

Müller-BBM GmbH
Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5
82152 Planegg bei München

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

www.MuellerBBM.de

Dr.-Ing. Gisbert Gralla
Telefon +49(89)85602 248
Gisbert.Gralla@mbbm.com

02. August 2021
M157090/04 Version 1 GRL/WDN

Neubaustrecke „Tram Münchner Norden, Planfeststellungsabschnitt 1“

Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit

Bericht Nr. M157090/04

Auftraggeber:	SWM Stadtwerke München GmbH Emmy-Noether-Straße 2 80992 München
Bearbeitet von:	Dr.-Ing. Gisbert Gralla M. Sc. Felix Martin
Berichtsumfang:	20 Seiten insgesamt, davon 15 Seiten Text und 5 Seiten Anhang

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

Geschäftsführer:
Joachim Bittner, Walter Grotz,
Dr. Carl-Christian Hantschk,
Dr. Alexander Ropertz,
Stefan Schierer, Elmar Schröder

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	3
1	Situation und Aufgabenstellung	5
2	Verwendete Literatur	6
3	Rechtliche Grundlagen	8
3.1	Schutz von Personen	8
3.2	Träger aktiver oder passiver Körperhilfsmittel	9
3.3	Störungen von elektrischen Geräten	10
3.4	Grenzwerte	11
4	Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder	13
4.1	Grundlagen	13
4.2	Berechnungsunsicherheit	13
4.3	Modellbildung	14
5	Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Anforderungen	15

Anhang: Grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse
der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke

Zusammenfassung

Die Stadtwerke München GmbH beabsichtigt eine Erschließung des Münchner Nordens durch Verlängerung der 2009 eröffneten Tramlinie 23. Bei diesem Projekt „Tram Münchner Norden“ wird die Tram bis in das Gebiet der ehemaligen Bayernkaserne und von dort weiter bis zum U-Bahnhof Kieferngarten verlängert. Im Zuge des Neubaus werden neue Gleisanlagen und Fahrdrähtleitungen entstehen. Außerdem sind zur Einspeisung des Fahrstroms für die Tramstrecke zwei Gleichrichterwerke vorgesehen. Es ist deshalb auch mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern in der Umgebung der neuen Straßenbahnstrecke bzw. der dazu gehörigen Gleichrichterwerke zu rechnen.

Für die Planfeststellung sollte nun die elektromagnetische Verträglichkeit des Straßenbahnbetriebes mit der angrenzenden schutzbedürftigen Bebauung nach den Kriterien des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) sowie hinsichtlich der Störungen magnetisch empfindlicher Geräte und Anlagen untersucht werden.

Die Untersuchung sollte sich also beziehen auf

- den Schutz von Personen und
- den Schutz von magnetfeldempfindlichen Geräten (z. B. medizinische Geräte wie MRTs)

Dazu sollten die von der Strecke zu erwartenden elektrischen und magnetischen Felder prognostiziert und hinsichtlich der oben genannten Schutzgüter beurteilt werden. Die Ergebnisse für den alten Planstand (Stand November 2018) wurden im Müller-BBM-Bericht: M157090/02 „Neubaustrecke Tram Münchner Norden, Planfeststellungsabschnitt 1 – Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit“ vom 27.05.2021 festgehalten.

In diesem Bericht wurde die aktualisierte Streckenplanung von Juli 2021 berücksichtigt.

Ergebnis:

Die höchsten magnetischen Flussdichten treten unmittelbar an den Schienenoberflächen auf und können dort bis zu 1,6 mT betragen. Der für den Personenschutz relevante Grenzwert (Europäische Ratsempfehlung 1999/512/EG) beträgt 40 mT und ist somit in jedem Fall eingehalten.

Die höchsten elektrischen Feldstärken werden unmittelbar an der Oberfläche der Fahrdrähte erreicht und betragen dort ca. 13 kV/m. In einem Abstand von 1 m – näher wird man sich den unter Spannung stehenden Fahrdrähten nicht nähern können – erreicht die elektrische Feldstärke 0,11 kV/m. Der für den Personenschutz relevante Grenzwert (Europäische Ratsempfehlung 1999/512/EG) beträgt 25 kV/m und ist somit in jedem Fall stets eingehalten.

Auch die Grenzwerte für Herzschrittmacherträger gemäß FB 451 sind nahezu im gesamten zugänglichen Bereich der Bahnanlage eingehalten. Lediglich unmittelbar über den Gleisen wird der zulässige Wert von 697 μT für die magnetische Flussdichte überschritten; er wird aber bereits in einem Abstand von 24 cm von den

Gleisen eingehalten. Aufgrund des geringen Gleisabstands ist diese Grenzwert-überschreitung für Herzschrittmacherträger unkritisch. Der zulässige Wert für die elektrische Feldstärke von 28,3 kV/m wird in jedem Fall stets eingehalten.

Elektrische Geräte und Anlagen im nichtmedizinischen Bereich werden durch die hier auftretenden Gleichfelder bzw. langsam veränderlichen Felder nicht gestört. Im medizinischen Bereich sind lediglich MRT-Geräte von besonderem Interesse, zumal diese auch im innerstädtischen Bereich häufig eingesetzt werden. Für einen störungsfreien Betrieb sind dabei – je nach Empfindlichkeit der MRT-Geräte – Abstände zwischen 32 m und 89 m vom nächstgelegenen Gleis erforderlich.

Für den Inhalt des vorliegenden Berichtes zeichnen verantwortlich:

Dr.-Ing. Gisbert Gralla
– Projektverantwortlicher –

M. Sc. Felix Martin
– Projektteam –

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-14119-01-01
D-PL-14119-01-02
D-PL-14119-01-03
D-PL-14119-01-04

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 beabsichtigt eine Erschließung des Münchner Nordens durch Verlängerung der 2009 eröffneten Tramlinie 23. Bei diesem Projekt „Tram Münchner Norden“ wird die Tram bis in das Gebiet der ehemaligen Bayernkaserne und von dort weiter bis zum U-Bahnhof Kieferngarten verlängert. Im Zuge des Neubaus werden neue Gleisanlagen und Fahrdrabtleitungen entstehen. Außerdem sind zur Einspeisung des Fahrstroms für die Tramstrecke zwei Gleichrichterwerke vorgesehen. Es ist deshalb auch mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern in der Umgebung der neuen Straßenbahnstrecke bzw. der dazu gehörigen Gleichrichterwerke zu rechnen.

Für die Planfeststellung soll nun die elektromagnetische Verträglichkeit des Straßenbahnbetriebes mit der angrenzenden schutzbedürftigen Bebauung nach den Kriterien des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) untersucht werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, inwieweit magnetisch empfindliche Geräte und Anlagen im Umfeld der Straßenbahnstrecke gestört werden können.

Die Untersuchung soll sich also beziehen auf

- den Schutz von Personen und
- den Schutz von magnetfeldempfindlichen Geräten
(z. B. medizinische Geräte wie MRTs (Magnetresonanztomographie-Geräte))

Dazu sollen die von der Strecke zu erwartenden elektrischen und magnetischen Felder prognostiziert und hinsichtlich der oben genannten Schutzgüter beurteilt werden. Die Ergebnisse für den alten Planstand (Stand November 2018) wurden im Müller-BBM-Bericht: M157090/02 „Neubaustrecke Tram Münchner Norden, Planfeststellungsabschnitt 1 – Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit“ vom 27.05.2021 festgehalten.

In diesem Bericht wird die aktualisierte Streckenplanung von Juli 2021 berücksichtigt.

2 Verwendete Literatur

- [1] Müller-BBM-Bericht: M157090/02
„Neubaustrecke Tram Münchner Norden, Planfeststellungsabschnitt 1 –
Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit“ vom 27.05.2021.
- [2] 26. BImSchV: 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutz-
gesetzes, Verordnung über elektromagnetische Felder vom 21. August 2013.
- [3] ISO/IEC Guide 98-3:2008-09: Messunsicherheit –
Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM).
- [4] 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).
- [5] Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder,
Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz LAI, September 2014.
- [6] 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.
- [7] Elektromagnetische Felder – Hochfrequenzanlagen,
Info-Blatt zur Umsetzung der Anforderung nach § 3 Nr. 3,
26. BImSchV Niederfrequenzanlagen, Bundesnetzagentur,
Referat 414, 55122 Mainz, April 2014.
- [8] 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).
- [9] 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, Dezember 2017.
- [10] DIN EN 50413; VDE 0848-1: Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren
der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und
elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz), August 2009.
- [11] Hersteller-Zertifikat (Genauigkeit der Feld-, Leistungsflussdichte- und
Schallpegelberechnung), WinField/EFC-400 –
Electrical and Magnetic Field Calculation Version >= V2021, 01.01.2021.
- [12] DIN EN 50121-2:2017-11; VDE 0115-121-2:2017-11: Bahnanwendungen -
Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 2: Störaussendungen des gesamten
Bahnsystems in die Außenwelt, Deutsche Fassung EN 50121-2:2017.
- [13] DIN EN 61000-6-1; VDE 0839-6-1: 2007-10: Elektromagnetische Verträglichkeit
(EMV) – Teil 6-1: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Wohnbereich,
Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe.
Deutsche Fassung EN 61000-6-1: 2007.

- [14] DIN EN 61000-6-2 Berichtigung 1:2011-06; VDE 0839-6-2
Berichtigung 1:2011-06: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) –
Teil 6-2: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Industriebereiche (IEC 61000-6-2:2005); Deutsche Fassung EN 61000-6-2:2005,
Berichtigung zu DIN EN 61000-6-2 (VDE 0839-6-2):2006-03;
Deutsche Fassung CENELEC-Cor.: :2005 zu EN 61000-6-2:2005.
- [15] Planungsunterlage: Lageplan
Titel: Übersichtsplan
Zeichnungsnummer: ---
Maßstab: 1:4000, Stand: 11.2018, Stadtwerke München GmbH.
- [16] Planungsunterlage: Lageplan
Titel: Münchener Norden Lageplan
Zeichnungsnummer: ---
Maßstab ---, Stand: ---, ---.

3 Rechtliche Grundlagen

3.1 Schutz von Personen

3.1.1 26. BImSchV

Die 26. BImSchV [1] 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 [5]. 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 definiert, bei Fahrdrableitungen beispielsweise durch den thermisch maximal zulässigen Dauerstrom. Die für die Berechnungen verwendeten Maximalströme und Maximalspannungen sind im Abschnitt „Berechnungsgrundlagen“ angegeben.

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 in der Regel um Rundfunksender im Kurz-, Mittel- und Langwellenbereich. Gemäß [7] 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. Im Sinne der Verordnung sind (vgl. § 1, Absatz 2):

- 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:
ortsfixe Anlagen zur Fortleitung, Umspannung und Umrichtung,
einschließlich der Schaltfelder, von Gleichstrom mit einer Nennspannung von
2000 Volt oder mehr

Die hier zu betrachtende Straßenbahnstrecke, die mit einer Gleichspannung von 750 Volt betrieben wird, fällt unter keine der oben genannten Kategorien; die 26. BImSchV ist demnach nicht anwendbar.

3.1.2 Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG

In Fällen, in denen die 26. BImSchV nicht anwendbar ist, kann die Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG, Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz) [4], zur Beurteilung herangezogen werden. Sie enthält Grenzwerte für den gesamten Frequenzbereich zwischen 0 Hz bis 300 GHz und keine Einschränkung des Anwendungsbereiches auf bestimmte Anlagen.

3.2 Träger aktiver oder passiver Körperhilfsmittel

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) [8] zurückgezogen wurde und DIN EN 50527-2-1 (Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren Geräten gegenüber elektromagnetischen Feldern) [9] keine Grenzwerte angibt, gibt es derzeit keine rechtliche Vorschrift speziell zum Schutz von Trägern aktiver oder passiver Körperhilfsmittel. Der Stand des Wissens ist jedoch im Forschungsbericht FB 451 [6] 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. Im Weiteren werden lediglich die (stets niedrigeren) Grenzwerte für Träger aktiver Körperhilfsmittel herangezogen.

3.3 Störungen von elektrischen Geräten

Die Wirkung elektromagnetischer Felder auf elektrische Geräte basiert – genau wie die Wirkungen auf den Menschen – ebenfalls darauf, dass Spannungen und Ströme in leitfähigen Materialien induziert werden, die dann ihrerseits Wirkungen auf die Geräte haben und Störungen verursachen können. Aus diesem Grund ist auch die Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder auf elektrische Geräte nicht in beliebiger Höhe zulässig. Die Regelungen hierzu sind in dem Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG), festgelegt, das seinerseits auf die harmonisierten Normen für die einzelnen Gerätearten – sofern solche vorhanden sind – verweist. Eine dieser hier relevanten Normen ist DIN EN 50121-2: Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 2: Störaussendung des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt [12], die sich allerdings nur auf den Hochfrequenzbereich bezieht und deshalb hier nicht anwendbar ist. Um für den hier insbesondere relevanten Niederfrequenzbereich Immissionswerte anzugeben, bei denen elektrische Geräte nicht gestört werden, kann DIN EN 61000-6-1: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-1: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe [13], und DIN EN 61000-6-2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Teil 6-1: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Industriebereich [14] verwendet werden.

Die in [13] und [14] genannten Störfestigkeitswerte für elektrische Geräte sind für den Hochfrequenzbereich und für energietechnische Frequenzen (50 Hz oder 60 Hz) angegeben. Für langsam veränderliche oder statische Felder sind dort keine Grenzwerte angegeben. Mit dem oben beschriebenen physikalischen Hintergrund der Störbeeinflussung (dass nämlich die Störungen aufgrund induzierter Spannungen und induzierter Ströme erfolgen) und unter Berücksichtigung, dass die Induktionswirkung grundsätzlich proportional der Frequenz ist, wird verständlich, dass Gleichfelder oder sehr langsam veränderliche Felder auch nicht in der Lage sind, elektrische Geräte zu stören.

Lediglich Geräte und Anlagen, bei denen die Funktionsweise unmittelbar – d. h. nicht aufgrund der Induktionswirkung – durch Magnetfelder beeinflusst werden kann, bleiben deshalb hier für die Betrachtung relevant. Solche deshalb besonders magnetfeldempfindlichen Geräte sind beispielsweise Elektronenmikroskope, aber auch MRT-Geräte, die in radiologischen Praxen eingesetzt werden. Für diese Geräte können die jeweiligen Empfindlichkeiten den entsprechenden Datenblättern entnommen werden. Im Weiteren werden hier lediglich MRT-Geräte betrachtet, da diese auch in einem städtischen Umfeld in den entsprechenden medizinischen Praxen häufig eingesetzt werden.

3.4 Grenzwerte

3.4.1 Technischer Hintergrund

Die hier zu beurteilende Straßenbahnstrecke wird mit einer Gleichspannung von 750 V 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. 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.

3.4.2 Grenzwerte für den Schutz der Allgemeinheit bzw. Träger aktiver Körperhilfsmittel

Tabelle 1. Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinheit und von Trägern aktiver Körperhilfsmittel

Frequenzbereich	Schutz der Allgemeinheit (Europäische Ratsempfehlung, 1999/519/EG)	Träger aktiver Körperhilfsmittel (FB 451)
Elektrische Feldstärke $f = 0$ Hz	25 kV/m*)	28,3 kV/m
Magnetische Flussdichte $0 \text{ Hz} < f \leq 1 \text{ Hz}$	40 mT	697 μT

*) Weder in der 26. BImSchV noch in der Europäischen Ratsempfehlung wird ein Grenzwert für die elektrische Feldstärke bei einer Frequenz von 0 Hz angegeben. In der Europäischen Ratsempfehlung findet sich lediglich der Hinweis, dass von den meisten Menschen elektrische Oberflächenladungen bei elektrischen Feldstärken unterhalb von 25 kV/m als nicht störend empfunden werden. Im Weiteren wird deshalb dieser Wert für die Beurteilung verwendet.

3.4.3 Magnetfeldempfindliche Geräte

Es gibt einige wenige elektrische Geräte, die nicht durch die oben beschriebenen induzierten Spannungen und Ströme gestört werden, sondern unmittelbar durch veränderliche Magnetfelder. Es handelt sich dabei um Geräte, die mit Elektronenstrahlen arbeiten oder bei denen selbst erzeugte Magnetfelder zum Funktionsprinzip gehören. Geräte, die mit Elektronenstrahlen arbeiten, sind (inzwischen nur noch selten in Betrieb befindliche) Bildschirme mit Kathodenstrahlröhren, ferner (hier nicht weiter behandelte) Elektronenmikroskope und Elektronenstrahlolithographie-Geräte. Geräte, bei denen selbst erzeugte Magnetfelder zum Funktionsprinzip gehören, sind z. B. Magnetresonanztomographie-Geräte.

Um eine Abschätzung über möglicherweise auftretende Störungen bei MRT-Geräten zu erhalten, wurden Angaben zur Störfestigkeit solcher Geräte verschiedener Hersteller analysiert. Die Angaben liegen für 50-Hz-Felder je nach Gerätetyp zwischen 0,2 μT und 4 μT (Effektivwerte), bei den hier relevanten langsam veränderlichen Feldern zwischen 0,37 μT und 2,82 μT (Spitze-Spitze-Werte).

Tabelle 2. Störfestigkeitswerte von MRT-Geräten.

Frequenzbereich	MRT-Geräte, Zusammenfassung verschiedener Herstellerangaben
Elektrische Feldstärke, $f = 0 \text{ Hz}$	keine Angaben
Magnetische Flussdichte, $0 \text{ Hz} < f \leq 1 \text{ Hz}$	0,37 μT – 2,82 μT

4 Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder

4.1 Grundlagen

Die Berechnung erfolgt mit dem Programm WinField EP, Version 2021 auf Grundlage von DIN EN 50413 [10]. Modelliert werden die Anlagenteile, die wesentlich zur Immission elektrischer und/oder magnetischer Felder beitragen. Es sind dies hier der Fahrdrabt der Strecke und die den Rückstrom führenden Schienen.

Die Fahrspannung entspricht laut Auftraggeber der Nennspannung DC 750 V nach DIN EN 50163. Für den maximalen Strom gilt der thermisch maximal zulässige Dauerstrom der Fahrleitungen. Dieser beträgt im Worst Case, also bei dem Fahrleitungssystem, welches den höchsten thermisch maximal zulässigen Dauerstrom tragen kann, 1350 A pro Fahrweg (Gleis). Diese Vorgabe wurde für die Berechnung verwendet (vgl. Abbildung „Isoflächendarstellung der magnetischen Flussdichte, Vertikalschnitt“ im Anhang auf Seite 4).

Die geplante Tramtrasse besteht aus zwei Fahrwegen, weshalb auf der Strecke insgesamt ein Strom von 2700 A fließt.

Für die elektrische Feldstärke wird berücksichtigt, dass beide Fahrdrähte stets gleichermaßen unter Spannung stehen. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen einer Einzelfahrleitung, einer Hochkettenfahrleitung und einer Seilgleiterfahrleitung nicht erforderlich, da die Grenzwerte bzgl. der elektrischen Feldstärke für den Schutz der Allgemeinheit bzw. Träger aktiver Körperhilfsmittel (vgl. Tabelle 1) selbst in unmittelbarer Nähe (wenige Zentimeter) nicht überschritten werden, und für empfindliche Geräte ohnehin nicht relevant sind (vgl. Tabelle 2). Zur Veranschaulichung der Verteilung der elektrischen Feldstärke wurde beispielhaft ein Einzelfahrdrabt verwendet (vgl. Abbildung „Isoflächendarstellung der elektrischen Feldstärke, Vertikalschnitt“ im Anhang auf Seite 5). Auch für die Darstellung der Immission elektrischer Felder im weiteren Umfeld der Strecke wurde lediglich ein Einzelfahrdrabt verwendet, auch wenn tatsächlich alle oben genannten Varianten der Fahrleitung im Verlauf der Strecke eingesetzt werden.

4.2 Berechnungsunsicherheit

Die Unsicherheit der Feldberechnung beträgt gemäß [11] 1,4 % und wird im Weiteren bei der Angabe der für die Beurteilung relevanten Werte additiv berücksichtigt. Zusätzliche Unsicherheiten der Modellierung bleiben im Weiteren unberücksichtigt.

4.3 Modellbildung

Für die Modellierung der Strecke wurden folgende technische Daten gemäß [15] und [16] verwendet:

Spurweite:	1435 mm
Fahrdrahthöhe:	5500 mm
Maximalstrom pro Gleis:	1350 A
Fahrdrahtspannung:	750 V

Annahmen:

- Die Strecke ist in einzelne Speiseabschnitte eingeteilt. Im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung wurde für die Modellierung der gesamte Maximalstrom (nach Angaben der SWM) auf der gesamten Strecke angenommen, auch in den Wendeschleifen an der Haltestelle Schwabing Nord und am Kieferngarten.
- 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 wurde deshalb der Wert in 9 cm Abstand verwendet.
- Die Magnetfeldimmission der U-Bahn-Strecke U6 im Bereich Kieferngarten wurde nicht berücksichtigt. Da die Grenzwerte zum Schutz von Personen bereits im Nahfeld der Gleise bzw. Fahrdrähte unterschritten werden, ist die Überlagerung der Magnetfelder von Straßen- und U-Bahn nicht relevant.
- Für die Vertikalschnitte der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte im Anhang auf Seite 4 und 5 wurden beide Gleise und ein Gleisabstand von 3,05 m verwendet.

Die Geometrie der Modellierung ist im Anhang dargestellt.

Für die Berechnung der Isolinien der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke (Anhang Seiten 2 und 3) wurde eine Berechnungshöhe von 1 m und eine Berechnungsauflösung von 2,0 m x 2,0 m gewählt.

Für die Berechnung der Vertikalschnitte (Anhang Seiten 4 und 5) wurde eine Berechnungsauflösung von 0,01 m x 0,01 m gewählt.

Die Ergebnisse der Berechnung der magnetischen Flussdichte sind dabei als Spitze-Werte zu interpretieren, d. h. als Anstieg der Flussdichte vom Ausgangswert (Flussdichtewert des lokalen Erdmagnetfeldes) bis zu dem angegebenen Wert und anschließend Abfall zurück auf den Ausgangswert.

5 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Anforderungen

Die Anforderungen sind die in Kapitel 3.4.2 und 3.4.3 (Tabelle 1 bzw. Tabelle 2) genannten Werte. Die Berechnungsgrundlagen sind in Kapitel 4 erläutert, die Berechnungsergebnisse sind im Anhang dargestellt.

Zusammenfassend ergibt sich Folgendes:

- Die höchste magnetische Flussdichte wird unmittelbar an der Oberfläche der Fahrdrähte bzw. der Schienen erreicht. Nachdem die Oberfläche der Fahrdrähte naturgemäß nicht berührt werden kann, ist der Flussdichtewert an der Oberfläche der Schienen als Maximalwert im zugänglichen Bereich zu betrachten. Dieser beträgt 1,62 mT.
- Die höchste elektrische Feldstärke wird unmittelbar an der Oberfläche der Fahrdrähte erreicht und beträgt dort ca. 13 kV/m. In einem Abstand von 1 m – näher wird man sich den unter Spannung stehenden Fahrdrähten nicht nähern können –, d. h. in einer Höhe von 4,5 m über dem Boden, erreicht die elektrische Feldstärke 0,11 kV/m.

Im Detail ist den Berechnungen zu entnehmen:

- **Schutz der Allgemeinheit**

Die höchste magnetische Flussdichte beträgt 1,62 mT an der Oberfläche der Schienen. Die höchste elektrische Feldstärke im zugänglichen Bereich (1 m Abstand von den unter Spannung stehenden Fahrdrähten) beträgt 0,11 kV/m. Die Anforderungen der Ratsempfehlung 1999/519/EG (40 mT bzw. 25 kV/m) werden somit in jedem Fall stets eingehalten.

- **Träger aktiver Körperhilfsmittel**

Die an der Schienenoberfläche mögliche magnetische Flussdichte von 1,62 mT liegt deutlich über dem gemäß FB 451 zulässigen Wert von 0,697 mT. Dieser zulässige Wert wird in einer Höhe von 24 cm über dem Erdboden erreicht.

Im Bereich der Fahrdrähte (in 1 m Abstand) beträgt die elektrische Feldstärke 0,11 kV/m und der gemäß FB451 zulässige Wert 28,3 kV/m. Die Anforderung der FB 451 wird somit in jedem Fall eingehalten.

- **Störfestigkeit Geräte im Industriebereich sowie im Wohn- und Geschäftsbereich**

Für Gleichfelder bzw. langsam veränderliche Felder sind in den entsprechenden Normen keine Grenzwerte genannt, da elektrische Geräte hier nicht empfindlich sind. Im Umfeld einer Straßenbahnstrecke ist deshalb mit Störungen elektrischer Geräte nicht zu rechnen.

- **MRT-Geräte**

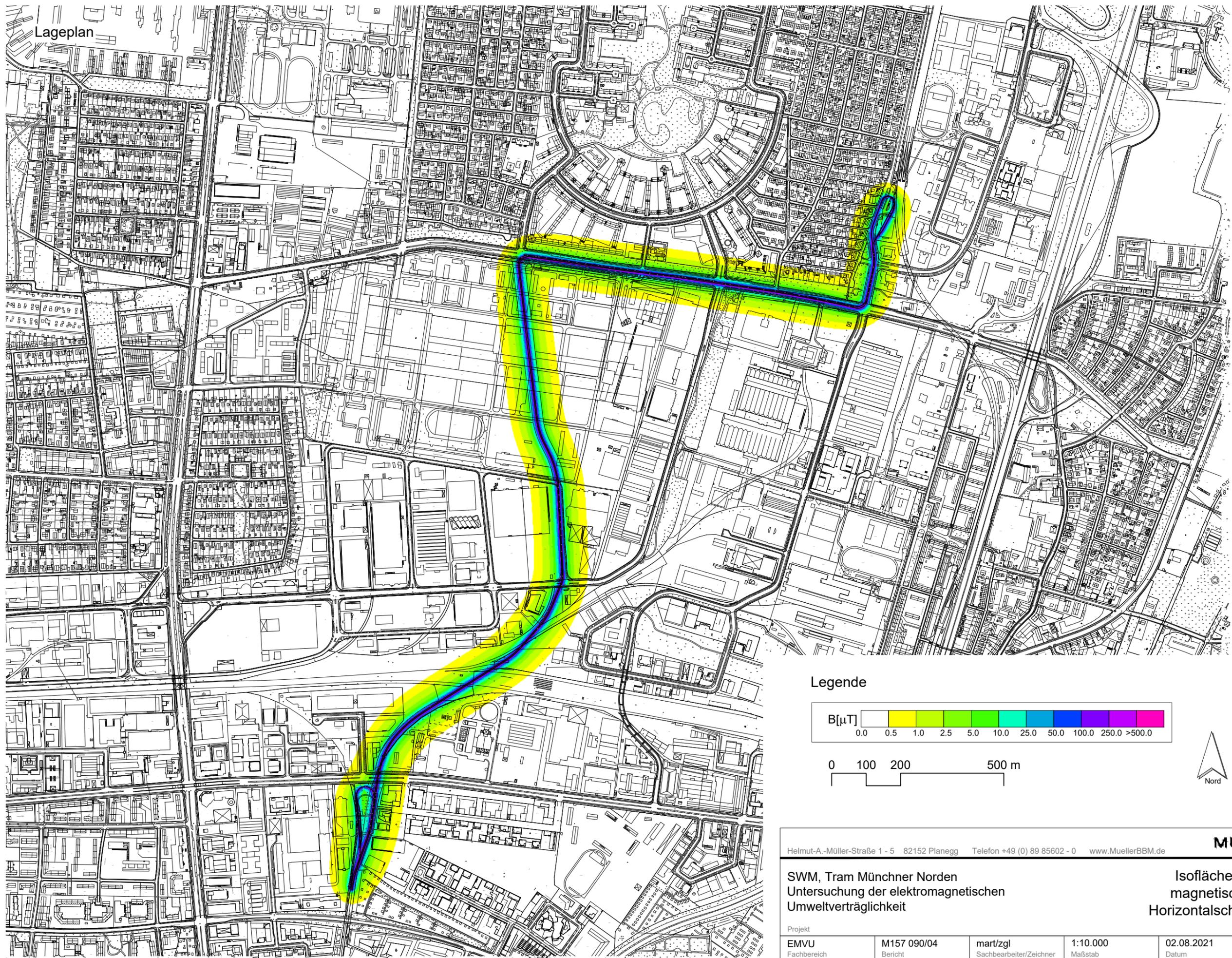
Um auch für empfindliche MRT-Geräte mit einer Störfestigkeit von nur 0,37 μ T einen störungsfreien Betrieb jederzeit sicherzustellen, ist ein Abstand von 89 m vom nächstgelegenen Gleis erforderlich. Für unempfindlichere MRT-Geräte und eine Störfestigkeit von 2,82 μ T genügt ein Abstand von 32 m.

Anhang

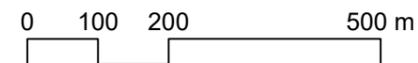
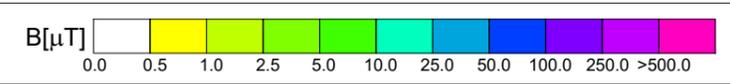
Grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke

- Seite 2: Isoflächendarstellung der magnetischen Flussdichte
Horizontalschnitt in 1 m Höhe
- Seite 3: Isoflächendarstellung der elektrischen Feldstärke
Horizontalschnitt in 1 m Höhe
- Seite 4: Isoflächendarstellung der magnetischen Flussdichte
Vertikalschnitt
- Seite 5: Isoflächendarstellung der elektrischen Flussdichte
Vertikalschnitt

Lageplan



Legende



Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5 82152 Planegg Telefon +49 (0) 89 85602 - 0 www.MuellerBBM.de

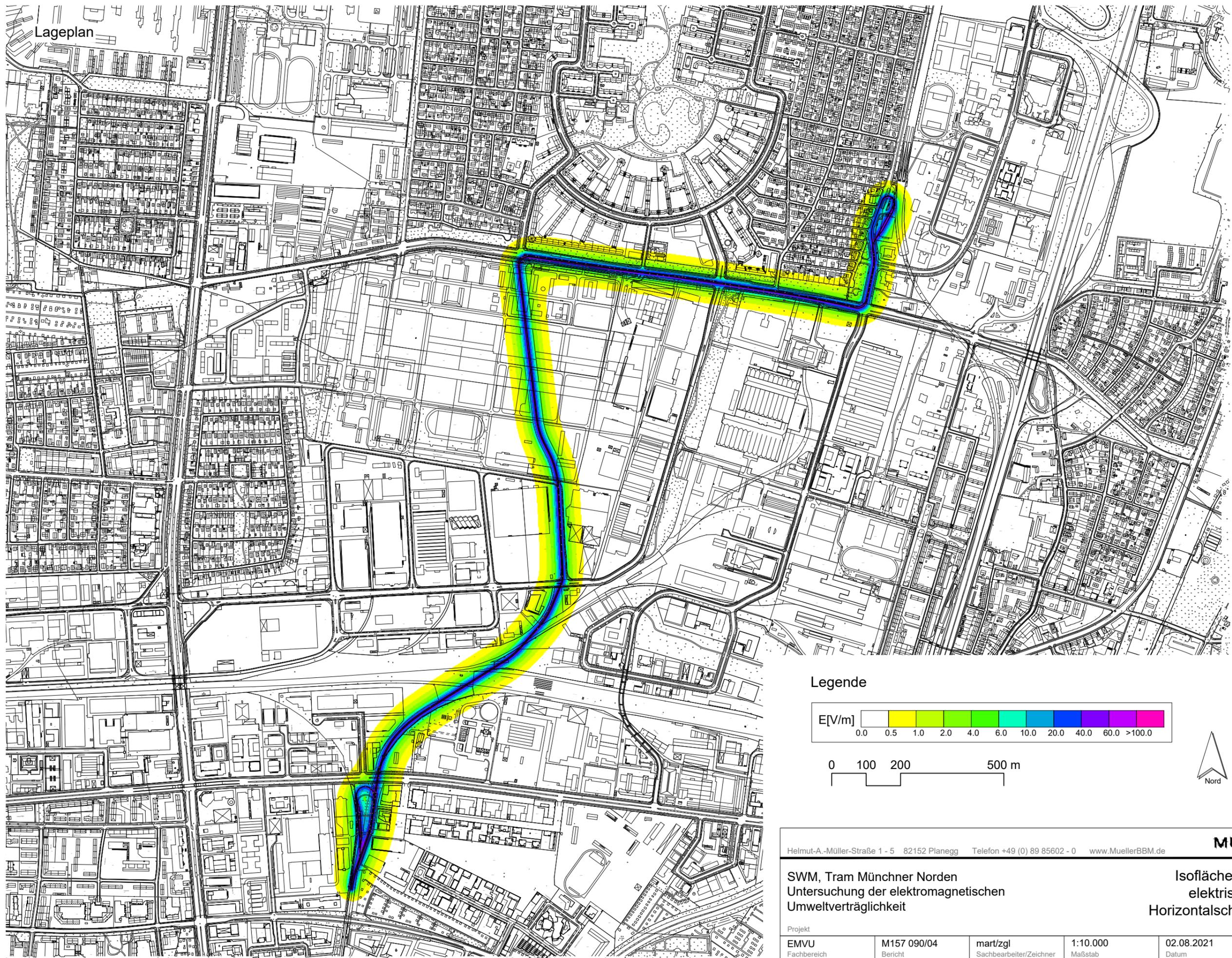
MÜLLER-BBM

SWM, Tram Münchner Norden
Untersuchung der elektromagnetischen
Umweltverträglichkeit

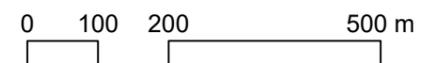
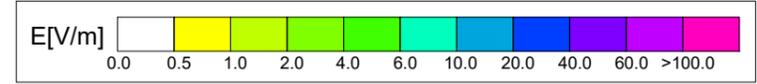
Isoflächendarstellung der
magnetischen Flussdichte
Horizontalschnitt in 1 m Höhe

Projekt	Inhalt
EMVU Fachbereich	M157 090/04 Bericht
mart/zgl Sachbearbeiter/Zeichner	1:10.000 Maßstab
02.08.2021 Datum	Anhang, Seite 2 Plan

Lageplan



Legende



Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5 82152 Planegg Telefon +49 (0) 89 85602 - 0 www.MuellerBBM.de

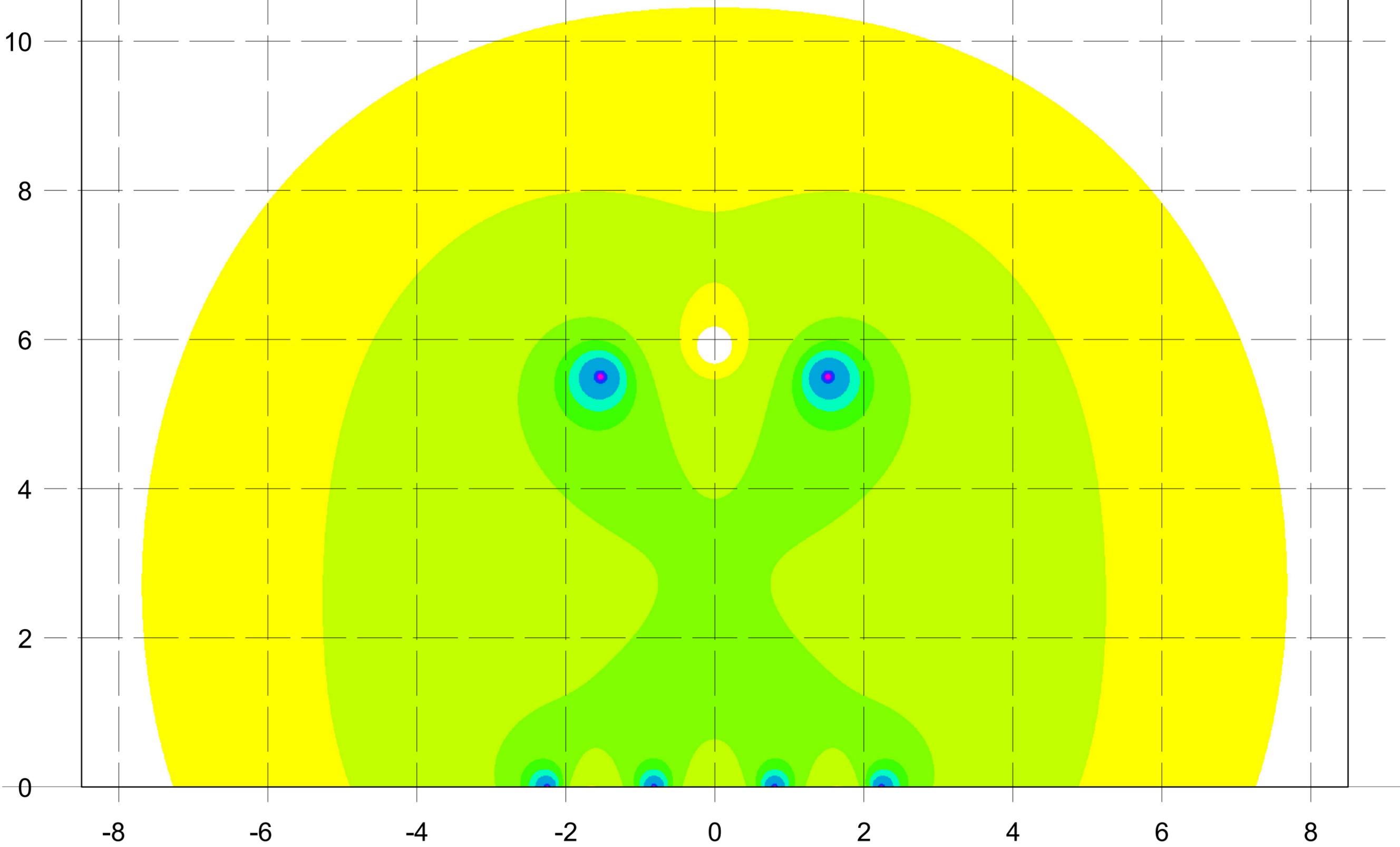
MÜLLER-BBM

SWM, Tram Münchner Norden
Untersuchung der elektromagnetischen
Umweltverträglichkeit

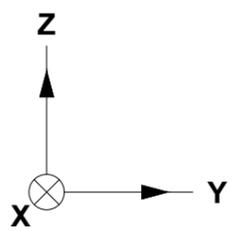
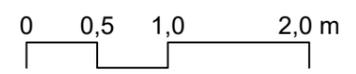
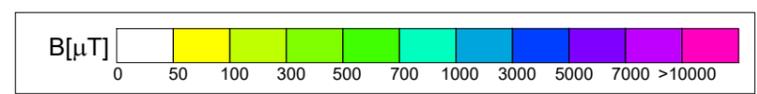
Isoflächendarstellung der
elektrischen Feldstärke
Horizontalschnitt in 1 m Höhe

Projekt	Inhalt
EMVU Fachbereich	M157 090/04 Bericht
mart/zgl Sachbearbeiter/Zeichner	1:10.000 Maßstab
02.08.2021 Datum	Anhang, Seite 3 Plan

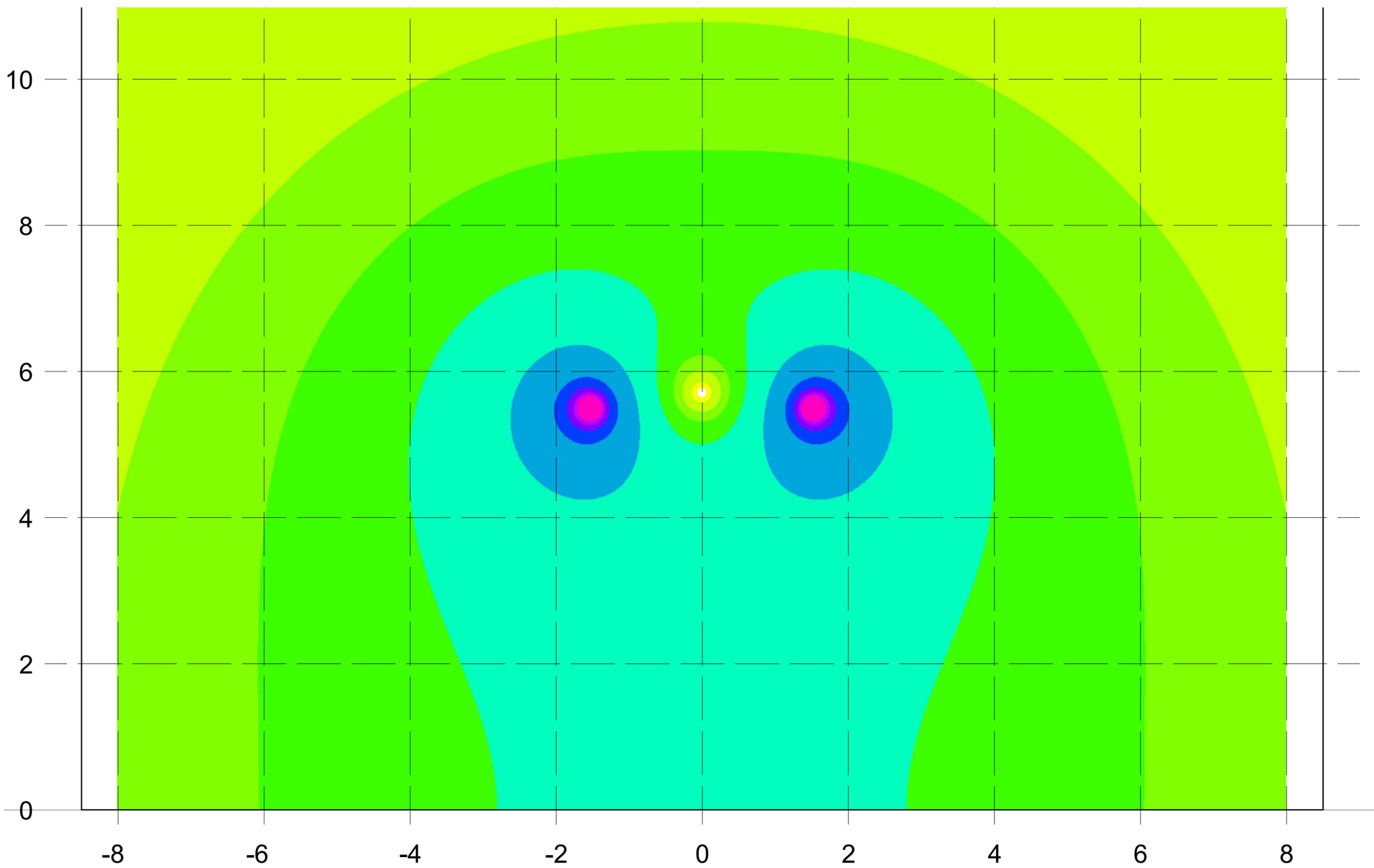
Vertikalschnitt



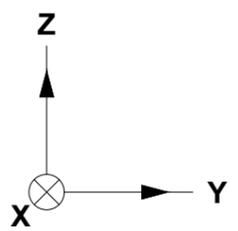
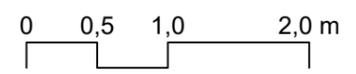
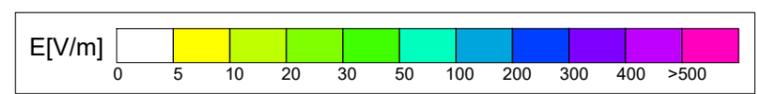
Legende



Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5 82152 Planegg Telefon +49 (0) 89 85602 - 0 www.MuellerBBM.de					MÜLLER-BBM	
SWM, Tram Münchner Norden Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit				Isoflächendarstellung der magnetischen Flussdichte Vertikalschnitt		
Projekt					Inhalt	
EMVU Fachbereich	M157 090/04 Bericht	mart/zgl Sachbearbeiter/Zeichner	1:50 Maßstab	02.08.2021 Datum	Anhang, Seite 4 Plan	



Legende



Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5 82152 Planegg Telefon +49 (0) 89 85602 - 0 www.MuellerBBM.de					MÜLLER-BBM	
SWM, Tram Münchner Norden Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit				Isoflächendarstellung der elektrischen Feldstärke Vertikalschnitt		
Projekt Inhalt						
EMVU Fachbereich	M157 090/04 Bericht	mart/zgl Sachbearbeiter/Zeichner	1:50 Maßstab	02.08.2021 Datum	Anhang, Seite 5 Plan	