

**Unterlage (20.1)**  
**Ergänzende Begleitdokumentation für das System**  
**Batterieoberleitungsbus Marburg**

zum

**Erläuterungsbericht**

zum

**Planfeststellungsverfahren**  
**zur Umstellung ausgewählter Buslinien**  
**auf einen Betrieb mit**  
**Batterie-Oberleitungsbussen in Marburg**

Erstellt durch:

**ARGE BOB Marburg IFB-VI**

für die



vertreten durch

Stadtwerke Marburg Consult GmbH

Dresden, den 23.08.2023

Gefördert durch:



Projektbegleitung durch:



## Inhaltsverzeichnis

1.	Elektrische Energiespeicher .....	5
1.1.	Kenngrößen von Akkumulatoren.....	5
1.1.1.	Spannungen .....	5
1.1.2.	Innenwiderstand .....	6
1.1.3.	Kapazität und C-Rate .....	6
1.1.4.	Energiedichte.....	6
1.1.5.	Zyklenzahl .....	6
1.2.	Speichertechnologie für Traktionsanwendungen .....	7
1.2.1.	Ruhspannungsverläufe .....	9
1.2.2.	Ladeverläufe.....	10
1.2.3.	Widerstands- und Leistungsverhalten .....	12
1.2.4.	Vergleich der spezifischen Energien .....	17
1.2.5.	Zusammenfassung .....	17
2.	Elektrische Infrastruktur .....	19
2.1.	Grundaufbau.....	19
2.2.	Wahl des Spannungssystems.....	19
2.3.	Unterwerke .....	20
2.4.	Fahrleitung und Stromabnehmer .....	21
2.4.1.	Grundlagen.....	21
2.4.2.	Konventionelle Obusfahrleitung .....	22
	Einfachoberleitungen.....	23
	Vorschriften in Bezug auf die Verlegung.....	24
2.4.3.	Systeme mit nicht durch den Fahrdraht geführten Stromabnehmern .....	28
2.5.	Konfiguration des Fahrleitungsnetzes .....	32
2.5.1.	Selektivität im Fehlerfall .....	32
2.5.2.	Senkung von Übertragungsverlusten .....	32
2.5.3.	Erkennbarkeit von Kurzschlüssen.....	33
2.5.4.	Vorzugsweise verwendete Konfiguration für Obusse .....	33
2.6.	Isolationsfehler und Erdung .....	34
3.	Übersicht über den Stand von Obus- und BOB-Systemen.....	36
3.1.	Ausgewählte Beispiele für Oberleitungsbusnetze .....	36
3.1.1.	Übersicht .....	36
3.1.2.	Eberswalde (BBG – Barnimer Busgesellschaft) .....	37
3.1.3.	Esslingen .....	39
3.1.4.	Solingen .....	41
3.1.5.	Arnheim (Niederlande).....	43
3.1.6.	Fribourg .....	43
3.1.7.	St. Petersburg.....	44
3.1.8.	Marrakesh.....	44
3.1.9.	Zürich .....	45
3.1.10.	Shanghai .....	45
3.2.	Übersicht der Hersteller .....	46
4.	Betriebshof .....	48
4.1.	Anzahl der Busse in Planvariante 1 .....	48
4.2.	Fahrleitungsanlage im Betriebshof.....	48
4.3.	Einrichtungen zum Nachladen der Busse .....	49
4.3.1.	Nachladung über konventionelle Fahrleitung .....	49
4.3.2.	Punktförmige Pantographenlösungen .....	50
4.3.3.	Steckerlösungen.....	50
4.4.	Technische Ausstattung.....	50

4.4.1.	Wartung von Elektrobussen und deren Komponenten .....	51
4.4.2.	Elektrowerkstatt mit Prüfplatz und Prüfgeräten .....	52
4.4.3.	Erschließung.....	52
4.4.4.	Energie- und Leistungsbedarf .....	52
5.	Qualifizierung des Personals .....	55
5.1.	Allgemeines .....	55
5.2.	Qualifikationsstufen .....	56
	Quellenverzeichnis .....	57
	Tabellenverzeichnis.....	60
	Abbildungsverzeichnis.....	61

<b>Revisions- nummer</b>	<b>Datum</b>	<b>Verfasser</b>	<b>Kommentar</b>
-	07.02.2023	ARGE BOB Marburg IFB VI	Entwurf
0	14.04.2023	ARGE BOB Marburg IFB VI	Freigabe

## 1. Elektrische Energiespeicher

### 1.1. Kenngrößen von Akkumulatoren

Bevor im Folgenden Energiespeicher miteinander verglichen werden, sollen an dieser Stelle die wichtigsten Kenngrößen und Begriffe in Bezug auf Akkumulatoren erläutert werden. Ein Akkumulator (kurz Akku; auch Sekundärbatterie oder ugs. Batterie genannt) ist ein wiederaufladbares galvanisches Element, bestehend aus zwei Elektroden und einem Elektrolyten, das elektrische Energie auf elektrochemischer Basis speichert. Ein einzelnes wiederaufladbares Speicherelement wird Sekundärzelle genannt.

#### 1.1.1. Spannungen

Die Spannung von galvanischen Zellen ist abhängig von der Art der Elektroden, des Elektrolyts, sowie der Temperatur. Die aktuell nutzbare Spannung einer galvanischen Zelle ergibt sich aus dem Ladezustand und aufgrund der Selbstentladung der Zeit seit dem letzten Aufladen.

##### *Entladespannung*

Die Entladespannung beschreibt die minimale Spannung bis zu welcher ein Akkumulator betrieben werden darf. Die Nichteinhaltung dieser, vom Hersteller angegebenen Grenze, führt in der Regel zu irreparablen Schäden.

##### *Ladeschlussspannung*

Die Ladeschlussspannung beschreibt die maximale Spannung, die an einem Akkumulator angelegt werden darf. Das Überschreiten dieser, ebenfalls vom Hersteller angegebenen Grenze führt ebenfalls zu irreparablen Schäden bis hin zur Selbstentzündung des Akkus.

##### *Nennspannung*

Die Nennspannung ist ein spezifischer Wert, mit dem die mittlere Entladespannung im Betrieb einer Batteriezelle angegeben wird. Die Nennspannung eines Akkublocks ergibt sich aus der Summe der miteinander in Reihe geschalteten Batteriezellen. In Tabelle 1-1 werden die Nennspannungen geläufiger Zellentypen aufgelistet.

Tabelle 1-1: Nennspannungen häufig verwendeter Zelltypen

Zellentyp	Nennspannung
Nickel-Metallhydrid	1,2 V
Blei-Bleioxid	2,0 V
Lithium-Titanat	2,3 V
Lithium-Eisenphosphat	3,2 V – 3,3 V
Lithium-Ionen	3,7 V
Lithium-Polymer	3,7 V

##### *Ruhespannung*

Die Ruhespannung entspricht der messbaren Spannung über den Klemmen der unbelasteten Batterie. Der maximal messbare Wert wird nach einem vollständigen Aufladeprozess erreicht. Aufgrund der unvermeidlichen Selbstentladung von Batterien sinkt der Wert mit zunehmender Zeit ab. Bei Li-Ionen Batterien besteht beispielsweise ein proportionaler Zusammenhang zwischen messbarer Ruhespannung und aktuellem Ladezustand (State of Charge, SoC).

### 1.1.2. Innenwiderstand

Der Innenwiderstand ist eine wichtige Systemgröße zur Beschreibung der Belastbarkeit einer Batterie, da sie zur Bestimmung der (aktuell) maximal verfügbaren Leistung benötigt wird. Die vom Innenwiderstand verursachten Verluste steigen quadratisch mit dem fließenden Strom an und werden in Wärme umgewandelt. Die messbare Klemmspannung über der Batterie ergibt sich durch Subtraktion aus Ruhespannung und Spannungsfall über dem Innenwiderstand.

### 1.1.3. Kapazität und C-Rate

Die Kapazität beschreibt, wieviel Strom der Akku über einen bestimmten Zeitraum abgeben kann und wird in Amperestunden angegeben. Die Kapazität einer Batterie wird üblicherweise über einen Zeitraum ermittelt. Wird beispielsweise für einen Akku eine Kapazität von 1 Ah angegeben, bedeutet dies, dass diese für einen Zeitraum von fünf Stunden einen Strom mit 0,2 A liefern kann. Die tatsächlich abrufbare Leistung ergibt sich dann durch Multiplikation mit der aktuellen Klemmspannung.

Batterieentwickler streben normalerweise eine Steigerung der Kapazität bei gleichbleibenden Batteriegrößen an. Dabei wird oft ein Anstieg des Innenwiderstands akzeptiert.

Zudem wird die verfügbare Kapazität durch den maximalen Entladestrom begrenzt. Einen schnellen Überblick über die tatsächliche Belastbarkeit und Schnellladefähigkeit erhält man durch die angegebenen C-Raten.

$$\text{C-Rate: } C_{Bat} = \frac{\max(I_{Bat})}{Q_{Bat}}$$

mit:  $I_{Bat}$ : Lade- bzw. Entladestrom,  $Q_{Bat}$ : Nennkapazität der Batterie

Der Batteriehersteller definiert, mit welcher C-Rate eine Batterie maximal geladen bzw. entladen werden darf. Die C-Rate für das Entladen ist allgemein um ein Vielfaches größer als die C-Rate für das Laden.

### 1.1.4. Energiedichte

Die Energiedichte wird zwischen volumetrischer und gravimetrischer Energiedichte unterschieden.

Die gravimetrische Energiedichte beschreibt, wieviel Energie pro Masse der Batterie gespeichert werden kann. Sie wird in Wattstunden pro Kilogramm angegeben. Je höher die Energiedichte ist, desto leichter ist eine Batterie bei gleicher gespeicherter Energiemenge. Lithium-Ionen-Batterien haben im Vergleich zu Blei-Säure-Batterien etwa eine dreifach höhere gravimetrische Energiedichte. Das bedeutet, dass eine Lithium-Ionen-Batterie, welche die gleiche Energiemenge wie eine Bleisäure-Batterie speichert, nur ein Drittel von der Blei-Säure-Batterie wiegt.

Die volumetrische Energiedichte beschreibt, wieviel Energie pro Volumen aus einer Batterie entnommen werden kann. Sie wird in Wattstunden pro Liter angegeben. Je höher die volumetrische Energiedichte, umso kleinere Maße hat eine Batterie bei gleicher gespeicherter Energiemenge.

### 1.1.5. Zyklenzahl

Wenn ein Akku einmal geladen und anschließend wieder entladen wird, spricht man von einem Zyklus. Wird dieser Vorgang bis zur maximalen Lade- bzw. Entladegrenze durchgeführt, spricht man von einem Vollzyklus. Mit der sogenannten Zyklenzahl kann nun die

Lebenserwartung eines Akkus beschrieben werden. Spricht man beispielsweise bei einem Akku von einer Zyklenzahl von 2.000, dann bedeutet dies, dass er 2.000-mal entladen und erneut geladen werden kann, ohne dass ein Kapazitätsverlust größer als 20 % eintritt. Die Zyklenzahl ist jedoch nur ein grober Richtwert, da sie die Verwendung des Akkus unter Idealbedingungen voraussetzt, was nur in seltensten Fällen zutrifft. Wird mit einem Akku nicht betriebsgerecht umgegangen, so kann sich seine Zyklenzahl drastisch reduzieren.

## 1.2. Speichertechnologie für Traktionsanwendungen

Ein geeigneter Energiespeicher für die Versorgung des Traktionskreises und der Bordnetzverbraucher von Fahrzeugen im Allgemeinen und Bussen im Speziellen, muss den folgenden Anforderungen genügen [26]:

- geringe Beschaffungs- und Betriebskosten,
- hoher Wirkungsgrad beim Laden und Entladen,
- hohe Energiedichten, so dass die Speicher klein und leicht gehalten werden können,
- hohe Leistungsdichten, für die fahrdynamische Performance und die effektive Aufnahme von Rekuperationsenergie,
- kurze Nachladezeiten, für eine hohe Verfügbarkeit,
- sicherer Betrieb muss gewährleistet sein, um zusätzliche Gefährdung auszuschließen,
- hohe kalendarische und zyklische Lebensdauer,
- günstiger ökologischer Fußabdruck.

Für derzeitige und geplante moderne Elektrobusse werden Akkumulatoren (wiederaufladbare Sekundärzellen) und Kondensatoren als Energiespeichersysteme eingesetzt. Einen ersten vergleichenden Überblick verschiedener Energiespeichersysteme vermitteln Ragone-Diagramme, in denen die Energie- und Leistungsdichtebereiche unterschiedlicher Speichertechnologien gegenübergestellt werden. Das Ragone-Diagramm in Abbildung 1 zeigt u.a., dass Doppelschichtkondensatoren (Super-Caps) sehr hohe spezifische Leistungen generieren können, die spezifischen Energien gegenüber Batterien aber gering sind. Umgekehrt lassen sich mit Akkumulatoren gegenüber Kondensatoren nur verhältnismäßig geringe Leistungen generieren. Gegenüber dem orange dargestellten, konventionellen Dieselmotorsatz zeigt sich, dass die spezifische Energie aller alternativen Speichertechnologien um Zehnerpotenzen niedriger ist. Daraus folgt, dass batteriegestützte Antriebe prinzipiell schwerer als Dieselfahrzeuge mit vergleichbarer Reichweite sind.

Neben Energie- und Leistungsdichte haben Energiespeicher individuelle Vor- und Nachteile. Für heute gängige, moderne Technologien sind in vergleichend gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass keine ideale Energiespeicher-Technologie existiert.

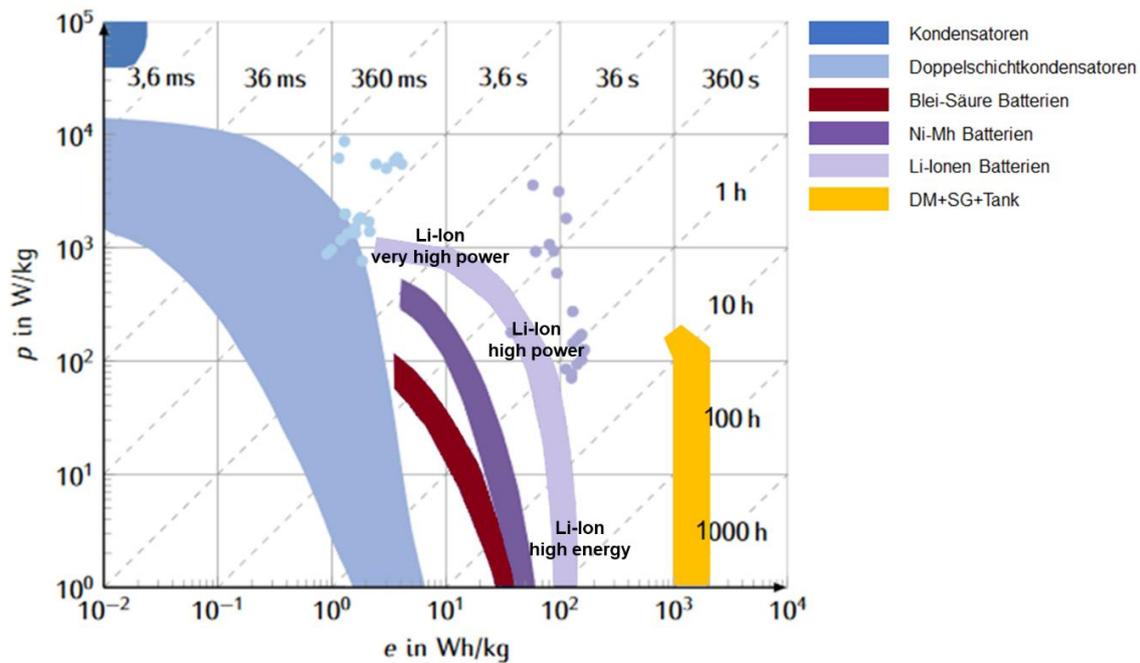


Abbildung 1-1: Ragone-Diagramm für Traktionsspeicher

Tabelle 1-2: Vergleich von Traktionsspeichertechnologien, nach [26],[29]

	<b>Li-Ionen-Akkus</b>	<b>NiMH-Akkus</b>	<b>Super-Caps</b>
Vorteile	Höchste Energiedichte Geringes spezifisches Gewicht Hohe Zell-Nennspannung, daher erhöhte spez. Leistung Gute Zyklfestigkeit und Lebensdauer Kein „Memory Effekt“ Geringe Selbstentladung	Zuverlässig und robust (kurzzeitig) Tiefentladefähig Gut geeignet für hohe Ströme, da geringer Innenwiderstand Höhere Standzeiten möglich	Zuverlässig und robust Wartungsarm Hohe kalendarische Lebensdauer Hohe Zyklenzahl Sehr große Leistungsdichte Hoher Wirkungsgrad
Nachteile	Hohe Kosten Reaktiv mit Luft und Feuchtigkeit Anfällig für Überladung Aufwändiges Batteriemangement notwendig (elektrisch und thermisch) Temperaturanfällig	Hohe Selbstentladung Schlechte Zykleneffizienz Nur begrenzt schnelladefähig Geringere Energiedichte Aufwendige Batteriepflege zur Reduktion des „memory Effekts“	Hohe Selbstentladung Großer Spannungshub Sehr geringe Energiedichte Hoher Überwachungsaufwand Große Gefahr bei falscher Bedienung Hohe Kosten

Super-Caps sind als reine Traktionsenergiespeicher aufgrund der viel zu geringen Energiedichten ungeeignet. Jedoch bieten sie Potenziale, in Kombination mit Batterien, deren begrenzte Leistungsdichten zu kompensieren.

Die NiMH-Batterien wurden in der Vergangenheit besonders in Mild- und Full-Hybrid-Fahrzeugen eingesetzt. Aufgrund deutlich größerer Energiedichten, der spezifischen Leistung, der Möglichkeit zur Schnellladung und deutlich verringerter Selbstentladungsraten werden heute aber im Hybrid- und Elektrofahrzeugesektor Li-Ionen Akkus verwendet.

Li-Ionen-Batterien werden als Hochenergiebatterien und Hochleistungsbatterien hergestellt (siehe Abbildung 1-1). Während für rein elektrische Fahrzeuge eine hohe Energiedichte zur Erzielung großer Reichweiten wesentlich ist, sind für Hybridfahrzeuge hohe Leistungsdichten zur Erzielung hoher Beschleunigungsvorgänge und zur schnellen Speicherung von großen Anteilen der Bremsenergie bedeutend.

Der im Folgenden dargestellte Vergleich von drei in Hybridfahrzeugen üblicherweise eingesetzten Hochleistungs-Li-Ionen-Akkutypen aus unterschiedlichen Elektrodenmaterialien – Lithium-Eisenphosphat (LiFePo<sub>4</sub> bzw. LFP), Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) und Lithiumtitanat (LTO) – und einem kommerziellem Doppelschichtkondensator wurde in [27] veröffentlicht. Es werden im Speziellen die Leistungsmerkmale, das Lade- und Entladeverhalten und das thermische Verhalten der Zellen beim Betrieb mit unterschiedlichen C-Raten und unterschiedlichen Umgebungstemperaturen vergleichend gegenübergestellt.

### **1.2.1. Ruhespannungsverläufe**

Die in Abbildung 1-2 dargestellten Ruhespannungen (bei einer Temperatur von 25 °C) ergeben sich für die Li-Akkumulatoren aus der verwendeten Materialkombination für die Kathoden- bzw. Anodenelektrode. Beim Doppelschichtkondensator hängt sie von den Polplattenflächen und deren Abstand ab. Auffällig ist, dass der Spannungsverlauf der LFP-Kurve im Bereich zwischen 20% und 80% des SoC einen sehr flachen Spannungsverlauf hat. Dies erleichtert einerseits die Regelung der Ladespannung, erschwert aber gleichzeitig die Bestimmung des momentanen Ladezustandes.

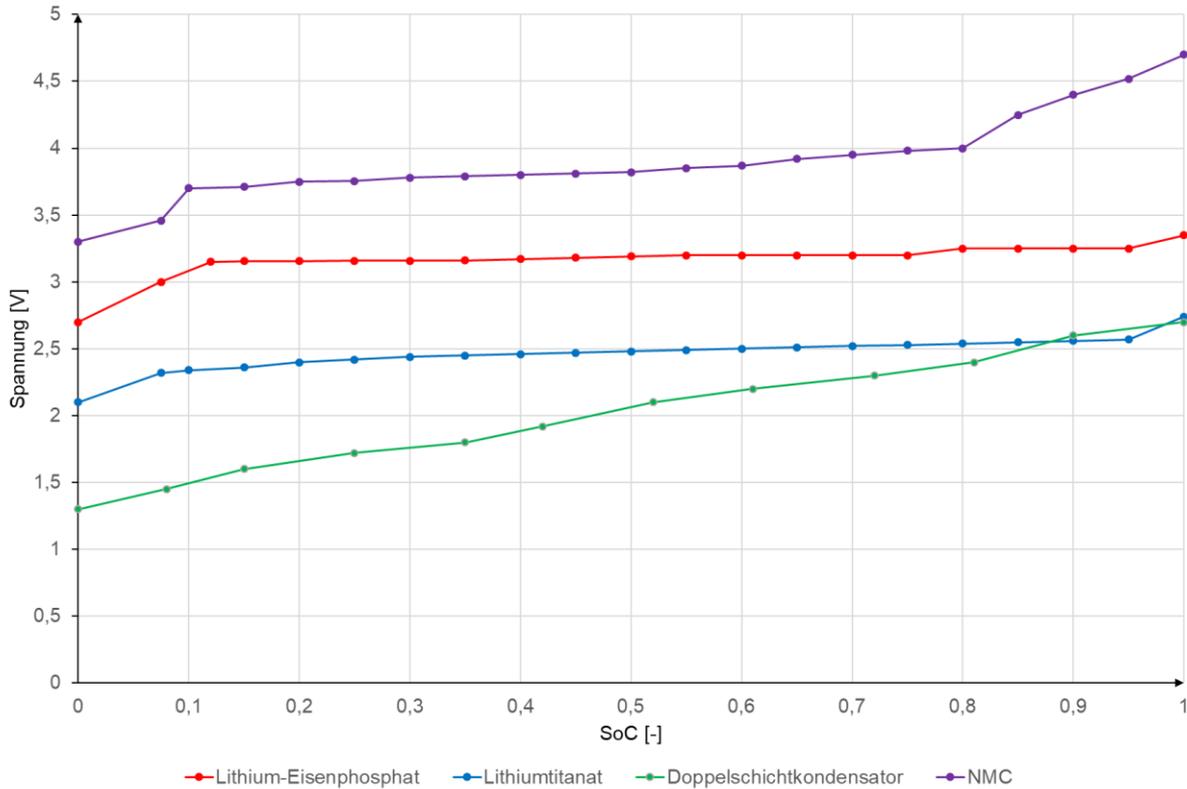


Abbildung 1-2: Ruhespannungsverläufe verschiedener Speichertechnologien, nach [28], [30]

### 1.2.2. Ladeverläufe

#### Entladen

Die Ladeverläufe von Energiespeichern spielen eine wichtige Rolle für den Betrieb von Hybrid- und Elektrofahrzeugen, da das Energiespeichersystem einerseits in der Lage sein muss große Ströme/Leistungen für Beschleunigungsvorgänge zu liefern und ebenso in der Lage sein sollte, die sich beim Bremsen ergebenden hohen Ströme und Leistungen mit steilem Gradienten aufzunehmen.

In Abbildung 1-3 sind die Verläufe der Kapazität in Abhängigkeit der Entladungsrate (C-Rate) bei einer Arbeitstemperatur von 25 °C dargestellt. Für alle Speichertechnologien ist zu erkennen, dass die verfügbare Kapazität mit zunehmender Entladungsrate abnimmt. Jedoch ergeben sich für identische Entladungsraten erhebliche Differenzen zwischen den Kapazitäten der Batterien und des Doppelschichtkondensators. Der Doppelschichtkondensator (SC) ist den Li-Batterien im Hinblick auf den Kapazitätserhalt überlegen. Er kann mit recht hohen Raten, bis zu 60 C, entladen werden, wobei die Ursprungskapazität um weniger als 5% abnimmt.

Im Gegensatz zum Kondensator, der die Ladungsträger elektrostatisch an der Elektrodenoberfläche speichert, wird die Energie in Batterien elektrochemisch durch Oxidations- und Redoxreaktionsvorgänge gespeichert. Daraus ergeben sich einerseits hohe Energiedichten, aber gleichzeitig auch verhältnismäßig langsame Reaktionsgeschwindigkeiten.

Es ist zu erkennen, dass die LTO-Batterie im Vergleich mit der LFP-Batterie und der NMC-Batterie überragende Entladeraten aufweist und demnach besser geeignet ist, Leistungen mit extrem variierenden und steilen Gradienten abzugeben.

Zudem ist die Kapazität von Li-Batterien stark abhängig von der Umgebungstemperatur. Bei niedrigen Temperaturen verringert sich die Leitfähigkeit des Elektrolyts, wodurch sich die

elektrochemischen Prozesse verlangsamen. In Folge erhöht sich der Innenwiderstand der Batterien und nutzbare Energie geht verloren. Unterhalb von  $-10\text{ °C}$  sollten die hier betrachteten Li-Speicher nicht betrieben werden. Dagegen funktioniert der Doppelschichtkondensator auch bei extremer Kälte und auch bei hohen Entladeraten wird die Kapazität nur minimal reduziert.

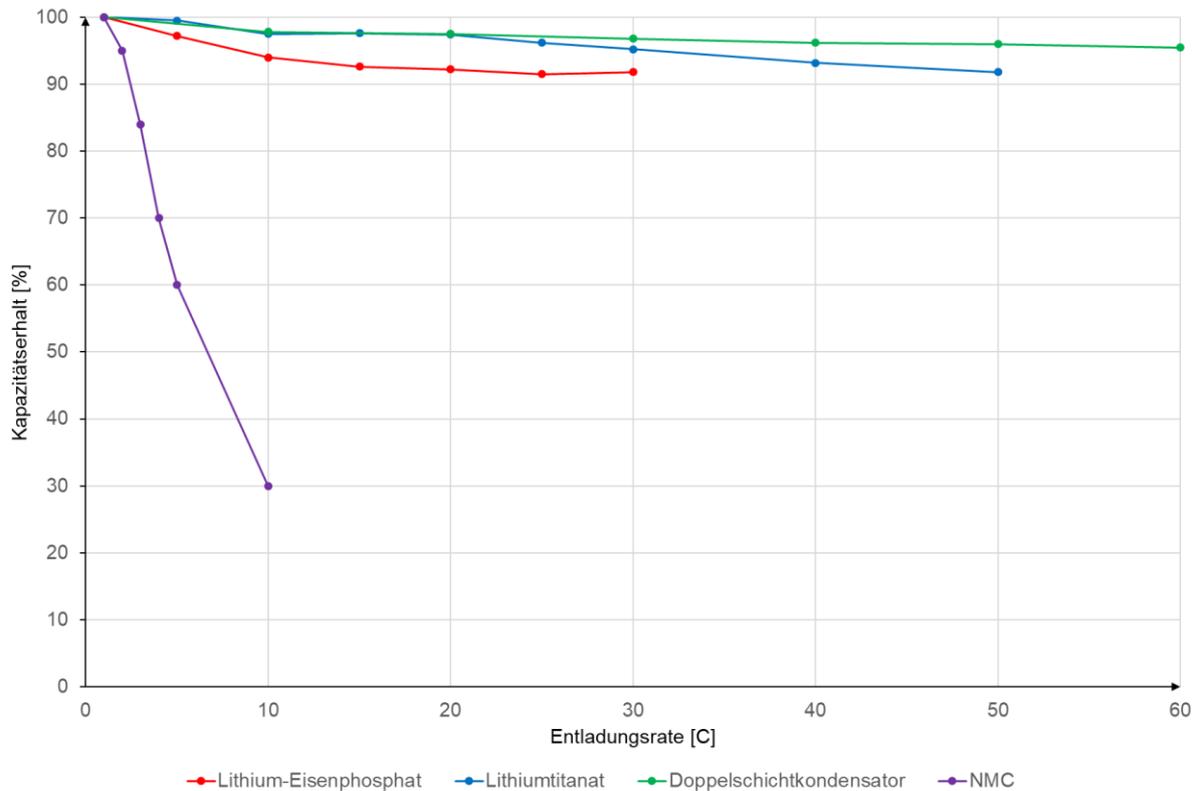


Abbildung 1-3: Kapazitätserhalt in Abhängigkeit der Entladungsrate verschiedener Speichertechnologien, nach [28], [29], [30]

### Aufladen

Für in der Vergangenheit entwickelte Dieselhybridbusse galt: Je höher der Hybridisierungsgrad eines Elektrobusses war, desto mehr Aufmerksamkeit wurde der Ladestromrate des Energiespeichers gewidmet, da die Rückgewinnung von rekuperierter Energie für den Kraftstoffverbrauch von besonderer Bedeutung ist. Für Batterie-Oberleitungsbusse (BOB) steigt die Bedeutung der Ladestromrate mit abnehmender Länge der Abschnitte mit Oberleitung an.

In Abbildung 1-4 sind für die Zelltypen LFP und LTO die Zellspannungsverläufe über der relativen Kapazität für verschieden große Laderaten dargestellt (bei einer Arbeitstemperatur von  $25\text{ °C}$ ). Zu beachten sind die unterschiedlichen aufgetragenen Laderaten, von  $0,5\text{ C}$  bis  $5\text{ C}$  bei LFP und von  $1\text{ C}$  bis  $30\text{ C}$  bei LTO-Batterien. Demnach erreicht die LFP-Batterie (gepunktete Linien) ihre Ladeschlussspannung bereits bei relativ kleinen Laderaten und kann nur bei relativ kleinen Laderaten die komplette zur Verfügung stehende Kapazität nutzen. Soll die Batterie komplett geladen werden, muss langsamer und mit geringerer Leistung nachgeladen werden. Dieselben Effekte zeigen sich für die LTO-Batterien erst bei etwa 5-fach höheren Laderaten.

Zur Darstellung des NMC-Ladeverlaufs lagen keine Daten vor. Festzuhalten ist, dass die NMC-Batterie prinzipiell mit maximal 10 C aufgeladen werden können und bei Laderaten größer als 3 C die Ladeschlussspannung umgehend erreicht wird.

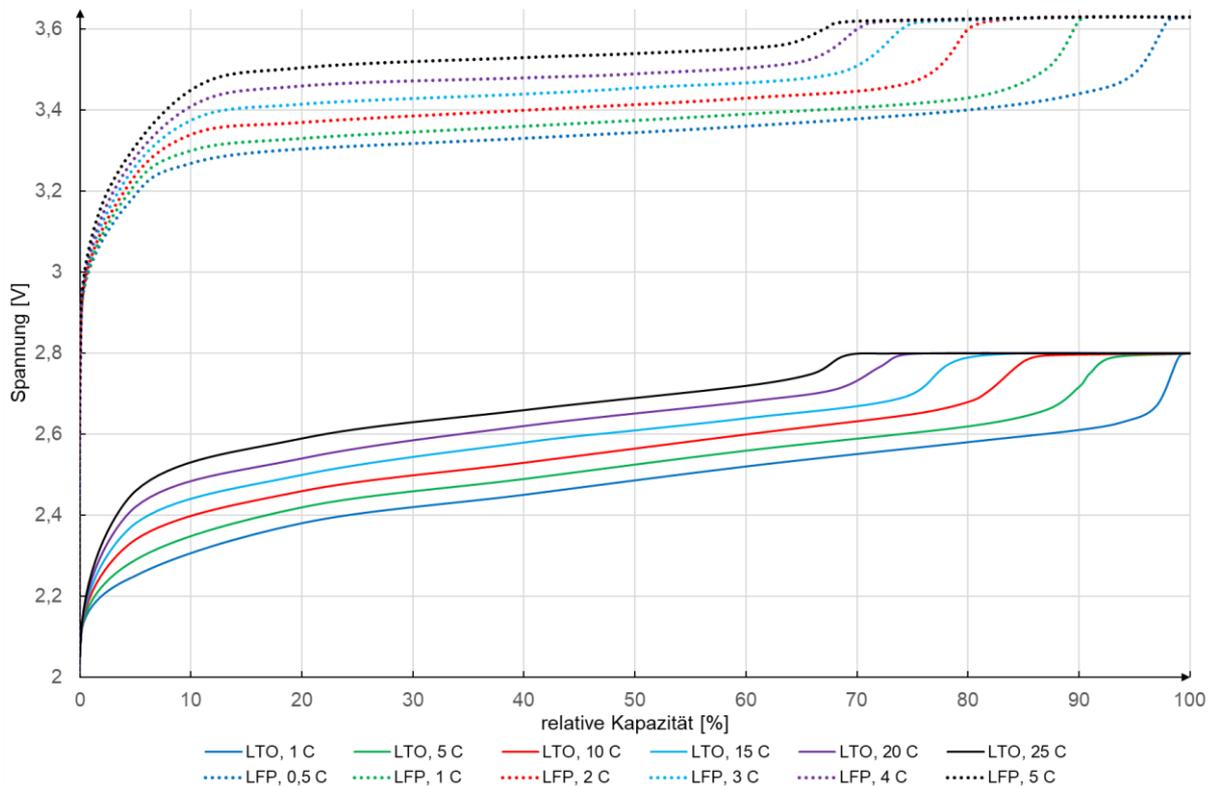


Abbildung 1-4: Vergleich der Aufladekurven von LTO- und LFP-Speichern, nach [28]

Üblicherweise werden Li-Batterien in einem Arbeitsbereich zwischen 30 % und 70-80 % des SoC betrieben, um so ein Überladen bzw. zu tiefes Entladen zu vermeiden, welches signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer hat.

Im Fahrbetrieb müssen Batterien von Elektrofahrzeugen teilweise Laderaten von 15 C bis 20 C standhalten können. Die LFP-Batterie kann bei einer Aufladerate von 10 C nur ca. bis zu 60 % der Gesamtkapazität mit der CC-Stufe (Konstantstrom) aufgeladen werden. Die restlichen 40 % müssen mittels CV-Ladeverfahren (Konstantspannung) aufgeladen werden. Bei der NMC-Batterie tritt dieser Effekt bereits bei Laderaten von 3 C ein. Dies zeigt, dass die LFP Batterie gegenüber der LTO-Batterie eine deutlich verminderte Schnellladefähigkeit besitzt und die NMC-Batterie für Schnellladungen prinzipiell ungeeignet ist.

Nicht dargestellt ist der sehr einfache, da lineare und von der Laderate unabhängige, Aufladeverlauf des Doppelschichtkondensators. Unabhängig von den Ladestromraten ist die Ladeleistung des Superkondensators elektrochemischen Energiespeichern deutlich überlegen.

### 1.2.3. Widerstands- und Leistungsverhalten

Der Innenwiderstand der Batterie beeinflusst direkt die Ausgangsleistung, den Wirkungsgrad und die Wärmeerzeugung der Batterie und wird zudem verwendet, um den Gesundheitszustand der Batterie zu ermitteln (State of Health, SoH). In Abbildung 1-5 werden die Lade-

und Entladewiderstandsverläufe von LTO- und LFP-Batterien verglichen. Es fällt auf, dass der Innenwiderstand der LTO-Batterie über den gesamten Betriebsbereich bedeutend geringer ist als von der LFP-Batterie – Folge des veränderten Elektrodenmaterials. Zudem unterscheiden sich die Verläufe von Lade- und Entladewiderstand bei der LFP-Batterie stärker als bei der LTO-Batterie. Laut [28] geht dies bei der LFP-Batterie zu Lasten der maximal erzielbaren Reichweite.

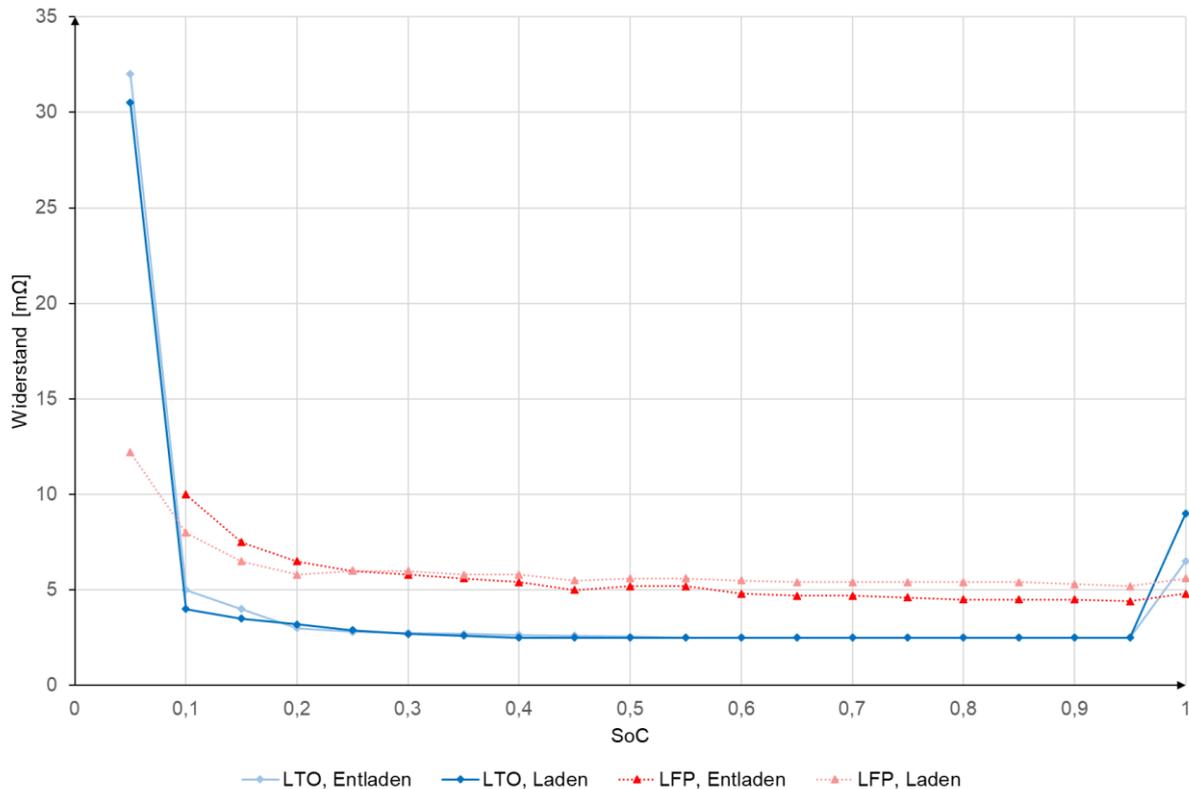


Abbildung 1-5: Vergleich der Lade- und Entladewiderstandsverläufe von LFP und LTO, nach [28]

Ein bedeutender Indikator für den Einsatz von Traktionsenergiespeichern sind die zugehörigen Leistungsmerkmale. So hängt beispielsweise der Grad der möglichen Hybridisierung vom Leistungsniveau des Energiespeichersystems ab. Abbildung 1-6 zeigt den sich ergebenden Verlauf der maximal nutzbaren spezifischen Leistung beim Entladen der Batterie (25 °C Arbeitstemperatur). Die spezifische nutzbare Leistung des Doppelschichtkondensators ist gegenüber den Batterien extrem erhöht. Dies zeigt eindrucksvoll, dass Kondensatoren besonders geeignet sind, wenn, wie beim Anfahren, in kurzen Zeiträumen hohe Leistungen benötigt werden. Der sich ergebende Leistungsverlauf zeigt die charakteristischen Vorteile der LTO-Speichertechnologie gegenüber der LFP- bzw. NMC-Technologie.

Noch deutlicher werden die Vorteile bei Betrachtung der Aufladeverläufe in Abbildung 1-7 (im Vergleich mit einem Supercap) bzw. Abbildung 1-8 (Vergleich der LTO- bzw. LFP-Batterien untereinander). Dabei zeigt sich, dass der Ladeleistungswert der LFP-Batterie signifikant schlechter ist gegenüber der LTO-Batterie. Die LTO-Batterie erscheint somit besser geeignet für Schnellladekonzepte und für Fahrzeugkonzepte bei denen die Rückgewinnung von möglichst viel Bremsenergie besondere Bedeutung beigemessen wird. Auf die Darstellung der NMC-Batterie wurde an der Stelle verzichtet, da sie, wie bereits erwähnt, nicht für Schnellladungen geeignet ist.

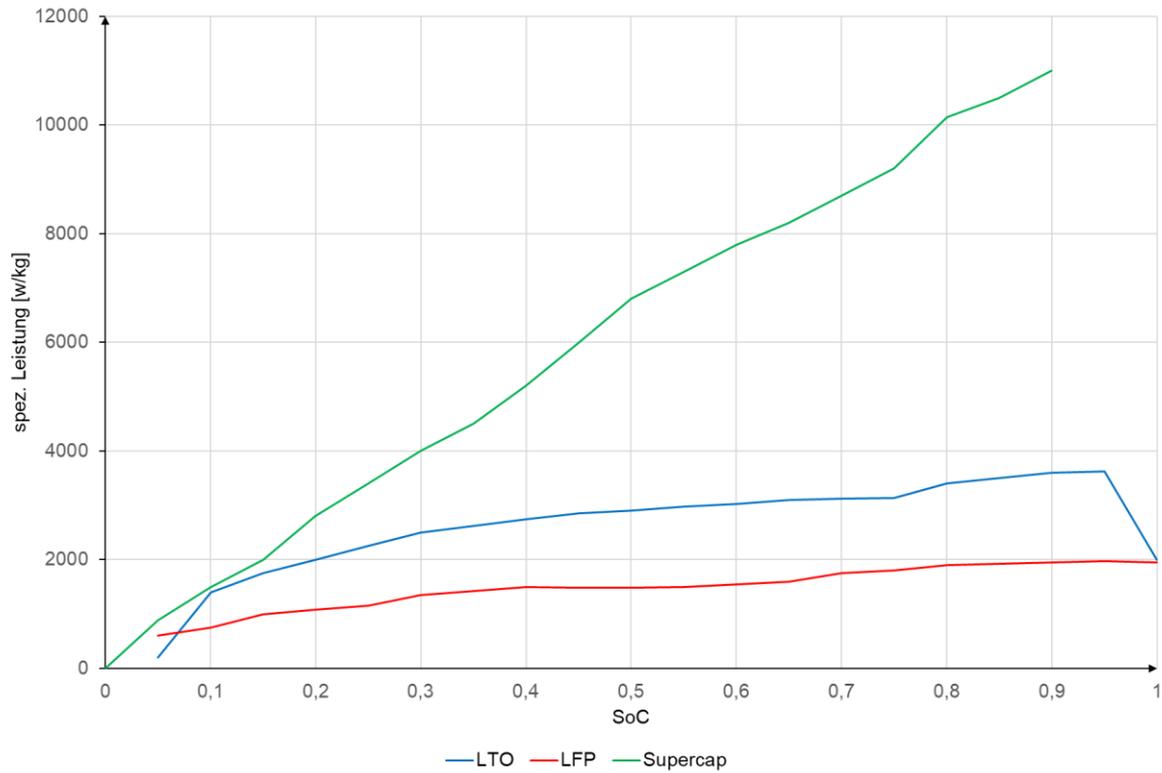


Abbildung 1-6: Verlauf der maximalen Entladeleistungen mit Hilfe eines Hybrid Pulse Power Test, nach [28]

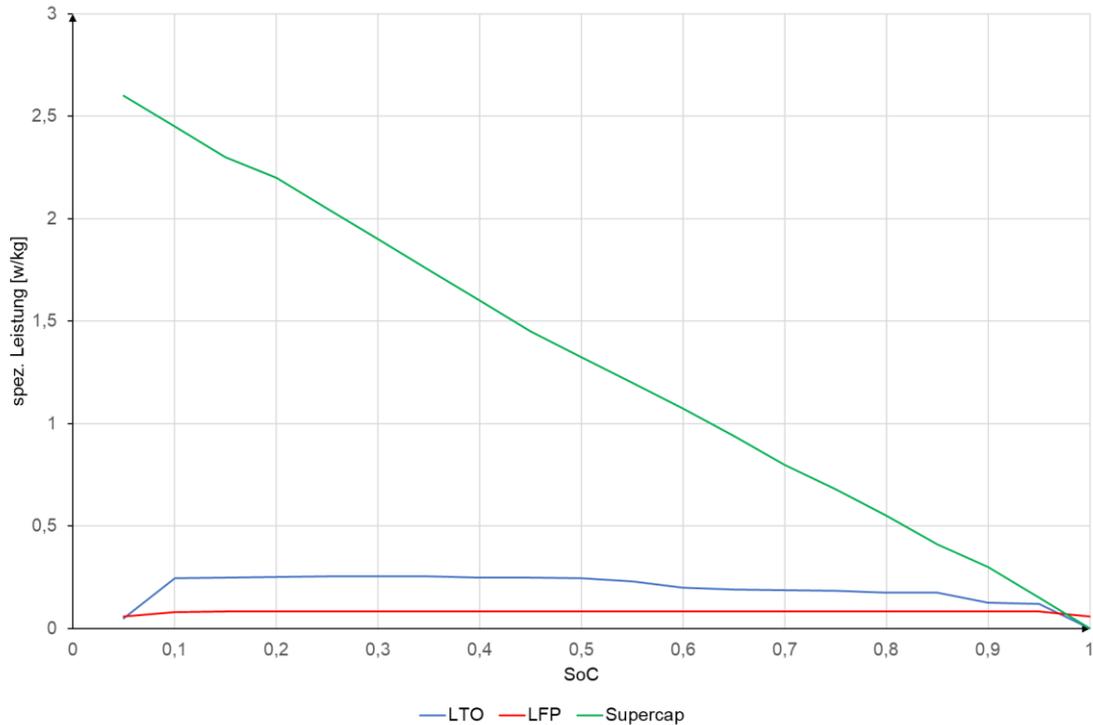


Abbildung 1-7: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen, nach [28]

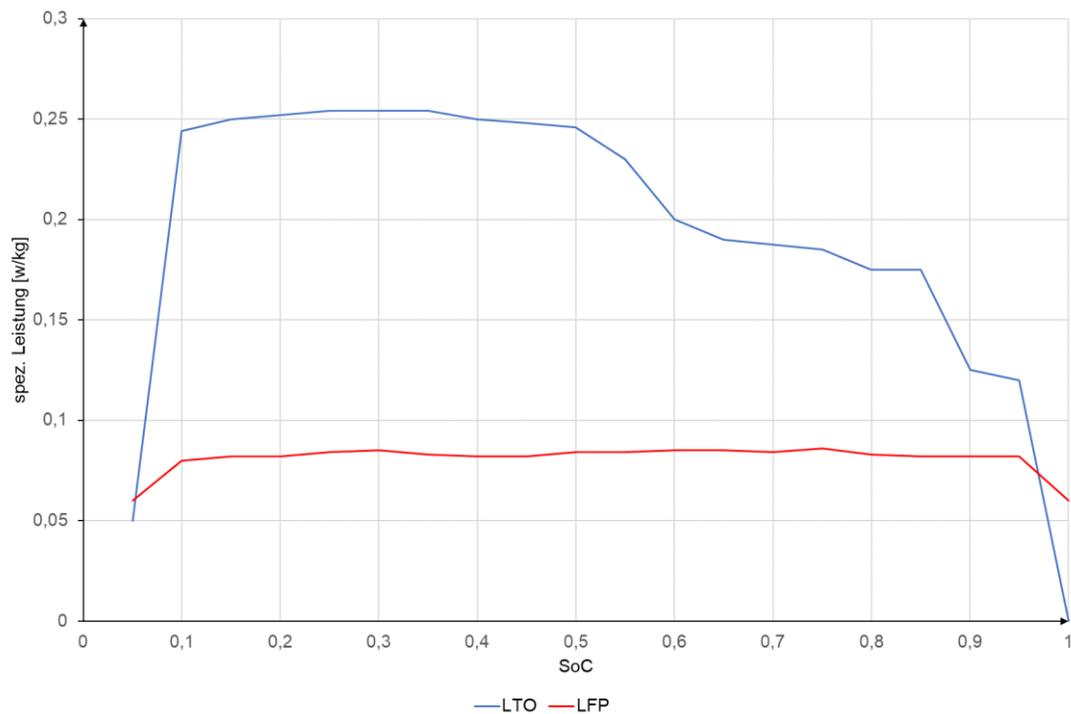


Abbildung 1-8: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen (nur LTO und LFP), nach [28]

Da der nominale Arbeitsbereich von Li-Batterien zwischen 30% und 80% SoC liegt, erscheint das temperaturabhängige Lade- und Entladeverhalten der Speicher bei einem SoC von 50% besonders repräsentativ. Die sich ergebenden Verläufe sind in Abbildung 1-9 und Abbildung 1-10 dargestellt. Einerseits sinkt, mit abnehmender Temperatur, die Ladung und somit auch die Entladungsleistungsrage. Andererseits ist zu erkennen, dass LFP-Batterien bei sehr tiefen Temperaturen gar nicht betrieben werden sollten.

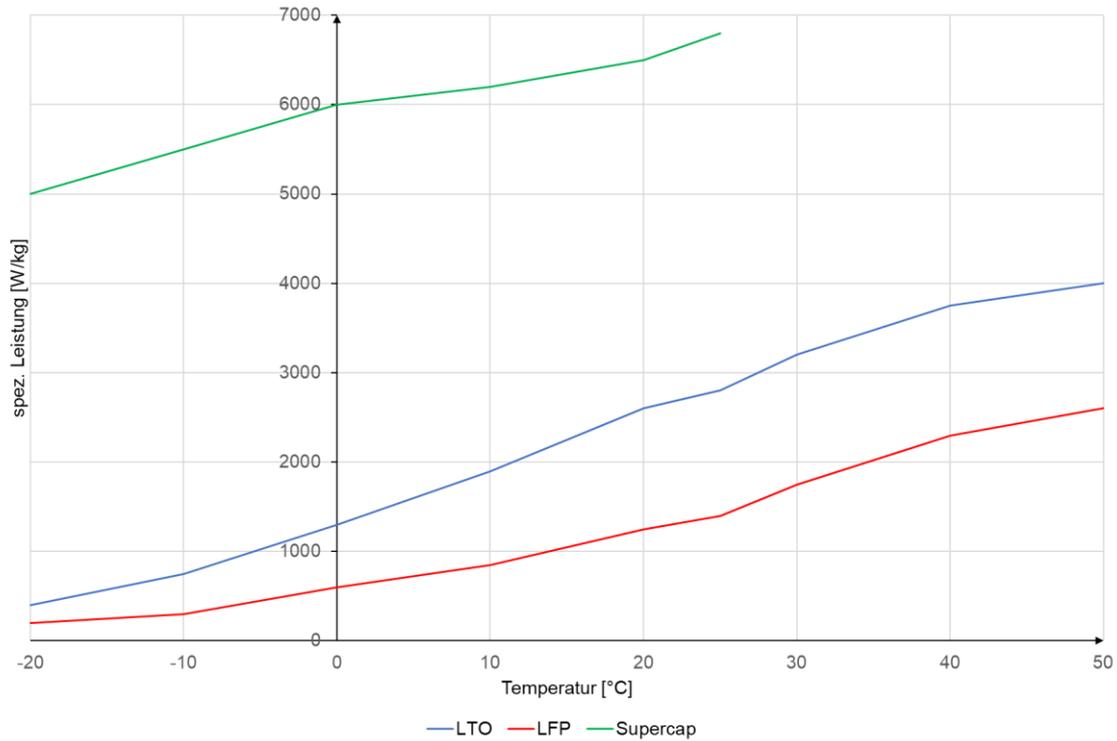


Abbildung 1-9: Vergleich der spezifischen Entladeleistungen bei 50% SoC, nach [28]

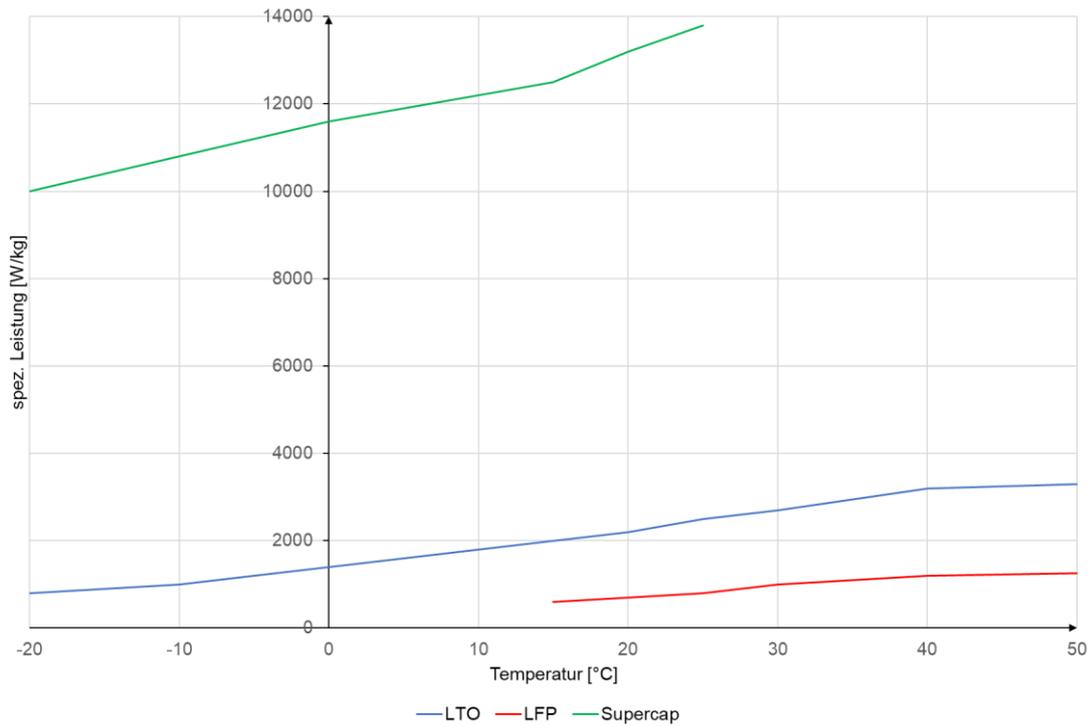


Abbildung 1-10: Vergleich der spezifischen Aufladeleistungen bei 50% SoC, nach [28]

#### 1.2.4. Vergleich der spezifischen Energien

Li-Ionen-Akkus sind für die Elektrotraktion aufgrund ihrer hohen spezifischen Energien (in Bezug auf deren Masse) besonders attraktiv. Abbildung 1-11 vergleicht die spezifischen Energien von LFP, LTO, NMC und Supercap bei einer Entladerate von 1 C bei 25 °C Arbeitstemperatur. Es wird deutlich, dass Doppelschichtkondensatoren als alleinige Energiespeicher ungeeignet sind. Es zeigt sich, dass die NMC-Batterie und die LFP-Batterie gegenüber der LTO-Batterie größere Energiemengen bei gleicher Masse aufnehmen können. Nicht dargestellt ist, dass auch die volumetrische Energiedichte der LTO-Batterie schlechter ausfällt als bei NMC- und LFP-Batterien. Das heißt, LTO-Batterien sind bei gleichen Kapazitäten größer und schwerer und somit weniger geeignet, wenn mit Hilfe des Energiespeichers große Distanzen ohne zwischenzeitliches Nachladen zurückgelegt werden sollen.

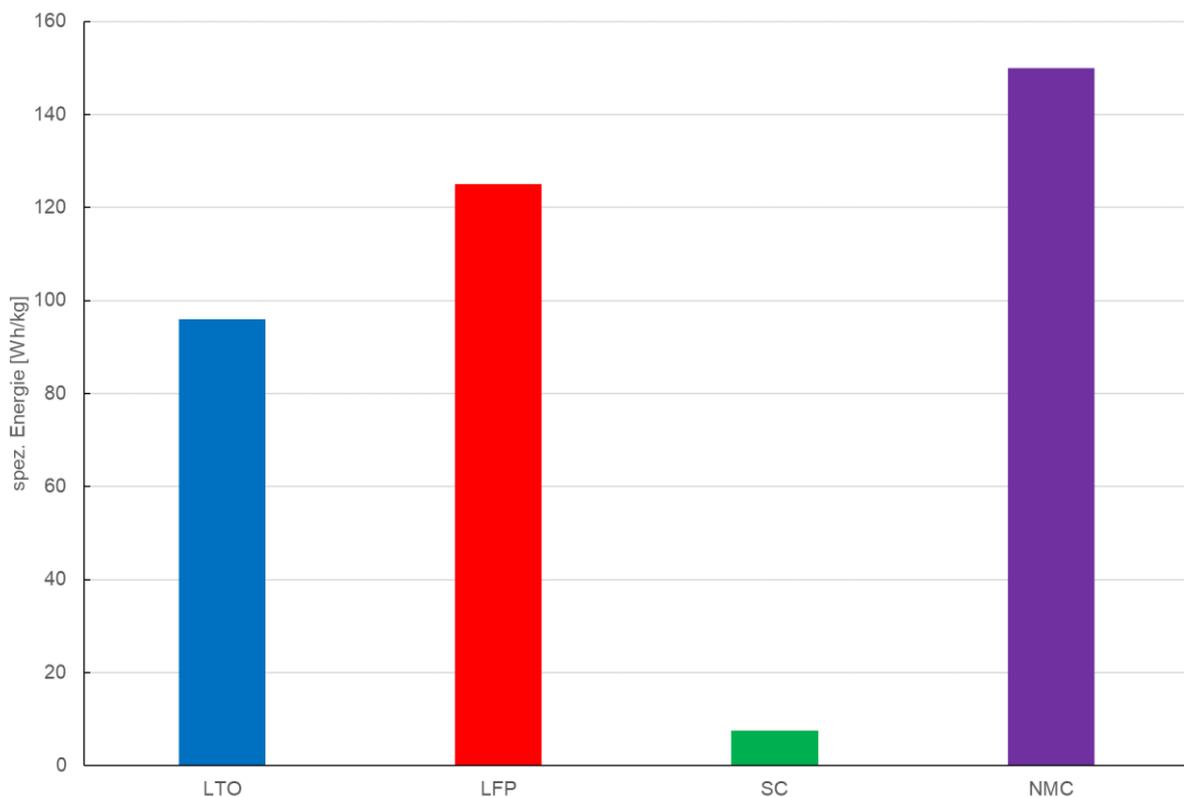


Abbildung 1-11: Vergleich der spezifischen Energien, nach [28]

#### 1.2.5. Zusammenfassung

Aus obigen Ausführungen geht hervor, dass keiner der vorgestellten Energiespeicher in allen Aspekten den anderen Speichertechnologien überlegen ist. Alle Energiespeicher weisen charakteristische Mängel auf, die ihren positiven Eigenschaften entgegenstehen. Letztendlich muss für jede Anwendung ein Kompromiss aus den verschiedenen Aspekten der Performance gefunden werden. In Abbildung 1-12 und Tabelle 1-3 sind die wichtigsten Eigenschaften der Energiespeicher übersichtlich gegenübergestellt.

Tabelle 1-3: Eigenschaften unterschiedlicher Li-Ionen-Batterien, nach [29]

LFP-Batterien	LTO-Batterien	NMC-Batterien
Moderates Spannungspotenzial: 3,2 V	Niedriges Spannungsniveau	Durchschnittliches Spannungspotenzial (3,8 V)
Gute Energiedichte: ca. 130 Wh/kg	Moderate Energiedichte: ca. 90 Wh/kg	Hohe Energiedichte: bis zu 230 Wh/kg
Hohe Lebensdauer	Hohe Zyklenzahl	Moderate Lebensdauer Gute Zyklenfestigkeit
Sehr hohe thermische Stabilität	Sehr hohe Eigensicherheit	Hohe Eigensicherheit
Günstige Materialkosten	Hohe Materialkosten	Günstige Herstellungskosten

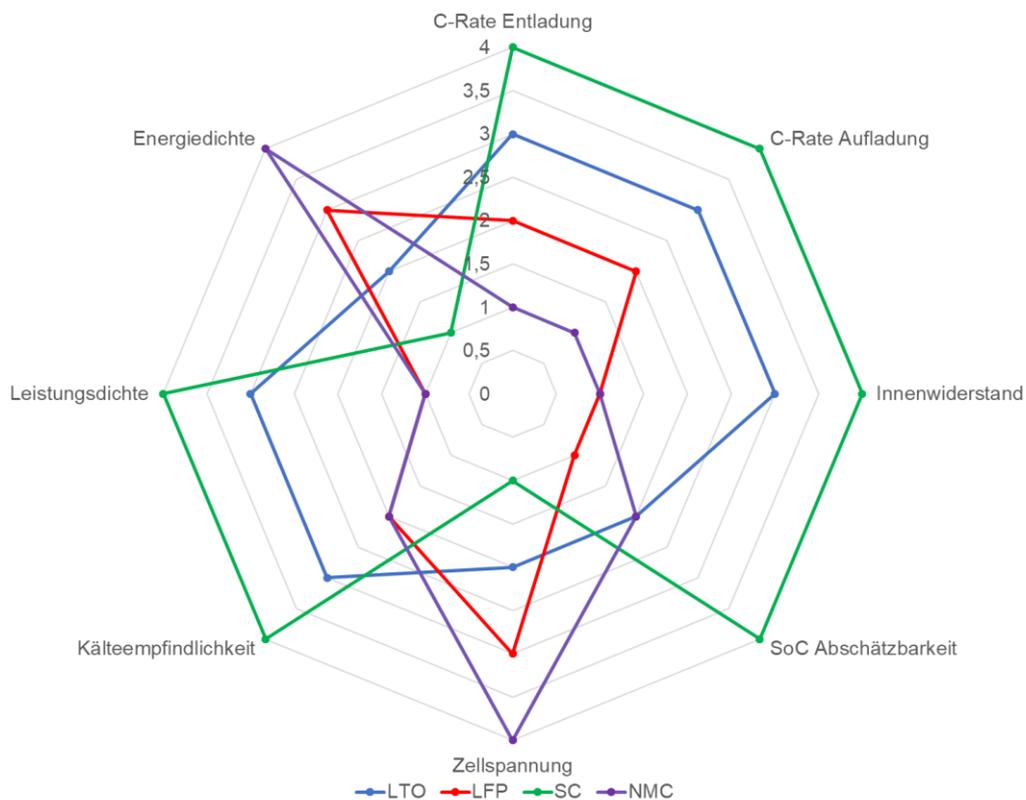


Abbildung 1-12: vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Traktionsspeicher, nach [27], [29]

## 2. Elektrische Infrastruktur

### 2.1. Grundaufbau

Die elektrische Infrastruktur eines Oberleitungsbus (Obus)-Betriebs besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

Unterwerk	Entnimmt Elektroenergie aus dem öffentlichen Versorgungsnetz und passt deren Form an die Bedingungen des Verkehrsmittels an.
Speiseleitung	Elektrische Verbindung zwischen Unterwerk und Fahrleitung (in der Regel Kabel).
Fahrleitung (auch Oberleitung)	Versorgt die Fahrzeuge mit Energie. Da sich die Fahrzeuge bewegen, ist ein ortsveränderlicher Kontakt erforderlich (in der Regel offener beschliffener Leiter).

Da die Speiseweite (die Länge von Speise- und Fahrleitungen ab Unterwerk) begrenzt ist, wird ein Fahrleitungsnetz von mehreren Unterwerken gespeist. Für Fahrzeuge mit Batteriespeicher können zusätzlich stationäre Ladeeinrichtungen vorhanden sein, die Fahrzeuge im Stillstand mit Energie versorgen (z.B. im Depot oder an Endhaltestellen).

### 2.2. Wahl des Spannungssystems

Fahrleitungen im öffentlichen Straßenraum können nur mit einer begrenzten Spannungshöhe betrieben werden, um das Risiko, dass ein elektrischer Überschlag auf Dritte (z. B. hohe Fahrzeuge) stattfindet, zu vermindern und auch um die möglichen Folgen eines dennoch stattfindenden Überschlags zu begrenzen. Relativ niedrige Spannungen bedingen im Betrieb höhere Ströme, was wiederum zu einem hohen Spannungsfall in Abhängigkeit von der Stromhöhe und der Entfernung vom Unterwerk führt. Straßenbahnen und Obus-Systeme werden daher mit Gleichspannung und nicht mit Wechselspannung betrieben, um einen zusätzlichen induktiven Spannungsabfall zu vermeiden. Dies bedingt wiederum Gleichrichteranlagen (sog. Gleichrichter-Unterwerke) zur Speisung der Fahrleitung.

Genormte Spannungsebenen nach EN 50163 und EN 50502 sind Nennspannungen von 600 V und 750 V Gleichspannung (siehe Tabelle 2-1). Die Normen erlauben gegenüber sonstigen Energieversorgungsnetzen relativ hohe Toleranzen in der Spannungshöhe, das heißt, die Fahrzeuge müssen für einen weiten Schwankungsbereich der Spannung ausgelegt werden. Die Toleranz nach unten ist erforderlich, weil sich Fahrzeuge bewegen und über den Weg vom Unterwerk zum Fahrzeug ein Spannungsabfall zu verzeichnen ist. Dieser steigt, je weiter man sich von der Einspeisung des Gleichrichters in die Fahrleitung entfernt. Eine größere Toleranz erlaubt längere Speiseweiten und damit eine Begrenzung der Investitionen in Unterwerke. Die Toleranz nach oben ist erforderlich, damit bremsende Fahrzeuge die verfügbare Leistung mit einer brauchbaren Reichweite in das Fahrleitungsnetz zurückspeisen können.

Straßenbahn- und Obus-Netze wurden über viele Jahrzehnte fast ausschließlich mit einer Nennspannung von 600 V DC betrieben. In den letzten Jahren stellen immer mehr Betriebe auf 750 V DC um, weil dies Vorteile hinsichtlich Speiseweiten, Kurzschlusserkennbarkeit und Verringerung thermischer Verluste bringt. Es wird daher empfohlen, für das BOB-System in Marburg von vornherein eine Nennspannung von 750 V DC zu verwenden. Eine noch höhere Nennspannung zu verwenden hätte den Nachteil, dass dann keine normierten Komponenten am Markt verfügbar wären.

Tabelle 2-1: Auszug aus EN 50163, Tabelle 1, mit den für Obus-Systeme üblichen Nennspannungen und deren Toleranzgrenzen. An der unteren Toleranzgrenze wird bei diesen beiden Nennspannungen nicht zwischen Dauer- und Kurzzeitwerten unterschieden.

Niedrigste nicht-permanente Spannung $U_{\min 2}$	Niedrigste Dauer-spannung $U_{\min 1}$	Nennspannung $U_N$	Höchste Dauer-spannung $U_{\max 1}$	Höchste nicht-permanente Spannung $U_{\max 2}$
400 V	400 V	<b>600 V</b>	720 V	800 V
500 V	500 V	<b>750 V</b>	900 V	1 000 V

### 2.3. Unterwerke

Gleichrichterunterwerke entnehmen Elektroenergie aus dem öffentlichen Versorgungsnetz der Mittelspannungsebene, also Dreiphasenwechselfspannung 10...30 kV mit Netzfrequenz 50 Hz. Sie verringern die Spannungshöhe auf die gewählte Leerlaufspannung (welche innerhalb der in Tabelle 2-1 beschriebenen Toleranz liegt) und wandeln diese Wechselfspannung dann in Gleichspannung um. Die Energie wird dann über Speiseleitungen in das Fahrleitungsnetz eingespeist. Auf beiden Seiten, zum Versorgungsnetz und zum Fahrleitungsnetz, gibt es Schaltanlagen zur Trennung des Unterwerks von den jeweiligen Netzen. Abbildung 2-1 zeigt die prinzipielle Struktur eines Gleichrichter-Unterwerks.

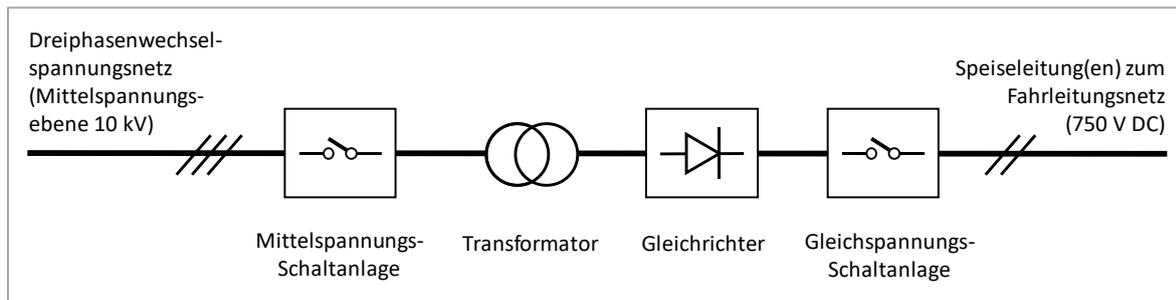


Abbildung 2-1: Prinzipielle Struktur eines Gleichrichter-Unterwerks

Unterwerke können zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und/oder der Redundanz mehrere Transformator-Gleichrichter-Einheiten besitzen. 12-pulsige Gleichrichter sind heute Stand der Technik, weil sie die Oberschwingungsbelastung des Fahrleitungsnetzes deutlich verringern. Generell können bei kleineren Nennleistungen der Gleichrichter auch 6-pulsige Gleichrichter eingesetzt werden. Diese Entscheidung ist im Rahmen der Ausführungsplanung mit dem lokalen Energieversorger abzustimmen. Mittels einer Simulation des Mittelspannungsnetzes können die Auswirkungen der unterschiedlichen Gleichrichterbrückenschaltungen dargestellt und eine Entscheidungsgrundlage gelegt werden.

Die Einspeisung in das Fahrleitungsnetz erfolgt üblicherweise mit einer Spannung von 10...20 % oberhalb der Nennspannung. Man nutzt hierbei die zulässige Toleranz (siehe Tabelle 2-1) aus, um durch die höhere Spannung die Ströme und damit die Verluste zu verringern.

Die Fahrzeuge, welche durch das Unterwerk versorgt werden, verbrauchen elektrische Energie, somit fließt die Energie aus dem Versorgungsnetz über die Fahrleitung zu den Fahrzeugen. Die umgekehrte Energierichtung, also die Übertragung von rückgespeicherter Bremsenergie der Fahrzeuge durch das Unterwerk in das öffentliche Versorgungsnetz, ist prinzipiell möglich, wird aber nur extrem selten angewandt. Ein bidirektionaler Gleich- bzw. Wechselrichter ist sehr viel teurer als ein einfacher monodirektionaler Gleichrichter. Die in das

vorgelagerte Mittelspannungsnetz zurückübertragene Energie ist meist nur sehr gering, weil es im Fahrleitungsnetz oft genug weitere Fahrzeuge gibt, die in diesem Moment die Bremsenergie eines bremsenden Fahrzeugs direkt aufnehmen, wodurch ein Energiefluss ins Versorgungsnetz nur sehr selten zustande käme, was die höheren Investitionen nicht rechtfertigt. Durch einen hohen Vermaschungsgrad des Fahrleitungsnetzes und ggf. vorhandene zusätzliche Energiespeicher im Gleichspannungsnetz lässt sich ein hoher Ausnutzungsgrad rekuperierter Energie erreichen.

Das Unterwerk enthält Steuer- und Schutzfunktionen, um bei Fehlerzuständen (z.B. Kurzschluss), Überlastung oder bei Instandhaltungsarbeiten eine Abschaltung vorzunehmen. Diese Funktionen müssen im Rahmen weiterer Planungsphasen konkret definiert und im Betrieb koordiniert werden.

## 2.4. Fahrleitung und Stromabnehmer

Die vom Stromabnehmer beschliffenen Drähte der Oberleitung werden Fahrdrähte genannt. Wesentliche Aufgabe der Fahrdrähte ist es, einen ununterbrochenen Stromfluss beim Übertragen der elektrischen Leistung zu den Schleifleisten des Stromabnehmers als Schleifkontakt zu sichern. Dabei unterscheiden sich Obus-Fahrleitungen von Straßenbahn-Fahrleitungen prinzipiell dadurch, dass für Obusse zwei Fahrdrähte gezogen werden, für Straßenbahnen nur einer.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Grundlagen für Obusfahrleitungen sowie der Stand der Technik in Bezug auf konventionelle Obusfahrleitungen wiedergegeben. Anschließend wird auf alternative Systeme und deren technischen Stand eingegangen.

### 2.4.1. Grundlagen

Nach [1] ist eine Fahrleitungsanlage der Oberbegriff der Termini Stromschienenanlage, Oberleitungsanlage und Stromschienenoberleitungsanlage. Sie stellt die erforderliche Anlage zur Versorgung von Fahrzeugen mit elektrischer Energie über Stromabnehmer dar. Für Straßenbahnen und Obusse werden quasi ausschließlich Oberleitungsanlagen verwendet.

Eine Oberleitungsanlage ist nach [1] das Netzwerk zur Versorgung elektrisch angetriebener Fahrzeuge mit elektrischer Energie. Sie umfasst:

- alle Drähte und Seile wie Längs- und Quertragseile, Fahrdrähte sowie Bahnenergieleitungen wie Rückleitungsseile, Erdseile, Blitzschutzseile, Speiseleitungen, Verstärkungsleitungen und Negativfeeder, wenn sie auf den Tragkonstruktionen befestigt sind,
- Gründungen, Tragkonstruktionen und alle anderen Komponenten, die der Halterung, Seitenführung oder Isolierung der Leiter dienen sowie
- Schaltgeräte, Überwachungs- und Schutz Einrichtungen, die auf oder in unmittelbarer Nähe von Tragkonstruktionen installiert sind.

Eine Oberleitung ist eine Fahrleitung, die entweder über den Fahrzeugen oder seitlich davon angeordnet ist, zur Versorgung mit elektrischer Energie über Dach- oder Seitenstromabnehmer [1].

Im Gegensatz zur Schienenbahn wird vom Obus eine gewisse seitliche Flexibilität erwartet, z.B. um andere Fahrzeuge überholen zu können. Daher ist der Stromabnehmer entweder seitlich schwenkbar (konventionelle Bauart, welche in der Praxis quasi ausschließlich eingesetzt wird). In Betrieb bzw. Entwicklung für elektrisch betriebene LKW befinden sich Schleifleisten mit einer gewissen Breite (Sonderbauarten), welche entweder seitlich fixiert oder seitlich schwenkbar montiert sein können.

Die Straßenbahn besitzt üblicherweise eine einpolige Fahrleitung; die Rückleitung erfolgt über die Schienen. Der Obus fährt dagegen auf einer nicht-leitfähigen Fahrbahn. In den Anfangs-

zeiten des Obusses versuchsweise gebaute Systeme mit einer einpoligen Fahrleitung und einer in die Fahrbahn eingelassenen Rückleitungsschiene haben sich praktisch nicht bewährt, aufgrund des unzuverlässigen elektrischen Kontaktes zur Rückleitungsschiene; zusätzlich wäre hier das Fahrzeug streng spurgebunden. Daher muss Hin- und Rückleitung des Stroms durch eine zweipolige Fahrleitung realisiert werden.

Die zweipolige Fahrleitung des Obusses wird mit zwei parallel aufgehängenen Fahrdrähten ausgeführt. Auf Straßen, die Obus-Verkehr in beide Richtungen aufweisen, hängen also zwei Fahrdrähtepaare parallel. Die Aufhängung kann durch Maste mit Ausleger oder durch Quertragseile realisiert werden. Die Quertragseile werden ihrerseits an Masten oder Hauswänden befestigt.

Die mögliche Befahrgeschwindigkeit einer Fahrleitung hängt von der Qualität des Stromabnehmerlaufs ab. Der Durchhang der Fahrleitung zwischen den Aufhängepunkten beeinflusst den Stromabnehmerlauf negativ. Es existieren verschiedene Bauarten der Oberleitung, welche in Kapitel 2.4.2.1 beschrieben sind.

Zur Verringerung des resultierenden elektrischen Widerstands werden oft jeweils die Plusfahrdrähte bzw. die Minusfahrdrähte beider Fahrtrichtungen in Abständen miteinander verbunden (z.B. alle 250 m). Diese Maßnahme senkt die über der Fahrleitung abfallende Verlustleistung, doch bei Abschaltung der Fahrleitung (z. B. im Kurzschlussfall) sind beide Fahrtrichtungen betroffen.

In einigen Fällen reicht die Parallelschaltung von Hin- und Rückrichtung nicht aus, um für den Betrieb hinreichende Widerstandsverhältnisse zu erreichen. Dann müssen parallel Verstärkungsleitungen geführt werden. Weil sichtbare zusätzliche Leiter in der Regel unerwünscht sind, werden diese Leitungen als Kabel unterirdisch geführt und in Abständen von etwa 200...300 m mit der Fahrleitung verbunden.

Die Polarität der Fahrleitung ist nicht normativ vorgeschrieben. Nach EN 50119 soll im Falle eines geerdeten oder mit der Rückleitung einer Straßenbahn verbundenen Pols sich dieser außen an der Fahrbahn befinden, bei dem in Deutschland üblichen Rechtsverkehr also in Fahrtrichtung rechts.

## **2.4.2. Konventionelle Obusfahrleitung**

### **2.4.2.1. Fahrleitungsanlage und -bauart**

Fahrleitungsanlagen für Straßenbahnen und Obusse bestehen aus mehreren Drähten, welche mittels Ausleger oder Quertragseilen an einem oder mehreren Masten befestigt sind. Dabei haben die Anzahl der Masten sowie die Zahl der verwendeten Drähte einen signifikanten Einfluss auf die Baukosten. Aufgrund der temperaturabhängigen Materialausdehnung und der Art der Nachspannung kann die Fahrleitung durchhängen, was einen Einfluss auf die Befahrgüte (d. h. die Zuverlässigkeit des Kontakts zwischen Stromabnehmer und Fahrdraht) und somit die maximale Befahrgeschwindigkeit hat. Je nach Einsatzzweck haben sich verschiedene Bauarten etabliert, um die Aspekte Befahrgeschwindigkeit und Materialaufwand gegeneinander zu optimieren.

Grundsätzlich wird zwischen Einfachoberleitungen und Kettenwerks oberleitungen unterschieden. Erstere besteht aus einem Fahrdraht, welcher auf verschiedene Weisen direkt an den Masten aufgehängt und abgespannt wird. Bei einer Kettenwerks oberleitung ist zwischen den Masten ein zusätzliches Tragseil gespannt, an welchem der Fahrdraht mittels sogenannter Fahrdrähthänger zusätzlich zur Befestigung an den Masten aufgehängt wird; dadurch kann der Durchhang stark verringert und die Oberleitung somit wesentlich schneller befahren werden.

## Einfachoberleitungen

Für Straßenbahnen und Obusse werden aus ökonomischen Erwägungen an vielen Stellen Einfachoberleitungen gewählt, insbesondere bei ohnehin niedrigen Befahrgeschwindigkeiten oder wenn das Umfeld der Strecke, beispielsweise in engen Straßenzügen, den Bau einer Kettenwerksoberleitung erschwert. Bei Obus-Fahrleitungen mit Befahrgeschwindigkeiten bis 80 km/h sind Einfachoberleitungen generell üblich, da Kettenwerksoberleitungen sich aufgrund befürchteter optischer Beeinträchtigungen des Stadtbildes nur selten und nur außerhalb des Stadtgebietes durchsetzen konnten. Für Obusse ist daher die Ausführung der Fahrdrahtaufhängung hinsichtlich der möglichen Befahrgeschwindigkeit ein wesentlicher Aspekt.

Einfachoberleitungen von Straßenbahnen und Obussen weisen einige gemeinsame Merkmale auf:

- Häufig werden Einfachoberleitungen fest abgespannt; auf selbsttätig die Zugkraft regulierende Nachspanneinrichtungen wird verzichtet.
- Die Fahrdrahtlage und damit die Befahrgüte fest abgespannter Fahrdrähte hängen von der Umgebungstemperatur ab. Temperaturbedingte Längenänderungen des Fahrdrahtes führen zu einer Änderung der Zugkraft im Fahrdraht. Beim Anstieg der Temperatur sinkt die Fahrdrahtzugkraft ab und der Fahrdrahtdurchhang nimmt zu.
- Die bei großen Durchhängen vorhandenen Änderungen der Fahrdrathöhe und damit der Stromabnehmerarbeitshöhe führen zu einem erhöhten Verschleiß des Fahrdrahtes. Dieser ist an den Fahrdrahtaufhängepunkten besonders hoch, da hier der Stromabnehmer seine Bewegungsrichtung abrupt umkehren muss.

Bei der nicht nachgespannten Einfachfahrleitung ohne Nachspannung, Pendelaufhängung oder Beiseile sind Abstände der Aufhängung von ca. 30 m und kleiner erforderlich, damit der Durchhang nicht zu groß wird (bis zu 40 cm sind zulässig). Eine Befahrgeschwindigkeit von 40 km/h ist theoretisch möglich. Praktisch sollte eine solche Bauart nur bis 25...30 km/h eingesetzt werden, damit Materialbeanspruchung und Entgleisungsrisiko vermindert werden. Diese Fahrleitungsbauart kann daher nur dort empfohlen werden, wo die Geschwindigkeit ohnehin niedrig ist (z.B. auf kurvenreichen Abschnitten).

Um die Zahl der Aufhängepunkte zu reduzieren und die Qualität des Stromabnehmerlaufes bei einer Einfachfahrleitung zu verbessern, sind drei Maßnahmen möglich:

- **Nachspannen des Einfachfahrdrathes**  
Die Einfachoberleitung kann nachgespannt aufgehängt werden, wobei die Nachspannung durch Gewicht mit Umlenkrolle oder durch Federelemente erfolgt. Der maximale Abstand der Aufhängepunkte kann auf etwa 40 m erhöht werden. Befahrgeschwindigkeiten von 40...50 km/h sind möglich, wobei beim oberen Wert wiederum Materialbeanspruchung und Entgleisungsrisiko steigen.  
Diese Bauart ist als Standard im Stadtbereich zu empfehlen.
- **Einfachoberleitung mit Pendelaufhängung**  
Bei Einfachoberleitungen für Obusse kann sowohl die Befahrgüte verbessert als auch der Verschleiß verringert werden, wenn der Fahrdraht an pendelnden Aufhängungen befestigt wird. Abbildung 2-2 nach [24] zeigt eine solche Aufhängung. Eine pendelnde Aufhängung gleicht, im Gegensatz zu einer festen Aufhängung, die Längenänderungen bei wechselnden Umgebungstemperaturen aus und verringert damit die Zugkraftänderungen. Der Durchhang einer pendelnd aufgehängten Einfachoberleitung ist bei hohen Fahrdrattemperatures geringer als bei einer fest aufgehängten, wodurch diese schneller befahren werden kann. Der realisierbare Mastabstand bei Pendelaufhängungen liegt bei bis zu 35 m.

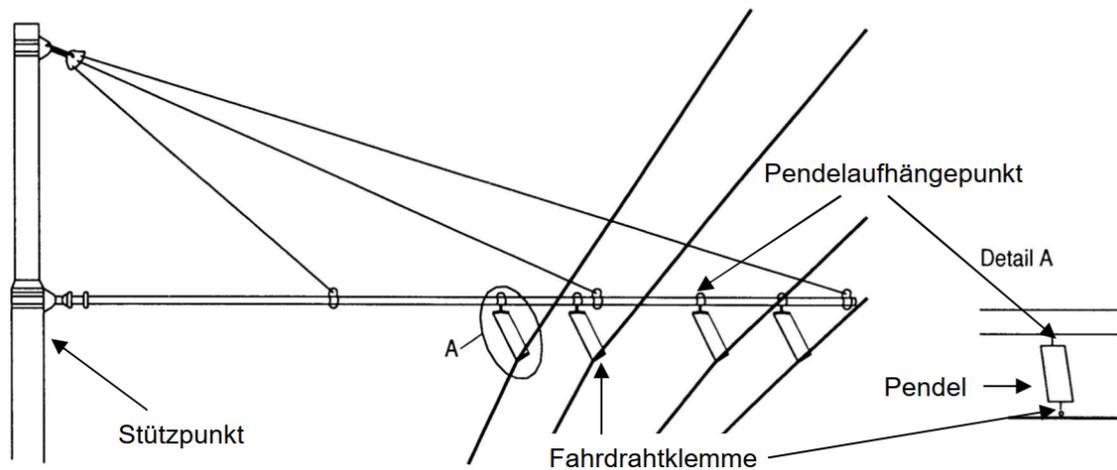


Abbildung 2-2: Prinzipieller Aufbau der Pendelaufhängung bei einer Obus-Fahrleitung [24]

- **Einfachfahrleitung mit Beiseil**

Eine weitere Möglichkeit, den Fahrdraht eines Obussystems aufzuhängen, ist die Einfachfahrleitung mit Beiseil (siehe Abbildung 2-3). Dabei werden an den Stützpunkten zusätzlich Beiseile in Dreiecksform angebracht. Die Beiseile überspannen  $\frac{2}{5}$  der Fahrleitung eines Feldes. Die Art der Aufhängung hat ein sehr gutes elastisches Verhalten.

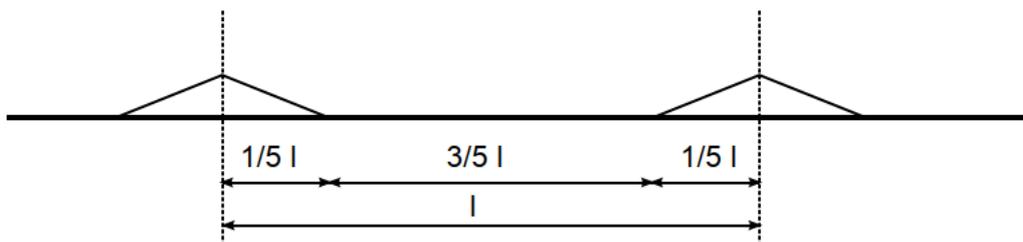


Abbildung 2-3: Einfachfahrleitung mit Beiseil [24]

Einfachoberleitungen mit Beiseil können zusätzlich mit einer Nachspannung ausgeführt werden. Alternativ ist der Einbau der Fahrleitung mit einem leichten Versatz in Längsrichtung (ähnlich wie Schrägpendelaufhängungen) möglich. Durch diese beiden Maßnahmen kann eine optimale Kompensation der temperaturbedingten Längenänderung des Fahrdrahtes erreicht werden. Durch die Beiseile verringern sich die Elastizitätsunterschiede längs des Fahrdrahtes auf ein Minimum. Dies hat zur Folge, dass sich auf Grund des besseren dynamischen Verhaltens zwischen Fahrdraht und Stromabnehmer die Qualität der Stromentnahme erhöht. Durch das bessere dynamische Verhalten verringert sich der Verschleiß und somit der Wartungsaufwand. Eine solche Oberleitungsbauart kann ggf. auch mit Geschwindigkeiten  $> 50$  km/h befahren werden.

### Vorschriften in Bezug auf die Verlegung

Nach EN 50119 soll der Abstand der beiden Fahrdrähte entweder 600 mm oder 700 mm betragen (horizontal), Lagetoleranz  $\pm 15$  mm. Fahrdrähte für Stangenstromabnehmer werden zur Vermeidung von unzulässigen Seitenbeschleunigungen ohne oder nur mit geringer Seitenverschiebung verlegt.

Die Nennhöhe über Fahrbahn ist ebenfalls in EN 50502 festgelegt mit 5.500...5.600 mm. Die Toleranz der Extremfälle über der Fahrbahn ist nicht standardisiert, doch wird in der Norm ein

bevorzugter Bereich von 4.700...6.500 mm angegeben (der untere Wert korrespondiert mit BOStrab §25). Ein niedriger Extremwert kann nützlich sein, um bestehende Brücken unterfahren zu können. Ein hoher Extremwert kann nützlich sein, um auf diesen Straßen noch bestimmte Schwerverkehre durchführen zu können (z.B. Werksausfahrten an einer Straße mit Fahrleitung). Praktisch wird es zweckmäßig sein, sich an die Nennhöhe und den bevorzugten Arbeitsbereich der Norm zu halten, um am Markt auf Standardlösungen zurück-greifen zu können.

Bei der konventionellen Bauart führt der Fahrdraht die Stromabnehmer. Dazu umfasst der Schleifschuh des Stromabnehmers den Fahrdraht von drei Seiten. Demzufolge werden an Abzweigen Weichen im Fahrdraht benötigt, um den Schleifschuh in die gewünschte Richtung zu lenken. Diese Weichen müssen vom Fahrzeug aus fernsteuerbar sein. Ebenso bedingt die Umfassung des Fahrdrahts durch den Schleifschuh, dass an Kreuzungen von Fahrdrähten beide Fahrdrähte unterbrochen werden müssen, damit die Führungskanten des Schleifschuhs am jeweils anderen Fahrdraht durchlaufen können ohne anzustoßen. Kreuzungen von Fahrdrähten treten nicht nur bei Kreuzungen von Strecken auf, sondern aufgrund des Doppelfahrdrachts bei jeder Weiche. Fahrdrahtkreuzungen müssen isoliert ausgeführt werden, weil die Mehrzahl der Kreuzungen Fahrdrähte verschiedener Polarität betrifft.

Übliche Fahrdrahtquerschnitte liegen bei 80...120 mm<sup>2</sup> Kupfer. Wegen der Umfassung durch den Schleifschuh müssen Fahrdrahtklemmen und -aufhängung so ausgebildet sein, dass sie den Lauf des Schleifschuhs nicht behindern.

Wegen der Führung des Schleifschuhs muss das Anlegen des Stromabnehmers am Fahrdraht („andrahten“ oder auch „eindrahten“) zielgenau erfolgen. Siehe dazu Kapitel 2.4.2.3.

#### **2.4.2.2. Stromabnehmer**

Die Stromabnahme erfolgt über zwei unabhängig bewegliche Stangen, eine je Fahrdraht/Pol. Sie sind in einer Konsole auf dem Fahrzeugdach vertikal und horizontal drehbar gelagert. Federn an der Stromabnehmerkonsole bewirken eine permanente aufwärts gerichtete Kraft, die zum Heben und zum Andrücken des Schleifschuhs an den Fahrdraht dient.

Am anderen Ende jeder Stange befindet sich ein Stromabnehmerkopf wie beispielhaft in der Abbildung 2-4 gezeigt:

- In der Öffnung des Stromabnehmerkopfes links vorn steckt die Stromabnehmerstange.
- Der metallisch glänzende Teil ist der sogenannte Schleifschuh.
  - Die seitlichen Flügel gewährleisten die Führung am Fahrdraht. Er ist in Form eines oben offenen U ausgebildet, um durch den Fahrdraht geführt zu werden.
  - Der untere Bereich des U ist innen mit einem auswechselbaren Kohleschleifstück versehen, auf dem der Fahrdraht gleitet.
  - Der Schleifschuh ist gegen die Stange drehbar gelagert, um unabhängig von der Auslenkung der Stange eine Stellung parallel zum Fahrdraht einnehmen zu können.



Abbildung 2-4 Stromabnehmerkopf (Quelle: Produktkatalog KIEPE [5])

Um den Schleifschuhen eine Anpresskraft am Fahrdrabt zu geben und um die Stromabnehmer nach einer Auslenkung wieder in die Fahrzeugachse zu holen, ist die Stromabnehmerstange neben dem Gelenk über Federn mit der Konsole verbunden. Nach EN 50119 soll die statische Kontaktkraft zwischen 70 N und 120 N liegen. Nach EN 50502 soll die Andruckfeder einstellbar sein, um Werte von mindestens 80 N bis 150 N zu erreichen. Der beiden Normen gemeinsame Bereich beträgt also 80 N bis 120 N.

Nach EN 50502 soll sich das Gelenk der Stromabnehmerkonsole in einer Höhe von 3100...3500 mm befinden. Ziel dieser Vorgabe ist es, der Stromabnehmerstange für alle Fahrdrabtlagen genug Bewegungsspielraum zu bieten und zudem die Rückstellkräfte nicht in einem konstruktiv schwer zu beherrschenden spitzen Winkel einzuleiten.

### 2.4.2.3. An- und Abdrahten

Das Heben und Senken der zwei Stromabnehmer erfolgt bei vielen bestehenden Obus-Systemen manuell mithilfe von isolierten Seilen und jeweils einer Aufwickeleinrichtung (auch Seilaufwickler, Fangtrommel oder Retriever genannt). Diese Aufwickeleinrichtung erlaubt langsame Bewegungen des Seils (um Höhenänderungen des Fahrdrabts zu folgen), bei einer „Entgleisung“ des Stromabnehmers (Schleifschuh springt von Fahrdrabt) wird dagegen das Hochspringen der Stromabnehmerstange auf einen kurzen Weg begrenzt. Die Seile werden auch zum manuellen An- und Abdrahten verwendet.

Die Stromabnehmer mit Aufwickeleinrichtung können zudem mit Pneumatikzylindern oder Magneten ergänzt werden, um eine Schnellabsenkung (bei Entgleisung des Stromabnehmers) durchzuführen.

Der letzte Stand der Technik sind Einrichtungen zum Halbautomatischen An- und Abdrahten der Stromabnehmer. Dabei befinden sich an der Stromabnehmerkonsole (z. B. pneumatische) Elemente zum Heben, Senken, Zentrieren und Verriegeln der Stromabnehmer. Auf die Seile kann verzichtet werden, wenn mit den Hebe- und Senkvorrichtungen auch die Bewegungsbegrenzung bei Stromabnehmerentgleisung realisiert wird. Viele Fahrzeuge der in Kapitel 3.1 vorgestellten BOB-Systeme besitzen diese Seile, obwohl sie aufgrund der häufigen An- und Abdrahtevorgänge mit Technik zum halbautomatischen Anheben und Senken der Stromabnehmer ausgestattet sind.

Das Anlegen der Stromabnehmer an der Fahrleitung wird als „Eindrahten“ oder „Andrahten“ bezeichnet, das Abziehen als „Ausdrahten“ oder „Abdrahten“. Während das Abdrahten einfach durch Niederholen des Stromabnehmers erfolgt, muss beim Andrahten der Schleifschuh den

Fahrdraht genau treffen, was nicht ohne geeignete Maßnahmen möglich ist. Auch die zuletzt genannten halbautomatischen Stromabnehmer, welche in der Literatur und in Produktkatalogen sogar häufig als „Stromabnehmer für automatisches An- und Abdrahten“ bezeichnet werden, unterliegen dieser Einschränkung.

Abhängig von der verwendeten Technik zum Heben und Senken der Stromabnehmer haben sich die folgenden Vorgehensweisen zum Andrahten der Stromabnehmer etabliert:

- **manuelles Andrahten:**  
Dies ist noch heute (in bestehenden OBus-Systemen) weltweit die am häufigsten praktizierte Methode. Der:die Fahrer:in greift sich das Seil vom Schleifschuh zur Fangtrommel, deblockiert die Fangtrommel und positioniert den Schleifschuh nach Augenmaß am Fahrdraht. Geübte Fahrer:innen können dies mit beiden Schleifschuhen gleichzeitig.  
Der Vorgang kann an beliebigen Stellen erfolgen und nimmt nur wenige Sekunden in Anspruch. Der Nachteil ist, dass der:die Fahrer:in aussteigen und zum Heck gehen muss, und auch wieder zurück. Manuelles Andrahten benötigt somit insgesamt, je nach Länge des Fahrzeugs und Gestaltung des Fahrer:innenplatzes, etwa 40...70 s. Die manuelle Methode ist somit nur vertretbar, wenn die Zahl der Andrahtvorgänge überschaubar bleibt, z. B. morgens im Depot einmal je Fahrzeug.
- **Andrahten mit Trichter:**  
Für den Fall, dass die Zahl der Andrahtvorgänge erhöht ist und/oder diese immer an bestimmten Stellen erfolgen, ist die Methode des manuellen Andrahtens nicht mehr praktikabel. Um die Durchführung des An- und Abdrahtens im Stillstand direkt vom Fahrer:innenplatz durchführen zu können, sind die beschriebenen steuerbare Hebe- und Senkeinrichtungen am Fahrzeug erforderlich. Damit beim Andrahten der Schleifschuh zielgenau den Fahrdraht erreicht, sind jeweils seitlich des Fahrdrahts schräge Platten aus Kunststoff in Form eines Trichters angeordnet, die den Schleifschuh zum Fahrdraht führen.

In Publikationen wird das Andrahten mittels Trichter oft als „automatisches Andrahten“ bezeichnet, obwohl die Funktion auf bestimmte Orte und den Stillstand des Fahrzeugs eingeschränkt ist. Der praktische Zeitbedarf zum Andrahten liegt bei 5...10 s, wobei nach Beobachtungen der untere Wert in China die Regel ist, während in Europa noch immer der obere Wert gebräuchlich ist. Man kann aber davon ausgehen, dass mit entsprechender Übung auch in Europa kurze Andrahtzeiten erreichbar sind. Der Zeitbedarf beim Abdrahten beträgt bis zu etwa 5 s. Die Trichter sind auch durch bereits zuvor angedrahtete Stromabnehmer befahrbar, wodurch die Einbindung von Seitenlinien ohne Fahrdraht in durchgehende Strecken mit Fahrdraht möglich wird.

Diese Lösung ist einfach zu realisieren. Wenn das An- und Abdrahten an einer Haltestelle erfolgt, gibt es kaum Fahrzeitverlängerungen. Allerdings gibt es auch Nachteile:

- Das An- und Abdrahten erfolgt immer exakt an denselben Stellen. Damit entsteht beim Andrahten eine mechanische Beanspruchung und beim Abdrahten möglicherweise ein Abrissfunke in räumlicher Konzentration. Auch wenn es keine belastbaren Verschleißdaten gibt, so sind diese Stellen regelmäßig zu beobachten, um rechtzeitig vor Schadenseintritt eine zustandsabhängige Instandhaltung zu veranlassen.
- Wegen der begrenzten räumlichen Wirksamkeit des Trichters muss das Fahrzeug beim Andrahten mit geringer Toleranz (in Längs- und Querrichtung) positioniert werden. Praktikabel sind Fahrbahnmarkierungen. Diese müssen stets sichtbar sein (z.B. permanente Schneefreihaltung). Die An- und Abdrahtstellen müssen sich in der Geraden mit zentrierter Lage der Fahrleitung über der Fahrzeugachse befinden, um die Abweichung von der idealen Position gering zu halten und die Seitenkräfte auf die Stromabnehmer zu verringern.

- Die Zahl möglicher Fahrbahnmarkierungen ist begrenzt. Da deshalb die Anordnung der Stromabnehmer in Bezug auf die Fahrzeugfront unter Einhaltung der Längstoleranz für jeden Trichter für eine der Fahrbahnmarkierungen passend sein muss, ergeben sich bei zukünftigen Fahrzeugbeschaffungen Einschränkungen in der Fahrzeuggeometrie, da die Stromabnehmer an einer standardisierten Stelle eingebaut werden müssen. Dieser Umstand lässt sich nur durch den Einbau zusätzlicher Trichter beheben.

Das Andrahten mit Trichter hat sich trotz der beschriebenen Beschränkungen in der Praxis bewährt und es gibt entsprechende Standardprodukte am Markt.

Es bestehen zwei Alternativvarianten des Andrahtens mit Trichter, um ein Andrahten mit geringen Geschwindigkeiten zu erlauben. Diese haben sich allerdings in der Praxis nicht bewährt, da dafür Sonderbauformen der Fahrleitung notwendig sind und weil eine Unbefahrbarkeit der Andrahthilfen durch bereits angedrahtete Stromabnehmer vorliegt. Die Möglichkeit des Andrahtens bei mäßiger Geschwindigkeit wiegt diese Nachteile nicht auf, daher gibt es für diese Alternativvarianten bisher nur Versuchsträger.

- Vollautomatisches Andrahten

Mit der heutigen Sensor- und Regeltechnik ist es prinzipiell möglich, Stromabnehmer zu konstruieren, bei denen der Schleifschuh an beliebigen Stellen automatisch und ohne mechanische Führungshilfen während der Fahrt andrahtet. Erste Patente dazu gab es bereits in den 1970er.

Ein Forschungsprojekt der Westsächsischen Hochschule Zwickau in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme und den Leipziger Verkehrsbetrieben im Rahmen der Projekte „AOSA plus – Automatisches Oberleitungsstromabnehmersystem für Busse“ und „eBus Skorpion“ 2013 bis 2016 zeigte eine technisch mögliche Realisierbarkeit. Eine praktische Umsetzung über den Demonstrator (siehe Abbildung 2-5) hinaus erfolgte bisher nicht.



Abbildung 2-5: Demonstrator der Westsächsischen Hochschule Zwickau.

### 2.4.3. Systeme mit nicht durch den Fahrdraht geführten Stromabnehmern

Der Vorteil des spurgeführten Stromabnehmers ist, dass (in gewissen Toleranzgrenzen) das Fahrzeug nicht streng spurgebunden ist und sich das Fahrpersonal nicht um die Spurtreue der Stromabnehmer kümmern muss. Der Nachteil des aufwendigen Andrahtens wird in der Regel in Kauf genommen.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die Schleifleisten-Technologie der Straßenbahn auf eine zweipolige Fahrleitung zu übertragen, um an jedem Punkt der Strecke auch ohne Sondertechnologie andrahten zu können – einfach durch Heben des Stromabnehmers wie bei konventionellen Straßenbahnen. Dies bedeutet aber wegen der endlichen Breite der Schleifstücke, dass eine Stromabnahme nur bei mehr oder weniger spurtreuem Fahren des Fahrzeugs gegeben ist.

Praktische Bedeutung haben nur zwei Methoden erlangt, beide bisher nur für LKW:

- **Tagebauanwendungen**

In großen Tagebauen wird mitunter der LKW-Verkehr gegenüber der Schiene bevorzugt, um eine örtliche Flexibilität bei wechselnden Abbauverhältnissen zu erreichen. In einigen Fällen verzichtete man nicht auf die elektrische Traktion und errichtete auf oft befahrenen Routen Fahrleitungsanlagen. Manche sind wie die konventionellen Fahrleitungsanlagen des Obus aufgebaut; in einigen Fällen wurde jedoch eine Beschleifung durch Schleifleisten wie bei Stromabnehmern von Schienenbahnen verwendet. Die Spurhaltung obliegt dann dem Fahrpersonal, d.h. sie ist rein manuell. Eine Überschreitung der seitlichen Toleranz durch unsaubere Spurhaltung führt zum Entgleisen des Stromabnehmers und in vielen Fällen zudem zu einer Beschädigung der Fahrleitung. Deshalb ist diese Methode praktisch sinnvoll nur in abgesperrten Betriebsgeländen anwendbar, wo die Fahrer:innen sich vordergründig auf das spurtreue Fahren konzentrieren können.

Bei der elektrischen Traktion ist neben der emissionsfreien Fahrt die höhere Leistung unter Fahrdraht (Verkürzung Umlaufzeit) und der geringere Wartungsaufwand für den Dieselmotor gegeben. Ein Anwendungsbeispiel ist in [4] für einen Minenbetrieb beschrieben: An der Abbaustelle wird das Fahrzeug von einem Dieselmotor angetrieben, die Fahrt aus dem Tagebau heraus erfolgt elektrisch. Die Fahrdrähte der zweipoligen Fahrleitung liegen mehrere Meter auseinander und werden von zwei unabhängigen Stromabnehmern bestrichen (siehe Abbildung 2-6). Die Nennspannung dieses Systems beträgt 1,5 kV DC.



Abbildung 2-6 Anwendungsbeispiel Siemens Trolley Truck [4]

- **Projekt eHighway**

Es handelt sich hierbei um ein von der Siemens AG (unter Mitarbeit von Forschungspartnern) entwickeltes System, mit dem Ziel, den Straßengüterverkehr zu elektrifizieren. Für diesen kommt nur eine flexible Teilstrecken-Nutzung einer elektrischen Infrastruktur infrage. Das Verfahren wäre prinzipiell auch für den BOB Marburg anwendbar.

Bei dieser Methode fährt das Fahrzeug spurtreu von den Fahrer:innen gesteuert unter einer zweipoligen Fahrleitung. Verwendet werden jedoch hoch dynamisch gesteuerte Stromabnehmer („aktive Stromabnehmer“) mit zwei zusätzlichen Funktionen:

- Die Stromabnehmer werden automatisch seitlich nachgeführt, um das Toleranzband für die seitliche Bewegung des Fahrzeugs zu erweitern.
- Die Stromabnehmer werden automatisch gesenkt, wenn das Fahrzeug seitlich zu weit von der Fahrleitung abweicht. Umgekehrt werden sie selbsttätig gehoben, wenn die Steuerung erkennt, dass eine Fahrleitung erreichbar ist. Wenn der Stromabnehmer sich nicht am Fahrdraht befindet, dann liefert ein Speicher und/oder Verbrennungsmotor die für den Fahrbetrieb notwendige Energie.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass aus Sicht des Fahrpersonals das Fahrzeug wie ein konventionelles fahrleitungsunabhängiges Fahrzeug benutzt werden kann. Die Fahrer:innen müssen weder die Spurhaltung der Stromabnehmer unter der Fahrleitung, noch das An- und Abdrähten veranlassen. Das Steuersystem erkennt und entscheidet selbst während der Fahrt, wann die Stromabnahme aus der Fahrleitung erfolgen kann. Die Stromabnehmer und die Zuschaltung der On-Board-Energiequellen sind dynamisch geregelt, so dass auch spontanes Verlassen des mit Fahrleitung versehenen Fahrwegs etwa für Überholvorgänge oder Abbiegen technisch möglich ist. Es entfällt der Zeitbedarf für das An- und Abdrähten im Stillstand.

Die Funktionsfähigkeit der Methode wurde von der Siemens AG seit 2010 auf einer Teststrecke auf einem ehemaligen Militärflughafen bei Groß Dölln in Brandenburg nachgewiesen (Projekt ENUBA, [2], [3]). Dort wurde eine Fahrleitungsspannung von 670 V gewählt und die Fahrleitung als Kettenwerk ausgebildet, um größere Mastabstände zu erreichen (ca. 65 m). Verwendet wurde ein Fahrdraht Cu 150 mm<sup>2</sup> und ein Trageil BzII 120 mm<sup>2</sup> mit Nachspannung.



Abbildung 2-7: Siemens-Teststrecke (eHighway) auf einem ehem. Flugplatz in Brandenburg [2], [3]

Für den eHighway gibt es derzeit mehrere Pilot-Projekte. In Deutschland sind das der Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein (FESH) [49] (siehe Abbildung 2-8), das Projekt ELISA eHighway Hessen [50] und das Projekt eWayBW auf einer Bundesstraße in Baden-Württemberg [51]. Alle Projekte laufen derzeit, sodass diesbezüglich noch keine Ergebnisse veröffentlicht wurden.



Abbildung 2-8: Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein (FESH), Bildquelle [49]

Die beschriebene Methode wäre auch beim BOB-System anwendbar und hätte den Vorteil des An- und Abdrahtens während der Fahrt ohne Eingreifen des Fahrpersonals und ohne Fahrzeitverlust. Allerdings sind die aktiven Stromabnehmer im Vergleich zu passiven deutlich teuer, was die breite und schnelle Einführung der Methode kommerziell erschwert.

## 2.5. Konfiguration des Fahrleitungsnetzes

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, besteht ein Obus-Fahrleitungsnetz in seiner Grundform aus zwei parallelen Fahrdrähten, die gegeneinander und gegen Erde isoliert sind. Eine Erweiterung aus Gründen der mechanischen Tragfähigkeit (Kettenwerk) oder elektrischen Belastbarkeit (parallele Verstärkungsleitungen) ist möglich.

Die Konfiguration des Netzes soll neben der Hauptaufgabe, den Energietransfer zu und zwischen den Fahrzeugen zu gewährleisten, zwei Aufgaben erfüllen:

- Selektivität im Fehlerfall (oder bei Abschaltung von Teilen des Netzes),
- geringe Übertragungsverluste.

Zudem muss die Fahrleitungsanlage so geplant werden, dass ein Kurzschluss im Fahrleitungsnetz schnell und sicher als solcher erkannt werden und die Abschaltung des betreffenden Abschnitts ausgelöst werden kann.

### 2.5.1. Selektivität im Fehlerfall

Bei der Konfiguration der Fahrleitung ist darauf zu achten, eine möglichst hohe Selektivität im Fehlerfall sicherzustellen. Der Begriff „Selektivität“ bedeutet, dass im Fall eines Fehlers wie Kurzschluss oder Beschädigung und der somit notwendigen Abschaltung der Fahrleitung ein möglichst kleiner Teil des Netzes abgeschaltet wird. Am einfachsten wäre dies mit einer möglichst kleinteiligen Zerlegung des Netzes in voneinander isolierte Abschnitte zu erreichen. Eine kleinteilige Zerlegung führt aber neben höheren Übertragungsverlusten auch zu erhöhtem Materialaufwand.

### 2.5.2. Senkung von Übertragungsverlusten

Die Senkung von Übertragungsverlusten ist auf zwei Arten möglich. Einerseits können möglichst viele Leiter parallelgeschaltet werden, also beispielsweise die Leiter gleicher Polarität beider Fahrtrichtungen („Querkupplung“). Da im Fehlerfall alle miteinander verbundenen Leiter abgeschaltet werden müssen, bedeutet dies, dass hierbei beide Fahrtrichtungen abgeschaltet werden und die Selektivität somit sinkt.

Die Übertragungsverluste (und die Selektivität) hängen auch sehr stark von der längsseitigen Verschaltung der Fahrleitungsabschnitte zwischen zwei Unterwerken ab. Diese können wie folgt gespeist werden:

- einseitige Speisung: Das Unterwerk speist an einem Ende des Abschnitts ein, das andere Abschnittsende ist isoliert. Die Abschnitte von zwei Unterwerken sind elektrisch voneinander getrennt. Im Fehlerfall muss nur der betroffene Abschnitt abgeschaltet werden.
- zweiseitige Speisung: Dabei wird ein Fahrleitungsabschnitt zwischen zwei Unterwerken von beiden Seiten gespeist. Dies hat deutliche Vorteile für die Spannungshaltung und die Senkung der Übertragungsverluste, weil sich die Ströme auf zwei Wege aufteilen. Bei einer Abschaltung ist zudem der gesamte gemeinsam verschaltete Abschnitt betroffen.

Die Unterschiede zwischen den beiden Speisearten sind in Abbildung 2-9 dargestellt.

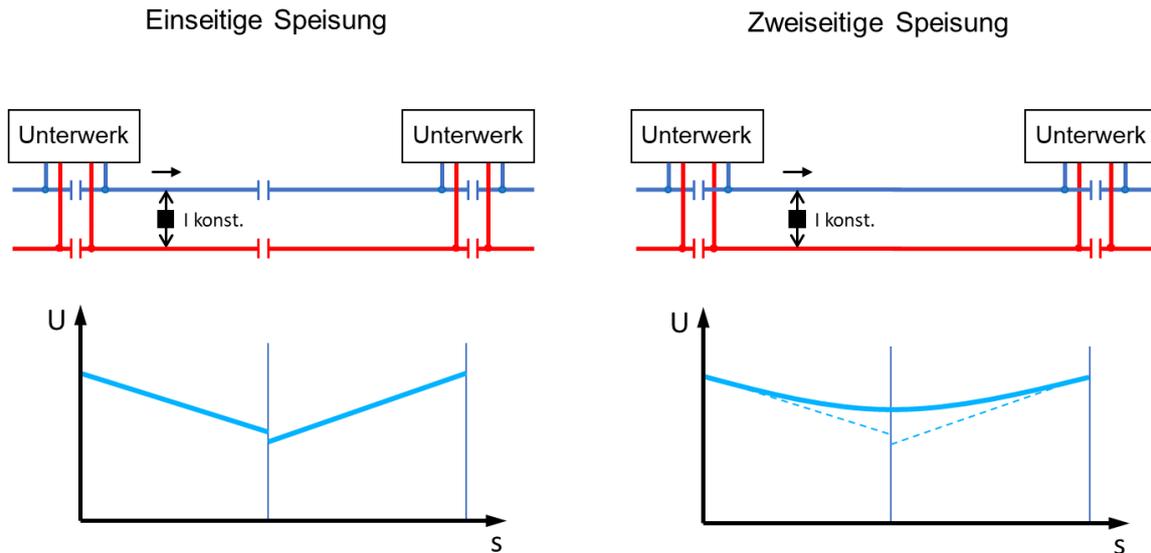


Abbildung 2-9: Gegenüberstellung von einseitiger Speisung und zweiseitiger Speisung, oben prinzipielle Anordnung, unten Spannung über Weg bei Konstantstrom über der Strecke

### 2.5.3. Erkennbarkeit von Kurzschlüssen

Da ein Kurzschluss in Abhängigkeit von seiner Dauer potentiell zur Gefährdung von Personen sowie zu großen Sachschäden führen kann, müssen auftretende Fehler sicher erkannt werden. Um Kurzschlüsse zu erkennen, wird am Speisekabel im Unterwerk ständig der dort fließende Strom gemessen. Sofern ein Strom einen eingestellten Wert übersteigt, wird ein Kurzschluss angenommen und ein Gleichstromschnellschalter schaltet das betreffende Speisekabel ab. Damit dieses Verfahren funktioniert, ist sicherzustellen, dass der geringste Kurzschlussstrom  $I_{k,min}$  signifikant über dem höchsten auftretenden Betriebsstrom  $I_{B,max}$  liegt.

Gemäß VDV-Schrift 520:2015, Kapitel 6.4 muss die folgende Ungleichung für den Wert des Auslösestroms  $I_A$  erfüllt sein:

$$1,1 \cdot I_{B,max} < I_A < 0,9 \cdot I_{k,min}$$

Bei zweiseitiger Speisung muss sichergestellt werden, dass ein Abschnitt mit Kurzschluss an beiden Enden abgeschaltet wird. Aufgrund der größeren Länge des gemeinsam gespeisten Abschnitts ist die Kurzschlusserkennung zumeist schwieriger als bei einseitiger Speisung. Die Hochstromauslösung des Streckenabgangsschalters eines Unterwerks vermag im ungünstigsten Fall (d. h. am anderen Ende des Abschnitts) einen Kurzschluss oft nicht zu erkennen. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, sogenannte Mitnahmeschaltungen einzurichten. Dabei wird eine Kommunikationsleitung zwischen den beiden Unterwerken verlegt. Wenn ein Schnellschalter auslöst, wird dann über Fernwirktechnik auch der andere Schalter ausgeschaltet.

### 2.5.4. Vorzugsweise verwendete Konfiguration für Obusse

Als Folge der in den vorherigen Unterkapiteln beschriebenen Zusammenhänge muss die Fahrleitungsanlage bei der Planung hinsichtlich der unterschiedlich gelagerten Aspekte Selektivität, Übertragungsverluste und Kurzschlusserkennung optimiert werden. Ausgeführte Anlagen für Obusse werden in der Mehrzahl mit Querkupplung und zweiseitiger Speisung gebaut, um die Übertragungsverluste zu senken, da im Fehlerfall meist ohnehin der Fahrweg in beide Richtungen und über die Distanz zwischen zwei Unterwerken blockiert ist. Bei der Verwendung von BOB ist überdies das Räumen der Fehlerstelle und ggf. über einen begrenzten Zeitraum die Überbrückung von spannungslosen Abschnitten im Batteriebetrieb möglich.

Die Trennung der Fahrleitungsabschnitte findet in Unterwerksnähe statt. Das Prinzip ist in Abbildung 2-10 gezeigt.

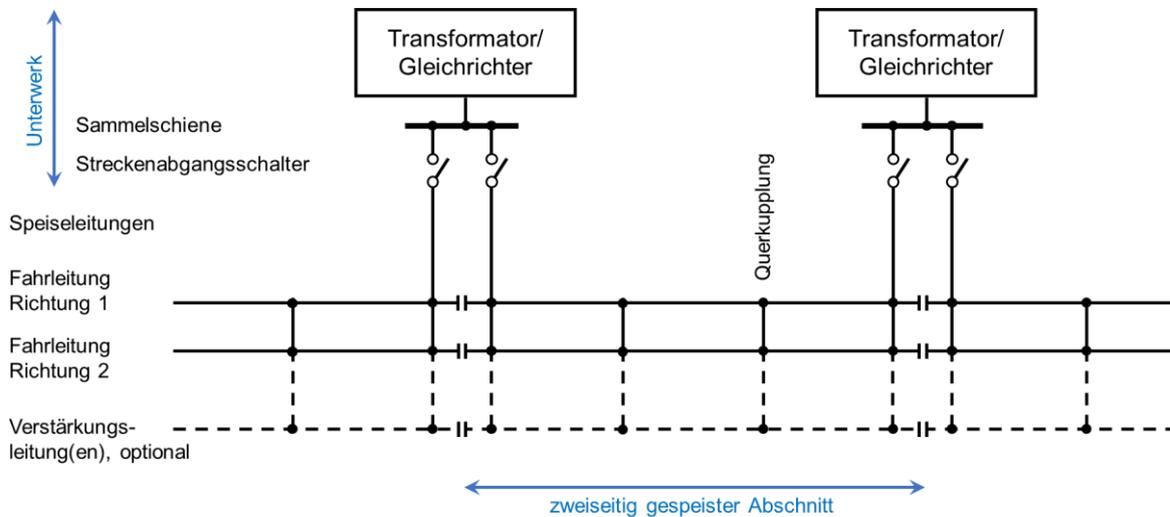


Abbildung 2-10: Üblicherweise gewählte Konfiguration der Fahrleitung mit Streckentrennung vor dem Unterwerk, zweiseitiger Speisung und Querkupplung. Optional ist die Parallelführung der Verstärkungsleitung(en). Alle Linien sind zweipolig (Plus/Minus).

## 2.6. Isolationsfehler und Erdung

Gleichspannungsbahnen werden zur Vermeidung der Gefahr von Streustromkorrosion mit isoliertem Gleis ausgeführt. Da das Gleis somit ein anderes Potenzial als der Boden annehmen kann, sind Maßnahmen zur Vermeidung einer elektrischen Gefährdung von Personen zu ergreifen, in der Regel durch eine Dimensionierung, welche auf ein geringes Gleis-Erde-Potenzial hin optimiert ist.

Bei Obus-Fahrleitungs-Systemen sind beide Fahrdrähte isoliert in der Luft geführt. Damit sind sowohl Streuströme, als auch der Abgriff eines gefährdenden Potenzials, nur im Fehlerfall möglich (unter der Voraussetzung, dass sich Personen der Fahrleitung nicht nähern können). Eine absichtliche ständige Erdung eines der beiden Fahrleitungspole (an mehreren Stellen entlang des Weges) ist nicht möglich, da ansonsten auch hier Streuströme auftreten können. Dennoch treten Erdverbindungen, gewollt und ungewollt, praktisch auf. Die Gefährdungsfälle hängen von der Art der Erdverbindung ab:

- **Ungewollte punktuelle Verbindung Fahrleitung – Erde oder Fahrleitung – Fahrzeuggehäuse, z.B. durch Funktionsverlust eines Isolators**

Solange es bei einer einzigen punktuellen Verbindung bleibt, besteht keine Gefahr. Allerdings bleibt die Verbindung oft lange unbemerkt. Dann besteht das Risiko, dass früher oder später eine zweite Fehlerstelle entsteht. Es entsteht in jedem Falle ein Streustrom, der zu gefährlichen Korrosionswirkungen führen kann. Des Weiteren ist es möglich, dass bei räumlicher Nähe der Fehlerstellen eine Potentialdifferenz abgegriffen werden kann.

Deshalb ist es nötig, dass Isolationsmessungen durchgeführt werden, um bereits den ersten Fehler zu beseitigen. Hinsichtlich der Infrastruktur kann dies in festzulegenden Intervallen erfolgen. Auf dem Fahrzeug muss die Isolationsmessung permanent aktiv sein, da das Risiko zu hoch ist, dass Fehler unmittelbar zur Gefährdung von Personen führen. Am gefährlichsten ist hier eine Potentialdifferenz zwischen Erde und Fahrzeugkasten. Deshalb ist bei Ansprechen der Isolationsüberwachung das Fahrzeug von der Fahrleitung zu trennen und ggf. zu räumen.

Um bereits die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Isolationsfehlers auf dem Fahrzeug zu mindern, ist eine doppelte Isolation gefordert (siehe EN 50502).

- **Absichtliche dauerhafte Erdung eines Fahrdrachtpols im Unterwerk in einem Punkt**  
Dies vereinfacht den Schutz des Personals im Unterwerk gegen gefährliche Potenzialdifferenzen und erlaubt die einfache Messung eines ungewollten Ableitstroms bzw. Isolationsfehlers. Andererseits erleichtert diese Erdung das Fließen von Ableit- und Fehlerströmen. Es genügt nun ein Isolationsfehler zu einer Gefährdung oder zum Streustrom, während ohne Erdung ein Doppelfehler nötig wäre.

Der Schutz des Instandhaltungspersonals bzw. die Durchführbarkeit einer Messung kann auch erreicht werden, wenn die Erdung nur kurzzeitig hergestellt wird, also z.B., wenn eine Schutzeinrichtung eine zu hohe Potenzialdifferenz zwischen Rückleitersammelschiene und Erdpotential detektiert. Es kann dann sofort Instandhaltungspersonal zur Fehlersuche aktiviert werden.

Wenn im Unterwerk ein Fahrdrachtpol geerdet ist, dann ist keine zweiseitige Speisung mehr möglich (siehe EN 50122-1, Kapitel 5.6.3.3), weil dann eine Erdverbindung von zwei Punkten verschiedenen Potentials hergestellt wird. Da eine zweiseitige Speisung vorteilhaft für die Spannungshaltung und die Verringerung der Übertragungsverluste ist, kann eine Erdung eines Fahrdrachtpols im Unterwerk nicht empfohlen werden.

- **Ungewollte Verbindung durch gemeinsame Speisung von Straßenbahn und Obus aus einem Unterwerk bei gleichzeitiger niedriger Isolation des Straßenbahngleises**  
Diese Art von Verbindung ist trotz isoliertem Aufbau des Straßenbahngleises nicht grundsätzlich vermeidbar, zum Beispiel bei Regen. Es treten dann die bereits oben beschriebenen Probleme bzw. Risiken auf. Nach Möglichkeit sollten daher Obus- und Straßenbahnfahrleitung aus galvanisch getrennten Gleichrichtern gespeist werden.

Empfohlen wird ein vollständig isolierter Aufbau des Gleichspannungsnetzes ohne Erdung in Verbindung mit Maßnahmen der Isolationsmessung und zur Erkennung/Vermeidung von abgreifbaren Potenzialdifferenzen. Für alle Bahnen mit Fahrleitung, so auch bei Obus/BOB, definiert die EN 50122-1 Räume, in denen Maßnahmen zur Verhinderung von Potenzialdifferenzen durchzuführen sind (z.B. Potenzialausgleich). Dies hat in definierten Bereichen zu geschehen:

- Oberleitungsbereich (der Bereich, den eine herabfallende Fahrleitung treffen könnte, z.B. Geländer) und
- Stromabnehmerbereich (der Bereich, in den ein gebrochener oder entgleister Stromabnehmer hineinragen kann, z.B. Stromabnehmer trifft einen Brückenträger über der Fahrleitung).

Dies bedeutet, dass bauliche Maßnahmen auch an Objekten durchzuführen sind, die nicht zur Infrastruktur des BOB-Netzes gehören und gegebenenfalls Eigentum Dritter sein können.

Im Gegensatz zu Schienenbahnen führen Isolationsfehler und Fahrleitungsriss selten zu Kurzschlüssen. Trotzdem müssen die Schutzeinrichtungen des Unterwerks einen Kurzschluss erkennen können, um eine Überlastung der Betriebsmittel zu verhindern (siehe Kapitel 2.5.3).

### 3. Übersicht über den Stand von Obus- und BOB-Systemen

#### 3.1. Ausgewählte Beispiele für Oberleitungsbusnetze

In diesem Unterkapitel werden gewählte Beispiele für in Betrieb befindliche Obusnetze vorgestellt. Diese sind in einer Übersicht zusammengefasst, anschließend wird ein Überblick über die Entwicklung ausgewählter BOB-Netze gegeben.

##### 3.1.1. Übersicht

Bis in die Mitte der 1950er Jahre entstanden in Deutschland 68 Obusbetriebe. Ab Anfang der 1960er Jahre wurden, unter anderem auf Grund der fortschreitenden Motorentechnologie sowie dem Preisverfall für fossile Kraftstoffe, immer mehr Straßenbahn- und Obussysteme abgebaut bzw. ersetzt. Diese Entwicklungen gingen trotz der Ölkrise 1975 weiter, sodass heute lediglich drei deutsche Verkehrsbetriebe in Solingen, Esslingen und Eberswalde weiterhin Obussysteme betreiben. Insbesondere im östlichen Ausland, konnten sich dagegen vergleichsweise mehr Obusbetriebe halten [10].

In Tabelle 3-1 wird ein Überblick über die Anzahl der in der EU verwendeten Oberleitungsbusse (inkl. BOB) gegeben. Dabei setzt die größte Anzahl dieser Betriebe entweder auf reine Obusse oder führt ihren Betrieb in oberleitungsfreien Abschnitten mit Fahrzeugen mit Diesel-Hilfsantrieb (hauptsächlich in Italien) durch. Einige Betriebe haben auch Fahrzeuge mit Batterien bestellt oder planen dies. In Tabelle 3-2 werden auf dem Stand der Quelle [33] die im Einsatz befindlichen bzw. bestellten BOB-Fahrzeuge aufgelistet.

Tabelle 3-1: Anzahl der Oberleitungsbusse (Fahrzeuge) in der EU [10]

Land	Anzahl der betriebenen Oberleitungsbusse
Italien	719
Tschechien	745 (davon Brno 140)
Rumänien	729 (davon Bukarest 396)
Schweiz	566
Bulgarien	516
Litauen	466 (davon Vilnius 321, Kaunas 145)
Griechenland	366 (Athen)
Slowakei	320
Ungarn	281
Lettland	264 (alle in Riga)
Polen	198
Frankreich	173
Österreich	142 (davon Salzburg 122)
Deutschland	71
Niederlande	40 (Arnheim)
Portugal	20
Spanien	9
Norwegen	6 (Bergen)
Schweden	5 (Landskrona)
<b>Insgesamt</b>	<b>etwa 5.600</b>

Tabelle 3-2: Anzahl der BOB-Fahrzeuge in der EU [33]

Land	Anzahl BOB
Italien	7 im Bestand, 8 bestellt, 16 geplant
Tschechien	58 im Bestand, 5 geplant
Schweiz	82 im Bestand, 7 Umbauten, 55 bestellt/geplant
Litauen	nicht bekannte Anzahl in Vilnius
Polen	10 im Bestand, 21 bestellt/geplant
Frankreich	2 im Bestand, 22 bestellt
Österreich	15 bestellt
Deutschland	9 im Bestand, 16 geplant
- Eberswalde	1 im Bestand
- Esslingen	4 im Bestand
- Solingen	4 im Bestand, 16 geplant
Niederlande	2 im Bestand in Arnheim
Spanien	6 im Bestand

### 3.1.2. Eberswalde (BBG – Barnimer Busgesellschaft)

Der Oberleitungsbusbetrieb in Eberswalde ist der älteste noch bestehende Obusbetrieb in Deutschland und wird von der Barnimer Busgesellschaft betrieben [7]. Das Netz besitzt heute eine Fahrdrachtlänge von 29,1 km [17]. Der Obusbetrieb findet auf zwei Linien mit abschnittsweiser Überlagerung statt. Das Fahrgastaufkommen auf den beiden Obuslinien betrug im Jahr 2015 3.551.000 Passagiere [22].

Der Betrieb findet mit 12 Fahrzeugen statt, davon ist eines als Batterieoberleitungsbus ausgerüstet. Die Fahrzeuge sind im Jahr 2009 als Ersatz für veraltete Fahrzeuge des Typs NGE 152 von Gräf & Stift bestellt worden [34]. Neu beschafft wurden Fahrzeuge vom Typ Solaris/Cegelec Trollino 18. Die ersten elf Fahrzeuge sind hierbei mit Supercaps und einem dieselmotorischen Hilfstriebwerk (engl. Auxiliary Power Unit, APU) ausgestattet [17]. Infolge einer Machbarkeitsstudie des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme entschied sich die Barnimer Busgesellschaft mbH für die Ausrüstung eines Fahrzeugs mit einer Batterie anstelle des dieselmotorisch betriebenen Hilfsgenerators [17]. Im Jahr 2012 wurde das 12. Fahrzeug mit batteriebetriebenen Hilfsantrieb von Solaris/Cegelec an den Obusbetrieb in Eberswalde ausgeliefert. In Tabelle 3-3 sind die fahrzeugtypischen Kenndaten für die in Eberswalde eingesetzten Oberleitungsfahrzeuge gegeben. Aufgrund des Einsatzzwecks der Batterie (nur für den hilfswiseigen Antrieb ohne Oberleitung) unterscheiden sich die Kenndaten dieser Fahrzeuge von den BOB-Fahrzeugen, welche in den anderen Kapiteln vorgestellt werden.

In Abbildung 3-1 wird der gelieferte Batterieoberleitungsbus dargestellt. Es handelt sich bei diesem Fahrzeug um den ersten in Europa eingesetzten Batterieoberleitungsbus. Das Hybridfahrzeug hat eine elektrische Reichweite von 18 km. Die elektrischen Kenndaten sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Bei den Batteriezellen handelt es sich um Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulatoren (LiFePO<sub>4</sub> oder LFP) vom chinesischen Hersteller Winston Battery. Die Speicherkapazität einer Zelle beträgt 100 Ah mit einer Arbeitsspannung von 2,8 - 4 V und einem Höchststrom von 0,5C/2C = 50/200 A. Eine Zelle hat ein Gewicht von 3,3 kg und die Abmaße 218 x 143 x 67 mm [8].



Abbildung 3-1: Batterieoberleitungsbus der BBG [22]

Tabelle 3-3: Übersicht Fahrzeuge Eberswalde [17]

Fahrzeuganzahl	Hilfsantrieb	Fahrzeugtyp	Inbetriebnahme	Fahrzeugkosten [€]	Fahrzeuglänge [m]	Achslasten [t]	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Transportkapazität [Sitz- u. Stehpl.]
1	Batterie	Solaris/ Cegelec Trollino 18 AC	2012	985.000	18	7,1 / 11,5 / 10	60 - 65	49 + 175
11	Diesel	Solaris/ Cegelec Trollino 18 AC	2012	985.000	18	7,1 / 11,5 / 10	60 - 65	49 + 175

Alle zwölf Obus-Fahrzeuge werden auf den Linien 861 und 862 eingesetzt. Die Linien befinden sich komplett unter Fahrdrabt. Ein Einsatz der Fahrzeuge ohne Oberleitung ist bisher nicht festgelegt. Jedoch gab die Barnimer Busgesellschaft mbH im Jahr 2015 eine Machbarkeitsstudie in Auftrag, welche den Einsatz von Batterieoberleitungsbusen (d. h. Bussen, welche regulär auf Teilstrecken ohne Oberleitung verkehren) auf der Dieselbuslinie 910 prüfen sollte [22]. Die Studie ergab, dass ein Einsatz von Batterieoberleitungsbusen auf der teilweise oberleitungsfreien Strecke technisch, ohne größere Investitionen in die Infrastruktur, umsetzbar ist. Die Studie ergab weiter, dass für den Einsatz Fahrzeuge benötigt werden, welche ihre Energiespeicher bis zum Verlassen des Oberleitungsabschnitts komplett wiederaufgeladen haben müssen [23]. Mit Stand 2022 wurden in diese Richtung noch keine weiteren Schritte unternommen. Auch hinsichtlich des OBus-Netzes und der eingesetzten Fahrzeuge gab es keine Veränderungen.

Tabelle 3-4: Kenndaten des elektrischen Systems für den Batterieoberleitungsbus [17]

Systemkenndaten [Einheit]	Wert			
Anzahl Zellen	2 x 108 in Serie			
Kapazität [Ah]	200			
Gewicht (Zellen) [kg]	756			
Gewicht (Box) [kg]	1.020			
Ladezeit (SOC 25-85 %) [min]	75			
Zeit für die erneute Ladung	Ca. 20 min nach einer Fahrstrecke von 5 km			
Anzahl der vorausgesetzten Zyklen (SOC 25 - 85 %)	3.000			
Anzahl der vorausgesetzten Zyklen (nach 5 km)	12			
Gesamtenergie [kWh]	70.4			
Ausnutzbare Energie SOC 25-85 % [kWh]	42.2			
Ausnutzbare Höchstleistung [kW]	12			
Spannung [V]	Minimale Spannung	Nennspannung	Ladespannung 85 % SOC	Ladespannung 100 % SOC
Je Zelle	2,8	3,2	3,43	3,65
Gesamtes Batteriepack	308	352	377	395
Höchststrom [A]	2 Sektionen parallel 0,5 C/2C = 100/400			

### 3.1.3. Esslingen

Das Oberleitungsbusnetz in Esslingen wird vom Städtischen Verkehrsbetrieb Esslingen am Neckar (SVE) betrieben. Drei Linien verkehren unter 15,5 km Fahrleitungsnetz [9]. Der Betrieb findet mit 10 Fahrzeugen, davon 4 Batterieoberleitungsbusen statt. Hierbei ist die 8,2 km lange Linie 101 von Untertürkheim Bhf. bis Lerchenäcker Endstation zu 100% elektrifiziert. Die Zollbergsschleife der Linie 118 kann lediglich in einer Richtung im Fahrdrabtbetrieb bedient werden. Durch die Inbetriebnahme von vier Batterieoberleitungsfahrzeugen im Jahr 2016 konnten auf der Obuslinie 118 ein Zweirichtungsverkehr und die zusätzliche Linie 113 eingerichtet werden.

Ein BOB-Betrieb findet auf den Linien 118 und 113 statt. Die Linie 118 führt vom Zentralen Omnibus-Bahnhof (ZOB) am Bahnhof Esslingen auf den Zollberg und bedient einmal stündlich entgegen des Uhrzeigersinns das Zollbergplateau und führt dann zurück zum Esslinger Bahnhof. Halbstündlich wird an der Haltestelle Zollberg ausgedrahtet und die Strecke auf dem Plateau im Batteriemodus befahren. Der Betrieb der Linie erfolgt mit einem Fahrzeug. Die Linienlänge beträgt ca. 8,8 km. Davon werden ca. 2,7 km ohne Fahrdrabt im Batteriemodus betrieben. Die Haltestellen werden von Betriebsbeginn bis Betriebsschluss in einem halbstündlichen Takt angefahren. In den Morgenstunden von 5.30 bis 6.30 Uhr werden die Haltestellen am Zollbergplateau ausschließlich im Oberleitungsbetrieb angefahren. Ab 7.00 Uhr findet, wie oben beschrieben, ein halbstündlicher Wechsel der Befahrungsrichtung statt [9].

Die Linie 113 fährt ebenfalls wie die Linie 118 vom ZOB am Esslinger Hauptbahnhof unter Fahrdrabt den Zollberg hinauf, drahtet an der Mutzenreisstraße aus und fährt im Batteriemodus durch Berkheim bis zur Endhaltestelle Kronenstraße. Auf der Rückfahrt fährt der Bus über die Adenauerbrücke Richtung ZOB. An der Haltestelle Schwimmbad drahtet das Fahrzeug auf der Strecke der Linie 101 wieder in das Oberleitungsnetz ein. Auf der Linie 113 werden teilweise weiterhin Dieselsebusse eingesetzt [9].

Entlang der Linie 113 werden ca. 12 km zurückgelegt. Der Anteil an fahrdrahtlosem Betrieb liegt bei ca. 6 km. Auf dem Streckenabschnitt wird eine Höhendifferenz von 219 m überwunden [9].

Insgesamt sind, gerechnet von der ersten Überlegung der Anschaffung der BOB-Fahrzeuge im Jahr 2011, 270.000 € Projektkosten und 170.000 € Investitionskosten in die Fahrleitung für 8,2 km zusätzliche Strecke pro Richtung im Jahr 2016 angefallen.

Bei den 2016 beschafften BOB handelt es sich um Fahrzeuge des Typs Solaris Trollino 18,75 Metrostyle (siehe Abbildung 3-2). Als Generalunternehmen agierte hierbei Kiepe Electric. Die Fahrzeuge verfügen über das bei Kiepe patentierte In-Motion-Charging (IMC®)-Verfahren, bei dem die Fahrzeuge unter Fahrdrabt die Batteriespeicher laden. Die Fahrzeuge entsprechen der verlängerten Version der Metrostyle-Obusse in Salzburg. In Tabelle 3-5 sind die fahrzeugtechnischen Kenndaten dargestellt.

Im Mai 2017 kündigte die SVE eine Erweiterung der Obus-Infrastruktur von 3,6 km und die Beschaffung weiterer Batterieoberleitungsbusse an [21]. Seit 2019 erhielten die SVE sechs weitere Solaris Trollino 18 mit einer erhöhten Batteriekapazität von 48 kWh statt 37 kWh nutzbarer Energie. Die Infrastruktur wurde jedoch bis 2022 nicht erweitert und es sind dazu auch keine Planungen bekannt.



Abbildung 3-2: Fahrzeug Esslingen, Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [11]

Tabelle 3-5: Fahrzeugtechnische Kenndaten Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [9], [11]

Systemkenndaten [Einheit]	Wert
Anzahl BOB-Fahrzeuge	4
Fahrzeugbezeichnung	Solaris Trollino 18.75 Metrostyle
Inbetriebnahme	2016
Fahrzeugkosten [€]	1.000.000
Fahrzeuglänge [m]	18,75 (1 Gelenk)
Achslast [t]	7,1 / 11,5 / 10

<b>Systemkenndaten [Einheit]</b>	<b>Wert</b>
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	60-65
Transportkapazität (Steh- u. Sitzpl.) [Pers]	110 + 44
Nennleistung [kW]	500
Reichweite elektrisch [km]	10-15
Batteriehersteller	Voltabox
Speichertechnologie	Lithium-Titanat-Oxid
Hersteller Elektriksystem	Knorr-Kiepe
Akku Gesamtenergie [kWh]	46 (Fahrzeuge 501-504)
Ausnutzbare Energie des Akkus [kWh]	37 (Fahrzeuge 501-504)
Ausnutzbare Höchstleistung des Akkus [kW]	240
Ladekonzept	IMC 150 kW
Energieaufnahme fahrend	150 kW

Bei dem verwendeten Energiespeicher handelt es sich um Lithium-Titanat-Oxid Batterien des Typs Voltabox Paragon [9]. Die Batterien werden je nach Bedarf auf 30 °C gekühlt bzw. geheizt. Es werden 2 x 14 Module mit einer Spannung von 500 V verwendet. Die Akkupacks haben eine Kapazität von 46 kWh, wobei 37 kWh genutzt und 9 kWh als Notfallreserve zur Verfügung stehen [11].

### 3.1.4. Solingen

Das Oberleitungsbusnetz in Solingen ist mit einer Fahrdrachtlänge von 102 km das größte Obus-Netz Deutschlands [15]. Mit 50 Fahrzeugen werden 6 Linien im Netz der Solinger Stadtwerke (SWS) bedient, wobei die Linie 683 in das Gebiet der benachbarten Stadt Wuppertal führt [20].

Für eine Erweiterung der Netzlänge hat die SWS im Jahr 2016 vier mit Option auf weitere 16 Batterieoberleitungsbusse bei einem Konsortium aus Solaris und Kiepe bestellt. Im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) stehen für die Integration der Batterie-Oberleitungsbusse (BOB) in das bestehende Obusnetz 15 Mio. Euro zur Verfügung. Weitere 4 Mio. Euro werden aus Eigenmitteln des Verkehrsbetriebs für die Beschaffung der Fahrzeuge aufgewendet [6]. Die ersten Planungen für das BOB-Projekt haben bereits in den Jahren 2013/2014 begonnen [13].

Die SWS plante ursprünglich ab Herbst 2018 die Umstellung der mit konventionellen Bussen betriebenen Linie 695 auf einen BOB-Betrieb, da bereits auf einem Viertel der Strecke eine Oberleitungsinfrastruktur existiert. Die Linie führt hierbei vom Abteiweg über die Innenstadt nach Meigen. Von der Wendeschleife Abteiweg im Stadtteil Gräfrath führt die Linie rund 4,5 km im oberleitungsfreien Betrieb bis zur Haltestelle Unionstraße. Von der Haltestelle Unionstraße bis Bahnhof Solingen-Mitte führt die Linie ca. 2,5 km unter Fahrdracht. Der BOB bezieht in

diesem Abschnitt seine Energie sowohl für den Antrieb als auch für die Ladung der Batteriespeicher aus der Oberleitung. Vom Bahnhof Solingen-Mitte fährt das Fahrzeug im Batteriebetrieb auf der 3,3 km langen Endabschnitt in Schleifenführung bis zur Endhaltestelle Meigen [20]. Die Umstellung der Linie 695 auf BOB-Betrieb erfolgte im Oktober 2019 [45].

Bei den ersten vier in Solingen beschafften Fahrzeugen handelt es sich um Solaris Trollino 18,75. Für die elektrische Ausrüstung ist Kiepe Electric verantwortlich. Für den Antrieb sind zwei 160 kW Traktionsmotoren im Einsatz [20]. Die wassergekühlten Lithium-Titan-Oxid-Batterien vom polnischen Hersteller Impact haben ein Gewicht von 1,2 t und eine Gesamtkapazität von 60 kWh. Das Batteriepack setzt sich hierbei aus vier Einzelpacks mit einer Nenngröße von jeweils 15 kWh zusammen. Im Batteriebetrieb stehen kurzzeitig die maximale Leistung von 320 kW sowie eine Dauerleistung von 200 kW zur Verfügung [13].

In Abbildung 3-3 ist der erste ausgelieferte BOB dargestellt. Die wesentlichen fahrzeugtechnischen Kenndaten dieses Typs BOB sind in Tabelle 3-6 abgebildet.



Abbildung 3-3: BOB-Fahrzeug in Solingen [13]

Tabelle 3-6: Fahrzeugtechnische Kenndaten BOB Solingen [13], [16], [20]

Systemkenndaten [Einheit]	Wert
Anzahl BOB-Fahrzeuge	4
Fahrzeugbezeichnung	Solaris Trollino 18.75 Metrostyle
Inbetriebnahme	2018
Fahrzeugkosten [€]	900.000
Fahrzeuglänge [m]	18,75 (1 Gelenk)
Achslast [t]	7,1 / 11,5 / 10
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	60-65
Transportkapazität (Steh- u. Sitzpl.) [Pers]	69 + 46
Nennleistung [kW]	320
Reichweite elektrisch [km]	20

<b>Systemkenndaten [Einheit]</b>	<b>Wert</b>
Batteriehersteller	Impact
Speichertechnologie	Lithium-Titanat-Oxid
Hersteller Elektriksystem	Knorr-Kiepe
Akku Gesamtenergie [kWh]	60
Ausnutzbare Höchstleistung des Akkus [kW]	320
Ladekonzept	In-Motion-Charging

Ab 2020 wurde mit der Ersatzbeschaffung für die 15 Berkhoff Premier AT Obusse begonnen. Der im Jahr 2016 mit Solaris/Kiepe abgeschlossene Liefervertrag sieht eine Option von 16 weiteren Fahrzeugen vor [13], die im Jahr 2020 von den Stadtwerken Solingen gezogen wurde [40]. Bis 2022 wurden von diesen Fahrzeugen acht geliefert, sodass die Zahl der BOB-Gelenkbusse nun 12 beträgt [47].

Unabhängig von der eingelösten Option über die Solaris-Gelenkbusse wurden im Jahr 2020 weitere 16 BOB als 12 m lange Solobusse, ebenfalls von Solaris und Kiepe, bestellt [46], von denen bis 2022 ebenfalls 8 geliefert wurden [47]. Mit diesen Fahrzeugen besteht die Möglichkeit, auch die bis nach Burg weitergeführten Kurse der bestehenden Linie 683 mit BOB zu befahren – vorher mussten für diese Kurse Dieselsebusse eingesetzt werden und am Endpunkt der Fahrleitung war ein Umstieg notwendig. Das Fahrgastaufkommen auf dem betreffenden Abschnitt rechtfertigt den Einsatz der kürzeren Busse.

### 3.1.5. Arnheim (Niederlande)

In Arnheim bestand im Jahr 2018 Interesse, die Oberleitungslinie 3 von Het Duifje nach Huissen ohne Fahrdrähte zu verlängern. Hierbei sollten in den zwei Hess/Kiepe SwissTrolley-4-Fahrzeugen der Dieselmotorhilfsantrieb durch eine wassergekühlte 160 kW / 30 kWh Batterie ersetzt werden. Die Batterie sollte unter Fahrdracht mit 150 kW nachgeladen werden können [10]. Bis 2022 wurden die beschriebenen Überlegungen jedoch nicht weiterverfolgt.

Konkrete Planungen bestehen für die Elektrifizierung einer rund 17 km lange Überlandlinie (Linie 352). Diese verläuft über ca. 4,5 km auf dem Linienweg der bestehenden OBus-Linie 1 und soll mit BOB-Fahrzeugen des Typs Solaris Trollino 18,75 MetroStyle bedient werden. Es ist eine Batteriekapazität von 90 kWh vorgesehen. Die Lieferung der Fahrzeuge soll ab dem Frühjahr 2024 erfolgen [44].

### 3.1.6. Fribourg

Nach der Durchführung von Vergleichsstudien haben der Verkehrsbetrieb Fribourg (TPF) und die Agglomeration Fribourg im März 2018 eine Beschaffung von BOB-Fahrzeugen verkündet. Hierbei sollten ab Mitte 2020 bis 2021 die ersten zehn Fahrzeuge geliefert werden [14]; mit dem heutigen Stand befinden sich 10 Hess LightTram BGT-N2D DC im Linienbetrieb, welche jeweils mit einer Batterie mit einer Speicherkapazität von 70 kWh ausgestattet sind. [42].

Die Fahrzeuge kommen auf der Linie 1 zum Einsatz. Dabei befindet sich ein 3 km langer Streckenabschnitt im Zentrum unter Fahrdracht. Etwa 1,8 km in Richtung Norden zur Porte de Fribourg als auch in Richtung Süden in die Gemeinde Marly (3,7 km) sind oberleitungsfrei. In

der Hauptverkehrszeit kommen im 7,5-Minutentakt neun Kurse zum Einsatz. Ansonsten verkehren im 10-Minutentakt sieben Kurse [14].

Bereits in [14] wurde informiert, dass (sofern sich die 2020 beschafften Neufahrzeuge im Betrieb bewähren), im Jahr 2022 weitere 20 BOB-Fahrzeuge bestellt werden sollen, um in den Jahren 2023-2025 die 12 SwissTrolley-3-Fahrzeuge auf den reinen OBus-Linien 2 und 3 zu ersetzen. Die Fahrzeuge dienen auch der Ausweitung des elektrischen Betriebs auf die Linie 6, die rund 3,7 km gemeinsam mit der rein elektrischen Linie 2 verkehrt. In Bezug auf Umleitungen etc. wird außerdem die betriebliche Flexibilität erhöht. Mit Stand 2022 wird als Zieljahr für die Erneuerung der Busse der Linien 2, 3 und 6 das Jahr 2025 anvisiert [43].

### 3.1.7. St. Petersburg

In St. Petersburg wurde die 14 km lange Oberleitungslinie 23 mit 15 Trolza-Megapolis Fahrzeugen mit einer Länge von 12 m unter dem Einsatz von Toshiba-Batterien im östlichen Teil um 7 km ohne Fahrleitung erweitert [29].

### 3.1.8. Marrakesh

In Marrakesh sind seit September 2017 zehn chinesische Dongfeng-Yangtse-Oberleitungs-fahrzeuge auf einer 10 km langen Obuslinie entlang der Avenue Hassan II im Einsatz. Die Strecke verbindet hierbei die Ortsteile Guelz und Massira und ist auf einer Strecke von nur 3 km elektrifiziert. Auf diesem Abschnitt werden die Traktionsbatterien für die Fortsetzung der weiteren Abschnitte aufgeladen. In Abbildung 3-4 ist das in Marrakesh betriebene Fahrzeug dargestellt. Der Obusbetrieb findet auf einer separat bereitgestellten Trasse statt. Weitere drei Linien sind Planung, wovon die nächste ursprünglich im Jahr 2019 eröffnet werden sollte. Weitere 15 Batterieoberleitungsfahrzeuge in Gelenkausführung wurden bestellt [10]. Bis 2022 sind keine weiteren BOB-Linien in Marrakesh in Betrieb gegangen.



Abbildung 3-4: Yangtse Batterieoberleitungsbus in Marrakesh im Batteriemodus [14]

### 3.1.9. Zürich

Ab 2003 beschafften die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) von der Hess AG 17 SwissTrolley Doppelgelenktrolleybusse (DGTB) mit einer Länge von 24,7 m (inklusive einer Option auf 14 weitere Fahrzeuge). Die Fahrzeuge wurden anfänglich mit Diesel-Hilfsaggregaten ausgeliefert. Die Umrüstung von 18 Doppelgelenk- und 17 weiteren Gelenkfahrzeugen auf Hilfsbatteriebetrieb erfolgte, um die Einhaltung der Euro-V- und -VI-Standards zu gewährleisten.

Ab 2013 wurden die restlichen DGTB aus der Option ab Werk mit Hilfsbatterien ausgestattet. Die Umrüstung erfolgte mit dem Ziel, die Befahrung von kurzen oberleitungsfreien Abschnitten zu ermöglichen, sodass Investitionen in Fahrleitungen, Kreuzungen und Luftweichen beim Umbau des Albisriedplatzes gespart werden konnten. Die Linien 33 und 72 fahren seit Sommer 2015 planmäßig zwischen Albisriedplatz und Hardplatz im Batteriemodus [10].

Die VBZ sehen im Trolleybus auf stark frequentierten Linien Vorteile gegenüber dem E-Bus und haben daher im Jahr 2016 bekannt gegeben, dass die Buslinien 69 (4,2 km) und 80 (11,8 km) im Zeitraum von 2019 bis 2022 auf BOB-Betrieb umgestellt werden sollen. Für die Erschließung der Gebiete beteiligt sich der Verkehrsbetrieb aus Zürich an der Entwicklung des BOB-Fahrzeugs SwissTrolley plus (Abbildung 3-5), welcher größere Abschnitte im Batteriebetrieb befahren kann. An dem Projekt SwissTrolley plus sind neben der VBZ sowohl die Carrosserie Hess AG als auch die ETH Zürich und die Berner Fachhochschule beteiligt [18].

Anfang 2017 wurde das Fahrzeug auf dem Netz der Verkehrsbetriebe Zürich getestet. Eingebaut ist eine LTO-Batterie mit einer Gesamtenergie von 60 kWh. Die Batterien werden während der Fahrt mit 11 bis 22 kW aus dem Netz als auch mit dem Bremsstrom geladen. Im Linienbetrieb wird hierdurch eine Reichweite von rund 10 km und bei Leerfahrten von bis zu 30 km erreicht [10]. Im Jahr 2020 bestellten die VBZ 9 Gelenkbusse des Typs SwissTrolley 5, welche im Linienbetrieb ebenfalls eine Reichweite von bis zu 10 km erzielen [41].



Abbildung 3-5: Darstellung des SwissTrolley plus im Einsatz in Zürich [19]

### 3.1.10. Shanghai

Im Februar 2017 gingen auf der Buslinie 71 40 BOB-Einheiten mit 18 m Länge (ZK5180A) und 28 BOB-Einheiten mit 12 m Länge (ZK5120C) mit Niederflertechnik der Firma Yutong offiziell in Betrieb. Die Linie zwischen Shenkun Road und Yan'an East Road hat eine Gesamtlänge von 17,5 km mit 25 Haltestellen und ist eine der wichtigsten Buslinien der Stadt. Die Fahrzeuge verkehren auf einer eigens eingerichteten Busspur. Dadurch konnte die Betriebsgeschwindigkeit von 13 km/h auf 15 km/h gesteigert und somit die Umlaufzeit von 85 min auf 75 min gesenkt werden. Mit dem System werden momentan ca. 4.000 Passagiere in der Stunde befördert, es wird erwartet, dass diese Zahl auf 6.000 ansteigt [31]. Im Jahr 2021 wurde bekannt, dass einige der bestehenden Trolley-Linien auf elektrische Busse umgestellt werden sollen [48]. Inwieweit auf den umgestellten Buslinien BOB-Einheiten eingesetzt werden, geht aus dieser Information nicht hervor.

### 3.2. Übersicht der Hersteller

Beim Batterieoberleitungsbus ist zum einen zwischen Fahrzeugen mit geringer Batteriekapazität für den kurzzeitigen Einsatz im fahrleitungsfreien Betrieb ohne Ladung aus der Fahrleitung und zum anderen zwischen Fahrzeugen mit permanenter Ladung aus der Fahrleitung mit höherer Reichweite zu unterscheiden. In der ersten Variante wird der Batteriespeicher unter Verwendung von Supercaps durch die Rekuperation der Bremsenergie aufgeladen. Batterieoberleitungsbusse (BOB) zeichnen sich mit ihrer Fähigkeit der Aufladung des Energiespeichers bei Fahrt unter Fahrdraht aus. Hierfür wird ein speziell entwickeltes Elektrik-System benötigt. Weltweit führend ist hierbei das von Kiepe Electric entwickelte In-Motion-Charging (IMC®)-System. Das IMC®-System ist hierbei unabhängig vom Karosseriebauer. In Tabelle 3-7 ist eine Übersicht der Batterieoberleitungsbusse mit der Kiepe IMC®-Technik dargestellt.

Tabelle 3-7: Ausgelieferte bzw. bestellte BOB v. Kiepe Electric mit IMC®-Technologie [12], [36]

Fahrzeuganzahl	Betreiber	Inbetriebnahme	Karosseriehersteller	Modellbezeichnung	Fahrzeuglänge [m]	Anzahl Gelenke	Leistung [kW]	Reichweite elektrisch [km]
20	Linz AG	2017-2018	Van Hool	ExquiCity 24 T	24	2	320	7
4	Verkehrsbetrieb Esslingen	2016	Solaris	Trollino 18.75 MetroStyle	18,75	1	500	10-15
4 (Option +16)	Stadtwerke Solingen	2018	Solaris	Trollino 18,75	18,75	1	320	10-15
452	King County Metro Seattle/ SFMTA, San Francisco	2014-2019	Xcelsior	XT60	18,54	1	n/a	min. 5 max. 25[36]
		2014-2019	Xcelsior	XT60	12,5	0	n/a	min. 5 max. 25[36]
28	GDRTA, Dayton	2018-2019	Gillig Corp.	NextGen	12.5	0	n/a	n/a
33	TPG, Genf	2013-2014	Van Hool	ExquiCity	18	1	320	7

Im Januar 2018 hat Solaris Bus & Coach bekannt gegeben, dass noch im gleichen Jahr ein Doppelgelenkoberleitungsfahrzeug mit 24 m fertiggestellt und demonstriert werden soll. Das Fahrzeug soll mit zwei 160 kW starke Traktionsmotoren von Cegelec ausgestattet werden [18]. Auf Grund der bisherigen Zusammenarbeit von Kiepe und Solaris im deutschen Obusmarkt ist es vorstellbar, dass auch dieses Fahrzeug mit Hilfe der IMC®-Technologie zu einem Batterieoberleitungselektrobus weiterentwickelt wird.

Ein weiteres im Einsatz befindliche Elektrik-System zur Aufladung des Energiespeichers unter Fahrdraht ist das im Rahmen des SwissTrolley plus (siehe Abbildung 3-5) entstandene Dynamic Charging (DC) Verfahren, welches in Zusammenarbeit der Hess AG gemeinsam mit der ETH Zürich, Fachhochschule Bern und der VBZ entwickelt worden ist. Das mit zwei permanenterregten Synchronmotoren (PMS-Motoren) mit jeweils 154 kW Leistung angetriebene Gelenkfahrzeug wurde zunächst in Zürich und Luzern getestet und hat eine Länge von 18,74 m [10], [19]. Das Modell wurde zwischenzeitlich zur Serienreife gebracht und als lightTram 19 DC oder SwissTrolley 5 u.a. durch die VBZ beschafft [41].

Außerhalb von Europa stellt der chinesische Hersteller Dongfeng-Yangtse „Dual-Source“ Batterieoberleitungsbusse her, die während des Betriebs unter Fahrdrabt das Batteriepaket aufladen können. Die Oberleitungsbusse sind hierbei als zweiachsige Fahrzeuge mit 12 m Länge (siehe Abbildung 3-4) und als dreiachsige Gelenkfahrzeuge mit einer Länge von 16 m und 18 m erhältlich [35]. Weitere große chinesische Bushersteller wie Yutong und Zhongtong (Fahrzeug LCK6123GEV in Jinan) [31] haben in den letzten Jahren BOB ausgeliefert.

## **4. Betriebshof**

Für dem Busbetriebshof in Marburg wird momentan in einem separaten Projekt unabhängig vom BOB Marburg ein Komplettumbau auf dem derzeit genutzten Gelände geplant [52]. Aus diesem Grund werden in diesem Dokument die Anforderungen an den Betriebshof, welche sich bei Einführung des BOB Marburg ergeben, lediglich genannt, ohne die Art der Umsetzung bereits konkret festzulegen.

Der Betrieb mit Batterie- und Oberleitungsbussen erfordert zahlreiche Änderungen in den Depots und Werkstätten im Vergleich zum aktuellen Busbetriebshof. Die Nachladeinfrastruktur und zusätzliche Werkstattausrüstung müssen neu beschafft und die betrieblichen Abläufe sinnvoll geregelt werden. Außerdem müssen die Beschäftigten für das Arbeiten mit Elektrosystemen und deren Gefahren qualifiziert werden.

Im Folgenden wird auf die mögliche Errichtung einer Fahrleitungsanlage für Testfahrten und Nachladung, die technisch erforderliche Ausstattung sowie die elektrische Ausrüstung des Betriebshofs eingegangen.

Die Auswirkungen der erforderlichen technischen Ausrüstung durch den BOB-Betrieb auf den Flächenbedarf des Betriebshofes werden ermittelt und können somit in die bereits begonnenen Planungen zur Errichtung des neuen Betriebshof der Stadtwerke Marburg einfließen.

### **4.1. Anzahl der Busse in Planvariante 1**

Im Projekt BOB Marburg werden für die favorisierte Planvariante 1 sechs Doppelgelenktrolleybusse (DGTB) im Betrieb und ein Bus als Reserve benötigt. Diese Busse sind jeweils 24 m lang und müssen bei der Planung der Abstellflächen berücksichtigt werden.

Die DGTB weisen eine maximale Ladeleistung von jeweils maximal ca. 100 kW auf. Dieser Wert ergibt sich aus der Strombegrenzung, welche im Stillstand anzuwenden ist, um die Kontaktpaarungen aus Schleifschuhen und üblichen Obus-Fahrleitungen nicht zu überlasten. Die Ladeleistung kann bei Verwendung einer anderen Methode (z. B. punktförmige Pantographenlösungen) signifikant gesteigert werden, dies erscheint bei Batterie-Oberleitungsbussen jedoch nicht nötig, da die Batterie kleiner im Vergleich zu reinen Batteriebusen dimensioniert ist.

Bei max. 100 kW Ladeleistung pro Bus können in der Spitze bis zu 700 kW Ladeleistung für die in Planvariante 1 vorgesehene Busflotte benötigt werden.

### **4.2. Fahrleitungsanlage im Betriebshof**

Der Aufbau eines Fahrleitungsnetzes für das Fahren im Betriebshof (d. h. bis zu jedem Abstellplatz und in die Werkstatt) ist wegen zahlreicher Weichen und Kreuzungen sehr aufwändig. Außerdem ist nach derzeitigem Stand vom Betriebshof Marburg keine Verbindung zum sonstigen Fahrleitungsnetz vorgesehen. Daher wird für die Bewegung der Fahrzeuge auf dem Betriebshof die eingebaute Batterie vorgeschlagen. Für die Bewegung entladener Fahrzeuge sind entsprechende Schlepper vorzuhalten. Falls in der Zukunft eine Fahrleitungsanlage von der Strecke bis auf den Betriebshof gebaut wird, sind Halteflächen zum An- und Abdrachten der Busse zweckmäßig, um auf dem Betriebshof selbst weiterhin keine Fahrleitung errichten zu müssen.

Im Betriebshof sollte dennoch eine einfache Fahrleitungsanlage z. B. als Ring vorhanden sein, um z. B. während oder nach Reparaturen Testfahrten durchführen zu können. Die Busse könnten außerdem in der Abstellanlage über ein Fahrleitungssystem nachgeladen werden,

ohne ein zusätzliches Steckersystem (mit zusätzlichem Platzbedarf) zwingend an jedem Stellplatz und in jedem Fahrzeug vorsehen zu müssen.

Damit die Fahrleitung im Betriebshof unabhängig von der Strecke unter Spannung gesetzt werden kann, ist ein eigenes Unterwerk für den Betriebshof erforderlich. Dieses sollte jeweils einen Speiseabgang für die Nachladung in der Abstellanlage, zur Testschleife sowie zu den Werkstätten bieten. Abgänge für die Nachladung von Bussen über Steckersysteme können ebenfalls am Unterwerk vorgesehen werden. Eine Transformator-Gleichrichter-Einheit mit einer Leistung von 660 kVA ist für die in Planvariante 1 vorgesehenen Busse ausreichend.

Es sollte eine elektrische Leitstelle, welche in Kommunikation mit den Bussen bzw. den Nachladeeinrichtungen die Ladeleistung steuern kann (Last- und Lademanagementsystem), vorgesehen oder zumindest vorbereitet werden, um ohne Ausbau des Unterwerks weitere Busse nachladen zu können. Für spätere Erweiterungen sollte Platz für eine zweite Transformator-Gleichrichter-Einheit sowie für weitere Speiseabgänge vorgesehen werden.

### **4.3. Einrichtungen zum Nachladen der Busse**

Für die Nachladung der Busse während der nächtlichen Pause im Betriebshof bestehen mehrere Möglichkeiten. Unabhängig von der gewählten Art der Nachladung ist, wie bereits erwähnt, ein Last- und Lademanagementsystem entweder auf Seiten der Infrastruktur oder auf Seiten der Fahrzeuge vorzusehen. In Kapitel 7 der VDV-Schrift 260 sind Anforderungen und Hinweise bzgl. solcher Systeme beschrieben.

#### **4.3.1. Nachladung über konventionelle Fahrleitung**

Über den Spuren der Abstellfläche wird eine konventionelle Obus-Fahrleitung errichtet. Die abgestellten Fahrzeuge werden über die Standard-Stromabnehmer geladen.

Die Vorteile dieser Variante sind:

- Es sind keine von der Streckenausrüstung abweichenden Bauformen notwendig. Die technische Infrastruktur entspricht derjenigen der Strecke und am Bus sind keine zusätzlichen Einrichtungen notwendig.
- Auf jeder Spur der Abstellanlage können Fahrzeuge verschiedener Länge abgestellt werden, weil die Fahrleitung auf der gesamten Länge Leistung bereitstellen kann.
- Kein Platzbedarf für Ladesäulen, kein Verschleiß von Kabeln.
- Wenn die Fahrleitungen über Querfelder aufgehangen werden, befinden sich keine oder nur wenige Maste auf der Abstellfläche.

Der Nachteil dieser Variante ist, dass der Stillstandsstrom der Stromabnehmer eingeschränkt ist (bei Standardfahrleitungen maximal 120 A), weil bei stehendem Fahrzeug der Wärmeeintrag in die Fahrleitung punktförmig ist. Damit verbleibt nach Abzug der Hilfsbetriebeleistung nur eine geringe Differenz zum Laden der Batterie. Dieser Nachteil lässt sich folgendermaßen mindern (nicht aber vermeiden):

- Wahl der maximal erlaubten Spannung als Einspeisespannung in die Fahrleitung (für DC 750 V Nennspannung maximal DC 900 V),
- Deutliche Reduzierung der Hilfsbetriebeleistung durch Zurückfahren der Komforteinrichtungen (z.B. Heizung nur auf Frostschutzniveau),
- Verwendung einer thermisch verstärkten Fahrleitungsbauart, um den zulässigen Strom zu erhöhen, zum Beispiel durch Hochkantprofile. Dies verteuert wegen der Sonderbauform die Anlage deutlich.

Bei der Nachladung über Fahrdrabt kann die Ladeleistung nicht direkt an der Einspeisung geregelt werden, wie dies z. B. bei punktförmigen Pantographenlösungen oder Steckersystemen prinzipiell möglich ist. Aus diesem Grund muss auf jedem Fahrzeug eine

Laderegeln existieren, welche neben der Konditionierung des Energiespeichers eine Begrenzung der Ladeleistung und/oder eine zeitliche Staffelung von Ladevorgängen ermöglicht, um die maximale Leistung der Transformator-Gleichrichter-Einheit, welche die Ladeleistung bereitstellt, nicht zu überschreiten. Da die Busse zum Nachladen unter der Oberleitung der Strecke sowieso eine Laderegeln eingebaut haben müssen, bietet es sich an, diese auch um die genannten Funktionen zu erweitern. Im Betriebshof ist dann nur eine entsprechende Leitstelle vorzusehen.

#### **4.3.2. Punktförmige Pantographenlösungen**

Hierbei werden einzelne Abstellplätze mit einem Lademast versehen. Die Stromübertragung erfolgt mit einem speziellen Stromabnehmer (Pantograph), der für einen größeren Übergangstrom im Vergleich zu einer üblichen Fahrleitungsanlage geeignet ist, aber nur im Stillstand des Fahrzeugs verwendet werden kann. Praktische Ausführungen ordnen wahlweise den Pantographen auf dem Fahrzeug oder am Lademast an. Auf der jeweils anderen Seite befinden sich spezielle Kontaktstücke.

Wegen der Bindung an einen Lademast sind die Anordnung der Abstellplätze und ihre Zuordnung zu bestimmten Fahrzeuglängen nach dem Bau der Maste fixiert. Änderungen im Typenbestand der Flotte, zumindest was Fahrzeuglänge und Position sowie Typ des Stromabnehmers betrifft, erfordern einen Umbau des Betriebshofes. Des Weiteren erfordert der Mast Platz, wodurch sich der Abstand der Abstellgassen erhöht bzw. die Kapazität des Betriebshofes sinkt. Schließlich müssen die zusätzlichen Pantographen bzw. Kontaktstücke auch auf jedem Fahrzeug vorgesehen werden.

#### **4.3.3. Steckerlösungen**

Der bauliche Aufwand für Steckerlösungen ist meist kleiner als für Fahrleitungen oder Pantographenmasten. Die erzielbare Ladeleistung ist dabei ähnlich der Leistung, die im Stillstand über eine übliche Fahrleitungsanlage übertragen werden kann. Steckerlösungen haben folgende Nachteile:

- Wegen der Bindung an einen Elektranen sind die Anordnung der Abstellplätze und ihre Zuordnung zu bestimmten Fahrzeuglängen nach dem Bau der Elektranen fixiert.
- Elektranen erfordern Platz, wodurch sich der Abstand der Abstellgassen erhöht bzw. die Kapazität des Betriebshofes sinkt.
- Erfahrungen zeigen, dass Elektranen mit einem Anfahrerschutz ausgestattet werden sollten, was den Platzbedarf weiter erhöht.
- Erfahrungen zeigen, dass mit einem erhöhten Verschleiß zu rechnen ist. Bodennah entnehmbare Ladekabel nutzen sich schnell ab (Schleifen über Beton, Überfahren durch Fahrzeuge, Herunterfallen der Stecker). Über Federsysteme aufgehängene Stecker kollidieren gelegentlich mit Frontscheiben der Busse.
- Änderungen im Typenbestand der Flotte, zumindest was Fahrzeuglänge und Position des Steckers betrifft, erfordern einen Umbau der Elektranen.

#### **4.4. Technische Ausstattung**

Eine Werkstatt für elektrisch betriebene Busse (mit Batterien und/oder Stromabnehmern) muss Einrichtungen besitzen, die für Standard-Dieselmotoren nicht oder nicht in diesem Umfang erforderlich sind. Eine Ausbildung der Beschäftigten für Elektroarbeiten ist erforderlich. Insbesondere die Schulung gegen elektrische Gefährdungen ist zu beachten.

Für den Fall, dass Dieselbusse parallel zu Elektrobussen im Betriebshof gewartet werden, ist der Platzbedarf zu beachten für:

- zusätzliche Werkzeuge,
- zusätzliche Lagerkapazität für Ersatzteile (Erhöhung der Zahl verschiedener Teile).

#### **4.4.1.      Wartung von Elektrobussen und deren Komponenten**

Die Diagnose, Instandhaltung und Wartung von Elektrobussen (mit Batterien und/oder Stromabnehmern) erfordert die Einrichtung einer entsprechenden Werkstattinfrastruktur. Der aktuelle technische Stand bezüglich der Wartung von Niederflurbussen im Allgemeinen ist in der VDV-Schrift 820, Teil 2 beschrieben.

Die Werkstattinfrastruktur umfasst:

- Dacharbeitsstände mit einer Krantraverse,
- In der Werkhalle: Prüfplätze oder Prüfanlagen mit Möglichkeit der Einspeisung der Fahrleitungsspannung über Fahrleitung und/oder ein Stecksystem, konform zu DIN EN 50191,
- Elektrowerkstatt mit Prüfplatz und Prüfgeräten bis 1000 V,
- Ladestationen,
- Lager für die Batterien,
- Spezialwerkzeuge und
- Persönliche Schutzausrüstung.

Bei der Nutzung von Grubenplätzen wird empfohlen, alle oder die allermeisten Grubenplätze für Durchgangsfahrten anzulegen. Für die Doppelgelenkbusse ist dies zwingend erforderlich (einschließlich der Bereitstellung der nötigen Grubenlänge und Anhebepunkte). Aber auch die Instandhaltung von Einfachgelenkbusen wird einfacher durch Durchgangsruben. Lediglich Solo- und Midibusse könnten über Grubenstände, welche als Kopfgruben vor der Wand angelegt sind, gewartet werden. Als Ergänzung oder Alternative zu Grubenplätzen sind Hebewerkzeuge wie Stempelheber oder Radgreifer vorzusehen.

In Abhängigkeit der Einbauorte der Hochvoltkomponenten (HV-Komponenten) und ggf. sonstiger Komponenten ist ein Dacharbeitsstand erforderlich. Da die Batterie-Oberleitungsbusse Stromabnehmer besitzen, werden auch einige Vorschriften der VDV-Schrift 820, Teil 1, als relevant betrachtet. Dies umfasst insbesondere den letzten Teil des Kapitels 1.3.5.1, beginnend mit „Für Prüfungen des Fahrzeugs unter Spannung ...“, welcher für die Infrastruktur im Betriebshof sowie für die Fahrzeuge Vorgaben bzgl. der Versorgung mit Oberleitungsspannung über Steckverbindungen enthält. Bei Vorhandensein dieser Versorgung ist der Bau einer Fahrleitung in der Werkhalle nicht unbedingt nötig. Außerdem beschränken sich dann Maßnahmen zum Schutz gegen direktes Berühren der Fahrleitungsspannung auf diese Anlagen inkl. deren Spannungsversorgung sowie auf die von ihnen versorgten Prüfplätze.

Werden Instandsetzungsarbeiten am HV-System der Fahrzeuge durchgeführt, benötigt das Werkstattpersonal entsprechende Arbeitsmittel und Werkstatthilfen. Zusätzlich werden spezielle Messgeräte, isoliertes Werkzeug und persönliche Schutzausrüstung benötigt. Durchzuführende Messverfahren sind z. B. in den Vorschriften ECE-R 85 und ECE-R 100 beschrieben. Die für die Arbeiten notwendigen Qualifikationen sind in Kapitel 5 beschrieben.

#### **4.4.2. Elektrowerkstatt mit Prüfplatz und Prüfgeräten**

Die Einrichtung einer Elektrowerkstatt mit Prüfplätzen und Prüfgeräten ist sinnvoll, wenn einzelne Baugruppen, von einzelnen Platinen bis hin zu einem Batteriepaket, vor Ort im Betriebshof geprüft werden sollen. Prinzipiell könnten in dieser Elektrowerkstatt die genannten Komponenten auch gewartet werden, dabei auch Geräte, die für den Fahrbetrieb nicht unbedingt erforderlich sind (z. B. Fahrscheinautomaten). Dies ist perspektivisch in Marburg jedoch nicht vorgesehen.

In der Praxis ist es sinnvoll, lediglich Komponenten, welche mit geringer Spannung und Leistung betrieben werden oder bei denen die Gewährleistung des Herstellers abgelaufen ist, direkt im Betriebshof warten zu lassen. Für die selbstständige Wartung von Hochleistungsbauteilen der Leistungselektronik muss die Montage des Kühlsystems mit sehr guter Qualität erfolgen, deshalb werden diese zweckmäßig direkt beim Hersteller bzw. durch zertifizierte Vertretungen repariert.

Eine Elektrowerkstatt hat je nach Umfang der durchzuführenden Arbeiten praktischerweise die folgende Ausstattung:

- Multimeter bzw. Oszilloskope mit Prüfspitzen, ggf. weitere Messgeräte (notwendig)
- Labornetzeile (notwendig)
- Empfohlen: Möglichkeit der Einfahrt mit Gabelstapler zum Transport von Batteriepaketen
- Optional: Antistatische Ausrüstung an den Prüfplätzen (Antistatikmatten etc.)
- Optional: Einrichtungen zum Entlöten/Verlöten kleiner Bauteile wie Kondensatoren, Widerstände, ICs (auch in SMD-Baugröße), mit Einrichtung zur Rauchabsaugung

Das Personal muss mit dem Umgang der Ausstattung geschult sein (siehe Kapitel 5). Beispielsweise müssen Batteriepakete unter Spannung gewartet werden.

#### **4.4.3. Erschließung**

Für den Betriebshof sind die üblichen Erschließungsmaßnahmen wie Stromanschluss, Wärmeanschluss (optional auch Kälteanschluss), Wasser- und Abwasseranschluss sowie Internetanschluss vorzusehen. Für die Versorgung des Unterwerks bzw. der Ladeeinrichtungen auf dem Betriebshof ist der Anschluss an das Mittelspannungsnetz erforderlich. Darüber hinaus bestehen keine besonderen Anforderungen.

#### **4.4.4. Energie- und Leistungsbedarf**

Für die technische Anbindung an das öffentliche Energieversorgungsnetz ist der Energie- und Leistungsbedarf des Betriebshofs zu bestimmen. Dabei kann der Energiebedarf in drei wesentliche Verbrauchskategorien unterteilt werden: Zum einen sind das Fahrleitungsnetz bzw. die für die BOB genutzten Ladeeinrichtungen zu berücksichtigen. Die Stromversorgung für die Verwaltung und die Werkstätten ist eine weitere Hauptkategorie. Drittens sind die Gebäude zu heizen und ggf. zu klimatisieren.

Von der ARGE BOB Marburg IFB-VI kann nur der Leistungs- und Energiebedarf der Kategorie 1, d. h. für das im Depot gebaute Fahrleitungsnetz bzw. die durch BOB benutzten Ladeeinrichtungen, sinnvoll abgeschätzt werden, da der Betriebshof derzeit in einem separaten Vorhaben neu geplant wird.

Für die Kategorien Stromversorgung Werkstatt/Verwaltung sowie Heizung/Klimatisierung werden die Energiebedarfe eines ungefähr vergleichbaren Betriebshofes genannt. Die Leistungs- und Energiebedarfe für die Kategorien Strombedarf der Verwaltung und Heizung/Klimatisierung der Gebäude sind unabhängig vom Leistungs- und Energiebedarf der Busse.

Beim Energiebedarf der Werkstatt ist von einem geringfügigen Mehrbedarf gegenüber der Wartung von Dieselsebussen auszugehen (aufgrund der Notwendigkeit, die schweren Batteriepacks und ggf. andere auf dem Dach verbaute Geräte mit einer Krananlage anzuheben). Da in Zukunft auch Batteriebusse (welche größere und schwerere Batterien besitzen als BOB-Fahrzeuge) im Betriebshof gewartet werden sollen, wird erwartet, dass sich auch in dieser Kategorie kein signifikanter Mehrbedarf durch die Umstellung auf den Betrieb mit BOB-Fahrzeugen ergibt.

#### **4.4.4.1. Fahrleitungsnetz und BOB-Ladeeinrichtungen**

Die Fahrleitung auf dem Betriebshof wird tagsüber lediglich für Testfahrten genutzt; nur im Fall einer Anbindung an das restliche Fahrleitungsnetz wären zusätzlich die Ein- und Ausrückfahrten zu beachten. Abgestellte Busse bzw. Reservefahrzeuge werden tagsüber ggf. nachgeladen und/oder geheizt. In Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung und der Gestaltung des elektrischen Anschlusses könnte auch diese Energie zum Teil mit einer PV-Anlage gespeist werden.

In den Nebenverkehrszeiten und während der nächtlichen Betriebsruhe wird der Energieverbrauch hauptsächlich durch die Anforderung für die Nachladung der abgestellten Busse bestimmt. Dies führt zu einem Energiebedarf, welcher in den Nachtstunden höher sein kann als am Tag, zudem entfällt in der Nacht die Möglichkeit der Einspeisung von Solarstrom.

Angenommen, es werden insgesamt sechs Doppelgelenktrolleybusse (das Reservefahrzeug nicht mitgezählt) mit jeweils 90 kWh Speicherkapazität (davon 72 kWh nutzbar) zu 50 % entladen abgestellt und über jede Nacht des Jahres bei einer Effizienz von 85 % aufgeladen, so kann der Energieverbrauch im Jahr auf ca. 93.000 kWh abgeschätzt werden. Die Spitzenleistung beträgt dabei maximal 100 kW pro Bus und somit (inkl. Reservefahrzeug) maximal 700 kW. Durch den Einsatz von Lademanagementsystemen kann die Spitzenleistung, nicht jedoch der Energieverbrauch signifikant reduziert werden. Eine zukünftige Vergrößerung der BOB-Flotte wird entsprechende Auswirkungen auf den Energieverbrauch und ggf. auch auf die gesamte Spitzenleistung beim Ladevorgang haben.

#### **4.4.4.2. 50 Hz Elektroenergie (exkl. Fahrleitung)**

Die Versorgung des Betriebshofes kann wie die Nachladeeinrichtung über einen Mittelspannungsanschluss erfolgen. Ein von der Größenordnung ähnlicher Busbetriebshof ist mit einem Anschluss mit einer Maximalleistung von 120 kW erschlossen. Dabei liegt die maximal erreichte Höchstleistung im Winter bei ca. 75 kW. Der Energieverbrauch aller 50-Hz-Anlagen auf diesem Betriebshof liegt im Jahr bei ca. 230.000 kWh. Da sich die genutzten Anlagen in ihren Leistungswerten stark ähneln, wird von einer ähnlichen Größenordnung beim Energieverbrauch ausgegangen; ggf. können bei strikter Verwendung von LED-Leuchtmitteln noch Einsparungen erzielt werden.

Um die benötigte elektrische Energie so günstig und so umweltfreundlich wie möglich zu beziehen, kann auf die Expertise der Stadtwerke Marburg bei der Planung der Energieversorgung des Betriebshofes zurückgegriffen werden. Synergieeffekte durch die Nutzung der Dachfläche sind denkbar – bei beispielhaft 6000 m<sup>2</sup> nutzbarer Fläche wäre unter der Annahme einer Spitzenleistung von 200 W/m<sup>2</sup> die Erzeugung von 30 kW (in der Spitze) möglich. Ein großer Teil der erzeugten Energie könnte tagsüber direkt auf dem Gelände genutzt werden.

#### **4.4.4.3. Wärmeversorgung und Klimatisierung**

Die notwendige Wärmeenergie hängt primär von der Geometrie der beheizten Räume und der Wärmeisolation der Wände ab. Somit ergeben sich diesbezüglich keine gesonderten Anforderungen aus dem Betrieb mit Elektrobussen. Einzig der Raum, welcher zur Lagerung von Batterien benutzt wird, muss ggf. innerhalb von bestimmten Temperaturgrenzen gehalten werden.

Um die benötigte Wärmeenergie so günstig und so umweltfreundlich wie möglich zu beziehen, kann auf die Expertise der Stadtwerke Marburg bei der Planung zurückgegriffen werden.

Die Wärmeversorgung des Betriebshofes eines vergleichbaren Busbetriebes leistet ca. 500.000 kWh pro Jahr. Davon entfallen ca. 50.000 kWh auf ein Verwaltungsgebäude ähnlicher Nutzfläche wie in [52] beschrieben, etwa 300.000 kWh pro Jahr entfallen auf die Werkstatthallen mit Sanitärräumen (1500 m<sup>2</sup>) und die restlichen 150.000 kWh pro Jahr entfallen auf die Bereiche für die tägliche Wartung und Reinigung sowie weitere kleine Werkstatträume (z. B. Elektrowerkstatt) mit je 800 m<sup>2</sup>. Es wird erwartet, dass die Neubauten in Marburg mit erhöhter Wärmeeffizienz realisiert werden können.

Hinweis: Die angegebenen Energiewerte beziehen sich lediglich auf die Heizung der Gebäude, da eine Klimatisierung im betrachteten Betriebshof nicht existiert.

## 5. Qualifizierung des Personals

### 5.1. Allgemeines

Für das Arbeiten an elektrischen Anlagen hat sich ein allgemeiner Sprachgebrauch etabliert und es existieren allgemein verbindliche Richtlinien, welche im Folgenden übersichtshalber vorgestellt werden.

Die Bezeichnung Elektrofachkraft (Efk) gilt per Definition nicht als Berufsbezeichnung. Der Begriff zeigt an, dass die betreffende Person das Vermögen und die Fertigkeiten besitzt, elektrotechnische Arbeiten in einem bestimmten Bereich der Elektrotechnik eigenverantwortlich und selbständig durchführen darf. Grundsätzlich gibt es für alle Bereiche der Elektrotechnik Elektrofachkräfte. Jedoch sind Elektrofachkräfte bestimmter anderer Bereiche nicht automatisch Elektrofachkräfte für HV-Systeme in Fahrzeugen. Die fachliche Qualifikation als Elektrofachkraft wird nach DGUV Information 203-011 und DGUV Vorschrift 3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ durch den Abschluss einer Berufsausbildung dokumentiert. Zu beachten sind außerdem die einschlägigen normativen Vorschriften. In der VDV-Mitteilung 5701 „Verantwortliche Elektrofachkraft (vEFK) im Aufgabengebiet des ÖPNV“ wird die geltende Rechtslage praxisnah und mit detaillierten Quellenangaben zusammengefasst, außerdem sind darin Vorschläge zur Mitarbeiterstruktur für die Bereiche, in denen Elektrofachkräfte verantwortlich sind, enthalten.

Die im Folgenden verwendeten Definitionen, ebenso wie die aufgeführten Handlungsempfehlungen sind dem Leitfaden „Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen“ der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft [38] und dem Abschlussbericht „Betrieb der Buslinie 204 mit einer Flotte von Elektrobussen inklusive Infrastruktur zur induktiven Zwischenladung“ [39] entnommen. In diesen beiden Dokumenten wird umfassend und lehrbuchhaft auf benötigte Qualifikationen und die Systematik der Schulung der Beschäftigten von Verkehrsunternehmen des ÖPNV bei der Einführung von Omnibussen mit Hochvolt-Systemen eingegangen.

Um einen reibungslosen Betrieb und die Integration des Trolleybus-Systems in alle betrieblichen Abläufe zu realisieren, müssen die Mitarbeiter:innen der Bereiche:

- Fahrbetrieb,
- Fahrzeuginstandhaltung,
- Instandhaltung der elektrischen Infrastruktur (einschließlich der Ladestationen),
- Leitstelle,
- Informationstechnik,
- Fahr- und Umlaufplanung und
- Ausbildungswerkstätten

zielgerichtet und in Abhängigkeit der geplanten Tätigkeiten auf den Umgang mit Hochvoltanlagen vorbereitet und weiter qualifiziert werden. Die Einführung von Bussen mit Hochvolt-Systemen (HV-Systeme) birgt zusätzliche Gefahren, durch:

- HV-Komponenten bei Tätigkeiten am Fahrzeug,
- neue Werkstattinfrastruktur und
- Mängel in der Werkstattorganisation

und erfordert daher eine Anpassung der bestehenden Gefährdungsbeurteilung. Um das zu vermittelnde Wissen zu festigen und Unsicherheiten vorzubeugen, müssen theoretische und praktische Schulungen wiederholt durchgeführt werden [39].

## 5.2. Qualifikationsstufen

Für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen sind die in Abbildung 5-1 dargestellten Qualifikationsstufen erforderlich, welche im Folgenden erläutert werden. Die Informationen entstammen [38].

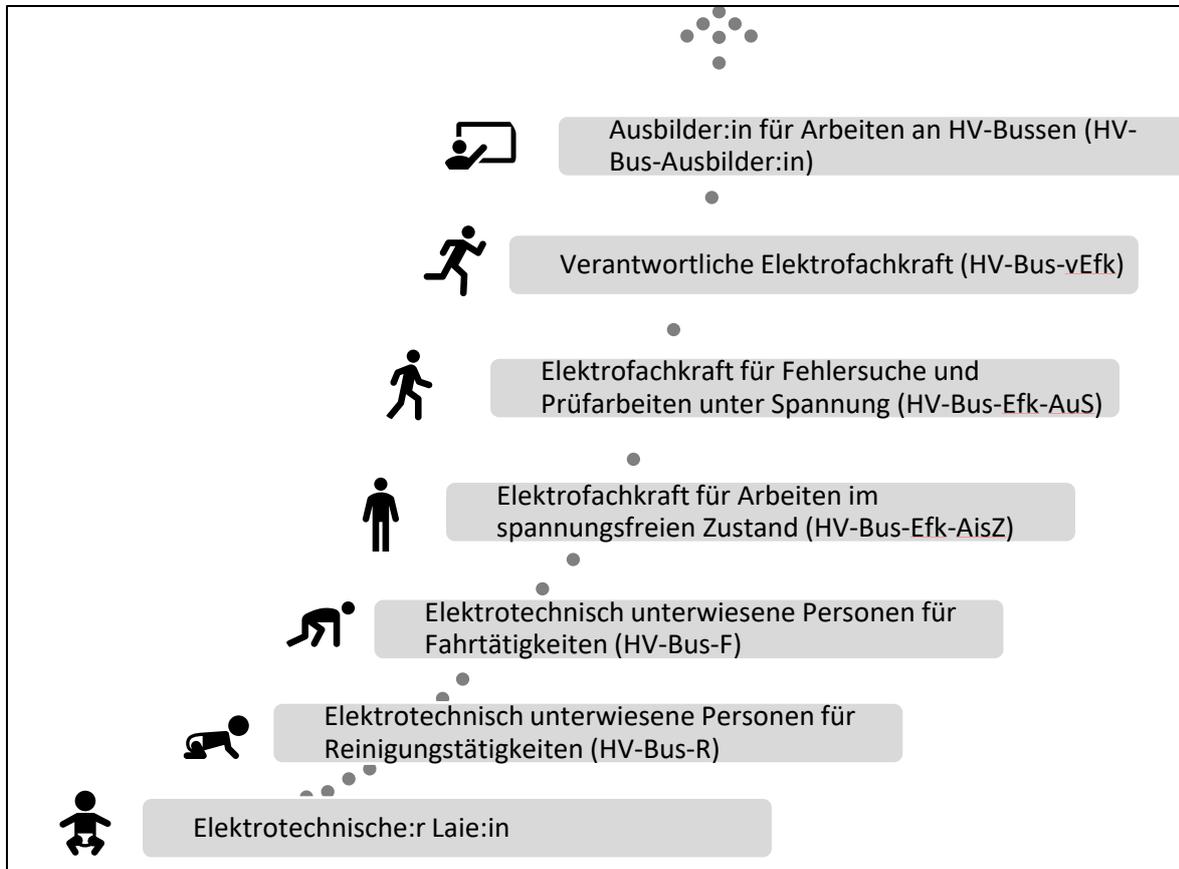


Abbildung 5-1: Qualifizierung für Arbeiten mit HV-Bussen (eigene Darstellung nach [38])

Hinsichtlich der Qualifikation der Mitarbeiter ist künftig zwischen elektrotechnischen Laien:Laiinnen, elektrotechnisch unterwiesenen Personen (EuP) und Elektrofachkräften (Efk) zu unterscheiden.

Für das Fahr- und Reinigungspersonal sind Sicherheitsunterweisungen hinsichtlich möglicher Gefahren bei unsachgemäßem Verhalten und für die Fahrer:innen zusätzlich ein Fahrer:innentraining durchzuführen – sie gelten dann als elektrotechnisch unterwiesene Personen für Reinigungstätigkeiten (HV-Bus-R) bzw. für Fahrtätigkeiten (HV-Bus-F).

Ebenso müssen Beschäftigte, die Servicearbeiten und mechanische Instandsetzungsarbeiten durchführen und nicht direkt mit dem HV-System arbeiten, durch Unterweisung zu EuP qualifiziert werden (HV-Bus-EuP).

Mitarbeiter:innen der Instandsetzung, welche eigenständig an HV-Anlagen arbeiten, müssen zu Elektrofachkräften für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen aus- bzw. weitergebildet werden. Die Dauer hängt dabei von bereits erworbenen, beruflichen Qualifikationen und den durchzuführenden Tätigkeiten (arbeiten im spannungsfreien Zustand oder arbeiten unter Spannung) ab.

Zusätzlich müssen die verantwortlichen Ersthelfer:innen im Betrieb für den Umgang mit Stromunfällen entsprechend den Ausführungen im Heft der BG ETE „Erste Hilfe mit Sonderteil Stromunfälle“ weitergebildet werden.

## Quellenverzeichnis

- [1] DIN EN 50502:2016-03 (VDE 0115-502): Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Elektrische Ausrüstung in Obussen - Sicherheitsanforderungen und Stromabnehmersysteme
- [2] Gerstenberg, Lehmann, Zauner: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen; in: Elektrische Bahnen 8-9/2012, Seite 452-460
- [3] Bühs, Keil, Lehmann: Stromabnehmer für schwere Nutzfahrzeuge; in: Elektrische Bahnen 4/2013; Seite 249-256
- [4] Brodkorb, A.: Truck Trolley System; Vortrag Siemens AG 2014
- [5] Kiepe Elektrik GmbH: Obus-Stromabnehmer; Druckschrift 12SA2DEI, Düsseldorf 2002
- [6] BMVI (Hrsg.): Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung 2018.
- [7] Bühlow, H.: Die Obus-Stadt-Eberwalde
- [8] Global World Logistic Ltd (Hrsg.): WB-LYP100AHA LiFeYPO4 (3.2V/100Ah TALL). <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP100AHA-LiFeYPO4-3-2V-100Ah-TALL.html>
- [9] Hondius, H.: Der Trolleybus-Hybridbetrieb in Esslingen. Stadtverkehr 6/17 (62. Jg.) S. 20 ff.
- [10] Hondius, H.: E-Mobilität: Welche Rolle kann der Trolleybus spielen? Der Nahverkehr 6/2018
- [11] Kiepe Electric (Hrsg.): Esslingen, Batterie Gelenkbus mit IMC 500
- [12] Kiepe Electric (Hrsg.): In Motion Charging (IMC®)-Busse - Referenzen . <http://www.kiepe.knorr-bremse.com/elektrobusse/trolleybusse-in-motion-charging/vkproduktordner.2008-05-14.2954039772>
- [13] Lehmann, J.: Die 5.Generation - Die ersten vier Batterie Oberleitungs Busse (BOB) der Firmen Solaris/Kiepe-Electric. <http://obus269rb.bplaced.net/s259BOB.pdf>
- [14] Lehmann, J.: Zusammenfassung der Meldungen von TrolleyMotion 01.03.2018 bis 31.05.2018. <http://trolley-motion.bplaced.net/okb112.pdf>
- [15] Stadtwerke Solingen (Hrsg.): Verkehrsbetrieb mit Weltruf. <http://www.sobus.net/die-sws/>
- [16] Stadtwerke Solingen (Hrsg.): Bob - Batterie Oberleitungsbus. <https://www.bob-solingen.de/>
- [17] TROLLEY (Hrsg.): Trolley - Promoting Electric Public Transport Teil B
- [18] Uhl, A.: Quartier-eBus: Die VBZ setzen Elektrifizierungsstrategie fort. [https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die\\_vbz/medien/medienmitteilungen/quartier-ebus--die-vbz-setzen-elektrifizierungsstrategie-fort.html](https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/medien/medienmitteilungen/quartier-ebus--die-vbz-setzen-elektrifizierungsstrategie-fort.html)
- [19] VBZ (Hrsg.): «SwissTrolley plus» – ein Batterie-Trolleybus. <https://www.swisstrolleyplus.ch>
- [20] Walther, C.: Ein BOB für Solingen. Stadtverkehr 5/18 (63. Jg.) S. 6 ff.
- [21] Werwitzke, C.: Städtischer Verkehrsbetrieb Esslingen wird rein elektrisch. <https://www.electrive.net/2017/07/25/esslinger-verkehrsbetrieb-wird-rein-elektrisch/>
- [22] Wruck, F. Et al.: Eberswalde Use Case set up Report Pillar A. ELIPTIC - electricification of public transport in cities
- [23] Wruck, F. Et al.: Eberswalde Final Use Case Report. ELIPTIC - electricification of public transport in cities

- [24] Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.; Schmidt, P.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen, Planung, Berechnung, Ausführung. Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner Verlag, 1998.
- [25] Berliner Verkehrsbetriebe, Solaris Deutschland GmbH, Bombardier Transportation GmbH, u.w.: Schaufenster Elektromobilität, E-Bus-Berlin – Betrieb der Buslinie 204 mit einer Flotte von Elektrobussen inklusive Infrastruktur zur induktiven Zwischenladung, 14.12.2016
- [26] Hammer, S.; Stephan, A; Wundratsch, G.; u.w.: Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen, Systemstudie; Hrsg.: trolley:motion, Verein zur Förderung moderner Trolleybussysteme, März 2017
- [27] Dongxiang Yan, Languang Lu, Fuchao Jiang, u.w.: Comparing the performances of different energy storage cells for hybrid electric vehicle; EVS28 Kintex, Korea, 3.-6. Mai 2015
- [28] D.W. Corson: High power battery systems for hybrid vehicles; Journal of Power Sources, ISSN 0378-7753, 105 (2002), Seite 110-113
- [29] Bauer, S.: Akku Welt; Hrsg.: Vogel Business Media, 2017
- [30] Dambrowski, J.: Methoden der Ladezustandsbestimmung – mit Blick auf LiFePO<sub>4</sub>/Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-Systeme.
- [31] [http://www.deutronic.com/fileadmin/images/products/Ladegeraete/Literatur\\_LG/Methoden\\_der\\_Ladezustandsbestimmung.pdf](http://www.deutronic.com/fileadmin/images/products/Ladegeraete/Literatur_LG/Methoden_der_Ladezustandsbestimmung.pdf), (abgerufen 28.03.2019)
- [32] Zhengzhou Yutong Group Co., Ltd:  
<https://en.yutong.com/pressmedia/marketexpress/2017/2017CHJDZxXngY.html>  
(abgerufen am 13.01.2019)
- [33] Zhongtong Double-source Electric Trolley Bus highly welcomed in Jinan;  
[http://www.chinabuses.org/news/2015/0303/article\\_8746.html](http://www.chinabuses.org/news/2015/0303/article_8746.html) (abgerufen am 13.01.2019)
- [34] trolley:motion: trolley worldmap. <https://www.trolleyemotion.eu/trolleystaedte/> (abgerufen am 19.06.2019)
- [35] Petersson, V.: Europas erster Hybrid-Obus rollt.  
<https://www.moz.de/landkreise/barnim/eberswalde/artikel4/dg/0/1/1027645/>
- [36] Dongfeng Yangtse (Hrsg.): Trolleybusses.  
<http://en.yzjqc.com/index.php/Index/pru/aid/45>
- [37] NFI Group Inc. (Hrsg.): New Flyer Xcelsior Trolley.  
<https://www.newflyer.com/bus/xcelsior-trolley/> (abgerufen am 26.01.2022)
- [38] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, Prof. Dr.-Ing. Friedbert Pautzke, Dipl.-Ing. Christian Hain u.a.: Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen, 10/2016
- [39] Berliner Verkehrsbetriebe, Solaris Deutschland GmbH, Bombardier Transportation GmbH, u.w.: Schaufenster Elektromobilität, E-Bus-Berlin – Betrieb der Buslinie 204 mit einer Flotte von Elektrobussen inklusive Infrastruktur zur induktiven Zwischenladung, 14.12.2016
- [40] Solingen bestellt Oberleitungs-Busse von Solaris.  
<https://emobilitaet.online/news/produkte-und-dienstleistungen/6946-solingen-e-busse-solaris-oberleitung>, abgerufen am 09.11.2022

- [41] Hess Swisstrolley5 BGT-N2D.  
[https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die\\_vbz/fahrzeuge/trolleybusse/hess-swisstrolley5-bgt-n2d.html](https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/trolleybusse/hess-swisstrolley5-bgt-n2d.html), abgerufen am 09.11.2022
- [42] Hess LighTram BGT N2D DC.  
<https://www.tpf.ch/de/uber-die-tpf/identitat/flotte/bus-und-trolleybus/hess-lightram-bgt-n2d-dc>, abgerufen am 21.11.2022
- [43] Verbesserung des Verkehrsangebots der Agglomeration Fribourg hinsichtlich der Fahrzeuge.  
<https://www.agglo-fr.ch/de/mobilitaet/busnetz-freiburger-agglomeration>, abgerufen am 21.11.2022
- [44] Ein neues Trolleybus-Angebot in Arnheim.  
<https://www.urban-transport-magazine.com/ein-neues-trolleybus-angebot-in-arnhem/>, abgerufen am 21.11.2022
- [45] BOBs haben in Solingen die Linie 695 übernommen.  
<https://www.solinger-tageblatt.de/solingen/bobs-haben-solingen-linie-uebernommen-13184455.html>, abgerufen am 21.11.2022
- [46] Stadtwerke Solingen bestellen 16 Batterie-O-Busse  
<https://emobilitaet.online/news/produkte-und-dienstleistungen/6946-solingen-e-busse-solaris-oberleitung>, abgerufen am 21.11.2022
- [47] Stadtwerke Solingen – Verkehrsbetrieb mit Weltruf.  
<http://www.sobus.net/die-sws/>, abgerufen am 22.11.2022
- [48] Übers.: Shanghai soll 6 Obus-Linien behalten, darunter Chinas erste Trolleybuslinie  
[https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_13781144](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13781144), abgerufen am 22.11.2022
- [49] Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein (FESH)  
<https://www.ehighway-sh.de/de/>, abgerufen am 22.11.2022
- [50] ELISA – eHighway Hessen  
<https://ehighway.hessen.de/>, abgerufen am 22.11.2022
- [51] eWayBW  
<https://ewaybw.de/>, abgerufen am 22.11.2022
- [52] Stadtwerke Marburg GmbH: Vorhabenbeschreibung für das Projekt „Elektrifizierung des Stadtbusverkehrs in der Universitätsstadt Marburg“, Teilvorhaben: Errichtung eines Betriebshofs, Stand: 15.02.2021

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Nennspannungen häufig verwendeter Zelltypen .....	5
Tabelle 1-2: Vergleich von Traktionsspeichertechnologien, nach [26],[29].....	8
Tabelle 1-3: Eigenschaften unterschiedlicher Li-Ionen-Batterien, nach [29].....	18
Tabelle 2-1: Auszug aus EN 50163, Tabelle 1, mit den für Obus-Systeme üblichen Nennspannungen und deren Toleranzgrenzen. An der unteren Toleranzgrenze wird bei diesen beiden Nennspannungen nicht zwischen Dauer- und Kurzzeitwerten unterschieden. ....	20
Tabelle 3-1: Anzahl der Oberleitungsbusse (Fahrzeuge) in der EU [10] .....	36
Tabelle 3-2: Anzahl der BOB-Fahrzeuge in der EU [33] .....	37
Tabelle 3-3: Übersicht Fahrzeuge Eberswalde [17] .....	38
Tabelle 3-4: Kenndaten des elektrischen Systems für den Batterieoberleitungsbus [17] .....	39
Tabelle 3-5: Fahrzeugtechnische Kenndaten Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [9], [11] .....	40
Tabelle 3-6: Fahrzeugtechnische Kenndaten BOB Solingen [13], [16], [20].....	42
Tabelle 3-7: Ausgelieferte bzw. bestellte BOB v. Kiepe Electric mit IMC®-Technologie [12], [36].....	46

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Ragone-Diagramm für Traktionsspeicher .....	8
Abbildung 1-2: Ruhespannungsverläufe verschiedener Speichertechnologien, nach [28], [30] .....	10
Abbildung 1-3: Kapazitätserhalt in Abhängigkeit der Entladungsrate verschiedener Speichertechnologien, nach [28], [29], [30].....	11
Abbildung 1-4: Vergleich der Aufladekurven von LTO- und LFP-Speichern, nach [28] .....	12
Abbildung 1-5: Vergleich der Lade- und Entladewiderstandsverläufe von LFP und LTO, nach [28].....	13
Abbildung 1-6: Verlauf der maximalen Entladeleistungen mit Hilfe eines Hybrid Pulse Power Test, nach [28].....	14
Abbildung 1-7: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen, nach [28].....	14
Abbildung 1-8: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen (nur LTO und LFP), nach [28] ..	15
Abbildung 1-9: Vergleich der spezifischen Entladeleistungen bei 50% SoC, nach [28] .....	16
Abbildung 1-10: Vergleich der spezifischen Aufladeleistungen bei 50% SoC, nach [28] .....	16
Abbildung 1-11: Vergleich der spezifischen Energien, nach [28] .....	17
Abbildung 1-12: vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Traktionsspeicher, nach [27], [29].....	18
Abbildung 2-1: Prinzipielle Struktur eines Gleichrichter-Unterwerks.....	20
Abbildung 2-2: Prinzipieller Aufbau der Pendelaufhängung bei einer Obus-Fahrleitung [24]	24
Abbildung 2-3: Einfachfahrleitung mit Beiseil [24] .....	24
Abbildung 2-4 Stromabnehmerkopf (Quelle: Produktkatalog KIEPE [5]) .....	26
Abbildung 2-5: Demonstrator der Westsächsischen Hochschule Zwickau. ....	28
Abbildung 2-6 Anwendungsbeispiel Siemens Trolley Truck [4].....	29
Abbildung 2-7: Siemens-Teststrecke (eHighway) auf einem ehem. Flugplatz in Brandenburg [2], [3] .....	30
Abbildung 2-8: Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein (FESH), Bildquelle [49].....	31
Abbildung 2-9: Gegenüberstellung von einseitiger Speisung und zweiseitiger Speisung, oben prinzipielle Anordnung, unten Spannung über Weg bei Konstantstrom über der Strecke ....	33
Abbildung 2-10: Üblicherweise gewählte Konfiguration der Fahrleitung mit Streckentrennung vor dem Unterwerk, zweiseitiger Speisung und Querkupplung. Optional ist die Parallelführung der Verstärkungsleitung(en). Alle Linien sind zweipolig (Plus/Minus).....	34
Abbildung 3-1: Batterieoberleitungsbus der BBG [22].....	38
Abbildung 3-2: Fahrzeug Esslingen, Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [11].....	40
Abbildung 3-3: BOB-Fahrzeug in Solingen [13] .....	42
Abbildung 3-4: Yangtse Batterieoberleitungsbus in Marrakesh im Batteriemodus [14] .....	44
Abbildung 3-5: Darstellung des SwissTrolley plus im Einsatz in Zürich [19].....	45
Abbildung 5-1: Qualifizierung für Arbeiten mit HV-Bussen (eigene Darstellung nach [38])....	56