

# Unterlage (21.1) Simulationsbericht

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:



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

**Bericht Nr. 2022-618600-661.0**

Auftraggeber: Magistrat der Universitätsstadt Marburg, Marburg

Dresden, 14.04.2023

Projektleiter:  
Dipl.-Ing. Eckert Fritz

Bearbeiter:  
Dipl.-Ing. Felix Bartels  
B.Eng. Jens Elger  
Dipl.-Ing. Maximilian Franke

## Inhalt

1	Zusammenfassung .....	4
2	Grundlagen der Betriebssimulation und der elektrischen Netzberechnung ....	5
2.1	Prinzip .....	5
2.2	Simulationssystem OpenTrack und OpenPowerNet .....	5
2.2.1	Betriebssimulator OpenTrack .....	5
2.2.2	Elektrische Netzberechnung mit OpenPowerNet .....	6
2.2.3	Simulationsablauf .....	6
2.2.4	Dimensionierung mit zeitgewichteten Kurven .....	8
3	Modellbeschreibung .....	10
3.1	Quellenübersicht .....	10
3.2	Infrastruktur .....	11
3.2.1	Streckentopologie .....	11
3.2.2	Höhenprofil .....	14
3.2.3	Haltestellenübersicht .....	15
3.3	Fahrbetrieb / Fahrplan / Linien .....	16
3.4	Fahrzeug .....	18
3.5	Elektrische Netzinfrastuktur .....	21
3.5.1	Fahrleitungsanlage .....	21
3.5.2	Kabel in der Fahrleitungsanlage .....	21
3.5.3	Gleichrichterunterwerke .....	22
3.5.4	Speise- und Rückleiterkabel .....	22
3.5.5	Strombelastbarkeit der elektrischen Leiter .....	23
3.5.6	Übersichtsschaltplan .....	23
4	Simulation und Auswertung .....	27
4.1	Untersuchte Szenarien .....	27
4.2	Minimale Spannung am Stromabnehmer .....	29
4.3	Kurzschlussstromerkennbarkeit und Beurteilung .....	31
4.4	Stromtragfähigkeit der Fahrleitung .....	34
4.5	Belastung der Gleichrichter .....	34
4.6	Ströme in den Speise- und Rückleiterkabeln .....	38
4.7	Bilanz des Batterieladezustands über mehrere Fahrten .....	39
4.8	Abweichungen vom ursprünglich simulierten Betriebskonzept .....	41
4.8.1	15-Minuten-Takt auf dem kompletten Ring .....	41
4.8.2	Haltestelle am Südbahnhof entfällt .....	41
5	Beschriftung der Diagramme im Anhang .....	42

## Revisionsübersicht

Revisionsnummer	Datum	Verfasser	Kommentar
-	07.02.2023	ARGE BOB Marburg IFB VI	Entwurf
-	13.04.2023	ARGE BOB Marburg IFB VI	Kapitel 4.8 hinzugefügt
0	14.04.2023	ARGE BOB Marburg IFB VI	Freigabe

## 1 Zusammenfassung

Die Universitätsstadt Marburg plant zusammen mit den Stadtwerken Marburg die Errichtung eines Batterie-Oberleitungsbussystems (BOB Marburg), das die Altstadt mit der Südstadt und dem Universitäts- und Klinikumgelände auf den Lahnbergen verbinden soll. Zum Einsatz kommen sollen dabei Doppelgelenk-Batterieoberleitungsbusse mit einer Batteriekapazität von 90 kWh (brutto), um die Fahrt durch die Altstadt und über neuralgische Punkte wie die Konrad-Adenauer-Brücke oder der Brücke auf der Neuen Kasseler Straße oberleitungsfrei zurücklegen zu können. Die Ringlinie 27 (Hauptbahnhof – Studentendorf – Klinikum – Campus Nord – Südbahnhof – Wilhelmplatz – Hauptbahnhof) wird dabei im südlichen Abschnitt vom Hauptbahnhof über Südbahnhof zum Klinikum durch die Linie 7 verstärkt. Beide Linien verkehren in der Hauptverkehrszeit (HVZ) jeweils im 30-Minuten-Takt, sodass sich im südlichen Abschnitt ein 15-Minuten-Takt einstellt.

Die ARGE BOB Marburg hat zur Herstellung der Genehmigungs- und Funktionsfähigkeit der Elektrifizierung der ausgewählten Stadtbuslinien in der Universitätsstadt Marburg ein DC 750 V Energieversorgungssystem für das Batterie-Oberleitungsbusnetz entworfen, das den gültigen Normen und betrieblichen Ansprüchen, auch im (n-1)-Ausfallbetrieb, genügt. Auf Basis des vorgesehenen Betriebskonzeptes wurde in einer gekoppelten Simulation aus Fahrbetrieb (OPENTRACK) und DC-Energieversorgung (OpenPowerNet) ermittelt, dass die Infrastruktur für die zu erwartenden elektrischen Belastungen ausreichend dimensioniert ist. Dabei zeigten sich für die Planvariante 1 (Genehmigungsvariante) folgende Ergebnisse:

Die Spannungshaltung im Fahrleitungsnetz ist für den Normal- und Ausfallbetrieb genügend. Auch in den Ausfallszenarien liegen die Fahrleitungsspannungen **innerhalb der zulässigen Grenzwerte**.

In Bezug auf die Strombelastung der elektrischen Oberleitungsanlage ist diese ausreichend dimensioniert. Bei den Speisekabeln zeigt sich in den modellierten Szenarien ebenfalls keine Überlastung der Speise- und Rückleiterstränge. Die Kurzschlusserkennbarkeit ist gewährleistet.

Die Ausstattung der Gleichrichterunterwerke mit Gleichrichter-Transformator-Einheiten entspricht den Belastungen durch den Fahrbetrieb. Es besteht zudem noch ausreichend Reserve bei den Gleichrichterunterwerken G UW 04 Südbahnhof, G UW 05 Amtsgericht und G UW 06 Hauptbahnhof, um zukünftig einen Betrieb mit weiteren Batterie-Oberleitungsbussen (BOB), z. B. auf weiteren Stadtbuslinien entlang der Universitätsstraße und der Schwanallee, realisieren zu können.

Die Bilanz des Ladezustands (State of Charge, SoC) der Batterien der Busse ist in fast allen Szenarien ausgeglichen. Somit kann die in den fahrleitungsfreien Abschnitten aus der Batterie entladene Energiemenge während der Fahrt in den Fahrleitungsabschnitten wieder komplett aufgeladen werden. Lediglich bei Ausfall des G UW 03 Alte Feldfabrik ist die SoC-Bilanz leicht negativ. In diesem Betriebsfall können die BOB-Fahrzeuge bis zu 18 Stunden des Tages verkehren. Es wird davon ausgegangen, dass ein G UW in kürzerer Zeit wieder in Betrieb gehen kann, sodass auch dieses Szenario als unkritisch einzustufen ist. Abschließend lässt sich festhalten, dass der geplante Fahrbetrieb sowohl im elektrischen Normalbetrieb als auch bei Ausfall einzelner Gleichrichterunterwerke **betriebssicher realisiert werden** kann.

## **2 Grundlagen der Betriebssimulation und der elektrischen Netzberechnung**

### **2.1 Prinzip**

Fahrleitungsgebundene elektrische Verkehrssysteme sind gekennzeichnet durch zeitlich und örtlich veränderliche Lastzustände. Für den Ortsveränderungsprozess der Fahrzeuge müssen Widerstandskräfte überwunden werden. Dafür sind elektrische Fahrzeuge mit elektrischen Fahrmotoren ausgestattet. Die Motoren gehören zu einem elektrischen Antriebsstrang, der aus Fahrleitungsanlagen und/oder aus Energiespeichern mit elektrischer Leistung versorgt wird. In einem elektrischen Fahrleitungsnetz gibt es oft mehrere Verbraucher und auch Energieerzeuger, die miteinander interagieren. Um die Interaktion des Fahrbetriebs und der elektrischen Infrastruktur abzubilden, benötigt man eine Betriebssimulation mit elektrischer Netzberechnung.

Die wechselnden Betriebszustände der Fahrzeuge, verursacht durch die ungleichförmig beschleunigte Bewegung, werden mit einer Betriebssimulation, die alle notwendigen Eingangsdaten berücksichtigt, abgebildet. In der Simulation werden in Zeitschritten (üblicherweise 1 s) die Fahrzustände der Fahrzeuge berechnet (Geschwindigkeit und Zugkraft unter Berücksichtigung der Fahrzeug- und Infrastruktureigenschaften, sowie der Betriebssituation). Der ermittelte mechanische Leistungsbedarf geht fahrzeugspezifisch in die Simulation des elektrischen Netzes ein. Im Rahmen der elektrischen Netzberechnung wird der Leistungsbedarf am Stromabnehmer der Fahrzeuge sowie darauf aufbauend der Lastfluss und die Spannungsverteilung im stationären Netz berechnet. Dabei kann es durch das lastflussabhängige Spannungsniveau der elektrischen Infrastruktur zu Rückwirkungen auf die Fahrdynamik, beispielsweise in Form von spannungsabhängigen Leistungsbegrenzungen, kommen. Die betrieblichen und elektrischen Ergebnisse der Simulation werden im Postprozess in Bezug auf verschiedene Kriterien ausgewertet und beurteilt.

Im Rahmen der Studie wird der Betriebssimulator *OpenTrack* und das vom IFB entwickelte Programm *OpenPowerNet* für die elektrische Netzberechnung verwendet.

### **2.2 Simulationssystem OpenTrack und OpenPowerNet**

#### **2.2.1 Betriebssimulator OpenTrack**

Der Betriebssimulator *OpenTrack* wurde beginnend in den 1990er Jahren an der ETH Zürich (IVT) entwickelt. Nach erfolgreicher Ausgründung im Jahr 2005 werden Support und Weiterentwicklung heute von der *OpenTrack Railway Technology Ltd.* Zürich durchgeführt. *OpenTrack* stellt einen international weit verbreiteten Betriebssimulator dar, der sowohl für die Betrachtung von Vollbahnen als auch für Nahverkehrsbahnen, Monorails und Busse eingesetzt werden kann.

Die Simulation des Betriebsablaufs im Simulator beruht auf:

- der Modellierung der Netzinfrastruktur aller betreffenden Strecken (einschließlich Trassierung, Gleisplan und ggf. Sicherungstechnik, aber ohne Betrachtung einer elektrischen Bahnenergieversorgung),
- der Modellierung fahrdynamisch relevanter Fahrzeugdaten und
- der Modellierung aller betrieblichen Daten (Fahrplan, Anschlussbeziehungen).

Während der Simulation wird die ungleichmäßig beschleunigte Bewegung der spezifizierten Fahrzeuge fahrplangesteuert auf der gegebenen Infrastruktur und unter definierbaren und reproduzierbaren Randbedingungen berechnet.

Für die wechselseitige Kommunikation mit dem Programm *OpenPowerNet* wurde eine spezielle Schnittstelle eingerichtet, mit der die Programme in jedem Simulationszeitschritt Daten austauschen.

## 2.2.2 Elektrische Netzberechnung mit OpenPowerNet

Das Programmsystem OpenPowerNet ist eine Entwicklung des IFB. Es ermöglicht zusammen mit dem Betriebssimulator OpenTrack mittels sogenannter gekoppelter Simulation die zeitgleiche Berechnung des elektrischen Lastflusses im Antriebsstrang der Fahrzeuge und im elektrischen Energieversorgungsnetz. Damit werden die physikalischen Größen wie Spannung, Strom und Leistung im Fahrleitungsnetz bestimmt. Die Co-Simulation bietet den Vorteil, dass insbesondere bei großen Bahnnetzen mit komplexer Betriebsführung zunächst eine Modellierung und Überprüfung des Fahrplanbetriebs ohne elektrisches Netz möglich ist. Erst wenn die Betriebssimulation stabil funktioniert, kann der elektrische Netzsimulator zugeschaltet werden.

Die elektrische Simulation beruht auf:

- der Modellierung der elektrischen Netzinfrastruktur aller zu berücksichtigender Strecken,
- der Modellierung betrieblich bzw. fahrdynamisch bedingter Lasten bzw. Einspeisungen.

OpenPowerNet und OpenTrack kommunizieren bidirektional miteinander, so dass die Wechselwirkungen zwischen Fahrdynamik und Netzzustand berücksichtigt werden. Somit sind beispielsweise Fahrtzeitverlängerungen durch Leistungsbegrenzungen bei schwachen elektrischen Netzen berechnen- und abbildbar.

## 2.2.3 Simulationsablauf

Öffentliche Energieverteilnetze unterscheiden sich gegenüber Energieversorgungsnetzen elektrischer Verkehrssysteme hinsichtlich des zeitlich stark veränderlichen Leistungsbedarfs (Beschleunigungs- und Bremsvorgänge inklusive Rückspeisung kinetischer Energie) und der Positionsveränderung der Energieverbraucher (ortsveränderliche Fahrzeuge). Dies erzwingt eine Anpassung des Berechnungsalgorithmus, der im Folgenden kurz skizziert wird:

- Anfordern einer mechanischen Leistung aus OpenTrack (OT) an OpenPowerNet (OPN),
- Berechnung der notwendigen elektrischen Leistung des Fahrzeuges, um mechanische Leistungsanforderung zu erfüllen (Fahrzeugmodellierung des energetischen Stranges von Rad über Getriebe und Motor hin zum Stromabnehmer in OPN),
- Anschließend Berechnung der elektrischen Lastflüsse basierend auf den geforderten elektrischen Leistungen der einzelnen Fahrzeuge in OPN,

- Ggf. Reduzierung der verfügbaren mechanischen Leistung durch zu geringe verfügbare Spannungen (Vorgabe einer spannungsabhängigen bzw. absoluten Strombegrenzung auf den Fahrzeugen) in OPN,
- Fortführung der Iteration, bis sich der elektrische Netzzustand (Lastfluss-situation) nicht mehr ändert,
- Übergabe der möglichen Traktionsleistung an OT,
- fahrdynamische Berechnung in OT mit möglicher Traktionsleistung, am Ende des Simulationszeitschrittes stehen veränderte Werte für Fahrzeug-geschwindigkeit, -leistung und -position zur Verfügung,
- Wiederholung aller Berechnungsschritte für gesamten Simulationszeitraum.

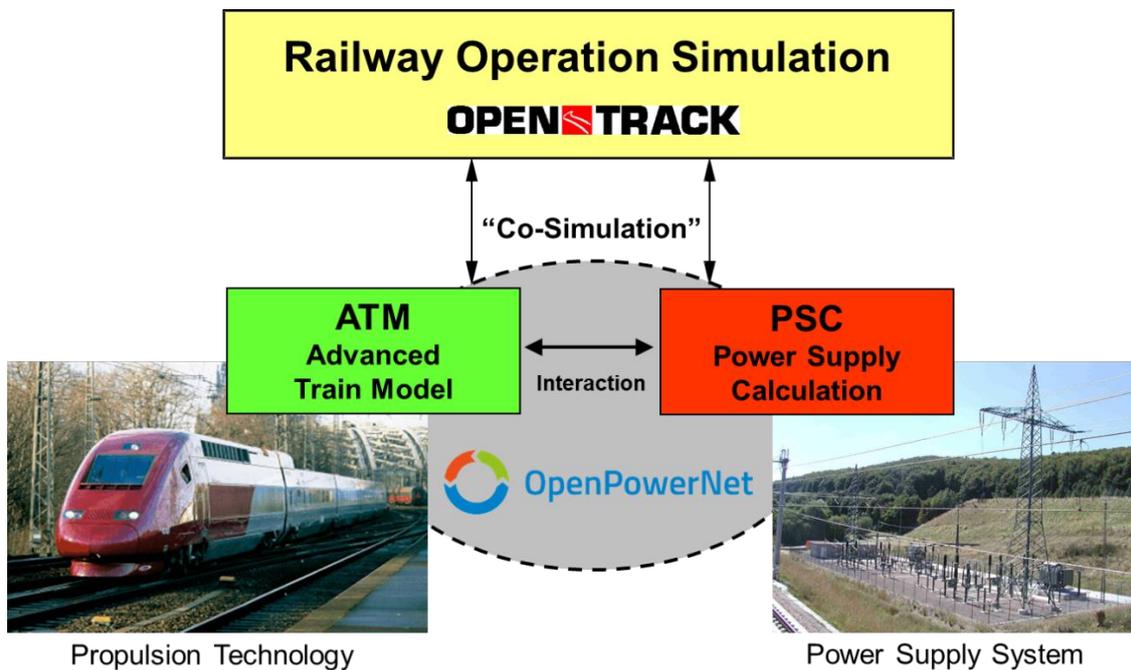


Abbildung 2-1: Gekoppelte Simulation mit OpenTrack und OpenPowerNet

Für elektrisch schwache Fahrleitungsnetze sind folgende Besonderheiten in der Simulation mit OPN und OT zu beachten:

Sind Strombegrenzungen auf dem Fahrzeug implementiert, so wird die maximale Stromaufnahme absolut oder in Abhängigkeit der Fahrleitungsspannung (bspw. nach Vorgabe aus EN 50388) reduziert. Das Abschalten eines Fahrzeuges bei Unterspannung erfolgt nicht. Bei sehr niedrigen Spannungen (in der Nähe von  $U_{\min 2}$  nach EN 50163) wird u. U. die Hilfsbetriebeleistung reduziert. Damit einher geht die Priorisierung der zur Verfügung stehenden Traktionsleistung. Eine Priorisierung von gleichzeitig auftretender Leistungsanforderung (Stromaufnahme mehrerer Fahrzeuge im selben Speiseabschnitt) erfolgt nicht. Sollte die Leistungsanforderung eines Fahrzeuges nicht verfügbar sein (Überlastung des elektrischen Netzes), führt dies zur Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeuges, unter Umständen bis zum Stillstand.

## 2.2.4 Dimensionierung mit zeitgewichteten Kurven

Die Verteilung des Stromes in elektrischen Anlagen der Bahnenergieversorgung ist ein stochastischer Prozess. Die Verwendung von zeitlichen Verläufen zur Dimensionierung ist ungeeignet. Gesucht ist eine Darstellung, welche die Dauer einer Belastung unabhängig vom konkreten Zeitverlauf dieser Belastung widerspiegelt. Anschließend soll es möglich sein mit dieser Darstellung Belastung und Belastbarkeit miteinander zu vergleichen, um die thermische Anlagendimensionierung bewerten zu können. Als ein sehr praktisches Werkzeug hat sich für diesen Vergleich die sogenannte zeitgewichtete Belastungsdauerkurve (ZBDK) erwiesen. Auf eine gegebene zeitabhängige Stromkurve  $f=i(t)$  wird dazu folgender Algorithmus angewendet:

Ein Zeitfenster mit fester Breite  $t^*$  wird über die Zeitachse  $t$  geschoben. An jeder Position des Fensters  $t^*$  wird der Effektivwert (RMS) des Stromes der sich im Zeitfenster befindlichen Stromwerte berechnet. Der maximale Effektivwert je Fensterbreite  $t^*$  wird zusammen mit der Zeitfensterbreite  $t^*$  abgespeichert. Dieser Vorgang wird für alle Zeitfensterbreiten (beginnend mit Einzelschritt, hier 1 s, bis zur gesamten Simulationsdauer, hier 1 h) wiederholt. Das sich daraus ergebende Diagramm wird über einer logarithmischen Zeitachse aufgetragen. Man kann den maximal auftretenden RMS-Wert für jede Zeitdauer ablesen. Der Wert für 1 s entspricht der maximalen Kurzzeitbelastung, der Wert ganz rechts steht für den RMS-Wert bei Dauerbetrieb.

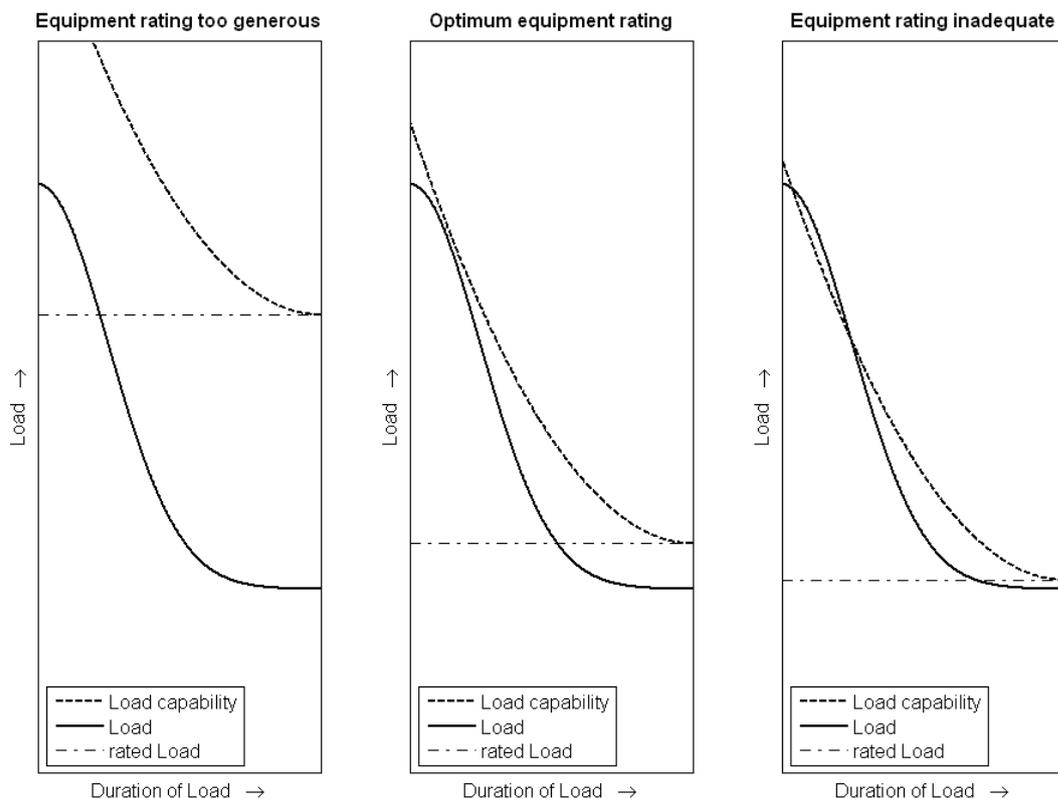


Abbildung 2-2: Auslegung elektrischer Anlagen: (überdimensioniert, optimal bemessen und unterdimensioniert, v.l.n.r.)

Die Berechnungsformel für die zeitgewichtete Belastungsdauerkurve einer physikalischen Größe (hier der Strom  $I_t$ ) und der diskreten Zeitschrittweite  $\Delta t$  ist:

$$I_{rms,t^*} = \sqrt{\frac{1}{t^*} \sum_t^{t+t^*} (I_t)^2 \Delta t} \quad t_{\min} \leq t \leq (T_S - t^*) \quad \text{und} \quad \Delta t \leq t^* \leq T_S$$

Eine Bewertung der Dimensionierung von elektrischen Anlagen erfolgt durch Vergleich von Belastung und Belastbarkeit (siehe Abbildung 2-2). Als Referenzkurve wird die Belastbarkeit entsprechend der Anforderungen einer Belastungsklasse für einen Nennwert und gegebene Überlastfähigkeit ermittelt. Dieser Vorgang wird hauptsächlich für Gleichrichter und Transformatoren angewendet, kann aber auch auf Oberleitungen und Kabel übertragen werden.

### 3 Modellbeschreibung

#### 3.1 Quellenübersicht

In der folgenden Tabelle sind die Quellen dargestellt, auf die in diesem Simulationsbericht Bezug genommen wird.

Tabelle 3-1: Quellenübersicht

Nr.	Inhalt	Dokumente	Stand
[Q1]	Topologie der Strecken (Verlauf, Neigung, Radien)	Zuarbeit der Roh-Daten durch Vössing Ingenieure, abschnittsweise geliefert und laufend aktualisiert	11.11.2021 bis 21.01.2022
[Q2]	Höchstgeschwindigkeiten	Mail von Herr Rau (SWMR) am 04.01.2022	04.01.2022
[Q3]	Fahrzeugdaten für Modell des Doppelgelenk-Batterieoberleitungsbusses (Fahrndynamik)	Trolleybus HESS.pdf	01.12.2021
[Q4]	Fahrzeugdaten für Modell des Doppelgelenk-Batterieoberleitungsbusses (Elektrik)	Telefoninterview mit Firma Kiepe, Herr Lenz	20.12.2021
[Q5]	Linienverlauf, Linie 7 und 27	Entwurf_Linie 7_27_Stand_22.12.2021.pdf	22.12.2021
[Q6]	Fahrzeugeinsatz	Mail von Herrn Rau (SWMR) am 18.01.2022	18.01.2022
[Q7]	Fahrplandaten	Entwurf_Linie 7_27_Stand_22.12.2021.pdf	22.12.2021
[Q8]	Fahrplandaten, Zwangspunkte am HBF und SBF	Mail von Herrn Rau (SWMR) am 18.01.2022	18.01.2022
[Q9]	Fahrleitungsbauart	fahrdrahtkatalog-furrer-frey_4431_de.pdf	01.12.2021
[Q10]	Querkupplungen und Speisekabel	Kabelschublehre BayKa 2021	01.12.2021
[Q11]	Elektrische Eigenschaften der Transformator, Gleichrichter, Sammelschienen,	Pra_0806-1430_Bahnstromversorgung-GLS-Nahverkehr_110526_mue_v1.pdf	10.01.2022

Nr.	Inhalt	Dokumente	Stand
	Streckenschalter, Speisekabel		
[Q12]	Statik der Oberleitungsmasten	Mail von Herrn Jantz (Omexom) am 06.04.2023	06.04.2023

## 3.2 Infrastruktur

### 3.2.1 Streckentopologie

In der vorliegenden Untersuchung wurden folgende Teile des Streckennetzes der Marburger Stadtbusverkehrs im Betriebssimulator OpenTrack modelliert:

- Linie 1 (Wehrda – Diakonie – Richtsberg)
- Linie 2 (Cappel – Südbahnhof – Erlenring – Ortenbergplatz – St.-Martin-Str.)
- Linie 4 (Wehrda – Kaufpark Wehrda – Richtsberg)
- Linie 5 (Marbach – Stadtwald)
- Linie 6 (Hauptbahnhof – Richtsberg)
- Linie 7 (Hauptbahnhof – Südbahnhof – Universitätsklinikum)
- Linie 9 (Elisabethkirche – Universitätsklinikum)
- Linie 27 (Ringlinie über Hauptbahnhof – Südbahnhof – Universitätsklinikum – Hauptbahnhof)

Um die Linien abzubilden, wurde grundlegend das Straßennetz in Marburg modelliert. Anders als bei Schienenbahnen sind innerstädtische Straßen im Allgemeinen nicht kilometriert, für die Umsetzung des Simulationsmodells wurde daher eine Kilometrierung eingeführt. Zu diesem Zweck wurden Fahrwege in sogenannte kilometrierte Streckenabschnitte bzw. Abschnittsbereiche (AB) unterteilt; diese bestehen ggf. aus Teilstücken mehrerer Straßen.

Da das gesamte Liniennetz berücksichtigt werden soll, wurde es komplett in AB aufgeteilt. Da im Liniennetz – sowohl für die Fahrplanfahrten als auch für Aus- und Einrückefahrten – viele verschiedene Fahrwege befahren werden, wurden für das Simulationsmodell insgesamt 44 verschiedene AB eingeführt. Eine Gesamtübersicht über die Unterteilung des Marburger Streckennetzes in AB ist in Abbildung 3-1 gezeigt.

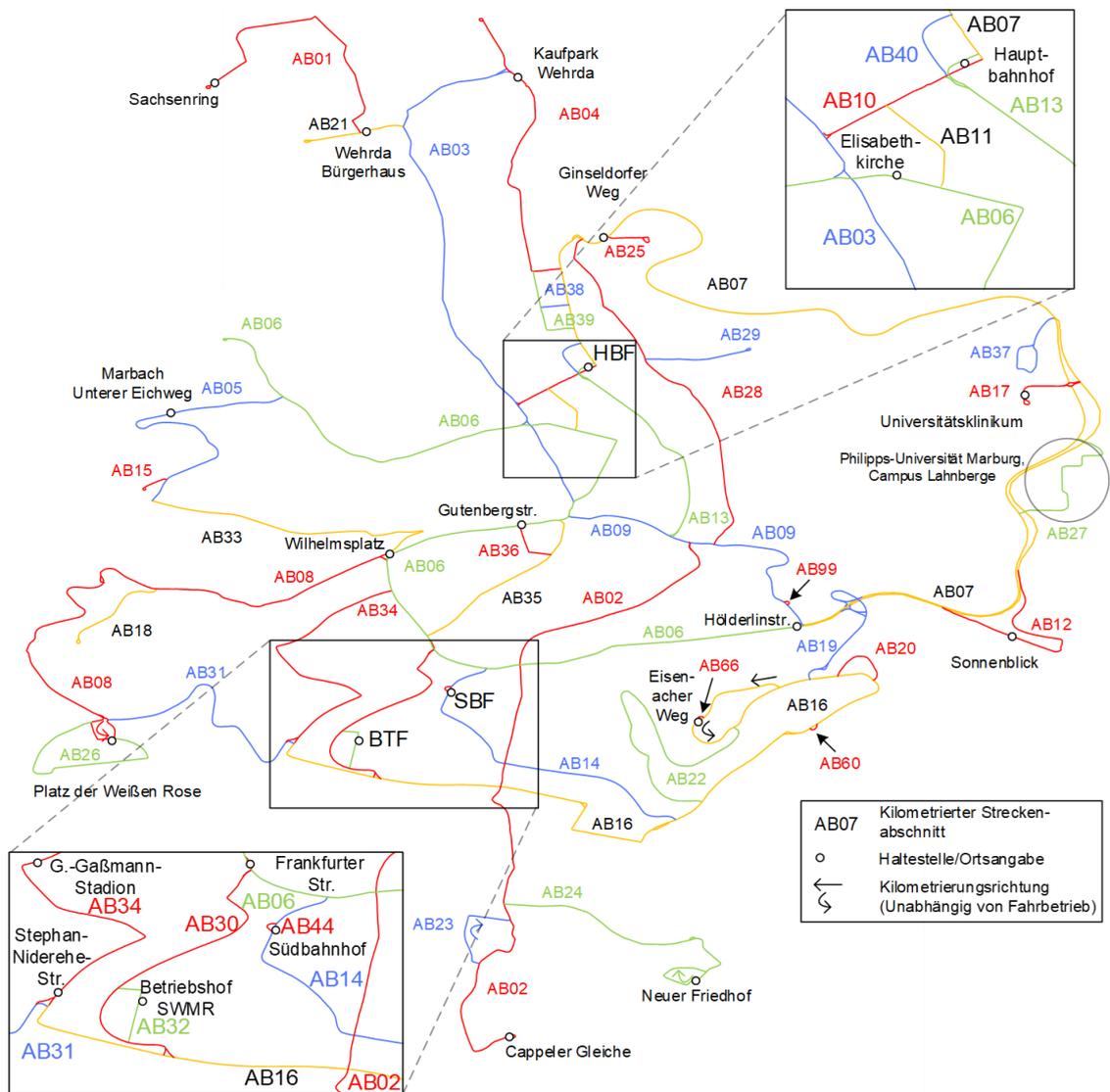


Abbildung 3-1 Übersicht der definierten Streckenabschnitte (AB) des Stadtbusliniennetzes in Marburg

Die Linien 7 und 27 wurden einer näheren Betrachtung unterzogen, da auf diesen beiden Linien der Einsatz von Batterie-Oberleitungsbussen (BOB) Gegenstand der Genehmigungsplanung ist. Das in der Simulation betrachtete Liniennetz wurde entsprechend modifiziert (siehe Abbildung 3-2).

Ein kompletter Linienumlauf (Hin- und Rückfahrt) ist bei der Linie 7 etwa 22 km lang, bei der Linie 27 beträgt dieser rund 34,2 km. Die beiden Linienverläufe sind auf der Karte in Abbildung 3-3 übersichtsartig dargestellt.

Hinweis: Die in Abbildung 3-3 für die Haltestellen verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 3-2 erklärt.

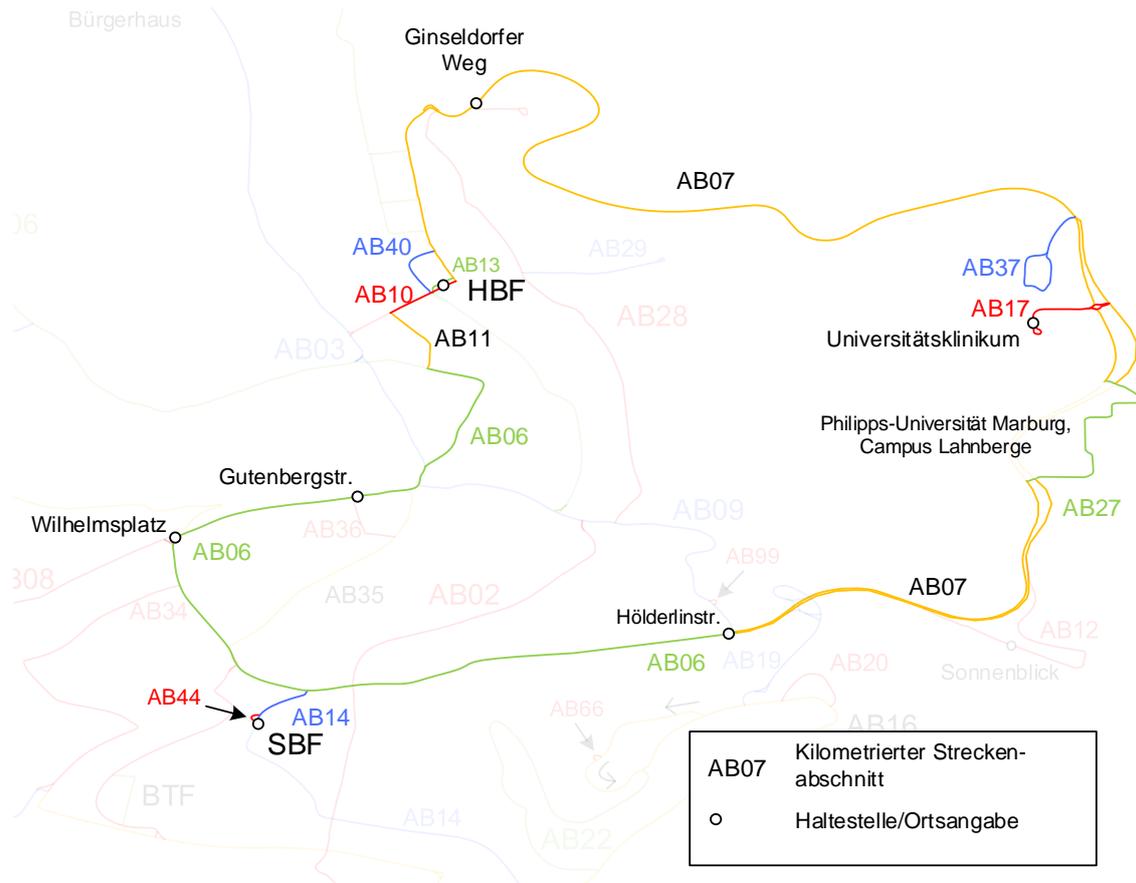


Abbildung 3-2 Definierte Streckenabschnitte (AB) für die Linien 7 und 27

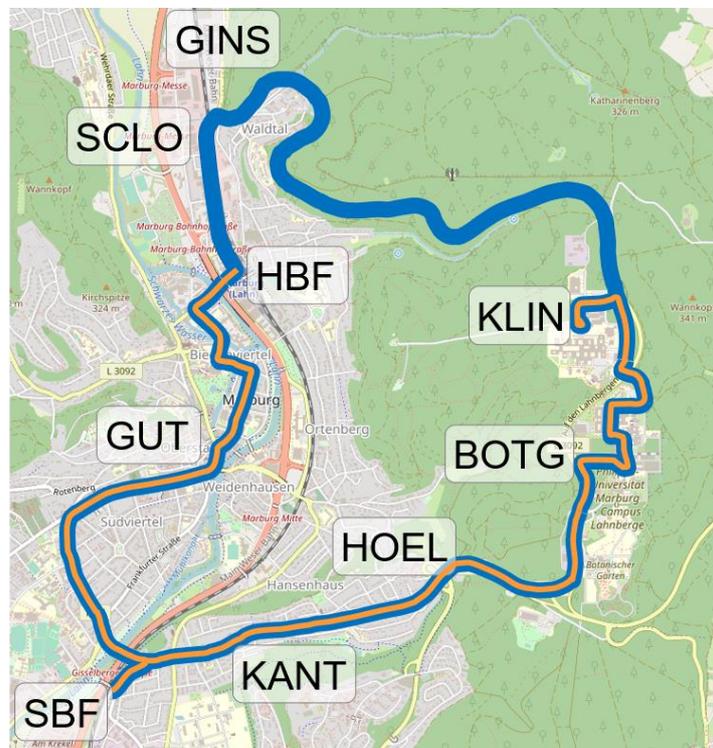


Abbildung 3-3: Übersicht des Linienvverlaufs Linie 7 (orange) und Linie 27 (blau)

### 3.2.2 Höhenprofil

In Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 sind das Höhenprofil sowie das Gradientenprofil der Linien 7 und 27 dargestellt. Zur besseren Orientierung im Streckennetz sind zudem die Haltestellenpositionen beschriftet.

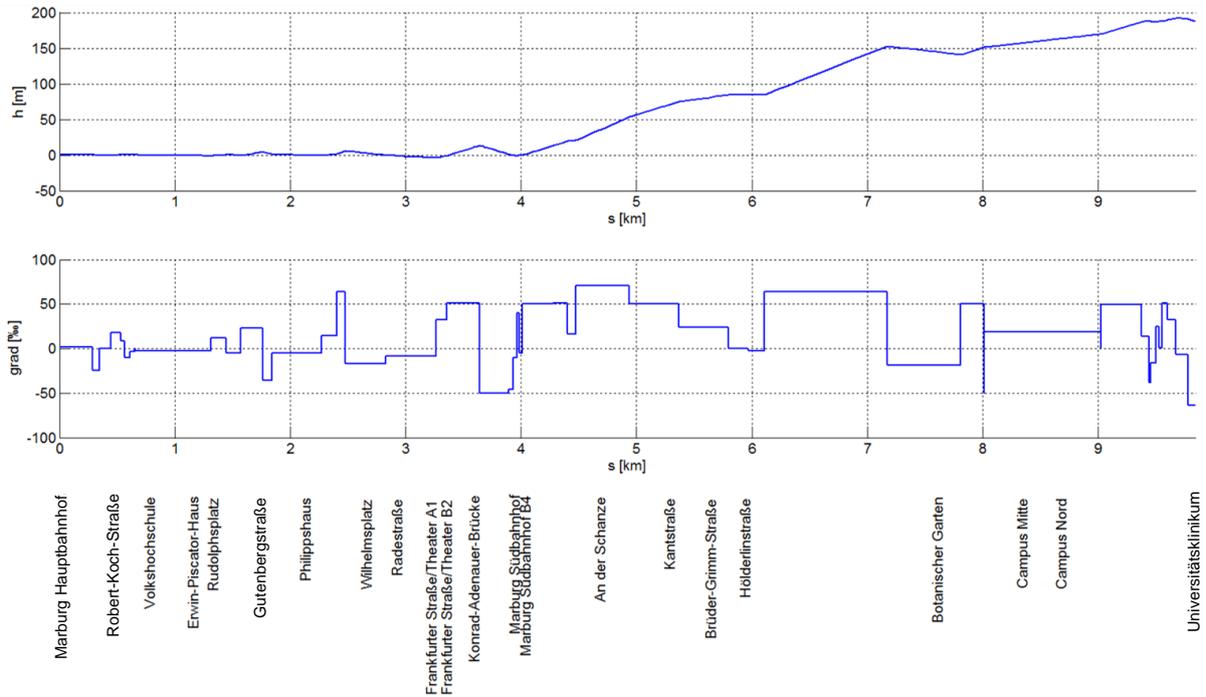


Abbildung 3-4: Höhen- und Gradientenprofil der Linie 7

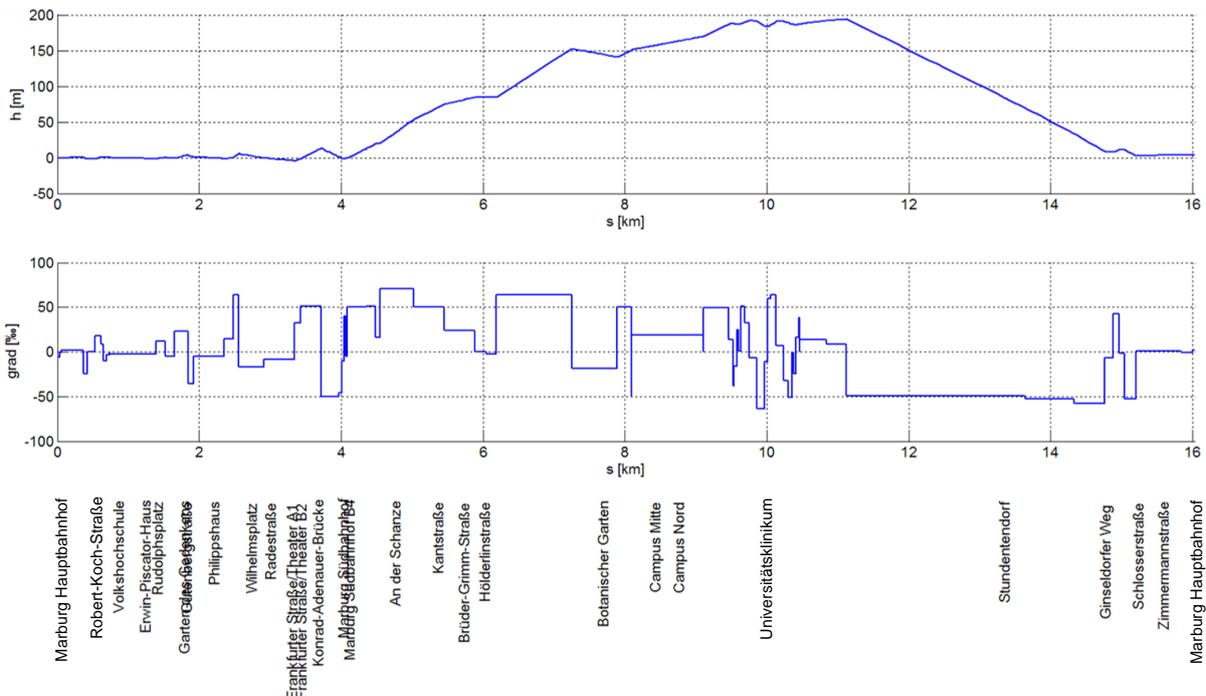


Abbildung 3-5: Höhen- und Gradientenprofil der Linie 27

Das Höhenprofil der Straßen zum Quartier Lahnberge ist für die Auslegung und Dimensionierung der elektrischen Traktion durch die großen Gradienten besonders anspruchsvoll. Initiale Vergleichssimulationen hatten bereits gezeigt, dass die Höchstgeschwindigkeit aktuell eingesetzter Busse nicht erreicht werden kann.

### 3.2.3 Haltestellenübersicht

In Tabelle 3-2 sind die Haltestellen mit dem jeweiligen Kürzel im Modell, der Position und der Zuordnung zur jeweiligen Linie aufgeführt. Die Position bezieht sich dabei auf den Streckenverlauf ab Hauptbahnhof (gegen Uhrzeigersinn), da die Linienwege auf vielen verschiedenen kilometrierten AB verlaufen (siehe Kapitel 3.2.1).

Tabelle 3-2: Haltestellenpositionen

Kürzel	Name	Position in km	Linie
HBF	Hauptbahnhof	0,0	7 + 27
ROKO	Robert-Koch-Straße	0,4	7 + 27
VHS	Volkshochschule	0,8	7 + 27
EPH	Erwin-Piscator-Haus	1,2	7 + 27
RUPL	Rudolphplatz	1,3	7 + 27
GAGE	Garten des Gedenkens	1,7	7 + 27
GUT	Gutenbergstraße	1,9	7 + 27
PHIL	Philippshaus	2,1	7 + 27
WIPL	Wilhelmsplatz	2,6	7 + 27
RADE	Radestraße	2,9	7 + 27
FRST	Frankfurter Straße	3,2	7 + 27
KAB	Konrad-Adenauer-Brücke	3,5	7 + 27
SBF	Südbahnhof	3,9	7 + 27
ADS	An der Schanze	4,6	7 + 27
KANT	Kantstraße	5,2	7 + 27
BGRI	Brüder-Grimm-Straße	5,5	7 + 27
HOEL	Hölderlinstraße	5,9	7 + 27
BOTG	Botanischer Garten	7,5	7 + 27
CPMI	Campus Mitte	8,2	7 + 27
CPNO	Campus Nord	8,6	7 + 27
UKGM	Universitätsklinikum	9,6	7 + 27
STUD	Studentendorf	12,8	27
GINS	Ginseldorfer Weg	14,2	27
SCLO	Schlosserstraße	14,6	27
ZIM	Zimmermannstraße	15,1	27

### 3.3 Fahrbetrieb / Fahrplan / Linien

Als Vorlage für den Linienverlauf und den Fahrplan inkl. der Berücksichtigung von Neben-, Schwach- und Hauptverkehrszeiten dient der aktuelle Planungsentwurf der Fortschreibung des Nahverkehrsplans der Stadt Marburg. Dabei wurden Anpassungen nötig, um die zukünftige Anbindung des neuen Campus Lahnberge über die Umweltstraße zu berücksichtigen. Dafür wurde der vorgegebene Fahrplan angepasst, wobei die aus dem Nahverkehrsplan resultierenden Zwangspunkte und Umsteigebeziehungen am Südbahnhof und Hauptbahnhof beibehalten wurden. Die Busse verkehren in dem Fahrplan nicht mehr über die Hans-Meerwein-Straße, sondern biegen zwischen den Haltestellen Botanischer Garten und Universitätsklinikum auf die Umweltstraße ab, auf der die beiden Haltestellen zur Bedienung des neuen Campus liegen, die in der Simulation als „Campus Nord“ und „Campus Mitte“ bezeichnet sind.

Die Linie 7 pendelt zwischen dem Hauptbahnhof und dem Universitätsklinikum auf den Lahnbergen über den Südbahnhof. Die Linie 27 ist eine in beide Richtungen (gegen und mit dem Uhrzeigersinn) verkehrende Ringlinie, die ebenfalls vom Hauptbahnhof über den Südbahnhof zum Universitätsklinikum auf den Lahnbergen verkehrt, dann aber den Ring über die Haltestellen Studentendorf und Schlosserstraße schließt. Die dabei bedienten Haltestellen sind in Tabelle 3-2 aufgelistet.

Im Kern sieht der Nahverkehrsplan für die Linien 7 und 27 jeweils einen 30-Minuten-Takt während der Hauptverkehrszeiten vor, wobei sich im südlichen Abschnitt zwischen Hauptbahnhof über Südbahnhof zum Klinikum und zurück eine betriebliche Überlagerung der beiden Linien ergibt. Aufgrund der Zwangspunkte resultiert daraus kein echter 15-Minuten-Takt, aber es gibt vier Fahrten pro Stunde und Richtung. Dies ist gut im Bildfahrplan der beiden Linien (Abbildung 3-6) erkennbar. In dem Bildfahrplan sind zwei Stunden Betrieb zwischen 8 Uhr und 10 Uhr vormittags dargestellt. Der Fahrplan wurde entsprechend der Quellen und Abstimmungen ([Q5], [Q7] und [Q8]) entwickelt.

Marburg Hauptbahnhof A1 - Marburg Hauptbahnhof B4

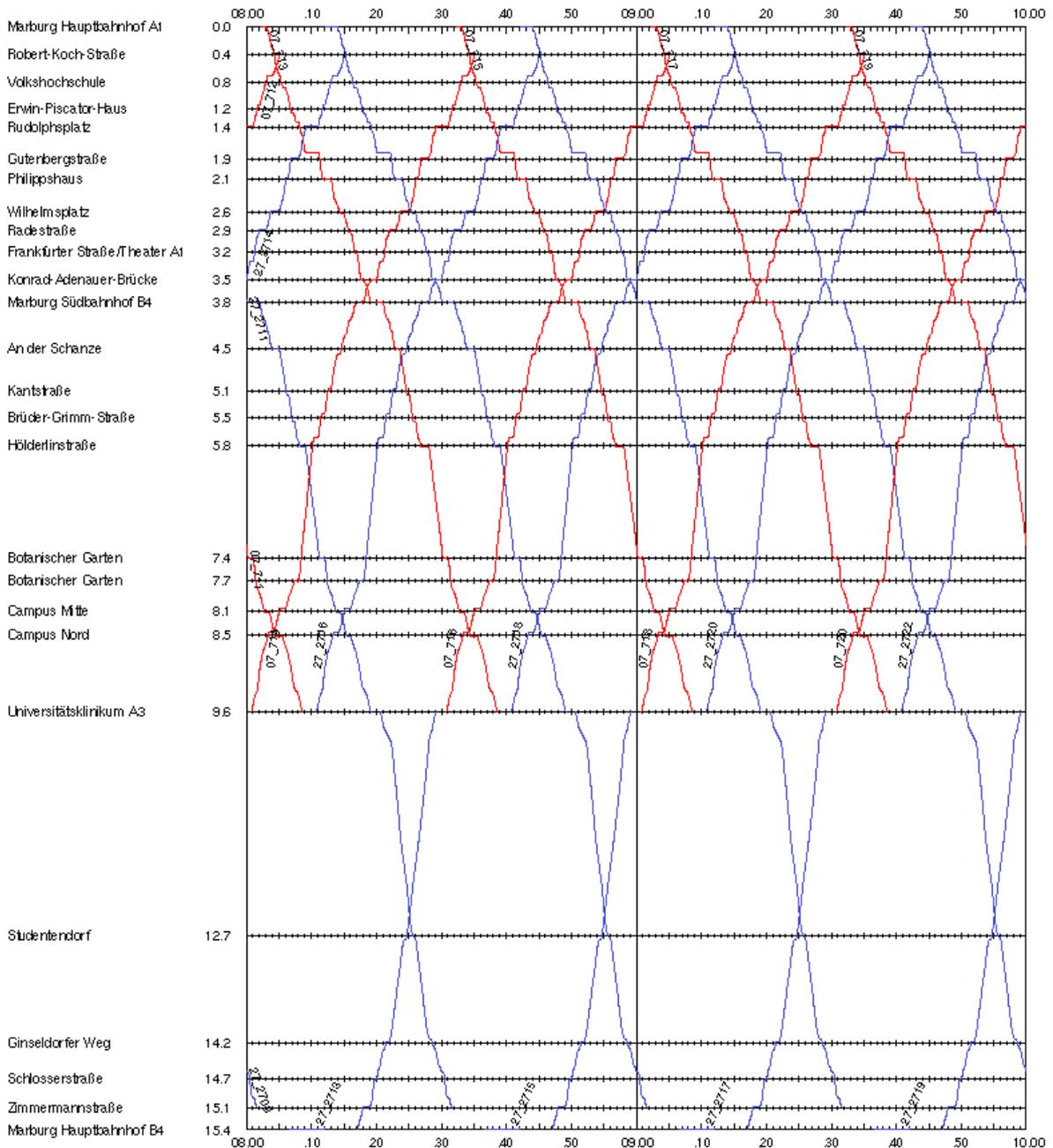


Abbildung 3-6: Bildfahrplan der Linien 7 (rot) und 27 (blau), 15/30min-Takt

Mit dem in Abbildung 3-6 gezeigten Fahrplan lassen sich unter Einsatz von Doppelgelenk-Oberleitungsbussen die in Abbildung 3-7 dargestellten Fahrgastkapazitäten von 800 Passagieren bzw. 1.600 Passagieren pro Stunde erreichen.

Hinweis: Die in Abbildung 3-7 für die Haltestellen verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 3-2 erklärt.

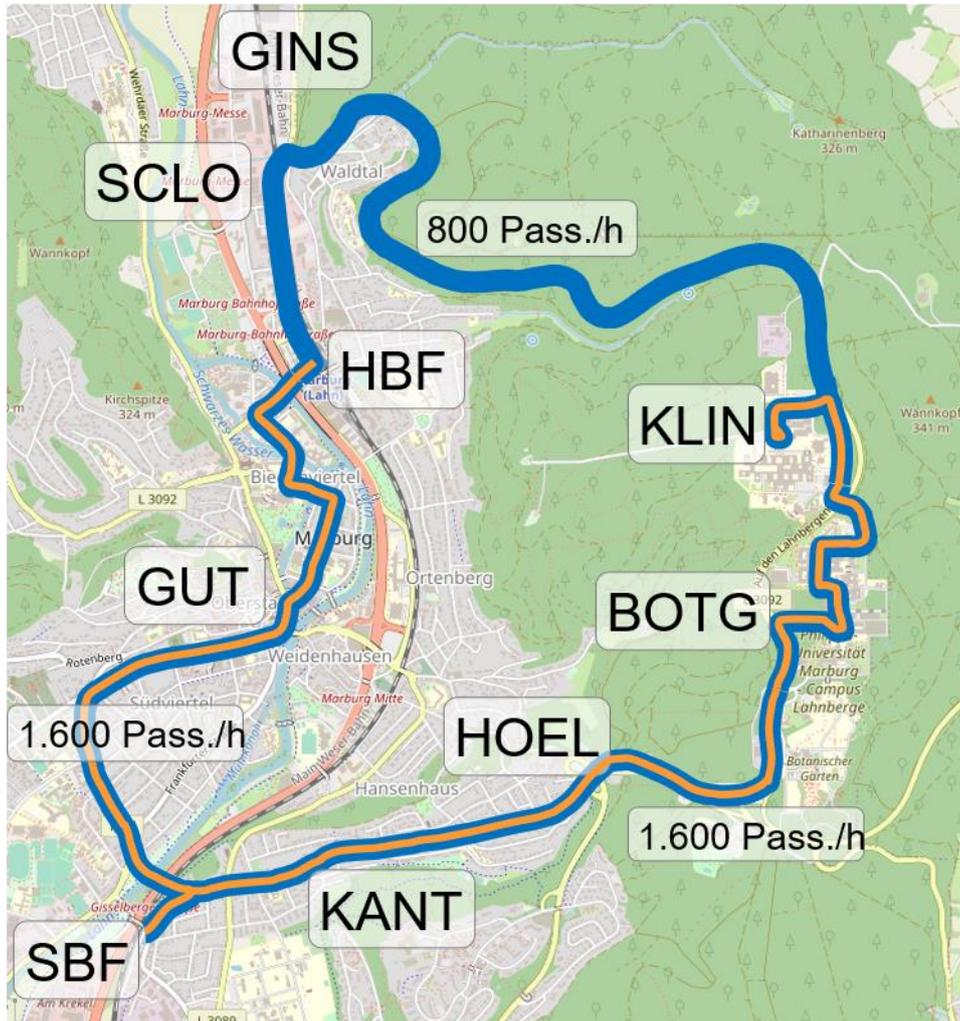


Abbildung 3-7: Transportkapazität auf den dargestellten Abschnitten der Linien 7 und 27

### 3.4 Fahrzeug

Die Fahrzeugeigenschaften (charakteristische, technische Daten und fahrdynamische Kennlinien) werden aus den verfügbaren Eingangsdaten und der Datenbank des IFB aus vergleichbaren Projekten übernommen. Für die Dimensionierung und Auslegung der elektrischen Energieversorgung wird ein Besetzungsgrad von AW3 (volle Besetzung) modelliert. Die modellierten Fahrzeugdaten sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst. Zur Bestimmung der zu überwindenden Fahrwiderstandskräfte in der Ebene wird die Davis-Formel

$$F_W = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

mit den in Tabelle 3-3 aufgeführten Parametern verwendet. Die Neigungs- und Kurvenwiderstände werden ortsabhängig hinzugefügt.

In der Hilfsbetriebeleistung wird der Leistungsbedarf für die Klimatisierung, Beleuchtung und Lüftung berücksichtigt. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle 3-3

aufgeführt und gelten für dauerhaften Einsatz. Im Stillstand wird die Hilfsbetriebeleistung um ca. die Hälfte reduziert.

Das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Der vom Fahrzeug aufgenommene Strom wird spannungsabhängig begrenzt und entsprechend EN 50388 im Fahrzeugmodell implementiert.

Es wird der angegebene, gemittelte Fahrzeuggesamtwirkungsgrad verwendet, der die mechanische Leistung am Rad und den elektrischen Leistungsbedarf am Stromabnehmer ins Verhältnis setzt.

Tabelle 3-3: Fahrzeugeingangsdaten Doppelgelenk-Trolleybus (DGTB)

<b>Modellparameter</b>	<b>DGTB</b>	<b>Bemerkung</b>
<i>Abmessungen</i>		
Länge [m]	25	
<i>Massen</i>		
Leermasse [t]	24	
Zul. Gesamtmasse [t]	39	~ 200 Personen
Adhäsionsmasse [t]	21,5	beladen
Rotationsfaktor [-]	1,07	
<i>Fahrwiderstand</i>		
Faktor A [kN]	3,0005	
Faktor B [kN/km/h]	0,00005	
Faktor C [kN/(km/h) <sup>2</sup> ]	0,00023	
<i>Fahreigenschaften</i>		
Max. Geschwindigkeit [km/h]	80	
Max. Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	1,1	
Max. Zugkraft [kN]	60	mechanisch am Rad
Max. Traktionsleistung [kW]	320 / 480	mechanisch am Rad, Traktion / Bremsen
<i>Elektrische Kenndaten</i>		
Hilfsbetriebe [kW]	63 / 30	Fahren / Stillstand
Gesamtwirkungsgrad [%]	86	
Strombegrenzung im Stillstand [A]	80	
Begrenzung des Traktionsstroms [A]	0...620	Spannungsabhängig, nach EN 50388, siehe Abbildung 3-9
<i>Kenndaten des Energiespeichers</i>		

Modellparameter	DGTB	Bemerkung
Energieinhalt Akku	90 kWh	brutto
Bereich des Ladezustands (Mean State of Charge)	50 % ± 40 %	SOC: 10 % bis 90%
Reduktionsfaktor Energieinhalt bei gealterter Batterie	20 %	
Zulässiger Strom [A]	187 / 510	Laden / Entladen
Batterietyp (Zellchemie)	LTO	flüssigkeitsgekühlt

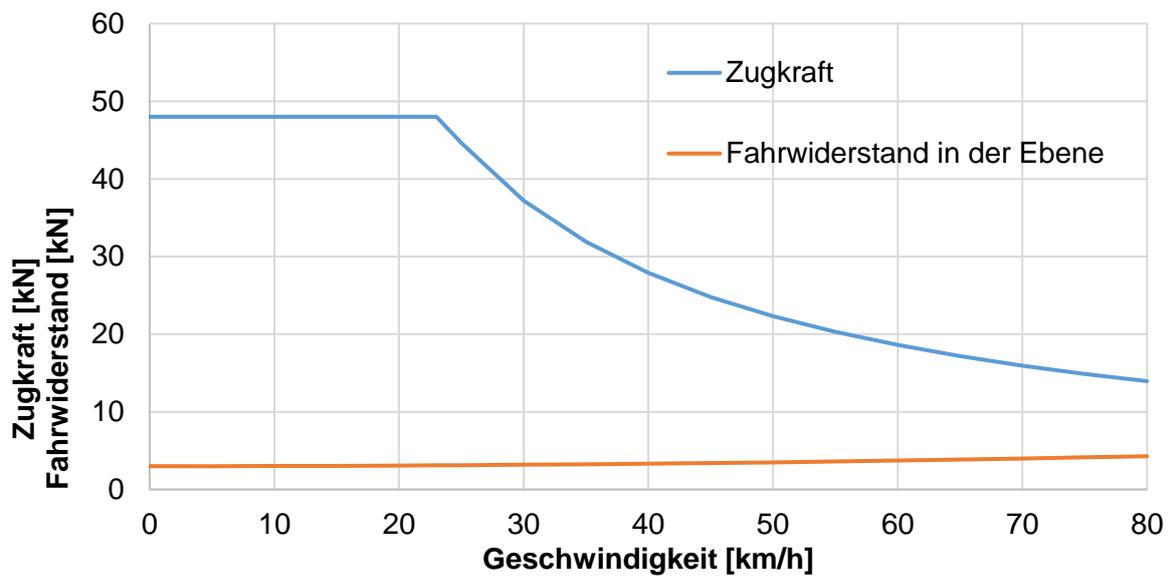


Abbildung 3-8: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm und Fahrwiderstand

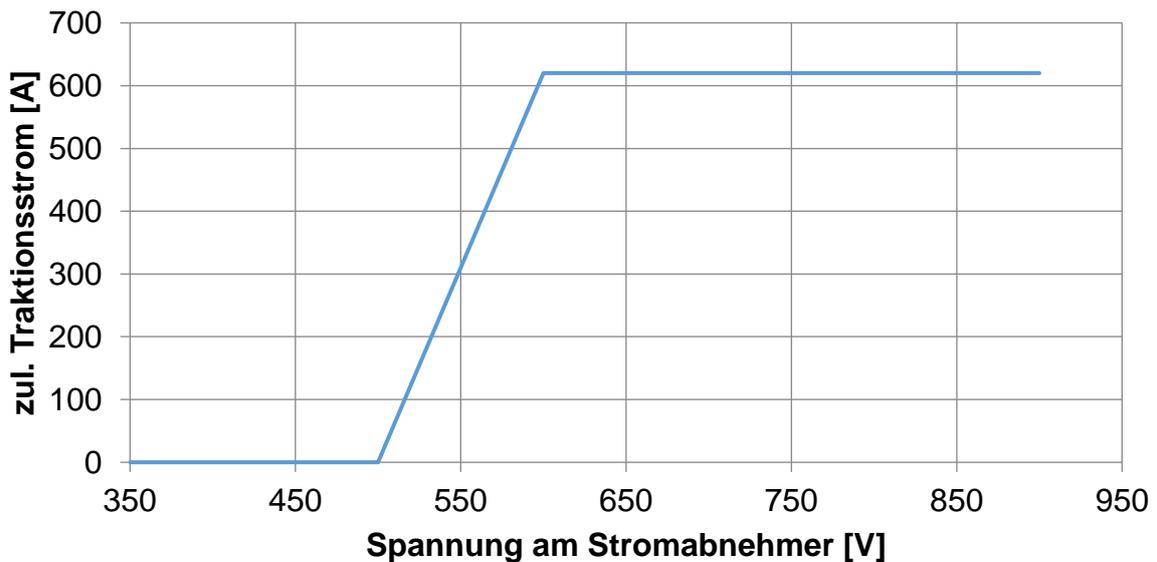


Abbildung 3-9: spannungsabhängige Strombegrenzung nach EN 50388

### 3.5 Elektrische Netzinfrastruktur

In diesem Abschnitt wird die notwendige elektrische Netzinfrastruktur vorgestellt. Dabei werden zunächst die Kenndaten der verwendeten Fahrleitung, der Gleichrichterunterwerke sowie der verwendeten Speise- und Rückleiterkabel beschrieben. Danach folgt ein Übersichtsschaltplan in Form eines Einliniendiagramms (Single Line Diagram), welcher die gewählte Fahrleitungskonfiguration schematisch zeigt.

#### 3.5.1 Fahrleitungsanlage

Die Fahrleitungsanlage wird durch zwei Leiter je Fahrspur modelliert: Der Hinleiter mit positiver Fahrspannung und der Rückleiter. Beide werden identisch als ein Breittrillenfahrdraht BRi120 parametrisiert. Es erfolgt eine Berücksichtigung der maximal betrieblichen zulässigen Abnutzung (von 20 %) bei der elektrischen Modellierung sowie eine Erhöhung des elektrischen Widerstands aufgrund von Wärmeeintrag (Leitertemperatur 60 °C). Aus den Annahmen ergibt sich ein spezifischer Widerstand von 215 mΩ/km.

Die Dauerstromtragfähigkeit  $I_{rms}$  dieser Konfiguration beträgt 390 A je Fahrdraht.

#### 3.5.2 Kabel in der Fahrleitungsanlage

Alle Fahrleitungsstrecken sind zweispurig ausgeführt. Zur Verbesserung der Spannungsverhältnisse bei gleichem Leiterquerschnitt wurde eine Querkupplung bestehend aus einem Kabel mit 120 mm<sup>2</sup> Cu (je Pol) angenommen. Diese Querkupplung ist entlang der elektrifizierten Strecke alle 300 m vorgesehen.

Zwischen den Gleichrichterunterwerken G UW 01 Panoramastraße und G UW 08 Ginseldorfer Weg wurde parallel zu den Fahrleitungen eine Verstärkungsleitung mit einem Querschnitt von 240 mm<sup>2</sup> Cu (je Pol) vorgesehen, welche ebenfalls alle 300 m mit der Fahrleitung verbunden ist und unterirdisch verlegt werden soll. Weiterhin ist zwischen den Gleichrichterunterwerken G UW 04 Südbahnhof und G UW 05 Amtsgericht ein Kabel von 1 x 400 mm<sup>2</sup> Cu (je Pol) vorgesehen, welches nur an den Einspeisepunkten der Gleichrichterunterwerke mit der Fahrleitung verbunden ist und deshalb wahlweise unterirdisch verlegt werden kann.

Es besteht die Randbedingung, dass zwei Brücken nicht mit Fahrleitung versehen werden können. Aus diesem Grund und zur Verbesserung des elektrischen Netzübertragungsverhaltens wurden zur Umgehung dieser Abschnitte und zur Vermeidung des Baus zusätzlicher Gleichrichterunterwerke Kabel von 1x240 mm<sup>2</sup> Cu (je Pol) vorgesehen. Diese sind jeweils zwischen den Haltestellen FRST und KAB zur Aussparung der Konrad-Adenauer-Brücke und zwischen den Haltestellen SCLO und GINS (neue Kasseler Straße) zur Aussparung der Brücke über die Main-Weser-Bahn modelliert. An den genannten Haltestellen wurden diese Kabel mit der Fahrleitung im Modell elektrisch verbunden.

Für die Kabel wird eine Leitertemperatur in Höhe von 60 °C bei der Modellierung berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein spezifischer Widerstand von 166 mΩ/km für das

120-mm<sup>2</sup>-Kabel, 83 mΩ/km für das 240-mm<sup>2</sup>-Kabel und 50 mΩ/km für das 400-mm<sup>2</sup>-Kabel.

### 3.5.3 Gleichrichterunterwerke

In der Simulation werden acht Gleichrichterunterwerke modelliert. Die Anzahl und die Position wurde iterativ unter Berücksichtigung der Randbedingungen entwickelt. Ein Gleichrichterunterwerk besteht in der Simulation aus dem Modell eines ungesteuerten Brücken-Gleichrichter und vorgeschaltetem Gleichrichtertransformator. Bezogen auf die Nennleistung  $S_{Trafo}$ , die ideale Leerlaufspannung  $U_{d0}$  und die relative Kurzschlussspannung des Transformators  $U_k$  ergibt sich der jeweilige modellierte Innenwiderstand des Gleichrichterunterwerks  $R_{i,U}$  gemäß der Formel aus der VDV-Schrift 525:

$$R_{i,U} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{U_k}{100 \cdot S_{Trafo}} \cdot (U_{d0})^2$$

Die Parameter der modellierten Gleichrichterunterwerke sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Übersicht der technischen Parameter der vorgesehenen Gleichrichterunterwerke

Gleichrichterunterwerk	$S_{Trafo}$	$U_{d0}$	$R_{i,U}$	$I_{d,nenn}$
G UW 01 Panoramastraße	660 kVA	849 V	68,69 mΩ	660 A
G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach	660 kVA	849 V	68,69 mΩ	660 A
G UW 03 Alte Feldfabrik	660 kVA	849 V	68,69 mΩ	660 A
G UW 04 Südbahnhof	1.000 kVA	849 V	45,34 mΩ	1.000 A
G UW 05 Amtsgericht Marburg	1.000 kVA	849 V	45,34 mΩ	1.000 A
G UW 06 Hauptbahnhof	1.000 kVA	849 V	45,34 mΩ	1.000 A
G UW 07 Brüder-Grimm-Straße	660 kVA	849 V	68,69 mΩ	660 A
G UW 08 Ginseldorfer Weg	660 kVA	849 V	68,69 mΩ	660 A

Aus Gründen der Marktverfügbarkeit werden nur Gleichrichterunterwerke mit 1 MVA für den weiteren Verlauf vorgesehen.

### 3.5.4 Speise- und Rückleiterkabel

Als Speisekabel werden je Speisepunkt 2x240mm<sup>2</sup> Kupferkabel im Simulationsmodell berücksichtigt. Als Rückleiter werden je Anschlusspunkt 3x240mm<sup>2</sup> Kupferkabel verwendet. Unter Berücksichtigung einer elektrischen Leitertemperatur ergeben sich die spezifischen Widerstände von 41 mΩ/km für die 2x240-mm<sup>2</sup>-Kabel sowie 27 mΩ/km für die 3x240-mm<sup>2</sup>-Kabel.

Die Anschlusspositionen der Rückleiteranschlüsse an die Fahrleitung der Strecke sind identisch mit denen der Speiseanschlüsse.

Die Anschlusspunkte sind im schematischen Streckenschaltplan ersichtlich (Abbildung 3-11, Abbildung 3-12 sowie Abbildung 3-13).

### 3.5.5 Strombelastbarkeit der elektrischen Leiter

In Tabelle 3-5 sind die verwendeten Widerstände sowie die Strombelastbarkeiten der einzelnen Kabel und der Fahrdrähte eingetragen.

Tabelle 3-5: Übersicht der modellierten technischen Kabelparameter

Leiter	Material	Querschnitt	$R_{res,0}$	$I_{max,zul}$
Fahrdraht BRi120	Kupfer	120 mm <sup>2</sup>	215 mΩ/km	390 A
Speisekabel	Kupfer	2x 240 mm <sup>2</sup>	41 mΩ/km	956 A
Rückleiterkabel	Kupfer	3x 240 mm <sup>2</sup>	27 mΩ/km	1434 A
Paralleles Feederkabel: Entlang der Panoramastr. Konrad-Adenauer-Brücke Brücke über die Main-Weser-Bahn	Kupfer	240 mm <sup>2</sup>	83 mΩ/km	746 A
Paralleles Feederkabel AGM-SBF	Kupfer	400 mm <sup>2</sup>	50 mΩ/km	975 A
Querverbinder	Kupfer	120 mm <sup>2</sup>	166 mΩ/km	389 A

### 3.5.6 Übersichtsschaltplan

Das Fahrleitungssystem des BOB-Systems besteht elektrisch gesehen aus den in den vorherigen Kapiteln dokumentierten Komponenten, sowie Fahrleitungstrennern, welche von den Bussen mit angelegten Stromabnehmern befahrbar sind und die Fahrleitung in elektrisch einzeln schaltbare Abschnitte unterteilen.

Die Fahrleitungsanlage besteht im Wesentlichen aus vier größeren Abschnitten. Diese sind:

- **Gutenbergstraße – Frankfurter Straße**

Dieser Abschnitt wird mit Fahrdraht für beide Fahrrichtungen vorgesehen. Stadtauswärts beginnt der Abschnitt an der Haltestelle Gutenbergstraße und endet an der Haltestelle Frankfurter Straße / Theater. Stadteinwärts beginnt der Fahrdraht an der Haltestelle Frankfurter Straße / Theater und endet an der Haltestelle Gutenbergstraße. Dadurch ist kein zusätzlicher Betriebshalt nötig und die Busse können den An- und Abdrahtvorgang während dem Aufenthalt in der Haltestelle realisieren. Dieser Abschnitt ist 1,6 km lang und wird von den Gleichrichterunterwerken GUW 04 Südbahnhof und GUW 05 Amtsgericht versorgt.

Zwischen den Einspeisepunkten am Amtsgericht und am Südbahnhof wurde zur besseren Spannungshaltung bei Ausfall eines der beiden Gleichrichterunterwerke ein parallel zur Oberleitung erdverlegtes Verstärkungskabel vorgesehen.

- **Konrad-Adenauer-Brücke – Südbahnhof – Botanischer Garten**

Dieser Abschnitt ist zu großen Teilen mit Fahrdraht für beide Fahrrichtungen vorgesehen. Eine Ausnahme bildet der kleine Abschnitt zwischen der Haltestelle

Konrad-Adenauer-Brücke und dem Abzweig zum Südbahnhof an der Kreuzung Zeppelinstraße, welcher nur in stadtauswärtiger Richtung mit Fahrdraht versehen ist. Dabei drahten die Fahrzeuge an der Haltestelle Konrad-Adenauer-Brücke ein und verkehren über den Südbahnhof bis zur Haltestelle Botanischer Garten, wo abgedrahtet wird. Stadteinwärts drahten die Busse an der Haltestelle Botanischer Garten ein, fahren über den Südbahnhof und drahten vor der Kreuzung Zeppelinstraße bei einem kurzen Betriebshalt ab, bevor sie ihre Fahrt über die Haltestelle Konrad-Adenauer-Brücke in Richtung Innenstadt fortsetzen. Der Abschnitt ist 4,2 km lang und wird aus den Gleichrichterunterwerken GUW 03 Alte Feldfabrik, GUW 04 Südbahnhof sowie GUW 07 Hölderlinstraße mit elektrischer Energie versorgt.

Der Bereich über die Konrad-Adenauer-Brücke ist fahrdrahtfrei. Statische Vorberechnungen haben ergeben, dass die Brücke nicht die Massen einer Oberleitungskonstruktion mit Masten sicher tragen kann.

- **Abzw. Universitätsklinikum – Ginseldorfer Weg**

Im Bereich der Panoramastraße wird Fahrdraht für die berg- und talwärts fahrenden Busse vorgesehen. Im Bereich des Abzweigs zum Klinikum wird das An- und Abdrahten durch einen Betriebshalt realisiert. Somit kann das Gelände des Universitätsklinikums fahrdrahtfrei gehalten werden. An der Haltestelle Ginseldorfer Weg geschieht das An- und Abdrahten während des Fahrgastwechsels an der Haltestelle. Die Versorgung dieses Fahrdrachtsabschnittes erfolgt aus den Gleichrichterunterwerken GUW 01 Panoramastraße, GUW 02 Lahnberge/Bauerbach und GUW 08 Ginseldorfer Weg. Der Abschnitt ist 4,4 km lang.

Zur besseren Spannungshaltung bei Ausfall eines der Gleichrichterunterwerke ist zwischen den Speisepunkten der Gleichrichterunterwerke Panoramastraße und Ginseldorfer Weg ein paralleles Verstärkungskabel vorgesehen, welches ca. alle 300 m mit der Fahrleitung verbunden ist.

- **Schlosserstraße – Zimmermannstraße**

Der mit 0,45 km kürzeste Fahrdrachtsabschnitt befindet sich zwischen den Haltestellen Schlosserstraße und Zimmermannstraße, wo der Fahrdraht für beide Fahrtrichtungen gespannt ist. Das An- und Abdrahten geschieht an den Haltestellen. Dieser Fahrdrachtsabschnitt wird aus den Gleichrichterunterwerken GUW 05 Hauptbahnhof und GUW 08 Ginseldorfer Weg versorgt. Der kurze Fahrdrachtsabschnitt ist notwendig, um die Batterie der Busse vollständig aufladen zu können. Statische Vorberechnungen haben ergeben, dass auch diese Brücke nicht die Massen einer Oberleitungskonstruktion mit Masten sicher tragen kann.

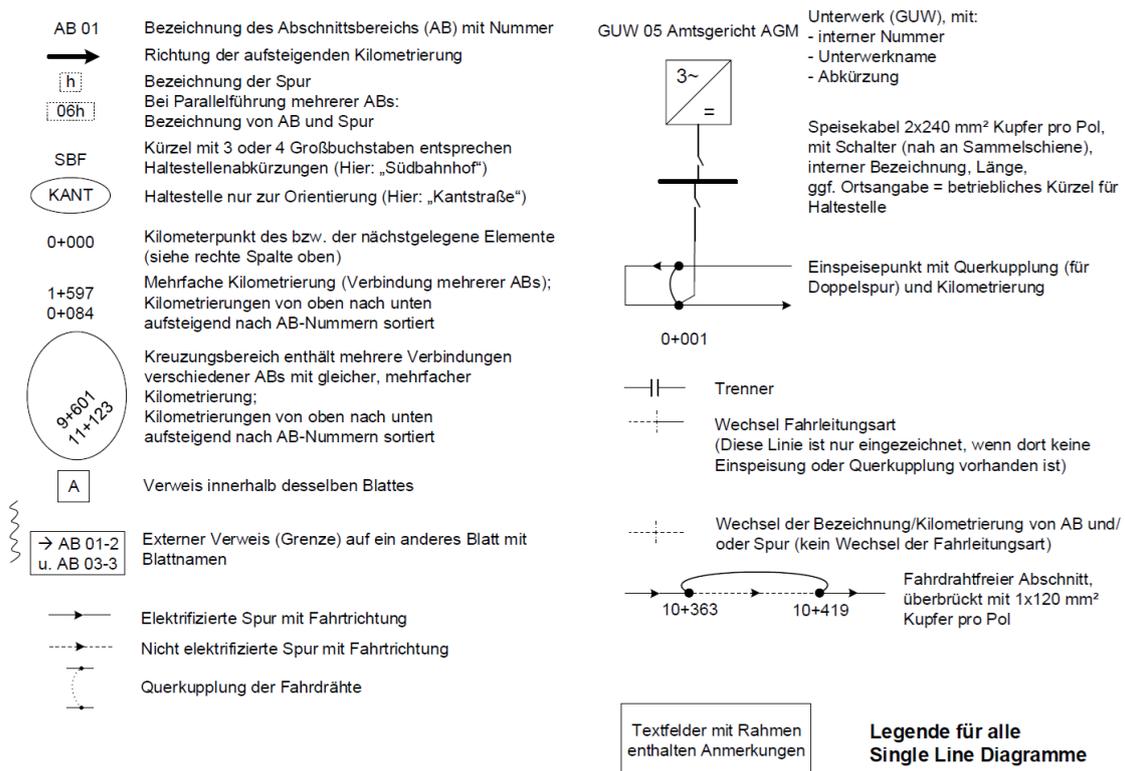


Abbildung 3-10: Legende zum Single Line Diagramm

**Single Line Diagramm**

**AB 06-1, AB 14 und AB44**

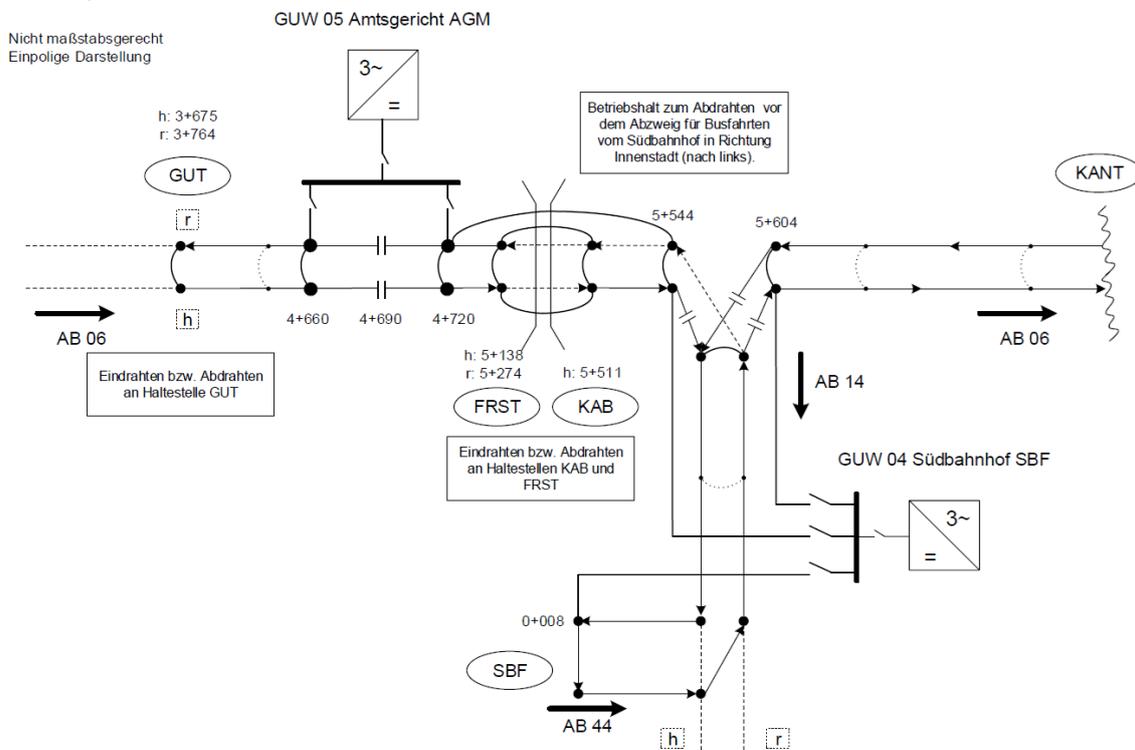


Abbildung 3-11: Schematischer Streckenschaltplan, Abschnitte 06-1, 14 und 44

**Single Line Diagramm  
 AB 06-2 und AB 07-1**

Nicht maßstabsgerecht  
 Einpolige Darstellung

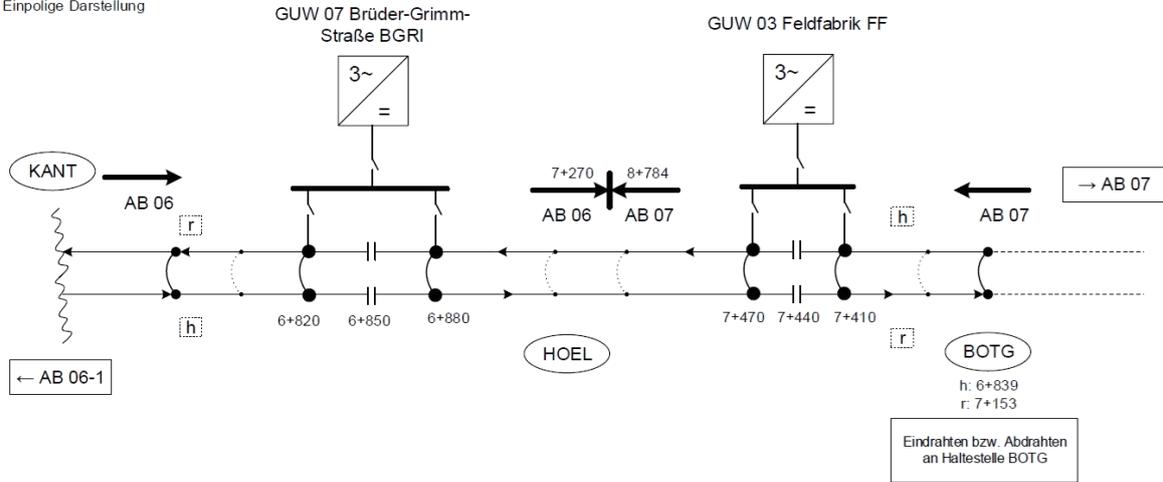


Abbildung 3-12: Schematischer Streckenschaltplan, Abschnitt 06-2 und 07-1

**Single Line Diagramm  
 AB 07-2**

Nicht maßstabsgerecht  
 Einpolige Darstellung

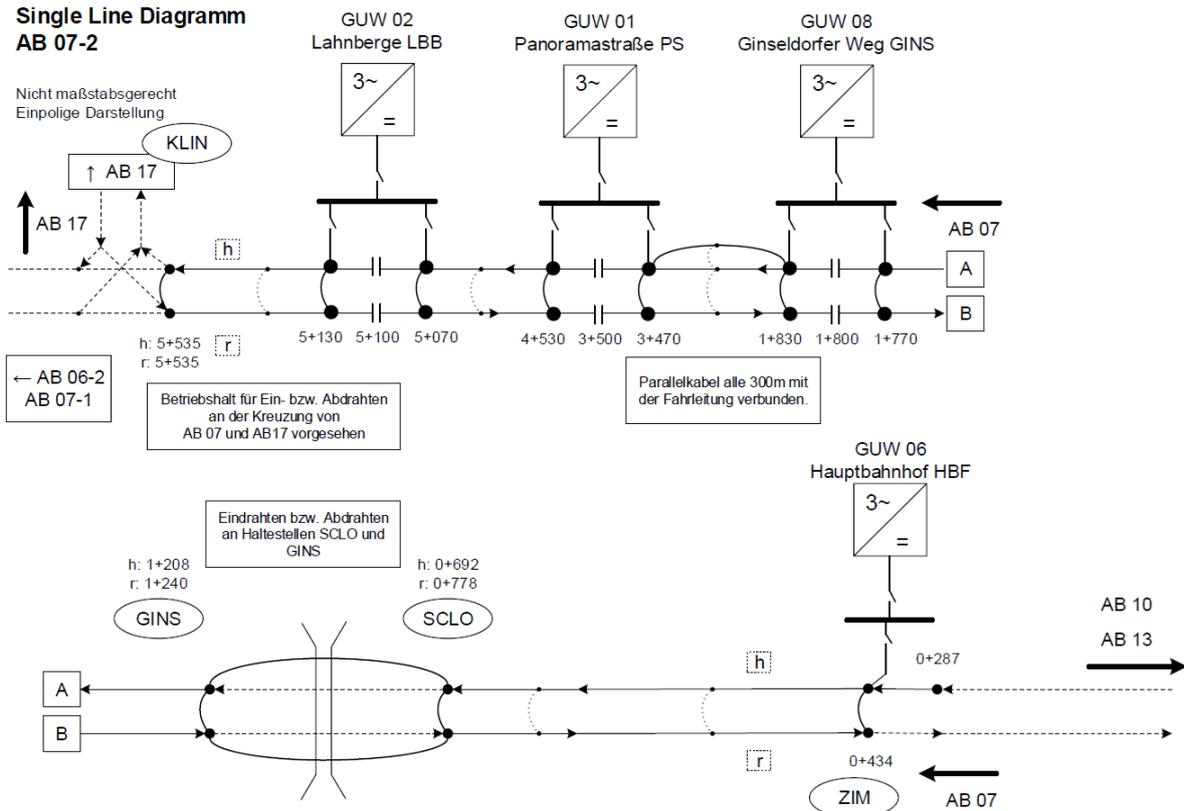


Abbildung 3-13: Schematischer Streckenschaltplan, Abschnitt 07-2

## **4 Simulation und Auswertung**

### **4.1 Untersuchte Szenarien**

Im Rahmen der Untersuchung wurden ein Normal- und acht Ausfall-Szenarien untersucht, wobei in den Ausfallszenarien jeweils der Ausfall eines kompletten Gleichrichterunterwerks nachgebildet wurde (sog. n-1 Betrieb). Dabei wurde simuliert, dass die Gleichrichter ausgeschaltet und die Streckenschalter geöffnet sind. Sind am Gleichrichterunterwerksstandort Trenner in der Fahrleitung verbaut, werden diese überbrückt, um eine zweiseitige Speisung über das ausgefallene Gleichrichterunterwerk hinweg zu ermöglichen. Abbildung 4-1 zeigt ein Single-Line-Diagramm beispielhaft für den Ausfall des G UW 01 „Panoramastraße“.

Drei Ausnahmen von diesem Vorgehen ergeben sich bei Ausfall des G UW 02 „Lahnberge-Bauerbach“. In diesem Szenario werden die Trenner nicht geschlossen und somit der letzte Fahrdrahtabschnitt nicht mit Spannung versorgt (siehe Abbildung 4-2). Selbiges gilt für den Ausfall des G UW 03 „Alte Feldfabrik“. Hier wird der Fahrdrahtabschnitt in Richtung des Klinikums ebenfalls nicht mit Spannung versorgt. Die Fahrzeuge fahren in diesen Fällen die genannten Rest-Abschnitte mit Energie aus der Batterie. Die dritte Ausnahme betrifft den Ausfall des G UW 07 „Brüder-Grimm-Straße“. In diesem Fall werden die Trenner am Gleichrichterunterwerk nicht gebrückt und die Speiseabschnitte in beide Richtungen des Gleichrichterunterwerks werden einseitig durch die jeweils benachbarten Gleichrichterunterwerke versorgt. Alle drei genannten Ausnahmen sind notwendig, um die Kurzschlusserkennbarkeit gemäß der VDV-Schrift 520 zu gewährleisten.

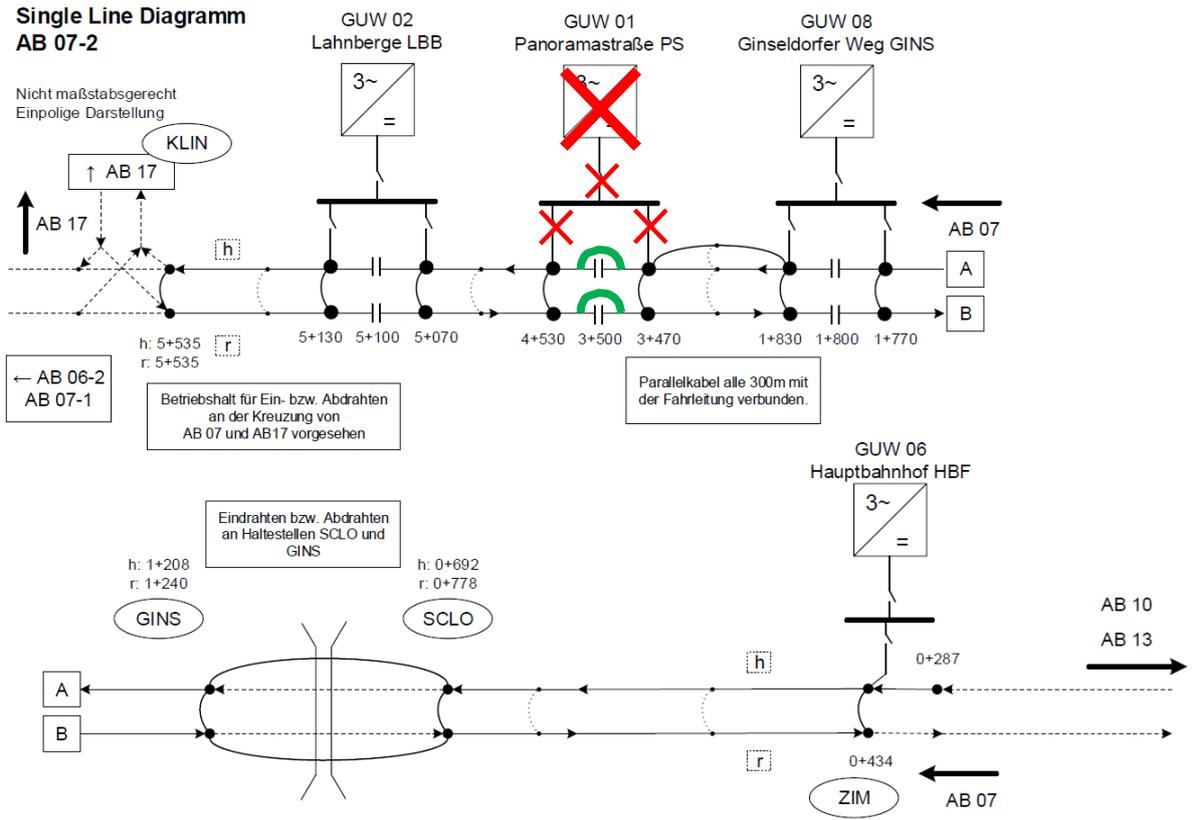


Abbildung 4-1: Ausschnitt SLD, Ausfall GUV 01 „Panoramastraße“

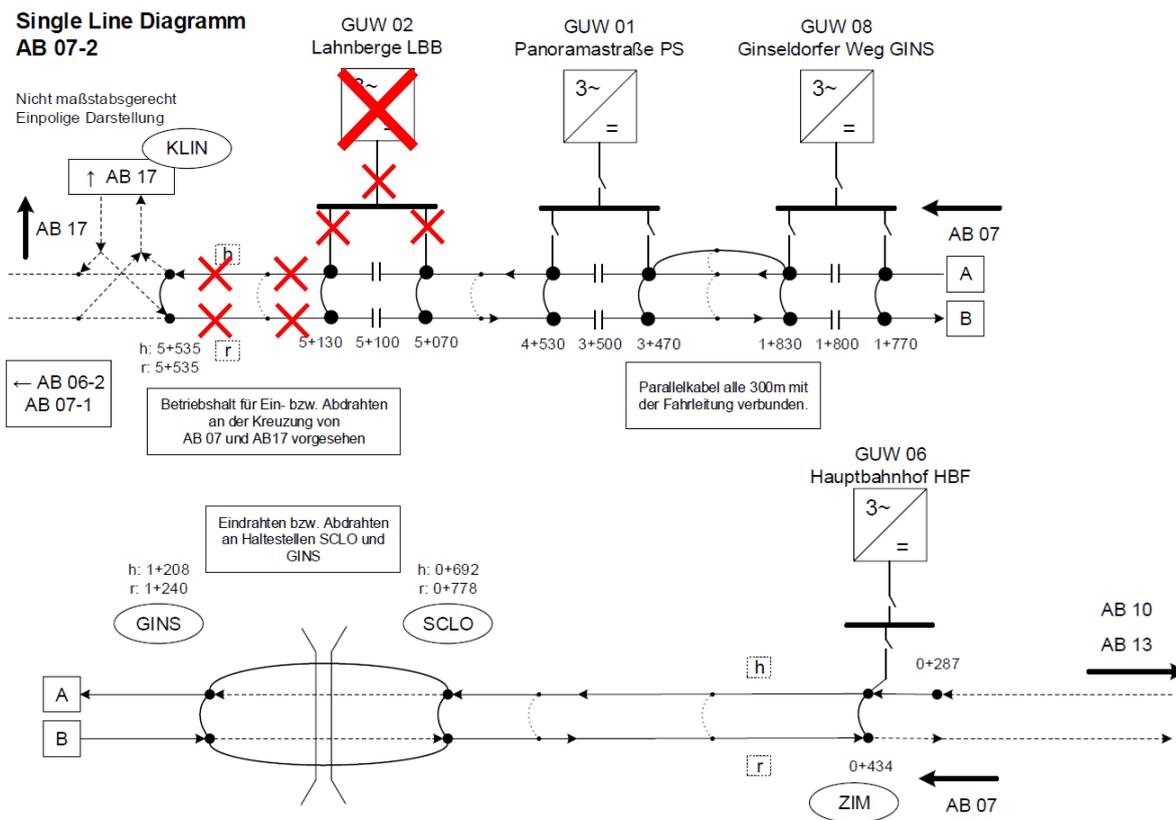


Abbildung 4-2: Ausschnitt SLD, Ausfall GUV 02 „Lahnberge / Bauerbach“

#### 4.2 Minimale Spannung am Stromabnehmer

Der zulässige Toleranzbereich der Fahrleitungsspannung ist in der Norm EN 50163 festgelegt:

Tabelle 4-1: zulässiger Toleranzbereich der Fahrleitungsspannung (EN 50163)

$U_{min2}$	$U_{min1}$	$U_N$	$U_{max1}$	$U_{max2}$
500 V	500 V	<b>750 V</b>	900 V	1.000 V

Für die Auslegung und Dimensionierung sind insbesondere die Minimalspannungen  $U_{min1}$  und  $U_{min2}$  relevant:

- „d) Unter bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen muss die Spannung im Bereich  $U_{min1} \leq U \leq U_{max2}$  liegen. [...]
- g) *Niedrigste Betriebsspannung: Unter außergewöhnlichen Betriebsbedingungen ist  $U_{min2}$  der niedrigste Wert der Fahrleitungsspannung, bei dem der Betrieb von Bahnfahrzeugen vorgesehen ist.“<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> EN 50163:2004 Kap. 4.1

Zur Beurteilung der Spannungshaltung im Fahrleitungsnetz wurde eine **ortsabhängige Auswertung der zeitlichen Spannungsverläufe aller Fahrzeuge** für alle Fahrleitungsabschnitte vorgenommen. Die grafisch dargestellten Minimalspannungsverläufe zeigen die im gesamten Simulationszeitraum aufgetretenen ortsabhängigen Minimalspannungen an den Stromabnehmern aller Fahrzeuge und sind detailliert im Anhang zu diesem Simulationsbericht zu finden. Für die untersuchten Speisesituationen traten folgende minimalen Spannungen (1s-Spitzenbelastung) auf:

Tabelle 4-2: Minimale Stromabnehmerspannung

Netzzustand	Minimale Stromabnehmerspannung [V]
Normalbetrieb	679
Ausfall G UW 01 Panoramastraße	679
Ausfall G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach	571
Ausfall G UW 03 Alte Feldfabrik	541
Ausfall G UW 04 Südbahnhof	624
Ausfall G UW 05 Amtsgericht Marburg	573
Ausfall G UW 06 Hauptbahnhof	583
Ausfall G UW 07 Brüder-Grimm-Straße	565
Ausfall G UW 08 Ginseldorfer Weg	679

Rot markiert:  $U_{\text{Panto,min}} < 500 \text{ V}$ , Orange markiert:  $U_{\text{Panto,min}} < 600 \text{ V}$

Entsprechend der normativen Vorgaben gemäß EN 50163 werden die untersuchten Speisesituationen wie folgt als unkritisch, genügend (nahe am Grenzwert) oder kritisch (Grenzwert unterschritten) bewertet:

**kritisch ( $U_{\text{min}} \leq 500 \text{ V}$ ):**

- keine Speisesituation

**genügend ( $500 \text{ V} < U_{\text{min}} \leq 600 \text{ V}$ ):**

- Ausfall G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach
- Ausfall G UW 03 Alte Feldfabrik
- Ausfall G UW 05 Amtsgericht Marburg
- Ausfall G UW 06 Hauptbahnhof
- Ausfall G UW 07 Brüder-Grimm-Straße

**unkritisch ( $U_{\text{min}} > 600 \text{ V}$ ):**

- Normalbetrieb
- Ausfall G UW 01 Panoramastraße
- Ausfall G UW 04 Südbahnhof
- Ausfall G UW 08 Ginseldorfer Weg

Die Auswertung der zeit- und örtlichen Spannungsverläufe aller Fahrzeuge hat ergeben, dass die minimal auftretenden Spannungen am Stromabnehmer im **Normalbetrieb** sowie bei Ausfall einzelner Gleichrichterunterwerke innerhalb normativer Grenzen liegen. Die minimalen Spannungen am Stromabnehmer betragen vornehmlich mehr als 550 V DC.

### 4.3 Kurzschlussstromerkennbarkeit und Beurteilung

Im betrachteten Fahrleitungsnetz wurden die minimalen stationären Kurzschlussströme berechnet. Der Kurzschluss wurde dabei als widerstandsfrei zwischen positivem und negativem Fahrdraht angenommen. Die Berechnung erfolgte ohne Berücksichtigung einer technisch möglichen Mitnahmeschaltung in den Gleichrichterunterwerken. Solche Mitnahmeschaltungen sind möglich, um die Erkennbarkeit von Kurzschlüssen in großen Speisebereichen zu erhöhen.

Nachfolgend sind die untersuchten minimalen Kurzschlussströme je Gleichrichterunterwerk für Normal- und Ausfallbetrieb zusammengefasst (Tabelle 4-3) und mit den maximalen Betriebsströmen verglichen. Die minimalen Kurzschlussströme müssen immer sicher erkannt und von den maximalen Betriebsströmen unterschieden werden können. Das empfohlene Verhältnis von maximalem Betriebsstrom  $I_{B,max}$  zu minimalem Kurzschlussstrom  $I_{K,min}$  sollte ca. 80% nicht übersteigen (abgeleitet aus VDV-Schrift 520), sodass der zwischen  $I_{K,min}$  und  $I_{B,max}$  liegende Auslösestrom  $I_{Trigger}$  des Streckenschalters jeweils 10 % Abstand zu den beiden Grenzwerten besitzt.

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$I_{K,min} > I_{Trigger} > I_{B,max}$$

Tabelle 4-3: Minimale stationäre Kurzschlussströme

Gleichrichterunterwerk	Kabel	Normalbetrieb			Ausfallbetrieb			
		$I_{B,max}$	$I_{K,min}$	$I_{B,max}/I_{K,min}$	$I_{B,max}$	$I_{K,min}$	$I_{B,max}/I_{K,min}$	Ausfall GUV
		A	A	%	A	A	%	
GUV 01 Panoramastraße	PS1	896	4.589	19,53	1.250	2.747	45,50	08 GINS
	PS2	583	2.156	27,06	910	1.750	52,02	02 LBB
GUV 02 Lahnberge/Bauerbach	LBB1	623	2141	29,10	678	1.599	42,38	01 PS
	LBB2	743	5.916	12,56	745	5.916	12,59	01 PS
GUV 03 Alte Feldfabrik	FF1	828	3.524	23,49	835	3.524	23,70	07 BGRI
	FF2	852	1.991	42,79	1.441	1.991	72,37	07 BGRI

Gleichrichterunterwerk	Kabel	Normalbetrieb			Ausfallbetrieb			Ausfall G UW
		$I_{B,max}$	$I_{K,min}$	$I_{B,max}/I_{K,min}$	$I_{B,max}$	$I_{K,min}$	$I_{B,max}/I_{K,min}$	
		A	A	%	A	A	%	
G UW 04 Südbahnhof	SBF1	505	4.430	11,40	1.636	2.826	57,91	05 AGM
	SBF2	645	2.453	26,28	1.431	2.453	58,34	07 BGRI
	SBF3	721	5.543	13,00	851	5.543	15,36	07 BGRI
G UW 05 Amtsgericht Marburg	AGM1	766	4.880	15,70	776	4.880	15,91	05 SBF
	AGM2	844	4.033	20,92	1.305	2.008	65,00	05 SBF
G UW 06 Hauptbahnhof	HBF1	615	2.664	23,08	645	1.903	33,87	08 GINS
G UW 07 Brüder-Grimm-Straße	BGRI1	780	2.515	31,02	963	1.923	50,10	05 SBF
	BGRI2	759	1.996	38,03	1.355	1.996	67,91	03 FF
G UW 08 Ginseldorfer Weg	GINS1	614	2.747	22,35	907	2.280	39,80	06 HBF
	GINS2	608	4.950	12,28	1.252	1.638	76,45	01 PS

Rot markiert: Kurzschluss- bzw. Auslösestrom größer als max. Betriebsstrom

Orange markiert: Kurzschluss- bzw. Auslösestrom in gleicher Größenordnung wie max. Betriebsstrom

Bei den berechneten maximalen Betriebsströmen ist zu beachten, dass diese nur für kurze Dauern auftreten. Im Normal- und Ausfallbetrieb liegen alle berechneten maximalen Betriebsströme in einem akzeptablen Bereich unter den minimalen Kurzschlussströmen. Eine eindeutige Kurzschlussstromerkennbarkeit ist somit gegeben.

Abbildung 4-3 stellt die berechneten stationären minimalen Kurzschlussströme im Bereich zwischen Wilhelmplatz und Hölderlinstraße dar. Die stationären minimalen Kurzschlussströme für den Bereich Hauptbahnhof – Lahnberge – Hölderlinstraße sind in Abbildung 4-4 aufgezeichnet.

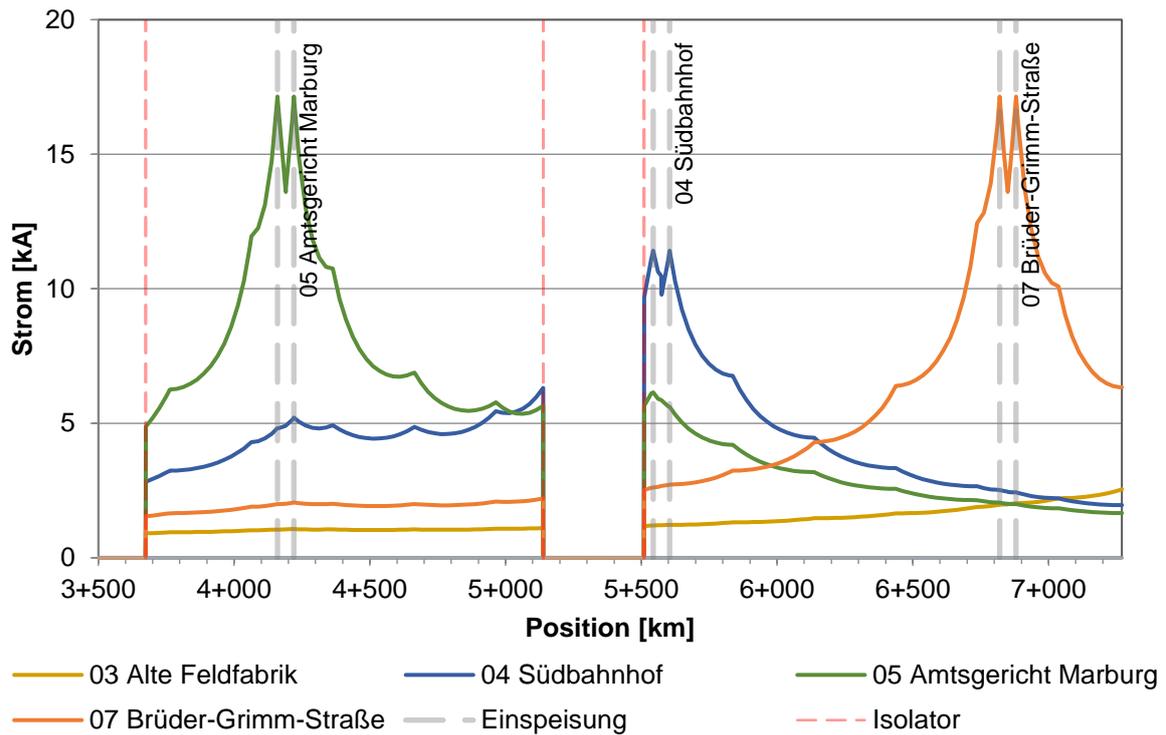


Abbildung 4-3 minimale stationäre Kurzschlussströme für AB06 (Abschnitt Wilhelmplatz – Hölderlinstraße) bei Speisung durch ein Unterwerk

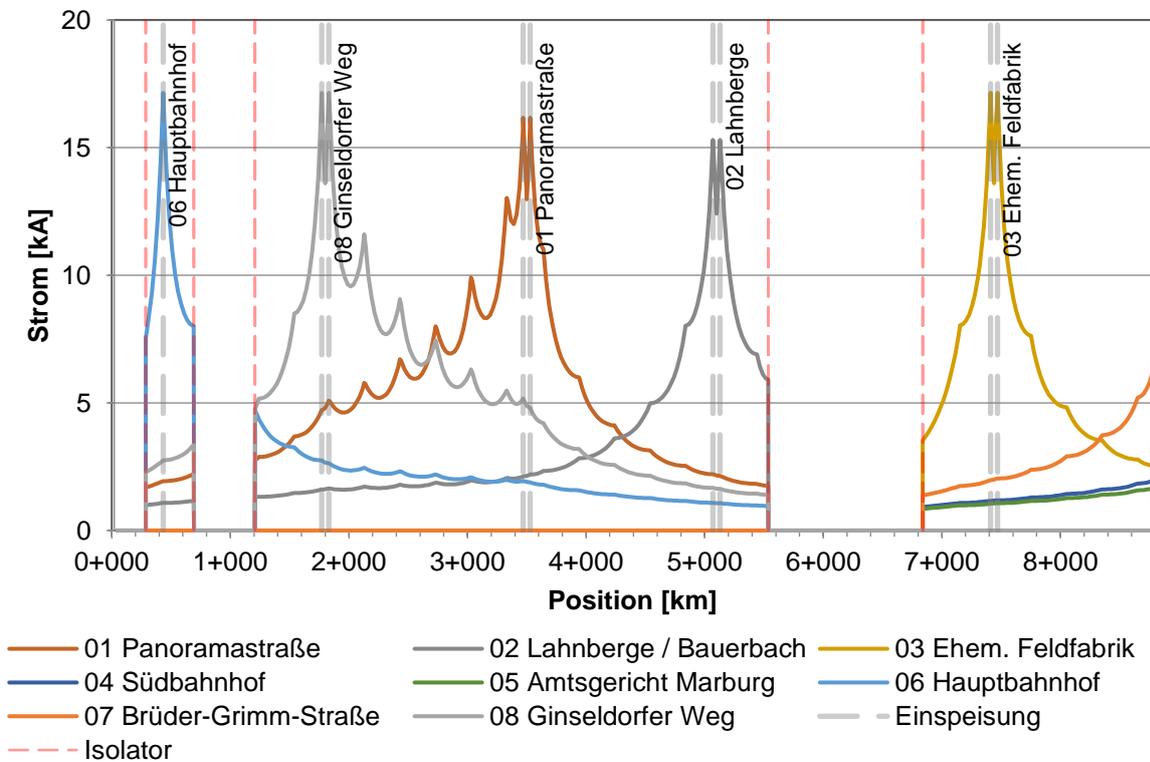


Abbildung 4-4 minimale stationäre Kurzschlussströme für AB07 (Abschnitt Hauptbahnhof – Lahnberge – Hölderlinstraße) bei Speisung durch ein Unterwerk

#### 4.4 Stromtragfähigkeit der Fahrleitung

Für das OpenPowerNet-Modell wurden die elektrischen Werte des eingesetzten Fahrleitungstyps (siehe Kapitel 3.5.1 *Fahrleitungsanlage*) herangezogen. Die Berechnung der Dauerstrombelastbarkeit erfolgte mit folgenden Annahmen: 20% Abnutzung des Fahrdrahtes, 1.000 W/m<sup>2</sup> solare Strahlung, 30 °C Umgebungstemperatur sowie 1 m/s Wind.

Die Dauerstromtragfähigkeit  $I_{rms}$  dieser Konfiguration (BRi120) beträgt hierbei 390 A. Im Normalbetrieb und in den Ausfallszenarien wird dieser Wert nicht überschritten. Die detaillierten Werte sind in den Diagrammen im Anhang zum Simulationsbericht zu finden. Eine Erläuterung des Anhangs erfolgt in Kapitel 5 *Beschriftung der Diagramme im Anhang*.

#### 4.5 Belastung der Gleichrichter

Für jedes Gleichrichterunterwerk wurden in Abhängigkeit von der Zeit die Ausgangsströme der beiden Gleichrichter berechnet. Da die Stromverläufe selbst für die Überprüfung der Dimensionierung wenig aussagekräftig sind, wurden die jeweiligen zeitgewichteten Belastungsdauerkurven berechnet und hinsichtlich der Maximal- und Effektivwerte analysiert.

Tabellarisch sind im folgenden Abschnitt Maximum- (Tabelle 4-4) und Effektivwerte (Tabelle 4-5) der Gleichrichterströme zusammengefasst.

Die größte Spitzenbelastung eines Gleichrichters tritt im G UW 04 Südbahnhof bei Ausfall des GUWs Amtsgericht Marburg auf und beträgt 1.644 A.

Der größte Effektivwert eines Gleichrichterstroms tritt ebenfalls im G UW 04 Südbahnhof bei Ausfall des GUWs Amtsgericht Marburg auf und beträgt 434 A.

Tabelle 4-4 Summe der Gleichrichterströme  $|I|_{max}$

Gleichrichterunterwerk	Normalbetrieb	Ausfallszenario	
	$ I _{max}$ in A	$ I _{max}$ in A	Ausfall von G UW
G UW 01 Panoramastraße	803	1.120	GINS
G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach	674	721	PS
G UW 03 Alte Feldfabrik	852	1.258	BGRI
G UW 04 Südbahnhof	956	1.644	AGM
G UW 05 Amtsgericht Marburg	899	1.385	SBF
G UW 06 Hauptbahnhof	615	645	GINS
G UW 07 Brüder-Grimm- Straße	704	1.193	FF
G UW 08 Ginseldorfer Weg	531	1.093	PS

Tabelle 4-5 Summe der Gleichrichterströme  $|I_{rms15}|$

Gleichrichterunterwerk	Normalbetrieb	Ausfallbetrieb	
	$I_{rms15}$ in A	$I_{rms15}$ in A	Ausfall von G UW
G UW 01 Panoramastraße	192	289	LBB
G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach	195	234	PS
G UW 03 Alte Feldfabrik	272	361	BGRI
G UW 04 Südbahnhof	307	549	AGM
G UW 05 Amtsgericht Marburg	262	475	SBF
G UW 06 Hauptbahnhof	121	164	GINS
G UW 07 Brüder-Grimm- Straße	257	438	FF
G UW 08 Ginseldorfer Weg	175	286	PS

Tabelle 4-6 Summe der Gleichrichterströme  $|I_{rms}|$

Gleichrichterunterwerk	Normalbetrieb	Ausfallbetrieb	
	$I_{rms}$ in A	$I_{rms}$ in A	Ausfall von G UW
G UW 01 Panoramastraße	134	201	LBB
G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach	136	163	PS
G UW 03 Alte Feldfabrik	214	289	BGRI
G UW 04 Südbahnhof	236	434	AGM
G UW 05 Amtsgericht Marburg	214	375	SBF
G UW 06 Hauptbahnhof	85	115	GINS
G UW 07 Brüder-Grimm- Straße	219	362	FF
G UW 08 Ginseldorfer Weg	122	199	PS

In den folgenden Diagrammen sind alle Belastungen (schwarz) und die Belastbarkeit (rot) der einzelnen Gleichrichterunterwerke aufgetragen (Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-8). Daraus geht hervor, dass die Strombelastbarkeit der Gleichrichteranlagen im Normal- und Ausfallbetrieb nicht überschritten wird. Die Gleichrichteranlagen sind somit ausreichend dimensioniert.

In den Diagrammen der Abbildung 4-6 und Abbildung 4-8 zeigt sich, dass elektrische Reserven für zusätzliche Linien oder weitere Fahrzeuge im Batterie-Oberleitungsbetrieb vorhanden sind. Die drei G UWs 04 Südbahnhof, 05 Amtsgericht

Marburg und 06 Hauptbahnhof können jeweils die Belastungen von bis zu vier weiteren Bussen pro Stunde realisieren.

*Anmerkung: Die Referenzkurve der Belastbarkeitsklasse wird maßgeblich durch den Basisstrom  $I_{dN}$  beschrieben. Die Belastbarkeitsklasse definiert das zeitliche Verhältnis aus Nenn- und zeitlichen Überlasten und bestimmt die Leistungsfähigkeit eines elektrischen Betriebsmittels (vgl. Kapitel 2.2.4). Durch die Überlastfähigkeit entsprechend der gewählten Belastbarkeitsklasse übersteigt folglich der dauerhaft zulässige Stromwert (Effektivwert des Bemessungslastgangs) den Bemessungsstrom (vgl. EN 60164 und EN 50328).*

*In der Belastbarkeitsklasse VI beträgt der Effektivwert des Bemessungslastgangs das 1,215-fache des Basisstroms des Gleichrichters.*

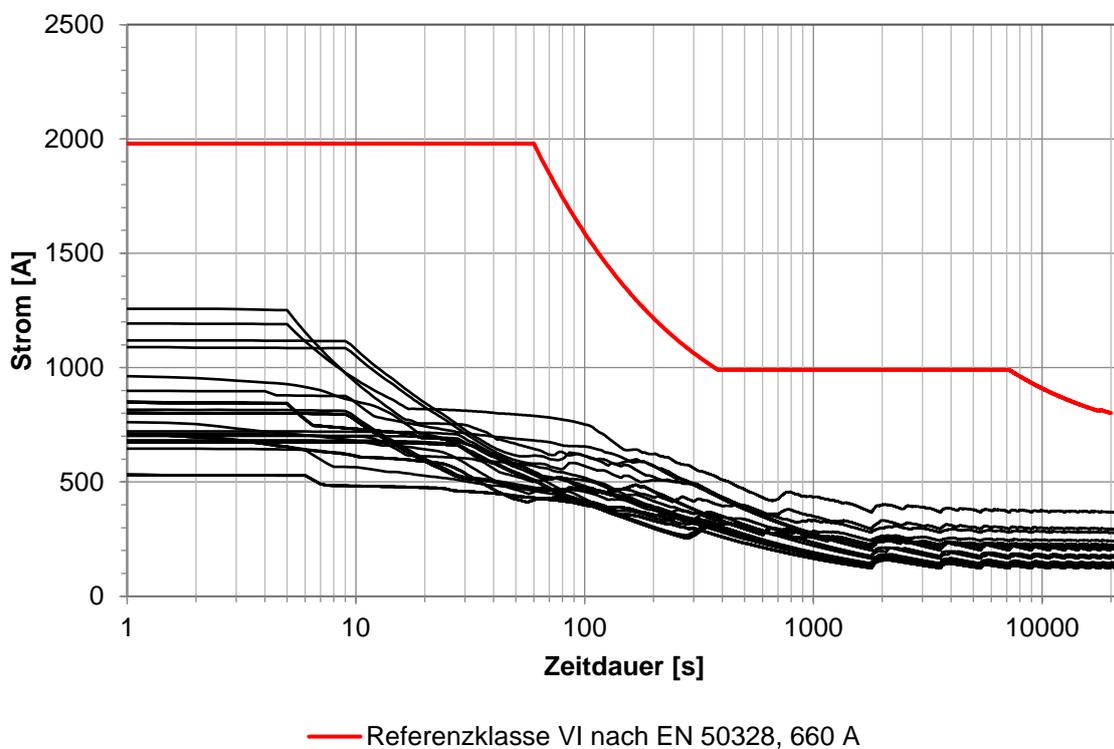


Abbildung 4-5 Strombelastung und -belastbarkeit der Gleichrichter für 660 A  
(GUW 01, GUW 02, GUW 03, GUW 07 und GUW 08)

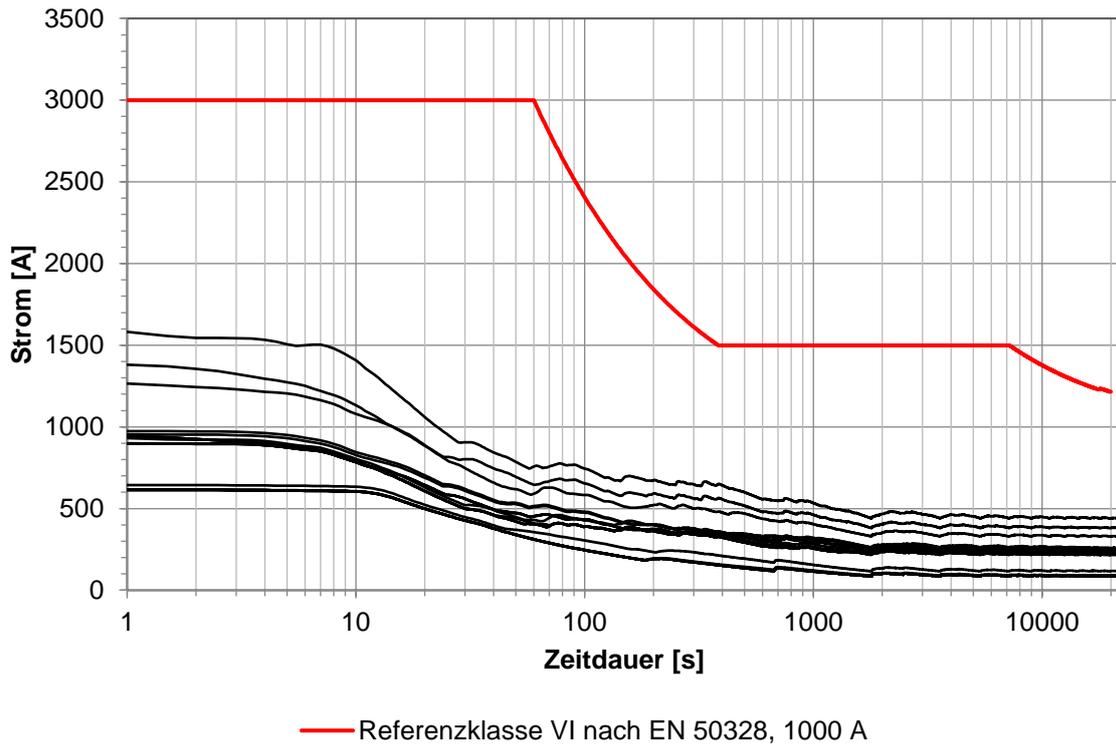


Abbildung 4-6 Strombelastung und -belastbarkeit der Gleichrichter für 1.000 A  
(GUW 04, GUW 05 und GUW 06)

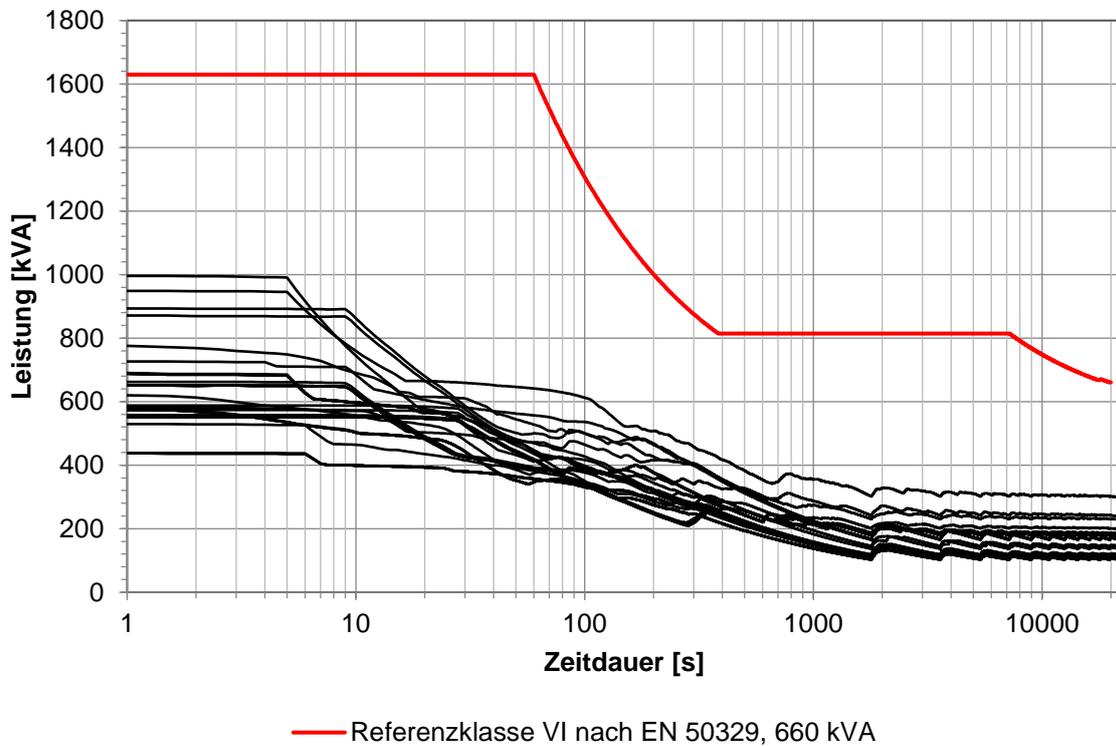


Abbildung 4-7 Belastung und Belastbarkeit der Transformatoren für 660 kVA  
 (GUW 01, GUW 02, GUW 03, GUW 07 und GUW 08)

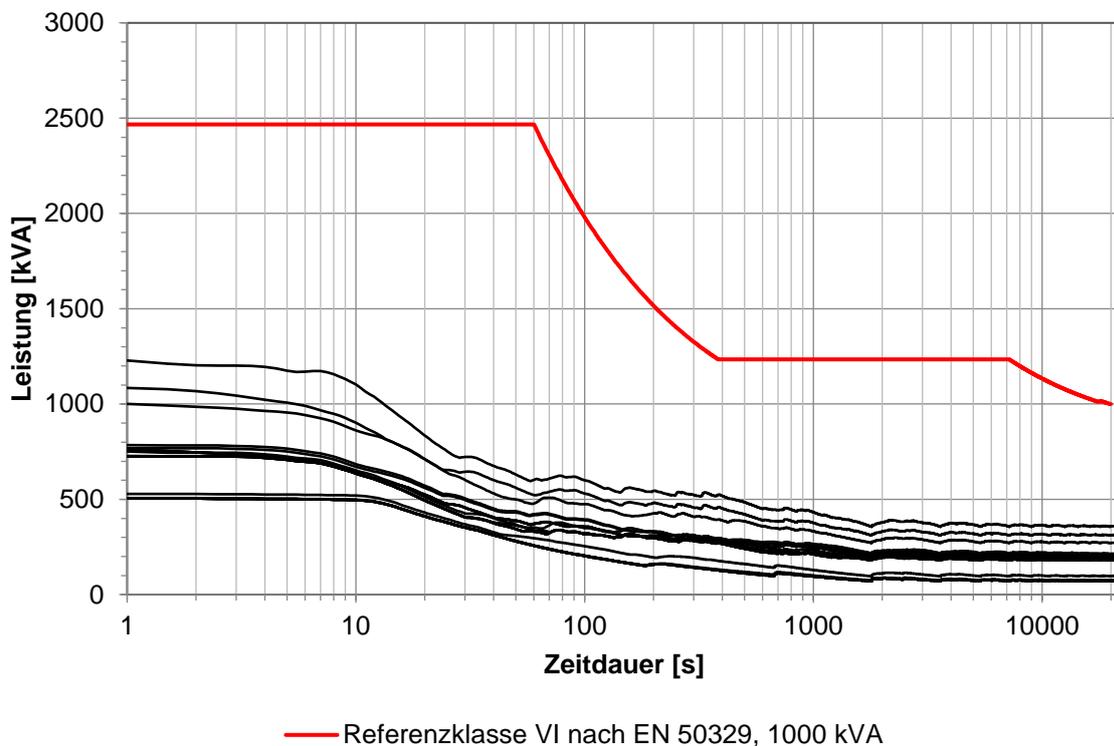


Abbildung 4-8 Belastung und Belastbarkeit der Transformatoren für 1.000 kVA  
 (GUW 04, GUW 05 und GUW 06)

#### 4.6 Ströme in den Speise- und Rückleiterkabeln

Für alle Speisekabel wurden die Ströme in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt und die zugehörige zeitgewichtete Belastungsdauerkurve berechnet (siehe Anhang zum Simulationsbericht). Als Speisekabel werden je Speisepunkt 2x240mm<sup>2</sup> Kupferkabel verwendet. Als Rückleiter werden je Anschlusspunkt 3x240mm<sup>2</sup> Kupferkabel verwendet.

Daraus ergibt sich eine Dauerstrom-Festigkeit je Speiseabgang von 864 A.

Im Folgenden sind in Tabelle 4-7 die effektiven Ströme in den Speisekabeln aufgeführt.

Tabelle 4-7 Belastung der Speise- und Rückleiterkabel  $|I_{rms}|$

Gleichrichterunterwerk	Kabel	Normalbetrieb	Ausfallszenario	
		$ I _{max}$ in A	$ I _{max}$ in A	Ausfall von GUW
GUW 01 Panorama- straße PS	PS1	113	182	GINS
	PS2	107	206	LBB
GUW 02 Lahnberge / Bauerbach LBB	LBB1	98	128	PS
	LBB2	106	106	PS

Gleichrichterunterwerk	Kabel	Normalbetrieb	Ausfallszenario	
		$I_{\max}$ in A	$I_{\max}$ in A	Ausfall von GUW
GUW 03 Alte Feldfabrik FF	FF1	147	148	BGRI
	FF2	166	247	BGRI
GUW 04 Südbahnhof SBF	SBF1	110	330	AGM
	SBF2	158	268	BGRI
	SBF5	162	174	LBB
GUW 05 Amtsgericht Marburg AGM	AGM1	148	150	SBF
	AGM2	168	325	SBF
GUW 06 Hauptbahnhof HBF	HBF1	85	115	GINs
GUW 07 Brüder-Grimm-Straße BGRI	BGRI1	173	227	SBF
	BGRI2	169	352	FF
GUW 08 Ginseldorfer Weg GINS	GINs1	94	171	HBF
	GINs2	116	206	PS

Rot markiert: Belastung größer als zul. Dauer-Betriebsstrom

Orange markiert: Belastung in gleicher Größenordnung (> 80 %) wie zul. Dauer-Betriebsstrom

Der größte Effektivwert der Speisekabelströme tritt im Gleichrichterunterwerk Brüder-Grimm-Straße im Speisekabelabgang BGRI2 auf. Bei Ausfall des Gleichrichterunterwerks GUW 03 Alte Feldfabrik steigt dort der Wert auf 352 A. Bei Verwendung der angegebenen Kabelanzahl für die Speiseabgänge wird die Belastbarkeit der Speisekabel im Normal- und Ausfallbetrieb somit nicht überschritten.

#### 4.7 Bilanz des Batterieladezustands über mehrere Fahrten

Zur Bewertung des aktuellen Batterieladezustands (State of Charge, SoC), wurde der Batterieenergieinhalt eines Fahrzeugs über einen Betriebszeitraum von sechs Stunden simuliert. Erst durch die Berücksichtigung dieses Zeitraums können Fahrzeugfolgen beim Übergang auf verschiedene Linien wie nachfolgend erläutert in Bezug auf die Energiebilanz beurteilt werden. Nachdem sich der SoC bei den ersten Umläufen noch einschwingen muss, können die spezifischen Fahrten 07\_725, 27\_2730, 07\_732 und 27\_2733 zur Auswertung herangezogen werden. Zu beachten ist, dass diese vier Fahrplanfahrten zu einem Fahrzeug gehören, welche in den untersuchten 6 Stunden in dieser Reihenfolge von diesem Fahrzeug geleistet werden. Durch die Analyse genau dieser vier Fahrten wird sichergestellt, dass dasselbe Fahrzeug (und somit derselbe Akku) über den gewählten Zeitraum betrachtet wird.

**Hinweis:** Im untersuchten Fall werden die Linien 7 und 27 abwechselnd vom selben Fahrzeug bedient. Es befährt die jeweilige Linie abwechselnd in beiden Richtungen.

Die SoC-Bilanzen der genannten vier Kurse ist in Tabelle 4-8 gezeigt. Ist die Bilanz des SoC ausgeglichen oder positiv, sind die Nachlademöglichkeiten ausreichend dimensioniert. Ist die SoC-Bilanz deutlich negativ, kann der Betrieb nach kurzer Dauer

nicht fortgesetzt werden. Ist die SoC-Bilanz hingegen nur gering negativ (bis – 10 % je komplettem Umlauf (ca. 3 Stunden)), lässt sich dies durch die verfügbare Energiereserve der Batterie abpuffern.

Tabelle 4-8: Übersicht der SoC-Bilanzen

Szenario	Umlauf				Summe
	07_725	27_2730	07_732	27_2733	
Normalbetrieb	-3 %	13 %	-7 %	-3 %	0 %
Ausfall G UW 01 Panoramastraße	-3 %	13 %	-7 %	-3 %	0 %
Ausfall G UW 02 Lahnberge/ Bauerbach	-3 %	11 %	1 %	-9 %	0 %
Ausfall G UW 03 Alte Feldfabrik	-6 %	7 %	0 %	-6 %	-5 %
Ausfall G UW 04 Südbahnhof	-3 %	13 %	-7 %	-3 %	0 %
Ausfall G UW 05 Amtsgericht Marburg	-3 %	13 %	-7 %	-3 %	0 %
Ausfall G UW 06 Hauptbahnhof	-3 %	13 %	-7 %	-3 %	0 %
Ausfall G UW 07 Brüder-Grimm- Straße	-5 %	12 %	-3 %	-4 %	0 %
Ausfall G UW 08 Ginseldorfer Weg	-3 %	13 %	-7 %	-3 %	0 %

Rot markiert: SoC-Bilanz (Summe) < -10 %

Orange markiert: SoC-Bilanz (Summe) < 0 %

Es zeigt sich, dass in nahezu allen Szenarien die SoC-Bilanz gemittelt über die beschriebenen vier Fahrplanfahrten ausgeglichen ist. Je nachdem, welches G UW ausgefallen ist, kann die Batterie im benötigten Umfang auf anderen Fahrleitungsabschnitten komplett nachgeladen werden. Lediglich im Ausfallszenario G UW 03 Alte Feldfabrik reicht die Zeit unter dem Fahrdraht auch gemittelt über den Beispielumlauf nicht aus, um ein ausgeglichenes SoC-Verhältnis herzustellen. Dies resultiert aus der Abschaltung des letzten Fahrdrahtabschnittes zwischen der Alten Feldfabrik und der Einfahrt zum Campus Nord, welche für die Kurzschlusserkennung in diesem Szenario nötig ist. Die SoC-Bilanz beträgt in diesem Fall - 5 % über den betrachteten Zeitraum von 6 h, siehe Tabelle 4-8. Rein rechnerisch könnten noch fünf Umläufe zu je drei

Stunden im betrachteten Szenario (ungünstigster Fall → volle Beladung, volle Hilfsbetriebe, ausgefallenes Gleichrichterunterwerk GUW 03 Feldfabrik) gefahren werden, bevor die Batterie leer ist. Wenn das Verkehrsangebot gleichbleiben soll, muss deshalb innerhalb von 18 Stunden diese Störung behoben werden, bevor eine andere Form der Nachladung für den Betrieb nötig wird, z. B. über Nacht im Depot.

## **4.8 Abweichungen vom ursprünglich simulierten Betriebskonzept**

### **4.8.1 15-Minuten-Takt auf dem kompletten Ring**

Grundlage der vorliegenden Szenarien ist ein 30-Minuten-Grundtakt auf der Linie 27, der durch die Linie 7 im südlichen Bereich auf einen 15-Minuten-Takt verdichtet wird. Sollten Planungen zukünftig einen 15-Minuten-Takt auf dem kompletten Ring vorsehen, müsste das neue Betriebskonzept genauer untersucht werden. Die Ergebnisse der bereits untersuchten Szenarien (*Kapitel 4.1*) lassen jedoch schon jetzt den Schluss zu, dass die elektrische Infrastruktur der Unterwerke, Kabel und Fahrleitungen für die höhere elektrische Belastung, die durch den 15-Minuten-Takt (bedeutet mehr Fahrzeuge) entstehen wird, adäquat ausgelegt und dimensioniert ist.

### **4.8.2 Haltestelle am Südbahnhof entfällt**

Für die initiale Untersuchung wurde davon ausgegangen, dass jedes Fahrzeug der Linien 7 und 27, egal ob stadteinwärts oder -auswärts fahrend, die Haltestelle am Südbahnhof bedient. Sollte perspektivisch eine Beschleunigung der genannten Linien auf dem südlichen Teil des Ringverkehrs geplant werden, wäre dies mit dem Auslassen des Halts am Südbahnhof möglich. Somit wird eine direkte Verbindung zwischen den Haltestellen „Konrad-Adenauer-Brücke“ und „An der Schanze“ realisiert. Ein zusätzlicher Leistungsbedarf für die elektrische Infrastruktur der Unterwerke, Kabel und Fahrleitungen wird durch dieses Fahrscenario nicht erwartet. In der Oberleitungsplanung wurde diese Variante der Linienführung zwar nicht berücksichtigt, jedoch erfolgte noch keine statische Berechnung der Fahrleitungsanlage. Die für diese Variante notwendige elektrische Konfiguration der Fahrleitungsanlage kann im Zuge des nächsten Planungsschrittes berücksichtigt und umgesetzt werden [Q12].

## **5 Beschriftung der Diagramme im Anhang**

Die Anhänge zum Simulationsbericht sind in der Unterlage (21.2) zusammengestellt. Die eindeutige Kennzeichnung der Diagramme innerhalb dieses Dokuments ist in Unterlage (21.2) auf S. 4 beschrieben, weshalb innerhalb dieses Berichts darauf verzichtet wird.