen geringen Strom in die Oberleitungsanlage einspeist, bewirkt einen Anstieg der Oberleitungsspannung, da entsprechende Verbraucher auf der Anlage fehlen. Dies konnte allerdings als erfolgreich gewertet werden, da andernfalls die Oberleitungsspannung konstant bliebe.

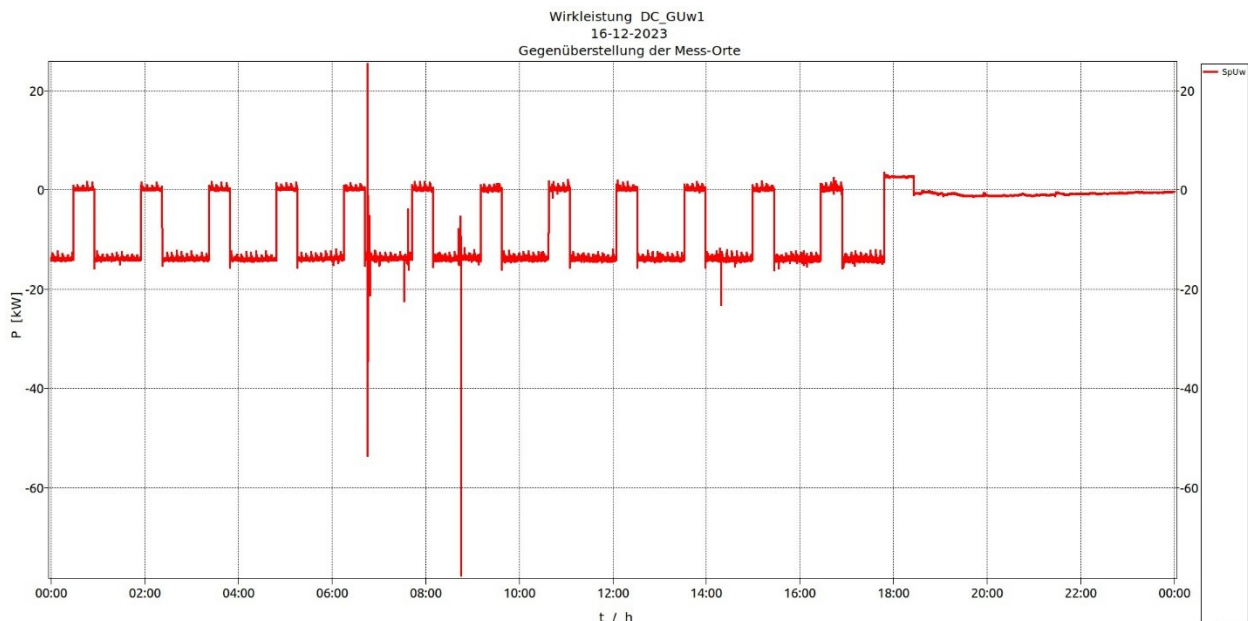


Abbildung 20 Wirkleistung Speicherunterwerk

Zum weiteren Probetrieb und der Verhaltensanalyse des Speicherunterwerkes gehören die Gleichspannungsanalyse und der Verlauf im Nachladebetrieb. Dies ist insofern wichtig, um im Regelbetrieb einzelne Spannungsrampen durch den Zwischenkreis abzufangen und damit das Netz gleichmäßig zu belasten.

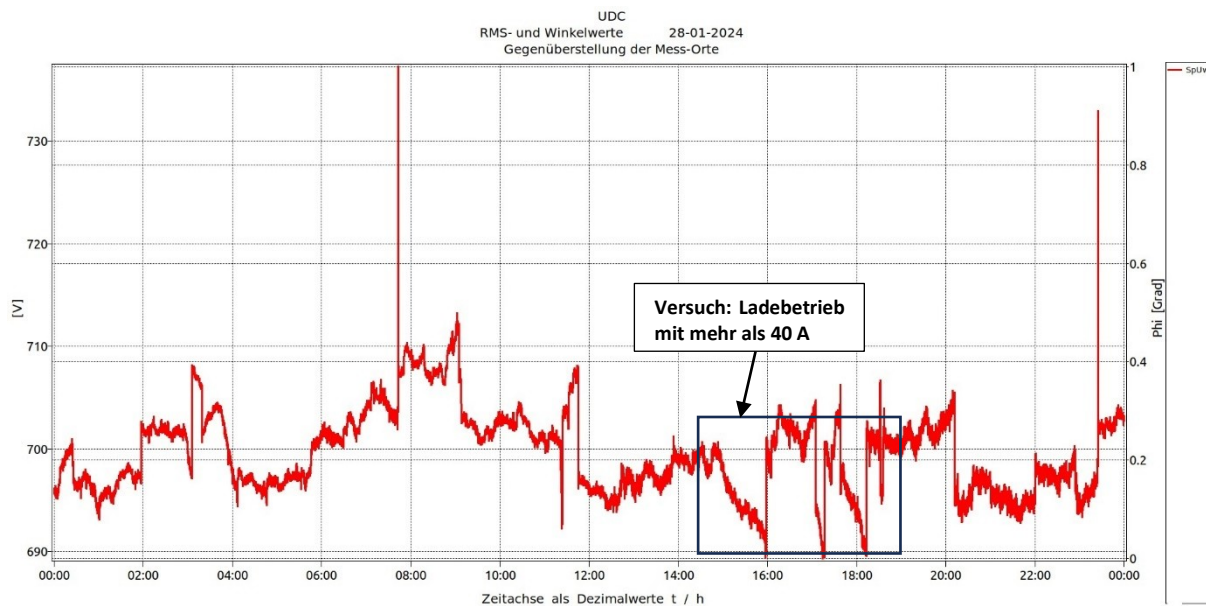


Abbildung 21 Spannungsverhalten SpUw über 24 Stunden

Abbildung 21 gibt den Spannungsverlauf des Speicherunterwerkes über einen Zeitraum von 24h wieder. Die Nennspannung der gesamten Anlage liegt zwischen 706-712V. Die einzelnen Spannungseinbrüche bis zu 690V spiegeln das Nachladen des Unterwerkes wider. Damit konnte die U(I)-Funktion im Nachladebetrieb erst einmal bestätigt werden.

Während des Probetriebes wurde eine sehr hohe Häufigkeit der Abschaltungen, vor allem in der Nacht registriert. Um die Anlagensicherheit zu gewährleisten überführt diese sich in einen sicheren Zustand und schaltet sich zudem in Gänze stromlos. Das Sicherheitskonzept der Anlage besagt, dass vor einer Wiederinbetriebnahme eine Vor-Ort-Begehung und Inspektion erforderlich ist. Eine Fehleranalyse konnte zunächst keinen Aufschluss zur Abschaltsymptomatik geben. Nach eindeutiger Diagnose konnte festgestellt werden, dass die Gleichspannungsschaltanlage (GS-Anlage) einen Selbsttest für den Gerüstschlusschutz (Fehlerstromerkennung) in der Nacht durchführt, wobei das Ganze mit einer kurzzeitigen Abschaltung der GS-Anlage verbunden ist. Die Folge davon ist, dass der Umrichter dieses Ereignis erkennt und unter dem Vorbehalt, dass ein Fehler auf der Strecke aufgetreten ist, sich ebenfalls abschaltet. Weiterhin wurde außerdem festgestellt, dass die 24V-Batteriepufferung nicht konform funktioniert und die Auslegung für den Eigenbedarf falsch konstruiert wurde. Nachdem auch der Hersteller diesen Fehler eingesehen hatte, wurde eine neue Konzeption zur Eigenbedarfsversorgung erstellt und durch eine Neuverkabelung mittels direkten Anschlusses an die Oberleitung realisiert. Außerdem wurde eine zusätzliche 24V USV-Anlage zur Pufferung der Steuerung der GS-Anlage angeschafft (15.07.2024). Entsprechend wurde das Konzept zur Eigenbedarfsversorgung angepasst, da eine direkte Spannungsversorgung

über die Oberleitung und nicht durch die Batterien gewährleistet wird (siehe auch dazu 5.2 Betriebsbericht Speicherunterwerk (01.01.2024 – 01.12.2024)).

Der erste erfolgreiche Entladungsversuch fand am 20.03.2024, nach der Wiederinbetriebnahme der OH-LKW durch die Spedition Bode. In der Spitze konnten hier insgesamt ca. 120 A eingespeist werden. Die Limitierung auf 70 kW beruht auf den Sicherheitsaspekt für die ersten Entladungsversuche, dies war insofern auch die Vorgabe des Herstellers.

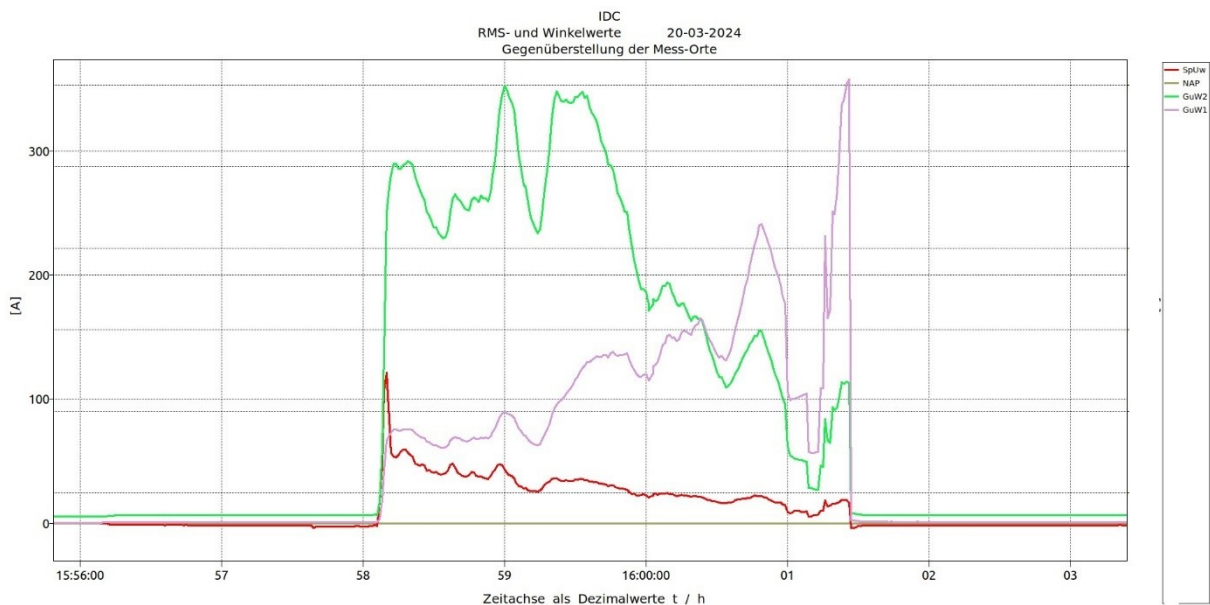


Abbildung 22 Stromverlauf aller Messorte über eine Fahrt – Fahrtrichtung Hamburg

Abbildung 22 gibt den Stromverlauf einer Fahrt aller Messorte inkl. des Speicherunterwerkes (rote Kurve) wieder. Die Fahrt fand in Fahrtrichtung Hamburg statt. Es ist klar zu erkennen, dass das SpUw das Maximum an Leistung abgibt (Spitzenstrom 120 A), da der OH-LKW (Verbraucher) nah an der Quelle ist. Mit weiterem Verlauf ist zu erkennen, dass die Speiseunterwerke (GUw1 / GUw2) die Hoheit der Speiseleistung übernehmen. Dies wird außerdem beim Stromverlauf über die Messorte deutlich. Betrachtet man allerdings den Spannungsverlauf über diese Fahrt wird deutlich, dass der Spannungsabfall am Ende der Teststrecke, also am Aufstellungsort des Speicherunterwerkes immer noch hoch ist. In der Spitze beträgt dieser ca. 80 V unter der Nennspannung. Dies lässt darauf zurückschließen, dass die abgegebene Leistung von 70kW immer noch zu niedrig ist, um die Spannung auf das Niveau von 680-690 V zu halten (siehe auch Abbildung 23).

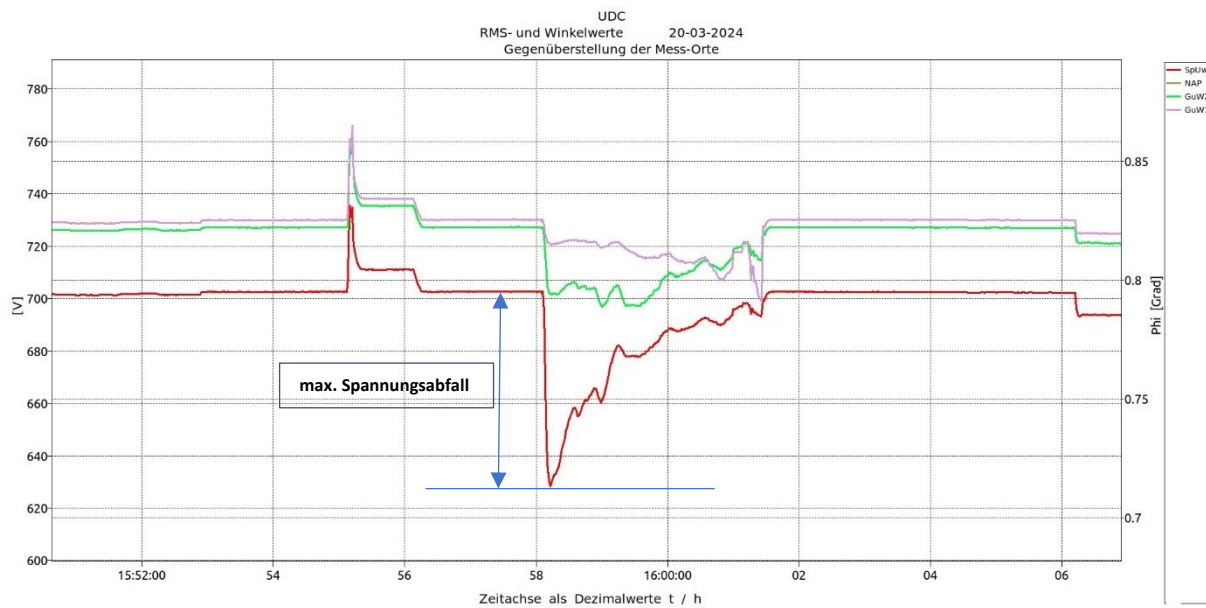


Abbildung 23 Spannungsverlauf Speicherunterwerk über eine Fahrt

Für die Regelung des Speicherunterwerkes ist dies eine wichtige Erkenntnis, um die Spannung am Ende der Strecke etwas weiter anzuheben und so lang wie möglich aufrecht zu erhalten, musste ein sog. PI-Regler in die Steuerung integriert werden. Diese dynamische Regelung soll das Spannungsniveau auf der Oberleitungsanlage nach Möglichkeiten nahezu konstant halten, indem es die Stromzufuhr aus dem Speicher ständig anpasst. Um das Optimum der Einstellwerte für den PI-Regler zu bestimmen, sind eine hohe Anzahl an Messungen im Belastungszustand notwendig. Die Anpassung der Werte für den PI-Regler musste somit ständig erfolgen.

Eine weitere Erkenntnis ist die Korrelation der Regelung mit den Einstellwerten und dem Fahrstil oder auch der Infrastruktur der Teststrecke. Die Regelung des Zwischenkreises hat die Aufgabe die Spannung auf das 700 Volt-Niveau zu halten, wobei das Ganze durch die permanente Stromregulation geschieht. Deutlich wird dies in der Abbildung 24. Je nachdem wo sich der OH-LKW auf der Strecke befindet ist dies im Spannungs- und Stromverlauf zu erkennen.

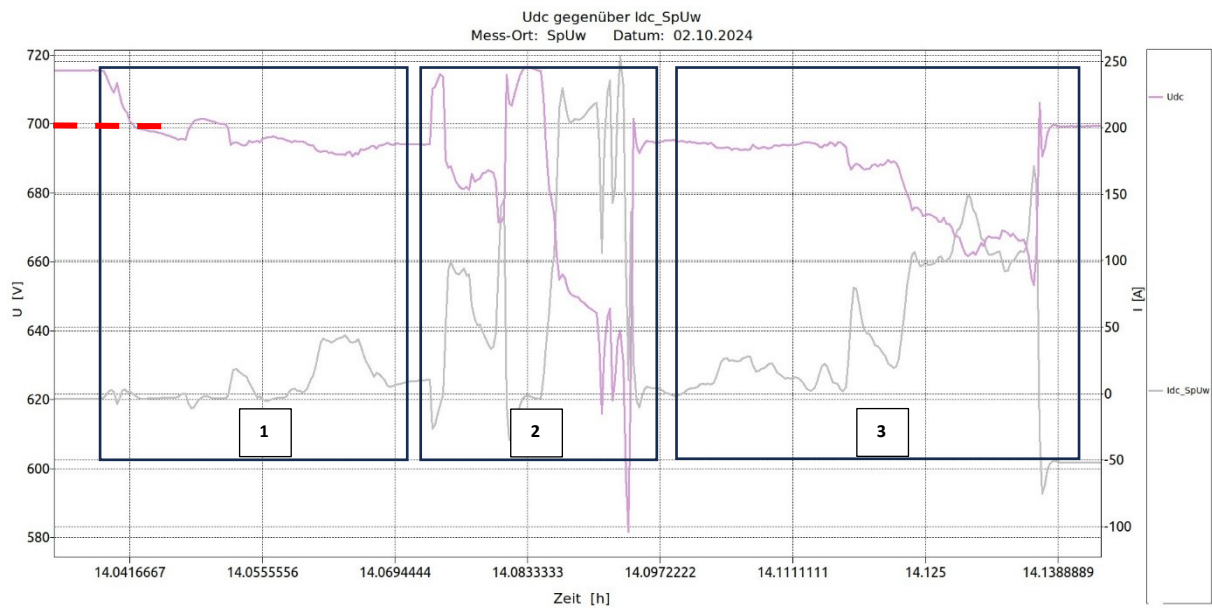


Abbildung 24 Strom- und Spannungsverlauf während einer Fahrt (Fahrtrichtung Lübeck ab Reinfeld)

Um den Verlauf der Fahrt und damit den Fahrstil, abhängig vom Autobahnverkehr und der Höhe und Senke der Teststrecke, und der Regelung des Zwischenkreises zu verdeutlichen, wurde der Kurvenverlauf in der Abbildung 24 in drei Segmente aufgeteilt.

Segment eins:

- Die Fahrt beginnt in Reinfeld in Fahrtrichtung Lübeck. Die Spannung sinkt gleichmäßig auf das Niveau von ca. 690V, wobei der Strom je nach Spannungsfall in die Oberleitung eingespeist wird. Ab dem Spannungsniveau unterhalb 700V wird der Strom eingespeist. In diesem Segment ist eine nahezu lineare Regelung des Zwischenkreises zu sehen, da zum einen die Spannung relativ gleichmäßig absinkt und zum anderen der OH-LKW gleichmäßig beschleunigt.

Segment zwei:

- Der OH-LKW befindet sich hier infrastrukturbedingt in der Senke, entsprechend wirkt sich dies auf den Fahrstil des Fahrers aus. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Regelung reglementiert funktioniert und sehr sensibel auf Spannungsabfall reagiert. Kurzzeitig fällt hier die Spannung sogar unterhalb 600V im Gegenzug wird ein Strom von ca. 200A eingespeist.

Segment drei:

- Der OH-LKW hat die Senke verlassen und beschleunigt nun wieder gleichmäßig. Der LKW nähert sich dabei dem Speicherunterwerk (Quelle), welcher dann die Speisehoheit übernimmt. Am Ende steigt die Spannung dann wieder auf die Nennspannung an (720V). Der Strom wird dann runterreguliert und das Unterwerk geht dann in den Ladebetrieb bei ca. -35kW (siehe auch Abbildung 25).

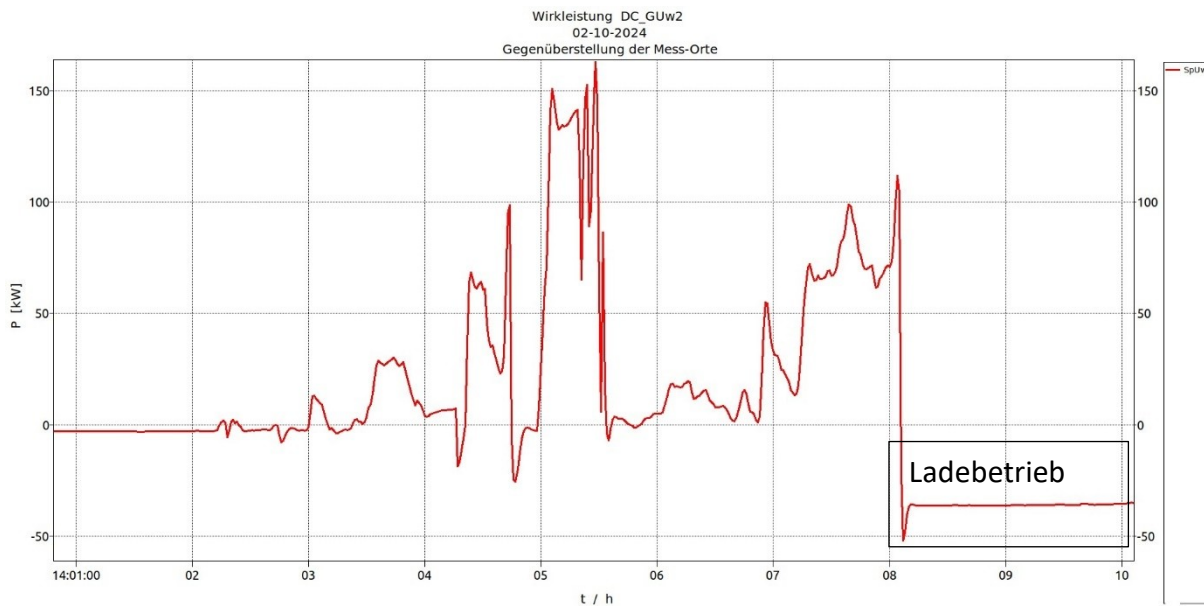


Abbildung 25 Leistungsverlauf Speicherunterwerk einer Fahrt, Fahrtrichtung Lübeck (siehe auch Abbildung 24)

Abbildung 25 veranschaulicht den Leistungsverlauf des Speicherunterwerkes während einer Fahrt in Fahrtrichtung Lübeck und knüpft an Abbildung 24 an.

## 5.1 Netzschutz – Systemschutz

Der Systemschutz der Anlage unterteilt sich dabei in den Anlagenschutz auf der Oberleitungsseite und die des Speicherunterwerkes. Die Gleichspannungsschaltanlage ist für den Schutz der Oberleitungsanlage zuständig und übernimmt jegliche Detektion von Fehlerströmen und Über- und Unterspannungen auf der Oberleitungsanlage. Dieses Konzept ist bereits bei den Bestandunterwerken realisiert und erfüllt vollständig die funktionalen Anforderungen.

Beim Schutz des Speicherunterwerkes sind allerdings andere Prioritäten zu setzen, da die Spannungsquelle der Speicher darstellt. Hier überwacht das Energiemanagementsystem die Ströme und Spannungen und ist für den beidseitigen Leistungsfluss im Speicher verantwortlich.

Für die Energielieferung von und in die Oberleitungsanlage sind die IGBT's (Power-Stacks) verantwortlich, die damit eine weitere Ebene des Geräteschutzes darstellen. Dabei wird der Schutz in zwei Stufen unterteilt, wobei die verbaute Strommessung in den Stacks die Grundlage sowohl für die Regelung als auch den Anlagenschutz darstellen. In den IGBTs ist eine Überstromabschaltung implementiert, die kontinuierlich überwacht, dass der IGBT nicht überlastet wird. Diese Schutzfunktion stellt sicher, dass der IGBT bei Überschreitung eines bestimmten Stromwertes automatisch abgeschaltet wird, um Schäden und Ausfälle zu

vermeiden. Am Beispiel eines SKiiP\_3614\_GB17E4\_6DUW mit 1500 A RMS wäre das 5400 A Peak. Das Stromsignal vom IGBT wird auch an die PIII/ EII gegeben. Dort ist das zweite Level der Überstromüberwachung implementiert. Die PIII/ EII schaltet bei einem höheren Strom (Peak) von  $I > I_{max}$  die IGBT's ab. Am Beispiel eine SKiiP\_3614\_GB17E4\_6DUW mit 1500 A RMS wäre das 3000 A Peak. Das Stromsignal wird dann an die Umrichter PLC weitergeleitet. Hier sind mehrere Softwareabschaltungen und Begrenzungen implementiert. Das Wichtigste ist das  $I_{max}$  Peak Level.

Während des gesamten Probetriebs kam es zu keiner Überlastung der Anlage.

## 5.2 Betriebsbericht Speicherunterwerk (01.01.2024 – 01.12.2024)

Unter anderem war die allgemeine Zielsetzung des Projektes, das Speicherunterwerk in den alltäglichen Betrieb zu implementieren und dabei die Grenzen auszutesten. Dabei ging es um die Spannungsregelung auf der Gleichstromseite durch die Zwischenkreisspannung, die als Schnittstelle zwischen den IGBTs und den Batterien fungiert. Hier gilt es, die Reaktionszeit des Zwischenkreises beim Energietransport zwischen den Batterien und den IGBTs zu verringern und somit eine Überladung zu verhindern. Sobald die grundlegenden Funktionen ohne Einschränkungen funktionieren und die Sicherheit der Anlage nicht beeinträchtigt wird, werden die Grenzen des Speicherunterwerkes getestet. Bspw. wird beim Laden oder Entladen der maximale Stromfluss ausgetestet und das Verhalten der Anlage dokumentiert. Die Parametrierung und Einstellung des Systems basierten auf den Grundeinstellungen des Energiemanagementsystems. Folgende Überwachungsoptionen sind dabei aktiv:

- Aktive kontinuierliche Überwachung der Batteriestacks und der IGBT-Module
- Isolationsüberwachung der Batteriestacks
- Koordinierte Lastflussregelung

Die eingegebenen Parameter in diesen Überwachungsoptionen wurden während des Betriebes aktiv angepasst, wobei die Gegebenheiten des eHighway-Betriebes näher analysiert wurden. Die Messparameter in Bezug auf Flanken des Stromanstiegs sowie des Spannungsabfalls und der Zwischenkreisregelung bildeten die Grundlage, um die Regelung des Lastflusses und der Energieverteilung auf einem gleichbleibenden und stabilen Niveau zu halten. Diese Betriebsoptimierung konnte nur im Rahmen der tatsächlich angefallenen Lasten (OH-LKW im angedockten Zustand unter der Oberleitung) durchgeführt werden. Die Sensitivität der Parameter spielt dabei eine entscheidende Rolle, sodass sich die Anlage unter diesen Bestimmungen und auf Basis der Einstellungen mehrmals abgeschaltet hat. Dies war wichtig, um unter anderem die Anlagensicherheit zu gewährleisten. Durch mehrfaches

Anpassen der Einstellungen konnte die Ausfallzeit auf ein Minimum verringert werden und betrug Mitte Oktober 2024 schließlich Null.

Seit dem 01.01.2024 gilt die neue Mautregelung für hybride LKWs, einschließlich der OH-LKWs. Daraufhin stellte die Spedition Bode den Betrieb der OH-LKWs für zwei Monate ein, sodass die Wiederinbetriebnahme der LKWs Anfang März 2024 erfolgte. Daher konnte im Zeitraum Januar bis ca. Mitte März 2024 der Testbetrieb des Speicherunterwerks nicht durchgeführt werden. Dadurch konnte auch das sog. Grund-Balancing - Anfangsbalancing (Zellenausgleich) der Batterien nicht durchgeführt werden, da hierfür die Batterien mehrmals während des Betriebes geladen und entladen werden mussten. Das Grund-Balancing konnte somit erst im Juni 2024 abgeschlossen werden, wobei das normative Balancing in regelmäßigen Abständen automatisch durchgeführt wird.

Anfang März 2024 wurde festgestellt, dass die Eigenbedarfsanlage keine saubere Spannung liefert, wodurch einige Messgeräte ausgefallen sind. Anstatt der geforderten 230 V AC kamen an den Geräten nur 205 V AC an. Der Grund hierfür war ein falsch ausgelegter Sternpunkt bei der Verkabelung. Nachdem diese Ursache erkannt und behoben wurde, lag die Spannung weiterhin unter der Marke von 230 V AC und betrug 211 V AC (April 2024). Durch diese Erkenntnis kam man zu dem Schluss, dass die Leistung der Eigenbedarfsanlage nicht ausreichend dimensioniert wurde. Zudem registrierte man häufigere Ausfälle bei der 24V-Steuerspannung, die zu einer vollständigen Abschaltung der Anlage führte. Ende Juli 2024 wurde eine zusätzliche Leitung zu der Black Start Unit (Eigenbedarfsanlage) gelegt, die den Eigenbedarf unter anderem zusätzlich aus der Oberleitung absichert. Außerdem wurde eine 24 V-USV angeschafft, um den Stationscontroller der Gleichspannungsschaltanlage zu puffern (August 2024). Diese Maßnahmen bewirkten keine weiteren Abschaltungen mehr.

Mitte Juni 2024 kam es zu häufigen Ausfällen der Anlage, da die Kommunikationsverbindung zu den Controllern des Energiemanagementsystems und zum Schutzgerät des Sitras MDC der Gleichspannungsschaltanlage unterbrach. Der Grund war hierfür ausgefallene Kommunikationsleitungen. Da der Fehler nur sporadisch aufkam, konnte man den Fehler erst Ende Juni 2024 beheben.

Ebenfalls Mitte Juni wurde eine Veränderung im SOC und der zugehörigen Zellspannung festgestellt. Anhand der Ladekurve für die LTO-Batterien konnte man feststellen, dass der SOC etwa um 40 % nach unten abweicht. Dies führte dazu, dass das System aufgrund der fehlenden Kapazität sich ständig abgeschaltet hat, obwohl die Anzeige bei mindestens 40-50 % des SOC war. Seitens der Software konnte man das Problem nicht eindeutig identifizieren. Nachdem sich das System abgeschaltet hat und die Batterien stromlos geschaltet wurden, begann das System sich neu zu kalibrieren und zeigte nach einer Stillstandzeit von bis zu 12 Stunden wieder den richtigen SOC-Wert an. Beispielsweise betrug die Zellspannung 2,17 V und der

zugehörige (falsche) SOC 100 %. Nach einer Stillstandzeit von 12 Stunden lag der (richtige) SOC bei 20 % bei derselben Zellspannung. Der Hersteller (AlznerBattery GmbH) konnte ebenfalls erst einmal keine Unstimmigkeit in der Software identifizieren. Auch bei dem Energiemanagementsystem konnte kein Fehler gefunden werden. Die Vermutung liegt als erstes bei der zugehörigen Strommessung, die entweder hardwareseitig falsch misst oder die einzelnen Veränderungen in den Stromspitzen vor allem bei den LKW-Fahrten nicht richtig misst, was zu einer Abweichung in der Stromzählung führt.

Mitte Oktober 2024 wurde ein zusätzlicher Datenlogger eingebaut, um das Problem einzugrenzen und eindeutig zu identifizieren. Allerdings musste auch hier seitens des Regelungskonzeptes erneut eingegriffen werden, um die Triggerkriterien für den Energiezu- und -abfluss neu anhand der Zellspannung zu definieren. Dabei wurden die Kriterien nach oben und unten wie folgt definiert:

- Untere Zellspannungsgrenze 2,1 V – entspricht etwa 20% SOC
- Obere Zellspannungsgrenze 2,5 V – entspricht etwa 90% SOC

Nachdem diese Kriterien Mitte Oktober 2024 in die Regelung implementiert wurden, waren keine ungeplanten Ausfälle mehr zu verzeichnen. Außerdem stellte man fest, dass der Speicher während einer Fahrt mehr Strom auspeist, da die Stromhöhe unter anderem von der Zellspannung abhängt. Dies war der endgültige Beweis für eine falsche Bestimmung oder Berechnung des SOC seitens des Herstellers. Ein weiterer Optimierungsbedarf war zu dem Zeitpunkt (Ende Oktober 2024) nicht gegeben. Somit startete der offizielle Betrieb des Speicherunterwerkes am 23.10.2024!

### 5.3 Wartungskonzept

Im Folgenden wird das Wartungskonzept erläutert, das für einen störungsfreien Betrieb des Speicherunterwerkes notwendig ist. Dabei sind Instandhaltungsintervalle zu berücksichtigen. Wenn bei regelmäßigen Inspektionen vermehrte Abnutzung individueller Komponenten oder funktioneller Gruppen festgestellt wird, muss der Betreiber die Instandhaltungsintervalle auf der Grundlage tatsächlicher Abnutzungserscheinungen festlegen. Veränderungen im normalen Betrieb, wie erhöhter Stromverbrauch, Temperatur, Erschütterungen, Geräusche oder Reaktionen der Überwachungssysteme, können darauf hinweisen, dass die Funktionalität des Unterwerkes eingeschränkt ist. Diese müssen dann von qualifizierten Fachkräften erneut inspiziert werden.

Tabelle 2 Wartungsintervalle einzelner Komponenten

Zu wartende Komponente	Instandhaltungsarbeit	Instandhaltungsintervall
USV-Batterie	Funktionsprüfung durchführen	einmal alle 6 Monate

Lüfterfilter	Lüfterfilter auf Verschmutzung prüfen und ggfs. austauschen	einmal alle 6 Monate
Vollständiges system	Sichtprüfung durchführen	einmal alle 6 Monate / nach Fehlerfall
DC-Schaltanlage	Inspektion	einmal alle 12 Monate
Kühlflüssigkeit	Kühlflüssigkeit austauschen	einmal alle 5 Jahre
Ausdehnungsgefäß	Druckprüfung durchführen	einmal alle 5 Jahre / wenn Kühlflüssigkeit ausgetauscht wird / bei vorliegender Fehlermeldung „pressure low“

Das Batteriesystem ist, soweit alle notwendigen Voraussetzungen eingehalten sind bspw. Klimatisierung, Aufstellungsort etc., wartungsfrei. Eine weitere Voraussetzung ist das Durchführen des Balancing für den Zellenausgleich, wobei dies im System automatisch abläuft.

Am 30. Oktober 2024 fand die Wartung des Speicherunterwerkes statt. Ein wichtiges Merkmal aus dem Bericht ist, dass durch die Salzstreuung auf der Autobahn die Kühlanlage Nebelsalz abbekommen hat, wodurch das Metall an der Kühlanlage und den Lüftern an einigen Stellen zu korrodieren begann. Entsprechend muss darauf geachtet werden, dass solche technischen Komponenten besonders geschützt werden, beispielsweise durch Auftragung eines Korrosionsschutzes.

## 6.0 Auswirkungen auf die Netzqualität

Der Einsatz von Batteriespeichern in einem Oberleitungsnetz bietet mehrere Vorteile, die die Stabilität, Flexibilität und Effizienz des Systems erhöhen. Ein wesentlicher Nutzen liegt im Spitzenlastmanagement, da Batteriespeicher bei kurzfristig hohem Leistungsbedarf, wie etwa beim Anfahren oder an Steigungen, zusätzliche Energie bereitstellen und somit die Belastung auf das Netz reduzieren. Dadurch lassen sich Lastspitzen abfangen, was die Netzqualität insgesamt verbessert. Zudem tragen Batteriespeicher zur Netzstabilisierung bei, indem sie Schwankungen ausgleichen und unerwünschte Netzzrückwirkungen wie Flicker oder Spannungseinbrüche minimieren können. Durch die Glättung der Lastkurven kann der Speicher zudem die Netzbelastung optimieren und langfristig die Netzanschlusskosten senken. Im Folgenden wird dies näher analysiert und beschrieben.

### 6.1 Messmethodik und Messkonzept

Die Eignung eines zusätzlichen oder ergänzenden Batteriespeichersystems hinsichtlich der Infrastruktur wurde experimentell untersucht. Zu diesem Zweck wurde am östlichen Ende der bestehenden Anlage ein entsprechender Batteriespeicher integriert. Diese Position ist

besonders relevant, da sie einer der am weitesten entfernten Punkte von den beiden speisenden Gleichrichterunterwerken darstellt und an der Oberleitung der höchste Spannungsabfall bei der Energieabnahme eines Lkw auftritt. Wie auch bei der Analyse der Netzurückwirkungen wurde eine hochabtastende Strom- und Spannungsmessung installiert, mit welcher die Funktionsweise des Batteriespeichers untersucht werden konnte (siehe auch Abbildung 15). Die Messdatenerfassung erfolgt im Sekundentakt und dient der automatisierten Erkennung und Auswertung von Fahrten. Das Triggerkriterium für die Fahrtenerkennung ist der Laststrom. Für die Auswertung der Netzqualitätskennzahlen werden Eine-Sekunde-Mittelwerte verwendet. Es ist notwendig, von der Norm (VDE-AR-N 4110:2018-11) abzuweichen, da diese eine Auswertung anhand von 10-Minuten-Mittelwerten vorschlägt, was aufgrund der kurzen Dauer einer LKW-Fahrt von lediglich 3-4 Minuten zu verfälschten Ergebnissen führen würde.

## 6.2 Analyse auf der Gleichstromebene

Die Analyse des Gleichspannungsverhaltens auf der Oberleitung umfasst die detaillierte Untersuchung der Spannungshaltung während einer oder mehrerer LKW-Fahrten. In diesem Zusammenhang wird der aus dem Speicher bereitgestellte Strom kontinuierlich angepasst, um die Oberleitungsspannung in einem Bereich von etwa 690-700 V zu stabilisieren. Diese Spannungskontrolle ist entscheidend, um eine gleichmäßige und zuverlässige Stromversorgung der OH-Lkw sicherzustellen und Spannungsschwankungen zu minimieren.

Darüber hinaus wird der Leistungsfluss zwischen den Speiseunterwerken untersucht und beschrieben. Dies beinhaltet die Analyse der Wechselwirkungen und des Energieflusses zwischen den Unterwerken, um die Effizienz und die Stabilität des gesamten Versorgungssystems zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Analysen liefern wichtige Einblicke in die Betriebsdynamik der eHighway-Anlage und sind grundlegend für die Optimierung des Systems im Hinblick auf Energieeffizienz und Netzstabilität.

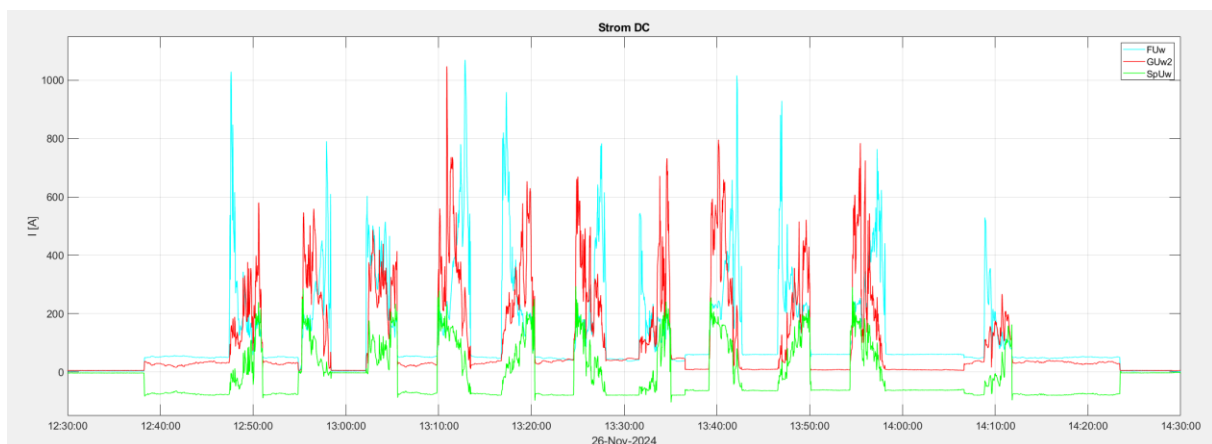


Abbildung 26 Stromverlauf der OH-LKW-Fahrten über einen Tag

Abbildung 26 veranschaulicht den Stromverlauf über einen Tag von allen speisenden Unterwerken. Dabei versorgt das Speicherunterwerk sämtliche LKW-Fahrten kontinuierlich mit Energie. Sobald die LKW-Fahrt beendet ist, wechselt das Speicherunterwerk in den Lademodus, was durch einen negativen Stromfluss gekennzeichnet ist. Dieser Wechsel ermöglicht die Wiederaufladung des Speichers für die nachfolgenden Fahrten. Diese dynamische Anpassung des Stromflusses stellt sicher, dass die Oberleitungsspannung konstant bleibt und die Energieversorgung der LKWs am Aufstellungsort des Speicherunterwerkes optimiert wird. Durch die detaillierte Analyse des Stromverlaufs können potenzielle Engpässe und Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden, um die Effizienz und Stabilität des eHighway-Systems weiter zu verbessern.

Eine weitere Analyse befasst sich mit der Spannungshaltung auf der Oberleitungsanlage. Zur Veranschaulichung des Verbesserungspotenzials wird eine Fahrt analysiert, bei der das Speicherunterwerk die Spannung stützt, und eine Vergleichsfahrt ohne die Unterstützung des Speicherunterwerkes durchgeführt. Diese beiden Szenarien ermöglichen eine detaillierte Bewertung der Unterschiede in der Spannungsstabilität und zeigen auf, wie sich die Unterstützung durch das Speicherunterwerk auf die Gesamteffizienz und Zuverlässigkeit des Systems auswirkt.

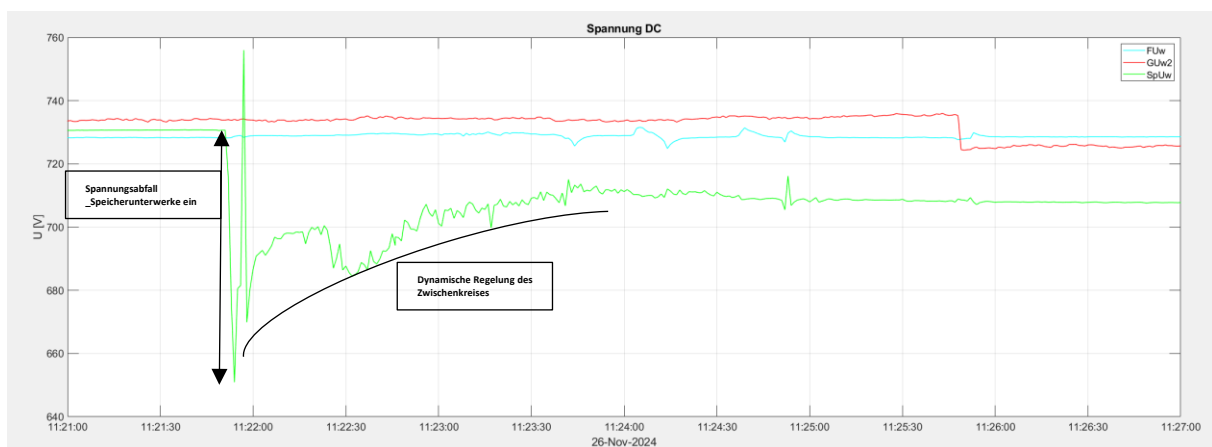


Abbildung 27 Spannungsverlauf über eine Fahrt bei eingeschaltetem Speicherunterwerk

Abbildung 27 veranschaulicht die Fahrt in Fahrtrichtung Hamburg, die mit einem initialen Spannungsabfall auf etwa 650 V beginnt, verursacht durch das Andocken des LKW an die Oberleitung. Dieser Spannungsabfall ist auf die plötzliche Leistungsaufnahme beim Anschließen des LKW zurückzuführen. Im Anschluss stabilisiert der Zwischenkreis die Spannung. Diese Spannungsregulierung ist entscheidend, um die Betriebsstabilität während der gesamten Fahrt sicherzustellen und Spannungsschwankungen zu minimieren.

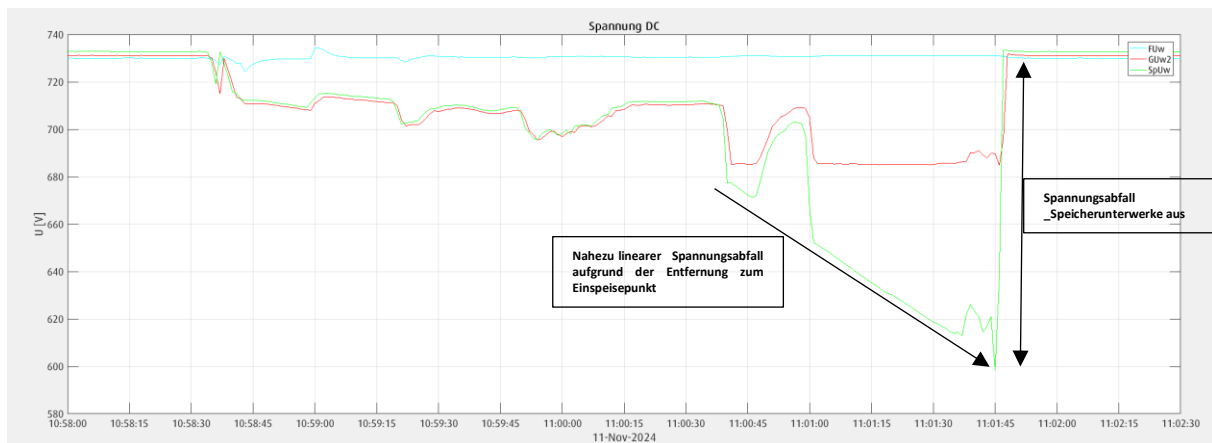


Abbildung 28 Spannungsverlauf über eine Fahrt bei ausgeschaltetem Speicherunterwerk

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 28 eine Fahrt in Fahrtrichtung Lübeck. Je weiter sich der LKW vom Speisepunkt des Speicherunterwerkes entfernt, desto größer wird der Spannungsabfall. Die minimale Spannung beträgt bei dieser Fahrt 600 V. Dies liegt daran, dass die elektrische Energie über längere Distanzen transportiert werden muss, was zu einem Spannungsabfall führt. Der Spannungsabfall kann durch den Widerstand und die Induktivität der Leitung verstärkt werden, insbesondere wenn die Entfernung zum Speisepunkt zunimmt. Vergleicht man diese Situation mit der Spannung am Gleichrichterunterwerk (GUw2 -rote Kurve), so bleibt die Spannung dort relativ konstant im Vergleich zum Speicherunterwerk. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das GUw2 näher am Speisepunkt liegt und somit weniger Spannungsabfall aufgrund der kürzeren Transportwege und der effizienteren Energieübertragung erfährt.

Die Analyse der Spannungsverläufe verdeutlicht die wesentliche Rolle des Speicherunterwerkes zur Gewährleistung einer stabilen und zuverlässigen Energieversorgung über größere Distanzen. Das Speicherunterwerk stellt sicher, dass die Spannung auf einem relativ konstanten Niveau gehalten wird, was besonders wichtig ist, wenn der LKW sich vom Speisepunkt entfernt. Ohne die Unterstützung des Speicherunterwerkes würde der Spannungsabfall deutlich stärker ausgeprägt sein, was zu erheblichen Herausforderungen für die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des eHighway-Systems führen könnte.

In Szenarien, in denen das Speicherunterwerk nicht zur Verfügung steht oder nicht ausreichend unterstützt, kommt es zu höheren Spannungsabfällen um etwa 50 V, die die Qualität der Stromversorgung beeinträchtigen. Diese Spannungsabfälle können zu Leistungsunterbrechungen und einer verringerten Effizienz des gesamten Systems führen. Darüber hinaus kann eine unzureichende Spannungsstabilität die Lebensdauer der eingesetzten Technologie negativ beeinflussen und zu höheren Wartungskosten führen.

Die Unterstützung durch das Speicherunterwerk ist daher unerlässlich, um die Netzqualität zu sichern und die Anforderungen an die Energieversorgung im eHighway-System zu erfüllen. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, die Zuverlässigkeit des Netzes zu erhöhen und die Einhaltung der regulatorischen Vorgaben sicherzustellen.

Ein weiterer Versuch ist die Speisung der Teststrecke nur mit Speicherunterwerk und Forschungsunterwerk (Umrichterunterwerk). Diese zweiseitige Speisung bringt viele Vorteile mit sich. Das FUw hält die Spannung auf der Oberleitung konstant, wobei das Speicherunterwerk nur eine hilfestellende Funktion übernimmt.

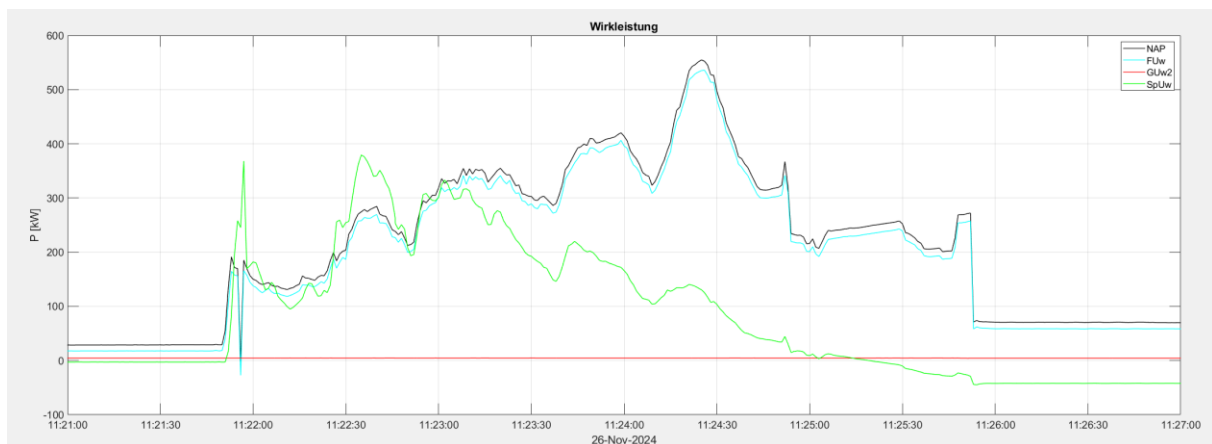


Abbildung 29 Leistungsverlauf über eine Fahrt bei Speisung der Teststrecke nur mit FUw und SpUw

In Fahrtrichtung Hamburg übernimmt das Speicherunterwerk anfangs die Speisehoheit. Es ist möglich, auch die Strecke mit den beiden Forschungseinrichtungen zu versorgen. Die zentrale Frage liegt in der Effizienz. Die Effizienz des Systems hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Verluste bei der Energieübertragung und die Leistungsfähigkeit der Speichertechnologie.

Allerdings fehlen umfassende Messdaten und Langzeitbeobachtungen, die eine genaue Bewertung der Energieflüsse und Verluste ermöglichen würden. Ohne diese Daten ist es schwierig, fundierte Schlussfolgerungen zu ziehen und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Um die Datenlage zu verbessern, sollten zusätzliche Messungen und Langzeittests durchgeführt werden. Diese sollten verschiedene Betriebszustände und Szenarien abdecken, um ein vollständiges Bild der Energieflüsse und Verluste zu erhalten.

### 6.3 Reduzierung der Netzanschlussleistung

Unter anderem wurde untersucht, ob das Speicherunterwerk die Netzanschlussleistung reduzieren kann. Eine Reduzierung der Netzanschlussleistung würde sich positiv auf die Netzanschlusskosten sowie auf den Baukostenzuschuss auswirken.

Die Netzanschlussleistung ist ein entscheidender Faktor bei der Planung und dem Bau neuer Anlagen. Eine geringere Netzanschlussleistung bedeutet niedrigere Anschlusskosten und geringere Baukostenzuschüsse, was die Gesamtkosten des Projekts erheblich reduzieren kann. Das Speicherunterwerk kann durch die Bereitstellung von Zwischenspeicherlösungen und die Glättung von Lastspitzen dazu beitragen, die Netzanschlussleistung zu reduzieren. Dies wird erreicht, indem überschüssige Energie gespeichert und bei Bedarf wieder ins Netz eingespeist wird. Dadurch wird die Belastung des Netzes verringert und die Netzanschlussleistung kann entsprechend angepasst werden.

Abbildung 30 gibt den Leistungsverlauf über eine Fahrt inklusive der Gegenüberstellung der Messorte mit dem Fokus auf die Reduzierung der Netzanschlussleistung wieder. Die dunkle gestrichelte Linie stellt dabei die summierte Leistung des Netzanschlusspunktes und des Speicherunterwerkes dar. Das heißt, wenn das SpUw nicht die Anlage speisen würde, läge der maximale Spitzenleistungsbezug aus dem Netzanschlusspunkt bei ca. 695 kW im Gegensatz zu 550 kW. Die maximale Leistungsdifferenz liegt bei 395 kW bedingt durch die Fahrt in Fahrtrichtung Hamburg.

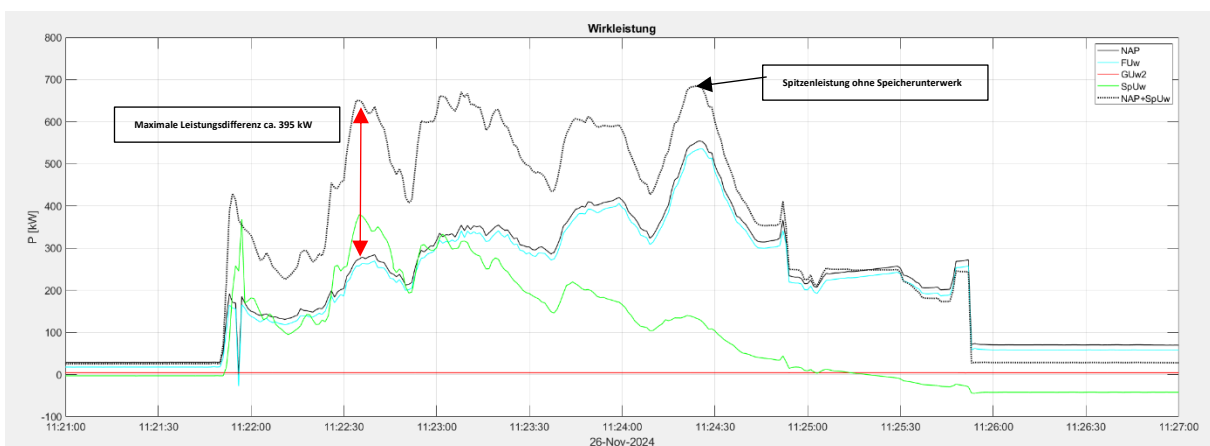


Abbildung 30 Leistungsverlauf über eine Fahrt mit Gegenüberstellung über alle Messorte mit dem Fokus auf Reduzierung der Netzanschlussleistung

Die Reduzierung der Netzanschlussleistung kann als erfolgreich bewertet werden. Durch die Implementierung des Speicherunterwerkes konnte die Netzanschlussleistung signifikant gesenkt werden.

## 6.4 Analyse und Bewertung der Netzurückwirkungen

Die Analyse und Bewertung von Netzurückwirkungen umfasst die Untersuchung von Spannungsschwankungen und Oberschwingungen. Spannungsschwankungen entstehen durch plötzliche Änderungen der Last oder Einspeisung und können zu Flicker führen.

Oberschwingungen sind harmonische Verzerrungen der Netzspannung, die durch nichtlineare Verbraucher verursacht werden und die Netzqualität beeinträchtigen können. Die zentrale Fragestellung lautete, ob das Speicherunterwerk zur Verbesserung der Netzqualität beiträgt und welche konkreten Auswirkungen es auf die Netzurückwirkungen hat.

Eine detaillierte Untersuchung ergab, dass die Netzstützung keine signifikanten Veränderungen bei den Netzqualitätskennzahlen bewirkte. Die maximalen Abweichungen im Bereich der Total Harmonic Distortion (THD) der Spannung (THDu) oder des Stroms (THDi) lagen im Promillebereich. Es ist jedoch möglich, dass diese Abweichungen auf Messfehler zurückzuführen sind.

## 7.0 Technische und wirtschaftliche Bewertung

In diesem Kapitel soll anhand vorhandener Daten aus dem Feldversuch untersucht werden, inwiefern das Speicherunterwerk aus technischer und wirtschaftlicher Sicht für die Infrastruktur nützlich sein kann.

### 7.1 Versorgungsqualität

Versorgungsunterbrechungen stellen eine signifikante Herausforderung für die Zuverlässigkeit und Effizienz des eHighway-Infrastruktursystems dar. Diese kann durch verschiedene Faktoren wie technische Störungen, Naturkatastrophen oder menschliches Versagen verursacht werden. Der Einfluss solcher Unterbrechungen kann weitreichend sein, von geringfügigen Unannehmlichkeiten bis hin zu schweren wirtschaftlichen Verlusten. Für die technische Bewertung des Speicherunterwerkes wurden insgesamt zwei Monate Betriebszeit im Zeitraum Oktober – Dezember 2024 in Betracht gezogen. Der Schwerpunkt dieser Betrachtung liegt bei der Versorgungszuverlässigkeit der Anlage, die eine Kennzeichnung der Anzahl und Dauer der Versorgungsunterbrechungen widerspiegelt. Dabei werden nur die ungeplanten Versorgungsunterbrechungen des Speicherunterwerkes beachtet.

Tabelle 3 Ausfälle Speicherunterwerk

<u>Datum</u>	<u>Ausfallgrund</u>	<u>Ausfallzeit</u>
08.10.2024	Softwarefehler - Bug in der Steuerung	36 Stunden

Die Tabelle 3 gibt die gesamten Ausfälle des Speicherunterwerkes für den Zeitraum Oktober – Dezember 2024 wieder. Insgesamt ist nur ein Ereignis aufgetreten, das zum Ausfall des Unterwerkes führte. Allerdings konnten bei der Probeinbetriebnahme und in der Phase der

Betriebsoptimierung (März-Oktober 2024) mehrere Ausfallursachen identifiziert werden, die hier aus Gründen der Vollständigkeit beschrieben werden:

- Hardwareausfälle: Defekte Festplatte, Serverausfall – dies führte wiederum zu Datenverlusten und Systemausfällen.
- Softwarefehler: Bugs, Inkonsistenzen in der Speichersoftware – dies beeinträchtigte die Integrität und Verfügbarkeit der gespeicherten Daten.
- Stromausfälle: Unterbrechungen in der Stromversorgung für die Steuerungskomponenten.
- Netzwerkausfälle: Probleme im Netzwerk für den Zugriff auf das System von außen

Es ist nicht konsistent genug eine Aussage zur Versorgungszuverlässigkeit in Anbetracht der kurzen Betriebszeit von 2 Monaten zu treffen, obwohl die Zuverlässigkeit in diesem Zeitraum über 90% betrug. Betrachtet man jedoch die gesamte Betriebszeit inkl. der Betriebsoptimierungsphase einschließlich des Probetriebs, liegt die Versorgungszuverlässigkeit unter 50%.

## 7.2 Technische und ökologische Bewertung

Durch den Einsatz des Batteriespeichers im Vergleich zu der klassischen Variante des Gleichrichterunterwerkes ergeben sich zahlreiche Vorteile:

- Vermeidung weiterer Netzanschlusspunkte: Zusätzliche Netzanschlusspunkte werden überflüssig, wodurch der Aufwand und die Kosten für die Netzverbindung reduziert werden.
- Verzicht auf die Verlegung einer Versorgungsstrasse: Die Notwendigkeit, eine zusätzliche Versorgungsstrasse zu verlegen, entfällt, was sowohl Baukosten als auch potenzielle Umweltauswirkungen minimiert.
- Keine Mittelspannung im Unterwerk: Im Unterwerk wird keine Mittelspannung benötigt, was die Komplexität und die Kosten der elektrischen Infrastruktur verringert.
- Wegfall von MS-Schaltanlage und Transformator: Mittelspannungs-Schaltanlagen und Transformatoren werden nicht mehr benötigt, was zu weiteren Kosteneinsparungen und einem vereinfachten Systemdesign führt.
- Gleichmäßigere Leistungsentnahme aus dem Netz: Die Leistungsentnahme aus dem Netz wird gleichmäßiger, was zur Stabilität des Gesamtsystems beiträgt.
- Stabilisierung der Oberleitungsspannung: Die Oberleitungsspannung wird stabilisiert, was die Zuverlässigkeit und Effizienz der gesamten Anlage verbessern.
- Verringerung des Eingriffs in die Natur und Umgebung: Durch den Einsatz von Batteriespeichern wird der Eingriff in die natürliche Umgebung reduziert. Dies

minimiert negative Auswirkungen auf die Umwelt und trägt zur Erhaltung der natürlichen Landschaft bei.

- Minimierung des Aufwands im Genehmigungsverfahren für die Versorgungsstrasse: Durch den Einsatz von Batteriespeichern wird der Bedarf an aufwendigen Genehmigungsverfahren für die Verlegung von Versorgungsstrassen deutlich reduziert. Dies beschleunigt nicht nur die Projektumsetzung, sondern spart auch Zeit und Kosten.

Außerdem sind Li-Titan-Batterien aufgrund ihrer chemischen Stabilität und der geringeren Anfälligkeit für thermische Ausfälle besonders sicher, was das Risiko von Bränden erheblich reduziert. Laut dem Hersteller funktionieren sie auch bei Temperaturen von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$ , was sie ideal für anspruchsvolle Umgebungen macht und entsprechend auch den Einsatz beim eHighway. Ein weiterer Vorteil dieser Batterien ist ihre Langlebigkeit, da sie eine längere Lebensdauer haben und mehr Ladezyklen durchlaufen können. Lithiumtitanat-Batterien sind äußerst langlebig und können gemäß Angaben des Herstellers von 15.000 bis zu 30.000 Ladezyklen erreichen. Dies verringert die Notwendigkeit häufiger Ersetzungen.

### 7.3 Eigenbedarfsenergie und Wirkungsgrad

Speichersysteme sind essentielle Komponenten moderner Energiesysteme, insbesondere im Zusammenhang mit der Integration erneuerbarer Energien. Zwei zentrale Aspekte dieser Systeme sind die Eigenbedarfsenergie und der Wirkungsgrad, die beide entscheidenden Einfluss auf die Effizienz und Nachhaltigkeit der Systeme haben. Die Eigenbedarfsenergie bezieht sich auf die Energiemenge, die ein Speichersystem für seinen eigenen Betrieb benötigt. Dazu zählen die Energie für Steuerungssysteme, Überwachung und Kommunikation, die kontinuierlich betrieben werden müssen, sowie die Energie für das Thermomanagement. Um die optimale Betriebstemperatur zu gewährleisten, benötigen Speichersysteme Kühl- oder Heizenergie, je nach Umgebungsbedingungen. Darüber hinaus verursachen die Lade- und Entladeprozesse der Batterien selbst Energieverluste, die zur Eigenbedarfsenergie hinzugerechnet werden müssen. Ein effizientes Speichersystem sollte daher einen möglichst geringen Eigenbedarf aufweisen, um die gespeicherte Energie optimal nutzen zu können.

Der Wirkungsgrad eines Speichersystems beschreibt das Verhältnis der abgegebenen Energie zur aufgenommenen Energie und wird in Prozent angegeben. Ein hoher Wirkungsgrad bedeutet, dass nur ein geringer Anteil der aufgenommenen Energie während des Speichervorgangs verloren geht. Li-Titan-Batterien erreichen Wirkungsgrade von 85 bis 95 Prozent. Verschiedene Faktoren beeinflussen den Wirkungsgrad, darunter die Häufigkeit der Lade- und Entladezyklen, die Betriebstemperaturen sowie die Alterung der Speichersysteme.

Mit zunehmendem Alter können chemische und mechanische Veränderungen zu erhöhten Verlusten führen.

Die Auswertung der Messwerte aus den Monaten Oktober bis Ende November 2024 des Speicherunterwerkes zeigen ab dem 24.10.2024 bei der Bestimmung des Wirkungsgrades, sehr nahe liegende Werte (Tabelle 4).

Tabelle 4 Wirkungsgrad des Li-Titan-Speichers

<u>Datum</u>	<u>Zugeführte Energie / kWh</u>	<u>Abgeführte Energie / kWh</u>	<u>Wirkungsgrad / %</u>
<b>21.10.2024</b>	27,7	24	86,6
<b>24.10.2024</b>	26	23,9	91,9
<b>25.10.2024</b>	26,8	25,1	93,8
<b>29.10.2024</b>	27,9	26,3	94,2
<b>04.11.2024</b>	25,6	24,3	94,9

Dazu ist anzumerken, dass am 23.10.2024 letzte Anpassungen bei der Steuerung und dem Regler vorgenommen wurden, wodurch die Reaktionszeit für den Energietransport verringert wurde.

Das Speicherunterwerk zeigt in Bezug auf die Eigenbedarfsenergie eine relativ ungünstige Bilanz, da ca. durchschnittlich **6,8 kW** ausschließlich für den Eigenverbrauch benötigt werden. Diese hohe Eigenbedarfsleistung bedeutet, dass ein signifikanter Anteil der gespeicherten Energie nicht für die eigentliche Nutzung zur Verfügung steht, sondern intern verbraucht wird. Dies erhöht wiederum den Energieumsatz und damit die Anzahl der Zyklen. Der Eigenverbrauch setzt sich hauptsächlich aus dem Betrieb des Kühlsystems und der Pumpe zusammen.

Ein hoher Wirkungsgrad und ein geringer Eigenbedarf sind entscheidend für die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Speichersystemen. Sie tragen dazu bei, die Energiekosten zu senken und den ökologischen Fußabdruck zu verringern.

## 7.4 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung des Speicherunterwerkes zielt darauf ab, die Kosten der verschiedenen Speisevarianten des Gleichrichterunterwerkes und des Speicherunterwerkes zu

vergleichen. Dabei werden auch die Netzintegrationskosten berücksichtigt und gegenübergestellt. Zusätzlich werden die flexiblen, jährlich anfallenden Kosten bewertet. Zu diesen gehören die jährlichen Wartungskosten sowie die Energiekosten für den Eigenbedarf.

Das modulare Einschubsystem ermöglicht die flexible Handhabung und den Austausch von Speichereinheiten. Bei Erreichen der maximalen Lebensdauer des Speichers oder im Falle eines erforderlichen Austauschs einer Speichereinheit kann dieser Vorgang mithilfe des Einschubsystems effizient durchgeführt werden. Die Kosten für eine Speichereinheit mit einer Kapazität von **8,2 kWh betragen 15.450€**. Diese Preisangabe ist besonders relevant für die Planung und Durchführung von Ersatzinvestitionen innerhalb des vorgesehenen Betrachtungszeitraumes.

Die gesamten Fixkosten inkl. der Netzintegrationskosten für das Speicherunterwerk sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5 Fixkosten Speicherunterwerk

### Fixkosten Speicherunterwerk

Speicherdaten:	Lithium-Titanat
Batteriekapazität in kWh	120
Wirkungsgrad Speicher in %	90,00
Kapazität der Batterie in Ah	29,85
Batterieleistung in kW	1.000
Lebensdauer Batterie in Vz	25.000
Gesamt-Kosten Unterwerk fertiggestellt	577.000 €
Preis je kWh /€	4808
Netzintegrationskosten hardwaretechnisch /€	60.000
Netzintegrationskosten softwaretechnisch /€	82.000
<b>Gesamtkosten Speicherunterwerk (ohne Personalkosten)</b>	<b><u>719.000 €</u></b>

Hinzu kommen noch die variablen Kosten hinzu (siehe Tabelle 6). Diese setzen sich aus den jährlichen Wartungskosten sowie der Energieverbrauchskosten für den Eigenbedarf zusammen. Dabei stellen die Eigenbedarfsenergiekosten den größten Kostentreiber dar. Es besteht somit ein Optimierungsbedarf bei der Eigenverbrauchsenergie des Unterwerks, beispielsweise durch die Abschaltung in der Nacht, um das Unterwerk nur 20 Stunden am Tag mit Energie zu versorgen. Dies könnte zu einer Reduzierung der Energieverbrauchskosten und einer effizienteren Nutzung führen.

Tabelle 6 Variable Kosten Speicherunterwerk

### Variable Kosten SpeicherUW

Wartungskosten /€ / Jahr	4800	
Kosten für Eigenbedarfsenergie kWh/ Tag	168	durchschnittliche Eigenbedarfsleistung inkl. Verluste = 7kW
Kosten für eine kWh vom Netzversorger €/kWh	0,22	Stand: 10.2024
Kosten für Eigenbedarfsenergie Jahr /€	<b>10.348,80</b>	Energiekosten als Kostentreiber -> Optimierungsbedarf
Gesamtkosten	<b><u>15.148,80</u></b>	

Diesen Kosten stehen die Netzanbindungskosten (Kosten für den Netzanschlusspunkt -

Tabelle 9), die Fixkosten sowie die variablen Kosten des Gleichrichterunterwerks gegenüber (Tabelle 7).

Bei den Netzanbindungskosten ist zu unterscheiden, ob das Gleichrichterunterwerk an einen bereits vorhandenen Netzanschlusspunkt angeschlossen wird oder eine zusätzliche Station aufgestellt werden muss. Zusätzlich muss beachtet werden, in welcher Entfernung der Netzanschlusspunkt zum Aufstellungsort des Gleichrichterunterwerks steht. Bei den hardwaretechnischen Netzintegrationskosten (Tiefbau und Kabelverlegung) geht man von einer Prämisse aus, dass das Unterwerk in einer 2,5km Entfernung zum Einspeisepunkt aufgestellt wird. Dies stellt die maximale Entfernung zu den Speiseunterwerken dar. Es ist weiterhin anzumerken, dass in den letzten fünf Jahren die Tiefbau- und Materialkosten um etwa 25 % gestiegen sind. Es ist höchstwahrscheinlich, dass sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen wird.

Tabelle 7 Fixkosten Gleichrichterunterwerk

## Fixkosten

### Gleichrichterunterwerk

Container	240.000,00 €
Transformator	40.000,00 €
MS-Anlage	41.000,00 €
Gleichspannungsschaltanlage	45.000,00 €
Überwachung-Ferwirk.	25.000,00 €
USV, Eigenbedarfstrafo,-anlage	41.000,00 €
Sonstige Leistungen	4.000,00 €
Gleichrichter	18.000,00 €

Gesamt **454.000,00 €**

unter der Beachtung, dass ein Gleichrichterunterwerk in einer maximalen Entfernung von 2,5 km zum Einspeisepunkt aufgestellt werden muss gemäß Netzbetreiber betragen die Kosten für die Kabelverlegung 200 €/m (3x 10 kV 120mm<sup>2</sup> parallel mit LWL)

### Netzintegrationskosten hardwaretechnisch

Tiefbaukosten Kabelverlegung 10kV inkl. LWL /€	500.000
Anschlusskosten Mittelspannung beidseitig /€	14.260

Anschluss im Netzanschlusspunkt und im GUw

Gesamt **514.260**

**Netzintegrationskosten softwaretechnisch /€ 82.000**

**Gesamtkosten Gleichrichterunterwerk 1.050.260,00 €**

Den größten Kostenposten stellen die Tiefbau- und Kabelverlegearbeiten dar. Außerdem sind noch die Planungs- und Genehmigungskosten miteinzubeziehen. Geht man allerdings davon aus, dass die Energiezuleitung parallel zur Bundesautobahn gelegt wird, kann diese Position außer Acht gelassen werden. Die größte Herausforderung könnte hier der Zeitfaktor sein. Diesem Aspekt muss jedoch besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, was in diesem Rahmen nicht ausführlich behandelt werden kann.

Bei den variablen Kosten schneidet das Gleichrichterunterwerk besser als das Speicherunterwerk ab. Die jährlichen Energieeigenbedarfskosten sind deutlich niedriger. Auch die Wartungskosten fallen geringer aus, da die eingesetzte Technik (Straßenbahnbereich) bereits seit vielen Jahrzehnten etabliert ist.

Tabelle 8 Variable Kosten Gleichrichterunterwerk

### Variable Kosten Gleichrichterunterwerk

Wartungskosten /€ / Jahr	3000
Kosten für Eigenbedarfsenergie kWh/ Tag	60
Kosten für eine kWh vom Netzversorger €/kWh	0,22
Kosten für Eigenbedarfsenergie Jahr /€	<b>3.696,00</b>
Gesamtkosten	<b><u>6.696,00</u></b>

Tabelle 9 Kosten für die Netzanschlussstation 10kV

### Kosten

#### Netzanschlussstation

Station ohne

Tiefbauarbeiten /€	<b>120.000</b>	Angebot Netzbetreiber 10kV Netz (TraveNetz GmbH)
Tiefbau für Kabel, Station 100m Umkreis	20.000	gemäß Netzbetreiber betragen die Kosten für die Kabelverlegung 200 €/m (3x 10 kV 120mm <sup>2</sup> parallel mit LWL)

Netzanschlusskosten	16.000	Angebot Netzbetreiber
---------------------	--------	-----------------------

Baukostenzuschuss für bestellte Leistung	29.000	gemäß Tabelle Schleswig-Holstein Netz AG 29€/kW für 1000 kW
---	--------	---

Gesamte Kosten	<b><u>185.000</u></b>
----------------	-----------------------

### Zusammenfassung

Die jährlichen variablen Kosten bei einem Speicherunterwerk sind deutlich höher als bei einem Gleichrichterunterwerk. Beim Gleichrichterunterwerk ist jedoch mit höheren Anfangsinvestitionskosten zu rechnen. Hier muss unterschieden werden, ob ein zusätzlicher Netzanschlusspunkt benötigt wird oder nicht. Außerdem ist zu berücksichtigen, wie lang die Energiezuleitung sein muss, um das Unterwerk ans Netz anzubinden. Für die neue Netzanschlussstation muss mit einer Vorlaufzeit gerechnet werden, da die Planung und eventuell eine Genehmigung viel Zeit in Anspruch nehmen kann. Derzeit muss mit einer Vorlaufzeit von 20 Wochen gerechnet werden.

Bei einem wirtschaftlichen Vergleich spielt der Betrachtungszeitraum eine besondere Rolle, da das Gleichrichterunterwerk nahezu wartungsfrei ist und nach dem heutigen Stand der Technik eine Mindestlebensdauer von 30 Jahren aufweist. Im Gegensatz dazu muss beim Speicherunterwerk mit einer Ersatzinvestition gerechnet werden, da der Speicher nach etwa 10 Jahren ersetzt werden muss. Geht man jedoch davon aus, dass in naher Zukunft die Speicherpreise sinken werden, könnte das Speicherunterwerk attraktiver werden.

Schlussendlich muss fallspezifisch unterschieden werden, wo und welche Unterwerksvariante sich besser einsetzen lässt, da hier nicht nur wirtschaftliche, sondern auch zeittechnische und genehmigungsrechtliche Faktoren berücksichtigt werden müssen.

## 8.0 Zukunftsaussichten und Optimierungsbedarf

Im Ladebetrieb zeigt sich, dass das Laden problemlos verläuft, wobei der Ladezustand (SOC) und die Zellspannung beachtet werden müssen. Es besteht Entwicklungspotenzial beim Balancing der Batterien, da die Kalibrierung nur im stromlosen Zustand mit einer Gesamtdauer von 4 Stunden erfolgt. Eine Fernauslösung ist nicht vorhanden. Ein hoher Eigenverbrauch kann die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Speichersystems erheblich beeinträchtigen und erfordert daher eine Optimierung, um die Effektivität des Systems zu maximieren. Optimierungsbedarf besteht bei der Eigenverbrauchsenergie, beispielsweise durch die Abschaltung in der Nacht, um das Unterwerk nur 20 Stunden am Tag mit Energie zu versorgen.

Im Entladebetrieb zeigt sich, dass die Spannungsstützung am Ende der Teststrecke funktioniert, jedoch besteht weiterhin Optimierungsbedarf. Der Einbau eines PI-Reglers in die Regelung, um die Spannung durch Stromzufuhr weiter aufrechtzuerhalten, war erfolgreich. Dadurch konnten Leistungsschwankungen während der Fahrt verhindert und das Entladeverhalten des Speichers optimiert werden.

Zukunftsweisend und im Hinblick auf einen möglichen Ausbau des eHighway-Systems wird ein Konzept vorgeschlagen, bei dem das Speicherunterwerk zwischen den einzelnen Netzanschlusspunkten als eine Art Spannungsstütze und Energiezwischenpufferung dient (Abbildung 31).

Insgesamt bietet dieses zukunftsweisende Konzept eine vielversprechende Lösung für die Herausforderungen der Energiewende. Es adressiert sowohl technische als auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte, die in den Kapiteln 7.2 Technische und ökologische Bewertung und 7.4 Wirtschaftliche Bewertung behandelt wurden.

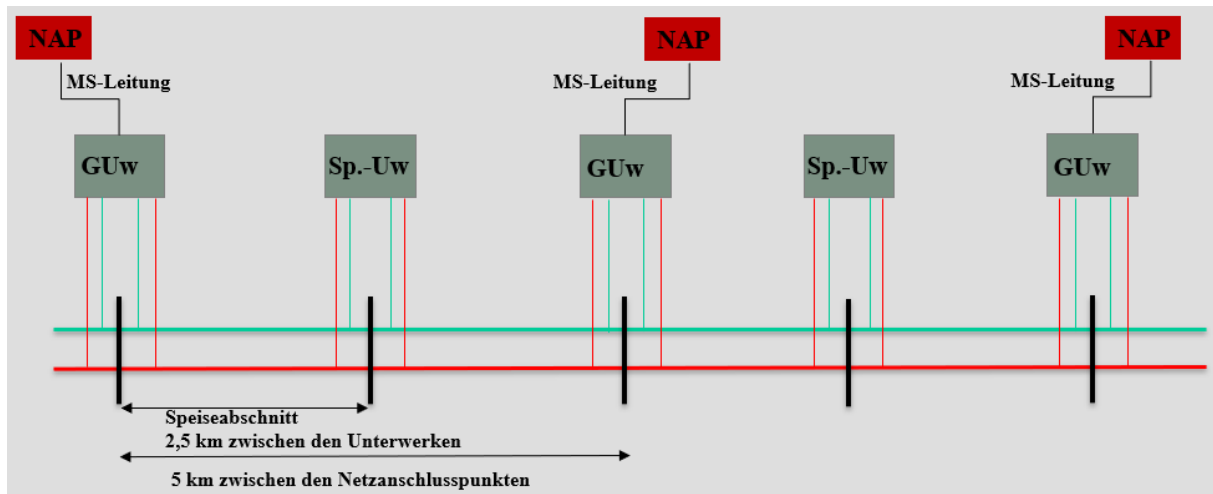


Abbildung 31 Versorgungskonzept der Zukunft