



# ERLÄUTERUNGSBERICHT

## Streustromgutachten

OPB Projekt Nr.: 20290  
Bearbeiter: Dr.-Ing. Dieter Petrausch  
Datum: 04.09.2015  
Ort: Leipzig

<b>1. GRUNDLAGEN</b>	<b>3</b>
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Technisch Physikalische Grundlagen	3
1.3 Gesetzliche Regelungen, Vorschriften und Empfehlungen	5
<b>2. EINFLUSSFAKTOREN AUF STREUSTRÖME UND DEREN AUSBREITUNG</b>	<b>6</b>
2.1 Bahnenergieversorgungsanlagen	6
2.2 Oberbau	6
2.3 Bauwerke	7
2.3.1 Allgemeines	7
2.3.2 Durchverbindung der Bewehrung	8
2.3.3 Abschnittsweise Isolation	8
2.3.4 Sonstige Anlagen	8
<b>3. BESCHREIBUNG DER BAUABSCHNITTE</b>	<b>9</b>
3.1 Bahnstromversorgung	9
3.2 Niveaustrecke Haltestelle Freiligrathplatz und Ausfädelung Linie U79	9
3.3 Rampenbauwerk Brücke Nordstern km 0+120 – km 0+240,6	9
3.4 Brückenbauwerk Nordstern km 0+240,6 bis km 0+716,6	10
3.5 Strecke in Dammlage (Fangedamm) km 0+717 bis km 0+899	10
3.6 Brückenbauwerk Tor 1 km 0+899 bis 1+027	11
3.7 Niveaustrecke km 1+027 bis km 1+322	11
3.8 Rampe und Tunnelbauwerk km 1+322 bis km 1+709	11
3.9 Terminal km 1+709 bis km 1+891	12
<b>4. RECHNERISCHE ABSCHÄTZUNG DER STREUSTROMBELASTUNG</b>	<b>13</b>
4.1 Rechengang	13
4.2 Rampenbauwerk Brücke Nordstern km 0+120 – km 0+240,6	13
4.3 Trogbauwerk Fangedamm km 0+717 bis km 0+899	14
4.4 Brückenbauwerk Tor 1 km 0+899 bis 1+027	14
4.5 Rampe und Tunnel km 1+322 bis km 1+709	14
4.6 Terminal km 1+709 bis km 1+891	15
4.7 Rampe Tunnel bis Terminal km 1+322 bis km 1+891	15
<b>5. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>16</b>







## 2. EINFLUSSFAKTOREN AUF STREUSTRÖME UND DEREN AUSBREITUNG

### 2.1 BAHNENERGIEVERSORGUNGSANLAGEN

Treibende Ursache für die Streustrombelastung sind die Schienenströme (Rückleitung). Da die Streustromkorrosion einen Langzeitprozess darstellt, sind dabei nicht die für die Bahnbelastung typischen kurzen Spitzenwerte des Belastungsstromes entscheidend, sondern der zeitliche Mittelwert. Er ergibt sich aus dem Betriebsprogramm (Fahrplan und Energieaufnahme der Fahrzeuge). Typische Tagesmittelwerte für Unterwerksströme liegen bei 250 ... 500 A.

Maßgeblich für die konkreten Korrosionsprozesse ist zunächst die Konfiguration des Bahnenergieversorgungsnetzes. Hierbei spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- Abstände der Gleichrichter-Unterwerke
- Schaltung/Speisung des Netzes
- Anzahl und Lage der Rückleiteranschlüsse
- Stromstärke der Schienenströme
- Isolationsverhältnisse

Die Rheinbahn betreibt ihre Bahnen mit Oberleitung. Deshalb ist für ganz oder teilweise elektrisch leitfähige Bauteile im Oberleitungsbereich die Schutzmaßnahme „Verbindung mit der Rückleitung“ anzuwenden. Diese ist insbesondere im Hinblick auf die Belange des Schutzes gegen Streustromkorrosion auszuführen.

Durch die hochohmige Gleisisolation können abhängig von der Betriebsbelastung auf Grund hoher Schienenströme erhebliche Potenzialunterschiede zwischen Bauwerkserde und Rückleitung auftreten. Um zu verhindern, dass unzulässig hohe Berührungsspannungen entstehen bzw. bestehen bleiben können, sind die Anlagen der Bahnstromversorgung entsprechend zu dimensionieren. Die Spannung zwischen Schienenrückleitung (z. B. Wagenkästen) und Tunnelerde wird überwacht und bei einer Überschreitung der zulässigen Werte werden die Streckenschalter geöffnet.

### 2.2 OBERBAU

Die Gleisanlage als Teil des Oberbaues stellt das Bindeglied zwischen elektrischen und mechanischen Anforderungen dar. Sie ist Teil der Bahnenergieversorgungsanlage, da sie den Rückstrom führt. Deshalb müssen in elektrischer Hinsicht bestimmte Bedingungen beachtet werden.

Gemäß EN 50122-2 sind zur Verringerung der Ableitung von Streuströmen die Gleise bestmöglich zu isolieren. Moderne Oberbauformen sowohl als offener als auch geschlossener Oberbau bieten geringe Gleis – Erde - Ableitungen (= hohe Widerstände). Für die Ableitung bei neuem Oberbau werden Werte zwischen 0,1 ... 2 S/km erreicht.

Um einen dauerhaften Schutz gegen Streuströme zu erhalten, müssen diese Werte auch unter langjährigen Betriebsbedingungen eingehalten werden. Dazu sind regelmäßige Inspektionen des Oberbaues sowie Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich. Die Wirksamkeit der Gleisisolation wird durch wiederkehrende Messungen des Ableitbelages kontrolliert.



### 2.3.2 DURCHVERBINDUNG DER BEWEHRUNG

Mit Korrosionsgefahr aus Streuströmen ist gemäß EN 50122-2 2011:09 nicht zu rechnen, wenn der Längsspannungsfall zwischen zwei beliebigen Punkten des Tunnels  $\leq 200$  mV beträgt. Die Tunnelbewehrung ist also entsprechend niederohmig zu gestalten. Dazu wird die Bewehrung des Tunnels längs durchverbunden. Der Mindestquerschnitt der durchverbundenen Bewehrung soll  $400 \text{ mm}^2$  Eisenäquivalent je Tunnelseite (gesamt  $400 \text{ mm}^2$  bei eingleisigen Tunneln,  $800 \text{ mm}^2$  bei zweigleisigen Tunneln) betragen. Darüber hinaus sind Erdungsleitungen von mindestens  $35 \text{ mm}^2$  Cu oder äquivalent zu verlegen (VDV 501/1). Bei hohen Strombelastungen, großen Speiseabschnittslängen oder anderen ungünstigen Faktoren kann es jedoch erforderlich werden, diese Querschnitte zu vergrößern.

### 2.3.3 ABSCHNITTSGEWEISE ISOLATION

Streustromaustausch kann auch verhindert werden, wenn der Stromfluss in leitfähigen Bauteilen unterbunden und damit der gesamte Streustrompfad sehr hochohmig gegenüber der Rückleitung wird. Diese Möglichkeit besteht bei Tübbingtunneln mit Betontübbingen. Diese werden in der Regel mit Kunststoff-Dichtelelementen montiert. Die Dichtelemente verhindern die Ausbildung tragfähiger galvanischer Verbindungen zwischen den einzelnen Tübbingen. Voraussetzung ist, dass Bauteile, die der Fixierung der Tübbinge während der Montage dienen, im Betriebszustand entfernt werden können.

Bei Stahl-tübbingen können auch bei Einsatz von Dichtelementen galvanische Verbindungen der Bauteile untereinander nicht ausgeschlossen werden. Hier sind zusätzliche Maßnahmen zur Herstellung der Niederohmigkeit des Bauwerkes zu treffen.

Diese Bauweisen kommen hier nicht zum Einsatz und werden daher nur zur Vollständigkeit erwähnt.

### 2.3.4 SONSTIGE ANLAGEN

Unabhängig von den beschriebenen Maßnahmen ist darauf zu achten, dass das Potential der Bauwerkserde nicht außerhalb des Bauwerksbereiches verschleppt wird. Rohrleitungen und andere metallische Einrichtungen, die mit der Tunnelerde gezielt oder zufällig verbunden sind, sind daher an der Austrittsstelle aus dem Bauwerk mit Isolierstücken zu versehen. Es ist darauf zu achten, dass es keine durchbindenden Bauteile zu benachbarten Gebäuden gibt, die eine Verschleppung des Bahnpotenzials ermöglichen würden. Aufzüge, Fahrtreppen, Notausstiege o.ä., die zu den Anlagen der U-Bahn gehören, werden daher elektrisch von benachbarten Gebäuden getrennt. Metallene Schirme von Kabeln werden isoliert aufgelegt.

Fundamenterder, die für die Gewährleistung der elektrischen Schutzmaßnahmen erforderlich sind, stellen eine direkte Verbindung der Bauwerkserde mit der Wassererde her. Dies führt ggf. dazu, dass Streuströme aus dem Bauwerk aus- und an anderer Stelle wieder eintreten. Dabei liegt der Strompfad BWE - Fundamenterder – Erdreich – Fundamenterder – BWE im Nebenschluss zur reinen durchverbundenen Bewehrung. Je niederohmiger die durchverbundene Bewehrung ist, umso geringer werden die Streustromanteile, die aus dem Bauwerk austreten können. Die nachfolgenden Rechnungen zeigen jedoch, dass im vorliegenden Fall nur eine sehr niedrige Streustrombelastung auftreten wird. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Fundamenterder keine negativen Wirkungen auf das Streustromverhalten der Anlage haben.



### 3. BESCHREIBUNG DER BAUABSCHNITTE

#### 3.1 BAHNSTROMVERSORGUNG

Die Bahnstromversorgung des Neubauabschnittes wird über zwei Gleichrichter-Unterwerke realisiert. Das vorhandene Unterwerk Freiligrathplatz (FGP) speist über Kabelstrecken an der Haltestelle Freiligrathplatz in die Fahrleitung der Neubautrecke. Parallel erfolgt der Anschluss der Rückleitung. Der Kabelweg vom Gleisanschluss zum Unterwerk beträgt ca. 400 m.

Die zweite Einspeisung erfolgt aus dem gleichnamigen Unterwerk Flughafenstraße (FHS). Das Unterwerk befindet sich unterhalb des Brückenbauwerkes. Damit ergeben sich sehr kurze Kabellängen sowohl für die Einspeisung als auch für die Rückleitung.

Zwischen Freiligrathplatz und Flughafenstraße wird im Regelbetrieb zweiseitig gespeist, ab dem Unterwerk FHS bis zum derzeitigen Endpunkt der Strecke einseitig.

#### 3.2 NIVEAUSTRECKE HALTESTELLE FREILIGRATHPLATZ UND AUSFÄDELUNG LINIE U79

Die Strecke wird als Schotteroberbau ausgeführt. Es kommt die Oberbauform W für Betonschwellen zum Einsatz. Diese Oberbauform erfüllt bei ordnungsgemäßer Ausführung die Anforderungen der EN 50122-2 hinsichtlich des Ableitungsbelages. Damit ergeben sich keine zusätzlichen Anforderungen hinsichtlich der Streustromminimierung.

Die Bahnsteige der Haltestelle sind bereits vorhanden und bestehen aus Betonfertigteilen mit einer Länge von 2,5 m. Für den künftigen Betrieb mit 3-Wagenzügen werden beide Bahnsteige auf eine Länge von 90 m verlängert. Die Bewehrungen der Fertigteile sind durchverbunden, um den Potenzialausgleich herzustellen und Blitzschutzmaßnahmen treffen zu können.

Parallel zur Strecke der U79 wird eine begrünte Lärmschutzwand errichtet. Diese besteht aus Stützen in Einzelfundamenten mit dazwischen montierten Fertigteilen, die teilweise metallisch sind. Eine galvanische Durchverbindung ist jedoch nicht vorhanden. In streustromtechnischer Hinsicht ergeben sich keine weiteren Anforderungen.

#### 3.3 RAMPENBAUWERK BRÜCKE NORDSTERN KM 0+120 – KM 0+240,6

Das Rampenbauwerk beginnt als Winkelstützwand und geht dann in ein Trogbauwerk über. Das Trogbauwerk weist eine Länge von 98 m auf. Es wird in Blöcken zu 14 m gebaut. Die Gleise liegen im Trogbauwerk auf einem Schotteroberbau der Oberbauform W und weisen damit konstruktionsbedingt eine gute Isolation auf.



### 3.6 BRÜCKENBAUWERK TOR 1 KM 0+899 BIS 1+027

Das Brückenbauwerk quert Leitungen der Düsseldorfer Stadtentwässerung und eine Straße. Es wird als in Längsrichtung vorgespannte Stahlbetonkonstruktion ausgeführt.

In der oberen Bewehrungslage werden insgesamt vier Erdungseisen  $\varnothing 16$  mm eingelegt und längs verschweißt. Am Beginn des Bauwerkes (Übergang zum Damm) sowie am Ende sind Querverbindungen aus Rundstahl  $\varnothing 16$  mm in die oberste Bewehrungslage zu verlegen und mit den längs laufenden Erdungseisen zu verschweißen. Im Bereich der Querverbindungen sind Erdungsbuchsen herauszuführen, um die Durchverbindung der Bewehrung zum Trogbauwerk auf dem Damm herstellen zu können.

Die übrigen Teile der schlaffen Bewehrung werden untereinander und mit den Erdungseisen verrödelt. **Alle Teile der Spannkonstruktion sind von den Erdungsmaßnahmen ausgenommen, da sie nicht mit Strömen beaufschlagt werden sollen, auch nicht kurzzeitig.**

Im Widerlager der Brücke befindet sich das Unterwerksgebäude GUW FHS. Die Kabelverlegung vom UW-Gebäude zur Strecke verläuft in einem Kabelschacht, der im Bereich der Gleisanlage endet. Schacht und Schachtdeckel befinden sich im Oberleitungsbereich. Nach EN 50122-1 können Schachtdeckelungen als Objekte mit kleinem Ausmaß angesehen werden und sind daher nicht zwingend in die Schutzmaßnahme einzubeziehen. Da durch den Kabelschacht die Spannung jedoch bis in das Unterwerk verschleppt werden kann, wird empfohlen, die Bewehrung des Kabelschachtes galvanisch mit der Erdungsanlage des Unterwerkes zu verbinden und zum Gleis die Schutzmaßnahme „Offene Verbindung mit der Rückleitung“ herzustellen.

Die Gleisanlage wird als Schotteroberbau ausgeführt. Es kommt die Oberbauform W für Betonschwellen zum Einsatz. Diese Oberbauform erfüllt bei ordnungsgemäßer Ausführung die Anforderungen der EN 50122-2 hinsichtlich des Ableitungsbelages.

### 3.7 NIVEAUSTRECKE KM 1+027 BIS KM 1+322

Der Streckenabschnitt auf Geländeneiveau weist keine Besonderheiten auf. Die Gleisanlage wird als Schotteroberbau ausgeführt. Es kommt die Oberbauform W für Betonschwellen zum Einsatz. Diese Oberbauform erfüllt bei ordnungsgemäßer Ausführung die Anforderungen der EN 50122-2 hinsichtlich des Ableitungsbelages. Damit ergeben sich keine zusätzlichen Anforderungen hinsichtlich der Streustromminimierung.

### 3.8 RAMPE UND TUNNELBAUWERK KM 1+322 BIS KM 1+709

Die Rampe wird als Trogbauwerk ausgeführt und ist 177 m lang. Danach schließt der Streckentunnel mit einer Länge von 210 m an. Der Tunnel weist einen Rechteckquerschnitt auf.

Beide Bauwerke werden in offener Bauweise gebaut und werden blockweise errichtet. Jeder Block ist 10 m lang.

In der oberen Bewehrungslage werden insgesamt vier Erdungseisen  $\varnothing 16$  mm eingelegt und längs verschweißt. Die Verlegung erfolgt mit je einem Eisen im Randbalken und einem Eisen unter dem jeweiligen Gleis. Jeweils an den Enden jedes Blockes werden Ringverbinder aus Rundstahl  $\varnothing 16$  mm angeordnet, die mit den Längseisen verschweißt werden. An den Stellen der Ringverbinder sind jeweils Anschlussbuchsen herauszuführen, um die Blöcke untereinander zu verbinden.

Die Gleisanlage wird als Schotteroberbau ausgeführt. Es kommt die Oberbauform W für Betonschwellen zum Einsatz. Diese Oberbauform erfüllt bei ordnungsgemäßer Ausführung die Anforderungen der EN 50122-2 hinsichtlich des Ableitungsbelages. Aus Schallschutzgründen wird das Schotterbett auf einer Unterschottermatte verlegt. Diese vermindert neben der Schallisolation auch das Übertreten von Streuströmen aus dem Gleis in das Bauwerk und verbessert damit das Streustromverhalten des Oberbaues noch weiter.

### **3.9 TERMINAL KM 1+709 BIS KM 1+891**

Das Terminal entsteht in Fortführung des Streckentunnels als Rechtecktunnel in offener Bauweise nach den gleichen baulichen Grundsätzen wie der Streckentunnel. Der Bau erfolgt in 10 m-Blöcken. Der Bahnsteig entsteht in Mittellage.

Die Gleisanlage im Terminal wird als Schotteroberbau ausgeführt. Es kommt die Oberbauform W für Betonschwellen zum Einsatz. Diese Oberbauform erfüllt bei ordnungsgemäßer Ausführung die Anforderungen der EN 50122-2 hinsichtlich des Ableitungsbelages.

Zum Schallschutz wird das Gleis auf einer elastisch gelagerten Sahlbetonplatte verlegt (Masse-Feder-System). In der oberen Bewehrungslage der Gleistragplatte werden insgesamt vier Erdungseisen  $\varnothing 16$  mm eingelegt und längs verschweißt. Am Beginn sowie am Ende sind Querverbindungen aus Rundstahl  $\varnothing 16$  mm in die oberste Bewehrungslage zu verlegen und mit den längs laufenden Erdungseisen zu verschweißen. Im Bereich der Querverbindungen sind Erdungsbuchsen herauszuführen, um die Durchverbindung der Bewehrung zum Trogbauwerk auf dem Damm herstellen zu können. Wenn die Gleistragplatte in Abschnitte unterteilt wird, sind an den Abschnittsenden jeweils beidseitig Querverbindungen mit herausgeführten Anschlussbuchsen vorzusehen.

Zusätzlich werden im eigentlichen Tunnelprofil für jedes Gleis je ein längs laufendes Erdungseisen  $\varnothing 16$  mm im Bereich des Randbalkens/Kabelkanals verlegt und durchgängig verschweißt. Jeweils an den Enden jedes Blockes werden Ringverbinder aus Rundstahl  $\varnothing 16$  mm angeordnet, die mit den Längseisen verschweißt werden. An den Stellen der Ringverbinder sind jeweils Anschlussbuchsen herauszuführen, um die Blöcke untereinander zu verbinden. Mindestens am Anfang und am Ende der Gleistragplatte sind die durchverbundenen Bewehrungen der Gleistragplatte (MFS) und der Tunnelkonstruktion ausrüstungseitig durch Erdungsverbinder zu verbinden.

## 4. RECHNERISCHE ABSCHÄTZUNG DER STREUSTROMBELASTUNG

### 4.1 RECHENGANG

Gemäß EN 50122-2 2011:09, Anhang C.2 kann eine rechnerische Abschätzung der Einhaltung des 200 mV-Kriteriums vorgenommen werden. Dazu dient die folgende überschlägliche Formel:

$$U_T = 0,5 * I * L * (R'_R * R'_T) / (R'_R + R'_T) * \{1 - L_C / L * (1 - e^{-L/L_C})\}$$

$$L_C = 1 / \sqrt{((R_R + R_T) * G_{RT})}$$

Dabei sind

- $U_T$  Längsspannung im (Tunnel-) Bauwerk in Volt
- $G_{RT}$  Ableitungsbelag Rückleitung – Bauwerkserde in Siemens / Kilometer
- $I$  Durchschnittswert des Bahnrückstromes im betrachteten Abschnittes in Ampere
- $L$  Länge des betrachteten Streckenabschnittes in Kilometern
- $L_C$  Charakteristische Länge des Systems Fahrschiene / Bauwerk in Kilometer
- $R'_R$  Widerstandsbelag der Fahrschienen in Ohm/Kilometer
- $R'_T$  Widerstandsbelag des Tunnelbauwerkes in Ohm/Kilometer

Eine Berechnung ist nur für die Bauwerksabschnitte mit durchverbundener Bewehrung sinnvoll. Das angewandte Verfahren ist sehr grob, ergibt jedoch Werte, die sehr stark auf der sicheren Seite liegen. Ergeben sich aus der Berechnung Werte, die deutlich höher als die geforderten 200 mV sind, soll ein genaueres Berechnungsverfahren herangezogen werden.

### 4.2 RAMPENBAUWERK BRÜCKE NORDSTERN KM 0+120 – KM 0+240,6

Der zu betrachtende Bereich mit durchverbundener Bewehrung ist etwa 120 m lang. In diesem Abschnitt kann der Längsspannungsfall gemäß obiger Formel überschläglich berechnet werden. Die Trasse wird hier als durchgängig zweigleisig betrachtet. Damit ergeben sich folgende Eingabewerte:

$$I = 400 \text{ A} \quad G_{RT} = 0,2 \text{ S/km} \quad L = 0,120 \text{ m}$$

$$R'_R = 0,008 \text{ } \Omega/\text{km} \quad R'_T = 0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Die überschlägliche Rechnung ergibt einen Längsspannungsfall von 1,6 mV. Dies liegt deutlich unterhalb der geforderten 200 mV, deshalb kann davon ausgegangen werden, dass hinsichtlich der Streuströme keine Beeinflussung zu erwarten ist.



#### **4.6 TERMINAL KM 1+709 BIS KM 1+891**

Der zu betrachtende Bereich mit durchverbundener Bewehrung ist etwa 182 m lang. In diesem Abschnitt kann der Längsspannungsfall gemäß obiger Formel überschläglich berechnet werden.

Die Trasse wird hier als eingleisig betrachtet, da sie durch die Gleistragplatte des Masse-Feder-Systems getrennt sind. Damit ergeben sich folgende Eingabewerte:

$$I = 400 \text{ A} \quad G_{RT} = 0,2 \text{ S/km} \quad L = 0,120 \text{ m}$$

$$R'_R = 0,016 \text{ } \Omega/\text{km} \quad R'_T = 0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Die überschlägliche Rechnung ergibt einen Längsspannungsfall von 7,3 mV. Dies liegt deutlich unterhalb der geforderten 200 mV, deshalb kann davon ausgegangen werden, dass hinsichtlich der Streuströme keine Beeinflussung zu erwarten ist.

#### **4.7 RAMPE TUNNEL BIS TERMINAL KM 1+322 BIS KM 1+891**

Zur Kontrolle wird der gesamte Abschnitt der durchverbundenen Bewehrung vom Beginn der Tunnelrampe bis zum Ende des Terminals berechnet. Der zu betrachtende Bereich mit durchverbundener Bewehrung ist etwa 569 m lang. In diesem Abschnitt kann der Längsspannungsfall gemäß obiger Formel überschläglich berechnet werden.

Die Trasse wird als zweigleisig betrachtet. Damit ergeben sich folgende Eingabewerte:

$$I = 400 \text{ A} \quad G_{RT} = 0,2 \text{ S/km} \quad L = 0,120 \text{ m}$$

$$R'_R = 0,016 \text{ } \Omega/\text{km} \quad R'_T = 0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Die überschlägliche Rechnung ergibt einen Längsspannungsfall von 36,0 mV. Dies liegt deutlich unterhalb der geforderten 200 mV, deshalb kann davon ausgegangen werden, dass hinsichtlich der Streuströme keine Beeinflussung zu erwarten ist.

