

Müller-BBM Industry Solutions GmbH  
Helmut-A.-Müller Straße 1 - 5  
82152 Planegg

Telefon +49(89)85602 0  
Telefax +49(89)85602 111

www.MuellerBBM.de

M. Sc. Felix Martin  
Telefon +49(89)85602 311  
Felix.Martin@mbbm.com

14. März 2023  
M140260/05 Version 1 MART/WDN

## **Stadtwerke München – Neubau Betriebshof Tram Ständlerstraße**

Unterlage-Nr. 15.03

### **Berechnung und Beurteilung der magnetischen Felder der Straßenbahnstromanlagen und deren Energieversorgungsanlagen**

**Bericht Nr. M140260/05**

Auftraggeber:	Stadtwerke München GmbH 80287 München	
Auftragsnummer:	4500201374	
Bearbeitet von:	Dr.-Ing. Gisbert Gralla M. Sc. Felix Martin	
Berichtsumfang:	37 Seiten insgesamt, davon 29 Seiten Textteil und 8 Seiten Anhang	

Müller-BBM Industry Solutions GmbH  
HRB München 86143  
USt-IdNr. DE812167190

Geschäftsführer:  
Joachim Bittner, Walter Grotz,  
Dr. Carl-Christian Hantschk,  
Dr. Alexander Ropertz

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Situation und Aufgabenstellung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Verwendete Unterlagen</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Rechtliche Grundlagen</b>	<b>11</b>
3.1	Schutz der Anwohnerschaft	11
3.2	Schutz von Beschäftigten	13
3.3	Träger aktiver oder passiver Körperhilfsmittel, besonders gefährdete Arbeitnehmer	13
3.4	Anwendung der rechtlichen Grundlagen im vorliegenden Gutachten	14
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Berechnung der elektromagnetischen Felder</b>	<b>15</b>
5.1	Grundlagen	15
5.2	Berechnungsunsicherheit	16
5.3	Modellbildung	16
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Beurteilung gemäß 26. BImSchVVwV</b>	<b>26</b>
7.1	Vorprüfung	26
7.2	Minimierungsmaßnahmen Mittelspannungsstationen	28
7.3	Minimierungsmaßnahmen Drehstromerdkabel im Mittelspannungsring	29

## Anhang:

Abbildung A 1. Gesamtgelände, Berechnung der magnetischen Flussdichte der Niederfrequenzanlagen (50-Hertz-Anlagen) in 1 m Höhe.	2
Abbildung A 2. Mittelspannungsring, Berechnung der magnetischen Flussdichte in einem Querschnitt senkrecht zur Kabelführung.	2
Abbildung A 3. TGW B1, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.	2
Abbildung A 4. TGW Ständlerstraße, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.	3
Abbildung A 5. Mittelspannungsstation O-MSB1A, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.	3
Abbildung A 6. Mittelspannungsstation O-MSB1A, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden.	3
Abbildung A 7. Mittelspannungsstation O-MSB1B, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.	4
Abbildung A 8. Mittelspannungsstation O-MSB1B, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden.	4
Abbildung A 9. Mittelspannungsstation O-MSB1C, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.	4
Abbildung A 10. Mittelspannungsstation BDII, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden.	5
Abbildung A 11. Mittelspannungskompaktstation (die beiden Stationen vom Aufbau und den elektrischen Parametern identisch), Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.	6
Abbildung A 12. Gleisanlagen, Berechnung der magnetischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen.	6
Abbildung A 13. Gleisanlagen, Berechnung der magnetischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen; Zoom auf ein Gleis.	7
Abbildung A 14. Gleisanlagen, Berechnung der elektrischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen.	7
Abbildung A 15. Gleisanlagen, Berechnung der elektrischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen; Zoom auf ein Gleis.	8

## Zusammenfassung

Die Stadtwerke München GmbH plant den Neubau eines Trambahn-Betriebshofes in der Ständlerstraße 20, 81549 München. Die Anlage soll bis zu 100 Fahrzeuge fassen und die bisherigen Hauptwerkstätte ergänzen. Auf dem Gelände werden sowohl neue Gleisanlagen als auch Betriebsmittel zur Energieversorgung errichtet. Es muss daher mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern auf das Grundstück und die umliegende Nachbarschaft gerechnet werden.

Ob diese Felder eine Auswirkung auf die Gesundheit der Beschäftigten und der Anwohnerschaft haben könnten, sollte ermittelt werden. Auf der Grundlage der technischen Daten der Planung wurden die zu erwartenden elektromagnetischen Felder auf dem Grundstück und für die umliegende Nachbarschaft berechnet. Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse wurden verwendet:

- Verordnung zum Schutz von Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder  
(Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV)
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV)

Der Bericht M140260/03 vom 29. August 2022 [2] ersetzt den bereits früher erstellten Bericht gleichen Titels (M140260/02 vom 23. April 2018, [1]) und berücksichtigt dabei einen neueren Planstand des Vorhabens.

Der vorliegende Bericht berücksichtigt den aktuellen Planstand.

## Ergebnis

### Schutz der Beschäftigten, Arbeitsschutz:

Die gemäß der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV – zulässigen Grenzwerte für die magnetische Flussdichte und die elektrische Feldstärke werden an den für Beschäftigte zugänglichen Bereichen innerhalb des Betriebsgeländes an keiner Stelle erreicht oder überschritten.

### Schutz der Anwohnerschaft:

Die gemäß 26. BImSchV zulässigen Grenzwerte für die magnetische Flussdichte werden an der für die Allgemeinheit zugänglichen Grenze des Betriebsgeländes an keiner Stelle erreicht oder überschritten. Damit werden die Grenzwerte auch in den nördlich des Betriebshofes angrenzenden Wohn- und Bürogebäuden keinesfalls erreicht oder überschritten. Die Grenzwerte für die elektrische Feldstärke sind hier nicht relevant.

### Träger aktiver Körperhilfsmittel:

Die gemäß EMFV für besonders gefährdete Personen – insbesondere Träger aktiver Implantate – einzuhaltenen Grenzwerte der 26. BImSchV werden im Nahbereich der Gleichrichterwerke B1 und STS, der Mittelspannungsstationen O-MSB1A, O-MSB1B und O-MSB1C und der Mittelspannungskompaktstationen überschritten. Der einzuhaltenen Abstand beträgt je nach Anlage 15 cm bis 30 cm von der Gebäudeaußenwand. Von der Oberfläche der Schienen ist ein Abstand von 20 cm einzuhalten.

### *Anmerkung zur Einwirkung von Hochfrequenzsendeanlagen:*

Innerhalb eines Abstands von 300 m um das betrachtete Umspannwerk befindet sich keine ortsfeste Hochfrequenzanlage mit Frequenzen zwischen 9 kHz und 10 MHz, welche als Vorbelastung gemäß den Hinweisen zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV), Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI), zu berücksichtigen wäre.

### *Anmerkung zur Minimierung elektromagnetischer Felder gemäß 26. BImSchVVwV:*

Die Vorprüfung ergab, dass sich im 1. OG oberhalb der Mittelspannungsstationen O-MSB1A und O-MSB1B Pausenräume befinden, welche zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind; deshalb ist hier eine Minimierung gemäß 26. BImSchVVwV durchzuführen. Die Prüfung der möglichen Minimierungsmaßnahmen ergab, dass diese bereits vollständig umgesetzt sind.

Weiterhin ergab die Vorprüfung, dass sich innerhalb des Einwirkungsbereichs der Drehstromkabel des Mittelspannungsringes von 10 m an der nördlichen Grenze des Betriebsgeländes Grundstücke befinden, welche dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind; deshalb ist hier ebenfalls eine Minimierung gemäß 26. BImSchVVwV durchzuführen. Die Prüfung der möglichen Minimierungsmaßnahmen ergab, dass diese bereits vollständig umgesetzt sind.

Für den Inhalt des vorliegenden Berichtes zeichnen verantwortlich:

Dr.-Ing. Gisbert Gralla  
– Projektverantwortlicher –

M. Sc. Felix Martin  
– Projektmitarbeiter –

Dieser Bericht darf nur in seiner Gesamtheit, einschließlich aller Anlagen, vervielfältigt, gezeigt oder veröffentlicht werden. Die Veröffentlichung von Auszügen bedarf der schriftlichen Genehmigung durch Müller-BBM. Die Ergebnisse beziehen sich nur auf die untersuchten Gegenstände.



Deutsche  
Akkreditierungsstelle  
D-PL-14119-01-00

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018  
akkreditiertes Prüflaboratorium.  
Die Akkreditierung gilt nur für den in der  
Urkundenanlage aufgeführten Akkreditierungsumfang.

## 1 Situation und Aufgabenstellung

Die Stadtwerke München GmbH plant den Neubau eines Trambahn-Betriebshofes in der Ständlerstraße 20, 81549 München. Die Anlage soll bis zu 100 Fahrzeuge fassen und die bisherigen Hauptwerkstätte ergänzen. Auf dem Gelände werden sowohl neue Gleisanlagen als auch Betriebsmittel zur Energieversorgung errichtet. Es muss daher mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern auf das Grundstück und die umliegende Nachbarschaft gerechnet werden.

Ob diese Felder eine Auswirkung auf die Gesundheit der Beschäftigten und der Anwohnerschaft haben könnten, sollte ermittelt werden. Auf der Grundlage der technischen Daten der Planung wurden die zu erwartenden elektromagnetischen Felder auf dem Grundstück und für die umliegende Nachbarschaft berechnet. Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse wurden verwendet:

- Verordnung zum Schutz von Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder  
(Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV)
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV)

Der Bericht M140260/03 vom 29. August 2022 ([2]) ersetzt den bereits früher erstellten Bericht gleichen Titels (M140260/02 vom 23. April 2018,[1]) und berücksichtigt dabei einen neueren Planstand des Vorhabens.

Der vorliegende Bericht berücksichtigt den aktuellen Planstand.

## 2 Verwendete Unterlagen

- [1] Müller-BBM-Bericht: M140260/02  
„Stadtwerke München – Neubau Betriebshof Tram Ständlerstraße, Berechnung und Beurteilung der magnetischen Felder der Straßenbahnstromanlagen und deren Energieversorgungsanlagen“ vom 23. April 2018
- [2] Müller-BBM-Bericht: M140260/03  
„Stadtwerke München – Neubau Betriebshof Tram Ständlerstraße, Berechnung und Beurteilung der magnetischen Felder der Straßenbahnstromanlagen und deren Energieversorgungsanlagen“ vom 29. August 2022
- [3] 26. BImSchV: 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über elektromagnetische Felder vom 21. August 2013
- [4] Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder, Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz LAI, September 2014
- [5] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 26. Februar 2016
- [6] Elektromagnetische Felder – Hochfrequenzanlagen, Info-Blatt zur Umsetzung der Anforderung nach § 3 Nr. 3, 26. BImSchV Niederfrequenzanlagen, Bundesnetzagentur, Referat 414, 55122 Mainz, April 2014
- [7] Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG, Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Felder (0 Hz – 300 GHz)
- [8] Verordnung zum Schutz von Beschäftigten vor Gefährdungen durch elektromagnetische Felder (Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV), November 2016
- [9] Nicht verbindlicher Leitfaden mit bewährten Verfahren im Hinblick auf die Durchführung der Richtlinie 2013/35/EU, Elektromagnetische Felder, Leitfaden für KMU, Europäische Kommission, November 2014
- [10] Forschungsbericht 451: Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz, Sicherheit von Beschäftigten mit aktiven und passiven Körperhilfsmitteln bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Januar 2015
- [11] DIN VDE 0848-3-1: Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz. Entwurf, Mai 2002 (zurückgezogenes Dokument)
- [12] DIN EN 50527-2-1: Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren Geräten (AIMD) gegenüber elektromagnetischen Feldern – Teil 2-1: Besondere Beurteilung für Arbeitnehmer mit Herzschrittmachern, Mai 2012

- [13] DIN EN 50413/A1; VDE 0848-1/A1: Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz), Juli 2014
- [14] Hersteller-Zertifikat (Genauigkeit der Feld-, Leistungsflussdichte- und Schallpegelberechnung), Winfield/EFC-400 – Electrical and Magnetic Field Calculation Version >= V2021, 01.01.2021
- [15] Planungsunterlage: Lageplan  
Titel: A03.02\_Lageplan\_Außenanlagen\_sk\_AnM\_R+P\_220809  
Maßstab: --  
Stand: 12.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [16] Planungsunterlage: Lageplan  
Titel: Lageplan Gleisanlagen  
Maßstab: 1:500  
Stand: 20.05.2022, Bernard Gruppe ZT GmbH
- [17] Planungsunterlage: Aufstellungsplan  
Titel: Aufstellungsplan TGW STS – Tram Gleichrichterwerk Ständlerstraße  
Maßstab: --  
Stand: 30.08.2022, Stadtwerke München GmbH
- [18] Planungsunterlage: Aufstellungsplan  
Titel: Aufstellungsplan TGW – Tram Gleichrichterwerk B1  
Maßstab: --  
Stand: 30.08.2022, Stadtwerke München GmbH
- [19] Planungsunterlage: Lastflussschema  
Titel: Lastflussschema Mittelspannung  
Stand: 31.08.2022, Stadtwerke München GmbH
- [20] Planungsunterlage: Produktkatalog  
Titel: Produktkatalog Siemens, Mittelspannungsschaltanlagen 8DJH  
Stand: 2017, Siemens
- [21] Planungsunterlage: Produktkatalog  
Titel: Produktkatalog Siemens, Mittelspannungsschaltanlagen 8DH10  
Stand: 2008, Siemens
- [22] Planungsunterlage: Maßbild  
Titel: Maßbild B12 Gleichrichter  
Stand: 13.04.2020, Siemens
- [23] Planungsunterlage: Übersichtsschaltplan  
Titel: Kundenanlage 8873, MVG Trambetriebshof Ost – Einsteinstraße 148, Übersichtsschaltplan  
Stand: 03.06.2020, Stadtwerke München GmbH
- [24] Planungsunterlage: Anordnungsplan  
Titel: Kundenanlage 8873, MVG Trambetriebshof Ost – Einsteinstraße 148, Anordnungsplan  
Stand: 03.06.2020, Stadtwerke München GmbH

- [25] Planungsunterlage: Betriebsanleitung  
Titel: Betriebsanleitung NH-Sicherungsleiste Größe 1-3,1- und 3 Polig schaltbar  
(BA L005)  
Stand: 11/2013
- [26] Planungsunterlage: Grundriss  
Titel: 220622\_TB1\_BD II\_E0\_AR-300\_GR\_00-002\_3\_F\_A  
Stand: 23.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [27] Planungsunterlage: Grundriss  
Titel: 220811\_1437\_SWM\_WD\_GR-1OG  
Stand: 12.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [28] Planungsunterlage: Grundriss  
Titel: 220621\_1437\_SWM\_WI-WL\_GR-1.OG  
Stand: 22.06.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [29] Planungsunterlage: Übersichtsschema  
Titel: Betriebshof Übersichtsschema MSP  
Stand: 10.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [30] Planungsunterlage: Schema  
Titel: Betriebshof, Schema NSHV-AV Werkstatt Logistik WL  
Stand: 11.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [31] Planungsunterlage: Schema  
Titel: Betriebshof, Schema NSHV-AV Werkstatt Instandsetzung WI  
Stand: 11.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [32] Planungsunterlage: Schema  
Titel: Betriebshof, Schema NSHV-AV Werkstatt Durchlaufwartung WD  
Stand: 11.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG
- [33] Planungsunterlage: Schema  
Titel: Betriebsdienstgebäude, Schema NSHV-AV Betriebsdienstgebäude BDII  
Stand: 11.08.2022, Raible+Partner GmbH & Co. KG

### 3 Rechtliche Grundlagen

#### 3.1 Schutz der Anwohnerschaft

##### 26. BImSchV

Die 26. BImSchV [3] enthält Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder. Hinweise zur Messung und Berechnung finden sich in den Hinweisen zur Durchführung dieser Verordnung [4]. Gemäß dieser Verordnung genügt es, die Immission an den „maßgebenden Immissionsorten“ zu betrachten. Maßgebende Immissionsorte sind schutzbedürftige Gebäude oder Grundstücke. Es sind dies „Gebäude oder Grundstücke, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“. Dieses „Bestimmtsein“ ist dabei insbesondere aus der bauplanungsrechtlichen Einordnung des Grundstückes abzuleiten. Es kommt also nicht darauf an, ob sich dort tatsächlich Personen „nicht nur vorübergehend“ aufhalten. Landwirtschaftliche Flächen, Straßen und Gehwege sind keine maßgebenden Immissionsorte.

Für die Beurteilung sind die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte bei „höchster betrieblicher Auslastung“ zu ermitteln. Diese „höchste betriebliche Auslastung“ ist laut 26. BImSchV nicht durch die tatsächlich zu erwartende maximale Auslastung, sondern durch eine technische Grenze (Nennleistung) definiert.

Außerdem ist die Vorbelastung durch andere Nieder- und Hochfrequenzanlagen zu berücksichtigen. Bei den Hochfrequenzanlagen genügt es dabei, ortsfeste Anlagen mit einer Sendeleistung von mehr als 10 Watt EIRP und Frequenzen zwischen 9 kHz und 10 MHz zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich gegebenenfalls um Rundfunksender im Kurz-, Mittel- und Langwellenbereich. Gemäß [6] genügt es, Anlagen zu betrachten, die sich näher als 300 m an der Niederfrequenzanlage befinden.

Die 26. BImSchV gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen. Gemäß § 1, Absatz 2 sind

- Hochfrequenzanlagen:  
ortsfeste Anlagen, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz erzeugen; ausgenommen sind Anlagen, die breitbandige elektromagnetische Impulse erzeugen und der Landesverteidigung dienen
- Niederfrequenzanlagen:  
ortsfeste Anlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität mit einer Nennspannung von 1000 Volt oder mehr, einschließlich Bahnstromfern- und Bahnstromoberleitungen und sonstiger vergleichbarer Anlagen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 9 kHz
- Gleichstromanlagen:  
ortsfeste Anlagen zur Fortleitung, Umspannung und Umrichtung, einschließlich der Schaltfelder, von Gleichstrom mit einer Nennspannung von 2000 Volt oder mehr

Die hier zu betrachtenden Anlagen der Straßenbahn, die mit einer Gleichspannung von 750 Volt betrieben werden, fallen unter keine der oben genannten Kategorien; sowohl die 26. BImSchV als auch die 26. BImSchVVwV sind demnach hier nicht an-

wendbar. Niederfrequenzanlagen mit einer Spannung von 0,4 kV, wie zum Beispiel die Station BDII, fallen ebenfalls nicht in den Bereich der 26. BImSchV bzw. der 26. BImSchVVwV.

## **26. BImSchVVwV**

Die allgemeine Verwaltungsvorschrift [5] konkretisiert den § 4 Absatz 2 der 26. BImSchV [3]. Sie beschreibt die Anforderungen an Niederfrequenz- und Gleichstromanlagen bei der Errichtung und wesentlichen Änderung, um die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren.

Die Umsetzung des Minimierungsgebots erfolgt in drei Teilschritten – einer Vorprüfung, ob überhaupt eine Minimierung erforderlich ist, anschließend, sofern eine solche erforderlich ist, einer Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen und einer Maßnahmenbewertung.

### **Vorprüfung**

Ein maßgeblicher Minimierungsort ist gemäß Nummer 2.11 der 26. BImSchVVwV [5] ein im Einwirkungsbereich der Anlage liegendes Gebäude oder Grundstück im Sinne des § 4 Absatz 1 der 26. BImSchV sowie jedes Gebäude oder jeder Gebäudeteil, das/der zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist. Sowohl der Einwirkungsbereich einer Ortsnetzumspannstation als auch der von Drehstromerkabeln mit einer Spannung kleiner als 50 kV beträgt 10 m (vgl. Nr. 3.2.1.2 der 26. BImSchVVwV [5]).

### **Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen und Maßnahmenbewertung**

Die Prüfung der Minimierung ist von der Lage der maßgeblichen Minimierungsorte abhängig. Liegt ein Minimierungsort innerhalb des Bewertungsabstandes, so ist die Minimierung individuell auf diesen Minimierungsort durchzuführen. Der Bewertungsabstand beträgt sowohl für eine Ortsnetzumspannstation als auch für ein Drehstromerkabel mit einer Spannung kleiner als 50 kV 1 m. Liegt der Minimierungsort zwischen Bewertungsabstand und Einwirkungsbereich, also zwischen 1 m und 10 m Abstand von der Gebäudeaußenwand bzw. dem Kabel, so ist ein repräsentativer Bezugsort im Bewertungsabstand, also in 1 m Abstand, zu wählen und auf diesen hin die Immission zu minimieren (vgl. Nummer 2.4 der 26. BImSchVVwV [5]).

Bei Ortsnetzumspannstationen sind grundsätzlich drei Minimierungsmaßnahmen zu prüfen: Abstandsoptimierung (größtmögliche Distanz von feldverursachenden Anlagenteilen zum maßgeblichen Minimierungsort), Minimieren der Distanz zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung, Optimierung von Einspeisung und Abgängen der Niederspannungsverteilung.

Bei Drehstromerkabeln sind grundsätzlich vier Minimierungsmaßnahmen zu prüfen: Minimierung der Kabelstände, Optimieren der Leiteranordnung (Anschlussreihenfolge der Drehstromleiter an die Erdkabel), Optimieren der Verlegegeometrie (horizontal, vertikal oder im Dreieck) und Optimierung der Verlegetiefe.

### **Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG**

In Fällen, in denen die 26. BImSchV nicht anwendbar ist (hier Felder der Straßenbahn), kann die Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG [7] zur Beurteilung herangezogen werden, die Grenzwerte für den gesamten Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 300 GHz enthalten (außer für elektrische Gleichfelder mit 0 Hz).

## **3.2 Schutz von Beschäftigten**

### **Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern – EMFV**

In dieser Verordnung [8] sind Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche und sensorische Wirkungen festgelegt, die sich auf das Innere des menschlichen Körpers beziehen und nicht direkt gemessen werden können. Es sind deshalb zusätzlich sog. Auslöseschwellen für elektrische und magnetische Feldstärken (bzw. Flussdichten) festgelegt, die am Arbeitsplatz gemessen werden können.

Ist die untere Auslöseschwelle nicht überschritten, so ist sichergestellt, dass weder direkte noch indirekte Wirkungen auftreten. Ist die obere Auslöseschwelle nicht überschritten, so ist lediglich sichergestellt, dass keine indirekten Wirkungen auftreten. Als direkte Wirkungen werden dabei thermische Wirkungen, Reizung von Muskeln, Nerven oder Sinnesorganen verstanden; als indirekte Wirkungen werden Wirkungen auf medizinische Vorrichtungen, Implantate aller Art, Projektilwirkung in Magnetfeldern bezeichnet.

Zusätzlich sind Auslöseschwellen für Gliedmaßen festgelegt, die teilweise noch über den oberen Auslöseschwellen liegen und sich auf die Exposition von Händen und Füßen beziehen.

Die Beurteilung der Messwerte erfolgt im Weiteren entsprechend der unteren Auslöseschwelle.

## **3.3 Träger aktiver oder passiver Körperhilfsmittel, besonders gefährdete Arbeitnehmer**

Weder die 26. BImSchV noch die Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern enthalten in der Praxis anwendbare Grenzwerte für Träger aktiver oder passiver Körperhilfsmittel. Nachdem auch die DIN VDE 0848-3-1 (Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln) [11] zurückgezogen wurde und DIN EN 50527-2-1 (Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren Geräten gegenüber elektromagnetischen Feldern) [12] keine Grenzwerte angibt, gibt es derzeit keine rechtliche Vorschrift zur Beurteilung von Arbeitsplätzen für Herzschrittmacherträger. Der Stand des Wissens ist jedoch im Forschungsbericht FB 451 [10] zusammengetragen, in dem auch Schwellenwerte für elektrische und magnetische Feldstärken (bzw. Flussdichten) für aktive und passive Körperhilfsmittel angegeben sind. Sind diese Schwellenwerte nicht überschritten, kann davon ausgegangen werden, dass die Sicherheit der entsprechenden Personen gewährleistet ist.

In dem Leitfaden zur Umsetzung der EMFV [9] wird empfohlen, zum Schutz besonders gefährdeter Arbeitnehmer (das sind insbesondere Träger aktiver und passiver Implantate und Schwangere) die Grenzwerte gemäß 1999/519/EG [7] einzuhalten. Diese sind nahezu identisch mit denen der 26. BImSchV (der Unterschied liegt im Bereich von weniger als 1 %), so dass es zum Schutz von Herzschrittmacherträgern letztlich genügt, die Grenzwerte der 26. BImSchV zum Schutz der Allgemeinheit einzuhalten.

### 3.4 Anwendung der rechtlichen Grundlagen im vorliegenden Gutachten

Die hier zu beurteilenden Straßenbahnanlagen werden mit einer Gleichspannung von 750 Volt betrieben. Im Umfeld der Anlage entsteht deshalb ein elektrisches Gleichfeld, das nur sehr geringe Schwankungen entsprechend den Schwankungen der Betriebsspannung aufweist. Die Frequenz des Feldes kann somit zu **0 Hz** angenommen werden. Das Magnetfeld im Umfeld der Anlage ist nicht konstant, sondern ändert sich entsprechend den aktuell in den Fahrdrähten bzw. den Schienen fließenden Strömen. Die Änderungen sind entsprechend dem Fahrbetrieb der Züge (Beschleunigung – konstante Fahrt – Abbremsen) langsam und es kann ihnen eine Frequenz zwischen **0 Hz und 1 Hz** zugeordnet werden.

Die allgemeine Energieversorgung arbeitet mit einer Frequenz von **50 Hz**, dementsprechend haben auch die resultierenden elektrischen und magnetischen Felder eine Frequenz von **50 Hz**.

Auch wenn gleichstrombetriebene Bahnen nicht in den Anwendungsbereich der 26. BImSchV fallen, werden hier doch die entsprechenden Grenzwerte für 0 Hz verwendet. Dies erscheint deshalb sinnvoll, weil in der Allgemeinbevölkerung auch Träger aktiver Implantate sind, und für diese in der EMFV die Anwendung der Grenzwerte der 1999/519/EG empfohlen wird, die bei den hier relevanten Frequenzen 0 Hz und 50 Hz identisch sind mit denen der 26. BImSchV. Nachdem es keinen offensichtlichen Grund dafür gibt, dass Träger aktiver Implantate als Arbeitnehmer anders geschützt werden sollten als Teil der Allgemeinbevölkerung, werden die Grenzwerte der 26. BImSchV im Weiteren auch ganz allgemein als Grenzwerte zum Schutz von Trägern aktiver Implantate verwendet. Die (wesentlich höheren) Grenzwerte der Ratsempfehlung 1999/519/EG werden deshalb im Weiteren nicht verwendet.

Im Folgenden sind die für dieses Gutachten verwendeten Grenzwerte tabellarisch zusammengestellt.

Tabelle 1. Grenzwerte.

	Allgemeinheit und Träger aktiver Implantate (26. BImSchV)		Arbeitnehmer (EMFV)	
	$B_{\text{eff}}$	$E_{\text{eff}}$	$B_{\text{eff}}$	$E_{\text{eff}}$
0 Hz	500 $\mu\text{T}$	keine Angabe	2 T	28,2 kV/m
50 Hz	100 $\mu\text{T}$	5 kV/m *)	1,0 mT	10 kV/m *)

\*) Diese Grenzwerte werden im Weiteren nicht benötigt, da alle hier relevanten 50-Hertz-Anlagen bzgl. elektrischer Felder vollständig abgeschirmt sind.

## 4 Vorgehensweise

Für die Beurteilung der Niederfrequenzanlagen (50-Hz-Anlagen) werden der 10-kV-Mittelspannungsring, die beiden Tram-Gleichrichterwerke (TGW B1, TGW Ständlerstraße), 4 Mittelspannungsstationen (O-MSB1A, O-MSB1B, O-MSB1C, BDII) und 2 Mittelspannungskompaktstationen modelliert, für die Beurteilung der Gleichfelder die Straßenbahngleise und die zugehörigen Fahrdrähte.

Für die Ermittlung der Maximalwerte des Mittelspannungsringes werden die Magnetfelder unmittelbar über den Kabeln an der Geländeoberkante betrachtet; eine Betrachtung der elektrischen Felder ist nicht erforderlich, da der Schirm der Mittelspannungskabel und auch das umgebende Erdreich die elektrischen Felder vollständig abschirmen.

Für die Ermittlung der Maximalwerte im Umfeld der TGWs, der Mittelspannungsstationen und der Kompaktstationen werden jeweils die Gebäudehüllen betrachtet, d. h., die Maximalwerte an den Außenwänden bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die Mitarbeiter des Betriebshofes bzw. Besucher des Betriebshofes das Innere dieser Stationen nicht betreten dürfen. Es werden auch hierbei lediglich die Magnetfelder betrachtet, da die elektrischen Felder durch die Gebäudehüllen vollständig abgeschirmt sind.

Für die Ermittlung der Maximalwerte im Umfeld der Gleise werden die Abstellgleise im Nordosten des Betriebsgeländes betrachtet, da sich hier eine große Anzahl von Gleisen nebeneinander befinden und diese Gleise auch der angrenzenden Wohnbebauung am nächsten liegen.

## 5 Berechnung der elektromagnetischen Felder

### 5.1 Grundlagen

Die Berechnung erfolgt mit dem Programm WinField EP, Version 2021 auf Grundlage der DIN EN 50413 [13]. Modelliert werden die Anlagenteile, die wesentlich zur Immission elektrischer und/oder magnetischer Felder beitragen. Es sind dies alle offenen, spannungsführenden Anlagenteile und alle Anlagenteile, die große Ströme führen.

Zur Berechnung der Immission werden dabei stets die Nennspannungen und die Nennströme der Anlagenteile verwendet oder die Ströme, die durch eine technisch bedingte Grenze auf Dauer nicht überschritten werden können. Sonderereignisse, wie Kurzschlüsse in bestimmten Anlagenteilen, werden nicht betrachtet. Bei einem Teil der betrachteten Anlagenteile handelt es sich um Dreiphasensysteme. Es wird dabei stets davon ausgegangen, dass diese Systeme symmetrisch belastet sind, d. h., die Ströme in den drei Phasenleitern betragsmäßig gleich groß und um jeweils  $120^\circ$  bezüglich der Phase versetzt sind. Die Bezeichnungen L1, L2 und L3 beziehen sich dabei stets auf die Phasenlagen  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $240^\circ$ . Sofern die geometrische Anordnung der Phasenleiter bei einem System (noch) nicht bekannt ist, wird diejenige Anordnung gewählt, die zur höchsten Immission in der Umgebung der Anlage führt.

## 5.2 Berechnungsunsicherheit

Die Unsicherheit der Feldberechnung beträgt gemäß [14] maximal 1,4 %. Zusätzliche Unsicherheiten der Modellierung bleiben im Weiteren unberücksichtigt.

## 5.3 Modellbildung

Für den Neubau des Trambahnbetriebshofes wurden die nachfolgend beschriebenen Anlagenteile gemäß [15] – [33] modelliert.

### 1. Einspeisung

Einspeisung mit zwei Sonderkabeln vom Umspannwerk STA zum Mittelspannungsring (TGW B1)

Gesamtstrom: 2 x 413 A

Kabeltyp: je 3 x NA2XS2Y 1 x 240 mm<sup>2</sup>

### 2. Mittelspannungsring

verbindet das Tramgleichrichterwerk Ständlerstraße (TGW STS), das Tramgleichrichterwerk B1 (TGW B1N und TGW B1S) und die Mittelspannungsschaltanlagen (MSP) O-MSB1A, O-MSB1B, O-MSB1C, O-MSB1D

Gesamtstrom (Modellstrom): **413 A**

Kabeltyp: 3 x NA2XS2Y 1 x 240 mm<sup>2</sup>

### 3. TGW STS

- eine gasisolierte Mittelspannungsschaltanlage, Typ: 8DH10  
Modellspannung: 10 kV  
Modellstrom Sammelschiene: **413 A** (Maximalstrom Kabel)
- ein Eingangsfeld und ein Abgangsfeld zum MS-Ring:  
Modellstrom: je **413 A** (Maximalstrom Kabel)  
Kabeltyp: 3 x NA2XS2Y 1 x 240 mm<sup>2</sup> (je Feld)
- zwei Gleichrichter-Trafofelder:  
Abgangsstrom: je **101 A**  
Kabeltyp: N2XSH 1 x 70 mm<sup>2</sup>
- zwei Zwei-Wickler-Gießharz-Trocken-Transformatoren:  
Nennleistung pro Transformator: 1,75 MVA  
Kabelanbindung mittelspannungsseitig von oben  
niederspannungsseitig von oben und unten  
Modellspannung: 10 kV, Modellstrom: **101 A**  
Modellspannung: 610 V, Modellstrom: **1656 A**  
**(jeweils 828 A oben und unten)**  
U<sub>k</sub> Transformator 1: 7,5 %  
U<sub>k</sub> Transformator 2: 7,5 %
- zwei B12-Gleichrichter:  
Nur die AC-Seite wurde modelliert, die Kabelanbindung erfolgt von der Türseite des Gleichrichterschrankes aus dem Doppelboden.  
Modellspannung: 610 V

Der Transformatorstrom von 1656 A pro B12-Gleichrichter teilt sich auf zwei B6-Gleichrichter mit je 828 A auf und dieser dann pro Phase auf zwei Kabelverbindungen mit je 414 A von den Transformatoren zu den Gleichrichtern.

Je Transformator und Phase: vier Kabel mit einem Strom von jeweils **414 A**  
Kabeltyp: NHXSGAFHXOE 1 x 300 mm<sup>2</sup>

## 4. TGW B1

- eine luftisolierte Mittelspannungsschaltanlage (Nord), Typ: ABB ZS8.4  
Modellspannung: 10 kV  
Modellstrom Sammelschiene: **826 A**  
(Gesamtstrom Einspeisung Mittelspannungsring)
  1. ein Eingangsfeld und ein Abgangsfeld zum Mittelspannungsring und ein Verbindungsfeld zwischen beiden Mittelspannungsanlagen (Nord und Süd):  
Eingangs- bzw. Abgangsstrom: je **413 A**  
Kabeltyp: 3 x NA2XS2Y 1 x 240 mm<sup>2</sup> (je Feld)
  2. zwei Gleichrichter-Trafofelder (DC1):  
Abgangsstrom: je **144 A**  
Kabeltyp: N2XSH 1 x 70 mm<sup>2</sup>
- eine luftisolierte Mittelspannungsschaltanlage (Süd), Typ: ABB ZS8.4  
Modellspannung: 10 kV  
Modellstrom Sammelschiene: **826 A** (Gesamtstrom Einspeisung Mittelspannungsring)
  1. ein Eingangsfeld und ein Abgangsfeld zum Mittelspannungsring und ein Verbindungsfeld zwischen beiden Mittelspannungsanlagen (Nord und Süd):  
Eingangs- bzw. Abgangsstrom: je **413 A**  
Kabeltyp: 3 x NA2XS2Y 1 x 240 mm<sup>2</sup> (je Feld)
  2. zwei Gleichrichter-Trafofelder (DC2):  
Abgangsstrom: je **144 A**  
Kabeltyp: N2XSH 1 x 70 mm<sup>2</sup>
  3. ein Gleichrichter-Trafofeld (DC3):  
Abgangsstrom: je **133 A**  
Kabeltyp: N2XSH 1 x 70 mm<sup>2</sup>
- vier Vier-Wickler-Gießharz-Trocken-Transformatoren:  
Nennleistung pro Transformator: 2,5 MVA  
Kabelanbindung mittelspannungsseitig von oben  
unterspannungsseitig von oben und unten  
Modellspannung: 10 kV, Modellstrom: **144 A**  
Modellspannung: 610 V, Modellstrom: **2366 A**  
**(jeweils 1183 A oben und unten)**  
 $U_k$ : 7,5 %

- ein Trocken-Transformator:  
Nennleistung: 2,3 MVA  
Modellspannung: 10 kV, Modellstrom: **133 A**  
Modellspannung: 450 V, Modellstrom: **2951 A**  
 $U_k$  Transformator: 20,0 %
- vier B12-Gleichrichter (DC1 und DC2):  
nur die AC-Seite wurde modelliert, die Kabelanbindung erfolgt von der Wand des TGWs aus dem Doppelboden.  
Modellspannung: 610 V

Der Transformatorstrom von 2366 A pro B12-Gleichrichter teilt sich auf zwei B6-Gleichrichter mit je 1183 A auf und dieser dann pro Phase auf zwei Kabelverbindungen mit je 592 A von den Transformatoren zu den Gleichrichtern.

je Transformator und Phase:  
vier Kabel mit einem Strom von jeweils **592 A**  
Kabeltyp: NHXSGAFHXOE 1 x 300 mm<sup>2</sup>

- ein spannungsverstellbarer Gleichrichter:  
nur die AC-Seite wurde modelliert, die Kabelanbindung erfolgt von der Wand des TGWs aus dem Doppelboden.  
Modellspannung: 450 V, Modellstrom: **2951 A**  
je Transformator und Phase:  
sieben Kabel mit einem Strom von jeweils **422 A**  
Kabeltyp: NHXSGAFHXOE 1 x 300 mm<sup>2</sup>

*Anmerkung:*

Für den spannungsverstellbaren Gleichrichter lag kein Maßbild vor. Es wurde deshalb der grobe Aufbau eines 3,6 m breiten B6-Gleichrichters als Modell verwendet, bestehend aus 1,2 m breiten Schaltschränken für jede Phase.

## 5. Mittelspannungsstationen O-MSB1A, O-MSB1B, O-MSB1C

Die o. g. Mittelspannungsstationen sind ähnlich aufgebaut, sie unterscheiden sich lediglich in dem genauen Aufbau der Niederspannungshauptverteilungen. Es wird hier deshalb nur der allgemeine Aufbau beschrieben (Details siehe [29], [30], [31] und [32]).

- eine Mittelspannungsschaltanlage vom Typ ABB ZS8.4:  
Sammelschiene: Modellspannung: 10 kV,  
Modellstrom: **413 A** (Maximalstrom Kabel)  
ein Eingangsfeld und ein Abgangsfeld zum Mittelspannungsring:  
Modellspannung: 10 kV,  
Modellstrom: **413 A** (Maximalstrom Kabel)  
Zwei Transformatorfelder: Modellspannung: 10 kV, Modellstrom: **36 A**

- zwei 630 kVA-Transformatoren:  
Modellspannung: 10 kV, Modellstrom: **36 A**  
Modellspannung: 0,4 kV, Modellstrom: **909 A**  
 $U_k = 6 \%$
- eine Niederspannungshauptverteilung vom Typ Siemens Sivacon:  
Transformatoranbindung mittig, der Gesamtstrom von **1819 A** wird  
gleichmäßig auf alle Abgänge aufgeteilt.

## 6. Mittelspannungs-Kompaktstation O-MSB1D

Die Kompaktstation ist 55 cm im Boden eingegraben. Sowohl die Mittelspannungskabel als auch die Niederspannungskabel verlaufen außerhalb der Station in einer Tiefe von 80 cm unter GOK und sind im Dreieck verlegt. Innerhalb der Station sind die Kabel flach verlegt.

- eine gasisolierte Mittelspannungsschaltanlage, Typ: 8DJH  
Höhe der Sammelschienen: zwischen 1,36 m und 1,4 m über GOK  
Ein- bzw. Abgänge von unten

Mittelspannungsring:

ein Eingangsfeld und ein Abgangsfeld:

Eingang-/Abgangsstrom: **413 A** (Maximalstrom Kabel)

Kabeltyp: 3 x NA2XS2Y 1 x 240 mm<sup>2</sup>

ein Trafofeld:

Abgangsstrom: je **36 A**

Kabeltyp: NA2XS(F)2Y 3 x 1 x 240 mm<sup>2</sup>

Verlegetiefe: 30 cm über UK Station

- ein 630-kVA-Öl-Transformator:  
steht auf dem Stationsboden  
Kabelanbindung mittelspannungsseitig von unten  
niederspannungsseitig von oben  
Modellspannung: 10 kV, Modellstrom: **36 A**  
Modellspannung: 400 V, Modellstrom: **909 A**  
 $U_k: 4 \%$   
  
Verbindung zwischen Transformator und Niederspannungsverteilung:  
Kabeltyp: NAYY 8 x 1 x 300 mm<sup>2</sup>  
Verlegetiefe: 36 cm unter der Decke
- eine Niederspannungsverteilung:  
Traf oanbindung mittig über einen Leistungsschalter  
(Modellspannung: 0,4 kV, Modellstrom: **909 A**)  
Höhe untere Sammelschiene: 34 cm über GOK  
Phasenabstand der Sammelschienen: 18,5 cm  
14 Abgänge über NH2-Sicherungslastschaltleisten  
gleichmäßige Stromaufteilung auf alle Abgänge  
Kabeltyp: NA2XY 4 x 150 mm<sup>2</sup>

## 7. Niederspannungshauptverteilung BDII

Eine Niederspannungshauptverteilung vom Typ Siemens Sivacon:  
Transformatoranbindung mittig, der Gesamtstrom von 260 A (wird von der NSHV der Station WL gespeist) wird gleichmäßig auf alle Abgänge aufgeteilt

## 8. Mittelspannungskompaktstation des lokalen Stromversorgers VNB-STS

Nahezu identisch zu O-MSB1D  
Einziger Unterschied: ein Eingangsfeld und ein Abgangsfeld mit Strom: 36 A

## 9. Abstellgleis im Nord-Osten des Geländes:

Für die Modellierung der Gleise wurden folgende technische Daten verwendet:

Spurweite:	1435 mm
Fahrdrahthöhe:	5500 mm
Maximalstrom pro Gleis:	1000 A
Fahrdrahtspannung:	DC 750 V
Fahrdrahtquerschnitt:	2x120 mm <sup>2</sup> , Einzelleiterabstand: 7 cm

### *Annahme:*

Zur Ermittlung der maximalen magnetischen Flussdichte wurde eine Schienenhöhe von 18 cm angenommen sowie ein (unendlich dünner) Stromfaden in der Mitte der Schiene in 9 cm Höhe. Eine Person kann sich damit bis auf 9 cm diesem Stromfaden nähern, als Maximalwert der magnetischen Flussdichte an der Schienenoberfläche wurde deshalb der Wert in 9 cm Abstand vom Stromfaden verwendet.

Die Geometrie der Modellierung ist exemplarisch für die beiden Gleichrichterwerke, eine Kompaktstation und eine Mittelspannungsanlage in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

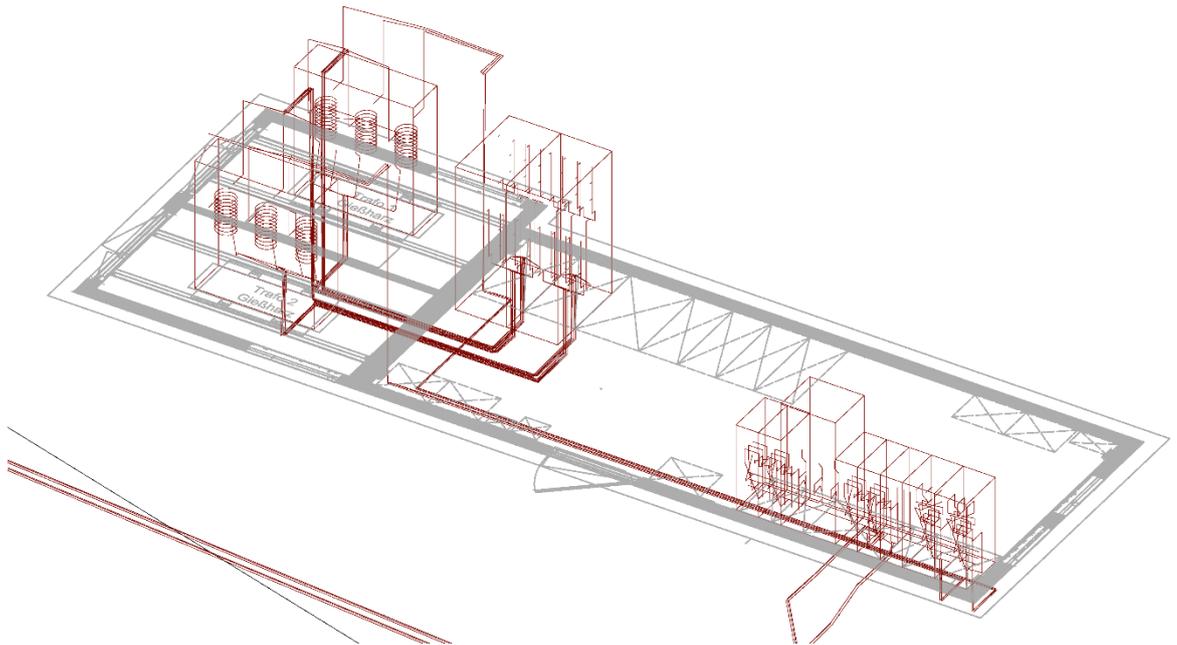


Abbildung 1. Isometrie TGW STS.

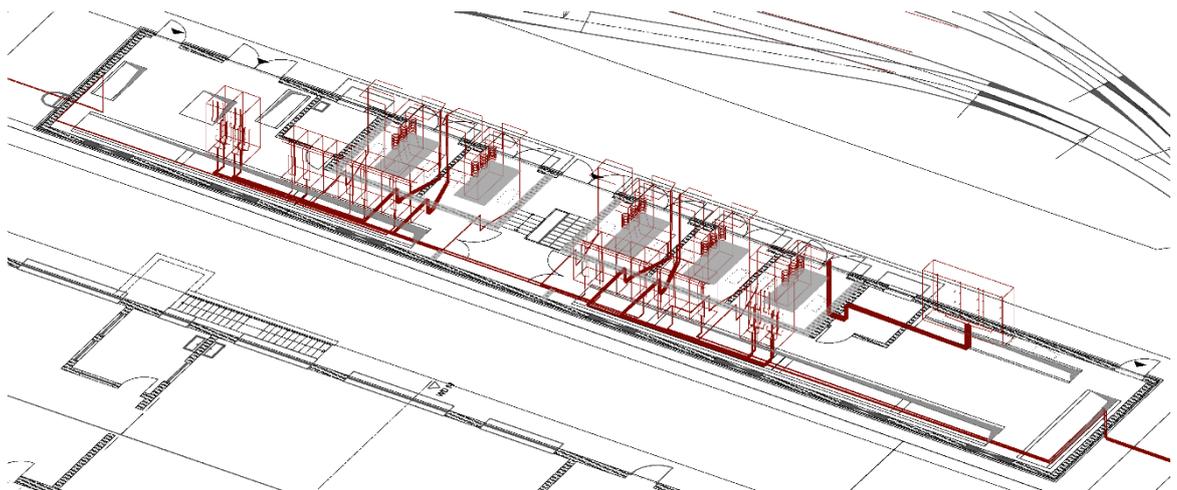


Abbildung 2. Isometrie TGW B1.

\\S-muc-fs01\allefirmen\W\Proj\140\W140260\W140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

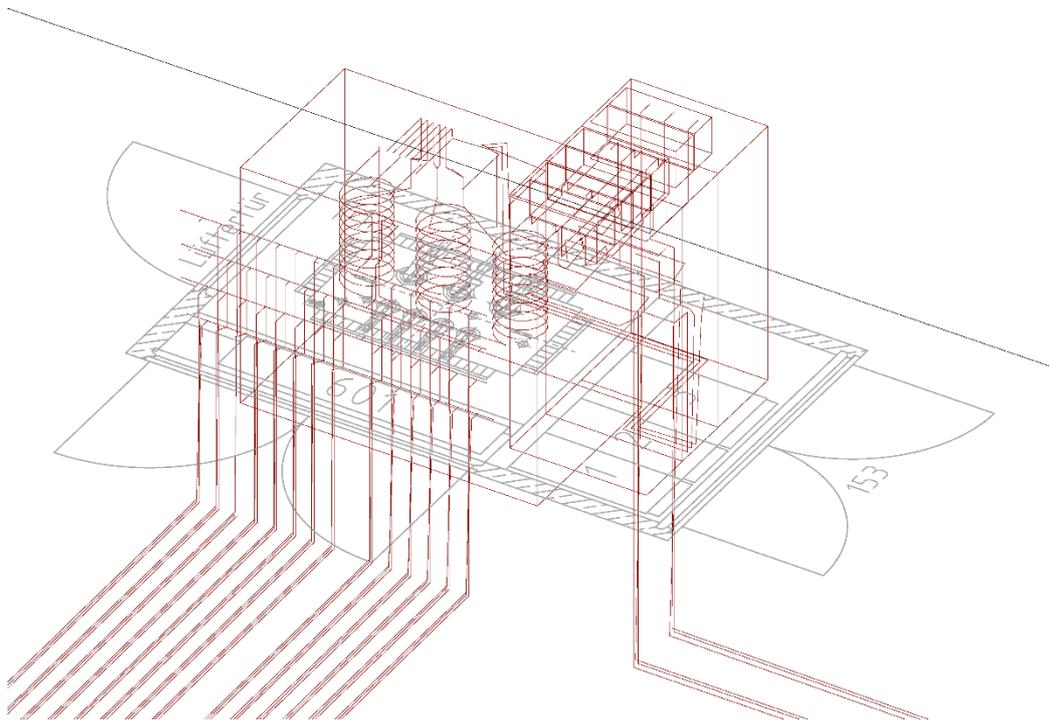


Abbildung 3. Isometrie Kompaktstation O-MSB1D.

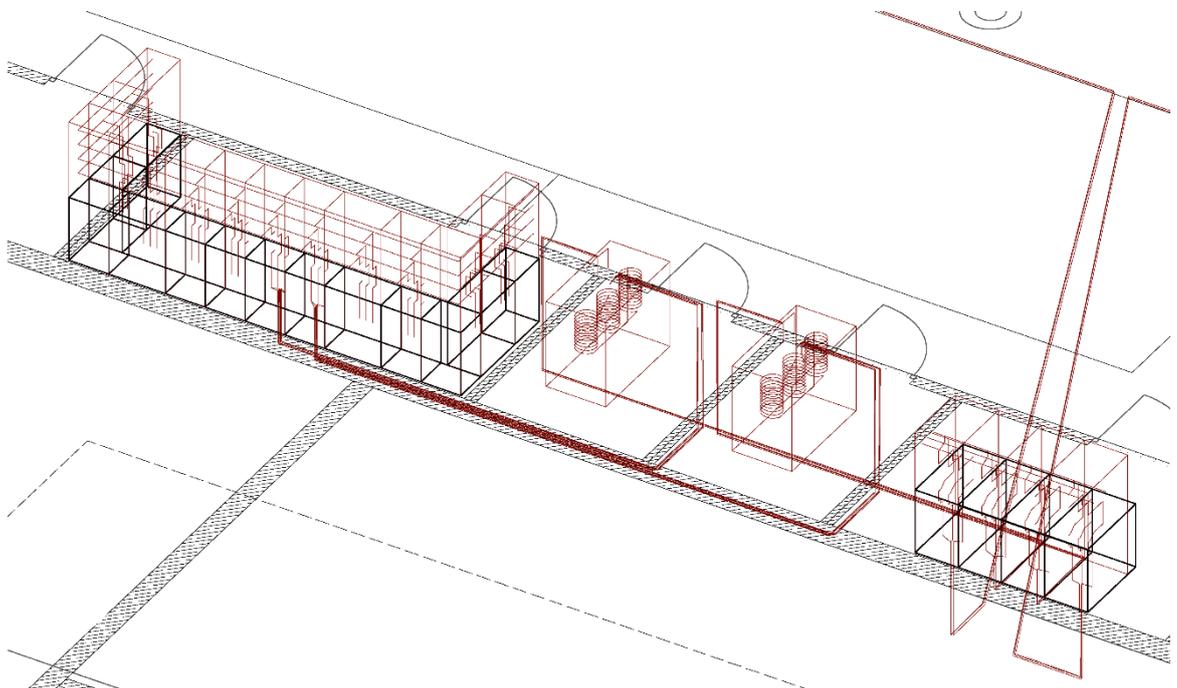


Abbildung 4. Isometrie O-MSB1A.

\\S-muc-fs01\allefirmen\W\Proj\140\M140260\M140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

## 6 Ergebnisse

Die Grenzwerte der EMFV zum Schutz von Arbeitnehmern (vgl. Tabelle 1, Grenzwerte) werden überall eingehalten und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Im Anhang werden folgende Ergebnisse dargestellt:

- Gesamtgelände, Berechnung der magnetischen Flussdichte der Niederfrequenzanlagen (50-Hertz-Anlagen) in 1 m Höhe. Die Darstellung dient der Übersicht über das Gelände und der Lage der Einzelanlagen, aber nicht der Ermittlung der Maximalwerte.
- Mittelspannungsring, Berechnung der magnetischen Flussdichte in einem Querschnitt senkrecht zur Kabelführung zur Ermittlung des Maximalwertes an der Geländeoberkante
- TGW B1, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle
- TGW Ständlerstraße (STS), Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle
- Mittelspannungsstation O-MSB1A, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle
- Mittelspannungsstation O-MSB1A, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden
- Mittelspannungsstation O-MSB1B, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle
- Mittelspannungsstation O-MSB1B, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden
- Mittelspannungsstation O-MSB1C, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle
- Mittelspannungsstation BDII, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden
- Mittelspannungskompaktstation (die beiden Stationen vom Aufbau und den elektrischen Parametern identisch), Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle
- Gleisanlagen, Berechnung des magnetischen Gleichfeldes in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen

- Gleisanlagen, Berechnung des magnetischen Gleichfeldes in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen; Zoom auf ein Gleis
- Gleisanlagen, Berechnung des elektrischen Gleichfeldes in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen
- Gleisanlagen, Berechnung des elektrischen Gleichfeldes in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen; Zoom auf ein Gleis

Die Berechnungsaufösung beträgt 1 m x 1 m für das Gesamtgelände, 0,1 m x 0,1 m für die Darstellung aller anderen Berechnungen und 0,01 m x 0,01 m für die Ermittlung der Maximalwerte.

Im Folgenden sind die Maximalwerte tabellarisch zusammengefasst. Bei den Gleisanlagen sind diejenigen Abstände angegeben, bei denen die Grenzwerte der 26. BImSchV eingehalten sind. Die Grenzwerte der EMFV sind dann ohnehin auch eingehalten, da diese deutlich höher sind als diejenigen der 26. BImSchV. Grenzwertüberschreitungen sind rot dargestellt.

Tabelle 2. Maximalwerte.

Anlage	Maximalwert	Anmerkung	Berechnungshöhe	Abb.
Mittelspannungsring	$B = 10 \mu\text{T}$	An der Geländeoberkante. Gültig für den gesamten Mittelspannungsring	- 2 m bis 2 m	A2
TGW B1	$B_{\text{max}} = 146 \mu\text{T}$	Im Bereich der beiden nördlichen B12-Gleichrichter. Der Grenzwert wird ab einem Abstand von 30 cm von der Gebäudeaußenwand eingehalten. Weitere Überschreitungen treten bei den beiden südlichen B12-Gleichrichtern auf.	1,72 m	A3
TGW STS	$B_{\text{max}} = 122 \mu\text{T}$	Im Bereich der Einführung der Mittelspannungskabel. Der Grenzwert wird ab einem Abstand von 10 cm von der Gebäudeaußenwand eingehalten.	0,4 m	A4
O-MSB1A	$B_{\text{max}} = 236 \mu\text{T}$	Im Bereich der NSHV. Der erforderliche Abstand beträgt 30 cm.	1,60 m	A5
O-MSB1A	$B_{\text{max}} = 5 \mu\text{T}$	Im 1. OG über den Schaltanlagen	3,92 m	A6
O-MSB1B	$B_{\text{max}} = 188 \mu\text{T}$	Im Bereich der NSHV. Der erforderliche Abstand beträgt 30 cm.	1,59 m	A7
O-MSB1B	$B_{\text{max}} = 4 \mu\text{T}$	Im 1. OG über den Schaltanlagen	3,92 m	A8
O-MSB1C	$B_{\text{max}} = 208 \mu\text{T}$	Im Bereich der NSHV. Der erforderliche Abstand beträgt 20 cm.	1,59 m	A9
BD II	$B_{\text{max}} = 1 \mu\text{T}$	Im EG über den Schaltanlagen	0 m	A10
O-MSB1D	$B_{\text{max}} = 390 \mu\text{T}$	Im Bereich der NSHV. Der erforderliche Abstand beträgt 30 cm.	0,51 m	A11
Gleisanlagen	$B_{\text{max}} = 1250 \mu\text{T}$	An der Schienenoberfläche. Der Grenzwert wird ab einem Abstand von 20 cm über der Schienenoberfläche eingehalten.  (Der Fahrstrom ist nur nachts an kalten Wintertagen aufgrund der Heizung der Fahrzeuge sehr hoch. Tagsüber ist der Fahrstrom sehr gering, da sich die Straßenbahnfahrzeuge auf der Strecke befinden.)	0,18 m	A13
Gleisanlagen	$E_{\text{max}} = 3,4 \text{ kV/m}$	An der Fahrdrachtoberfläche. In 1 m Abstand vom Fahrdrach beträgt die elektrische Feldstärke 126 V/m.	5,50 m	A15

## 7 Beurteilung gemäß 26. BImSchVVwV

### 7.1 Vorprüfung

Sowohl die Gleichrichterwerke als auch die Mittelspannungsstationen werden zur Beurteilung gemäß 26. BImSchVVwV als Ortsnetzumspannstationen betrachtet. Der Einwirkungsbereich für solche Anlagen beträgt 10 m.

Innerhalb des Einwirkungsbereichs um die Gleichrichterwerke TGW B1 und TGW STS, die Kompaktstationen O-MSB1D und VNB-STs, sowie die Mittelspannungsstation O-MSB1C befinden sich keine Orte, welche zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind. Für diese ist deshalb keine Minimierung gemäß 26. BImSchVVwV durchzuführen.

Im 1. OG oberhalb der Mittelspannungsstationen O-MSB1A und O-MSB1B befinden sich Pausenräume, welche zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind; deshalb ist hier eine Minimierung elektrischer und magnetischer Felder gemäß 26. BImSchVVwV durchzuführen.

Innerhalb des Einwirkungsbereichs der Drehstromkabel des Mittelspannungsringes von 10 m an der nördlichen Grenze des Betriebsgeländes befinden sich Grundstücke, welche zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind; deshalb ist hier ebenfalls eine Minimierung elektrischer und magnetischer Felder gemäß 26. BImSchVVwV durchzuführen.

M140260/05  
14. März 2023  
Version 1  
MART/WDN

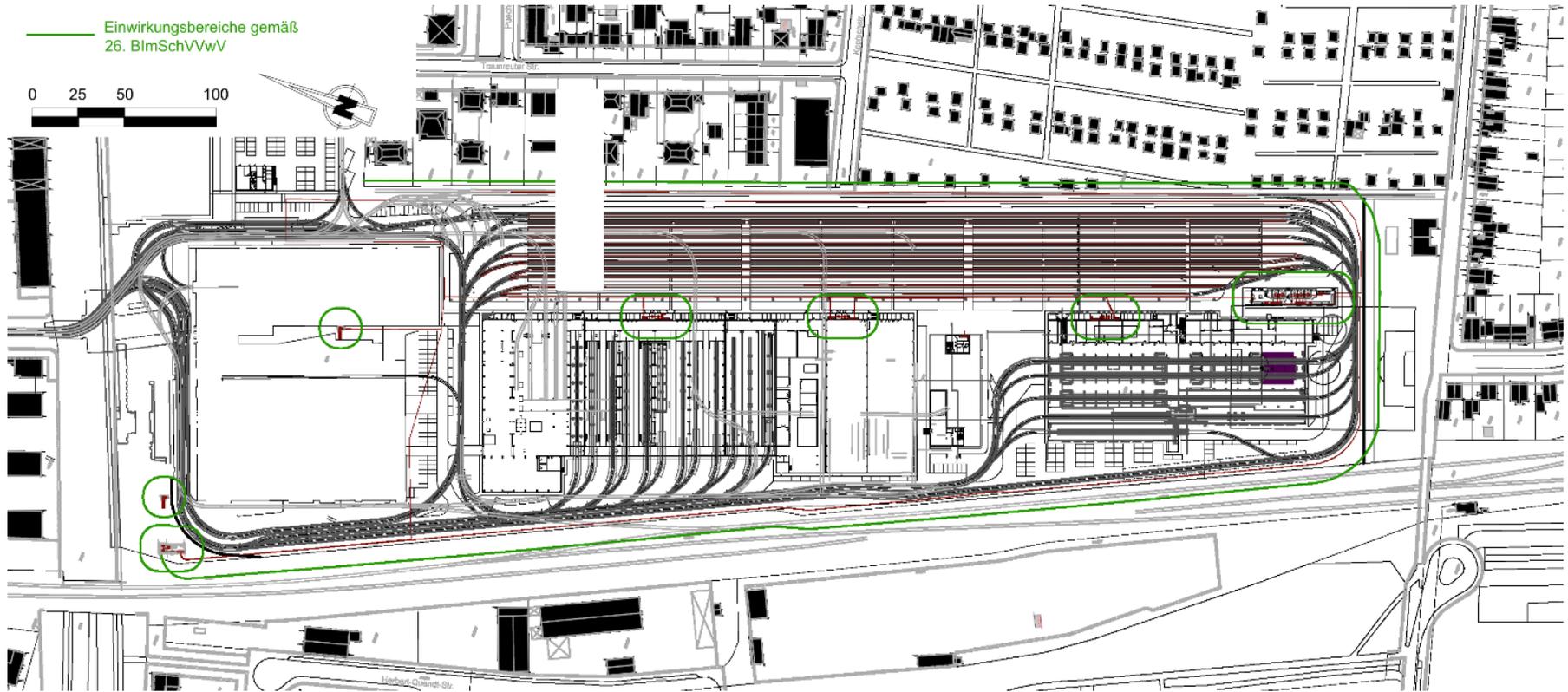


Abbildung 5. Einwirkungsbereiche der elektrotechnischen Anlagen.

## 7.2 Minimierungsmaßnahmen Mittelspannungsstationen

Für die Mittelspannungsstationen sind drei Minimierungsmaßnahmen zu prüfen: Abstandsoptimierung (größtmögliche Distanz von feldverursachenden Anlagenteilen zum maßgeblichen Minimierungsort), Minimieren der Distanz zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung, Optimierung von Einspeisung und Abgängen der Niederspannungsverteilung.

### Abstandsoptimierung

Bei dieser Maßnahme werden die Anlagenteile, welche maßgeblich zur Emission magnetischer Felder beitragen, in größtmöglichem Abstand zum maßgeblichen Minimierungsort errichtet. Leitungen sollten auf dem kürzestmöglichen Weg und am weitesten entfernt vom maßgeblichen Minimierungsort geführt werden.

In den Mittelspannungsstationen O-MSB1A und O-MSB1B verlaufen die Kabel bereits auf kürzestmöglichem Weg im Doppelboden und die Transformatoranbindung erfolgt von unten. Da sich die maßgeblichen Minimierungsorte oberhalb der Mittelspannungsstation befinden, befinden sich die elektrotechnischen Anlagen bereits in größtmöglichem Abstand zum maßgeblichen Minimierungsort. Das Minimierungspotential ist deshalb bereits ausgeschöpft.

### Minimieren der Distanz zwischen Betriebsmitteln unterschiedlicher Phasenbelegung

Um eine bestmögliche Kompensation elektrischer und magnetischer Felder, ausgehend von 3-Phasen-Wechselstrom zu gewährleisten, sollten Betriebsmittel unterschiedlicher Phase möglichst nah zusammen und kompakt errichtet werden. Voraussetzung dabei ist das Beachten von technischen Randbedingungen, sowie das Einhalten von Mindestluftisolierstrecken zwischen Betriebsmitteln unterschiedlicher elektrischer Potentiale.

Die Kabel sind hier bereits kompakt im Dreieck verlegt und die Schaltschränke entsprechen dem Stand der Technik. Das Minimierungspotential ist hier also ausgeschöpft.

### Optimierung von Einspeisung und Abgängen der Niederspannungsverteilung

An der Niederspannungshauptverteilung sollte die Transformatoranbindung so platziert werden, dass die felderzeugenden Ströme minimiert werden. Dies erfolgt durch den Anschluss der Transformatorleitung in der Mitte der Niederspannungshauptverteilung.

Diese Maßnahme ist hier bereits umgesetzt.

### 7.3 Minimierungsmaßnahmen Drehstromerdkabel im Mittelspannungsring

Bei Drehstromerdkabeln sind grundsätzlich vier Minimierungsmaßnahmen zu prüfen: Minimierung der Kabelstände, Optimieren der Leiteranordnung (Anschlussreihenfolge der Drehstromleiter an die Erdkabel), Optimieren der Verlegegeometrie (horizontal, vertikal oder im Dreieck) und Optimierung der Verlegetiefe.

#### **Minimieren der Kabelabstände**

Die Kabel sollten in möglichst geringem Abstand zueinander verlegt werden. Dies beinhaltet sowohl den Kabelabstand innerhalb eines Stromkreises sowie zu anderen Stromkreisen.

Diese Maßnahme ist hier bereits umgesetzt.

#### **Optimieren der Leiteranordnung**

Bei einer vorgegebenen geometrischen Anordnung der Kabel wird die Phasenlage so gewählt, dass sich die magnetischen Felder bestmöglich kompensieren. Diese Maßnahme ist umso effektiver, je geringer die Leiterabstände sind.

Diese Maßnahme ist hier bereits umgesetzt.

#### **Optimieren der Verlegegeometrie**

Die Kabel werden so verlegt, dass sich die magnetischen Felder bestmöglich kompensieren. Die Kabel können horizontal oder vertikal in einer Ebene oder im Dreieck verlegt werden. Bei kleinen Leiterseilquerschnitten ist auch eine Verdrillung der Kabel möglich. Eine Verlegung im Dreieck oder eine Verdrillung sind für die Kompensation des magnetischen Feldes günstig.

Im vorliegenden Fall sind die Kabel im Sinne der Minimierung der Magnetfelder optimal im Dreieck verlegt.

#### **Optimieren der Verlegetiefe**

Die Kabel sollten möglichst tief im Boden verlegt werden. Dabei ist die Bodenbeschaffenheit und die vor Ort gegebene Infrastruktur zu beachten. Außerdem verschlechtert sich die Wärmeabfuhr mit zunehmender Verlegetiefe.

Diese Maßnahme wird unter Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit und der vor Ort gegebenen Infrastruktur umgesetzt.

## Anhang

### Darstellung der Berechnungsergebnisse

\\S-muc-fs01\allefirmen\W\Proj\140\W140260\W140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

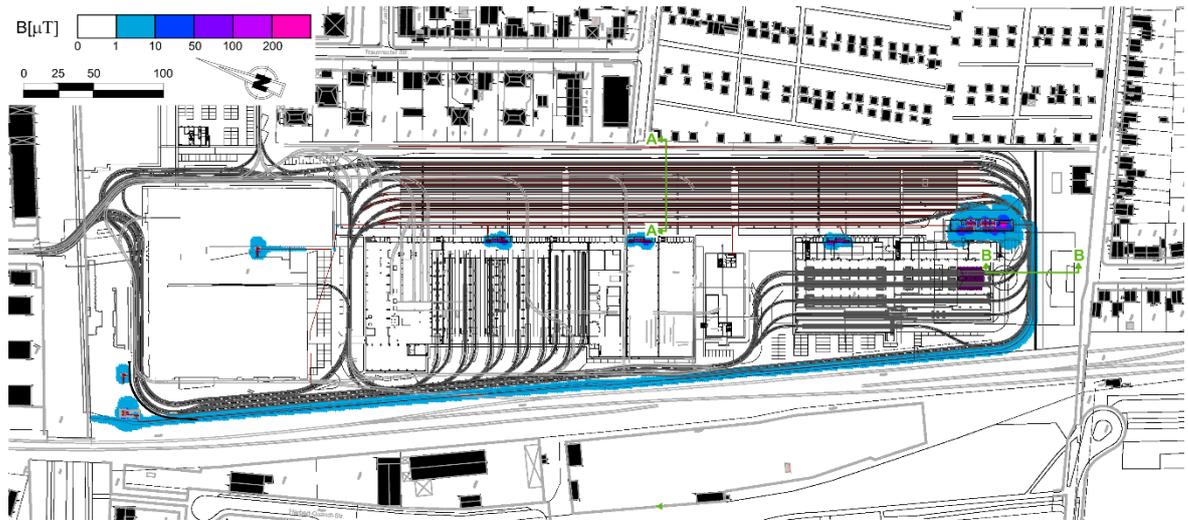


Abbildung A 1. Gesamtgelände, Berechnung der magnetischen Flussdichte der Niederfrequenzanlagen (50-Hertz-Anlagen) in 1 m Höhe.

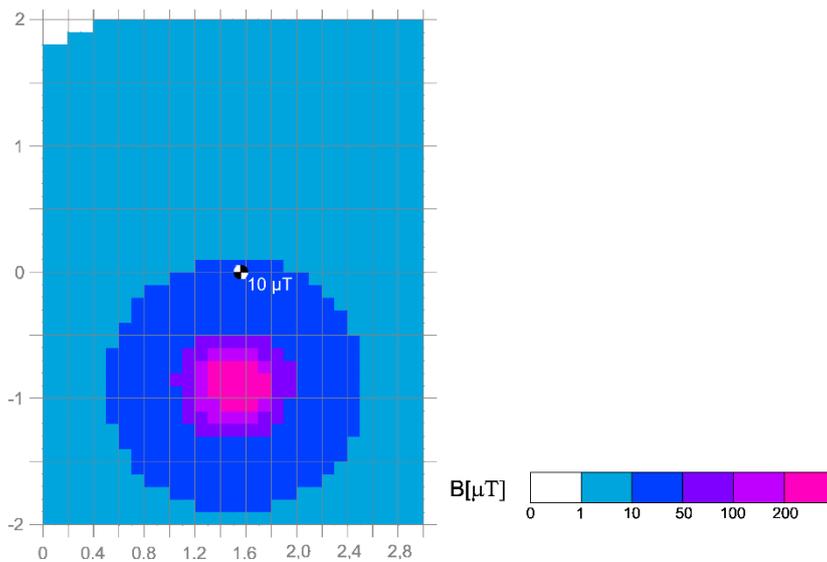


Abbildung A 2. Mittelspannungsring, Berechnung der magnetischen Flussdichte in einem Querschnitt senkrecht zur Kabelführung.

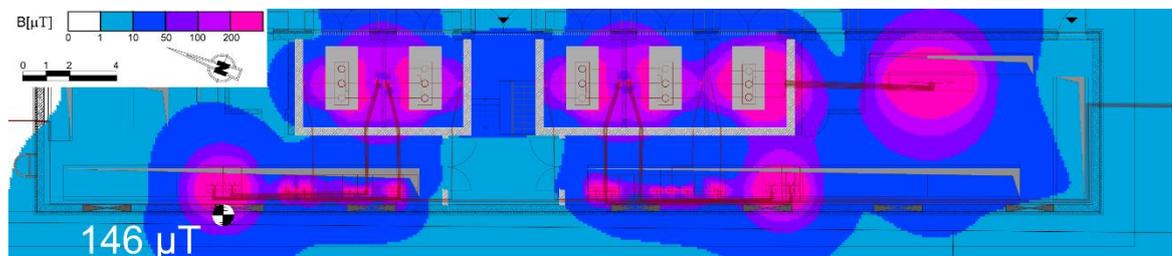


Abbildung A 3. TGW B1, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.

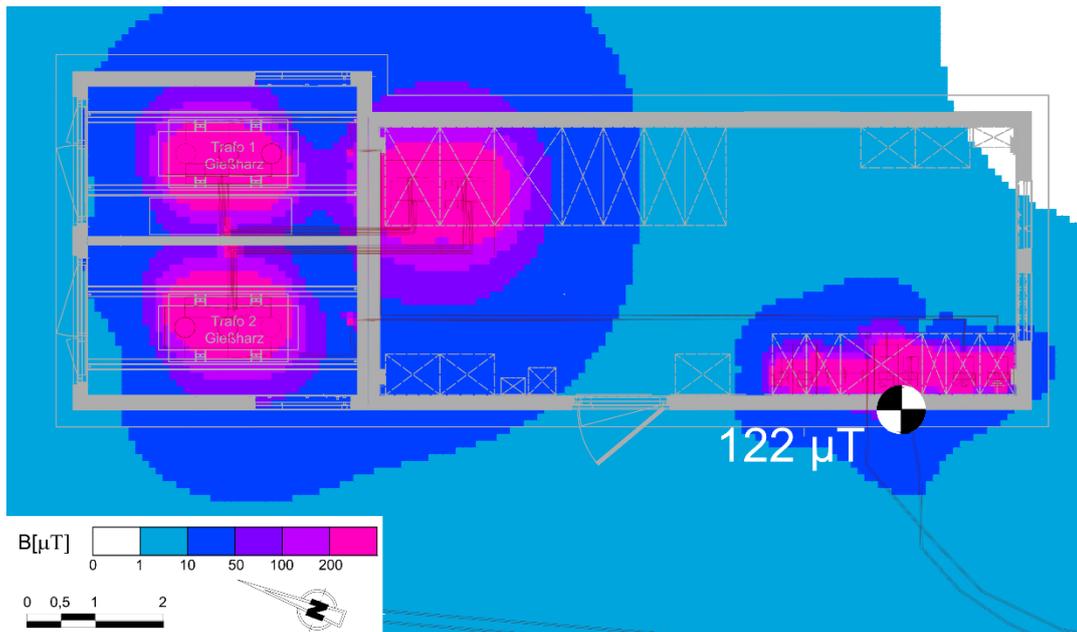


Abbildung A 4. TGW Ständlerstraße, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.

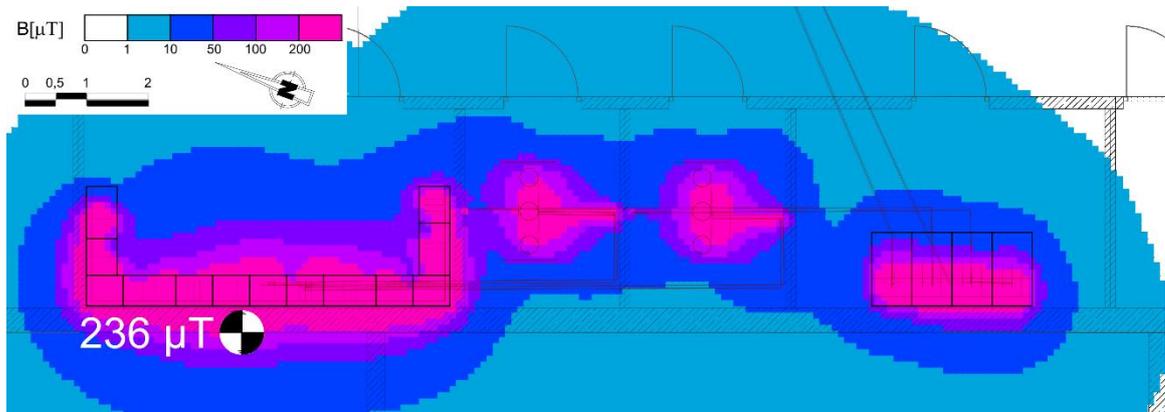


Abbildung A 5. Mittelspannungsstation O-MSB1A, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.

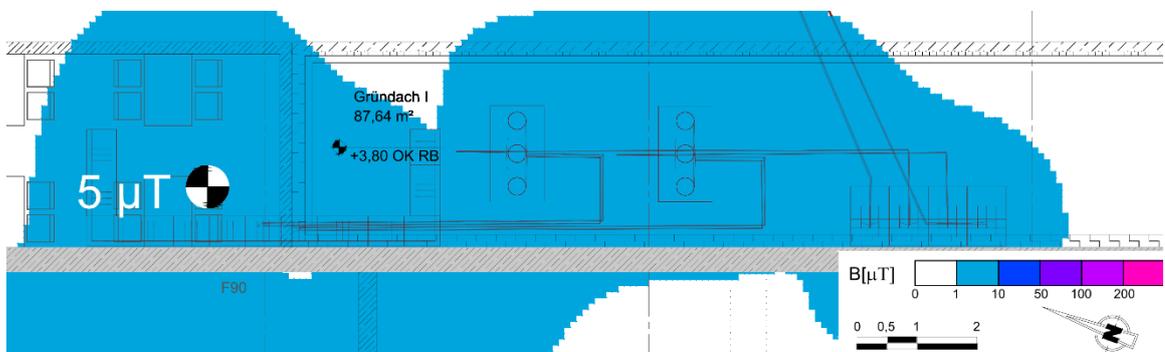


Abbildung A 6. Mittelspannungsstation O-MSB1A, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden.

\\S-muc-is01\allefirmen\WP\Proj\140\W140260\W140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

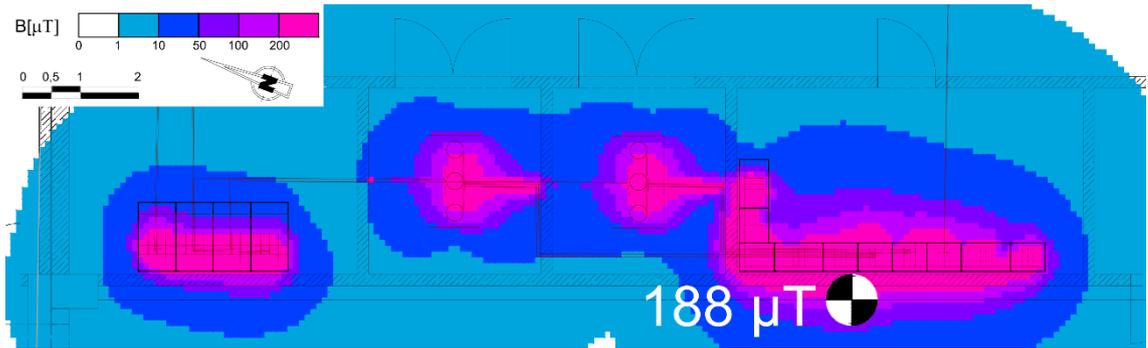


Abbildung A 7. Mittelspannungsstation O-MSB1B, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.

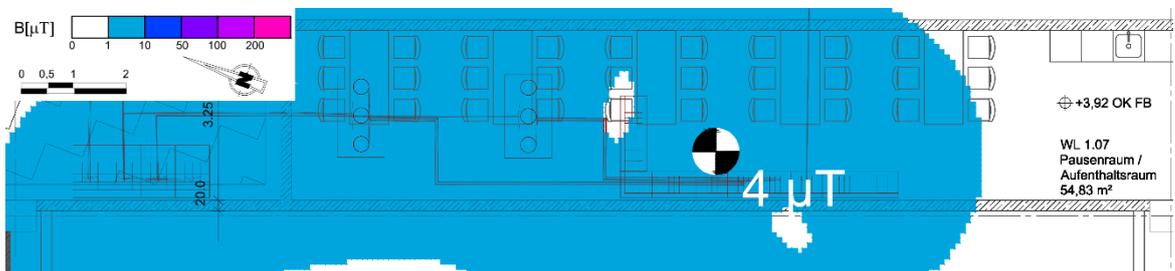


Abbildung A 8. Mittelspannungsstation O-MSB1B, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden.

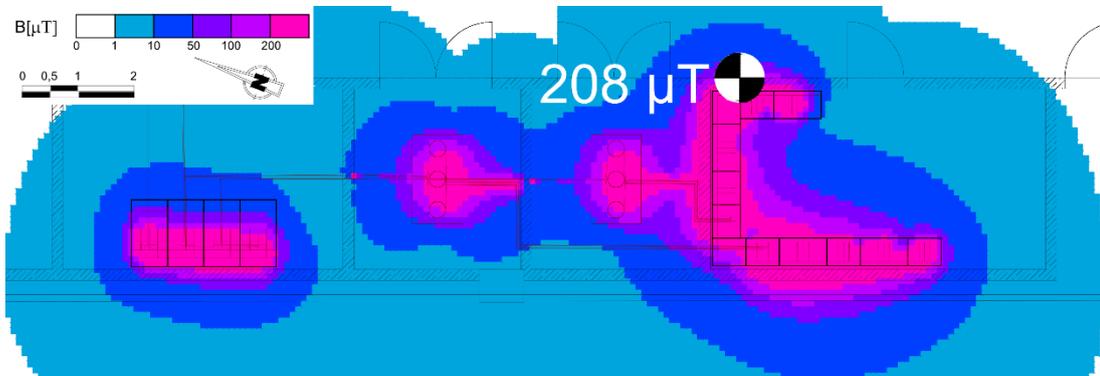


Abbildung A 9. Mittelspannungsstation O-MSB1C, Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.

\\S-muc-fs01\allefirmen\W\Proj\140\W140260\W140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

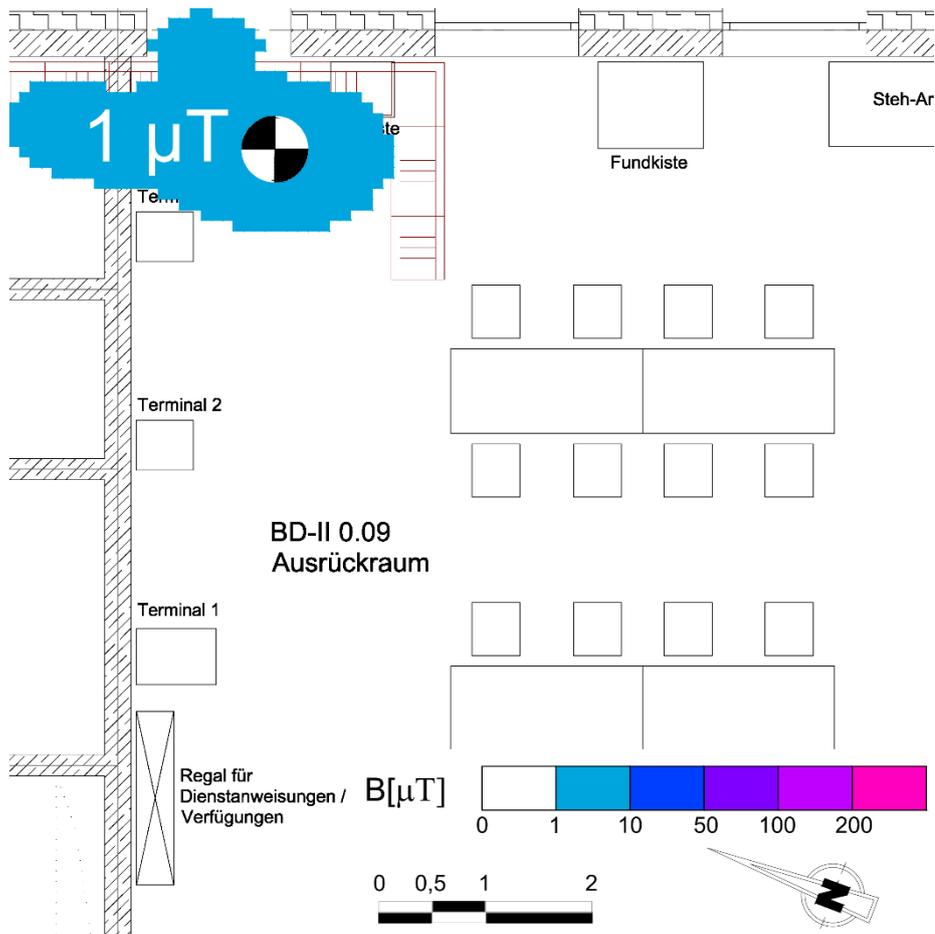


Abbildung A 10. Mittelspannungsstation BDII, Berechnung der magnetischen Flussdichte in den über der Station liegenden Räumlichkeiten in Höhe der Oberkante Fertigfußboden.

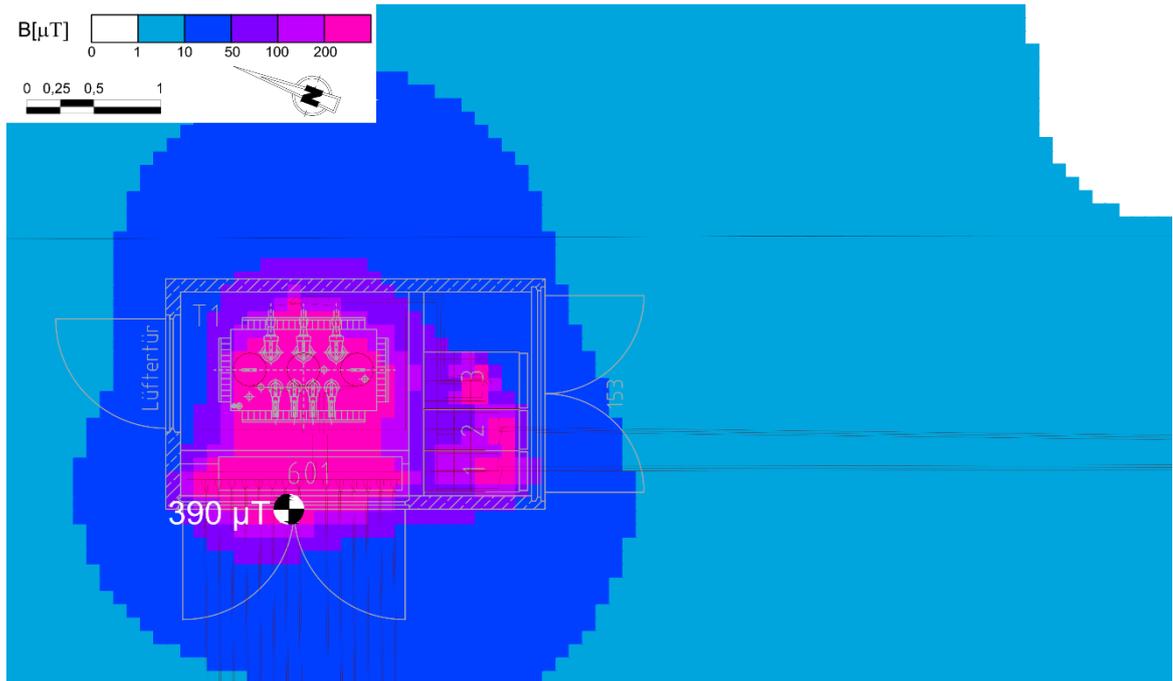


Abbildung A 11. Mittelspannungskompaktstation (die beiden Stationen vom Aufbau und den elektrischen Parametern identisch), Berechnung der magnetischen Flussdichte in der Höhe des Maximalwertes an der Außenhülle.

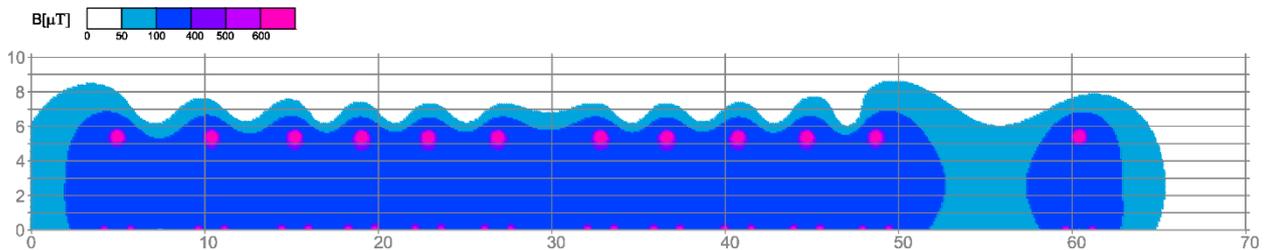


Abbildung A 12. Gleisanlagen, Berechnung der magnetischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen.

\\S-muc-fs01\allefirmen\W\Proj\140\W140260\W140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

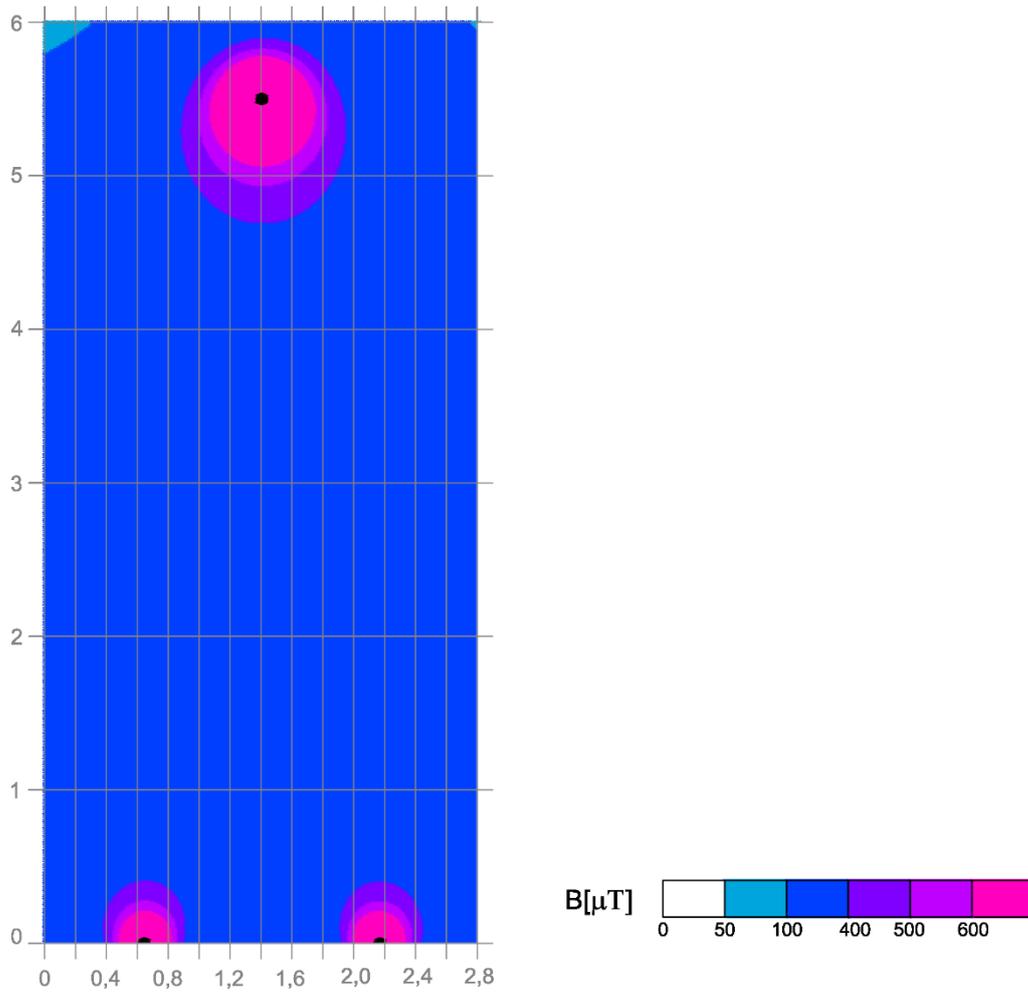


Abbildung A 13. Gleisanlagen, Berechnung der magnetischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen; Zoom auf ein Gleis.

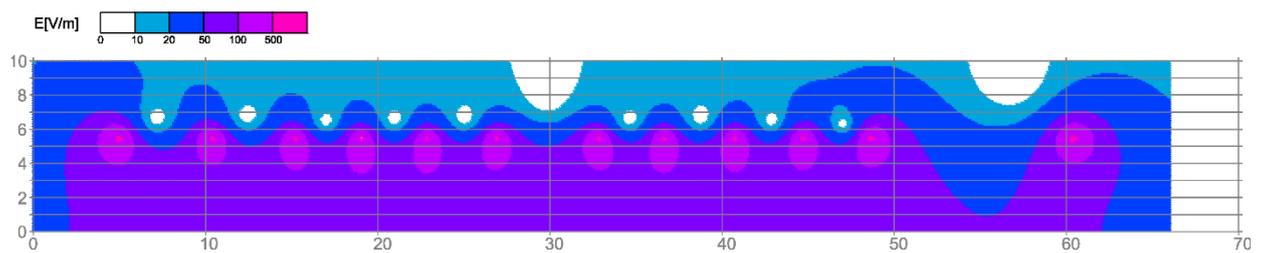


Abbildung A 14. Gleisanlagen, Berechnung der elektrischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen.

\\S-muc-fs01\allefirmen\WP\Proj\140\M140260\M140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023

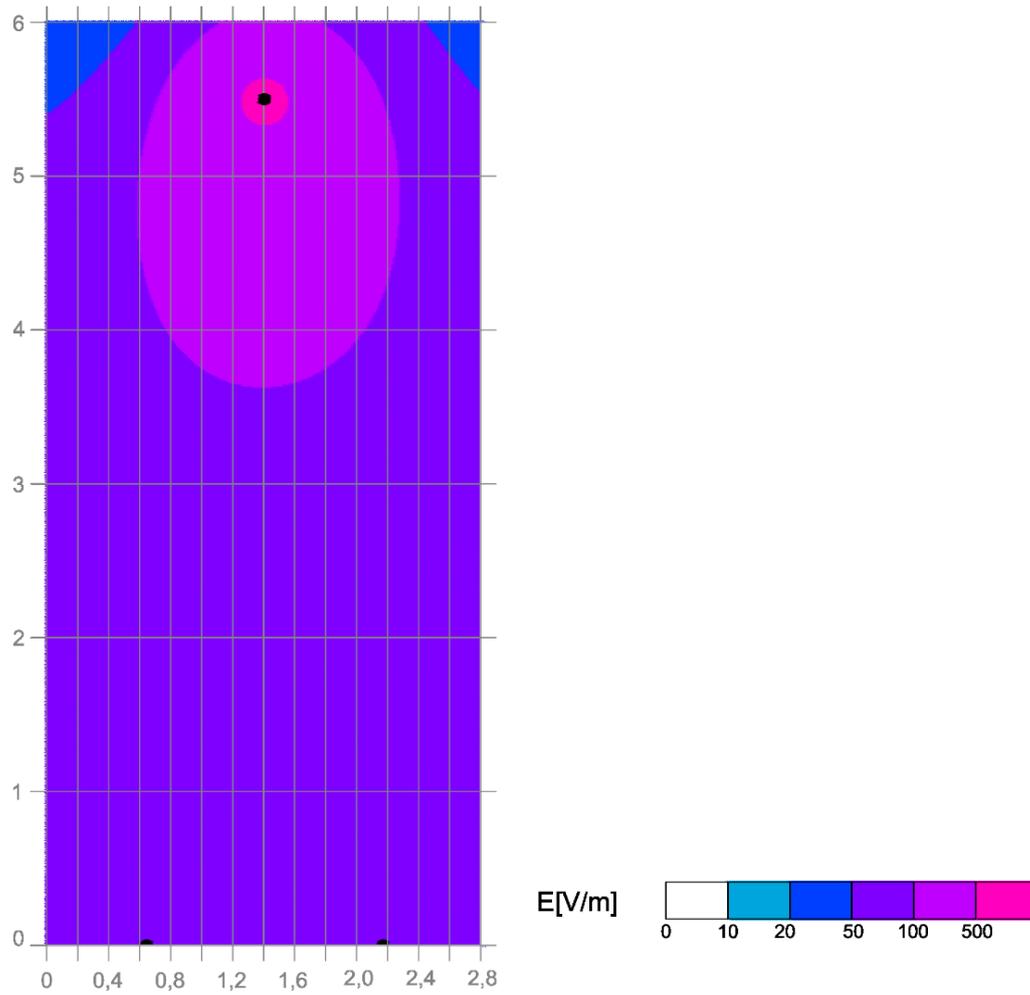


Abbildung A 15. Gleisanlagen, Berechnung der elektrischen Gleichfelder in einem Querschnitt senkrecht zu den Gleisen; Zoom auf ein Gleis.

\\S-muc-fs01\allefirmen\W\Proj\140\M140260\M140260\_05\_BER\_1D.DOCX:14. 03. 2023