

Hamburg,

U5 Ost City Nord – Bramfeld -

EMV - und Streustrom-Gutachten

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Elektromagnetische Felder im Bereich der geplanten U-Bahn-Strecke	4
1.1 Allgemeines	4
1.2 Schutz von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern	4
1.3 Beeinflussung von Geräten	5
2. Verringerung von Streuströmen	6
2.1 Allgemeines	6
2.2 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen	7
2.3 Zu treffende Maßnahmen	7
2.3.1 Gleisoberbau	7
2.3.2 Metallen leitende Durchverbindung von Stahlbetonbauwerken	8
2.3.3 Elektrische Trennung zwischen Tunnel und Erde bzw. anderen Bauwerken	9
2.3.4 Schutzmaßnahmen gegen das Bestehen bleiben unzulässig hoher Spannungen	10
2.3.5 Überwachung der elektrischen Isolierung Fahrschienen/Erde	10
3. Zusammenfassung	11
4. Normen und Empfehlungen	12

Anlage: 2 Abbildungen
3 Diagramme
3 Tabellen

Wuppertal, 29.11.2018
IfB 049-16#1

Hamburg, U5 Ost City Nord – Bramfeld - EMV- und Streustrom-Gutachten

Von der ZPP Ingenieure AG wurde das Institut für Beeinflussungsfragen, IfB Ulrich Bette beauftragt, die durch den U-Bahn-Betrieb verursachten elektromagnetischen Felder zu bewerten und die zu treffenden Maßnahmen zur Verringerung von Streuströmen unter Berücksichtigung der Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag in einem Gutachten zu beschreiben (Auftrag vom 30.01.2018).

Die Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) plant den Bau der Linie U5 Ost von der Haltestelle City Nord bis zum Notausstieg Heukoppel in Bramfeld.

Die neue Strecke wird durch vier Unterwerke mit Fahrstrom versorgt. Sofern sich in der Nähe der Unterwerke Personen über einen längeren Zeitraum aufhalten können, unterliegen die Unterwerke der 26. BImSchV. Hiervon betroffen sind die beiden Unterwerke Nordheimstraße und Bramfeld. Diese Unterwerke befinden sich zwar in der Fahrebene, jedoch sind in der darüber liegenden Schalterhalle Verkaufsstätten oder Aufenthaltsräume geplant. In dem vorliegenden Gutachten wird daher auf die durch die Unterwerke der U-Bahn verursachten magnetischen und elektrischen Felder eingegangen. Die eigentlichen U-Bahn-Strecken werden mit einer Gleichspannung von 750 V betrieben, sodass sie nicht der 26. BImSchV unterliegen. Jedoch werden durch den Fahrbetrieb magnetische Gleichfeldänderungen verursacht, die besonders empfindliche Geräte beeinträchtigen können.

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 Stahlbetonfahrbahnen metallisch leitend durchverbunden sein und sie darf keine galvanische Verbindung mit der Rückleitung und der Bewehrung anderer Bauwerke haben. Aufgrund dessen sind besondere Erdungsmaßnahmen notwendig.

Für die Erstellung des Gutachtens wurden folgende Unterlagen verwendet:

Dokument-Nr.: 1 R (-) 225/0202, Abstimmungsunterlage U5 Ost City Nord – Bramfeld, Übersichtslageplan, Stand: 18.01.2018

Dokument-Nr.: 1 R (-) 225/0213, Abstimmungsunterlage U5 Ost City Nord – Bramfeld, Schildvortrieb Querschnitt 2 - 2, Bereich Zwanckweg 7 – 10, Stand: 01.11.2017

Dokument-Nr.: 1 R (-) 225/xxxx, Entwurfsplanung U5 Ost City Nord – Bramfeld, Kartierungsflächen Nordheimstraße, Vorabzug: 29.06.2018

Plan-Nr.: 3EGF 003463 Z 6312, Stromschienenstützpunkt mit Höhenverstellung, Hochbahn, Stand: 05.03.03

1. Elektromagnetische Felder im Bereich der geplanten U-Bahn-Strecke

1.1 Allgemeines

Die HOCHBAHN betreibt ihr U-Bahn-Netz 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 Stromschiene und der Minuspol an die Fahrschienen angeschlossen.

1.2 Schutz von Personen gegenüber elektromagnetischen Feldern

In Bezug auf die Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV unterliegen nur die Gleichrichter-Unterwerke dieser Verordnung, da es sich hierbei um Umspannanlagen mit einer Oberspannung von 1000 V oder mehr und einer Frequenz von 50 Hz handelt. Voraussetzung ist allerdings, dass sich in der Nähe dieser Anlagen Personen über einen längeren Zeitraum aufhalten können.

An diesen Orten wie den Verkaufsstätten und den Aufenthaltsräumen oberhalb der Unterwerke Nordheimstraße und Bramfeld darf der maximale Effektivwert der magnetischen 50-Hz-Flussdichte nicht größer sein als 100 μT . Hiervon ausgenommen sind kurzzeitige Überschreitungen bis zu 200 μT mit einer Dauer von insgesamt 72 Minuten je Tag. Hinsichtlich des elektrischen Feldes darf der maximale Effektivwert bei einer Frequenz von 50 Hz nicht größer sein als 5000 V/m.

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 wird empfohlen, die Kabelabgänge von den Unterspannungsseiten der Fahrstromtransformatoren gebündelt zum Gleichrichter zu führen. Hierbei sollten die Kabel nicht direkt unter der Decke der Traforäume, sondern vom Trafo zur nächstgelegenen Wand und dort gebündelt hinunter in den Kabelkeller geführt werden. Durch diese Maßnahme ergibt sich aufgrund der Höhe der Traforäume und der Dicke der Zwischendecke ein ausreichend großer Abstand zu den oben genannten Immissionsorten. Messtechnische Untersuchungen im Rahmen des vom Bundesminister für Verkehr beauftragten Forschungsvorhabens FE-Nr.: 70506/96 ergaben in diesen Fällen Maximalwerte der magnetischen Flussdichte von $< 20 \mu\text{T}$, die somit um den Faktor 5 kleiner sind als der zulässige 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 5000 V/m vernachlässigbar gering.

Die eigentlichen U-Bahn-Strecken unterliegen nicht der 26. BImSchV, da sie mit einer Gleichspannung von 750 V betrieben werden. In der Verordnung werden nur Aussagen für Gleichstromanlagen mit einer Spannung von 2000 V oder mehr getroffen; der zulässige Wert beträgt 500 μT . Für Anlagen mit einer niedrigeren Spannung empfiehlt der Rat der europäischen Union einen Basisgrenzwert von 40 mT. Dieser Wert gilt insbesondere für die relevanten Bereiche, in denen sich Einzelpersonen für eine erhebliche Zeit aufhalten, aber nicht für den Schutz von Arbeitnehmern am Arbeitsplatz. Unabhängig hiervon empfiehlt jedoch die Strahlenschutzkommission zur Vermeidung von Störbeeinflussungen von elektronischen Implantaten (z.B. Herzschrittmacher oder Defibrillatoren) ortsfeste Gleichstrom-Energieversorgungsanlagen so zu planen, zu errichten und zu betreiben, dass die auftretenden magnetischen Felder in nicht gekennzeichneten Bereichen, die Implantatträgern zugänglich sind, auch bei höchster betrieblicher Auslastung 500 μT nicht überschreiten.

Durch den Fahrbetrieb entstehen im Bereich der U-Bahn-Strecken magnetische Gleichfeldänderungen, die sich dem natürlichen Erdmagnetfeld (ca. 50 μT) überlagern. Typische Werte, gemessen in einem Abstand von 10 m, siehe DIN EN 50121-2, liegen um 46 μT und verringern sich in einem Abstand von 20 m auf 13 μT .

Somit muss mit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung von Personen durch niederfrequente Felder nicht gerechnet werden.

1.3 Beeinflussung von Geräten

Hochempfindliche Messgeräte in Wissenschaft und Industrie sowie medizinische Geräte wie Elektronenrastermikroskope, Kernspintomographen und Massenspektrometer können durch noch kleinere Feldänderungen beeinflusst werden. Allerdings kann in diesen Fällen kein allgemeiner Grenzwert angegeben werden. Zum Beispiel haben viele 1,5- bzw. 3-Tesla-Kernspintomographen in der klinischen Diagnostik eine Störfestigkeit von 430 nT. Andere hochauflösende Geräte haben dagegen nur eine Störfestigkeit von 50 nT. Somit sind Einzelfallbetrachtungen notwendig, um bewerten zu können, ob mit Beeinträchtigungen gerechnet werden muss.

Je nach Auflösung bzw. Störfestigkeit der Geräte können erfahrungsgemäß Beeinträchtigungen bis zu Abständen von 150 m von der Bahntrasse auftreten. Aus diesem Grund wurde von der ZPP Ingenieure AG überprüft, ob sich in einem Korridor von ± 150 m beiderseits der neuen U-Bahn-Trasse Betreiber von hochempfindlichen Geräten befinden. Diese Recherchen ergaben, dass sowohl die Asklepios Klinik Barmbek als auch die Praxis und Dialyse Hamburg Barmbek zu betrachten sind. Die Lage der entsprechenden Gebäude sind in der Abbildung 1 dargestellt.

Zuerst wurde untersucht, welche Anordnung der Stromschienen in Bezug auf mögliche Beeinträchtigungen günstiger ist. Von der HOCHBAHN wurde uns der maximal mögliche Fahrstrom zu 8000 A je Gleis mitgeteilt. Der Abstand der nächstgelegenen Gebäudekanten beträgt 75 m bzw. 140 m und die betrachteten Aufpunkthöhen jeweils 27 m über der Schienenoberkante. Das Diagramm 1 zeigt den Vergleich der maximalen Gleichfeldänderungen bei unterschiedlicher Anordnung der Stromschienen. Bei innenliegender Anordnung (zwischen den Gleisen) ergeben sich die höchsten Feldänderungen, wenn auf beiden Gleisen Fahrbetrieb stattfindet. Bezogen auf die Gebäudekante der Praxis und Dialyse Hamburg Barmbek ist mit einer Gleichfeldänderung von 174 nT zu rechnen. An der Gebäudekante der Asklepios Klinik Barmbek tritt eine Feldänderung von 53 nT auf. Im Innern des Gebäudes, d.h. in einem Abstand von 144 m beträgt sie < 50 nT.

Bei außenliegenden Stromschienen treten an den betrachteten Aufpunkten die höchsten Feldänderungen bei alleinigem Fahrbetrieb auf Gleis 2 auf. Sie betragen 752 nT (Praxis und Dialyse) und 233 nT (Asklepios Klinik Barmbek).

Dieser Vergleich zeigt, dass die innenliegende Anordnung der Stromschienen, wie von der HOCHBAHN geplant, zu einer geringeren Beeinflussung führt. Die bei dieser Anordnung auftretenden Feldänderungen sind in den Diagrammen 2 und 3 dargestellt. Sie wurden den Betreibern der Geräte zur Verfügung gestellt. Die anschließende Diskussion ergab, dass mit einer Beeinträchtigung der vorhandenen Geräte nicht gerechnet wird und nichts gegen die geplante Ausführung spricht.

In DIN EN 50121-2 werden weiterhin 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 an elektrischen Geräten, so dass auch Beeinträchtigungen durch hochfrequente Felder in der Regel ausgeschlossen werden können.

Zusammenfassend zeigen die vorgenommenen Untersuchungen, dass durch die von der U-Bahn-Strecke U5 Ost verursachten elektromagnetischen Felder keine unzulässigen Beeinträchtigungen von Personen und Geräten auftreten werden.

2. Verringerung von Streuströmen

2.1 Allgemeines

Laut DIN EN 50122-1 ist ein Streustrom ein Strom, der auf anderen als den vorgesehenen Pfaden fließt. Betrachtet man als Beispiel einen Rückleitungsabschnitt einer oberirdischen Strecke, 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 Schienepotential 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, erfolgt der Materialabtrag zur Tiefe hin und der Korrosionsschaden tritt in relativ kurzer Zeit auf.

Bei Streustromaustritt aus Stahlbeton erfolgt zunächst eine anodische Polarisation. Dabei entstehen am passiven Stahl Sauerstoff und Wasserstoffionen. Die anodisch erzeugte Säure (Wasserstoffionen) 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 DIN 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 30 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 wie Brücken zwischen zwei beliebigen Orten in der Hauptverkehrszeit nicht größer sein als 200 mV.

2.2 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen

Gemäß DIN EN 50122-2 und der VDV-Schrift 501/1 ist der durch den Fahrbetrieb verursachte Längsspannungsfall an der durchverbundenen Bewehrung rechnerisch zu ermitteln. Die neue U-Bahn-Strecke wird durch insgesamt vier Unterwerke mit Fahrstrom versorgt: UW City Nord, UW Nordheimstraße, UW Steilshoop und UW Bramfeld. Hierdurch ergeben sich acht Rückleitungsabschnitte, deren Längsspannungsfälle zunächst nach der in der o.g. Norm/Schrift angegebenen Näherungsgleichung berechnet wurden. Die Betriebsströme (höchste Stundenmittelwerte) stammen aus einer früheren Netzsimulation und wurden uns von der HOCHBAHN zur Verfügung gestellt. Die Längen der einzelnen Rückleitungsabschnitte wurden dem Übersichtslageplan der Linie U5 Ost entnommen.

Für den Ableitungsbelag der Fahrschienen wurde der in der vorherigen Ausgabe von DIN EN 50122-2 genannte Wert von 0,1 S/km je Gleis angenommen. Für die Widerstandsbeläge der Fahrschienen und der durchverbundenen Tunnelbewehrung wurden die in der VDV 501/1 angegebenen Richtwerte (Doppelgleis: 0,01 Ω /km und Tunnel: 0,11 Ω /km) zugrunde gelegt. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der mit der Näherungsgleichung (DIN EN 50122-2) berechneten Spannungsfälle.

Demnach ist nur der Spannungsfall des ersten Rückleitungsabschnitts kleiner als 200 mV. Alle anderen Rückleitungsabschnitte weisen zum Teil deutlich höhere Längsspannungsfälle auf. In solchen Fällen empfiehlt die VDV-Schrift 501/1 exaktere Berechnungen mit dem Rechnermodell VDV 501/3 vorzunehmen, bei der u.a. auch die gegenseitige Beeinflussung durch den Fahrbetrieb in den angrenzenden Abschnitten berücksichtigt wird und dadurch geringere Längsspannungsfälle ergibt.

Weiterhin wurde beachtet, dass sich durch die oberirdische Strecke im Bereich der Haltestelle Sengelmannstraße zwei voneinander getrennte Tunnelbauwerke ergeben. Die diesbezüglichen Berechnungen, siehe Tabelle 2, ergaben einen Längsspannungsfall von 252 mV.

Nachfolgende Berechnungen, bei denen der Ableitungsbelag Fahrschienen/Tunnel zu $G' = 75$ mS/km je Gleis angesetzt wurde, ergaben einen Längsspannungsfall von 191 mV. Sie zeigen, dass mit einer ausreichend guten elektrischen Isolierung der Fahrschienen die in der VDV-Schrift genannten Mindestanforderungen an die Bewehrungsdurchverbindung des Tunnels ausreichen, um die Streustrom-Korrosionsgefahr sowohl für den Tunnel und außerhalb im Erdboden vergrabenen Installationen zu verringern.

Der größte, auf die Länge bezogene Streustromaustritt ergibt sich unter diesen Bedingungen an der Stromscheide Sengelmannstraße zu $I' = 1,09$ mA/m und liegt ebenfalls unter dem in DIN EN 50122-2 genannten Richtwert von 2,5 mA/m. Da die Tunnelstrecken zwischen den einzelnen Haltestellen als Tübbingtunnel errichtet werden, bei denen eine metallene leitende Durchverbindung nur mit einem erheblichen Aufwand zu realisieren ist, müsste zur Vermeidung einer unzulässigen Streustrombeeinflussung von im Erdboden befindlicher Installationen der Streustromaustritt auf $\leq 0,625$ mA/m begrenzt werden, siehe eb 112 (2014) Heft 1-2. Dieses hat einen höheren Aufwand hinsichtlich der Isolierung der Fahrschienen zur Folge. Daher wird empfohlen, in den Tübbingtunneln die Rissbewehrung des Füllbetons in Längsrichtung durchzuverbinden,

Die im Einzelnen zu treffenden Maßnahmen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.3 Zu treffende Maßnahmen

2.3.1 Gleisoberbau

Aufgrund der vorgenommenen Berechnungen sind die Fahrschienen so zu verlegen, dass ihr Ableitungsbelag nicht größer ist als 0,075 S/km. Dieser Wert kann bei offenem Oberbau (Schotterbett) ohne weiteres erzielt werden, wenn die Fahrschienen mit isolierenden

Befestigungselementen wie Isolierdübel, isolierende Kragenbuchsen und isolierendem Unterguss bzw. isolierenden Zwischenlagen auf Schwellen befestigt werden und in den bewitterten Abschnitten für eine gute Entwässerung der Fahrschienen gesorgt wird.

Isolierende Zwischenlagen sollten in Anlehnung an VDV 506 so bemessen werden, dass sich Kriechwege von ≥ 12 mm ergeben.

2.3.2 Metallen leitende Durchverbindung von Stahlbetonbauwerken

Die aus den Fahrschienen entweichenden Streuströme treten in die Bewehrung des Tunnels und Stahlbetonbauwerken wie Brücken 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 Stahlbetonfahrwege in Längsrichtung niederohmig metallen leitend durchzuverbinden. Darüber hinaus dient die metallen leitende Durchverbindung zum Schutz gegen Gefahren durch das Schienenpotential.

Der in Längsrichtung wirksame Querschnitt der metallen 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 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.

Wie uns von der HOCHBAHN mitgeteilt wurde, werden die zwischen den Haltestellen liegenden Tunnelstrecken als Tübbingtunnel errichtet. Die einzelnen Tübbingelemente haben untereinander keine metallen leitende Verbindung. Dort wird empfohlen, die Stahlstäbe bzw. Flacheisen im Füllbeton der Tunnelsohle einzubauen und mit der Rissbewehrung punktzverschweißen. Hierdurch wird ein Tunnellängsspannungsfall von im zeitlichen Mittel von < 200 mV gewährleistet, sodass, wie bereits erwähnt, außerhalb des Tunnels befindliche Installationen aus Metall wie Rohrleitungen nicht unzulässig durch Streuströme beeinflusst werden.

Aufgrund der unterschiedlichen elektrischen spezifischen Widerstände von Betonstählen sollten entweder glatte Stahlstäbe des Typs S235JR+AR mit einem Durchmesser von 25 mm oder Flacheisen 50×8 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 punktzverschweißt 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 50×8 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 Fahrebene 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 den Fußgängerebenen der Haltestellen beiderseits von Fugen zur Einbeziehung der Ausgangsblöcke anzuordnen.

Es wird empfohlen, in Betriebsräumen der Haltestellen mit elektrischer Haupt- oder Unterverteilung und in den Gleichrichter-Unterwerken weitere Erdungsfestpunkte anzuordnen, die später als Fundament-/ Tiefenerder für die elektrischen Anlagen verwendet werden können.

In den Tübbingtunneln sind am Anfang und Ende des Füllbetons Erdungsfestpunkte von der Bewehrungsdurchverbindung heraus zu führen, sodass der Aufbeton durch Überbrückungskabel mit der Bewehrungsdurchverbindung der Haltestellen verbunden werden kann. Sollte der Füllbeton endlos betoniert werden, wird empfohlen, ca. alle 100 m Erdungsfestpunkte heraus zu führen, um metallene Bauteile in den Potentialausgleich einbeziehen zu können.

2.3.3 Elektrische Trennung zwischen Tunnel und Erde bzw. anderen Bauwerken

Zur Vermeidung von Streustromverschleppungen wird sowohl in DIN 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 und in die Haltestellen verlaufenden Kabel und Rohrleitungen isolierend eingeführt und hinter der Gebäudeeinführung von den außen liegenden Installationen elektrisch getrennt werden.

Die Abbildung 2 zeigt das Erdungsschema für die Gleichrichter-Unterwerke.

In den Gleichrichter-Unterwerken und den Haltestellen 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 Erdungssammelschienen 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 die Gleichrichter-Unterwerke und Haltestellen 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 eingeführt und erhalten direkt hinter der Gebäudeeinführung ein Isolierstück. Wegen der relativ hohen elektrischen Leitfähigkeit des Wassers sollte die Frischwasserleitung aus Kunststoff bestehen.

Die jeweilige Haupterdungsschiene der Gleichrichter-Unterwerke und der Haltestellen ist mit der durchverbundenen Bewehrung des Tunnels zu verbinden. Es 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.

2.3.4 Schutzmaßnahmen gegen das Bestehen bleiben unzulässig hoher Spannungen

Als Anlagenerde für die Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag dient die metallene leitende Durchverbindung des Tunnels. Da der Ausbreitungswiderstand von Bahnhöfen aus Stahlbeton in der Größenordnung von $< 0,1 \Omega$ liegt, sind separate Tiefenerder nicht erforderlich. Wie in der Abbildung 2 dargestellt, werden daher die längslaufenden, parallel zur Bewehrung geschalteten Erdungsseile auf die jeweilige Haupterdungsschiene (HES/BWE) der Haltestelle geführt. An diese Erdungssammelschiene werden sowohl die elektrischen Betriebsmittel der Schutzklasse I als auch alle zu erdenden Bauteile aus Metall wie Türen und Geländer angeschlossen.

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Niederspannungsversorgung über einen Eigenbedarfs-Transformator, 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 den Haltestellen 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.

Auf Grund der elektrischen Trennung zwischen den Fahrschienen und der metallenen leitenden Durchverbindung treten betriebsmäßig Potentialdifferenzen auf, die bei z.B. bei der gleichzeitigen Anfahrt von mehreren Zügen unzulässig hohe Werte annehmen können. Daher ist in den Haltestellen und an einzelnen Bahnüberführungen eine Spannungsbegrenzungseinrichtung (VLD: Voltage Limiting Device) einzubauen.

2.3.5 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 DIN 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 entsprechendes 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.

3. Zusammenfassung

Im Auftrag der ZPP Ingenieure AG wurden für die U-Bahn-Strecke U5 Ost City Nord – Bramfeld die möglichen Beeinträchtigungen durch elektromagnetische Felder untersucht und die zu treffenden Maßnahmen zur Verringerung von Streuströmen erarbeitet.

Durch den Betrieb der neuen U-Bahn-Linie ist mit keiner unzulässigen Beeinträchtigung durch elektromagnetische Felder zu rechnen. Dieses gilt sowohl für Personen als auch für die medizinischen Geräte in der Praxis und Dialyse Hamburg Barmbek und den Asklepios Kliniken Barmbek.

Die in Bezug auf die zu treffenden Maßnahmen zur Verringerung von Streuströmen durchgeführten Berechnungen ergaben, dass der Ableitungsbelag der Fahrschienen nicht größer als 0,075 S/km je Gleis sein soll. Hinsichtlich der Bewehrungsdurchverbindung des Tunnels und der anderen Stahlbetonbauwerke wie Tröge und Brücken sind dann die in der VDV-Schrift 501/1 genannten Mindestanforderungen auszuführen. Die diesbezüglichen, im Einzelnen zu treffenden Maßnahmen sind im vorliegenden Gutachten beschrieben.

Wuppertal, 29.11.2018

IfB Ulrich Bette
Institut für Beeinflussungsfragen
Wuppertal

Konrad-Adenauer-Str. 51
42111 Wuppertal



4. Normen und Empfehlungen

BOStrab: 2016

Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen
(Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung)

26. BImSchV: 2013

26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
(Verordnung über elektromagnetische Felder)

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

Schutz vor elektrischen und magnetischen Feldern der elektrischen Energieversorgung
und -anwendung, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, 21./22.02.2008

Forschungsbericht FE-Nr. 70506/96: Messtechnische Ermittlung der elektromagnetischen Felder
im Bereich von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen, Bundesminister für Verkehr, September 1998

DIN EN 50121-2 (VDE 0115-121-2): 2017

Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit
- Teil 2: Störaussendungen des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt

DIN EN 50122-1 (VDE 0115-3): 2017

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
- Maßnahmen und Berechnungsgrundlagen

VDV-Schrift 501/3: 1995

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

VDV-Schrift 506: 2005

Aufbau und Schutzmaßnahmen von elektrischen Energieanlagen in Betriebshöfen und Werkstätten
von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen

VDV-Schrift 509: 2008

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

eb 112 (2014) Heft 1-2: Streustrombeeinflussung von Stahlrohrleitungen durch Gleichstrom-
Nahverkehrsbahnen, Ulrich Bette; Manfred Menge



Betrachtete Gebäude:

Praxis und Dialyse Barmbek, Entfernung zur U-Bahn-Trasse: 75 m; $\Delta B_{DC, \max} = 174 \text{ nT}$

Asklepios Kliniken Barmbek, Entfernung zur U-Bahn-Trasse: 140 m; $\Delta B_{DC, \max} = 53 \text{ nT}$

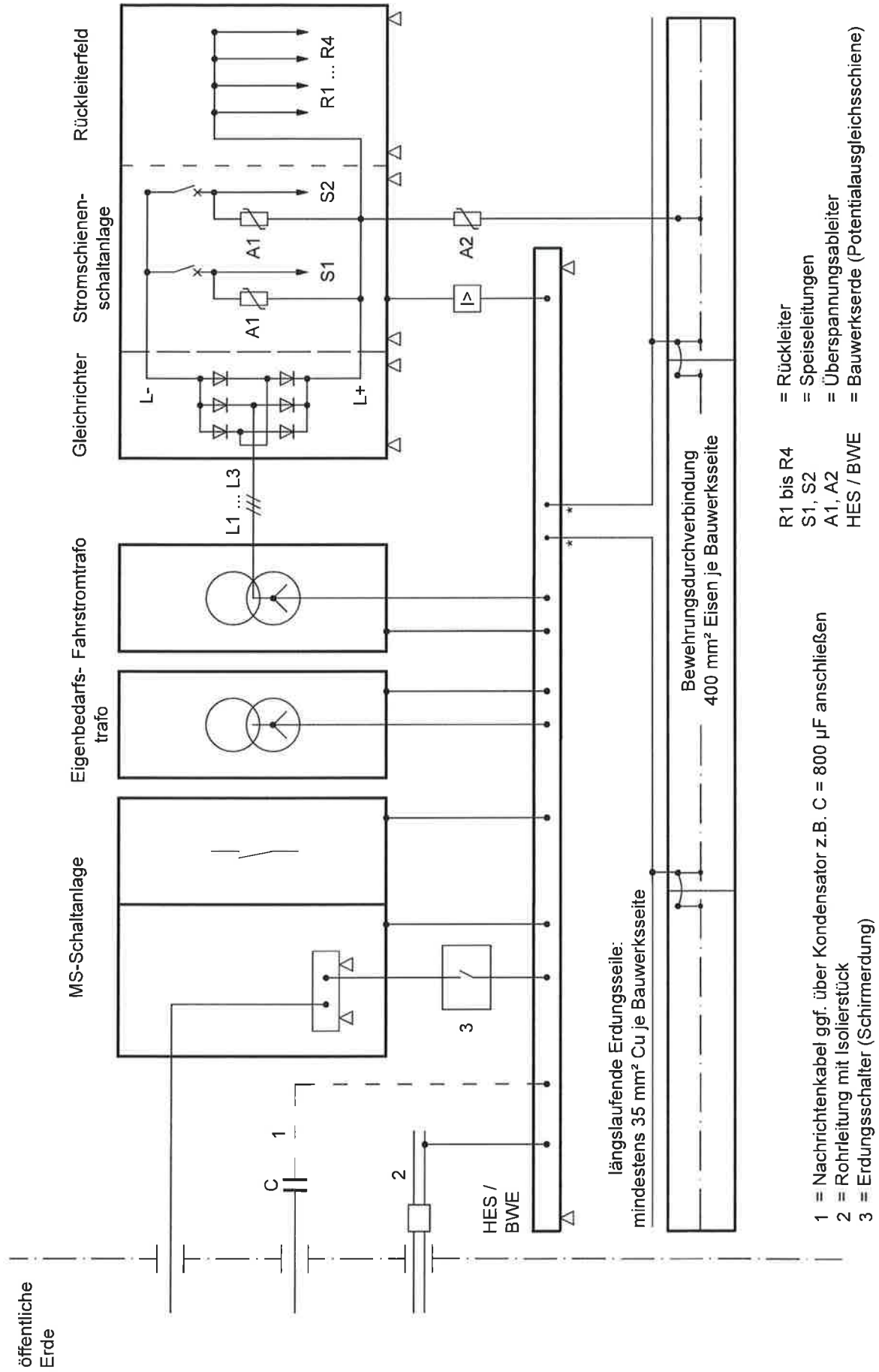


Abbildung 2 - Erdungsschema Gleichrichter-Unterwerke, U5 Ost, HOCHBAHN, Oktober 2018

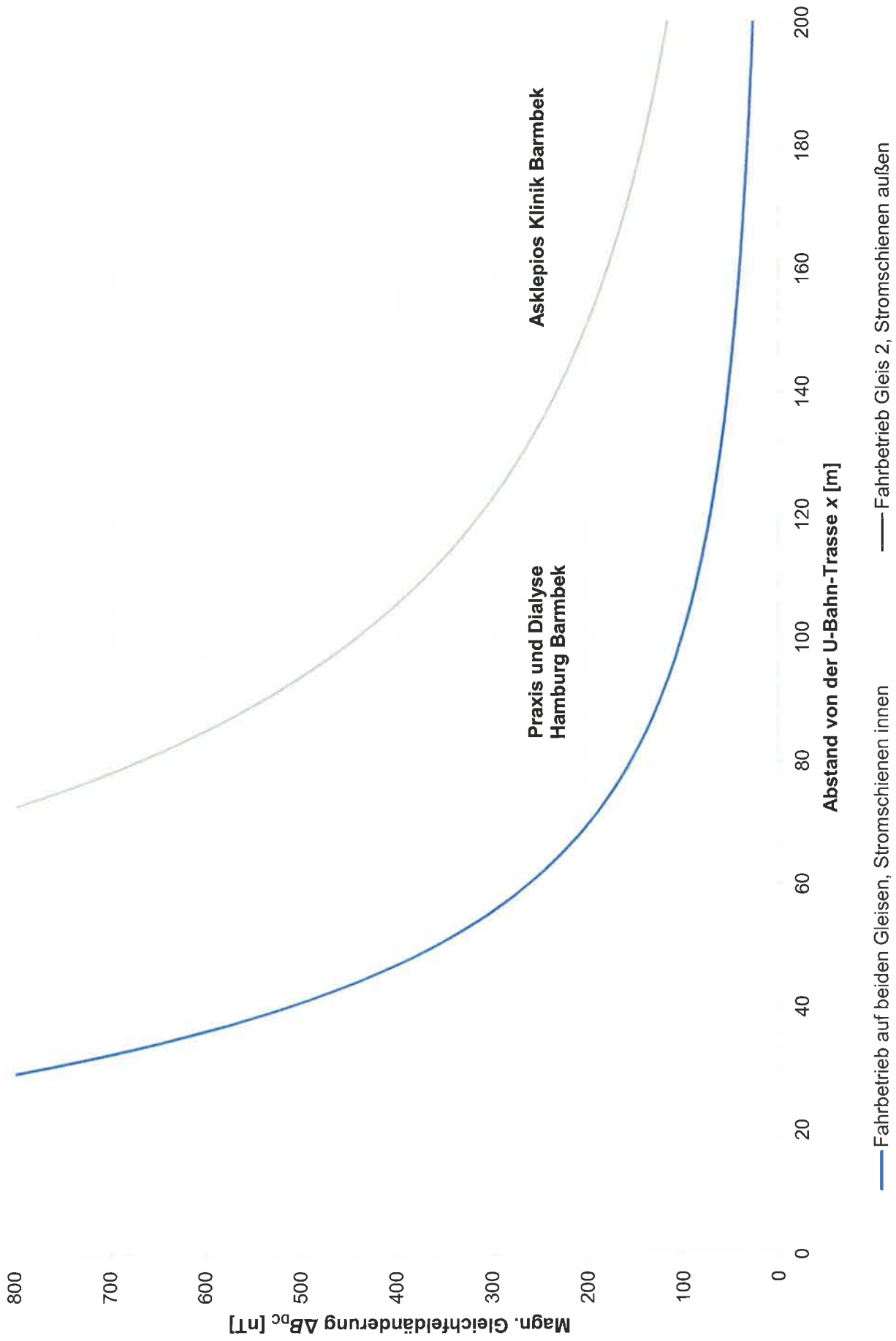


Diagramm 1 - Magnetische Gleichfeldänderung, Linie U5 Ost, Stromaufnahme je Zug (Gleis): 8000 A, HOCHBAHN, Oktober 2018

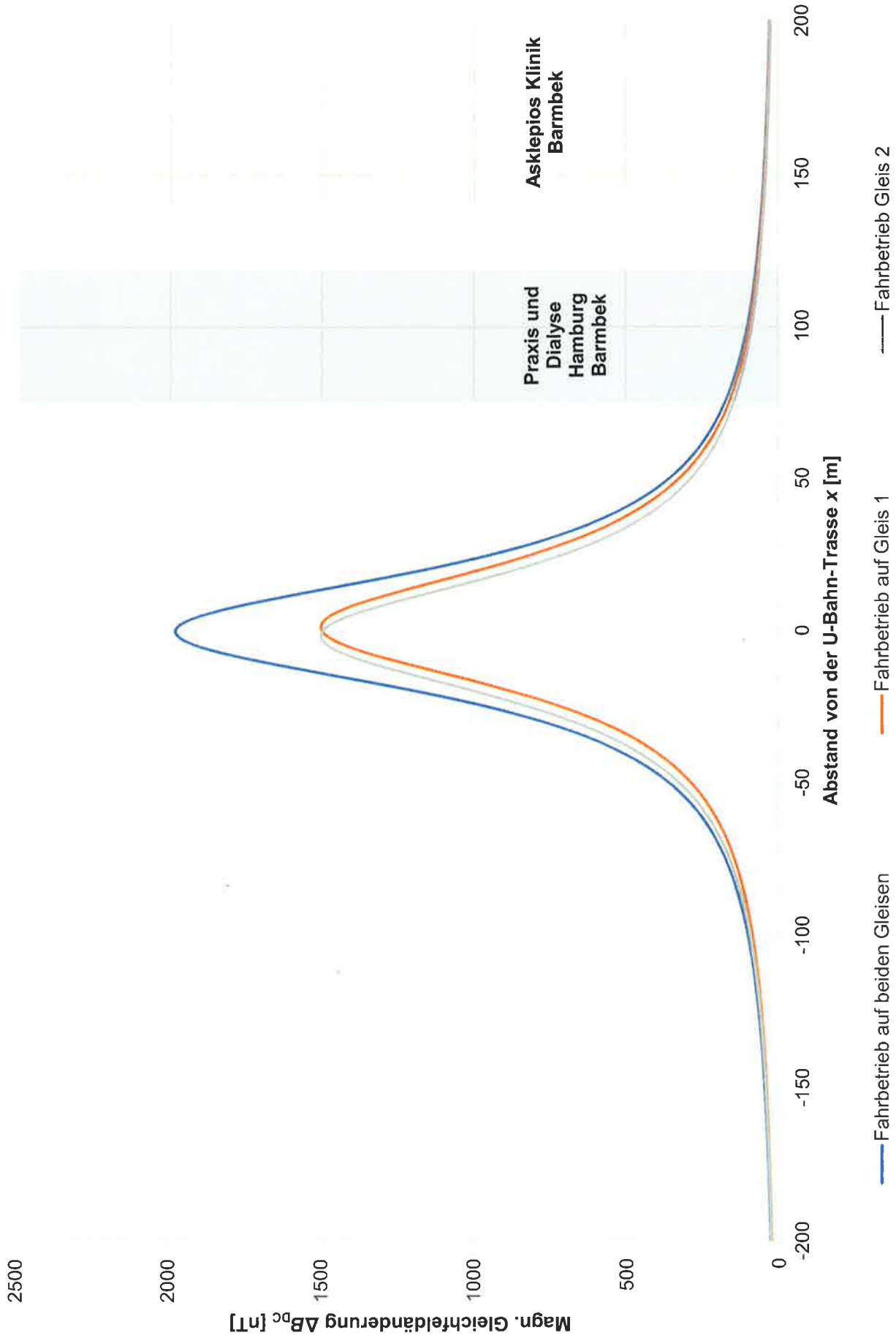


Diagramm 2 - Magnetische Gleichfeldänderung, Linie U5, Stromaufnahme je Zug (Gleis): 8000 A, HOCHBAHN, Juli 2018

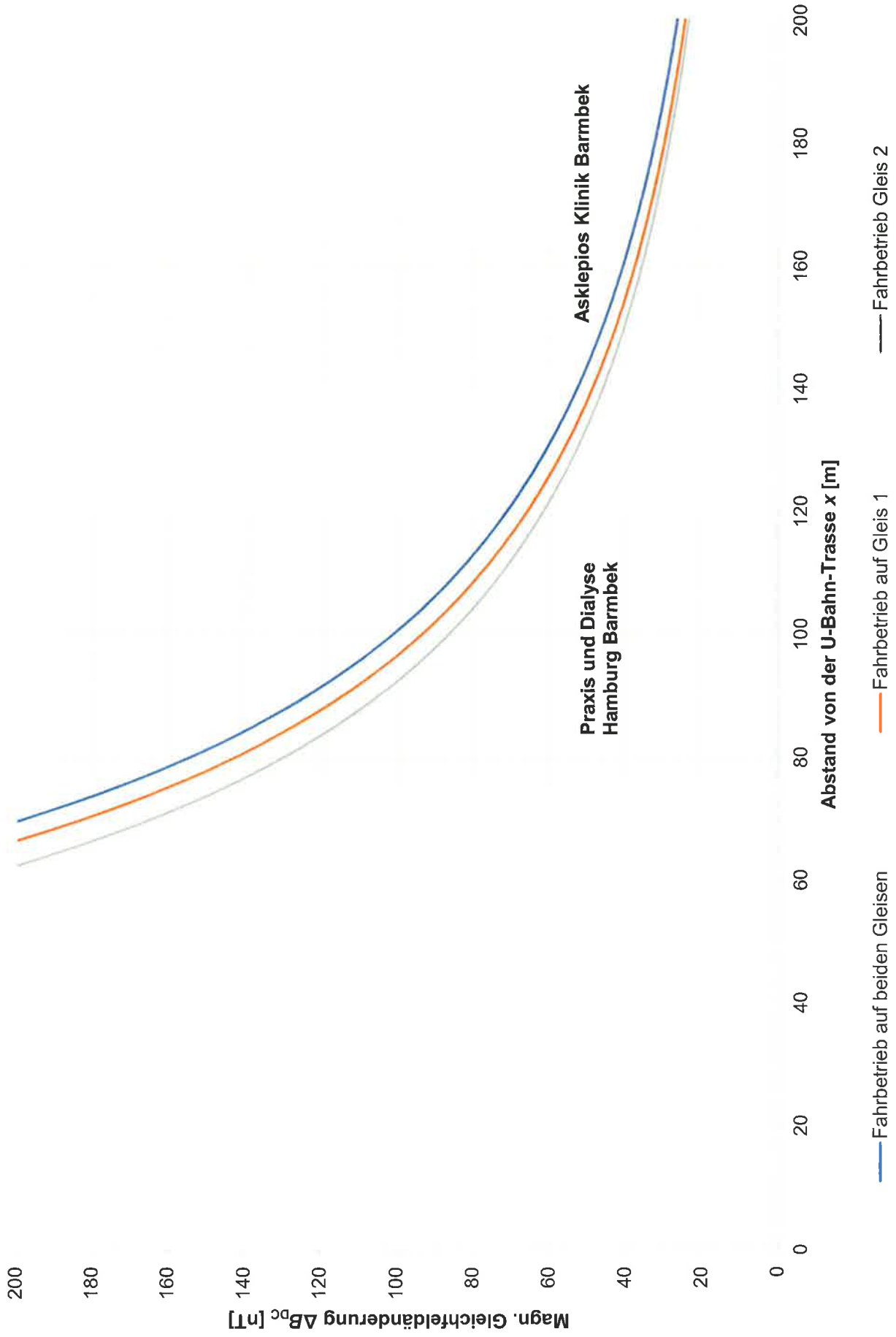


Diagramm 3 - Magnetische Gleichfeldänderung, Linie U5, Stromaufnahme je Zug (Gleis): 8000 A, HOCHBAHN, Juli 2018

Rückleitungsabschnitt von bis		Start-km	End-km	Länge L [km]	Betriebsströme Gleis 1 I_1 [A]	Gleis 2 I_2 [A]	Ableitungsbelag je Gleis G_{RE} [S/km]	Widerstandsbeläge Doppelgleis R_R [Ω /km]	Tunnel R_s [Ω /km]	Längs- spannungsfall U [mV]
Tunnelanfang	UW City Nord	-0,991	-0,828	0,163	1800	1400	0,100	0,010	0,110	30
UW City Nord	Stromscheide	-0,828	0,317	1,145	1800	1400	0,100	0,010	0,110	1405
Stromscheide	UW Nordheimstraße	0,317	1,462	1,145	1900	1800	0,100	0,010	0,110	1625
UW Nordheimstraße	Stromscheide	1,462	2,063	0,601	1200	1200	0,100	0,010	0,110	298
Stromscheide	UW Steilshoop	2,063	2,664	0,601	1200	1300	0,100	0,010	0,110	311
UW Steilshoop	Stromscheide	2,664	3,486	0,822	1600	2000	0,100	0,010	0,110	828
Stromscheide	UW Bramfeld	3,486	4,308	0,822	1800	1800	0,100	0,010	0,110	828
UW Bramfeld	NA Heukoppel	4,308	4,888	0,58	1200	800	0,100	0,010	0,110	232

Rückleitungsabschnitt von bis		Start-km	End-km	Länge L [km]	Betriebsströme Gleis 1 I_1 [A]	Gleis 2 I_2 [A]	Ableitungsbelag je Gleis G'_{RE} [S/km]	Widerstandsbeläge Doppelgleis R'_R [Ω /km]	Tunnel R'_S [Ω /km]	Längs- spannungsfall U [mV]
Tunnelanfang	UW City Nord	-0,991	-0,828	0,163	1800	1400	0,100	0,010	0,110	-1,1
UW City Nord	Trogende	-0,828	-0,040	0,788	1800	1400	0,100	0,010	0,110	-20,2
Stromscheide Sengelmanstraße	UW Nordheimstraße	0,317	1,462	1,145	1900	1800	0,100	0,010	0,110	108,4
UW Nordheimstraße	Stromscheide	1,462	2,063	0,601	1200	1200	0,100	0,010	0,110	44,4
Stromscheide	UW Steilshoop	2,063	2,664	0,601	1200	1300	0,100	0,010	0,110	30,8
UW Steilshoop	Stromscheide	2,664	3,486	0,822	1600	2000	0,100	0,010	0,110	5,8
Stromscheide	UW Bramfeld	3,486	4,308	0,822	1800	1800	0,100	0,010	0,110	52,5
UW Bramfeld	NA Heukoppel	4,308	4,888	0,58	1200	800	0,100	0,010	0,110	10,3

Ergebnis:

 Bei einem Ableitungsbelag von $G'_{RE} = 0,1$ S/km je Gleis beträgt

der größte Längsspannungsfall an den Streckenabschnitten

 Stromscheide Sengelmanstraße bis NA Heukoppel: $U_{max} = 252,2$ mV

Rückleitungsabschnitt von bis		Start-km	End-km	Länge L [km]	Betriebsströme Gleis 1 I_1 [A]	Gleis 2 I_2 [A]	Ableitungsbelag je Gleis G'_{RE} [S/km]	Widerstandsbeläge Doppelgleis R'_R [Ω /km]	Tunnel R'_S [Ω /km]	Längs- spannungsfall U [mV]
Tunnelanfang	UW City Nord	-0,991	-0,828	0,163	1800	1400	0,075	0,010	0,110	-0,8
UW City Nord	Trogende	-0,828	-0,040	0,788	1800	1400	0,075	0,010	0,110	-15,1
Stromscheide Sengelmannstraße	UW Nordheimstraße	0,317	1,462	1,145	1900	1800	0,075	0,010	0,110	81,7
UW Nordheimstraße	Stromscheide	1,462	2,063	0,601	1200	1200	0,075	0,010	0,110	33,7
Stromscheide	UW Steilshoop	2,063	2,664	0,601	1200	1300	0,075	0,010	0,110	23,5
UW Steilshoop	Stromscheide	2,664	3,486	0,822	1600	2000	0,075	0,010	0,110	4,7
Stromscheide	UW Bramfeld	3,486	4,308	0,822	1800	1800	0,075	0,010	0,110	39,7
UW Bramfeld	NA Heukoppel	4,308	4,888	0,58	1200	800	0,075	0,010	0,110	7,8

Ergebnis:

 Bei einem Ableitungsbelag von $G'_{RE} = 0,075$ S/km je Gleis beträgt

der größte Längsspannungsfall an den Streckenabschnitten

 Stromscheide Sengelmannstraße bis NA Heukoppel: $U_{max} = 191,1$ mV