

- Nachrichtlich -

Beeinflussbarkeit wissenschaftlicher Geräte durch eine Straßenbahntrasse auf dem Campus Lichtwiese in Darmstadt

erstellt durch

Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick

Steinbeis Forschungs- und Entwicklungszentren GmbH, Stuttgart

Leiter des Steinbeis Forschungszentrum Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Winckelmannstr. 50
01728 Bannewitz

Stand 15.01.2013

Inhalt

1	Einführung.....	3
1.1	Gegenstand des Gutachtens.....	3
1.2	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	3
1.3	Aufbau des Gutachtens	3
2	Allgemein: Elektromagnetische Auswirkungen des Betriebs von Straßenbahnen auf die Umgebung	5
2.1	Allgemeinverständliche Darstellung der physikalischen Grundlagen der Thematik elektromagnetische Verträglichkeit	5
2.1.1	Elektromagnetische Effekte	5
2.1.2	Elektromagnetisches Störmodell	5
2.1.3	Elektromagnetische Verträglichkeit	6
2.1.4	Ansätze zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit	7
2.2	Straßenbahnspezifische EMV-Betrachtungen	9
3	Grundlagen und Rahmenbedingungen der Begutachtung	10
3.1	Datengrundlagen des Gutachtens und verwendete Planunterlagen	10
3.1.1	EMV-relevante Einzelheiten der Rahmenplanung des Vorhabenträgers.....	10
3.1.2	Planungsunterlagen.....	10
3.1.3	Informationen durch die Institute	12
3.1.4	Messungen	12
3.2	Rechtsgrundlagen	13
4	Maßnahmen zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit des Vorhabens.....	14
4.1	Allgemeiner Ablauf der Begutachtung	14
4.1.1	Gerätestandorte	14
4.1.2	Relevante Kopplungsarten	15
4.2	Möglichkeiten zur Sicherstellung der EMV im Campus Lichtwiese im Überblick.....	16
4.2.1	Allgemeine Maßnahmen.....	16
4.2.2	Gebäude– und gerätespezifische Maßnahmen am Emissionsort.....	17
4.2.3	Gebäude– und gerätespezifische Maßnahmen am Kopplungspfad	17
4.2.4	Gebäude– und gerätespezifische Maßnahmen am Immissionsort	17
4.2.5	Maßnahmen bei Havarie und Wartung.....	18
4.2.6	Exemplarische Darstellung einer gebäude- und gerätespezifischen EM-Verträglichkeitsprüfung	18
4.2.7	Allgemeine Bewertung der gegenwärtigen Situation.....	19
4.3	Bewertung der EMV für die Geräte der Fachbereiche	20
4.3.1	Bewertung der EMV für die Trassenvariante 1.....	20
4.3.2	Bewertung der EMV für die Trassenvariante 2.....	25
Anhang A1	Quellenangaben	32
Anhang A2	Analytische Betrachtungen	33
A2.1	Berechnung der magnetischen Induktion durch die Ströme	33
A2.2	Einfluss des Streustromes (Rückströme über das Erdreich) auf die magnetischen Felder.....	37
Anhang A3	Magnetfeldkompensierte Trassenführung	40
Anhang A4	Gleichfeldänderungen aufgrund der magnetisierbaren Fahrzeugmasse	41
Anhang A5	Liste der Anlagen	42

1 Einführung

1.1 Gegenstand des Gutachtens

Die HEAG mobilo GmbH plant für die Stadt Darmstadt die Errichtung einer neuen Straßenbahntrasse im Universitätsgebiet Lichtwiese.

Zielsetzung des Gutachtens ist die Ermittlung und Bewertung möglicher Beeinträchtigungen der im Plangebiet befindlichen (technischen) Anlagen, durch die nach Verwirklichung der Straßenbahntrasse zu prognostizierenden elektromagnetischen Immissionen, siehe Abschnitt 4, an den einzelnen technischen Anlagen. Dabei wurden zwei mögliche Trassenführungen bewertet. Soweit Beeinträchtigungen zu erwarten sind, zeigt das Gutachten auf, dass geeignete technische Maßnahmen zur Verfügung stehen, die einzeln oder in Kombination zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit ergriffen werden können. Die Auswahl zwischen mehreren Varianten obliegt dem Vorhabenträger im Rahmen der Ausführungsplanung.

Zu den möglicherweise beeinträchtigten Anlagen gehören insbesondere technische Anlagen verschiedener im Plangebiet angesiedelter universitärer Einrichtungen (Plan Abbildung 5).

1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei einem Straßenbahnbetrieb im Campus Lichtwiese in Darmstadt mit Stromentnahme aus der Oberleitung kann nicht von einem gleichbleibendem Immissionsniveau an technischen Anlagen ausgegangen werden. Gleichwohl lassen sich Maßnahmen finden, die in Ihrer Summe sowohl einen ordnungsgemäßen Straßenbahnbetrieb sichern, als auch eine unzulässige Beeinträchtigung der Geräte ausschließen.

Entsprechend den Angaben der Institute wird davon ausgegangen, dass keine Beeinträchtigungen auftreten, wenn nach Verwirklichung der Straßenbahntrasse die Zusatzbelastung, d. h. die maximale Gleichfeldänderung, im Rahmen der von den Instituten angegebenen Toleranzwerte (regelmäßig kleiner als 50 nT, Spitze-Spitze) liegt. Soweit Beeinträchtigungen zu erwarten sind, zeigt das Gutachten geeignete technische Maßnahmen auf, die einzeln oder in Kombination zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit ergriffen werden können.

Insbesondere durch eine magnetfeldoptimierte Trassenausführung und der Verwendung aktiver Magnetfeldkompensation an ausgewählten Geräten kann die Beeinflussung sensibler Technik im Umfeld der Straßenbahntrasse verhindert werden.

Im Gutachten wurden zwei mögliche Trassenvarianten bewertet. Die Ausführung einer kompensierten Straßenbahntrasse mit Wendeschleife nördlich des Hörsaal- und Medienzentrums wird zur Sicherstellung der EMV vorgeschlagen, da diese Variante einen geringen Eingriff in die bestehende Infrastruktur beinhaltet. Diese Variante bietet zudem die Sicherheit, dass auch bei möglichen Abweichungen von den prognostizierten Feldstärken¹ die EMV durch zusätzliche aktive Kompensationsanlagen sichergestellt werden kann.

1.3 Aufbau des Gutachtens

Abschnitt 1.2 enthält vorangestellt eine allgemeinverständliche Zusammenfassung der Ergebnisse.

In Kapitel 2 Abschnitt 2.1 erfolgt eine allgemeinverständliche Darstellung der physikalischen Grundlagen der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Die Darstellung dient der Einführung in die Thematik, erhebt aber an dieser Stelle nicht den Anspruch, diese aus wissenschaftlicher Sicht abschließend zu behandeln. Es wird beispielhaft eine Übersicht zu den theoretisch vorhandenen Möglichkeiten gegeben, die zur Reduzierung einer bestimmten Immissionsbelastung zur Verfügung stehen.

¹ z.B. aufgrund von zum jetzigen Zeitpunkt nicht einzuschätzenden Einflussfaktoren

Im folgenden Abschnitt 2.2 erfolgt eine kurze Erläuterung der spezifischen EMV-Aspekte im Fall des Straßenbahnbetriebs.

Im Kapitel 3 werden allgemeine Angaben zur EMV im Plangebiet dargestellt. In Abschnitt 3.1 erfolgt eine Übersicht über die bei der Erstellung des Gutachtens durch den Vorhabenträger vorgegebenen Eingangsdaten, die verwendeten Planungsunterlagen, die seitens der im Plangebiet gelegenen Institute bereits eingebrachten Informationen. Die Normungssituation auf dem Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit ist in Abschnitt 3.2 erläutert.

In Kapitel 4 sind die Maßnahmen zur Gewährleistung der EMV im Planungsgebiet dargestellt. Zunächst enthält Abschnitt 4.1 den allgemeinen Ablauf der EMV Begutachtung. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 ein Überblick über die Möglichkeiten zur Sicherstellung der EMV gegeben.

In Abschnitt 4.3 sind in Unterabschnitten die zu erwartenden Immissionswerte an den einzelnen Anlagen gesondert für die beiden vorgeschlagenen Trassenvarianten prognostiziert. Dabei ist anzumerken, dass im Plangebiet unterschiedliche technische Anlagen zu Forschungszwecken betrieben werden. Soweit diese Anlagen typischerweise durch elektromagnetische Immissionen beeinträchtigt werden können, sind sie Gegenstand der Begutachtung. Die Ergebnisse der Begutachtung sind entsprechend dem jeweiligen Aufstellungsort abschnittsweise unterteilt dargestellt.

Anschließend sind als Anhang die Grundlagen der Prognose dargestellt. Zunächst finden sich die Quellenangaben in Anhang A1. Anschließend werden in Anhang A2 die Grundlagen der analytischen Berechnungen der magnetischen Felder dargelegt. In Anhang A3 ist beispielhaft eine Möglichkeit der magnetfeldoptimierten Straßenbahntrasse beschrieben. In Anhang A4 ist der Einfluss magnetisierbarer Massen auf Gleichfeldänderungen erläutert. In Anhang A5 sind zum Abschluss die dem Gutachten beigefügten Anlagen zusammengestellt.

2 Allgemein: Elektromagnetische Auswirkungen des Betriebs von Straßenbahnen auf die Umgebung

2.1 Allgemeinverständliche Darstellung der physikalischen Grundlagen der Thematik elektromagnetische Verträglichkeit

2.1.1 Elektromagnetische Effekte

Von elektromagnetischen Feldern gehen elektromagnetische Effekte aus. Elektromagnetische Felder werden im engeren Sinn dabei in elektrische Felder, magnetische Felder und Hochfrequenzfelder unterschieden.

Grundlegend gilt, dass elektrische Felder durch elektrische Ladungen erzeugt werden, wobei elektrische Felder wiederum Kräfte auf elektrische Ladungen ausüben.

Bewegte elektrische Ladungen (Ströme), erzeugen zusätzlich magnetische Felder, wobei magnetische Felder wiederum Kräfte auf andere bewegte elektrische Ladungen (Ströme) ausüben.

Zeitlich veränderliche bewegte elektrische Ladungen führen zu zeitlich veränderlichen magnetischen Feldern, die auch auf ruhende elektrische Ladungen Kräfte ausüben können (führt zur sogenannten induzierten Spannung).

Maßgebliche Unterscheidungskriterien sind also die Veränderungen, denen ein elektromagnetisches Feld in räumlicher und zeitlicher Hinsicht unterliegen kann. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten werden elektromagnetische Felder daher auch in *elektrostatistische Felder* (keine Zeitabhängigkeit; kein Strom) sowie in *magnetische Gleichfelder* (keine Zeitabhängigkeit; Ströme), *elektrische und magnetische Wechselfelder* (Zeitabhängigkeit; Ströme) unterteilt.

Sind dabei zeitliche und räumliche Änderungen elektrischer und magnetischer Felder nicht voneinander trennbar, spricht man vom Hochfrequenzfeld.

Soweit im Einwirkungsbereich elektromagnetischer Felder elektrische Ladungen vorhanden sind, kommt es zu (ggf. auch gegenseitiger) Beeinflussung. Hierbei handelt es sich dann um elektromagnetische Effekte.

2.1.2 Elektromagnetisches Störmodell

Die Immission elektromagnetischer Felder am Standort eines Objektes erfolgt ausgehend von einer Emissionsquelle über (zwischen dem Emissionsort und dem Immissionsort gelegene) Leiter bzw. vorhandene Felder.

Elektromagnetische Immissionen führen in der Praxis regelmäßig zu einer Beeinträchtigung eines Objekts (z. B. einer technischen Anlage) beziehungsweise seiner Funktionsfähigkeit und sind daher regelmäßig unerwünscht. Entsprechend wird im elektromagnetischen Störmodell die Emissionsquelle als **Störquelle** bezeichnet, das vermittelnde Medium (Leiter, Feld) als **Kopplungspfad** und das beeinflusste Gerät als **Störsenke**.



Abbildung 1 Störmodell

Bei den von einer Störquelle ausgehenden Emissionen handelt es sich, wie bereits oben beschrieben, um elektrische Felder, magnetische Felder und Hochfrequenzfelder.

Die Kopplung (Übertragung) von der Störquelle zur Störsenke kann dabei

- galvanisch, d. h. über einen gemeinsamen Leiter,
- kapazitiv, d. h. durch die Wirkung des elektrischen Feldes,
- induktiv, d. h. durch die Wirkung des magnetischen Feldes oder
- elektromagnetisch über Hochfrequenzfelder

erfolgen, siehe Abschnitt 2.1.1.

Die Störsenke kann dann wiederum von den benannten Feldern, also elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern beeinflusst werden.

Bei allen Arten von elektromagnetischen Feldern handelt es sich um Vektorfelder, d. h. es existieren Komponenten in alle drei Raumrichtungen (x, y, z).

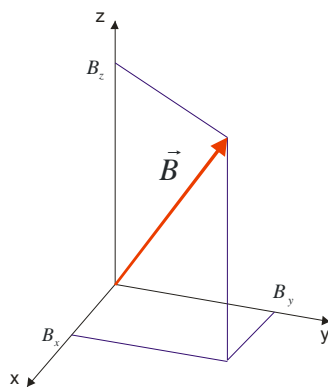


Abbildung 2 Vektor in kartesischen Koordinaten

Mit Blick auf die vorliegend zu untersuchenden Geräte der im Plangebiet vorhandenen Institute wird bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Störsenke im Einzelfall auch nur in Bezug auf eine der drei Feldkomponenten eine signifikante Empfindlichkeit aufweisen kann.

2.1.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

Die juristische Definition der elektromagnetischen Verträglichkeit aus § 3 Nr. 4 des Gesetzes über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG, Stand 26.02.2008) lautet:

„ [...] elektromagnetische Verträglichkeit [ist] die Fähigkeit eines Betriebsmittels, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umgebung vorhandene Betriebsmittel unannehmbar wären“.

Unter Betriebsmittel versteht das Gesetz hierbei Geräte und ortsfeste Anlagen.

Um die juristisch-normativen Elemente „zufriedenstellend“, „Störung“ und „unannehmbar“ bereinigt, lässt sich der Begriff der elektromagnetischen Verträglichkeit aus technischer Sicht wie folgt definieren:

Elektromagnetische Verträglichkeit ist gegeben, wenn (mindestens) zwei Betriebsmittel (Geräte) gleichzeitig und ihrem jeweiligen Zweck entsprechend in vollem Umfang genutzt werden können, ohne dass die elektromagnetische Emission des einen Betriebsmittels die Funktionsfähigkeit des jeweils anderen Betriebsmittels beeinträchtigt¹.

¹ Es wird betont, dass die Definition keine Beschränkung auf den räumlichen Nahbereich enthält. Sie umfasst damit insbesondere auch den sicherzustellenden Empfang lizenzierter Funkdienste.

Mit den Begriffen „zufriedenstellend“ und „unannehmbar“ sind Wertungsfragen verknüpft, die die Gesetzgebung und Rechtsprechung zu treffen haben. Das Ineinandergreifen der Begrifflichkeiten veranschaulicht folgende Überlegung:

Ein im jeweiligen Einzelfall gegebenes Emissionsniveau kann unumgänglich sein, wenn ein dem Zweck der emittierenden Anlage entsprechender Betrieb nur unter Inkaufnahme dieses Emissionsniveaus möglich ist. Kommt es in dieser Situation zu Beeinträchtigung anderer Geräte und soll die Situation ausschließlich zulasten der emittierenden Anlage gelöst werden (Wertungsfrage), so kann der Betrieb

- entweder nicht,
- nur eingeschränkt (und also nicht dem ursprünglichen Zweck entsprechend),
- nicht in der Nähe der beeinträchtigten Anlage oder
- nur nach Umsetzung (sonstiger) geeigneter Minimierungsmaßnahmen

erfolgen.

Entsprechendes gilt für die Störsenke. Soll eine gegebene elektromagnetische Unverträglichkeit zulasten der durch die Immissionen beeinträchtigten Anlage gelöst werden (Wertungsfrage), so kommen auch hier nur die Alternativen in Betracht, dass diese entweder nicht, nur eingeschränkt, nicht in der Nähe der beeinträchtigenden Anlage oder nur nach Umsetzung sonstiger geeigneter Schutzmaßnahmen betrieben wird.

Es handelt sich um eine allgegenwärtige Problemstellung. Während indes eine einmalige Knackstörung (etwa ein durch das Abschalten eines Kühlschranks verursachtes Knackgeräusch im Radio) in praktischer Hinsicht hinnehmbar sein wird, kann es in anderen Fällen zu gravierenden Störungen bis hin zum Ausfall der Elektronik der Störsenke kommen.

Ob und inwieweit die Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit durch normative Anforderungen an die Störquelle oder an die Störsenke verwirklicht wird, unterliegt, wie gehabt, der Entscheidung des Gesetzgebers beziehungsweise der Rechtsprechung. Da Anlagen zugleich Störquelle als auch Störsenke sein können, wird im Rahmen der allgemeinen normativen Anforderungen regelmäßig sowohl die Störaussendung limitiert als auch eine ausreichende Störfestigkeit der Geräte gefordert.

2.1.4 Ansätze zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit

Neben der Ermittlung potentieller Immissionsbelastungen zeigt das Gutachten Möglichkeiten auf diese zu minimieren, um derart die elektromagnetische Verträglichkeit des Planungsvorhabens im Plangebiet zu gewährleisten. Entsprechend dem dreiteiligen Störkopplungsmodell kann dabei gedanklich nach Maßnahmen zur Reduzierung der Störaussendung an der Störquelle, der über den Kopplungspfad an die Störsenke übertragenen Immissionen sowie zur Erhöhung der Störfestigkeit der Störsenke unterschieden werden.

Die Zuordnung der verschiedenen Möglichkeiten zu einer der drei Abschnitte des Störkopplungsmodells dient dabei lediglich der besseren Verständlichkeit. Grundsätzlich orientiert sich die Zuordnung vorliegend an der räumlichen Anordnung einer Minderungsmaßnahme. Diese an räumlichen Kriterien orientierte Zuordnung vermag zwar in Grenzbereichen keine trennscharfe Abgrenzung zu leisten, da etwa der Einsatz von Maßnahmen der *aktiven Kompensation* (siehe dazu unter 2.1.4.3) an sich sowohl dem Kopplungspfad als auch der Störsenke zugeordnet werden kann, weil diese im unmittelbaren Nahbereich der Störsenke umgesetzt werden. Gleichzeitig gilt aber auch, dass die Zuordnung als solche lediglich begrifflicher Natur ist und die Wirksamkeit einer Maßnahme aus physikalischer Sicht unberührt lässt.

2.1.4.1 *Möglichkeiten zur Reduzierung der Störaussendung an der Störquelle*

Welche Möglichkeiten zur Reduzierung der Störaussendung einer Störquelle zur Verfügung stehen, hängt von der jeweiligen Störquelle im Einzelfall ab. Beim Betrieb einer Straßenbahn wird das Emissionsniveau insbesondere von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Fahrstrom in der Oberleitung sowie den Schienen und der Ströme im Fahrzeug,
- Schienenisolierung,
- Oberleitungshöhe (Abstand zwischen Oberleitung und Schienen),
- Oberleitungsaufbau (Einfachfahrdraht, Oberleitungsketten),
- ferromagnetische Eigenschaften einer Straßenbahn (Stahlanteil)¹,
- Länge des Speiseabschnittes,
- Anordnung der Unterwerke,
- beidseitige Fahrstromversorgung,
- Kabelverlegung im Bereich der Trasse und der Anbindung des Unterwerks,
- Ausbildung der Rückleitungsanschlussleiter,
- Anzahl der gleichzeitig passierenden Fahrzeuge.

2.1.4.2 *Möglichkeiten zur Reduzierung der über den Kopplungspfad übertragenen Immissionen*

Unterschieden wird, wie ausgeführt, grundsätzlich zwischen leitungsgebundener und feldgebundener Kopplung. Leitungsgebundene Störungen (galvanische Kopplung) kommen vorliegend insbesondere aufgrund von Streuströmen im Erdreich in Betracht. Beim Betrieb einer Straßenbahn können feldgebundene Störungen als induktive Kopplung (Magnetfelder), kapazitive Kopplung (elektrische Felder) und Strahlungskopplung (hochfrequente Felder) auftreten. Beeinflusst wird die in die Störsenke vermittelte Störgröße dabei maßgeblich durch den Abstand zwischen Störquelle und Störsenke, also durch die Länge des Kopplungspfades.

2.1.4.3 *Möglichkeiten zur Reduzierung der Störempfindlichkeit an der Störsenke (Erhöhung der Störfestigkeit)*

Als Störsenke sind im Fall einer Straßenbahntrasse insbesondere Geräte zu betrachten, die aufgrund physikalischer Effekte (Lorenzkraft, Larmorfrequenz) direkt auf magnetische Felder reagieren, wie z. B. Elektronenstrahlröhren. Besonders im Forschungsbetrieb werden Geräte verwendet, die eine sehr hohe Empfindlichkeit gegen externe Felder besitzen.

Welche Möglichkeiten zur Reduzierung der Emissionen in eine Störsenke beziehungsweise zur Erhöhung der Störfestigkeit der Störsenke zur Verfügung stehen, ist einzelfallabhängig. Bei den im Plangebiet befindlichen Geräten kommen grundsätzlich insbesondere folgende Maßnahmen in Betracht:

- Änderung der räumlichen Ausrichtung eines Gerätes bei gegebener Empfindlichkeit gegenüber ausschließlich einzelner Feldkomponenten (x, y, z),
- aktive Kompensation (durch Gegenfelder),
- direkte Abschirmung des Gerätes oder von Gerätekomponenten.

Für die letztgenannte Möglichkeit gilt, dass diese, soweit lediglich Beeinträchtigungen durch magnetische Felder zu betrachten sind², grundsätzlich besteht, in ihrer Wirksamkeit indes stark von der Frequenz des jeweiligen magnetischen Störfeldes abhängig ist. Maßnahmen zur direkten Abschirmung von magnetischen Gleichfeldern sowie von sehr langsam veränderlichen Magnetfeldern machen aufgrund physikalischer Zusammenhänge sehr hohe Wandstärken (Abschirmung aus hochpermeablem Material) erforderlich. Niederfrequente Magnetfelder können grundsätzlich durch Verwendung von leitfähigem und/oder permeablem Material geschirmt werden. Indes werden auch hierbei große Wandstärken erforderlich. In der Praxis kommen Maßnahmen der direkten Abschirmung

¹ Im engeren Sinn handelt es sich nicht um eine Störaussendung, sondern eine Verzerrung des Erdmagnetfeldes durch die ferromagnetischen Materialien.

² Siehe hierzu unter 2.1.1.

bei gleich-, niederfrequenten und sehr langsam veränderlichen Magnetfeldern nur in Spezialfällen zum Einsatz und werden auch im Folgenden nicht weiter untersucht.

2.2 Straßenbahnspezifische EMV-Betrachtungen

Der Betriebsstrom der Straßenbahn fließt vom Unterwerk über die Oberleitung sowie über die Straßenbahn zur Schiene und über die Schienen zurück zum Unterwerk. Dadurch entsteht eine Spulenordnung. Die resultierende magnetische Feldstärke ist von der Stromaufnahme der Fahrzeuge und der Auslastung des Speiseabschnittes abhängig. Hohe Oberleitungsströme treten in der Beschleunigungsphase auf, wohingegen bei einem „Rollen“ der Bahn geringere Ströme fließen.

Die Anbindung des Unterwerkes erfolgt in der Regel über eine streufeldarme Verlegung der Kabel. Ist die elektrische Isolierung der Schienen zum Erdreich eingeschränkt, kann ein Teil des eigentlich über die Schienen fließenden Rückstromes als sogenannter Streustrom über das Erdreich fließen.

Die Stromaufnahme der Straßenbahnen ist typspezifisch und liegt im Regelfall zwischen 800 A und 1500 A. Für die Betrachtungen im Rahmen des Gutachtens wurde von Fahrzeugen ausgegangen, deren Stromaufnahme im Beschleunigungsfall 1200 A beträgt.

Es muss weiterhin unterschieden werden, ob der Streckenabschnitt nur von einem Fahrzeug befahren wird, oder ob z. B. in jede Richtung eine Bahn fährt. Im Straßenbahnnormalbetrieb kommt es regelmäßig zum Begegnungsverkehr, das heißt in jede Richtung fährt eine Straßenbahn mit maximaler Stromaufnahme, so dass sich die erzeugten magnetischen Felder der beiden Straßenbahnen überlagern.

Hochfrequenzfelder durch elektronische Komponenten oder Abrissfunken an Oberleitungstrennern bzw. vereisten Oberleitungen werden ebenfalls erzeugt.

Neben dem Einfluss durch den Strom ist auch allein durch die Anwesenheit einer Straßenbahn ein Einfluss auf die magnetische Flussdichte in der Umgebung zu erwarten. Dieser wird durch die Feldverzerrung der ferromagnetischen Materialien wie Eisen und Stahl in der Straßenbahn hervorgerufen, da sich die Ferromagnete entsprechend ihrer magnetischen Momente parallel zum äußeren Magnetfeld ausrichten. Dadurch wird das Erdmagnetfeld verzerrt.

3 Grundlagen und Rahmenbedingungen der Begutachtung

3.1 Datengrundlagen des Gutachtens und verwendete Planunterlagen

3.1.1 EMV-relevante Einzelheiten der Rahmenplanung des Vorhabenträgers

Für das Gutachten wurden für die Straßenbahntrasse folgende Randbedingungen angenommen:

- Standard Regelfahrdrahthöhe ist 5,5 m,
- Fahrdraht als Einfachfahrdraht,
- 30 m Abstand zwischen den Oberleitungsmasten,
- die standardmäßige Stromaufnahme einer Straßenbahn bei maximaler Beschleunigung beträgt 1200 A,
- in einem Speiseabschnitt kann in jede Richtung eine Bahn fahren, d. h. maximal 2 Bahnen,
- 1 Unterwerk (UW) zur Versorgung der Oberleitung im Bereich, Nieder-Ramstädter-Strasse,
- einseitige Speisung der Oberleitungsabschnitte zwischen Campus Lichtwiese und UW,

Diese Parameter werden später der Berechnung für die Standardausführung zu Grunde gelegt (siehe Abschnitt 4).

3.1.2 Planungsunterlagen

Zur Erstellung des Gutachtens wurden folgende Planungsunterlagen verwendet:

- Lageplan ÖPNV Untersuchung Erschließung Lichtwiese Korridor Roßdorf -Groß Zimmern, Variante Lichtwiese , (Maßstab 1:2000, Stand 14.09.2012)
- Straßenbahn zur Lichtwiese, Vorplanung, Lageplan 02 Variante Wendeschleife (Maßstab 1:500, Stand 11.12.2012)
- Neubau Centre of Smart Interface , elektronische Gebäudepläne (Stand 15.03.2012)
- Grundrisse des Gebäudes L2/01 ohne weitere Angaben
- Bauteilnummer 3202, Grundriss Erdgeschoss Teil 1/3, Entwurfsplanung, Zeichnungsnummer A2330001 (Maßstab 1:100, Stand 04.09.2007)
- Bauteilnummer 3204_F, Grundriss 2. OG Bauteil 'F', Zeichnungsnummer A455002F (Maßstab 1:50, Stand 04.09.2007)
- Bauteilnummer 3204, Grundriss 2. OG, Ausschreibungsplan Zeichnungsnummer (Maßstab 1:100, Stand 14.12.2009)
- Bauteilnummer 3204, Grundriss 3. OG, Ausschreibungsplan Zeichnungsnummer (Maßstab 1:100, Stand 14.12.2009)
- Flurkarte Gemarkung Darmstadt /5,6) Flur 8, 9, 24, 25, 79 (Maßstab 1:500, Stand 12.11.2012)

Es wurden zwei Varianten der Trassenführung begutachtet. Variante 1 beinhaltet eine Straßenbahntrasse entlang der Petersenstraße mit einer Wendeschleife um das Hörsaal- und Medienzentrum (Abbildung 3).



Abbildung 3 Trassenführung Variante 1: Petersenstraße

Variante 2 geht von einer Trasse nördlich der Mensa und einer Wendeschleife nördlich des Hörsaal- und Medienzentrums aus (Abbildung 4).

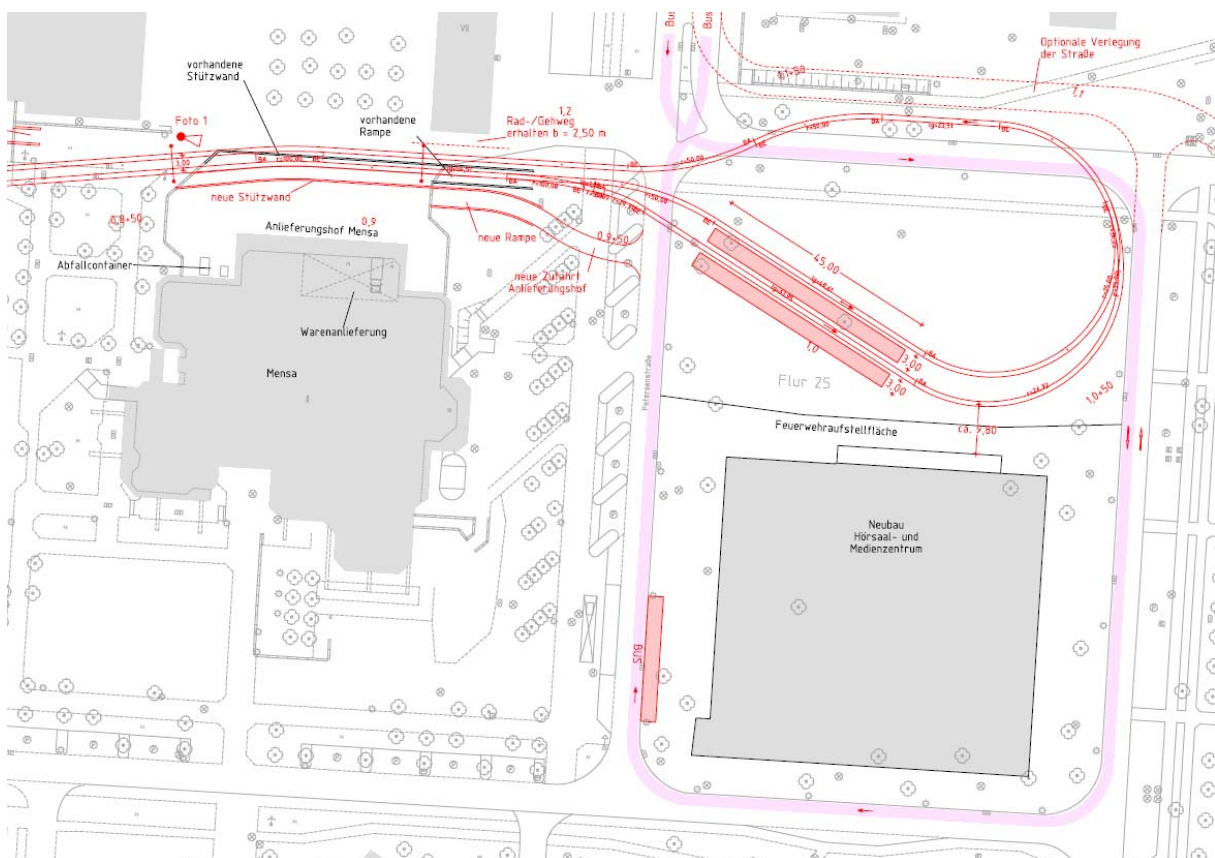


Abbildung 4 Trassenführung Variante 2

3.1.3 Informationen durch die Institute

Die folgenden Institutionen der Technischen Universität Darmstadt haben Informationen zu den gegenüber elektromagnetische Feldern empfindlichen Geräten bereitgestellt :

- Fachbereich Material- und Geowissenschaften
- Fachbereich Chemie
- Center of Smart Interfaces (CSI)

Die erschütterungsempfindlichen Geräte werden in diesem Gutachten nicht betrachtet und werden dementsprechend auch nicht aufgeführt.

3.1.3.1 Fachbereich Material- und Geowissenschaften

Vom Fachbereich Material- und Geowissenschaften wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Geräte angegeben.

Tabelle 1 Geräteliste Material- und Geowissenschaften

Gebäude	Standort	geplanter Standort	Gerät	Institut	Empfindlichkeitsgrenzen ΔB
L2/01	054		REM JSM-6300F Jeol	Elektronische Materialeigenschaften	100nT/50Hz
L2/01	061		JEM 3010	Geomaterialwissenschaft	100nT
L2/01	067		JEM 2100F	Geomaterialwissenschaft	100nT
L2/01	068		JEOL ARM 200F	Geomaterialwissenschaft	20nT
L2/01	072		FEI CM20	Geomaterialwissenschaft	0,18A/m=0,2 μ T
L2/01	9		JEOL JSM 7600F	Geomaterialwissenschaft	30nT /(0,015 μ T/min)
L2/01	20		JEOL JIB 4600F	Geomaterialwissenschaft	30nT /(0,015 μ T/min)
L2/01	062		HREM XL30 FEI	Dünne Schichten	300nT/ 50Hz sonst 100nT
L2/01	073		FEI ESEM Quanta 200FEG	Umweltmineralogie	50nT
L2/01	063-064		DAISY-SOL	Oberflächenforschung	300nT /AC, 100 μ T/DC
L2/01	18		DAISY-BAT	Oberflächenforschung	300nT /AC, 100 μ T/DC
L2/01	165		DAISY-MAT	Oberflächenforschung	300nT /AC, 100 μ T/DC
L2/01	167		STM/AFM Asylum Research	Oberflächenforschung	50nT angenommen
L2/01	169		DAISY-FUN	Oberflächenforschung	300nT /AC, 100 μ T/DC
L2/01	169		UHV-STM/AFM - UHV Scanning Tunneling Microscope	Oberflächenforschung	50nT angenommen

3.1.3.2 Fachbereich Chemie

Vom Fachbereich Chemie wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Geräte angegeben.

Tabelle 2 Geräteliste Fachbereich Chemie

Gebäude	Standort	geplanter Standort	Gerät	Institut	Empfindlichkeitsgrenzen ΔB
L2/04	F204		Röntgen-Photoelektronen-Spektrometer	Physikalische Chemie	300nT /AC, 100 μ T/DC
L2/04	F206		Röntgen-Photoelektronen-Spektrometer SSX-100	Physikalische Chemie	300nT /AC, 100 μ T/DC
L2/04	201	E02.001	Rastertunnel-/Rasterkraftmikroskop	Physikalische Chemie	50nT angenommen
L2/04	-	E03.401	Elektronenmikroskop (TEM)/Rasterkraft-Mikroskop	Makromolekulare Chemie	50nT angenommen
L2/02	235	A.00.039	NMR-Spektrometer	Zentrale NMR-Analytik:	50nT angenommen
L2/02	239	A.00.045	NMR-Spektrometer	Zentrale NMR-Analytik:	50nT angenommen
L2/02	240	A.00.050	NMR-Spektrometer	Zentrale NMR-Analytik:	50nT angenommen
L2/02	241	A.00.055	NMR-Spektrometer	Zentrale NMR-Analytik:	50nT angenommen

3.1.3.3 Center of Smart Interfaces (CSI)

Vom Center of Smart Interfaces wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Geräte angegeben.

Tabelle 3 Geräteliste Center of Smart Interfaces

Gebäude	Standort	geplanter Standort	Gerät	Institut	Empfindlichkeitsgrenzen ΔB
CSI	R14		Rasterkraftmikroskop, MFP 3D ASYLUM Research	Centre of Smart Interfaces	50nT angenommen

3.1.4 Messungen

Es wurden Bestandsmessungen der langsamen Gleichfeldänderung an ausgewählten Messpunkten im Außenbereich bzw. in Institutsgebäuden auf dem Camus Lichtwiese durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Messbericht [20] hinterlegt.

3.2 **Rechtsgrundlagen**

In Deutschland gilt für Betriebsmittel, die in Verkehr gebracht werden und nicht anderen Europäischen Richtlinien unterliegen, das Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG). Die Einhaltung der formulierten Schutzziele wird vermutet, wenn das Gerät die Anforderungen der einschlägigen Normen einhält, die im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht sind.

Nach EMVG müssen Geräte den in Standards festgeschriebenen Mindestanforderungen hinsichtlich der Störfestigkeit und der Störaussendung genügen. Es ist festzuhalten, dass der niederfrequente Bereich, in dem Beeinflussungen beim Betrieb einer Straßenbahn auftreten können, bis auf die 50/60 Hz Komponente nicht durch normative Anforderungen erfasst ist.

Für Bahnanwendungen gelten Produktfamiliennormen bzw. Produktnormen der Reihe EN 50121, [16] und [17]. Die Störaussendung des gesamten Bahnsystems ist im Teil 2 dieser Normenreihe geregelt. Die aufgeführten Grenzwerte für die feldgebundene Störaussendung gelten in einem Frequenzbereich von 9 kHz bis 1 GHz und dienen dem Schutz des Funkempfangs. Für Fahrzeuge des städtischen Nahverkehrs dürfen die Grenzwerte der Störaussendung für Fahrschienen mit 750 V Gleichspannung (Stromschiene) nicht überschritten werden. Unterhalb von 9 kHz sind keine Grenzwerte für das magnetische Feld angegeben.

Zusätzlich sind Regelungen zum Schutz von Personen einzuhalten. Die 26. BImSchV, [15], regelt den Schutz von Personen gegenüber dynamischen Feldern. Sie gilt in der Umgebung von Hochfrequenzanlagen und Niederfrequenzanlagen (z. B. 100 μ T bei 50 Hz und 300 μ T bei 16 2/3 Hz). Diese Verordnung gilt nicht für Oberleitungen von Gleichstromstraßenbahnen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden,

- dass die Störaussendung der Straßenbahn gegenwärtig unterhalb von 9 kHz nicht durch normative Anforderungen limitiert ist,
- dass oberhalb von 9 kHz Grenzwerte für die Störaussendung und die Störfestigkeit existieren, so dass bei CE gekennzeichneten Betriebsmitteln mit keiner Beeinflussung zu rechnen ist.

4 Maßnahmen zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit des Vorhabens

4.1 Allgemeiner Ablauf der Begutachtung

Im Folgenden sind vorab die zu begutachtenden Gerätestandorte aufgelistet. Anschließend erfolgt eine Übersicht über die verschiedenen Arten elektromagnetischer Beeinflussung (Kopplungsarten). In diesem Rahmen wird auch aufgezeigt, welche Kopplungsarten den Gegenstand der weiteren Begutachtung bilden, beziehungsweise – mit anderen Worten – durch welche Kopplungsart eine elektromagnetische Beeinflussung zu erwarten ist, sollten entsprechende Vorsorgemaßnahmen nicht ergriffen werden.

Hieran schließt sich eine Darstellung der zur Gewährleistung der EMV zur Verfügung stehenden technischen Maßnahmen im Einzelnen an. Es handelt sich letztlich um eine vertiefte Darstellung ausgewählter Maßnahmen, welche in Abschnitt 2.1.4 bereits eingeführt wurden. Die in Betracht kommenden Maßnahmen können dabei danach unterschieden werden, ob eine Maßnahme über die gesamte Strecke hin installiert wird beziehungsweise für die gesamte Strecke Wirkung entfaltet (**allgemeine Maßnahmen**) oder ob eine Maßnahme ausschließlich mit Blick auf einen Gerätestandort (oder auch mehrere Gerätestandorte in einem Gebäude) umzusetzen ist (**Gebäude- und gerätespezifische Maßnahmen**). Die erstgenannten Maßnahmen werden vorab und sozusagen „vor die Klammer gezogen“ dargestellt. Es handelt sich dabei durchgehend um Maßnahmen am Emissionsort. Anschließend erfolgt eine beispielhafte Darstellung einer gebäude- und gerätespezifischen EM-Verträglichkeitsprüfung mitsamt den notwendigen Erläuterungen.

In Kapitel 4.3 schließt sich die Darstellung der zur Gewährleistung der EMV konkret erforderlichen gerätespezifischen Maßnahmen an.

4.1.1 Gerätestandorte

Die Begutachtung erfolgt abschnittsweise bezogen auf die Gebäude, in denen die Geräte installiert sind. Die begutachteten Gebäude sind in dem Lageplan in Abbildung 5 angegeben.

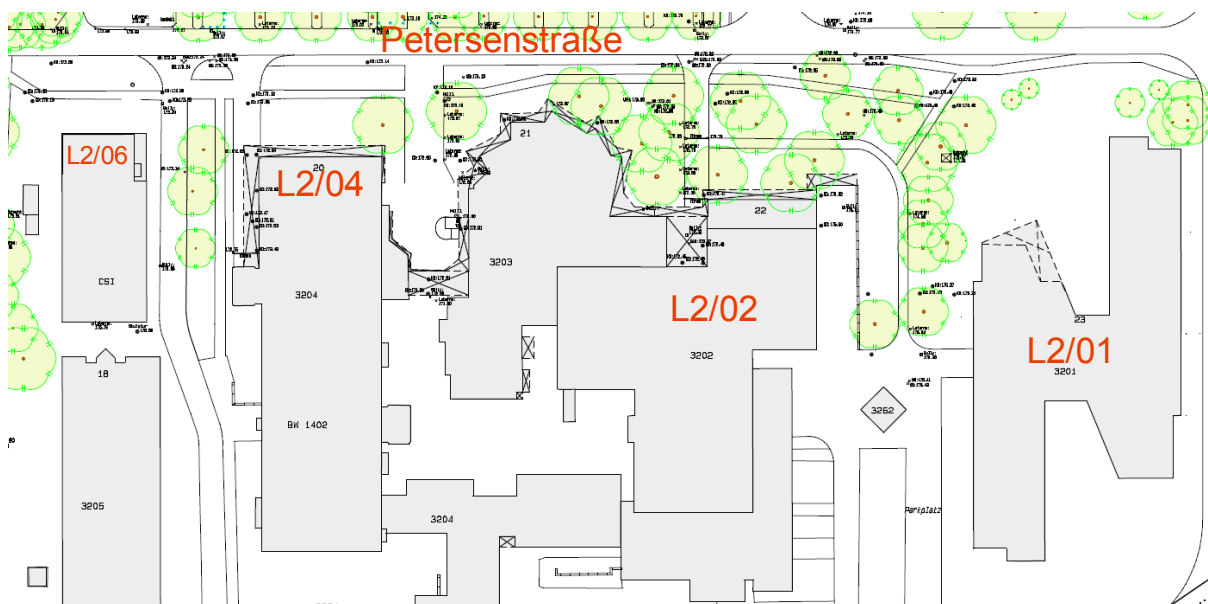


Abbildung 5 Lageplan der begutachteten Gebäude

Die Begutachtung wird nach folgender Reihenfolge durchgeführt:

1. Gebäude L2/01, Fachbereich Material- und Geowissenschaften
2. Gebäude L2/02, Fachbereich Chemie
3. Gebäude L2/04, Fachbereich Chemie
4. Gebäude L2/06 CSI, Center of Smart Interfaces (CSI)

4.1.2 Relevante Kopplungsarten

Der Betrieb der Straßenbahn im Plangebiet wird sowohl elektrische und magnetische Felder als auch elektromagnetische Hochfrequenzfelder generieren. Die möglichen sowie die für die weitere Begutachtung relevanten Kopplungsarten mit den Geräten sind im Folgenden dargestellt.

Tabelle 4 Bewertung der zu berücksichtigenden Kopplungsarten

Kopplungsart	Bewertung	Begutachtung erforderlich
Kapazitiv	Die zu prognostizierenden Feldstärken sind vernachlässigbar gering	Nein
Galvanisch	Die Schienen sind mit einem Ableitungsbelag von 0,5 S/km je Gleis verlegt; so dass die geringen Streuströme nicht zu galvanischen Verkopplungen führen	Nein
Induktiv – Gleichfeldänderungen	Durch den Gleichstrombetrieb der Straßenbahn werden magnetische Gleichfeldänderungen verursacht	Ja
Induktiv -Wechselfelder	Durch die Gleichrichtung im Unterwerk können auch niederfrequente magnetische Felder mit einer Frequenz von 300 Hz sowie deren Oberwellen entstehen. Diese Feldanteile sind von der Amplitude wesentlich geringer als die Gleichfeldänderungen und damit unkritischer	Nein
Hochfrequenz	Die Störfestigkeit der Geräte gegenüber elektromagnetischen Feldern ist aufgrund der Normungssituation gewährleistet (CE-Kennzeichnung)	Nein

Aus der Tabelle folgt, dass nur die Gleichfeldänderungen zur Begutachtung herangezogen werden müssen. Die Gleichfeldänderungen lassen sich vorliegend auf zwei Ursachen zurückführen:

1. Änderungen aufgrund des Betriebsstromes der Straßenbahn,
2. Änderungen aufgrund der magnetisierbaren Fahrzeugmasse.

An zu berücksichtigenden Anlagen finden sich im Plangebiet insbesondere Elektronenmikroskope und Kernspinresonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie). Elektronenmikroskope werden durch magnetische Felder beeinflusst, da der - meist vertikale - Elektronenstrahl eines Elektronenmikroskops insbesondere durch horizontale Magnetfelder abgelenkt wird, wodurch sich die Qualität der Bildgebung (Auflösung) verringert. Bei der NMR-Spektroskopie bedingt ein äußeres Magnetfeld eine Verschiebung der Larmorfrequenz, infolge dessen verringert sich ebenfalls die Auflösung. Die Sensibilität existiert für sich langsam ändernde magnetische Felder in Richtung des B_0 -Feldes, daher ist die Störempfindlichkeit bei vertikalen Störfeldern gegeben. Die Empfindlichkeit wird

angegeben als Spitze-Spitze Wert (Pk-Pk), d. h. der Unterschied zwischen maximalen und minimalen Wert in einem Zeitintervall, da die Geräte auf die Änderung des Feldes reagieren.

Im Gutachten wird die Änderung des Gleichfeldes analytisch prognostiziert und für die Bewertung der Situation herangezogen. Die für eine Prognose notwendige analytische bzw. numerische Berechnungsgrundlage ist im Anhang in Kapitel Anhang A2 dargestellt.

In der Regel kann ab einem Abstand von 50 m von der Gleismitte der Einfluss der magnetisierbaren Fahrzeugmasse vernachlässigt werden, da die resultierenden Gleichfeldänderungen kleiner 50 nT sind.

4.2 Möglichkeiten zur Sicherstellung der EMV im Campus Lichtwiese im Überblick

Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Einflussfaktoren zur Sicherstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) zusammen.

Tabelle 5 Einflussgrößen auf die magnetische Flussdichte

Einflussgröße	Reduktionsmöglichkeit	Bewertung
Stromaufnahme der Straßenbahn	geringere Stromaufnahme aus der Oberleitung bzw. stromlose Abschnitte	starker Einfluss
Oberleitungshöhe	geringere Höhen	geringerer Einfluss bei der Annahme von Streuströmen
Abstand	größere Abstände zur Trasse	starker Einfluss
Material der Bahn	geringerer Stahlanteil	geringer Einfluss bei Abständen größer 50 m
Streuströme	isolierte Schienen	starker Einfluss, insbesondere auf die z-Komponente
Kompensationsleitungen	optimierte Auslegung	starker Einfluss
aktive Magnetfeldkompensation	Installation spezieller Geräte am Gerätestandort	starker Einfluss
Rückstrom beim Bremsen	technische Maßnahmen am Fahrzeug	starker Einfluss

4.2.1 Allgemeine Maßnahmen

Wie bereits dargestellt, lassen sich die zur Verfügung stehenden Reduktionsmöglichkeiten in allgemeine Maßnahmen sowie gebäude- und gerätespezifische Maßnahmen unterteilen. Unter allgemeinen Maßnahmen sollen dabei vorliegend solche Maßnahmen verstanden werden, die über die gesamte Strecke hin installiert werden beziehungsweise für die gesamte Strecke Wirkung entfalten.

Die umsetzungsbedürftigen allgemeinen Maßnahmen sind im Folgenden zusammengestellt:

1. Der Abzweig in den Lichtwiesenweg ist mit Schienenisoliertößen zu versehen, so dass die Gleise elektrisch von den restlichen Gleisanlagen sind. Die Fahrstromversorgung für die neu errichtete Straßenbahn ist elektrisch isoliert durchzuführen. Diese Maßnahme verhindert Ausgleichsströme zwischen verschiedenen Streckenabschnitten über das Erdreich.
2. Die elektrische Speisung für die neue Trasse im Campus Lichtwiese ist gesondert auszuführen. Es darf keine direkte elektrische Verbindung zu anderen Trassen existieren.
3. In der Ausschreibung für den Gleisbau ist ein Ableitungsbelag je Gleis von $G' = 0,5 \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$, einschließlich des messtechnischen Nachweises zu fordern.

4. Es muss sichergestellt werden, dass keine Rückspeisung des Stromes beim Bremsen des Fahrzeuges erfolgt.
5. Für die Prognose der Gleichfeldänderungen wird von kompensierten Straßenbahnstrecken mit 30 m langen Kompensationsabschnitten im gesamten Campusgebiet ausgegangen. Die genaue Festlegung der Länge der kompensierten Abschnitte im Einzelfall hat in der Ausführungsplanung zu erfolgen.
6. Streuströme werden bei den prognostizierten Gleichfeldänderungen vernachlässigt. Treten diese auf, so werden sich insbesondere die vertikalen Komponenten der magnetischen Flussdichte erhöhen.

Für die gebäude- und gerätespezifische Bewertung der EMV wird davon ausgegangen, dass die oben genannten Maßnahmen umgesetzt sind.

4.2.2 Gebäude- und gerätespezifische Maßnahmen am Emissionsort

Entsprechend Tabelle 5 lassen sich unterschiedliche Maßnahmen zur Sicherstellung der Verträglichkeit der Geräte umsetzen. Am Emissionsort sind dies insbesondere:

1. Verwendung einer Leiteranordnung, die zu einer gewissen Kompensation des Feldes führt, [19].

Diese beinhaltet eine Kompensationsleitung in der Mitte der Gleisachse, aus der der Fahrdrat an jedem Mast gespeist wird. Das Prinzip ist im Anhang in Abschnitt Anhang A3 dargestellt. Die Länge des Kompensationsabschnittes hat Einfluss auf den Abstand, ab dem das Feld mit einer höheren Potenz abnimmt. Die Länge ist in Abhängigkeit von den Abständen der Oberleitungsmasten zu bestimmen.

2. Reduktion des Stromes in der Oberleitung.

Hierdurch lassen sich die magnetischen Flussdichten verringern. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Straßenbahnen mit Strombegrenzung, welche in der Planung nicht vorgesehen sind.

3. Begrenzung des Rückstroms über das Erdreich durch Verwendung von isolierten Schienen.

Als Maßnahme am Emissionsort wird vornehmlich die Kompensation betrachtet.

Die Reduktionsmaßnahme am Emissionsort ist im Gutachten folgendermaßen bezeichnet:

- ME1 : Kompensation mit 30 m langen Abschnitten nach Anhang A3. Diese Maßnahme wird kurz als *Kompensation, 30 m Mastabstand*, bezeichnet. Es werden absolute Werte der Gleichfeldänderung angegeben.

4.2.3 Gebäude- und gerätespezifische Maßnahmen am Kopplungspfad

Am Kopplungspfad kann folgende Maßnahme zur Sicherstellung der EMV umgesetzt werden:

1. Da die Emission vom Abstand zur Straßenbahntrasse abhängig ist, kommt theoretisch auch eine Verlagerung zu Standorten mit größerem Abstand zur Straßenbahntrasse in Betracht.

4.2.4 Gebäude- und gerätespezifische Maßnahmen am Immissionsort

Am Immissionsort kann folgende Maßnahme zur Sicherstellung der EMV umgesetzt werden:

1. Für Geräte wie Elektronenmikroskope können aktive Kompensationsmaßnahmen vorgesehen werden. So lässt sich z.B. mit der Anlage MACOM II® von Müller-BBM laut Datenblatt [21] im Frequenzbereich 0 Hz - 1 kHz eine Feldreduktionswirkung > 60 dB (Faktor 1000) - Best Case Annahme - erzielen. Im Gutachten wird von einem abstandsabhängigen Reduktionsfaktor ausgegangen. Dabei wird berücksichtigt, dass das Gerät aufgrund der Spulengröße starke, inhomogene Felder in dem zu schützenden Volumen schlechter kompensiert als niedrige,

homogene Felder. Da die Feldstärke und die Homogenität vom Abstand zur und dem Aufbau der Straßenbahntrasse abhängt, ist für große Abstände eine gute Reduktion von externen Störfeldern zu erzielen. Die genauen Reduktionsfaktoren lassen sich im Vorfeld nur durch numerische Feldberechnung berechnen. Für das Gutachten können nur grobe Reduktionsfaktoren (Worst Case) angenommen werden. Sollte die sich daraus ergebende Bewertung nachteilig für den Vorhabensträger sein, so sind konkrete Berechnungen für die betroffenen Gerätestandorte bei einem möglichen Lieferanten einer Kompensationsanlage (z.B. Müller-BBM) in Auftrag zu geben. Folgende Reduktionsfaktoren werden für das Gutachten angenommen:

a) Trasse in Standardausführung

- bis 100 m Abstand von der Strecke 1/2
- ab 100 m Abstand von der Strecke 1/10

b) Trasse in kompensierter Ausführung mit 30 m langen Abschnitten

- bis 45 m Abstand von der Strecke 1/2
- ab 45 m Abstand von der Strecke 1/10

Als Maßnahme am Immissionsort wird ausschließlich die aktive Kompensation der Geräte betrachtet. Die Reduktionsmaßnahme ist im Gutachten folgendermaßen bezeichnet:

- MI1 : Aktive Kompensation durch Kompensationsanlage am Gerätestandort. Diese Maßnahme wird kurz als *aktive Kompensation* bezeichnet. Es werden relative Werte der Reduktionswirkung für Gleichfeldänderung angegeben, d. h. ein Faktor von z.B. 1/10, mit dem der Wert ohne aktive Kompensation zu multiplizieren ist.

4.2.5 Maßnahmen bei Havarie und Wartung

Zur Wartung der Gleise bzw. für den Havariefall einer Straßenbahn stehen Maßnahmen zur Verfügung, die das Gesamtkonzept zur Sicherstellung der EMV nicht beeinträchtigen.

4.2.6 Exemplarische Darstellung einer gebäude- und gerätespezifischen EM-Verträglichkeitsprüfung

Die Begutachtung der EMV für die einzelnen Geräte basiert auf den jeweiligen Angaben der Institute, insbesondere auf den mitgeteilten Toleranzwerten. Soweit Messungen in der Nähe der Gerätestandorte vorgenommen wurden, hat sich an einigen Orten gezeigt, dass die maßgeblichen Grenzwerte (50 nT) teilweise bereits heute überschritten werden. Die Ergebnisse sind im Einzelnen aus dem Messbericht [20] ersichtlich. Einen Vergleich mit den zu erwartenden Zusatzbelastungen beim Betrieb der Straßenbahn in Standardausführung ermöglichen die entsprechenden Angaben.

Die für die Bewertung notwendigen Informationen sind tabellarisch zusammengefasst. Anhand Tabelle 6 wird dies exemplarisch für das Beispielgerät A dargestellt.

Tabelle 6 Beispieltabelle zur Bewertung der EMV von Geräten

Gerät	Gerät A			
Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	x m Erdgeschoss			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Datenangaben	x	y	horizontal	z
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	Bx	By	Bh	Bz
	524	1089	1209	183
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante x				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	129	153	200	78
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	13	15	20	8

Die erste Zeile enthält Angaben über den Abstand des jeweiligen Gerätes von der Petersenstraße sowie zu dem Geschoss, in welchem das Gerät installiert ist. Anschließend ist für das jeweilige Gerät die Toleranzgrenze entsprechend der Datenblattangaben (Herstellerangaben) bzw. den Angaben des Betreibers für die einzelnen Raumrichtungen der magnetischen Induktion aufgeführt. Handelt es sich um ein Gerät, für das der horizontale Anteil spezifiziert ist (Elektronenmikroskop), so ist zusätzlich die Spalte "horizontal" enthalten. Dem folgend enthält die dritte Zeile Angaben zu der analytisch ermittelten Zusatzbelastung bei einer Straßenbahn in Standardausführung¹. Sind die Werte größer als die Toleranzgrenze, so wird dieser Umstand durch eine farbliche Kennzeichnung besonders hervorgehoben. Für diesen Fall werden ab der vierten Zeile eine oder mehrere Kombinationsmöglichkeiten dargestellt, bei deren Umsetzung die Zusatzbelastung entsprechend der analytischen Berechnungen unterhalb der Toleranzgrenze liegen wird. Im abgebildeten Beispiel wird ersichtlich, dass die geforderten Toleranzwerte von 50 nT Spitze-Spitze dort mittels einer Kombination aus den Reduktionsmaßnahmen ME1 und MI1 eingehalten werden könnten.

Die für die nachfolgenden Darstellungen jeweils ausgewählten Variante(n) erfüllen dabei stets folgende Mindestbedingungen:

- Reduktion der zusätzlichen Belastungen auf < 50 nT Spitze-Spitze (Toleranzgrenze)
- grundsätzlicher Vorrang von Maßnahmen am Emissionsort vor solchen am Immissionsort, soweit der wirtschaftliche Betriebsablauf dadurch nicht gefährdet wird
- zahlenmäßig möglichst geringe Anzahl kombinierter Reduktionsmaßnahmen

Anschließend wird verbal die Variante dargestellt, die in der Summe der Reduktionsmaßnahmen sowohl einen ordnungsgemäßen Straßenbahnbetrieb sichert, als auch eine unzulässige Beeinträchtigung der als empfindlich angegebenen Geräte ausschließt.

4.2.7 Allgemeine Bewertung der gegenwärtigen Situation

Es existieren im Tagesverlauf natürliche Schwankungen des Erdmagnetfeldes. Aufgrund der langsamen Änderung kann diese Schwankung in der Regel durch die Messtechnik kompensiert werden. Zusätzlich sind kurzzeitige Schwankungen des Magnetfeldes mit geringeren Amplituden möglich. Es ist üblich, einen Wert von 50 nT für diese Schwankungen anzunehmen, auch wenn diese in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der betrachteten Komponente auch nur zwischen 5 nT und 20 nT liegen können.

In Zeiten von magnetischen Stürmen kann sich die Stärke des Erdmagnetfeldes in kurzer Zeit um Werte von bis zu 250 nT (bei geringer Aktivität) ändern. Auch Werte bis zu ca. 1000 nT sind bei starken magnetischen Stürmen möglich.

¹ Der Standardausführung der Strecke liegt die Annahme zu Grunde, dass zwei Fahrzeuge mit jeweils 1,2 kA Stromaufnahme einen Streckenabschnitt passieren. Vereinfachend wird mit nur einem Gleis und Oberleitung mit 2,4 kA Betriebsstrom gerechnet.

Die künstlichen Störungen im Frequenzbereich von 5 Hz bis 9 kHz sind erfahrungsgemäß größer als 100 nT. Das Störpotential wird dabei in den Gebäuden selbst erzeugt, da jeder Strom von einem Magnetfeld umgeben ist. Bei einer breitbandigen Messung der Induktion zwischen 5 Hz und 30 kHz misst man in üblichen Laborgebäuden in der Regel Induktionswerte von 150 nT bis 250 nT Spitze, d. h. 300 nT bis 500 nT Spitze-Spitze. Diese Werte sind vor allem auf der 50 Hz Netzfrequenz und deren Vielfachen festzustellen.

Bezüglich der hochfrequenten Felder (9 kHz bis 1 GHz) sind typische Pegel für eine städtische Umgebung zu erwarten. Ein größerer Einfluss der Straßenbahn auf den Umgebungspegel in der Nähe der Gebäude wird nicht vermutet¹. Oberhalb von 30 MHz werden die höchsten Feldstärken durch lizenzierte Funkdienste erzeugt, so dass bei ordnungsgemäßem Geräteaufbau und Einhaltung der gültigen Standards zur Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder keine Störungen auftreten sollten.

4.3 Bewertung der EMV für die Geräte der Fachbereiche

Die Bewertung der EMV der Geräte erfolgt für die beiden Trassenvarianten in gesonderten Unterabschnitten.

4.3.1 Bewertung der EMV für die Trassenvariante 1

Die Variante 1 geht von einer Straßenbahntrasse entlang der Petersensenstraße mit einer Wendeschleife um das Hörsaal- und Medienzentrums gemäß Abbildung 3 aus. Die EMV kann bei dieser Variante nicht garantiert werden.

4.3.1.1 Gebäude L2/01, Fachbereich Material- und Geowissenschaften

In dem Gebäude L2/01 werden verschiedene wissenschaftliche Geräte betrieben. Die Bewertung der EMV Situation ist in Tabelle 7 bis Tabelle 16 zusammengefasst. Für die Geräte wurde die Vorbelastung ermittelt, welche oberhalb der Toleranzgrenze liegt. Dies betrifft insbesondere Räume direkt neben dem Böllenfalltorweg.

Tabelle 7 Bewertung der EMV für die AG Elektronische Materialeigenschaften, AK Prof. Seggern

Gerät	REM JSM-6300F Jeol			
Raum	054			
Abstand zur Petersenstraße	47 m			
Geschoss	1.UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	30	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnin Standardausführung in nT	594	1231	1367	329
Zusatzbelastung bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	152	224	271	25
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	15	22	27	3

¹ Wegen der CE Konformität der Straßenbahn. Im Schienenbereich sind höhere Funkstörpegel vorhanden.

Tabelle 8 Bewertung der EMV für die AG Geomaterialwissenschaft, AK Prof. Kleebe

Gerät	JEM 3010				JEM 2100F			
Raum	061				067			
Abstand zur Petersenstraße	25 m				47 m			
Geschoss	1. UG				1. UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	100	100	-	-	100	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn Standardausführung in nT	2062	4216	4693	1950	594	1231	1367	329
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	1140	1741	2081	240	152	224	271	25
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/2	1/2	1/2	1/2	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	570	871	1041	120	15	22	27	3

Tabelle 9 Bewertung der EMV für die AG Geomaterialwissenschaft, AK Prof. Kleebe

Gerät	ARM200F				FEI CM20			
Raum	068				072			
Abstand zur Petersenstraße	51 m				65 m			
Geschoss	1. UG				1. UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	20	100	-	-	200	200
Zusatzbelastung durch Straßenbahn Standardausführung in nT	505	1047	1162	259	311	647	718	127
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	115	170	205	19	55	76	94	9
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	12	17	21	2	6	8	9	1

Tabelle 10 Bewertung der EMV für die AG Geomaterialwissenschaft, AK Prof. Kleebe

Gerät	JEOL JSM 7600F				JEOL JIB 4600F			
Raum	9				20			
Abstand zur Petersenstraße	104 m				75 m			
Geschoss	EG				EG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	30	100	-	-	30	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn Standardausführung in nT	122	253	281	19	235	488	542	50
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	20	17	26	2	41	50	65	6
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	2	2	3	0	4	5	6	1

Tabelle 11 Bewertung der EMV für die AG Dünne Schichten, Prof. Alff

Gerät	HREM XL30 FEI			
Raum	062			
Abstand zur geplanten Trasse	29 m			
Geschoss	1. UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	100	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	1542	3168	3523	1300
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	726	1108	1325	139
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/2	1/2	1/2	1/2
M Summe in nT	363	554	662	70

Tabelle 12 Bewertung der EMV für die AG Umweltmineralogie, Prof. Weinbruch

Gerät	FEI ESEM Quanta 200FEG			
Raum	073			
Abstand zur Petersenstraße	69 m			
Geschoss	1.UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	276	574	637	106
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	48	62	78	7
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	5	6	8	1

Tabelle 13 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät	DAISY-SOL			
Raum	063-064			
Abstand zur Petersenstraße	34 m			
Geschoss	1.UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	1127	2326	2585	832
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	440	668	800	77
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/2	1/2	1/2	1/2
M Summe in nT	220	334	400	39

Tabelle 14 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät	DAISY-BAT			
Raum	18			
Abstand zur Petersenstraße	60 m			
Geschoss	EG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	366	763	846	97
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	66	99	119	11
M Summe in nT	66	99	119	11

Tabelle 15 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät	DAISY-MAT				STM/AFM Asylum Research			
Raum	165				167			
Abstand zur Petersenstraße	39 m				46 m			
Geschoss	1. OG				1. OG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	864	1798	1995	445	622	1295	1437	274
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	281	422	507	48	163	241	291	27
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/2	1/2	1/2	1/2	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	141	211	253	24	16	24	29	3

Tabelle 16 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät	DAISY-FUN				UHV-STM/AFM			
Raum	169				169			
Abstand zur Petersenstraße	53 m				53 m			
Geschoss	1. OG				1. OG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnn								
Standardausführung in nT	469	976	1083	181	469	976	1083	181
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	148	241	283	23	148	241	283	23
M Summe in nT	148	241	283	23	148	241	283	23

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante auch bei Verwendung von Kompensationsmaßnahmen nicht für jedes Gerät sichergestellt werden.

4.3.1.2 Gebäude L2/02, Fachbereich Chemie

In dem Gebäude L2/02 ist der Bereich zentrale NMR-Analytik angeordnet. Nur die beiden der Straßenbahntrasse am nächsten angeordneten Geräte werden betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass eine aktive Kompensation der NMR Geräte technisch anspruchsvoll ist. Als Alternative gibt es spezielle aktiv geschirmte Magnete für die Geräte, wodurch die Empfindlichkeitsgrenze auf ca. 1 μT erhöht wird.

Die Bewertung der EMV Situation ist in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17 Bewertung der EMV für die Zentrale NMR-Analytik

Gerät	NMR			NMR		
Raum	A.00.050			A.00.055		
Abstand zur Petersenstraße	90 m			97 m		
Geschoss	EG			EG		
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			Raumrichtung		
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	z	x	y	z
	-	-	50	-	-	50
Zusatzbelastung durch Straßenbahnn						
Standardausführung in nT	163	339	29	140	291	23
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen						
Variante 1						
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	27	28	3	23	21	3
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	3	3	0	2	2	0

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante sichergestellt werden kann. Problematisch kann sich das Auftreten von Streuströmen auswirken, da dadurch insbesondere die z- Komponente (vertikale Komponente) des Magnetfeldes erhöht wird (vgl. Anhang A2.2).

4.3.1.3 Gebäude L2/04, Fachbereich Chemie

In dem Gebäude L2/04 werden verschiedene wissenschaftliche Geräte betrieben. Die Bewertung der EMV Situation für die einzelnen Arbeitsgruppen ist in Tabelle 18 bis Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 18 Bewertung der EMV für die AG Makromolekulare Chemie, AK Prof. Rehahn/Prof. Biesalski

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Elektronenmikroskop (TEM) E03.401 70 m 3.OG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung			
	x	y	horizontal	z
	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	267	552	613	137
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	47	60	76	7
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	5	6	8	1

Tabelle 19 Bewertung der EMV für die AG Physikalische Chemie, AK Prof. Schäfer

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Rastertunnel-/Rasterkraftmikroskop E02.001 70 m 2. OG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung			
	x	y	horizontal	z
	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	267	552	613	137
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	47	60	76	7
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	5	6	8	1

Tabelle 20 Bewertung der EMV für die AG Physikalische Chemie, AK Prof. Hess

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Röntgen-Photoelektronen-Spektrometer F204 20 m 2. OG				Röntgen-Photoelektronen-Spektrometer F206 20 m 2. OG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300	-	-	300	300
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	2969	5627	6362	4061	2969	5627	6362	4061
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	2144	3311	3945	536	2144	3311	3945	536
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
M Summe in nT	1072	1656	1972	268	1072	1656	1972	268

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante auch bei Verwendung von Kompensationsmaßnahmen nicht für jedes Gerät sichergestellt werden kann.

4.3.1.4 Gebäude L2/06, Center of Smart Interfaces (CSI)

In dem Gebäude CSI werden verschiedene wissenschaftliche Geräte betrieben, wobei nur ein Gerät für die EMV-Bewertung relevant ist.

Tabelle 21 Bewertung der EMV für das Gebäude CSI

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Rasterkraftmikroskop, mag. Sonde R14 40 m EG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung			
	x	y	horizontal	z
	-	-	100	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	650	1357	1505	229
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	175	260	313	29
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/2	1/2	1/2	1/2
M Summe in nT	88	130	157	15

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante auch bei Verwendung von Kompensationsmaßnahmen nicht sichergestellt werden.

4.3.2 Bewertung der EMV für die Trassenvariante 2

Entsprechend Abbildung 4 führt die Trasse in der Variante 2 nördlich der Mensa vorbei und die Wendeschleife ist nördlich des Hörsaal- und Medienzentrums angeordnet. Der Abstand zu den Geräten wird dadurch mindestens um den Abstand der Trasse zur Petersenstraße (ca. 80 m) erhöht. Die EMV der Geräte lässt sich durch geeignete Maßnahmen sicherstellen.

4.3.2.1 Gebäude L2/01, Fachbereich Material- und Geowissenschaften

In dem Gebäude L2/01 werden verschiedene wissenschaftliche Geräte betrieben. Die Bewertung der EMV Situation ist in Tabelle 22 bis Tabelle 31 zusammengefasst. Für die Geräte wurde die Vorbelastung ermittelt, welche oberhalb der Toleranzgrenze liegt.

Tabelle 22 Bewertung der EMV für die AG Elektronische Materialeigenschaften, AK Prof. Seggern

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	REM JSM-6300F Jeol 054 47 m 1.UG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung			
	x	y	horizontal	z
	-	-	30	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnen Standardausführung in nT	64	83	105	8
Zusatzbelastung bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	26	34	43	3
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	3	3	4	0
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	64	83	105	8
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	6	8	10	1

Tabelle 23 Bewertung der EMV für die AG Geomaterialwissenschaft, AK Prof. Kleebe

Gerät	JEM 3010				JEM 2100F			
Raum	061				067			
Abstand zur Petersenstraße	25 m				47 m			
Geschoss	1. UG				1. UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	100	100	-	-	100	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnin Standardausführung in nT	91	121	151	12	64	83	105	8
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	39	55	67	4	26	34	43	3
M Summe in nT	39	55	67	4	26	34	43	3
Variante 2								
MI1 Straßenbahn in Standardausführung	91	121	151	12	64	83	105	8
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	9	12	15	1	6	8	10	1

Tabelle 24 Bewertung der EMV für die AG Geomaterialwissenschaft, AK Prof. Kleebe

Gerät	ARM200F				FEI CM20			
Raum	068				072			
Abstand zur Petersenstraße	51 m				65 m			
Geschoss	1. UG				1. UG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	20	100	-	-	200	200
Zusatzbelastung durch Straßenbahnin Standardausführung in nT	55	71	90	6	50	64	81	2
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	22	28	36	2	19	24	31	2
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10				
M Summe in nT	2	3	4	0	19	24	31	2
Variante 2								
MI1 Straßenbahn in Standardausführung	55	71	90	6	50	64	81	2
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10				
M Summe in nT	6	7	9	1	50	64	81	2

Tabelle 25 Bewertung der EMV für die AG Geomaterialwissenschaft, AK Prof. Kleebe

Gerät	JEOL JSM 7600F				JEOL JIB 4600F			
Raum	9				20			
Abstand zur Petersenstraße	104 m				75 m			
Geschoss	EG				EG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	30	100	-	-	30	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnin Standardausführung in nT	31	39	50	1	43	55	70	2
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	11	14	18	1	17	20	26	1
M Summe in nT	11	14	18	1	17	20	26	1
Variante 2								
MI1 Straßenbahn in Standardausführung	31	39	50	100	43	55	70	2
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	3	4	5	10	4	6	7	0

Tabelle 26 Bewertung der EMV für die AG Dünne Schichten, Prof. Alff

Gerät Raum Abstand zur geplanten Trasse Geschoss	HREM XL30 FEI 062 29 m 1. UG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung x y horizontal z - - 100 100			
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	85	112	141	12
Zusatzbelastung bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	36	50	62	4
M Summe in nT	36	50	62	4
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	85	112	141	12
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	9	11	14	1

Tabelle 27 Bewertung der EMV für die AG Umweltmineralogie, Prof. Weinbruch

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	FEI ESEM Quanta 200FEG 073 69 m 1.UG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung x y horizontal z - - 50 100			
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	47	60	76	4
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	18	23	29	2
M Summe in nT	18	23	29	2
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	47	60	76	4
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	5	6	8	0

Tabelle 28 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	DAISY-SOL 063-064 34 m 1.UG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung x y horizontal z - - 300 300			
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	78	103	129	10
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	33	44	55	3
M Summe in nT	33	44	55	3
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	78	103	129	10
M Summe in nT	78	103	129	10

Tabelle 29 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	DAISY-BAT 18 60 m EG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	53	73	90	2
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	21	27	34	1
M Summe in nT	21	27	34	1
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	53	73	90	2
M Summe in nT	53	73	90	2

Tabelle 30 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	DAISY-MAT 165 39 m 1. OG				STM/AFM Asylum Research 167 46 m 1. OG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	72	102	125	4	64	90	110	3
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	30	41	51	1	27	36	45	1
M Summe in nT	30	41	51	1	27	36	45	1
Variante 2								
Straßenbahn in Standardausführung	72	102	125	4	64	90	110	3
M Summe in nT	72	102	125	4	64	90	110	3

Tabelle 31 Bewertung der EMV für die AG Oberflächenforschung, AK Prof. Jaegermann

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	DAISY-FUN 169 53 m 1. OG				UHV-STM/AFM 169 53 m 1. OG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung				Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z	x	y	horizontal	z
	-	-	300	300	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	58	81	100	3	58	81	100	3
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	24	31	39	1	24	31	39	1
M Summe in nT	24	31	39	1	24	31	39	1
Variante 2								
Straßenbahn in Standardausführung	58	81	100	3	58	81	100	3
M Summe in nT	58	81	100	3	58	81	100	3

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante für jedes Gerät sichergestellt werden kann. Dabei kann die Trasse sowohl in Standardausführung als auch in kompensierter Ausführung gebaut werden. In der Standardausführung wird es notwendig, an acht Geräten aktive Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen.

In der Ausführung als kompensierte Trasse sind nur an zwei Geräten Kompensationsmaßnahmen erforderlich. An einem Gerät, dem ARM 200F, ist bereits eine Kompensationsanlage installiert, wodurch insgesamt nur für ein Gerät die Installation einer solchen aktiven Kompensationsanlage notwendig wird.

Da die kompensierte Trasse einen geringeren Eingriff in die bestehende Infrastruktur beinhaltet, wird vorgeschlagen, die Straßenbahntrasse zur Sicherstellung der EMV in einer kompensierten Variante auszuführen.

4.3.2.2 Gebäude L2/02, Fachbereich Chemie

In dem Gebäude L2/02 ist der Bereich zentrale NMR-Analytik angeordnet. Nur die beiden der Straßenbahntrasse am nächsten angeordneten Geräte werden betrachtet.

Die Bewertung der EMV Situation ist in Tabelle 32 zusammengefasst.

Tabelle 32 Bewertung der EMV für die Zentrale NMR-Analytik

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	NMR A.00.039 75 m EG			NMR A.00.045 82 m EG		
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			Raumrichtung		
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	z	x	y	z
	-	-	50	-	-	50
Zusatzbelastung durch Straßenbahnin Standardausführung in nT	40	80	2	37	74	2
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen						
Variante 1						
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	16	35	1	15	32	1
M Summe in nT	16	35	1	15	32	1
Variante 2						
Straßenbahn in Standardausführung	40	80	2	37	74	2
M Summe in nT	40	80	2	37	74	2

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante sowohl in Standardausführung als auch in kompensierter Ausführung für jedes Gerät sichergestellt werden kann.

4.3.2.3 Gebäude L2/04, Fachbereich Chemie

In dem Gebäude L2/04 werden verschiedene wissenschaftliche Geräte betrieben. Die Bewertung der EMV Situation ist für die einzelnen Arbeitsgruppen in Tabelle 33 bis Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 33 Bewertung der EMV für die AG Makromolekulare Chemie, AK Prof. Rehahn/Prof. Biesalski

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Elektronenmikroskop (TEM) E03.401 70 m 3.OG			
Toleranzwerte in nT	Raumrichtung			
Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	x	y	horizontal	z
	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahnin Standardausführung in nT	38	90	98	4
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	19	40	44	2
M Summe in nT	19	40	44	2
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	39	90	98	4
M11 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor 1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	4	9	10	0

Tabelle 34 Bewertung der EMV für die AG Physikalische Chemie, AK Prof. Schäfer

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Rastertunnel-/Rasterkraftmikroskop E02.001 70 m 2. OG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung x y horizontal z			
	-	-	50	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	39	90	98	4
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	19	40	44	2
M Summe in nT	19	40	44	2
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	39	90	98	4
MI1 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	4	9	10	0

Tabelle 35 Bewertung der EMV für die AG Physikalische Chemie, AK Prof. Hess

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Röntgen-Photoelektronen-Spektrometer F204 20 m 2. OG				Röntgen-Photoelektronen-Spektrometer F206 20 m 2. OG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung x y horizontal z				Raumrichtung x y horizontal z			
	-	-	300	300	-	-	300	300
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	77	172	188	12	77	172	188	12
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen								
Variante 1								
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	45	98	108	6	45	98	108	6
M Summe in nT	45	98	108	6	45	98	108	6
Variante 2								
Straßenbahn in Standardausführung	77	172	188	12	77	172	188	12
M Summe in nT	77	172	188	12	77	172	188	12

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante für jedes Gerät sichergestellt werden kann. Dabei kann die Trasse sowohl in Standardausführung als auch in kompensierter Ausführung gebaut werden. In der Standardausführung wird es notwendig, an zwei Geräten aktive Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen. In der Ausführung als kompensierte Trasse sind diese Kompensationsmaßnahmen nicht erforderlich.

Da die kompensierte Trasse einen geringeren Eingriff in die bestehende Infrastruktur beinhaltet, wird vorgeschlagen, die Straßenbahntrasse zur Sicherstellung der EMV in einer kompensierten Variante auszuführen.

4.3.2.4 Gebäude L2/06, Center of Smart Interfaces (CSI)

In dem Gebäude CSI werden verschiedene wissenschaftliche Geräte betrieben, wobei nur ein Gerät für die EMV-Bewertung relevant ist.

Tabelle 36 Bewertung der EMV für das Gebäude CSI

Gerät Raum Abstand zur Petersenstraße Geschoss	Rasterkraftmikroskop, mag. Sonde R14 40 m EG			
Toleranzwerte in nT Empfindlichkeitsangaben ΔB in nT	Raumrichtung			
	x	y	horizontal	z
	-	-	100	100
Zusatzbelastung durch Straßenbahn in Standardausführung in nT	50	120	130	4
Zusatzbelastung < Toleranzwert bei den Maßnahmen				
Variante 1				
ME1 Kompensation, 30 m Mastabstand, nT	29	68	74	2
M Summe in nT	29	68	74	2
Variante 2				
Straßenbahn in Standardausführung	50	120	130	4
M11 aktive Kompensation, Reduktionsfaktor	1/10	1/10	1/10	1/10
M Summe in nT	5	12	13	0

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.6 genannten Mindestbedingungen und unter Berücksichtigung des Gesamtergebnisses wird festgestellt, dass die EMV bei der vorgeschlagenen Trassenvariante für jedes Gerät sichergestellt werden kann. Dabei kann die Trasse sowohl in Standardausführung als auch in kompensierter Ausführung gebaut werden. In der Standardausführung wird es notwendig, an einem Gerät aktive Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen. In der Ausführung als kompensierte Trasse sind diese Kompensationsmaßnahmen nicht erforderlich.

Da die kompensierte Trasse einen geringeren Eingriff in die bestehende Infrastruktur beinhaltet, wird vorgeschlagen, die Straßenbahntrasse zur Sicherstellung der EMV in einer kompensierten Variante auszuführen.

Anhang A1 Quellenangaben

- [1] Lageplan ÖPNV Untersuchung Erschließung Lichtwiese Korridor Roßdorf -Groß Zimmern, Variante Lichtwiese , (Maßstab 1:2000, Stand 14.09.2012)
- [2] Straßenbahn zur Lichtwiese, Vorplanung, Lageplan 02 Variante Wendeschleife (Maßstab 1:500, Stand 11.12.2012)
- [3] Neubau Centrer of Smart Interfacse , elektronische Gebäudepläne (Stand 15.03.2012)
- [4] Grundrisse des Gebäudes L2/01 ohne weitere Angaben
- [5] Bauteilnummer 3202, Grundriss Erdgeschoss Teil 1/3, Entwurfsplanung, Zeichnungsnummer A2330001 (Maßstab 1:100, Stand 04.09.2007)
- [6] Bauteilnummer 3204_F, Grundriss 2. OG Bauteil 'F', Zeichnungsnummer A455002F (Maßstab 1:50, Stand 04.09.2007)
- [7] Bauteilnummer 3204, Grundriss 2. OG, Ausschreibungsplan Zeichnungsnummer (Maßstab 1:100, Stand 14.12.2009)
- [8] Bauteilnummer 3204, Grundriss 3. OG, Ausschreibungsplan Zeichnungsnummer (Maßstab 1:100, Stand 14.12.2009)
- [9] Flurkarte Gemarkung Darmstadt /5,6) Flur 8, 9, 24, 25, 79 (Maßstab 1:500, Stand 12.11.2012)
- [10] EN 61000-6-1: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 6-1: Fachgrundnorm - Störfestigkeit für Wohnbereich, Geschäfts- Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe
- [11] EN 61000-6-2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 6-2: Störfestigkeit für Industriebereich
- [12] EN 61000-6-3: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) -Teil 6-3: Fachgrundnormen - Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe
- [13] EN 61000-6-4: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) -Teil 6-4: Fachgrundnorm Störaussendung für Industriebereich, August 2002
- [14] Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG) vom 26.02.2008
- [15] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) vom 16. Dezember 1996
- [16] DIN EN 50121-3-1: Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) -Teil 3-1: Bahnfahrzeuge - Zug und gesamtes Fahrzeug
- [17] DIN EN 50121-2 Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) -Teil 2: Störaussendung des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt
- [18] Gonschorek, K.-H.: EMV für Geräteentwickler und Systemintegratoren. Springer Verlag 2005
- [19] van Overbeeke, F; Gravendeel, B.; Schiedam; Kruit, P.; van der Sluis, L.: Verringerung von DC-Magnetfeldern bei Straßenbahnen. in Elektrische Bahnen, Oldenburg Industrieverlag, Heft 12 2009 S. 522-529
- [20] Bericht zur Bestandsmessung der Änderungen des magnetischen Gleichfeldes am Campus Lichtwiese. Januar 2013
- [21] MACOMM II® Aktive Magnetfeldkompensationsanlage. Datenblatt Müller-BBM GmbH

Anhang A2 Analytische Betrachtungen

Die Prognose der magnetischen Feldänderungen kann durch Simulation mit einem numerischen Tool oder durch eine analytische Berechnung erfolgen. Bei der Simulation wird die Strecke durch ein Drahtmodell vereinfacht, wobei die Oberleitung mit einem Strom gespeist wird, welcher über die Straßenbahn zum Gleis zurückfließt.

Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Höhe des Erdniveaus an den Gebäuden ist gleich dem Höhengniveau der Straßenbahnschienen.
- Der Fahrdrat ist ein Einfachdraht hat eine Fahrdrathöhe $h = 5,5 \text{ m}$ über Schienenoberkante.
- Die Spurweite der Straßenbahn beträgt 1 m . In der Mitte der Gleise verläuft der Fahrdrat.
- Als Abstand zwischen der Mitte von Hin- und Rückgleis beträgt 3 m .
- Es wurden Mittelmasten angenommen.
- Die Modellierung erfolgt über äquivalente Drahtanordnungen, wobei der Einfluss der Gebäudestrukturen auf die Feldverteilung vernachlässigt wird.

Im Folgenden werden kurz die Grundlagen der analytischen Abschätzung dargelegt.

A2.1 Berechnung der magnetischen Induktion durch die Ströme

Setzt man voraus, dass die Ströme in einem Draht konzentriert auf der Achse fließen, kann über das Gesetz von Biot-Savart die magnetische Feldstärke in einem beliebigen Aufpunkt außerhalb der Achse bestimmt werden.

Zur Anwendung der allgemeinen Form des Biot-Savart-Gesetzes auf einen geraden Linienleiter wird die in Abbildung dargestellte Geometrie verwendet.

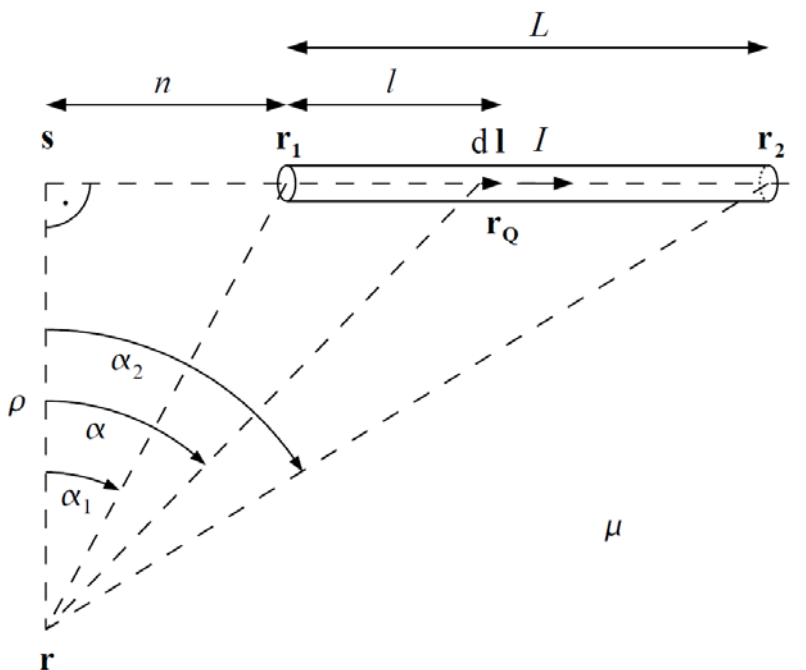


Abbildung A1 Endlich langer Draht mit Strom I auf der Drahtachse

Der Leiter mit der Länge L beginnt an einem Punkt \mathbf{r}_1 und endet bei \mathbf{r}_2 . Somit ergibt sich die gesamte magnetische Flussdichte am Ort \mathbf{r} als Integral über alle Quellpunkte \mathbf{r}_Q entlang des Leiters.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu I}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} d\mathbf{l} \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_Q}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_Q|^3}$$

Nach einer Zwischenrechnung ergibt sich für die magnetische Flussdichte

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu I}{4\pi\rho} (\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1) \hat{\mathbf{e}}_B .$$

Die weitere Problematik beschränkt sich auf die Bestimmung des Abstandes ρ , der Winkel α_1 und α_2 sowie des Einheitsvektors $\hat{\mathbf{e}}_B$ aus den Koordinaten des Beobachtungspunktes \mathbf{r} und den Anfangs- und Endkoordinaten des Leiters \mathbf{r}_1 und \mathbf{r}_2 .

Dazu betrachtet man die Ebene, auf welcher der Leiter senkrecht steht und auf der auch der Punkt \mathbf{r} liegt. Der Normalenvektor \mathbf{n} dieser Ebene ist durch die Punkte \mathbf{r}_1 und \mathbf{r}_2 gegeben.

$$\mathbf{n} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$$

Die Leitergerade lässt sich durch eine Gleichung

$$\mathbf{x} = \mathbf{r}_2 - t\mathbf{n}$$

beschreiben, wobei \mathbf{x} ein Punkt auf der Geraden und t ein Parameter der Geraden ist.

Der Parameter t ergibt sich zu

$$t = \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{n}|^2} .$$

Mit

$$\mathbf{s} = \mathbf{r}_1 + t\mathbf{n}$$

ergibt sich der Abstand ρ zwischen \mathbf{r} und \mathbf{s}

$$\rho = |\mathbf{s} - \mathbf{r}| .$$

Die gesuchten Winkel α_1 und α_2 lassen sich aus der tan-Funktion ableiten

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{s}) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{\rho}\right) \quad \alpha_2 = \arctan\left(\frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{s}) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{\rho}\right) .$$

Der Vektor $\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}$ ist der normierte Normalenvektor.

Der Einheitsvektor $\hat{\mathbf{e}}_B$ in Richtung der magnetischen Flussdichte ergibt sich aus dem Kreuzprodukt

$$\hat{\mathbf{e}}_B = \frac{\mathbf{s} - \mathbf{r}}{|\mathbf{s} - \mathbf{r}|} \times \hat{\mathbf{n}} .$$

Mit diesen Angaben lassen sich die Feldanteile unterschiedlicher Leiter an einem Aufpunkt berechnen und komponentenweise überlagern.

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte am Beobachtungspunkt wurde durch Nutzung eines Scripts (Programms) ausgeführt.

Dabei wird auch die Stromverteilung auf die einzelnen Leiter der Anordnung entsprechend der Leiterquerschnitte und Leitungslängen berechnet und bei der Ermittlung der magnetischen Flussdichte berücksichtigt.

Ein Beispiel für die Leiteranordnung eines kompensierten Abschnittes ist in Abbildung A2 dargestellt.

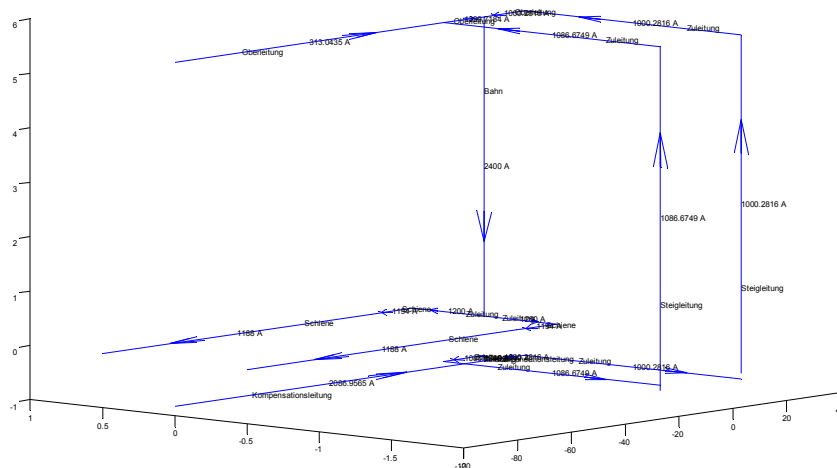


Abbildung A2 Beispiel für eine Leiteranordnung eines kompensierten Bereiches

Zur Vereinfachung der Berechnung wird angenommen, dass der maximale Betriebsstrom von 2 Straßenbahnen (2400 A) in einem Abschnitt entnommen wird. Gleichzeitig wird nur das dem betrachteten Gerät nächstgelegene Gleis berücksichtigt, in dessen Oberleitung der maximale Betriebsstrom von 2400 A fließt. Dies ist eine Worst Case Betrachtung.

Da die Straßenbahn während der Fahrt einen zeitlich variablen Einfluss an einem Aufpunkt hat, wird das Maximum der magnetischen Flussdichte entlang einer zur Trasse parallelen Geraden bestimmt. Bei Auswertung dieser Werte für unterschiedliche Höhen erhält man die maximal zu erwartende magnetische Flussdichte am Beobachtungspunkt, d. h. Gerätestandort.

Bei der Berechnung von kompensierten Anordnungen hängt die magnetische Flussdichte zusätzlich von der Position der Straßenbahn im Kompensationsabschnitt ab. Daher wird die Berechnung für unterschiedliche Positionen wiederholt und das Maximum zur Bewertung der EMV genutzt. Für die Prognose des Gutachtens wurde für ein entsprechender Streckenverlauf angenommen und die Stromverteilung in den einzelnen Speiseabschnitten berücksichtigt.

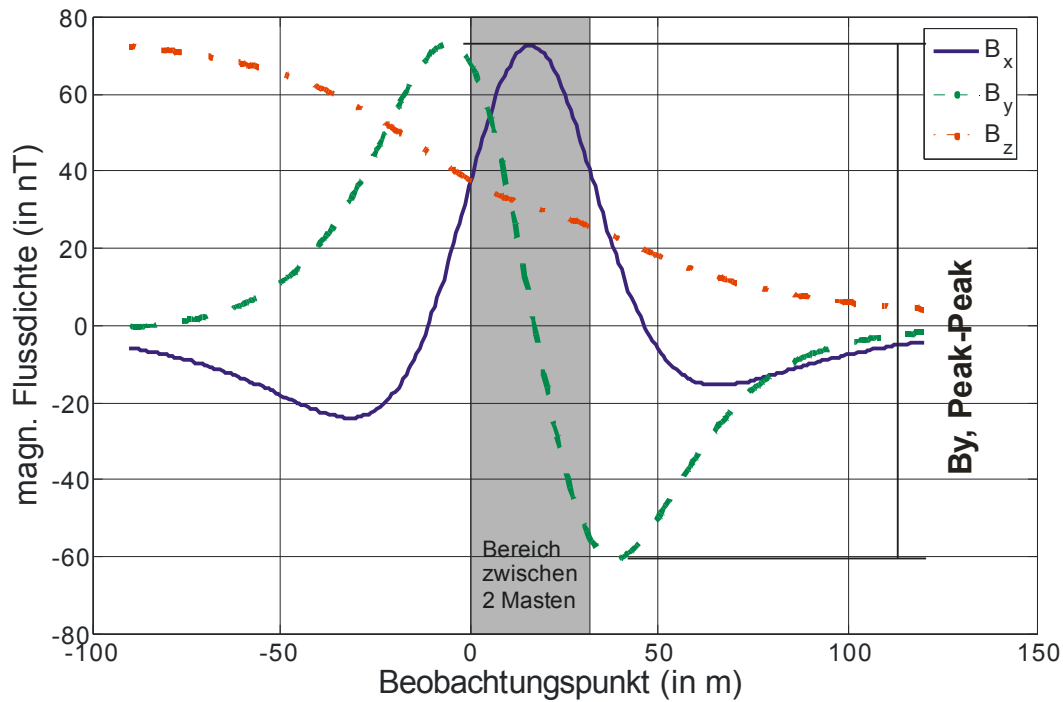


Abbildung A3 Verlauf der magnetischen Flussdichte parallel zu den Gleisen bei einer kompensierten Anordnung in 50 m Abstand und 0 m Höhe; Peak-Peak-Wert als maximale Änderung der Flussdichte; Speisung bei -800 m; Bahn in der Mitte des kompensierten Abschnittes mit Mittelmasten

Wird die Berechnung anstelle von Mittelmasten mit Aussenmasten durchgeführt, so wird die maximale Änderung der magnetischen Flussdichte geringer (vgl. Abbildung A4).

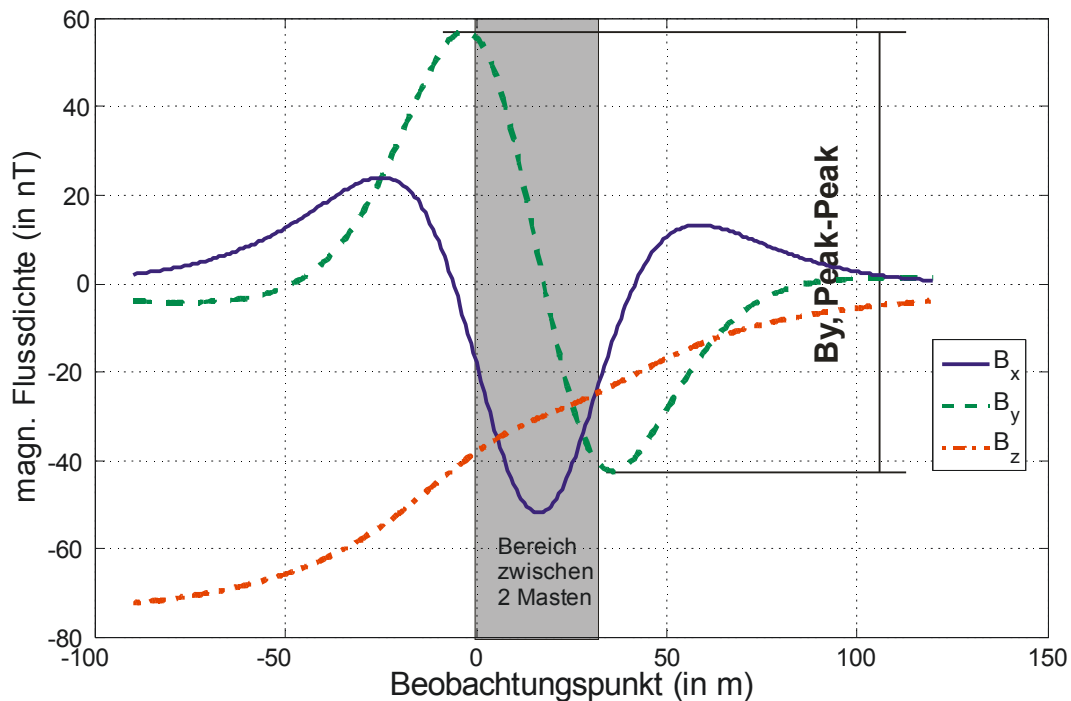


Abbildung A4 Verlauf der magnetischen Flussdichte parallel zu den Gleisen bei einer kompensierten Anordnung in 50 m Abstand und 0 m Höhe; Peak-Peak-Wert als maximale Änderung der Flussdichte; Speisung bei -800 m; Bahn in der Mitte des kompensierten Abschnittes mit Aussenmasten

A2.2 Einfluss des Streustromes (Rückströme über das Erdreich) auf die magnetischen Felder

Die Isolierung zwischen den Schienen und dem Erdreich besitzt eine gewisse Leitfähigkeit, welche durch einen Ableitungsbelag G' charakterisiert ist.

Dieser Ableitungsbelag ist abhängig vom Aufbau des Gleises. An dieser Stelle wird ein Ableitungsbelag von $G' \leq 0,5 \text{ S/km}$ angenommen, wie er sich für Schienen zuverlässig realisieren lässt. Da die Stromverteilung aufgrund der verteilten Ableitströme ortsabhängig wird, kann für die Berechnung der Streuströme folgendes Ersatzschaltbild eines Gleissegmentes verwendet werden.

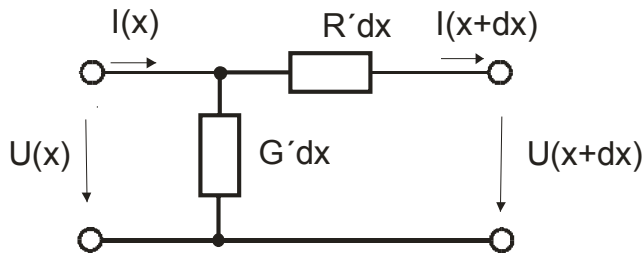


Abbildung A5 Ersatzschaltbild für ein Gleissegment der Länge dx

Darin ist

- R' der Widerstandsbelag der Fahrschiene,
- G' der Ableitungsbelag Fahrschiene/Erde,
- $U(x)$ die Spannung zwischen Fahrschiene und Erde an der Stelle x ,
- $I(x)$ der Strom in der Fahrschiene an der Stelle x .

Mit dem Ersatzschaltbild lässt sich analog zur Leitungstheorie ein DGL-System zur Beschreibung der Ortsabhängigkeit finden:

$$\frac{dI}{dx} = G' \cdot U,$$

$$\frac{dU}{dx} = R' \cdot I.$$

Bei Vorhandensein einer Schienenlängsspannung U_0 am Anfang der Leitung ($x=0$) ergibt sich als Lösung für den ortsabhängigen Spannung des Gleises gegenüber Erde

$$U(x) = U_0 \cdot e^{-\sqrt{R' \cdot G'} \cdot x}.$$

Demzufolge ergibt sich bei einer Strecke mit der Länge l ein Strom von

$$I = \int_0^l G' U_0 \cdot e^{-\sqrt{R' \cdot G'} \cdot x} dx,$$

der nicht über das Gleis zurückfließt, mit der Lösung

$$I = \frac{G' U_0}{\sqrt{R' \cdot G'}} \cdot (1 - e^{-\sqrt{R' \cdot G'} \cdot l}).$$

Daraus folgt, dass der maximale Streustrom auftritt, wenn die Straßenbahn am weitesten entfernt von der Einspeisestelle ist, d. h. für x die maximale Streckenlänge l eingesetzt wird.

Für eine Abschätzung der Streuströme können folgende Daten genutzt werden:

- Streckenlänge $l = 900 \text{ m}$,
- Ableitungsbelag für isoliert verlegte Gleise maximal $G' = 0,5 \text{ S/km}$ je Gleis
- Erfahrungswert für den Widerstandsbelag einzelner Schiene beträgt $R' = 0,04 \text{ } \Omega/\text{km}$.

Als Worst Case ergibt sich bei einem Strom von $1,2 \text{ kA}$ eine Längsspannung entlang des Gleises von $21,6 \text{ V}$. Berechnet man den Streustrom mit 22 V Längsspannungsabfall so ergibt sich ein Anteil des Betriebsstromes, der nicht über das Gleis zurückfließt von $9,5 \text{ A}$, d. h. $0,8 \text{ } \%$.

Anhand der Abbildung A6 und der Abbildung A7 ist beispielhaft der Einfluss der Streuströme auf die Komponenten des magnetischen Feldes erkennbar. Insbesondere die z-Komponente (vertikale Komponente) nimmt unter Berücksichtigung von Streuströmen mit zunehmendem Abstand nicht mehr so stark ab.

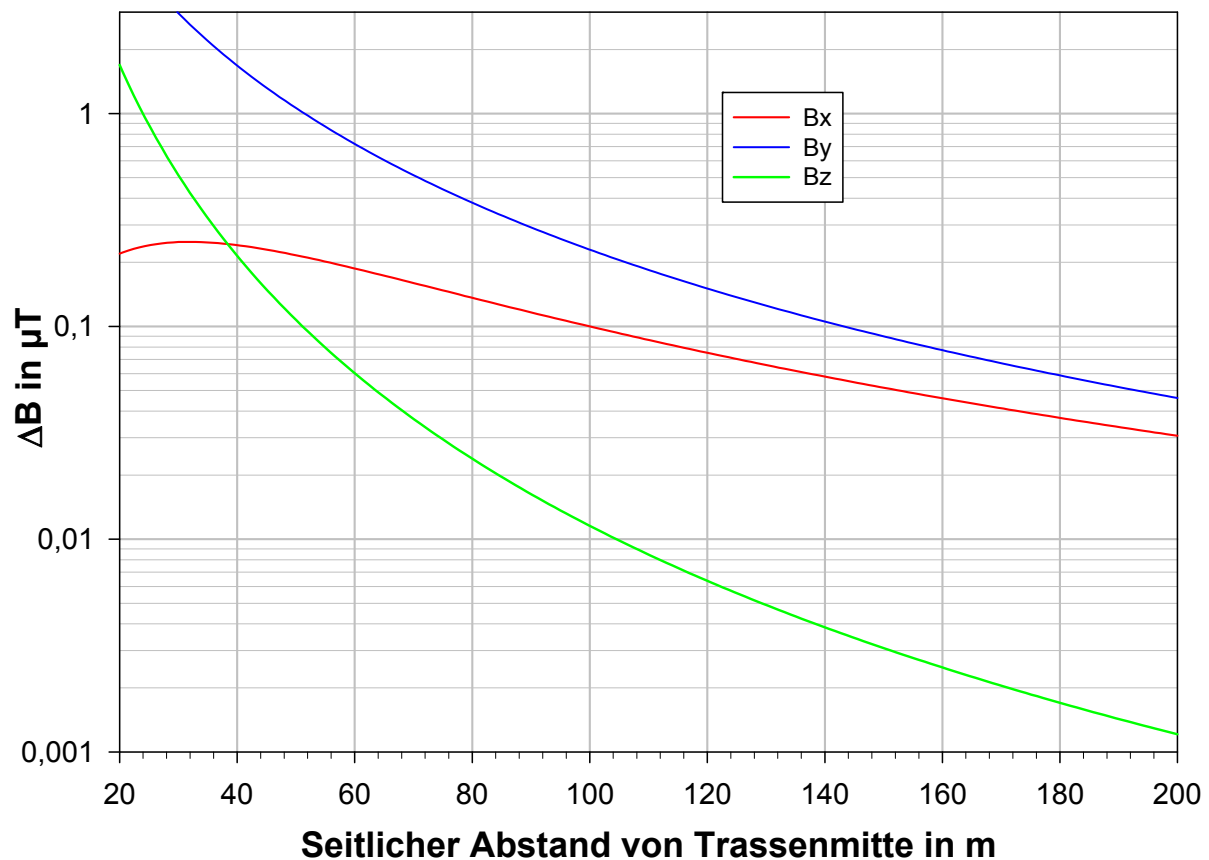


Abbildung A6 Abstandsabhängigkeit der Feldkomponenten bei der Vernachlässigung der Streuströme bei einer Straßenbahn in Standardausführung, $z=0$

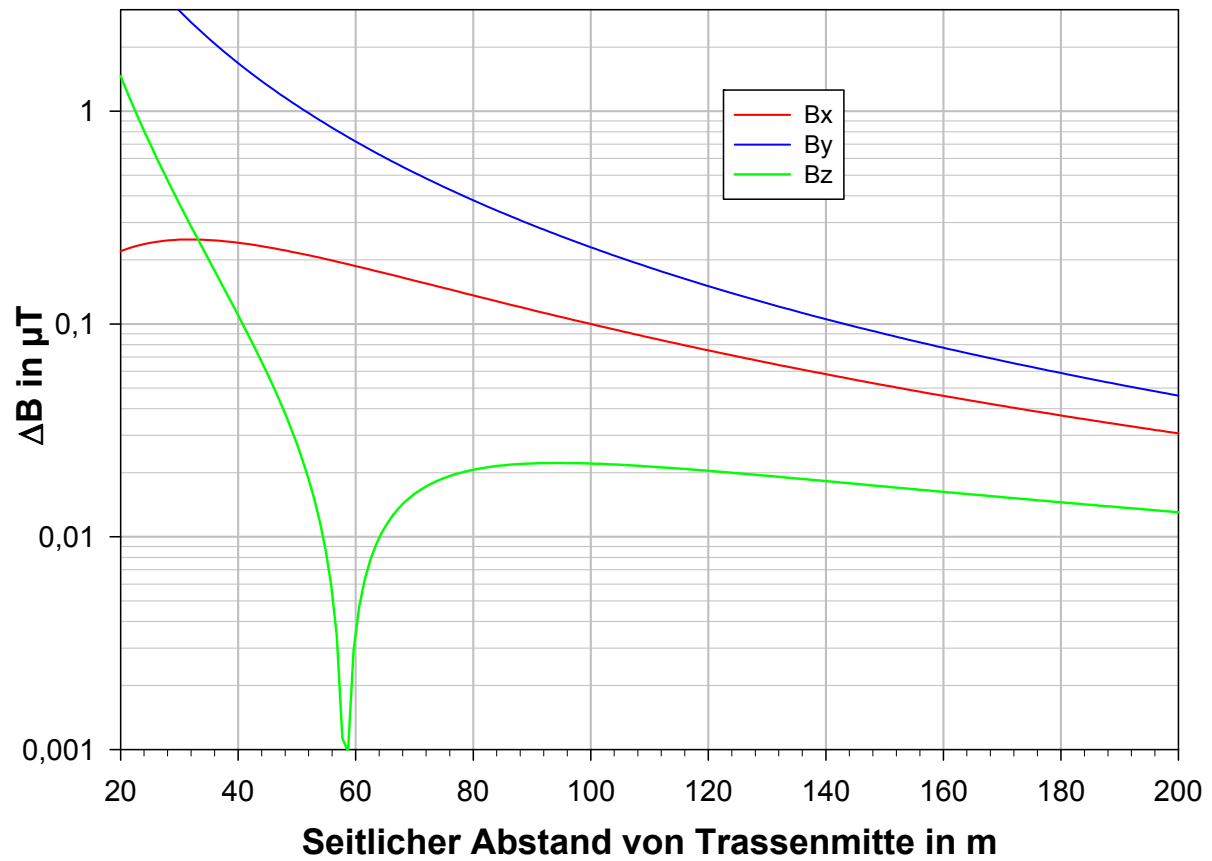


Abbildung A7 Abstandsabhängigkeit der Feldkomponenten bei Berücksichtigung von 1% Streuströmen bei einer Straßenbahn in Standardausführung, $z=0$

Anhang A3 Magnetfeldkompensierte Trassenführung

Die Kompensation beruht auf einer zusätzlichen Leitung - Kompensationsleitung - unterhalb der Schienen, in der Gleisachse. Als Kompensationsabschnitt wird der Abstand zwischen zwei Oberleitungsmasten bezeichnet.

Diese Kompensationsleitung ist über elektrische Verbindungen von der Mitte eines Kompensationsabschnittes beidseitig an den Masten mit dem Fahrdraht verbunden. Die Verbindungsleitung hat einen Querschnitt von $A_F = 120 \text{ mm}^2$ (wie der Fahrdraht), wobei die Verbindung symmetrisch aufgebaut ist.

Entsprechend einem Stromteiler, der sich aus der Anordnung und den Querschnitten von Kompensationsleitung und Fahrdraht ergibt, wird sich der Gesamtstrom auf die Kompensationsleitung und den Fahrdraht aufteilen. Durch die Kompensationsleitung fließt aufgrund des großen Querschnitts der größte Betriebsstrom zur Straßenbahn. Als Querschnitt für die Kompensationsleitung wurde $A_K = 800 \text{ mm}^2$ verwendet.

Die Verlegungstiefe der Kompensationsleitung ergibt sich nach Bette zu

$$h \cdot A_F = A_K \cdot t$$

mit den zusätzlichen Parametern

h - Fahrdrathöhe

t - Verlegungstiefe der Kompensationsleitung.

Im Rahmen der Detailplanung ist die Verlegungstiefe der Kompensationsplanung entsprechend der Stromverteilung zu konkretisieren und die Schutzrechtssituation zu klären.

Der den Berechnungen zugrundeliegende Aufbau ist in Abbildung A8 schematisch dargestellt.

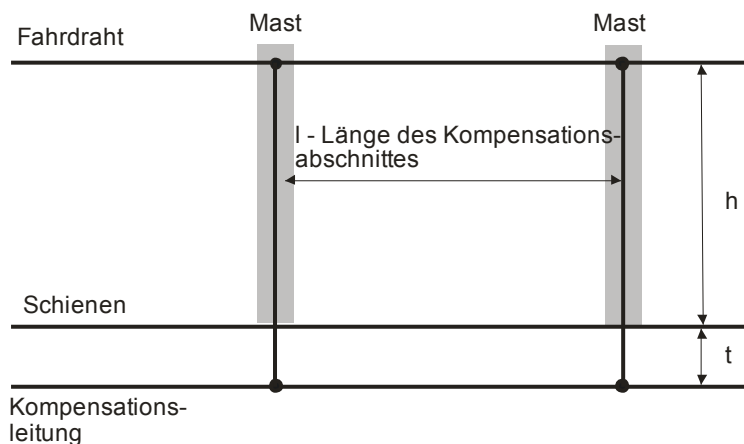


Abbildung A8 Aufbau der kompensierten Straßenbahntrasse

Durch die Länge des Kompensationsabschnittes kann der Feldverlauf beeinflusst werden.

Anhang A4 Gleichfeldänderungen aufgrund der magnetisierbaren Fahrzeugmasse

Eine analytische Prognose der Beeinflussungen des Erdmagnetfeldes durch die Straßenbahn ist nicht mehr möglich, so dass numerische Programme verwendet werden müssen. Um den Einfluss der magnetischen Eigenschaften einer Straßenbahn auf das Gleichfeld zu untersuchen, wurde eine Simulation durchgeführt. Dazu wurde ein dreidimensionaler Quader mit den Abmessungen 160 m Länge, 160 m Breite und 120 m Höhe mit dem Erdmagnetfeld als Randbedingung beaufschlagt. In Süddeutschland ist näherungsweise mit einem Betrag von 48 μT , einer horizontalen Komponente von 20 μT (nach Norden) und einer vertikalen Komponente von 44 μT (nach unten) auszugehen.

Die Straßenbahn wurde zu einem quaderförmigen Körper vereinfacht und im Mittelpunkt des Raumwürfels angeordnet. Nach Orientierung an tatsächlichen Werten wurden die Abmaße auf 30 m Länge, 2,5 m Breite und 2,5 m Höhe festgelegt. Die genaue Masse, Verteilung und magnetische Permeabilität ferromagnetischer Materialien innerhalb der Straßenbahn ist nicht bekannt. Deshalb wurde der gesamte quaderförmige Körper als Material mit einer gleichverteilten und höheren Permeabilität als Luft mit $\mu_r = 4,9^1$ angenommen. Damit findet in jedem Fall eine Überabschätzung statt.

Tabelle A1 Änderung der magnetischen Flussdichte aufgrund eines bewegten ferromagnetischen Körpers mit $\mu_r = 4,9$

Abstand von Trasse	Ausrichtung der Aufpunktklinie	Änderung der magnetischen Flussdichte in nT			
		B_x	B_y	B_z	B
10 m	Horizontal	516	762	876	823
21 m	Horizontal	126	157	164	191
37 m	Horizontal	40	45	52	57
50 m	Horizontal	16	20	12	25
65 m	Horizontal	10	10	7	13

Es ist zu erkennen, dass bei einem Abstand größer 50 m der Einfluss der ferromagnetischen Materialien vernachlässigt werden kann.

¹ Die Magnetisierbarkeit vom tatsächlichen Stahlvolumen wurde auf das verteilte Volumen der Simulation umgerechnet

Anhang A5 Liste der Anlagen

Dem Gutachten sind folgende Anlagen beigelegt:

- Anlage 1: Bericht zur Bestandsmessung der Änderungen des magnetischen Gleichfeldes am Campus Lichtwiese. Januar 2013 (Quelle [20] aus Anhang 1)
- Anlage 2: Verringerung von DC-Magnetfeldern bei Straßenbahnen (Quelle [19] aus Anhang 1)
- Anlage 3: MACOMM II® Aktive Magnetfeldkompensationsanlage (Quelle [21] aus Anhang 1)