

Stadtbahnstrecke B, TA 3 Europaviertel -

Streustrom- und EMV-Gutachten

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Verringerung von Streuströmen	4
1.1 Allgemeines	4
1.2 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen	5
1.3 Zu treffende Maßnahmen	6
1.3.1 Gleisoberbau	6
1.3.2 Metallen leitende Durchverbindung von Stahlbetonbauwerken und -fahrwegen	6
1.3.3 Elektrische Trennung zwischen Tunnel und Erde bzw. anderen Bauwerken	8
1.3.4 Schutzmaßnahmen gegen das Bestehen bleiben unzulässig hoher Spannungen	9
1.3.5 Überwachung der elektrischen Isolierung Fahrschienen/Erde	10
1.3.6 Blitzschutzmaßnahmen	10
2. Elektromagnetische Felder im Bereich von Stadtbahnen	11
2.1 Allgemeines	11
2.2 Schutz von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern	11
2.3 Beeinflussung von Geräten	11
3. Zusammenfassung	12
4. Normen und Empfehlungen	13

Anlage: 3 Abbildungen
3 Tabellen

Wuppertal, 16.05.2014
L5033-12#1/Bette/Sedl

Stadtbahnstrecke B, TA 3 Europaviertel - Streustrom- und EMV-Gutachten

Von der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) wurde das Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik der Technischen Akademie Wuppertal e.V. beauftragt, die zu treffenden Maßnahmen zur Verringerung von Streuströmen unter Berücksichtigung der Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag, die zu treffenden Blitzschutzmaßnahmen und ggf. die notwendigen Maßnahmen in Bezug auf die Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV in einem Gutachten zu beschreiben (Auftrag Nr. 4500 276564/610 vom 04.07.2012).

Die VGF plant die Verlängerung der Stadtbahnstrecke B vom Platz der Republik durch das neu zu gestaltende Europaviertel. Die Strecke schließt an den bestehenden Tunnel am Platz der Republik an und verläuft über die Haltestelle Güterplatz bis zur Europaallee als Tunnelstrecke. Von der Haltestelle Emser Brücke bis zur Haltestelle Europagarten wird die Strecke oberirdisch auf einem Stahlbetonfahrweg geführt. Sie unterquert den Europagarten in einem Gemeinschaftstunnel; im mittleren Tunnel verläuft die Stadtbahnstrecke, durch die beiden außenliegenden Tunnel wird der Individualverkehr geführt. Hinter dem Gemeinschaftstunnel schließt ein oberirdischer Streckenabschnitt mit der Endhaltestelle Wohnpark an. In diesem Streckenabschnitt werden die Fahrschienen ebenfalls auf einem Stahlbetonfahrweg verlegt.

Gemäß BOStrab §3 (1) Nr. 4 müssen Anlagen von Gleichstrombahnen mit Energieübertragung über Fahrschienen so gebaut sein, dass nachteilige Wirkungen der Streustromkorrosion gering sind. Darüber hinaus muss laut §30 (4) die Bewehrung von Stahlbetontunneln und Stahlbetonfahrwegen metallisch leitend durchverbunden sein und sie darf keine galvanische Verbindung mit der Rückleitung und der Bewehrung anderer Bauwerke haben. Aufgrund dessen sind besondere Erdungsmaßnahmen sowohl für die Anlagen der VGF als auch für den Straßentunnel notwendig, die nachfolgend beschrieben werden.

Die neue Stadtbahnstrecke wird durch zwei Unterwerke mit Fahrstrom versorgt. Da Unterwerke von Gleichstrombahnen unter gewissen Umständen der 26. BImSchV unterliegen, wird in dem vorliegenden Gutachten auf die durch den Stadtbahnbetrieb verursachten magnetischen und elektrischen Felder eingegangen.

Für die Erstellung des Gutachtens wurden folgende Unterlagen verwendet:

Stadtbahnstrecke Europaviertel, Planfeststellung, Übersichtslageplan,
Nr. 4403-4414_OGLP002lp_2000.dwg vom 16.05.2014

Stadtbahnstrecke Europaviertel, Planfeststellung, Lageplan Ost, km 2+455.517 – km 2+100,
Nr. 4403-4405_OGLP003lp_0500.dwg vom 16.05.2014

Stadtbahnstrecke Europaviertel, Planfeststellung, Lageplan Ost, km 2+100 – km 2+750,
Nr. 4406-4407_OGLP004lp_0500.dwg vom 16.05.2014

Stadtbahnstrecke Europaviertel, Planfeststellung, Lageplan West, km 2+750 – km 3+480,
Nr. 4408-4410_OGLP005lp_0500.dwg vom 16.05.2014

Stadtbahnstrecke Europaviertel, Planfeststellung, Lageplan West, km 3+480 – km 4+224.485,
Nr. 4411-4414_OGLP006lp_0500.dwg vom 16.05.2014

Pflichtenheft, Anlage 4, Fahrdynamische Berechnung U5 Frankfurt am Main, Bombardier,
Ausgabe: 03.05.2006

1. Verringerung von Streuströmen

1.1 Allgemeines

Laut EN 50122-2 ist ein Streustrom ein Strom, der auf anderen als den vorgesehenen Pfaden fließt. Betrachtet man als Beispiel einen Rückleitungsabschnitt einer Stadtbahnstrecke, so erzeugt der in den Fahrschienen zurückfließende Betriebsstrom an diesen einen Längsspannungsfall. Dieser Schienenspannungsfall steht über die Gleisbettung auch am Erdboden an, so dass ein Teil des Rückstroms in den umgebenden Erdboden entweicht. Diesen Teil des Stroms bezeichnet man als Streustrom.

Er kann auf seinem Weg durch den Erdboden in andere Installationen aus Metall wie Rohrleitungen, Kabelmäntel und Stahlbewehrungen übertreten. In den Bereichen, in denen sich das Schienenpotential aufgrund des Fahrbetriebes in Richtung negativerer Werte verändert, tritt der Streustrom aus den o. g. Installationen wieder aus, um zu den Fahrschienen zurückzufließen. An den Stromaustrittsstellen bewirkt der Streustrom einen Materialabtrag (Streustromkorrosion). Bei Verbindung des negativen Pols der Fahrstromversorgung mit den Fahrschienen kann Korrosion an Rohrleitungen, Kabelmänteln und Stahlbewehrungen im Bereich der speisenden Unterwerke verstärkt auftreten.

Das Ausmaß der Korrosion hängt gemäß dem Faradayschen Gesetz von der Höhe des austretenden Stroms, dessen Einwirkungsdauer und dem elektrochemischen Äquivalent des Metalls ab. Beispielsweise beträgt das elektrochemische Äquivalent von Stahl $\mu_{K, Fe} = 9,13 \text{ kg/(A a)}$, d.h. dass ein Streustrom von 1 A, der aus einer Stahlrohrleitung in den Erdboden austritt, einen Materialabtrag von 9,13 kg innerhalb eines Jahres zur Folge hat. Ist der Stromaustritt auf eine kleine Fläche begrenzt und somit die Austrittsstromdichte sehr hoch, so erfolgt der Materialabtrag zur Tiefe hin und der Korrosionsschaden tritt in relativ kurzer Zeit auf.

Bei Streustromaustritt aus Stahlbeton erfolgt zunächst eine anodische Polarisierung. Dabei entstehen am passiven Stahl Sauerstoff- und Wasserstoffionen. Die anodisch erzeugte Säure wird durch die Mörtelalkalität neutralisiert. Erst wenn der Alkalitätsvorrat an der Stahloberfläche erschöpft ist, geht der Stahl in den aktiven Zustand über, und es erfolgt ein Materialabtrag entsprechend dem Faradayschen Gesetz. Daher tritt Korrosion bei Stahlbeton erst nach einer längeren Einwirkungsdauer von Streuströmen auf. Außer einem Materialabtrag von der Bewehrung entstehen Betonabplatzungen, da das Volumen der Korrosionsprodukte größer ist als das der ursprünglichen Bewehrung.

Darüber hinaus können Streuströme zu einer thermischen Überlastung von Kabeln wie Schutzleiter und zu Funkenbildung führen. Sie sind somit eine Gefahrenquelle für Feuer.

Um die Auswirkungen von Streuströmen beurteilen und bereits bei der Errichtung der Bahnanlage geeignete Maßnahmen treffen zu können, sollen gemäß EN 50122-2 die Bahnstromversorgung, die Rückleitung und das Erdungssystem untersucht werden. Hierbei ist u.a. die elektrische Isolierung der Fahrschienen gegenüber Erde, dem Tunnel und anderen Stahlbetonfahrwegen zu berücksichtigen. Demnach ist die gesamte Rückleitung einschließlich der Fahrschienen so gegenüber Erde und Tunneln zu isolieren, dass der auf die Länge bezogene Streustromaustritt aus den Fahrschienen im zeitlichen Mittel 2,5 mA/m nicht überschreitet. Unter dieser Bedingung wurden in den zurückliegenden 25 Jahren keine streustrombedingten Korrosionsschäden an den Gleisen von Gleichstrombahnen beobachtet.

Weiterhin soll der durch Streuströme verursachte Längsspannungsfall an der durchverbundenen Bewehrung von Tunneln, Trogbauwerken und Stahlbetonfahrwegen zwischen zwei beliebigen Orten in der Hauptverkehrszeit nicht größer sein als 200 mV.

1.2 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen

Laut dem Betriebskonzept der VGF fahren die Züge an Werktagen in der Hauptverkehrszeit von 06:30 Uhr bis 09:00 Uhr und von 15:00 Uhr bis 19:00 Uhr im 5-Minuten-Takt. Für die Berechnungen wurde angenommen, dass Drei-Wagen-Züge des Typs U5 mit $\frac{2}{3}$ Zuladung verkehren.

In den Streckenabschnitten vom Platz der Republik bis zur Emser Brücke beträgt die maximal zulässige Geschwindigkeit 70 km/h und von der Emser Brücke bis zum Wohnpark 50 km/h. Aus den fahrdynamischen Berechnungen folgt, dass bis zu einer Geschwindigkeit von 70 km/h die durchschnittliche Beschleunigung $0,81 \text{ m/s}^2$ beträgt. Die Stromaufnahme eines Drei-Wagen-Zuges ergibt sich zu 3000 A.

Ausgehend von diesen Angaben und der Anzahl der Zuganfahrten innerhalb der einzelnen Rückleitungsabschnitte wurde für jeden Rückleitungsabschnitt der mittlere Betriebsstrom (Stundenmittelwert) und nachfolgend der Strombelag in den Fahrschienen berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Wie uns von der Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH mitgeteilt wurde, werden die oberirdischen Streckenabschnitte als feste Fahrbahn mit armiertem Unterbau ausgeführt. Gemäß EN 50112-2 ist nicht nur die Bewehrung des Tunnels sondern auch die Bewehrung von armiertem Unterbau in Längsrichtung metallisch leitend durchzuverbinden. Der in Längsrichtung wirksame Querschnitt ist so zu dimensionieren, dass der durch Streuströme verursachte Längsspannungsfall 200 mV nicht überschreitet. Die diesbezüglichen Berechnungen wurden mit dem Rechnermodell der VDV-Schrift 501/3 durchgeführt. Hierbei wurde die gesamte Strecke in mehrere Streckenabschnitte unterteilt und die entsprechenden Kenngrößen für den Widerstandsbelag der Fahrschienen, den Widerstandsbelag der durchverbundenen Bewehrung, den Ableitungsbelag Fahrschienen/Erde und den Betriebsstrom eingesetzt.

Der Widerstandsbelag der Fahrschienen wurde zu $R'_S = 0,01 \text{ } \Omega/\text{km}$ (Doppelgleis, S49) angenommen.

Für den Widerstandsbelag der Tunnel und Rampen wurde der in der VDV-Schrift 501/1 genannte Wert von $R'_T = 0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$ angesetzt. Dieser Wert ergibt sich aus dem durchzuverbindenden Mindestquerschnitt von 400 mm^2 Eisen je Bauwerksseite und den parallel zu schaltenden Erdungsleitern von 35 mm^2 Kupfer je Tunnelseite. In den Streckenabschnitten mit zwei eingleisigen Tunneln ergibt sich daher ein Widerstandsbelag von $R'_T = 0,055 \text{ } \Omega/\text{km}$.

Der Widerstandsbelag der oberirdischen Streckenabschnitte wurde mit $R'_T = 0,2 \text{ } \Omega/\text{km}$ zugrunde gelegt, was einem durchverbundenen Eisenquerschnitt von 400 mm^2 je Bauwerksseite (Gesamtquerschnitt: 800 mm^2) entspricht.

In Bezug auf die Ableitungsbeläge wurden die in der früheren Ausgabe von EN 50122-2 genannten Werte angesetzt. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die in den Normen genannten Richtwerte für eingleisige Strecken gelten, sodass bei den Berechnungen jeweils der doppelte Wert angenommen wurde. Daher ergibt sich für die Tunnelstrecken ein Ableitungsbelag von $0,2 \text{ S/km}$, für die Rampen ein Wert von 1 S/km (offener Oberbau) und für die oberirdischen Streckenabschnitte ein Ableitungsbelag von 5 S/km (geschlossener Oberbau) bzw. für den eingleisigen Endabschnitt $2,5 \text{ S/km}$.

Für den Strombelag in den Fahrschienen wurden die oben berechneten Werte, siehe Tabelle 1, angenommen.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der Tabelle 2 wiedergegeben. Der größte Gesamtlängsspannungsfall ergibt sich an den Abschnitten vom Ende der Rampe Emser Brücke bis zum Streckenende zu 183,8 mV. Dieser Wert ist kleiner als der in EN 50122-2 genannte zulässige Längsspannungsfall von 200 mV.

Weiterhin wurde für die Orte, an denen sich das Schienenpotential in positiver Richtung verändert, der auf die Länge bezogene Streustromaustritt berechnet. Er ist in der Tabelle 3 wiedergegeben. Demnach ergibt sich der größte Streustromaustritt zwischen dem Rampenende und der Emser Brücke zu 1,75 mA/m. Er ist ebenfalls kleiner als der in EN 50122-2 genannte Wert von 2,5 mA/m.

Die vorgenommenen Berechnungen zeigen somit, dass die in EN 50122-2 und VDV 501/1 genannten Mindestforderungen zur Verringerung von Streuströmen ausreichen.

1.3 Zu treffende Maßnahmen

1.3.1 Gleisoberbau

Die Berechnungen ergaben, dass der empfohlene Wert für den auf die Länge bezogenen Streustromaustritt eingehalten wird, wenn die Ableitungsbeläge Fahrschienen/Erde bei geschlossenem Oberbau nicht größer als 2,5 S/km je Gleis und bei offenem Oberbau nicht größer als 0,5 S/km sind. Im Tunnel beträgt der Richtwert 0,1 S/km je Gleis.

Um diese Werte zu gewährleisten, ist in den oberirdischen Streckenabschnitten für eine gute Schienenentwässerung zu sorgen. Außerdem sind die Fahrschienen mit isolierenden Befestigungselementen wie Isolierdübel, isolierende Kragenbuchsen und isolierendem Unterguss bzw. isolierenden Zwischenlagen zu befestigen.

Beim geschlossenen Oberbau wird zusätzlich empfohlen, isolierende Kammerfüllprofile zu verwenden. Die mit den Fahrschienen verbundenen Bauteile wie Weichenantriebs-, Entwässerungs- und Rückleiteranschlusskästen sind ebenfalls gegenüber Erde elektrisch zu isolieren. Dies kann z. B. durch Unter- bzw. Umgießen der Bauteile mit einer isolierenden Vergussmasse erfolgen.

Beim offenen Oberbau ist darauf zu achten, dass die isolierenden Kragenbuchsen und Zwischenlagen so bemessen werden, dass sich Kriechwege von ≥ 12 mm ergeben

1.3.2 Metallen leitende Durchverbindung von Stahlbetonbauwerken und -fahrwegen

Die aus den Fahrschienen entweichenden Streuströme treten in die Bewehrung des Tunnels und der festen Fahrbahn über und fließen über die metallen leitende Durchverbindung bis zu den Abschnitten, in denen das Schienenpotential negativ ist. Hierdurch entsteht an der metallen leitenden Durchverbindung ein Längsspannungsfall, der auch am Erdboden anliegt, so dass ein Teil des Streustromes in den Erdboden abfließt und andere Installationen aus Metall nachteilig beeinflussen kann. Durch Begrenzung des Längsspannungsfalls auf 200 mV wird der in den Erdboden abfließende Streustrom soweit minimiert, dass an anderen erdverlegten Metallinstallationen keine unzulässigen Beeinflussungen mehr auftreten. Vor allem aber wird hierdurch auch gewährleistet, dass die außen liegende Tunnelbewehrung nicht nachteilig beeinflusst wird. Um den Längsspannungsfall von 200 mV einzuhalten, ist es u.a. erforderlich, die Bewehrung des Tunnels und der festen Fahrbahn in Längsrichtung niederohmig metallen leitend durchzuverbinden. Darüber hinaus dient die metallen leitende Durchverbindung

- zum Schutz beim indirekten Berühren wie Fahrleitungsriß und
- zum Schutz gegen Gefahren durch das Schienenpotential.

Der in Längsrichtung wirksame Querschnitt der metallenen leitenden Durchverbindung soll laut VDV 501/1 den bei der Planung zugrunde gelegten Wert mindestens jedoch 400 mm^2 je Bauwerksseite haben. Parallel zur Bewehrung müssen auf jeder Tunnelseite Erdungsleitungen aus mindestens 35 mm^2 Kupfer oder gleichwertig verlegt und mit den an den Dehnungsfugen herausgeführten Bewehrungsanschlüssen (Erdungsfestpunkte) verbunden werden.

Die vorgenommenen Berechnungen ergaben, dass die in VDV 501/1 genannten Mindestanforderungen ausreichen, um den Längsspannungsfall auf $< 200 \text{ mV}$ zu begrenzen.

Deshalb wird empfohlen, auf jeder Tunnel- und Trogseite in Längsrichtung durchlaufende Stahlstäbe oder Flacheisen einzubauen, deren Querschnitt mindestens 400 mm^2 beträgt, sodass sich ein Gesamtquerschnitt von mindestens 800 mm^2 Eisen ergibt. Aufgrund der unterschiedlichen elektrischen spezifischen Widerstände von Betonstählen sollten entweder glatte Stahlstäbe des Typs S235JR+AR mit einem Durchmesser von 25 mm oder Flacheisen $50 \times 8 \text{ mm}$ verwendet werden. Die längslaufenden Eisen sind an ihren Stoßstellen miteinander zu verschweißen, so dass der Schweißnahtquerschnitt mindestens genauso groß ist wie der Querschnitt des Eisens. Die auf beiden Bauwerksseiten verlegten längslaufenden Eisen sollten alle zwei Meter mit der statischen Bewehrung punktverschweißt werden.

Am Anfang und Ende eines Blockes sind die längslaufenden Eisen mit einem über den gesamten Umfang umlaufenden Eisen mit einem Querschnitt von mindestens 400 mm^2 , z.B. Flacheisen $50 \times 8 \text{ mm}$, zu verschweißen. In den Haltestellenblöcken sollten die umlaufenden Eisen auch in der Fußgängerebene als umlaufendes Eisen geführt werden, sodass die Ausgangsblöcke in den Potentialausgleich mit einbezogen werden können.

Am Anfang und Ende eines Blockes, d.h. beiderseits der Fugen, werden in der Fahrbahn von den umlaufenden Flacheisen Erdungsfestpunkte (z.B. Cadweld FDB-16, Weitkowitz WEB 12 oder gleichwertig) herausgeführt, an die später die Fugenüberbrückungskabel und die längslaufenden Erdungsseile angeschlossen werden.

Zusätzliche Erdungsfestpunkte sind in der Fußgängerebene der Haltestelle Güterplatz beiderseits von Fugen zur Einbeziehung der Ausgangsblöcke anzuordnen.

Im Bereich des Gemeinschaftstunnels werden die Erdungsfestpunkte in beiden innenliegenden Tunnelwänden eingebaut, sodass sie vom Gleis aus zugänglich sind. Die Bewehrungen der außenliegenden Straßentunnel sind konstruktiv mit der Bewehrung des innenliegenden Stadtbahntunnels verbunden. Es wird empfohlen, in den Betriebsgebäuden des Straßentunnels und des Gleichrichter-Unterwerkes weitere Erdungsfestpunkte anzuordnen, die später als Fundament-/Tiefenerder für die elektrischen Anlagen verwendet werden.

Im Bereich der oberirdischen Streckenabschnitte ist die Bewehrung des armierten Unterbaus ebenfalls mit einem Gesamtquerschnitt von 800 mm^2 Eisen durchzuverbinden. Am Anfang und Ende des armierten Unterbaus, am Anfang und Ende von Haltestellen und bei längeren Betonierabschnitten in Abständen von 100 m sind auf beiden Seiten der Stadtbahntrasse von der Streustrombewehrung Erdungsfestpunkte herauszuführen. Diese Erdungsfestpunkte dienen dazu, den armierten Unterbau mit der Durchverbindung der Tunnel und mit den Bauwerkserden der Haltestellen zu verbinden.

1.3.3 Elektrische Trennung zwischen Tunnel und Erde bzw. anderen Bauwerken

Zur Vermeidung von Streustromverschleppungen wird sowohl in EN 50122-2 als auch in VDV 501/1 die elektrische Trennung zwischen dem Tunnel und dem Erdungssystem der öffentlichen Stromversorgung sowie anderen Bauwerken, die nicht gegen Erde isoliert sind, gefordert. Daher müssen sämtliche in die Gleichrichter-Unterwerke, in den Haltestellen und den Betriebsgebäuden der Straßentunnel verlaufenden Kabel und Rohrleitungen isolierend eingeführt und hinter der Gebäudeeinführung von den außen liegenden Installationen elektrisch getrennt werden.

Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen das Erdungsschema für die Gleichrichter-Unterwerke, des Betriebsgebäudes für die Straßentunnel und der Haltestellen.

In den Gleichrichter-Unterwerken, siehe Abbildung 1, erfolgt die Trennung zwischen öffentlicher Erde und Tunnelerde über Transformatoren mit getrennten Wicklungen. Die Schirme und Kabelendverschlüsse der von außen eingeführten Mittelspannungskabel werden in den Einspeisezellen auf isoliert befestigte Erdungssammelschienen aufgelegt. Diese Schienen werden untereinander verbunden und an einen von Hand zu betätigenden Erdungsschalter angeschlossen. Das andere Ende des Erdungsschalters wird auf die Haupterdungsschiene/Bauwerkserde (HES/BWE) geführt. Der Erdungsschalter sollte direkt neben der Eingangstür angeordnet werden und dient zur Schirmerdung bei Servicearbeiten in den Einspeisezellen.

Auf den Einspeisezellen und neben dem Erdungsschalter werden Hinweisschilder mit folgender Aufschrift angebracht:

**Achtung,
Schirmerdung!
Bei Arbeiten in den Einspeisezellen
Erdungsschalter einlegen!
Nach Beendigung der Arbeiten
Erdungsschalter wieder öffnen!**

Fernmeldekabel müssen ebenfalls isolierend in das Gleichrichter-Unterwerk eingeführt und dürfen nicht direkt mit der Bauwerkserde verbunden werden. Dient der Kabelmantel zur Herabsetzung des Reduktionsfaktors, so ist es zugelassen, ihn über einen induktionsarmen Kondensator an die Bauwerkserde anzuschließen.

Rohrleitungen aus Stahl werden mit isolierenden Wanddurchführungen in die Gleichrichter-Unterwerke eingeführt und erhalten direkt hinter der Gebäudeeinführung ein Isolierstück. Wegen der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers sollte die Frischwasserleitung aus Kunststoff bestehen.

Die Haupterdungsschiene der Gleichrichter-Unterwerke ist mit der durchverbundenen Bewehrung der Tunnel zu verbinden. In der Haltestelle Güterplatz wird empfohlen, die auf beiden Tunnelseiten durchlaufenden Erdungsleitungen aus mindestens 35 mm² Kupfer über die Haupterdungsschiene zu führen oder über zwei separate Erdungsleitungen auf jeder Tunnelseite an die metallene leitende Durchverbindung anzuschließen.

Im Gleichrichter-Unterwerk Europagarten ist die Haupterdungsschiene an den entsprechenden Erdungsfestpunkt anzuschließen.

Im Betriebsgebäude des Straßentunnels wird die Potentialausgleichsschiene ebenfalls mit dem entsprechenden Erdungsfestpunkt verbunden. Weiterhin wird empfohlen, die Potentialtrennung durch einen 1:1-Transformator herzustellen, siehe Abbildung 2. Innerhalb der Straßentunnel können dann Verbraucher der Schutzklasse I ohne besondere Maßnahmen mit Niederspannung versorgt werden. Allerdings muss sichergestellt werden, dass Verbraucher außerhalb des Tunnels nicht direkt aus diesem Betriebsgebäude gespeist werden. In Bezug auf in das Gebäude eingeführten Kabel und Rohrleitungen gilt das Gleiche wie für Gleichrichter-Unterwerke.

In den oberirdischen Haltestellen wird empfohlen, die elektrische Trennung zur öffentlichen Erde ebenfalls durch ein TT-Netz sicherzustellen. Anstelle eines 1:1-Transformators wird jedoch die Verwendung von so genannten Bahn-FI/LS-Schaltern gemäß VDV-Schrift 509 empfohlen. Die jeweilige Haupterdungsschiene wird mit dem armierten Unterbau verbunden, siehe Abbildung 3. Für die in die Haltestellen eingeführten Fernwirkkabel und Rohrleitungen gilt das Gleiche wie in Gleichrichter-Unterwerken.

1.3.4 Schutzmaßnahmen gegen das Bestehen bleiben unzulässig hoher Spannungen

Als Anlagenerde für die Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag dient die metallene leitende Durchverbindung des Tunnels und des armierten Unterbaus. Da der Ausbreitungswiderstand von Bahnhöfen aus Stahlbeton und des durchverbundenen Unterbaus in der Größenordnung von $< 0,1 \Omega$ liegt, sind separate Tiefenerder nicht erforderlich. Wie in den Abbildungen 1 und 3 dargestellt, werden daher die längslaufenden, parallel zur Bewehrung geschalteten Erdungsseile bzw. der armierte Unterbau auf die jeweilige Haupterdungsschiene (HES) der Haltestelle geführt. An diese Erdungssammelschiene werden sowohl die elektrischen Betriebsmittel der Schutzklasse I als auch alle im Oberleitungs- und Stromabnehmerbereich angeordneten Bauteile aus Metall wie Türen, Geländer, Feuerlöschleitungen und Unterstände angeschlossen. Hiervon ausgenommen sind lediglich Bauteile geringer Abmessung, wenn sie überschaubar sind und über sie keine Spannungsverschleppung erfolgen kann. Bauteile geringer Abmessung sind beispielsweise Geländer mit einer Länge von ≤ 15 m parallel zum Gleis bzw. ≤ 2 m quer zum Gleis. Wird zum Beispiel in einer innenliegenden Wand des Gemeinschaftstunnels eine Tür aus Metall eingebaut, die im Oberleitungsbereich angeordnet ist, so ist die Tür zwar ein Bauteil geringer Abmessung, jedoch muss sie trotzdem geerdet werden, weil eine Person im Straßentunnel die Tür anfassen könnte und nicht sehen kann, dass ein gerissener Fahrdrat die Tür berührt.

Der Oberleitungsbereich wird in EN 50122-1 als ein gleichschenkliges Dreieck definiert, dessen Spitze gleich der Fahrleitungshöhe ist und dessen Schenkel jeweils 4 m seitlich der Gleisachse auf SO enden. Der Stromabnehmerbereich ist der Bereich, der von einem gebrochenen Stromabnehmer berührt werden kann und wird von den Verkehrsbetrieben in Abhängigkeit von den eingesetzten Fahrzeugen festgelegt.

Wie bereits erwähnt, erfolgt in der Haltestelle Güterplatz die Niederspannungsversorgung über einen Eigenbedarfstransformator, dessen Sternpunkt der Unterspannungsseite an HES angeschlossen wird. Die Versorgung der in den Betriebsräumen installierten elektrischen Betriebsmittel der Schutzklasse I erfolgt über fünfadriges Kabel. Die in den Tunnelstrecken oder auf der Haltestelle installierten Steckdosen, an die Geräte der Schutzklasse I angeschlossen werden können und mit denen an den Fahrschienen gearbeitet werden kann, sind über Bahn-FI/LS-Schutzschalter mit RC-Beschaltung gemäß VDV 509 anzuschließen.

Erfolgt die Stromversorgung einer Haltestelle direkt aus dem öffentlichen Netz, d.h. ohne Zwischenschalten eines Transformators, sind Schutzmaßnahmen entsprechend VDV 509 notwendig, siehe Abbildung 3. In diesen Fällen werden Geräte der Schutzklasse I über Bahn-FI/LS-Schutzschalter angeschlossen. Der PEN-Leiter wird nicht zu Schutzzwecken verwendet; er dient lediglich als N-Leiter. Der PE-Leiter wird mit der Bauwerkserde BWE verbunden.

Die im Tunnel und Trog angeordneten metallenen Bauteile wie Signalleitern werden ebenfalls an die metallene leitende Durchverbindung (längslaufende Erdseile) angeschlossen.

Auf Grund der elektrischen Trennung zwischen den Fahrschienen und der metallenen leitenden Durchverbindung treten betriebsmäßig Potentialdifferenzen auf, die bei einem Fehler wie Fahrleitungsriss unzulässig hohe Werte annehmen können. Daher ist in den Haltestellen und an

einzelnen Bahnüberführungen eine Spannungsbegrenzungseinrichtung (VLD: Voltage Limiting Device) einzubauen.

Wie uns mitgeteilt wurde, erhält der Gemeinschaftstunnel im Bereich der Portale eine Wandverkleidung. Sofern die Wandverkleidungen im Oberleitungs- oder Stromabnehmerbereich angeordnet sind, sind sie in die Bewehrungsdurchverbindung einzubeziehen.

1.3.5 Überwachung der elektrischen Isolierung Fahrschienen/Erde

Es wird empfohlen, die elektrische Trennung zwischen den Fahrschienen und der durchverbundenen Bewehrung mit geeigneten Fehlermeldegeräten kontinuierlich zu überwachen. Wird keine kontinuierliche Überwachung der Isolierung Fahrschienen/Erde vorgenommen, muss laut EN 50122-2 eine wiederkehrende Überprüfung erfolgen. Für die wiederkehrende Prüfung wird ein Zeitintervall von 5 Jahren empfohlen. Gemäß VDV 501/1 ist die elektrische Trennung zwischen den Fahrschienen und Tunneln bzw. Stahlbetonfahrwegen sogar einmal jährlich zu kontrollieren, wenn keine kontinuierliche Überwachung erfolgt.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wird empfohlen, in jeder Haltestelle ein Fehlermeldegerät zu installieren, mit dem die Spannung zwischen den Fahrschienen und der Bauwerkserde kontinuierlich überwacht wird. Diese Geräte werden auf einen vom Fahrbetrieb abhängigen unteren Grenzwert eingestellt. Bei einer ungewollten Verbindung zwischen den Fahrschienen und der Bauwerkserde bricht das Schienenpotential zusammen, sodass der untere Grenzwert nicht mehr erreicht wird. Nach einer wählbaren Verzögerungszeit erfolgt eine Alarmierung über einen potentialfreien Meldekontakt, sodass dann eine Fehlerbeseitigung veranlasst werden kann.

1.3.6 Blitzschutzmaßnahmen

Zum Schutz der Fahrleitungsanlage gegen Überspannungen aufgrund von Blitzeinwirkungen wird empfohlen, an den Tunnelein- und -ausfahrten jeweils einen Überspannungsableiter der Funktion A1 gemäß VDV-Schrift 525 zu schalten. Auf Ableiter der Funktion A2 kann verzichtet werden, wenn als Spannungsbegrenzungseinrichtungen zwischen Tunnel und Rückleitung solche VLDs verwendet werden, die gleichzeitig für transiente Überspannungen geeignet sind, z.B. VLDs des Typs HVL 120-03 oder gleichwertig.

Zusätzliche Schutzbeschaltungen sind gemäß VDV 525 an Speisemasten, Stromentnahmestellen und dem Streckenende zweckmäßig.

In den Gleichrichter-Unterwerken wird eine Schutzbeschaltung direkt an den Abgängen der Streckenschalter empfohlen, siehe Abbildung 1. Zwischen der Rückleitersammelschiene und der Bauwerkserde wird ein weiterer Ableiter mit der Funktion A2 geschaltet. Dieser Ableiter ist direkt an die Bewehrung des Tunnels anzuschließen. Daher wird empfohlen, im Doppelboden, direkt unter den Streckenschaltern, einen Erdungsfestpunkt von der Bewehrung herauszuführen.

Auf den Brüstungen der Portale des Gemeinschaftstunnels werden Geländer errichtet. Sofern diese außerhalb des Stromabnehmerbereiches liegen, sind keine Maßnahmen gegen das Bestehen bleiben unzulässig hoher Spannungen erforderlich. Aus Blitzschutzgründen wird jedoch empfohlen, die Geländer über ihre Pfosten oder Ankerplatten direkt mit der senkrecht verlaufenden Bewehrung der Portale zu verschweißen oder über Klemmverbindungen anzuschließen. Die als Ableitung dienenden senkrecht verlaufenden Bewehrungsseisen sollten einen Durchmesser von ≥ 12 mm haben, an ihren Stoßstellen verschweißt oder über Klemmverbindungen durchverbunden und mehrfach mit der übrigen Bewehrung verrödelt sein. Sind die Geländerelemente untereinander ausreichend elektrisch leitend verbunden, reicht es aus, die Geländer alle 20 m an die Bewehrung anzuschließen.

2. Elektromagnetische Felder im Bereich von Stadtbahnen

2.1 Allgemeines

Die VGF betreibt ihr Straßenbahnnetz zukünftig mit einer Nennspannung von 750 V DC. Die Gleichspannung wird in Gleichrichter-Unterwerken durch Heruntertransformieren aus dem Mittelspannungsnetz und anschließender Gleichrichtung erzeugt und über Speise- sowie Rückleiterkabel der Strecke zugeführt. Hierbei wird der Pluspol an die Fahrleitung und der Minuspol an die Fahrschienen angeschlossen.

2.2 Schutz von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern

In Bezug auf die Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV unterliegen nur die Gleichrichter-Unterwerke dieser Verordnung und das auch nur dann, wenn sich in deren Nähe Personen über einen längeren Zeitraum aufhalten können. Die eigentlichen Stadtbahnstrecken unterliegen nicht der 26. BImSchV, da sie mit Gleichstrom betrieben werden.

An den Gleichrichter-Unterwerken treten magnetische Wechselfelder mit einer Grundfrequenz von 50 Hz und deren Oberwellen auf. Hierbei werden die größten magnetischen Flussdichten an den Unterspannungsseiten der Fahrstromtransformatoren und den Gleichrichtern festgestellt. Daher werden die Fahrstromtransformatoren so aufgestellt, dass deren Unterspannungsseiten zur Gebäudeinnenseite gerichtet sind und die Kabelabgänge gebündelt zum Gleichrichter geführt werden. Messtechnische Untersuchungen in verschiedenen Städten zeigen, dass die dann auftretenden Maximalwerte der magnetischen Flussdichte deutlich kleiner sind als der in der 26. BImSchV genannte Wert von 100 μT .

Das elektrische 50-Hz-Feld wird u.a. durch das Unterwerksgebäude selbst abgeschirmt. Typische gemessene Werte liegen unter 1 V/m und sind gegenüber der in der 26. BImSchV genannten elektrischen Feldstärke von 5 000 V/m vernachlässigbar gering.

Durch den Fahrbetrieb entstehen im Bereich der Stadtbahntrassen magnetische Gleichfeldänderungen, die sich dem natürlichen Erdmagnetfeld (ca. 50 μT) überlagern. Typische Werte, gemessen in einem Abstand von 10 m, liegen um 30 μT (Drei-Wagen-Zug) und verringern sich in einem Abstand von 20 m auf 8 μT .

Hinsichtlich der Beurteilung einer möglichen Beeinträchtigung von Personen empfehlen die WHO und der Rat der Europäischen Union einen Basisgrenzwert von 40 mT (= 40 000 μT). Dieser Wert gilt insbesondere für die Bereiche, in denen sich Einzelpersonen für eine erhebliche Zeit aufhalten.

2.3 Beeinflussung von Geräten

Die für das magnetische Gleichfeld genannten Werte gewährleisten jedoch nicht zwangsläufig ein einwandfreies Funktionieren von Elektronenstrahlröhren wie von älteren Fernsehgeräten und PC-Monitoren. Je nach Gerät können Farbverfälschungen und Bildverzerrungen auftreten. Bei stehenden Bildern wie bei CAD-Anwendungen werden Gleichfeldänderungen von $\geq 10 \mu\text{T}$ und bei bewegten Bildern von $> 20 \mu\text{T}$ wahrgenommen. Inwieweit sich die Beeinflussungen störend bemerkbar machen, hängt aber auch von der Einwirkrichtung des magnetischen Feldes und der Störfestigkeit des Fernsehgerätes bzw. Monitores ab. Allgemein gilt, dass Geräte mit einer großen Bildschirmdiagonale empfindlicher sind als Geräte mit einer kleinen Diagonale. Bei OLED-, LCD- und Plasmabildschirmen treten bauartbedingt keine Störungen auf.

Hochempfindliche Messgeräte in Wissenschaft und Industrie sowie medizinische Geräte wie Elektrokronenrastermikroskope, Kernspintomographen und Massenspektrometer können durch

noch kleinere Feldänderungen beeinflusst werden. Allerdings kann in diesen Fällen kein allgemeiner Grenzwert angegeben werden. Hier sind ggf. Einzelfallbetrachtungen notwendig, um bewerten zu können, ob mit Beeinträchtigungen gerechnet werden muss.

In EN 50121-2 werden zusätzlich Grenzwerte für die Störaussendung des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt im Bereich von 9 kHz bis 1 GHz angegeben. Die dort genannten Werte liegen unterhalb der Störfestigkeitsanforderungen von elektrischen Geräten, so dass Beeinträchtigungen durch hochfrequente Felder in der Regel ausgeschlossen werden können.

3. Zusammenfassung

Im Auftrag der VGF wurden für die Stadtbahnstrecke B, TA 3, vom Platz der Republik bis zum Wohnpark Berechnungen hinsichtlich der zu treffenden Maßnahmen zur Verringerung von Streuströmen durchgeführt. Diese ergaben, dass die in EN 50122-2 und VDV 501/1 genannten Mindestanforderungen ausreichen, um die durch den Bahnbetrieb verursachten Streuströme auf ausreichend kleine Werte zu verringern. Die im Einzelnen zu treffenden Maßnahmen werden im vorliegenden Gutachten beschrieben.

Hinsichtlich des Gemeinschaftstunnels ist zu beachten, dass die elektrischen Anlagen in den Straßentunneln keine metallene leitende Verbindung mit der öffentlichen Erde haben dürfen. Sie werden stattdessen mit der Bauwerkserde (Tunnelerde) verbunden.

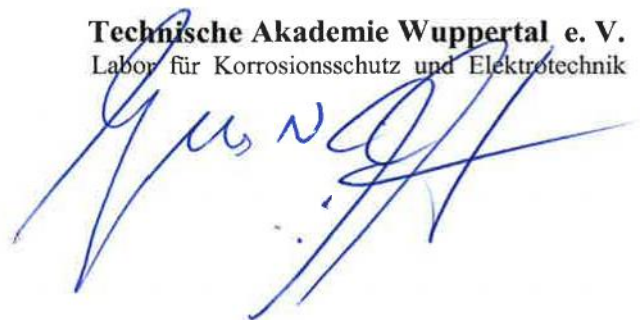
Die eigentlichen Stadtbahnstrecken unterliegen nicht der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV. Lediglich die Gleichrichter-Unterwerke unterliegen dieser Verordnung, vorausgesetzt, dass sich in ihrer Nähe Personen über einen längeren Zeitraum aufhalten.

Im Bereich der Stadtbahnstrecken treten allerdings Gleichfeldänderungen auf, die bei empfindlichen Messgeräten in Wissenschaft und Industrie sowie bei empfindlichen medizinischen Geräten zu Beeinträchtigungen führen können. Eine gesundheitliche Beeinträchtigung von Personen kann nach dem heutigen Kenntnisstand jedoch ausgeschlossen werden.

Berichterstatte



Technische Akademie Wuppertal e. V.
Labor für Korrosionsschutz und Elektrotechnik



4. Normen und Empfehlungen

DIN EN 50121-2 (VDE 0115-121-2): 2007

Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit

- Teil 2: Störaussendungen des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt

DIN EN 50122-1 (VDE 0115-3): 2011

Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung

- Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag

DIN EN 50122-2 (VDE 0115-4): 2011

Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung

- Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen Streustromwirkungen durch Gleichstrombahnen

DIN EN 50162 (VDE 0150): 2005

Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen

VDV-Schrift 501/1: 1993

Verringerung der Korrosionsgefahr durch Streuströme in Tunneln von Gleichstrombahnen mit Stromrückleitung über Fahrschienen

VDV-Schrift 507: 2005

Aufbau und Schutzmaßnahmen von elektrischen Energieanlagen an Strecken von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen

VDV-Schrift 509: 2008

Einsatz von Fehlerstrom(FI)-Schutzschaltungen in elektrischen Energieanlagen von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen

VDV-Schrift 525: 2012

Überspannungsschutz für Fahrstromversorgungsanlagen von Gleichstrombahnen

26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

(Verordnung über elektromagnetische Felder) vom 14.08.2013

Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz), Nr.1999/519/EG

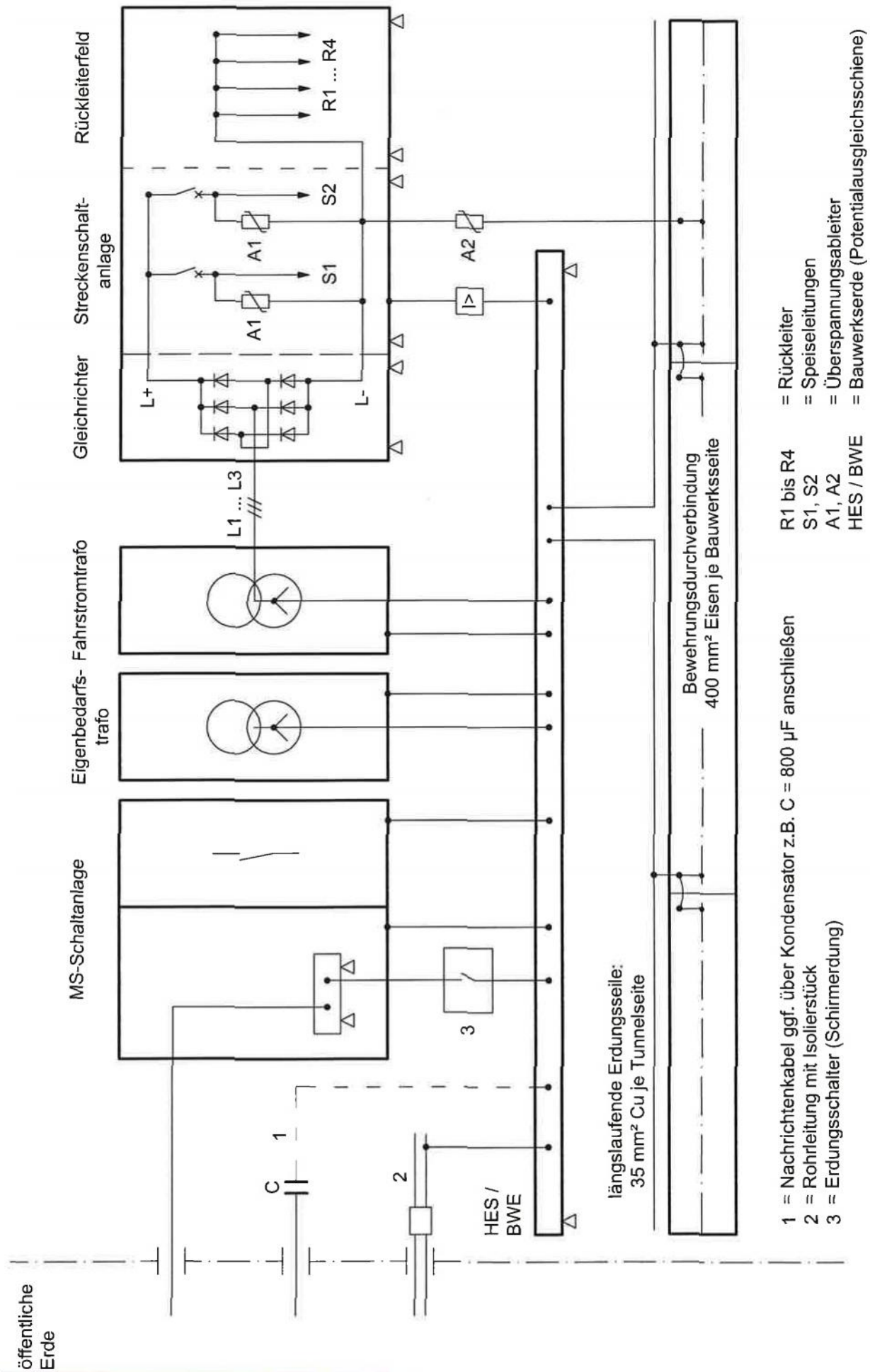


Abbildung 1 - Erdungsschema Gleichrichter-Unterwerke Güterplatz und Europagarten, VGF, Oktober 2012

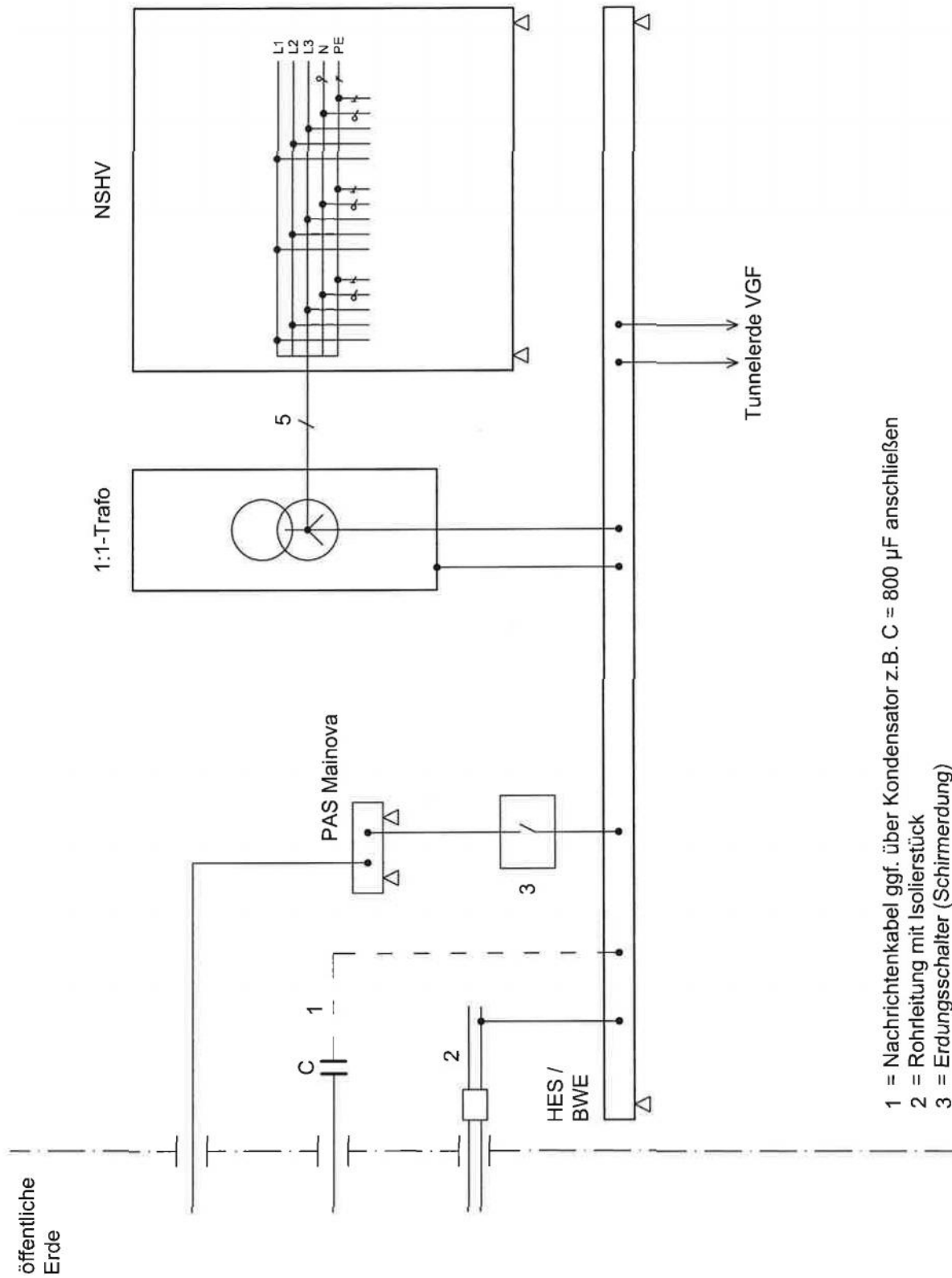


Abbildung 2 - Erdungsschema Betriebsgebäude Straßentunnel, VGF, Oktober 2012

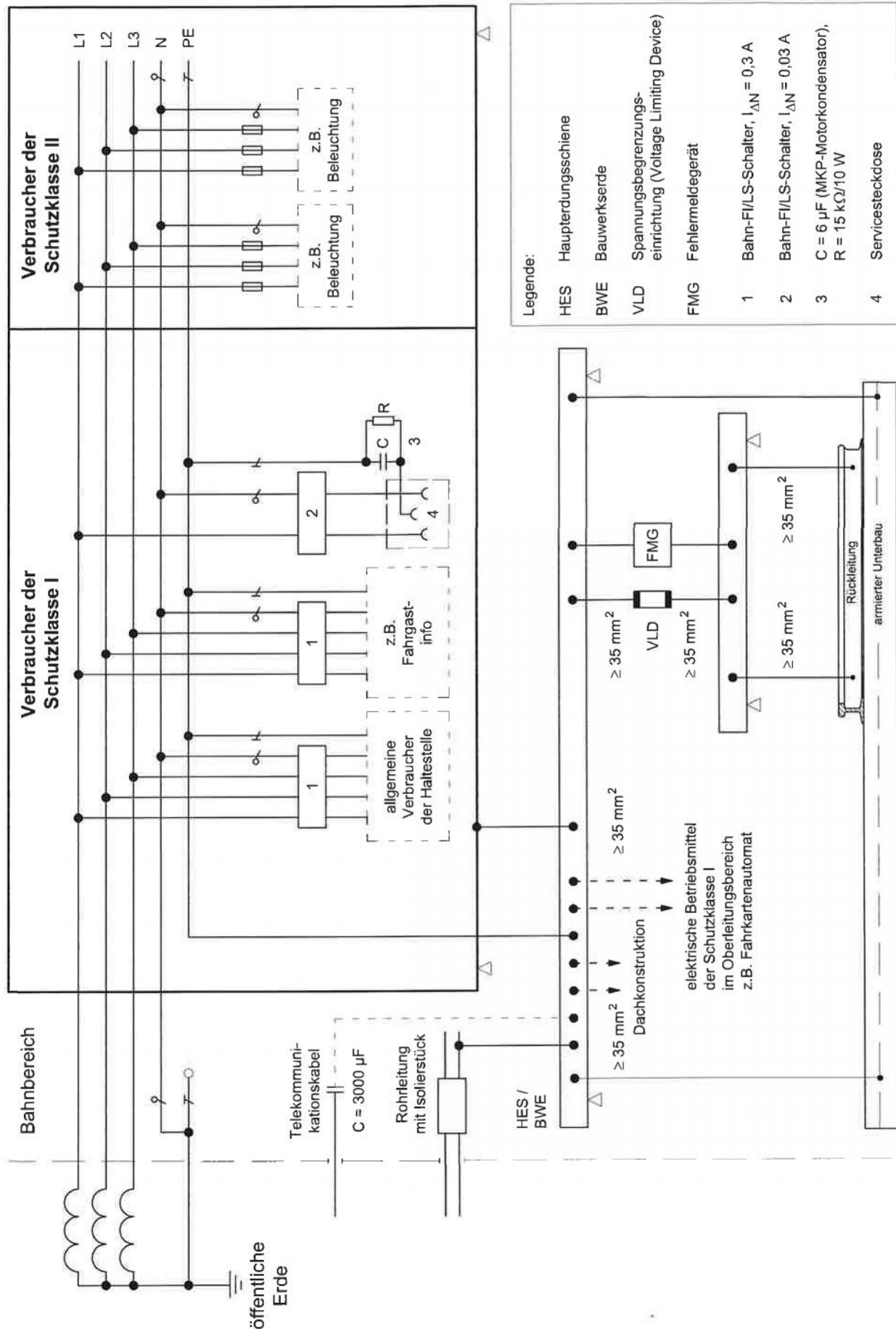


Abbildung 3 - Erdungsschema oberirdische Haltestellen, Europaviertel, VGF, Oktober 2012

Rückleitungsabschnitt	Länge in km	Zugfahrten	Dreifach- traktionen Anzahl/h	Betriebsstrom (Stundenmittelwert) I in A	Strombelag I' in A/km
GW Hauptbahnhof - Mainzer Landstraße	0,380	Hauptbahnhof --> Güterplatz	12	240	632
Mainzer Landstraße - GW Güterplatz	0,380	Güterplatz --> Hauptbahnhof	12	240	632
GW Güterplatz - Emser Brücke	0,750	Güterplatz <--> Emser Brücke	24	480	640
Emser Brücke - GW Europagarten	0,750	Emser Brücke <--> Europagarten Europagarten --> Wohnpark	36	513	684
GW Europagarten - Wohnpark	0,785	Wohnpark --> Europagarten	12	171	218

Tabelle 1 - Ermittlung des Betriebsstroms und des Strombelags in den Fahrschienen, Europaviertel, VGF, Oktober 2012

Kennung	L km	R' _s Ω/km	R' _T Ω/km	G' S/km	I' A/km	I _c A	U _T mV	Bemerkung
U -0,300 - S 0,080	0,380	0,010	0,055	0,20	-632	0	-0,7	eingleisige Tunnel
S 0,080 - K 0,424	0,344	0,010	0,055	0,20	632	0	-1,6	eingleisige Tunnel
K 0,424 - U 0,460	0,036	0,010	0,110	0,20	632	217	-0,5	Hst. Güterplatz
U 0,460 - K 0,597	0,137	0,010	0,110	0,20	-640	-392	-2,0	Hst. Güterplatz
K 0,597 - K 0,836	0,239	0,010	0,055	0,20	-640	-239	-1,9	eingleisige Tunnel
K 0,836 - K 1,017	0,181	0,010	0,110	0,20	-640	-124	-2,7	zweigleisiger Tunnel
K 1,017 - K 1,167	0,150	0,010	0,110	1,00	-640	-28	-1,3	Rampe
K 1,167 - S 1,210	0,043	0,010	0,200	5,00	-640	0	0,4	oberirdisch
S 1,210 - K 1,924	0,714	0,010	0,200	5,00	684	0	129,8	oberirdisch
K 1,924 - U 1,960	0,036	0,010	0,110	1,00	684	488	2,9	Rampe
U 1,960 - K 2,355	0,395	0,010	0,110	0,20	-218	-85	29,6	Gemeinschaftstunnel
K 2,355 - K 2,392	0,037	0,010	0,110	1,00	-218	-77	2,6	Rampe
K 2,392 - K 2,650	0,258	0,010	0,200	5,00	-218	-21	17,7	oberirdisch
K 2,650 - S 2,745	0,095	0,020	0,200	2,50	-218	0	0,8	oberirdisch, eingleisig
K 1,167 - S 2,745							183,8	

Tabelle 2 - Längsspannungen an der metallenen leitenden Durchverbindung der Bewehrung, Europaviertel, VGF, Oktober 2012

Kennung	L km	R' _s Ω/km	R' _T Ω/km	G' S/km	I' A/km	I _c A	Ort	U _{ST} V	I' _s mA/m
U -0,300 - S 0,080	0,380	0,010	0,055	0,20	-632	0	U -0,300	-1,1	
S 0,080 - K 0,424	0,344	0,010	0,055	0,20	632	0	S 0,080	-0,6	
K 0,424 - U 0,460	0,036	0,010	0,110	0,20	632	217	K 0,424	-1,0	
U 0,460 - K 0,597	0,137	0,010	0,110	0,20	-640	-392	U 0,460	-1,1	
K 0,597 - K 0,836	0,239	0,010	0,055	0,20	-640	-239	K 0,597	-0,5	
K 0,836 - K 1,017	0,181	0,010	0,110	0,20	-640	-124	K 0,836	0,3	0,03
K 1,017 - K 1,167	0,150	0,010	0,110	1,00	-640	-28	K 1,017	0,6	0,30
K 1,167 - S 1,210	0,043	0,010	0,200	5,00	-640	0	K 1,167	0,7	1,75
S 1,210 - K 1,924	0,714	0,010	0,200	5,00	684	0	S 1,210	0,7	1,75
K 1,924 - U 1,960	0,036	0,010	0,110	1,00	684	488	K 1,924	-0,9	
U 1,960 - K 2,355	0,395	0,010	0,110	0,20	-218	-85	U 1,960	-1,1	
K 2,355 - K 2,392	0,037	0,010	0,110	1,00	-218	-77	K 2,355	-0,5	
K 2,392 - K 2,650	0,258	0,010	0,200	5,00	-218	-21	K 2,392	-0,5	
K 2,650 - S 2,745	0,095	0,020	0,200	2,50	-218	0	K 2,650	-0,4	
							S 2,745	-0,3	

Tabelle 3 - Auf die Länge bezogener Streustromaustritt, Europaviertel, VGF, Oktober 2012