

Schirmung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder

beim Bau von Krankenhäusern

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Betreuer

Dipl. Ing. Dr. techn. Ernst Schmutzner
Dipl. Ing. Katrin Friedl

Vorgelegt von
Gerhard Loos

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / März - 2010



Danksagung

Mein erster Dank gilt meinen Eltern, die mir über all meine Studienjahre ein sorgenfreies und komfortables Studium ermöglicht haben.

Meinen Betreuern Dipl. Ing. Dr. techn. Ernst Schmutzner und Frau Dipl. Ing. Katrin Friedl danke ich dafür, dass sie immer wieder Zeit gefunden haben, sich meiner Anliegen anzunehmen.

Danken möchte ich auch Prof. Leitgeb und den Mitarbeitern des Instituts für Health Care Engineering mit Europaprüfstelle für Medizinprodukte, die mir in allen Fragestellungen stets kollegial und hilfsbereit zur Seite standen.

Ein großes Dankeschön geht an meine Studienkollegen und Freunde. Sie haben dafür gesorgt, dass die Jahre in Graz fast wie im Flug vergangen sind und in vielen Situationen als Gesprächs- und Diskussionspartner wertvolle Inputs geliefert.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Die Konzentration der Menschen auf Ballungszentren ist in ständiger Zunahme begriffen. Durch den steigenden Bedarf an Gesundheitsversorgung in diesen Gebieten gepaart mit der hohen Dichte an Gebäuden und Infrastruktur ergeben sich für Krankenhausplaner neue Herausforderungen.

Die vorliegende Arbeit untersucht Grenzwertfestlegungen für elektromedizinische Geräte, besonders für implantierbare Herzschrittmacher. Außerdem wird die Möglichkeit einer Schirmung gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern mit energietechnischen Frequenzen an einem 2D-Modell evaluiert.

Es zeigt sich, dass auf dem Gebiet der Normung noch Handlungs- und Vereinheitlichungsbedarf besteht. Am 2D-Modell kann gezeigt werden, dass, den recherchierten Grenzwerten nach zu schließen, in den meisten Berechnungsfällen eine Schirmung nicht notwendig ist. Eine Schirmung mit Öffnungen (z.B. Fenstern) hat oft einen kontraproduktiven Effekt, wirksam ist nur eine geschlossene Schirmung mit hochpermeablem Schirmblech.

Abstract

The influx of the population into the city districts is continuously increasing. The increased need for medical treatment combined with a high building density and a large amount of power lines and electrified railways result in new challenges for hospital designers.

The thesis investigates in prescriptive limits concerning medical electrical devices, especially implantable cardiac pacemakers. Furthermore the possibility of shielding intervention for low frequency electric and magnetic fields is evaluated on a 2D-model.

There is considerable evidence for changing current regulations with the goal of reaching a higher level of uniformity. The simulation on the 2D-model indicates that there is no need for field reducing measures for most of the cases considered. A shielding designed with openings creates a more or less pronounced counterproductive effect on electric and magnetic fields inside the building. Whenever shielding seems to be necessary, only those made of shroud with a high permeability and without any gaps should be considered for application.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Zeichenerklärung | 7 |
| 2 Kurzfassung | 8 |
| 2.1 Ziel | 8 |
| 2.2 Methode | 8 |
| 2.3 Ergebnisse | 8 |
| 2.4 Schlussfolgerungen | 8 |
| 3 Einleitung | 9 |
| 3.1 Motivation | 9 |
| 3.2 Aufgabenstellung | 9 |
| 4 Methoden | 11 |
| 4.1 Normenrecherche | 11 |
| 4.2 Feldberechnungen | 11 |
| 4.2.1 Vorbereitung | 11 |
| 4.2.2 Berechnungsannahmen | 12 |
| 4.2.3 Durchführung der Berechnungen | 16 |
| 4.2.4 Auswertung der Ergebnisse | 25 |
| 5 Ergebnisse | 26 |
| 5.1 Normenrecherche | 26 |
| 5.1.1 ÖVE/ÖNORM EN 60601-1-2:2007 (2) | 26 |
| 5.1.2 ÖVE/ÖNORM E 8007:2007 (5) | 27 |
| 5.1.3 EN 45502-1:1997 (3) | 27 |
| 5.1.4 ÖVE/ÖNORM EN 45502-2-1:2004 (4) | 27 |
| 5.1.5 E DIN VDE 0848-3-1:2002 (Entwurf) (6) | 28 |
| 5.1.6 Richtlinie 93/42/EWG:1993 (letzte Änderung 2007) (14) | 30 |
| 5.1.7 Richtlinie 90/385/EWG:1990 (letzte Änderung 2007) (15) | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.8 | Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (bis 300GHz) (16) | 30 |
| 5.1.9 | Personen mit aktiven Implantaten in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern - Fachinformation des OEK 2009 (17) | 34 |
| 5.2 | Feldberechnungen..... | 36 |
| 5.2.1 | Tabellen der magnetischen Flussdichte..... | 38 |
| 5.2.2 | Tabellen der elektrischen Feldstärke | 44 |
| 5.2.3 | Abstandsvergrößerung | 48 |
| 5.2.4 | Effekt der Fenster | 51 |
| 5.2.5 | Wahl des Schirmmaterials | 55 |
| 5.2.6 | Ausführung der Gleisanlage | 57 |
| 6 | Diskussion..... | 59 |
| 6.1 | Grenzwerte..... | 59 |
| 6.1.1 | Grenzwertfindung | 59 |
| 6.1.2 | Grenzwertdefinition für den praktischen Gebrauch | 60 |
| 6.2 | Feldberechnungen..... | 61 |
| 6.2.1 | Einschränkungen..... | 61 |
| 6.2.2 | Wahl des Masttyps | 61 |
| 6.2.3 | Ausführungsform der Gleisanlage..... | 62 |
| 6.2.4 | Sinnhaftigkeit von Schirmmaßnahmen..... | 62 |
| 6.3 | Grenzwertanwendung auf das Modell..... | 63 |
| 6.4 | Schutzziele | 66 |
| 6.5 | Weiterführende Überlegungen..... | 67 |
| 7 | Verzeichnisse..... | 68 |
| 7.1 | Literaturverzeichnis..... | 68 |
| 7.2 | Abbildungsverzeichnis | 70 |
| 7.3 | Tabellenverzeichnis | 71 |

1 Zeichenerklärung

| | |
|-----------|---|
| CEN | Comité Européen de Normalisation |
| CENELEC | Comité Européen de Normalisation Électrotechnique |
| DIN | Deutsche Industrienorm |
| EEG | Elektroenzephalogramm |
| EKG | Elektrokardiogramm |
| EleFAnT2D | Electromagnetic Field Analysis Tool für zweidimensionale Probleme |
| EMG | Elektromyogramm |
| EN | Europäische Norm |
| EWG | Europäische Wirtschaftsgemeinschaft |
| FD | Fahrdraht |
| ICNIRP | International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| NF | niederfrequent |
| OEK | Österreichisches Komitee für Elektrotechnik |
| ÖNORM | Österreichisches Normungsinstitut |
| ÖVE | Österreichischer Verband für Elektrotechnik |
| RL | Rückleiter |
| SC | Schiene |
| TS | Tragseil |
| VDE | Verband Deutscher Elektrotechniker |
| VL | Verstärkungsleiter |

2 Kurzfassung

2.1 Ziel

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Findung von Grenzwerten für elektrische und magnetische Felder im Krankenanstaltenbau zu finden. Besondere Beachtung gilt dabei Personen mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten, im speziellen Personen mit Herzschrittmachern. Zusätzlich soll die Möglichkeit einer Schirmung von elektrischen und magnetischen Feldern an der Gebäudeaußenfläche durch Berechnungen verifiziert werden.

2.2 Methode

Zur Grenzwertfindung wird eine Literaturrecherche in einschlägigen Normen und Publikationen von Fachgremien, insbesondere hinsichtlich spezieller Anforderungen für Krankenanstalten, durchgeführt. Die Berechnungen von Schirmungsproblemen erfolgen mit der Software EleFAnT2D an einem 2D Modell eines Gebäudes in der Nähe einer Hochspannungsfreileitungen (Masttyp Donau und Tonne) oder in der Nähe einer eingleisigen Bahnanlage mit verschiedenen Ausführungsformen.

2.3 Ergebnisse

Die Recherche hat gezeigt, dass es noch keine gültigen Normen zum Schutz von Personen mit Implantaten gibt. Eine effektive Schirmung gegenüber magnetischen Feldern an der Gebäudehülle ist nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit nur mit einem vollkommen geschlossenen hochpermeablen Schirmblech möglich.

2.4 Schlussfolgerungen

Für Krankenanstalten existieren zumindest für das magnetische Feld bei Netzfrequenz **f=50 Hz** Grenzwerte die weit unter den Grenzwerten laut Normentwurf für Träger von Herzschrittmachern liegen. Wenn die Möglichkeit einer Schirmung ohne Fensteröffnungen nicht gegeben ist, zeigen die Berechnungen, dass es besser ist, auf die Schirmung zu verzichten als eine Schirmung mit Fensteröffnungen vorzusehen.

3 Einleitung

1744 veröffentlichte Gottlob Krüger die „*Gedanken von der Electricität*“ und läutete somit das Zeitalter der Elektromedizin ein. Die ersten diagnostischen Anwendungen beruhten auf der Reaktion der Nerven bei Reizung mit elektrischem Strom. 1876 zeichnete Etienne Jules Marey (französischer Physiker, 1830-1904) erstmals die elektrischen Vorgänge an einem Tierherz in Kurvenform auf (1).

Seit dieser Zeit hat sich nicht nur die Medizin und mit ihr die Medizintechnik, sondern auch die Gesellschaft erheblich gewandelt. Die Konzentration der Menschen in Ballungszentren wird immer größer und somit steigt auch der Bedarf an Gesundheitsversorgung in diesen Gebieten. Wurden Krankenhäuser Ende des 19. Jahrhunderts noch möglichst außerhalb von Siedlungsgebieten gebaut, ist heute eine Integration in die städtische Infrastruktur üblich.

3.1 Motivation

Die Entwicklung medizinisch-technischer Geräte, die immer leistungsfähiger und sensibler werden, auf der einen, sowie die immer größer werdende Baudichte im städtischen Gebiet auf der anderen Seite, werfen für die Krankenhausplaner neue Fragestellungen auf. Der gleichzeitig stattfindende demografische Wandel der Bevölkerungsstruktur in Richtung einer stetig steigenden Lebenserwartung erhöht zwangsläufig auch die Zahl der Träger von aktiven implantierbaren medizinischen Geräten, insbesondere von Herzschrittmachersystemen. Speziell diese Personen wiederum werden öfter als der Durchschnitt der Bevölkerung eine Krankenanstalt aufsuchen.

Vor allem in der Nähe von Hochspannungsleitungen und Eisenbahnstrecken kann nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass die elektromagnetische Umgebung den Anforderungen eines Krankenhauses entspricht. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Klärung der Fragestellung liefern, welche Grenzwerte für niederfrequente elektrische und magnetische Felder für den Betrieb von Krankenanstalten festgelegt sind. Weiters soll untersucht werden, welche Felder in der Nähe von Hochspannungsleitungen und von elektrifizierten Bahntrassen zu erwarten sind.

3.2 Aufgabenstellung

Aus einschlägigen Normen und aktuellen Publikationen sind die Grenzwerte für niederfrequente elektrische und magnetische Felder zu ermitteln. Ein besonderes Augenmerk gilt hierbei der Wirkung von elektrischen und magnetischen Feldern mit energietechnischen Frequenzen auf Personen mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten, speziell mit implantierbaren Herzschrittmachersystemen. Für die Feldberechnung

ist ein 2D Modell eines Gebäudes zu entwerfen und die Feldquelle mit variablem Abstand zum Gebäude zu positionieren. Am Gebäude kommen verschiedene Schirmmaßnahmen zum Einsatz.

4 Methoden

4.1 Normenrecherche

Für die Normenrecherche wird die Norm *EN 60601-1-2:2007* (2), *EN 45502-1:1997* (3), *EN 45502-2-1:2003* (4), die *ÖVE/ÖNORM E8007:2007* (5) sowie der Normentwurf *E DIN VDE 0848-3-1:2002* (6) herangezogen. Aufgrund von Verweisen in diesen Dokumenten werden weiters die Normen *EN 61000-4-4:2004* (7), *EN 61000-4-5:2006* (8), *EN 61000-4-8:1993+A1:2001* (9) und die *EN 45502-2-1:2008* (10) betrachtet.

Zusätzlich zu den Normen werden das *Medizinproduktegesetz* (11), das *Elektrotechnikgesetz* (12) und die *Nullungsverordnung* (13) betrachtet. Außerdem werden die Richtlinien *93/42EWG:2007* (14) *über Medizinprodukte* und *90/385 EWG:2007* (15) *über aktive implantierbare medizinische Geräte* eingeschlossen.

Als informative Quellen dienen des Weiteren die deutsche Übersetzung der *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)* der ICNIRP (16) und die Fachinformation des OEK: *Personen mit aktiven Implantaten in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern* (17).

Ergebnis der Normenrecherche ist eine Tabelle mit den ermittelten Grenzwerten sowie bei Werten mit Frequenzgang eine grafische Verlaufsdarstellung des Grenzwertes über die Frequenz im Bereich von 1-1000Hz.

4.2 Feldberechnungen

Alle Berechnungen werden mit der Software EleFAnT2D, entwickelt von Istvan Bardi, Oskár Biró und Kurt Preis am Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik, TU-Graz, durchgeführt.

Die Software funktioniert nach dem Prinzip der Finite Elemente Methode, nähere Erläuterungen dazu finden sich in der Fachliteratur (18).

4.2.1 Vorbereitung

Um Daten in EleFAnT2D eingeben zu können, muss ein sogenanntes *Grid* vorhanden sein. Dies ist eine Maske aus Gitternetzlinien in die in weiterer Folge Strukturen eingefügt werden können. Für die Erstellung des Grids werden alle benötigten Feldquellen in der 2D-Ansicht dargestellt und die Gitternetzlinien derart eingetragen, dass sich in jedem entstehenden Gitternetzabschnitt nur ein Objekt befindet. Dieses initiale Grid ist in

Abbildung 1 dargestellt.

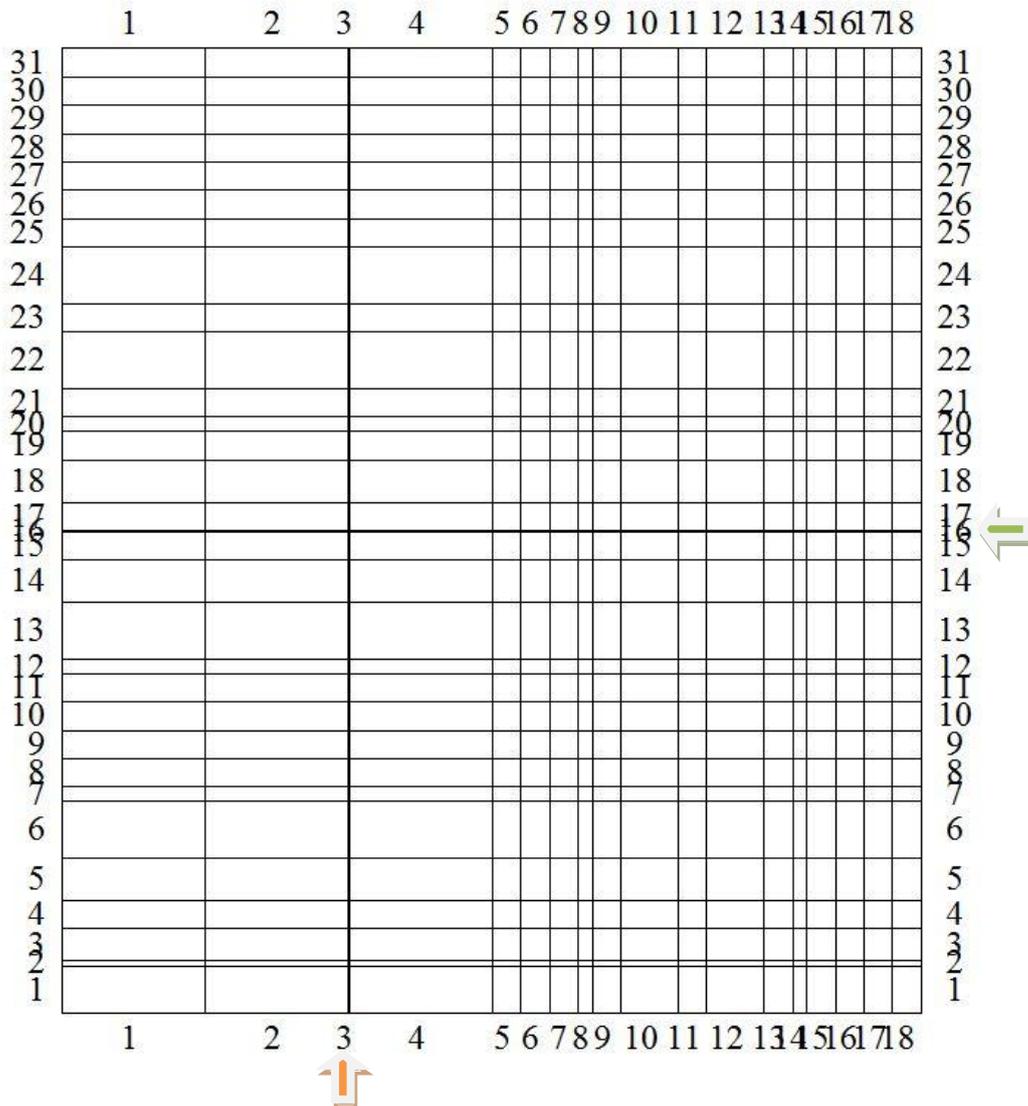


Abbildung 1: Grundgitter zur Eingabe der verschiedenen Feldquellen

Die Dicke der Schirmung wird in **x**-Richtung mit Element 3 und in **y**-Richtung mit Element 16 eingestellt. Für eine Schirmung mit Stahl wird eine Dicke von **5 cm** und für die Schirmung mit hochpermeablem Schirmblech eine Dicke von **3 mm** als Berechnungsgrundlage gewählt.

Über das Gitterelement 4 in x-Richtung wird der Abstand zwischen Gebäude und Feldquelle eingestellt. Bei Bedarf (große Abstände) werden an dieser Stelle weitere Elemente eingefügt.

4.2.2 Berechnungsannahmen

4.2.2.1 Hochspannungsfreileitungen

Alle Berechnungen werden unter der Annahme eines Worst-Case-Betriebsfalles vorgenommen.

Dies bedeutet eine üblicherweise verwendete Phasenleiteranordnung am Masten bei maximaler Strombelastung beider Systeme (thermischer Grenzstrom) bzw. bei höchster zulässiger Betriebsspannung. Die Höhe der Leiterseile wird so gewählt, dass sich das jeweils tiefste Leiterseil auf einer Höhe von $h=8\text{ m}$ über dem Bodenniveau befindet¹, die Berechnung findet also für maximalen Durchhang statt.

Für die betrachteten 110-kV-Hochspannungsfreileitungen vom Typ *Donau* und *Tonne* liegt der Wert für den thermischen Grenzstrom beim gewählten Leiterseiltyp Al/St 240/40 bei $I_{\max, \text{therm}}=640\text{ A}$ und die maximal zulässige Betriebsspannung bei $U_{\max}=123\text{ kV}$, jeweils bei einer Frequenz von $f=50\text{ Hz}$.

Ausdrücklich *nicht* betrachtet werden Asymmetrien in Spannung und Strom, Oberschwingungen, sowie Betriebsfälle, die vom Regelbetrieb abweichen (z.B. Abschaltung eines Leitungssystems) sowie Störfälle im Leitungsbetrieb, die eine Abschaltung des betroffenen Systems nötig machen (z.B. Bruch eines Leiterseils).

4.2.2.2 Elektrifizierte Bahntrasse

Die Bahntrasse wird als eingleisige Strecke modelliert. Als Ausführungsformen werden eine Anlage mit Rückleiter, eine Anlage mit Verstärkungsleiter, eine Anlage mit Verstärkungs- und Rückleiter, sowie eine Anlage ohne Verstärkungs- und Rückleiter berechnet. Die Schienenhöhe befindet sich auf Bodenniveau Erdgeschoß.

Der gesamte Traktionsstrom beträgt für alle Berechnungen $I_{F, \text{eff}}=1000\text{ A}$. Die Rechenannahme geht vom Betriebsfall einer isolierten Schienenverlegung aus. Bei derartigen Anlagen fließt kein Stromanteil über die Erde zurück, der gesamte Rückstrom teilt sich nur auf die Schienen und den fallweise vorhandenen Rückleiter auf. Für die Rückleitung wurde in Abwandlung der Faustformel aus der Dissertation von Frei eine Stromaufteilung zu gleichen Teilen festgelegt. Die Aufteilung der Ströme in Fahrdraht, Tragseil und Verstärkungsleiter erfolgt anhand der Widerstandsverhältnisse dieser Leiter. Tabelle 1 fasst die für die Berechnungsfälle ermittelten Ströme zusammen.

¹ größter Durchhang – im Freien größtes Feld (vgl. (24) Seite 53

| Trassenausführung | Strom Fahrdraht | Strom Tragseil | Strom Verstärkungsleiter | Strom Rückleiter | Strom Schiene |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| Ohne Rück- u. Verstärkungsleiter | 690 A _{eff} | 310 A _{eff} | - | - | 1000 A _{eff} |
| Mit Rückleiter | 690 A _{eff} | 310 A _{eff} | - | 500 A _{eff} | 500 A _{eff} |
| Mit Verstärkungsleiter | 405 A _{eff} | 185 A _{eff} | 410 A _{eff} | - | 1000 A _{eff} |
| Mit Rück- u. Verstärkungsleiter | 405 A _{eff} | 185 A _{eff} | 410 A _{eff} | 500 A _{eff} | 500 A _{eff} |

Tabelle 1: Stromaufteilung nach ohmschen Leitungswiderständen

Für die Berechnung der elektrischen Felder wird von der maximal zulässigen Betriebsspannung von $U_{max,eff}=18\text{ kV}$ ausgegangen. Es ist zu beachten, dass die Berechnungen an der Bahntrasse bei einer Frequenz von $f=16,67\text{ Hz}$ durchzuführen sind.

4.2.2.3 Gebäude

Es wird ein viergeschoßiges Gebäude mit Keller angenommen (siehe Abbildung 2)

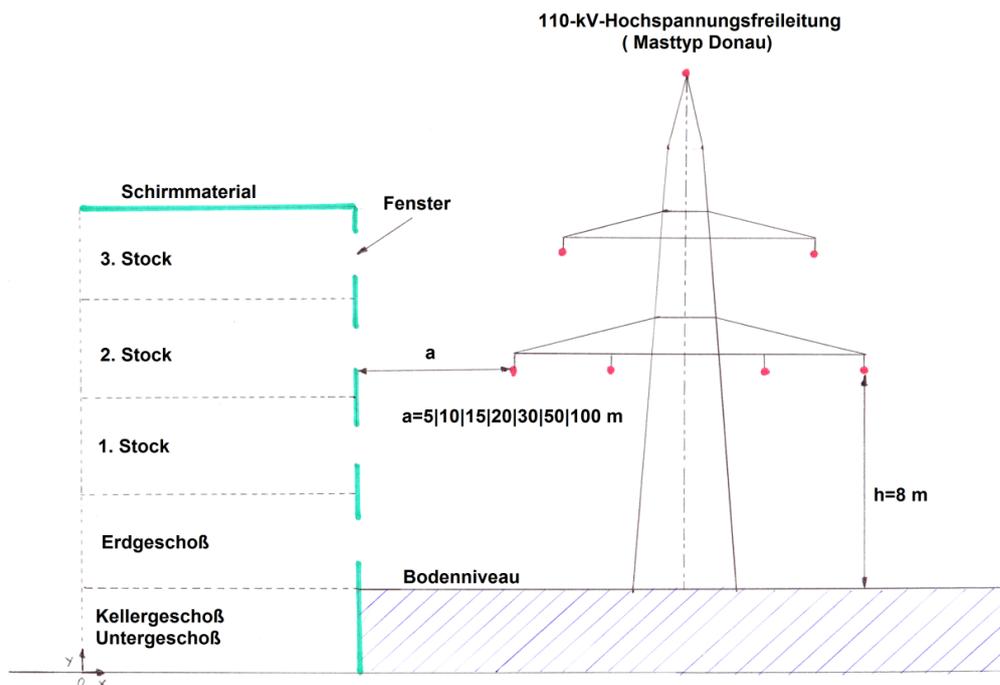


Abbildung 2: Darstellung des Problemaufbaus (Beispiel Schirmung mit Fenster, Donaumast, 5 m Abstand)

Die Raumhöhe im Berechnungsbeispiel beträgt für das Kellergeschoß $h_K=3\text{ m}$ und für die darüber liegenden Stockwerke $h_E=3,5\text{ m}$. In jedem Geschoß (außer Kellergeschoß) ist 1m über dem Boden ein 1,5 m hohes Fenster eingebaut.

Zum besseren Verständnis der Grafik ist das an das Kellergeschoß angrenzende Erdreich schraffiert dargestellt (Abbildung 2).

4.2.2.4 Abstand zur Feldquelle

Berechnet wird das Feld für ein Gebäude im Abstand von 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 50 m und 100 m zur Feldquelle. Die Bestimmung des Abstands erfolgt hierbei von der Gebäude- (Schirmungs-) –Außenkante bis zu jenem Gitterelement, welches den gebäudenächsten stromführenden Leiter enthält (siehe dazu auch Abbildung 2). Für die elektrifizierte Bahntrasse ist der Abstand für alle Berechnungsfälle bis zum Gitterelement für den Rückleiter festgelegt, um vergleichbare Ergebnisse für die unterschiedlichen Ausführungsformen zu erhalten.

4.2.2.5 Schirmung

Die Schirmung befindet sich an der feldzugewandten Fassadenseite sowie an der Oberseite des Gebäudes und ist wahlweise als 5 cm dicke Stahlplatte mit einer relativen Permeabilität von $\mu_R=50$ oder als 3 mm dickes hochpermeables Schirmblech mit einer relativen Permeabilität von $\mu_R=50000$ ausgeführt (Abbildung 2).

Die Fenster sind entweder ebenfalls geschirmt oder, wie in Abbildung 2 dargestellt, offen. Als Vergleichswert wird zusätzlich immer das Feld im ungeschirmten Fall berechnet.

Für die Berechnung des elektrischen Feldes wurde nur die Materialstärke 5cm herangezogen. Die relative Permittivität wurde auf $\epsilon_R=1$ belassen, da der Effekt der guten Leitfähigkeit von Metall dominiert. Hier ist die Betrachtung einer Art von Schirmung ausreichend, da jedes leitfähige Material niederfrequente elektrische Felder ausgezeichnet schirmt.

4.2.3 Durchführung der Berechnungen

Die Matrix der durchzuführenden Berechnungen ergibt sich aus den *verschiedenen Feldquellen* (110-kV-Hochspannungsfreileitung Masttyp *Donau*, 110-kV-Hochspannungsfreileitung Masttyp *Tonne*, elektrifizierte Bahntrasse ohne Rück- und Verstärkungsleiter, elektrifizierte Bahntrasse mit Rückleiter, elektrifizierte Bahntrasse mit Verstärkungsleiter, elektrifizierte Bahntrasse mit Rück- und Verstärkungsleiter) jeweils für die *Abstände* 5, 10, 15, 20, 30, 50 und 100 m, jeweils für *Gebäude* mit Stahlschirmung und Fenster B-Feld, mit Stahlschirmung ohne Fenster B-Feld, mit Schirmblech und Fenster B-Feld, mit Schirmblech ohne Fenster B-Feld, leerer Raum B-Feld, Gebäude mit Fenster E-Feld, Gebäude ohne Fenster E-Feld sowie leerer Raum E-Feld.

Mit **6** Feldquellen, **7** Abständen zur Feldquelle und **8** Schirmungs- bzw. Feldarten ergibt sich die Anzahl von **336** Berechnungssituationen.

4.2.3.1 110-kV-Hochspannungsleitung Masttyp DONAU

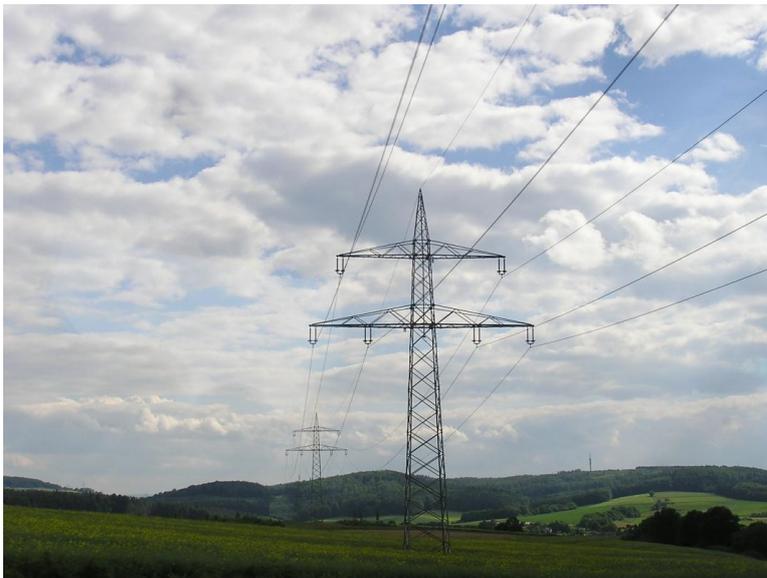


Abbildung 3: Donaumast Quelle: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Donaumast.jpg> GNU Free Document License

Abbildung 3 zeigt das Foto eines Donaumastes, die für die Berechnung gewählte Leiterseilbelegung kann der schematischen Darstellung aus Abbildung 4 entnommen werden.

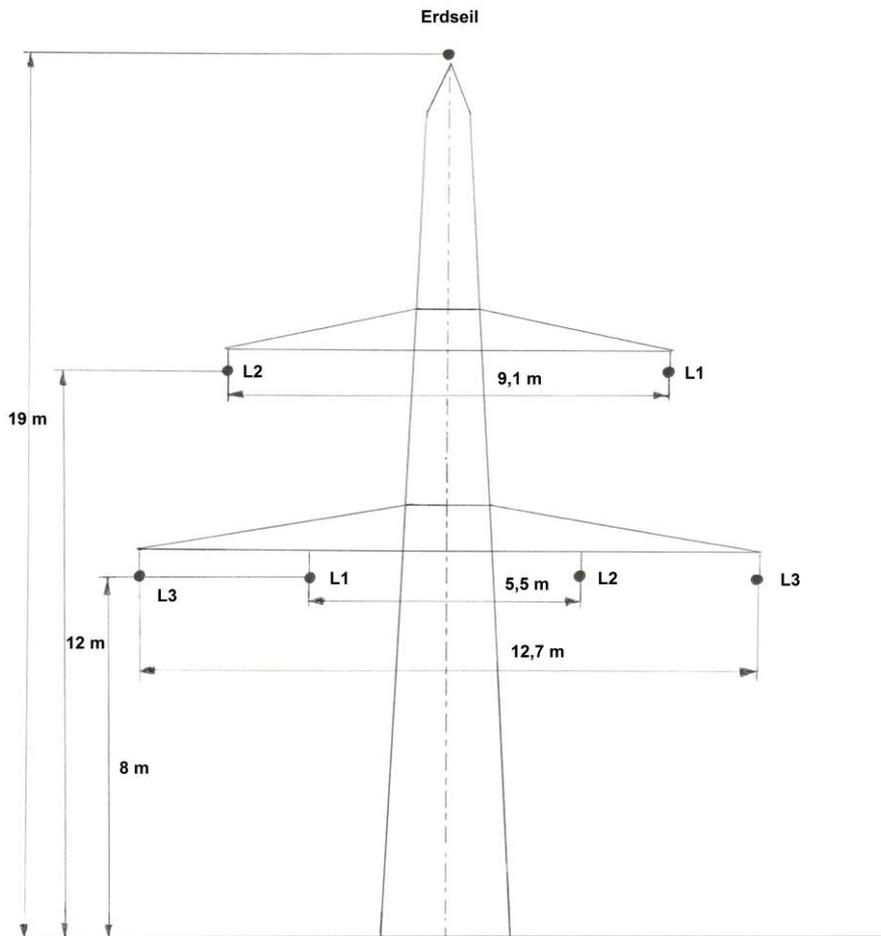


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Leiterseilanordnung Donaumast

Die Phasenverschiebung beträgt für L1 $\varphi_{L1}=0^\circ$, für L2 $\varphi_{L2}=-120^\circ$ und für L3 $\varphi_{L3}=120^\circ$, die verkettete Spannung jeweils $U_{\text{eff}}=123 \text{ kV}$ bzw. der effektive Strom $I_{\text{eff}}=670 \text{ A}$ je Phasenleiter (entsprechend dem Leiterseiltyp Al/St 240/40).

4.2.3.2 110kV Hochspannungsleitung Masttyp TONNE



Abbildung 5: Tonnenmast

Abbildung 5 zeigt das Foto eines Tonnenmastes als Verdrillungsmast, die Phasenleiteranordnung für die verwendete Variante mit 2 Systemen ist in der schematischen Darstellung Abbildung 6 zu sehen. Die Berechnungsannahmen sind ident mit denen der 110-kV-Hochspannungsfreileitung Typ Donau.

Die Phasenverschiebung beträgt für L1 $\varphi_{L1}=0^\circ$, für L2 $\varphi_{L2}=-120^\circ$ und für L3 $\varphi_{L3}=120^\circ$, die effektive verkettete Spannung jeweils $U_{\text{eff}}=123 \text{ kV}$ bzw. der effektive Strom $I_{\text{eff}}=670 \text{ A}$ (entsprechend dem Leiterseiltyp AL/St 240/40).

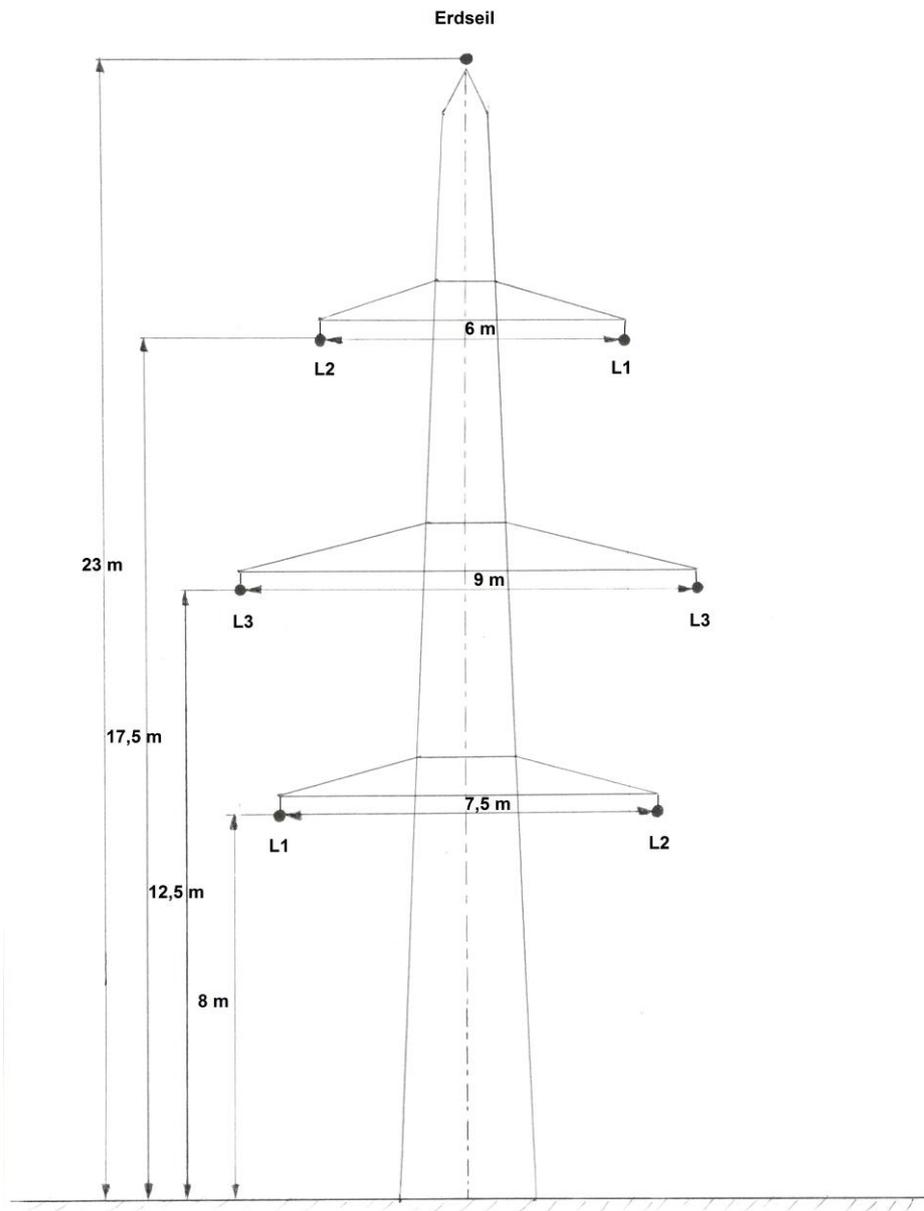


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Leiterseilbelegung Tonnenmast

4.2.3.3 Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter

Bei der Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter (Abbildung 7) fließen im Fahrdrabt $I_{FD,eff}=690\text{ A}$, im Tragseil $I_{TS,eff}=310\text{ A}$ und in jeder Schiene ebenfalls $I_{SC,eff}=500\text{ A}$ mit einer Phasendrehung von $\varphi_{SC}=180^\circ$. Für die Berechnung des elektrischen Feldes wird eine Spannung von $U_{eff}=18\text{ kV}$ angenommen. Es ist zu beachten, dass die Frequenz im Bahnbereich $f=16,67\text{ Hz}$ beträgt.

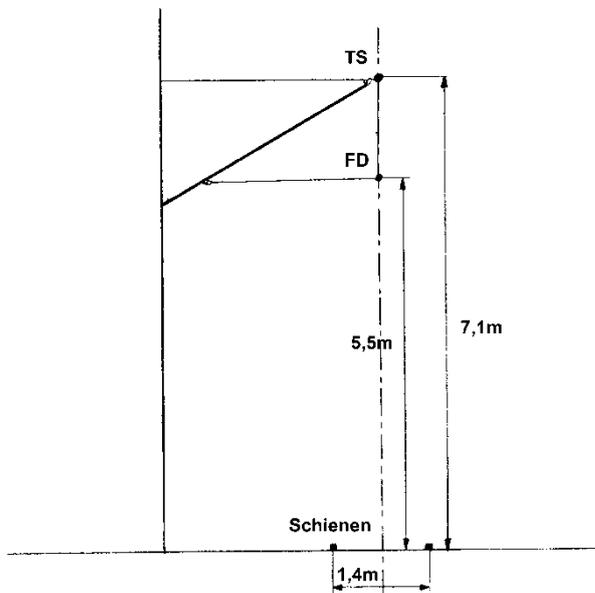


Abbildung 7: Schematische Darstellung Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter

4.2.3.4 Gleisanlage mit Rückleiter

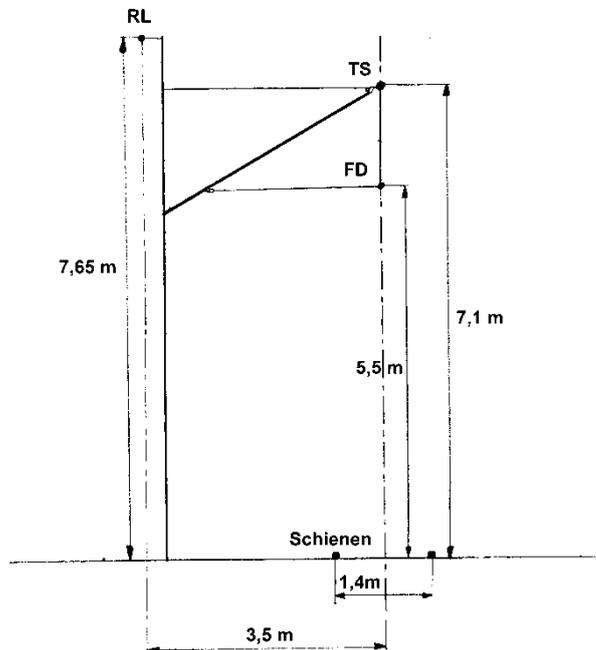


Abbildung 8: Schematische Darstellung Gleisanlage mit Rückleiter

Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau einer Gleisanlage mit Rückleiter. Der Stromfluss in den Schienen verringert sich auf je $I_{SC,eff}=250\text{ A}$, im Rückleiter fließen weitere $I_{RL,eff}=500\text{ A}$ jeweils mit einer Phasendrehung von $\varphi_{SC} = \varphi_{RL}=180^\circ$.

4.2.3.5 Gleisanlage mit Verstärkungsleiter

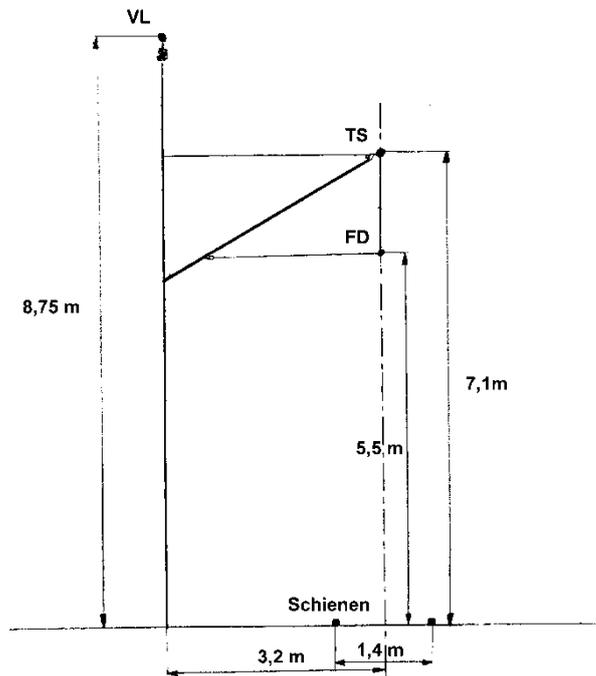


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Gleisanlage mit Verstärkungsleiter

Abbildung 9 stellt schematisch eine Gleisanlage mit Verstärkungsleiter dar. Der Strom teilt sich zu Fahrdraht $I_{FD,eff}=405\text{ A}$, Tragseil $I_{TS,eff}=185\text{ A}$, und Verstärkungsleiter $I_{VL,eff}=410\text{ A}$ auf. In den Schienen fließen jeweils $I_{SC,eff}=500\text{ A}$ mit einer Phase von $\varphi_{SC}=180^\circ$.

4.2.3.6 Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter

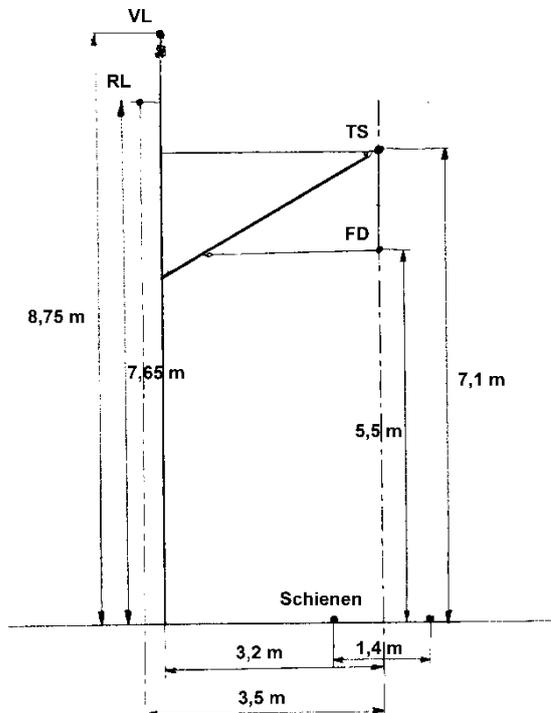


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter

Für die Anordnung mit Rück- und Verstärkungsleiter teilen sich die Ströme in Fahrdrabt, Tragseil und Verstärkungsleiter analog zu 4.2.3.5 auf. Der Rückstrom fließt mit einer Phasendrehung von $\varphi_{SC} = \varphi_{RL} = 180^\circ$ in jeder Schiene mit $I_{SC,eff} = 250 \text{ A}$ und im Rückleiter mit $I_{RL,eff} = 500 \text{ A}$

Abbildung 11 zeigt zum besseren Verständnis das Foto einer elektrifizierten Gleisanlage. Hier erkennt man gut die Isolierkörper für Fahrdrabt- und Tragseilhalterung sowie für den Verstärkungsleiter, welche beim Rückleiter (auch: Erdungsseil) fehlen.

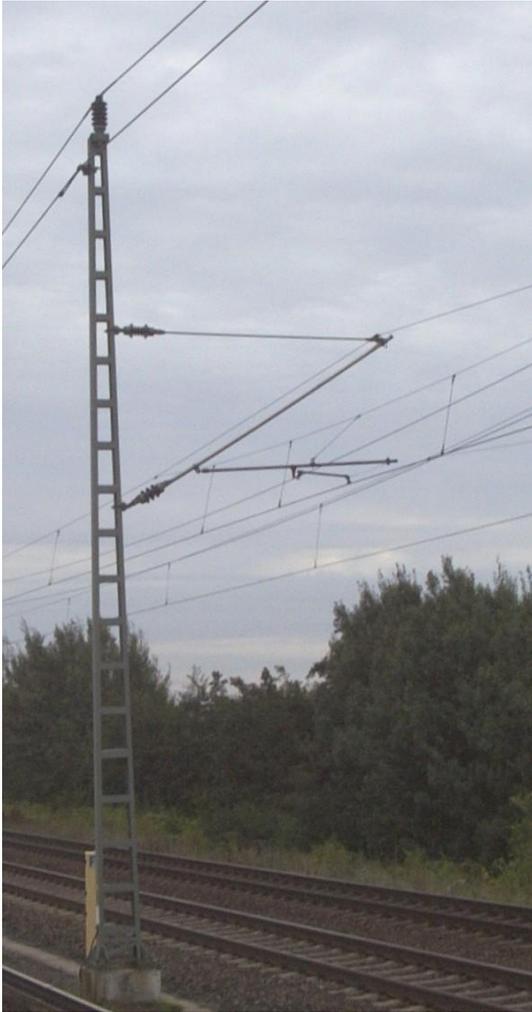


Abbildung 11: Stahl Oberleitungsmast der deutschen Bahn mit Rück- und Verstärkungsleiter aus http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stahl-Oberleitungsmast_Deutsche_Bahn.jpg - GNU Free Document License

4.2.4 Auswertung der Ergebnisse

Der Feldverlauf wird jeweils in horizontaler Richtung untersucht. Für jedes Geschoß in jeder Berechnung wird somit eine Datenreihe in x-Richtung exportiert: Als betrachtete Höhe wurde, entsprechend der ungefähren Lage eines Herzschrittmachersystems im Körper, 1,5m über dem Bodenniveau des jeweiligen Geschoßes gewählt.

- x von 0-15 m, y=4,5 m (entspricht 1,5 m über Bodenniveau Erdgeschoß)
- x von 0-15 m, y=8 m (entspricht 1,5 m über Bodenniveau 1. Stock)
- x von 0-15 m, y=11,5 m (entspricht 1,5 m über Bodenniveau 2. Stock)
- x von 0-15 m, y=15 m (entspricht 1,5 m über Bodenniveau 3. Stock)

Abbildung 12 zeigt in schematischer Weise, in welchen Höhen das Feld ausgewertet wird.

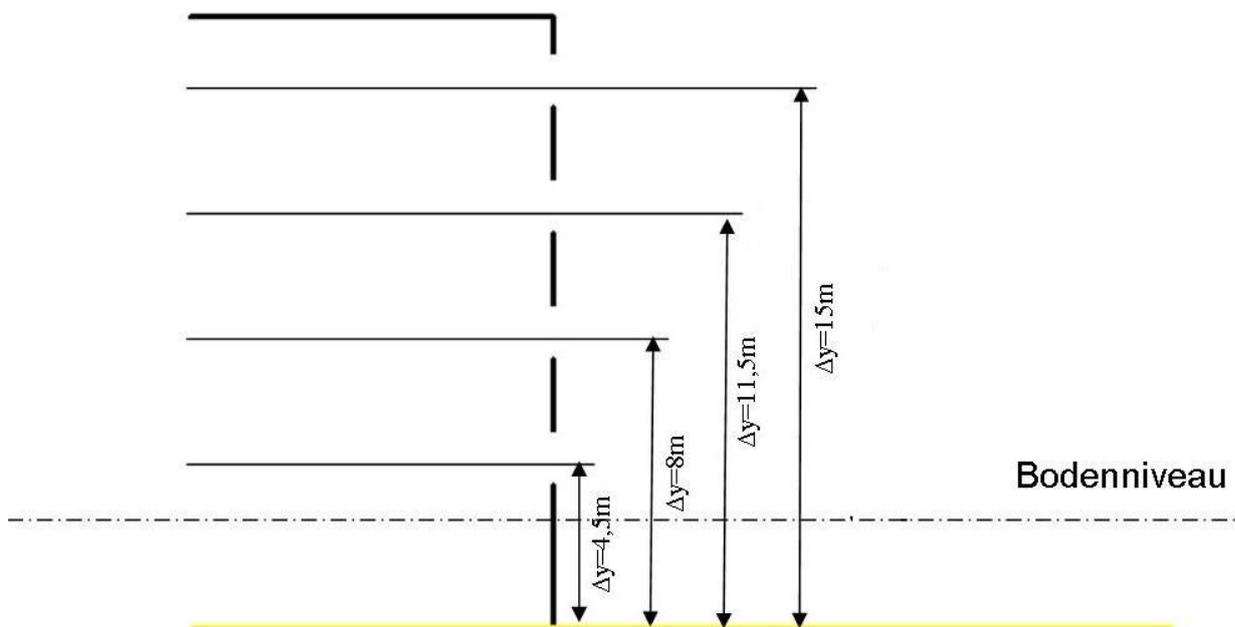


Abbildung 12: Schematische Darstellung der gewählten Auswertehöhen

Die entstehenden Datenreihen werden mit Matlab-Skripts unter Zuhilfenahme der Funktion xlswrite in Excel-Tabellen übertragen. Verwendet wird Matlab in der Version R2007b (The Mathworks Corporation).

Verwendet wird Excel in der Version 2007. Pro betrachtetem Geschoß gibt es ein Diagramm, in dem jeweils die Feldstärke über die horizontale Achse für jeden der 7 gewählten Abstände aufgetragen wird. Neben diesen Grafiken werden noch spezielle Zusammenstellungen aus dem Datenmaterial sowie Feldbilder erzeugt. Für Details dazu siehe Ergebnisse ab Seite 26.

5 Ergebnisse

5.1 Normenrecherche

5.1.1 ÖVE/ÖNORM EN 60601-1-2:2007 (2)

Die ÖVE-EN-60601-1-2:2007 (*Medizinische elektrische Geräte Teil 1-2: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit – Ergänzungsnorm: Elektromagnetische Verträglichkeit*) ist eine Ergänzungsnorm betreffend die Anforderungen und die Prüfverfahren im Bezug auf elektromagnetische Verträglichkeit von medizinischen elektrischen Geräten.

Die Norm regelt die Störfestigkeit von medizinischen elektrischen Geräten primär für die Umgebung des typischen Gesundheitswesens. Bis eigene Normen für andere Umgebungen verabschiedet werden, gilt sie jedoch für medizinische elektrische Geräte in allen Umgebungen.²

Für Geräte, die Patientensignale messen, kann der Hersteller die Störfestigkeitspegel verringern, wenn er eine hinreichende Rechtfertigung dafür geben kann und folgendes in der Gebrauchsanweisung angibt:³

- Bei welchen Pegeln erfüllt das Gerät die Anforderungen der Norm?
- Welche Eigenschaften muss die elektromagnetische Gebrauchsumgebung aufweisen, damit das Gerät bestimmungsgemäß arbeitet?
- Wie kann diese Gebrauchsumgebung sichergestellt werden?

Da die vorliegende Arbeit sich mit Feldern energietechnischer Frequenz beschäftigt, ist der Grenzwert für die Störfestigkeit gegenüber magnetischen Feldern bei Netzfrequenz **f=50 Hz** von **3 A/m** magnetische Feldstärke, was im freien Raum einer Flussdichte von **3,77 µT** entspricht, von Bedeutung⁴. Alle Werte sind als Effektivwerte zu verstehen⁵.

Die Prüfung der Störfestigkeit des medizinischen elektrischen Gerätes erfolgt hierbei nach IEC 61000-4-8 (9) im homogenen Magnetfeld einer Induktionsspule.

² (2) Anhang F (informativ), Seite 101

³ (2) Einleitung Absatz 6, Seite 7

⁴ (2) 6.2.8.1.1 Absatz 1, Seite 52

⁵ Die Norm nennt keine Grenzwerte für **f=16,67 Hz**. Eine mögliche Annahme für diesen Fall ist ein verkehrt proportionales Verhältnis von Frequenz und Grenzwert, wie es für diesen Frequenzbereich auch in den Guidelines der ICNIRP (16) verwendet wird. Mit diesem Ansatz erhält man für **f=16,67 Hz** einen Grenzwert von **B_{max,eff}=11,31 µT**

5.1.2 ÖVE/ÖNORM E 8007:2007 (5)

Die ÖVE/ÖNORM E 8007:2007 (*Starkstromanlagen in Krankenhäusern und medizinisch genutzten Bereichen außerhalb von Krankenhäusern*) regelt Starkstromanlagen in Krankenhäusern und medizinisch genutzten Räumen außerhalb von Krankenhäusern.

Diese Norm wurde in der Elektrotechnikverordnung (Anhang 1) für verbindlich erklärt.

Im *informativen* (also nicht verbindlichen) Anhang D⁶ wird eine Begrenzung der magnetischen Induktion an der Patientenposition (Kopf, Becken, Fuß) von

- $B_{SS} = 400$ nT bei $f = 50$ Hz für EKG (entspricht $B_{eff} = 141$ nT)
- $B_{SS} = 200$ nT bei $f = 50$ Hz für EEG (entspricht $B_{eff} = 71$ nT)
- $B_{SS} = 100$ nT bei $f = 50$ Hz für EMG (entspricht $B_{eff} = 35$ nT)

vorgeschlagen.

Weiters weist der Anhang auf eine mögliche Beeinflussung von elektromedizinischen Messeinrichtungen durch in der Nähe befindliche Wechselstrom-Bahnanlagen hin, ohne näher darauf einzugehen.

5.1.3 EN 45502-1:1997 (3)

Die EN 45502-1 (*Aktive implantierbare medizinische Geräte Teil 1: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit, Aufschriften und vom Hersteller zur Verfügung zu stellende Informationen*) befasst sich mit Anforderungen für Sicherheit von, Aufschriften auf und vom Hersteller zur Verfügung zu stellenden Informationen über aktive implantierbare medizinische Geräte. Unter Punkt 27.1 wird zunächst als Grenzwert im niederfrequenten Bereich eine magnetische Feldstärke von **$H = 150$ A/m** festgelegt, für das elektrische Feld gibt es keine Anforderungen. Es sind allerdings mögliche Gefährdungen aufgrund der Einwirkung von elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern festzustellen und auf ihre Relevanz für Grenzwerte zu untersuchen.

Für Herzschrittmacher wird Punkt 27.1 dieser Norm in der EN 45502-2-1:2004 ersetzt. Siehe dazu Kapitel 5.1.4.

5.1.4 ÖVE/ÖNORM EN 45502-2-1:2004 (4)

Die ÖVE/ÖNORM EN 45502-2-1:2004 (*Aktive implantierbare medizinische Geräte – Teil 2-1: Besondere Festlegungen für aktive implantierbare medizinische Geräte zur Behandlung von*

⁶ (5) Anhang D – D.3 Maßnahmen gegen Störungen durch netzfrequente magnetische Felder, Seite 59

Bradyarrhythmie (Herzschrittmacher) regelt die Vorschriften für aktive implantierbare medizinische Geräte – besondere Festlegungen für Herzschrittmacher.

Diese Norm hat in Österreich den Status einer *Österreichischen Bestimmung für Elektrotechnik* und ist somit verbindlich einzuhalten.

Die Störfestigkeit wird nur in Form einer maximal zulässigen Störspannung an einer in der Norm definierten Körperrückbildung festgelegt.⁷ Für Herzschrittmacher der Kategorie 1 (eingeschränkt störfest) beträgt diese Spannung $U_{SS}=1\text{ V}$ für $f=16,67\text{ Hz}$ bis $f=20\text{ kHz}$). Welche externen Felder eine derartige Störspannung hervorrufen ist in der Norm nicht genannt.

5.1.5 E DIN VDE 0848-3-1:2002 (Entwurf) (6)

Die E DIN VDE 0848-3-1:2002 (*Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln bei Einwirkung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder*) ist ein Normentwurf und deswegen nur als informatives Dokument zu betrachten. Sie regelt den Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln bei der Einwirkung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz.

Für Herzschrittmacher weist der Normentwurf darauf hin, dass die Störschwellen von Gerät zu Gerät stark unterschiedlich sind sowie, dass die Einhaltung der, in den Produktnormen DIN EN 50061/A1 (Anm.: nicht harmonisierte Norm, nicht mehr gültig) sowie E DIN EN 45502-2-1 angegebenen, Störschwellen in eben diesen Normen nicht gefordert wird.⁸

Der Normentwurf gibt die Störschwellen als Spitze-Spitze-Spannungswert an der Herzschrittmacherelektrode an. Die Höhe der, durch ein bestimmtes äußeres Feld verursachten, Spannung an der Elektrode wird *durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben*. Dabei sind die *Eigenschaften des Körpergewebes und die Lage von Herzschrittmacherelektroden und Herzschrittmachergerät im Körper zu berücksichtigen*.⁹

Für Frequenzen $<25\text{ kHz}$ ist die maximal zu erwartende Störspannung an der Herzschrittmacherelektrode (Worst-Case Fall):

$$\frac{U_{SS}^{ind,max}}{1\text{ V}} = 0,0089 \max \left\{ \frac{|H(t)|}{1\text{ A/m}} + \frac{|E(t)|}{80\text{ V/m}} \right\} \frac{f}{25\text{ kHz}}^{10} \quad (5.1)$$

⁷ (4) Kapitel 27.2 Absatz 6 Seite 39

⁸ (6) Kapitel 5.1 Absatz 4, Seite 10

⁹ (6) Kapitel 5.1, Absatz 5, Seite 10

¹⁰ (6) Punkt 5.1.6.1

- Wobei gilt: $U_{SS}^{ind,max}$... Spitze-Spitze-Wert der maximal induzierten Spannung
- $|\mathbf{H}(t)|$... Betrag der magnetischen Feldstärke
- $|\mathbf{E}(t)|$... Betrag der elektrischen Feldstärke

Bei dieser Berechnung wird auch die Phasenlage von elektrischem und magnetischem Feld zueinander berücksichtigt.

Im normativen Anhang B der Norm finden sich Details zum Schutz von Personen mit Herzschrittmachern der Kategorie 1 (eingeschränkt störfest).

Die in den Tabellen angegebenen Werte gelten für amplitudenmodulierte bzw. intermittierende Felder, für Frequenzbereiche unter 650 Hz jedoch auch für kontinuierliche sinusförmige Signale. Es gelten die folgenden Grenzwerte:¹¹

$$\bullet \quad 0 \text{ Hz} \leq f < 7,8 \text{ Hz:} \quad \max \left\{ \frac{|\mathbf{H}(t)|}{1 \text{ A/m}} + \frac{|\mathbf{E}(t)|}{80 \text{ V/m}} \right\} \leq 720 \quad (5.2)$$

$$\bullet \quad 7,8 \text{ Hz} \leq f < 20 \text{ Hz:} \quad \max \left\{ \frac{|\mathbf{H}(t)|}{1 \text{ A/m}} + \frac{|\mathbf{E}(t)|}{80 \text{ V/m}} \right\} \leq 337 \frac{16,67 \text{ Hz}}{f} \quad (5.3)$$

$$\bullet \quad 20 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz:} \quad \max \left\{ \frac{|\mathbf{H}(t)|}{1 \text{ A/m}} + \frac{|\mathbf{E}(t)|}{80 \text{ V/m}} \right\} \leq 73 \left(\frac{50 \text{ Hz}}{f} \right)^{1,47} \quad (5.4)$$

$$\bullet \quad 50 \text{ Hz} \leq f < 650 \text{ Hz:} \quad \max \left\{ \frac{|\mathbf{H}(t)|}{1 \text{ A/m}} + \frac{|\mathbf{E}(t)|}{80 \text{ V/m}} \right\} \leq 73 \frac{50 \text{ Hz}}{f} \quad (5.5)$$

- Wobei gilt: $|\mathbf{H}(t)|$... Betrag der magnetischen Feldstärke
- $|\mathbf{E}(t)|$... Betrag der elektrischen Feldstärke

Greift man die Netzfrequenz von **f=50 Hz** heraus kann man den Grenzwert für den Spitzenwert der magnetischen Feldstärke in Abwesenheit eines elektrischen Feldes durch

$$\max\{|\mathbf{H}(t)|_{E=0}\} \leq 73 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (5.6)$$

¹¹ (6) Anhang B (normativ), Tabelle B.2, Seite 26

oder unter Annahme eines homogenen Raums mit $\mu_R=1$ als magnetische Flussdichte durch

$$\max\{|B(t)|_{E=0}\} \leq 91,7 \mu T \quad (5.7)$$

ausdrücken.

Für $f=16,67 \text{ Hz}$ sind die Grenzwerte für die Spitzenwerte von magnetische Feldstärke und magnetischer Flussdichte

$$\max\{|H(t)|_{E=0}\} \leq 337 \frac{A}{m} \quad (5.8)$$

und

$$\max\{|B(t)|_{E=0}\} \leq 423 \mu T \quad (5.9)$$

5.1.6 Richtlinie 93/42/EWG:1993 (letzte Änderung 2007) (14)

Die Richtlinie 93/42/EWG (*über Medizinprodukte*) behandelt allgemeine Vorschriften für die Inverkehrbringung von Medizinprodukten.

Sie fordert, dass unter anderem Risiken in Zusammenhang mit Magnetfeldern ausgeschlossen oder so weit wie möglich verringert werden müssen¹².

5.1.7 Richtlinie 90/385/EWG:1990 (letzte Änderung 2007) (15)

Die Richtlinie 90/385/EWG (*zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über aktive implantierbare medizinische Geräte*) behandelt die Vorschriften über aktive implantierbare medizinische Geräte. Sie weist auf die Risiken in Zusammenhang mit vernünftigerweise vorhersehbaren Umgebungsbedingungen hin und streicht dabei magnetische Felder besonders heraus¹³.

5.1.8 Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (bis 300GHz) (16)

Die Richtlinie unterscheidet zwischen Basisgrenzwerten – im NF-Fall hauptsächlich Stromdichte – und Referenzwerten. Referenzwerte dienen der Beurteilung der Exposition in der Praxis und definieren Grenzwerte für die zu messende Größe, bei denen der

¹² (14) Anhang 1 Punkt 9.1, Absatz 3, Seite 29

¹³ (15) Anhang 1 Punkt 8, Absatz 4, Seite 16

Basisgrenzwert unter vernünftigerweise annehmbaren Bedingungen nicht überschritten wird. Kommt es zu einer Überschreitung der Referenzwerte, ist im speziellen Fall zu prüfen, ob die Basisgrenzwerte noch eingehalten werden oder nicht.

Es wird dezidiert darauf hingewiesen, dass Störungen an Herzschrittmachern bei Werten auftreten können, die unterhalb der angegebenen Referenzwerte liegen.

Abbildung 13 und Abbildung 14 stellen die Referenzwerte für elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte nach ICNIRP für die Allgemeinbevölkerung grafisch dar. Es handelt sich jeweils um Effektivwerte, durch Multiplikation mit $\sqrt{2}$ kann man die Spitzenwerte erhalten.

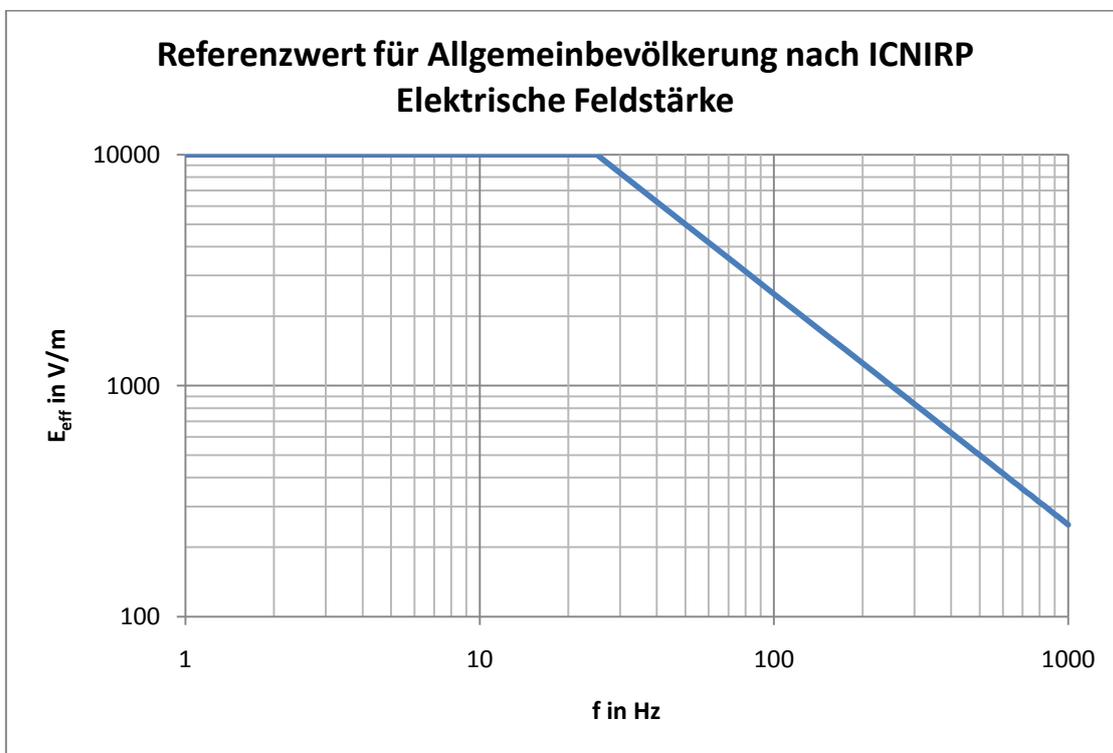


Abbildung 13: Referenzwert für Allgemeinbevölkerung elektrische Feldstärke nach ICNIRP

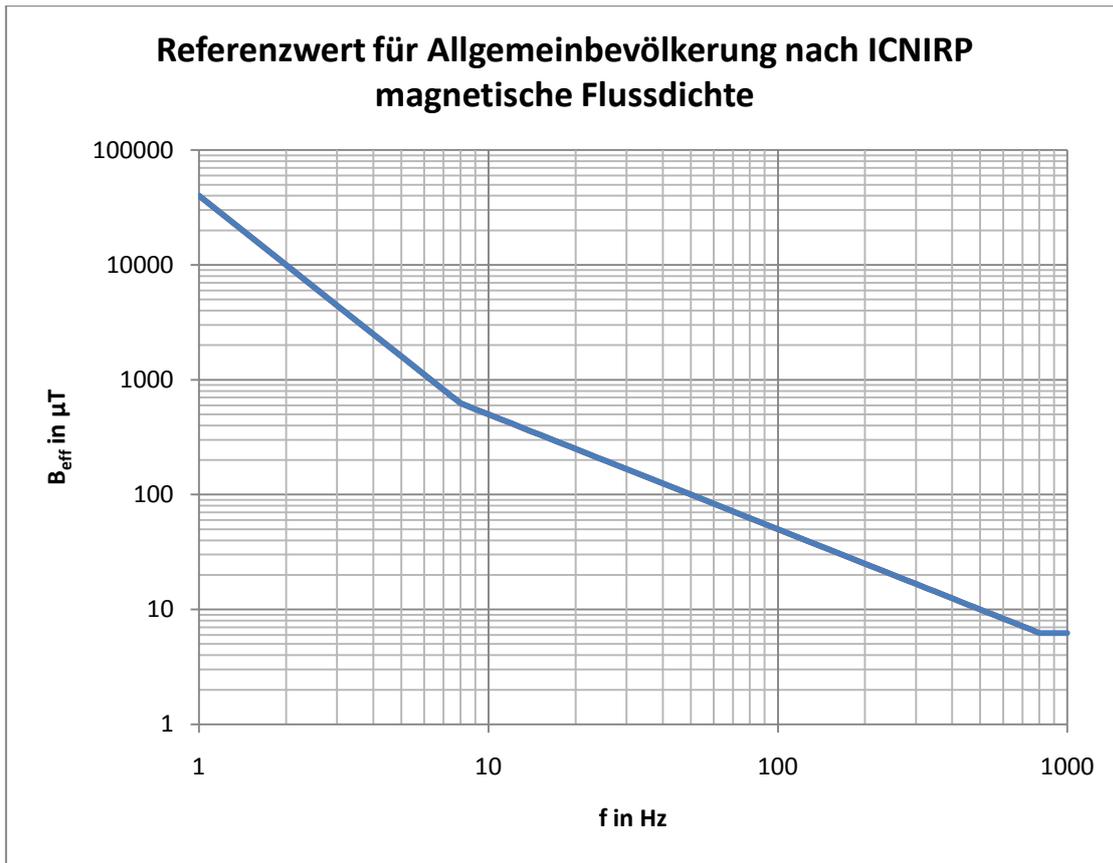


Abbildung 14: Referenzwert für Allgemeinbevölkerung magnetische Flussdichte nach ICNIRP

Die Referenzwerte von besonderer Bedeutung sind

- für $f=50$ Hz: $E_{\max,eff}= 5$ kV/m bzw. $B_{\max,eff}= 100$ µT
- für $f=16,67$ Hz: $E_{\max,eff}= 10$ kV/m bzw. $B_{\max,eff}= 300$ µT

Für das gleichzeitige Auftreten mehrerer Frequenzen gilt im niederfrequenten Bereich eine anteilmäßige Aufsummierung der Basisgrenzwerte für die Stromdichte

$$\sum_{i=1Hz}^{10 MHz} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (5.10)$$

Wobei gilt: $J_i \dots$ Wert der Stromdichte bei Frequenz f_i

$J_{L,i} \dots$ Basisgrenzwert der Stromdichte bei Frequenz f_i

Für die praktische Anwendung mit Referenzwerten werden magnetische Flussdichte und elektrische Feldstärke getrennt betrachtet, wobei beide Grenzwerte für sich eingehalten werden müssen. Für den niederfrequenten Bereich bedeutet das:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} \leq 1 \quad (5.11)$$

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{65\text{ kHz}} \frac{H_i}{H_{L,i}} \leq 1 \quad (5.12)$$

| | | |
|-------------|-----------------|---|
| Wobei gilt: | $E_i \dots$ | Wert der elektrischen Feldstärke bei Frequenz f_i |
| | $E_{L,i} \dots$ | Referenzwert der elektrischen Feldstärke bei Frequenz f_i |
| | $H_i \dots$ | Wert der magnetischen Feldstärke bei Frequenz f_i |
| | $H_{L,i} \dots$ | Referenzwert der magnetischen Feldstärke bei Frequenz f_i |

Für die Grenzwerte der magnetischen Exposition kann statt der magnetischen Feldstärke auch die magnetische Flussdichte mit dem entsprechenden Referenzwert herangezogen werden.

5.1.9 Personen mit aktiven Implantaten in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern - Fachinformation des OEK 2009 (17)

Eine Fachinformation kann als Stand des Fachwissens einer bestimmten Gruppe betrachtet werden. Sie ist rechtlich nicht bindend.

Die Fachinformation weist besonders darauf hin, dass es grundsätzlich nicht möglich ist eine Störschwelle für alle Herzschrittmacher anzugeben, da nicht von allen Geräten die Störfestigkeit bekannt ist.

Es werden Richtwerte sowohl für magnetische als auch elektrische Felder genannt, allerdings unter der Voraussetzung, dass die jeweils andere Feldkomponente vernachlässigbar ist, das Feld einen sinusförmigen Verlauf hat (vernachlässigbare Oberschwingungen) sowie die Herzschrittmacher nicht empfindlicher programmiert sind als 2 mV unipolar bzw. 0,3 mV bipolar¹⁴.

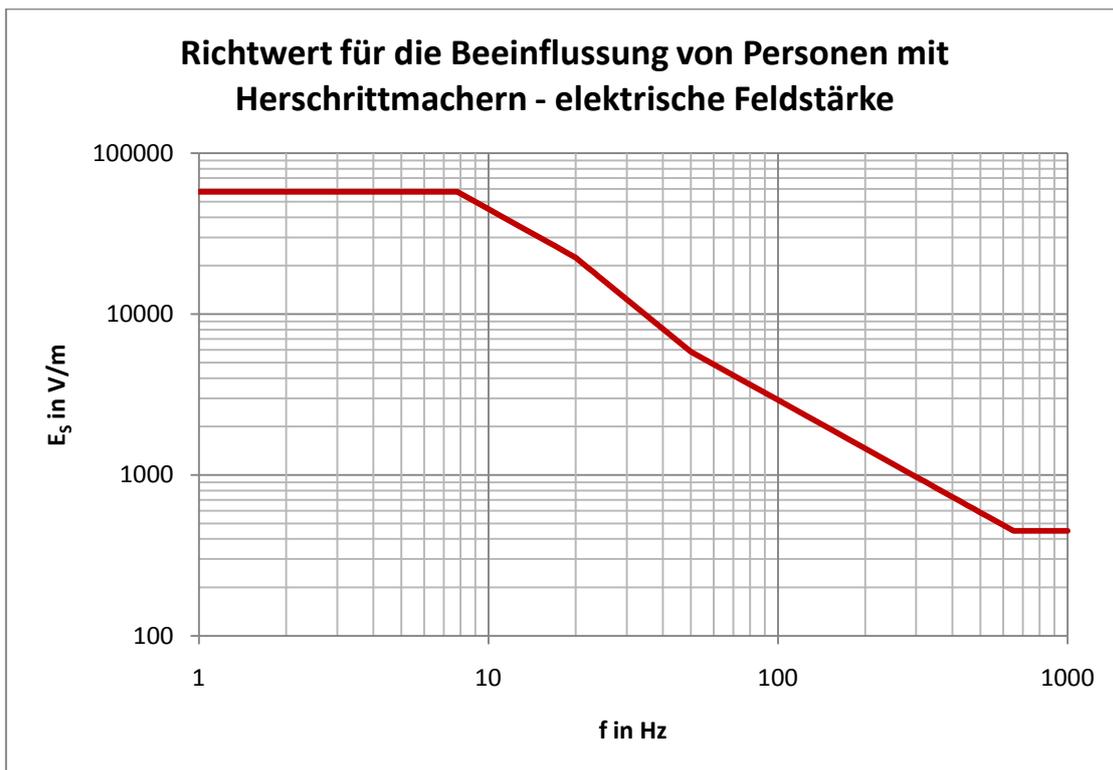


Abbildung 15: Grenzwert für Personen mit Herzschrittmachern elektrische Feldstärke nach OKE (17)

¹⁴ (17) Kapitel 2.6, Tabellen 1 und 2, Seite 9-10

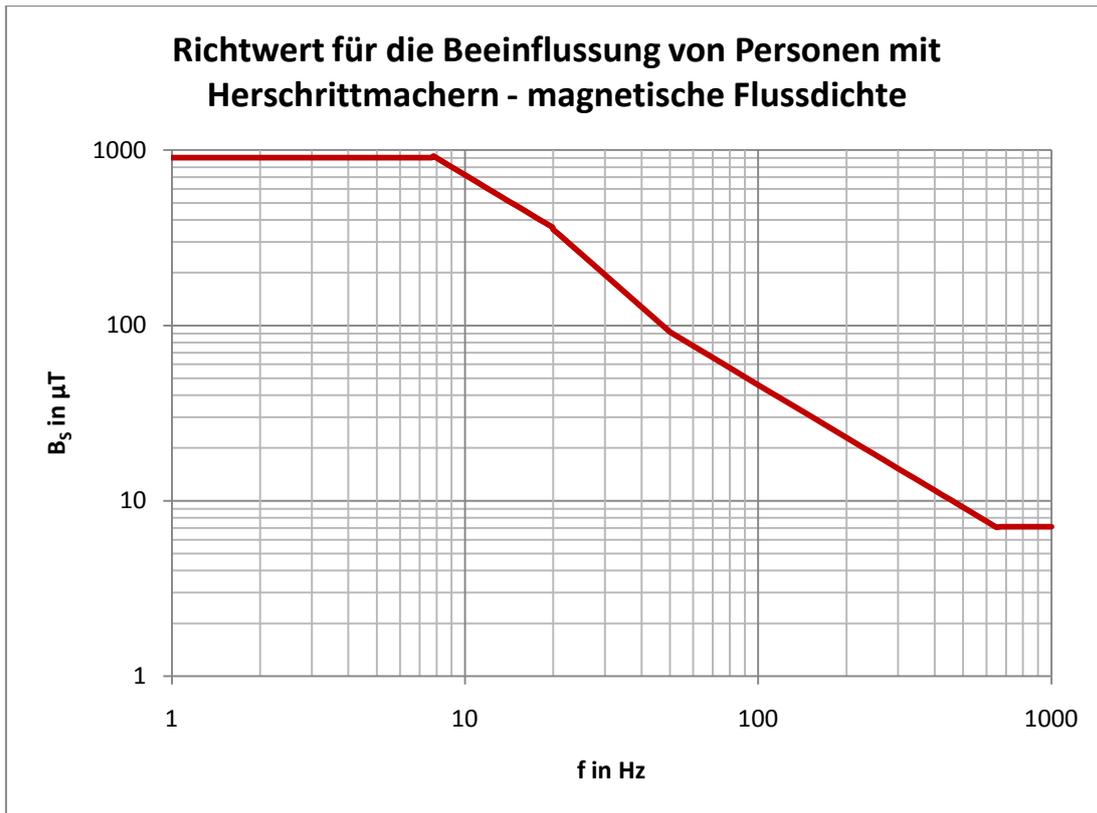


Abbildung 16: Grenzwert für Personen mit Herzschrittmachern magnetische Flussdichte nach OKE (17)

Die Referenzwerte von besonderer Bedeutung sind

- für $f=50$ Hz: $E_S=5,84$ kV/m bzw. $B_S=91,7$ μ T
- für $f=16,67$ Hz: $E_S=26,96$ kV/m bzw. $B_S=423,5$ μ T

Sie entsprechen jenen des Normentwurfs E DIN VDE 0848-3-1 (6).

Die Fachinformation der OKE legt eine Berechnungsmethode für das gleichzeitige Auftreten von elektrischem und magnetischem Feld jedoch nur bei *einer* Frequenz fest. In diesem Fall gilt

$$\frac{B_{S,max}}{B_{S,zulässig}} + \frac{E_{S,max}}{E_{S,zulässig}} < 1 \quad (5.13)$$

Wobei gilt:

- $B_{S,max} \dots$ maximaler Wert der magnetischen Flussdichte bei Frequenz f_i
- $B_{S,zulässig} \dots$ Referenzwert der magnetischen Flussdichte bei Frequenz f_i
- $E_{S,max} \dots$ maximaler Wert der elektrischen Feldstärke bei Frequenz f_i
- $E_{S,zulässig} \dots$ Referenzwert der elektrischen Feldstärke bei Frequenz f_i

Es darf also die Summe der Grenzwertausnutzung nicht größer als 1 werden.

5.2 Feldberechnungen

Die folgenden Tabellen fassen die Berechnungsergebnisse in komprimierter Form zusammen. Es werden jeweils der Maximalwert und der arithmetische Mittelwert des Feldes innerhalb des Gebäudes (für $x < 10$ m) ermittelt. Die Berechnung erfolgt jeweils in 1,5 m über dem Bodenniveau für Erdgeschoß, 1., 2., und 3. Obergeschoß. Für jeden Abstand von der Feldquelle wird der ungeschirmte Fall mit den verschiedenen Schirmvarianten prozentuell verglichen. Ein *Schirmfaktor* (SF) genannter Wert gibt an, wie viele Prozentpunkte des Maximalwerts bzw. des Mittelwerts der betrachteten Feldgröße (elektrische Feldstärke oder magnetische Flussdichte) innerhalb des Gebäudebereichs nach Anwendung der Schirmung jeweils erreicht werden.

$$SF_{max} = \frac{B_{max,ungeschirmt}}{B_{max,geschirmt}} * 100 \text{ in } \% \quad (5.14)$$

$$SF_{mean} = \frac{B_{mean,ungeschirmt}}{B_{mean,geschirmt}} * 100 \text{ in } \% \quad (5.15)$$

| | | |
|-------------|------------------------------|--|
| Wobei gilt: | $SF_{max} \dots$ | Maximalwert des Feldes innerhalb des Gebäudebereichs im geschirmten Fall in % des Maximalwerts des Feldes innerhalb des Gebäudebereichs im ungeschirmten Fall |
| | $SF_{mean} \dots$ | arithmetischer Mittelwert des Feldes innerhalb des Gebäudebereichs im geschirmten Fall in % des arithmetischen Mittelwert des Feldes innerhalb des Gebäudebereichs im ungeschirmten Fall |
| | $B_{max,ungeschirmt} \dots$ | maximaler Wert der magnetischen Flussdichte innerhalb des Gebäudebereiches ohne Berücksichtigung der Schirmung |
| | $B_{max,geschirmt} \dots$ | maximaler Wert der magnetischen Flussdichte innerhalb des Gebäudes unter Berücksichtigung der Schirmung |
| | $B_{mean,ungeschirmt} \dots$ | arithmetischer Mittelwert der magnetischen Flussdichte innerhalb des Gebäudebereiches ohne Berücksichtigung der Schirmung |
| | $B_{mean,geschirmt} \dots$ | arithmetischer Mittelwert der magnetischen Flussdichte innerhalb des Gebäudebereiches unter Berücksichtigung der Schirmung |

Die Berechnung der Schirmfaktoren für die elektrische Feldstärke verläuft analog.

Zur besseren Übersicht sind die Schirmfaktoren farbcodiert, wobei grüne Farbtöne einen Schirmfaktor von $<100\%$, gelb einen Schirmfaktor von 100% und rote Farbtöne einen Schirmfaktor von $>100\%$ bedeuten. Es ist zu beachten, dass weder der Wert noch der Farbcode eine Aussage über den absoluten Wert der betrachteten Größe machen. Bewertet wird die Effizienz der Schirmung als Relativvergleich vom ungeschirmten zum geschirmten Fall. Die Skala reicht von grün (ausgeprägte Schirmwirkung) über orange (kaum bzw. keine Schirmwirkung) bis zu rot (feldverstärkender Effekt).

Bei einer Schirmung ohne Fensteröffnungen (siehe Abbildung 24 Seite 52) tritt der Maximalwert der magnetischen Flussdichte immer an der feldabgewandten, ungeschirmten Gebäudeseite auf. Führt man die Schirmung mit Fensteröffnungen aus (siehe Abbildung 23 Seite 52) kann der Maximalwert je nach Berechnungsfall die Feldüberhöhung an der Fensteröffnung oder der Feldeingriff an der ungeschirmten, feldabgewandten Seite sein.

5.2.1 Tabellen der magnetischen Flussdichte

Tabelle 2: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Donaumast

| Donaumast Betrag magnetische Flussdichte | kein Gebäude (= 100%) | | | | | | hochpermeables Blech mit Fensteröffnungen | | | | | | hochpermeables Blech ohne Fensteröffnungen | | | | | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | | | |
|--|-----------------------|-------------------|---------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|---|-------------------|---------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|--|-------------------|---------------------------|------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------|--------|--------|-------|--|
| | max B in nT | mean B in nT | SF _{max} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{max} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{max} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{max} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{max} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{max} in % | | | | | | |
| Erdgeschoss | 5m | 2383.68 | 1273.81 | 117.83 | 1319.24 | 103.57 | 294.72 | 280.98 | 22.06 | 259.47 | 107.37 | 1255.44 | 98.56 | 2028.72 | 85.11 | 2383.68 | 1273.81 | 117.83 | 1319.24 | 103.57 | 294.72 | 107.37 | 1255.44 | 98.56 | 2028.72 | 85.11 | | | | |
| | 10m | 1151.66 | 662.69 | 124.84 | 674.78 | 101.82 | 211.33 | 207.15 | 31.26 | 1290.19 | 112.03 | 658.21 | 99.32 | 980.55 | 85.14 | 1151.66 | 662.69 | 124.84 | 674.78 | 101.82 | 211.33 | 112.03 | 658.21 | 99.32 | 980.55 | 85.14 | | | | |
| | 15m | 606.86 | 405.69 | 117.67 | 398.25 | 98.17 | 161.75 | 158.38 | 39.04 | 657.04 | 108.27 | 401.56 | 98.98 | 538.05 | 88.66 | 606.86 | 405.69 | 117.67 | 398.25 | 98.17 | 161.75 | 108.27 | 401.56 | 98.98 | 538.05 | 88.66 | | | | |
| | 20m | 387.22 | 285.34 | 112.99 | 281.34 | 98.60 | 127.63 | 125.14 | 43.86 | 400.53 | 103.44 | 279.92 | 98.10 | 352.91 | 91.14 | 387.22 | 285.34 | 112.99 | 281.34 | 98.60 | 127.63 | 103.44 | 279.92 | 98.10 | 352.91 | 91.14 | | | | |
| | 30m | 211.36 | 168.66 | 104.37 | 159.56 | 94.61 | 85.92 | 40.65 | 83.35 | 49.42 | 211.66 | 164.93 | 97.79 | 197.14 | 93.27 | 211.36 | 168.66 | 104.37 | 159.56 | 94.61 | 85.92 | 211.66 | 164.93 | 97.79 | 197.14 | 93.27 | | | | |
| | 50m | 92.05 | 78.46 | 97.71 | 71.48 | 91.10 | 46.34 | 44.08 | 56.18 | 66.67 | 90.50 | 76.67 | 97.71 | 87.28 | 94.82 | 92.05 | 78.46 | 97.71 | 71.48 | 91.10 | 46.34 | 44.08 | 56.18 | 66.67 | 90.50 | 76.67 | 97.71 | 87.28 | | |
| | 100m | 25.74 | 23.55 | 92.51 | 21.06 | 89.44 | 16.33 | 63.44 | 64.43 | 15.17 | 25.05 | 97.31 | 23.01 | 24.81 | 96.36 | 25.74 | 23.55 | 92.51 | 21.06 | 89.44 | 16.33 | 63.44 | 64.43 | 15.17 | 25.05 | 97.31 | 23.01 | 24.81 | 96.36 | |
| | 5m | 3561.85 | 1522.92 | 135.71 | 1603.42 | 105.29 | 322.05 | 298.71 | 19.61 | 4401.47 | 123.57 | 1537.26 | 100.94 | 2774.18 | 77.89 | 3561.85 | 1522.92 | 135.71 | 1603.42 | 105.29 | 322.05 | 298.71 | 123.57 | 1537.26 | 100.94 | 2774.18 | 77.89 | | | |
| | 10m | 1256.58 | 678.64 | 1775.89 | 701.65 | 103.39 | 224.17 | 17.84 | 207.37 | 30.56 | 1606.52 | 127.85 | 687.22 | 101.26 | 1032.82 | 82.19 | 1256.58 | 678.64 | 1775.89 | 701.65 | 103.39 | 224.17 | 127.85 | 687.22 | 101.26 | 1032.82 | 82.19 | | | |
| | 15m | 607.38 | 406.70 | 815.99 | 400.65 | 98.51 | 168.56 | 154.70 | 38.04 | 736.12 | 121.20 | 406.93 | 100.06 | 534.76 | 88.04 | 607.38 | 406.70 | 815.99 | 400.65 | 98.51 | 168.56 | 154.70 | 38.04 | 736.12 | 121.20 | 406.93 | 100.06 | 534.76 | 88.04 | |
| 20m | 388.80 | 286.10 | 486.66 | 280.09 | 97.90 | 132.84 | 34.17 | 120.88 | 42.25 | 431.75 | 111.05 | 281.77 | 98.49 | 352.60 | 90.69 | 388.80 | 286.10 | 486.66 | 280.09 | 97.90 | 132.84 | 111.05 | 281.77 | 98.49 | 352.60 | 90.69 | | | | |
| 30m | 211.01 | 167.84 | 238.31 | 156.55 | 93.28 | 89.10 | 42.23 | 79.89 | 47.60 | 221.03 | 104.75 | 164.10 | 97.77 | 195.71 | 92.75 | 211.01 | 167.84 | 238.31 | 156.55 | 93.28 | 89.10 | 104.75 | 164.10 | 97.77 | 195.71 | 92.75 | | | | |
| 50m | 91.32 | 71.85 | 94.00 | 69.36 | 89.10 | 47.96 | 52.52 | 42.13 | 54.12 | 92.17 | 100.92 | 75.81 | 97.37 | 86.21 | 94.40 | 91.32 | 71.85 | 94.00 | 69.36 | 89.10 | 47.96 | 100.92 | 75.81 | 97.37 | 86.21 | 94.40 | | | | |
| 100m | 25.65 | 23.46 | 94.02 | 20.35 | 86.74 | 16.86 | 65.75 | 14.48 | 61.71 | 25.17 | 98.14 | 22.78 | 97.10 | 24.59 | 95.89 | 25.65 | 23.46 | 94.02 | 20.35 | 86.74 | 16.86 | 98.14 | 22.78 | 97.10 | 24.59 | 95.89 | | | | |
| 5m | 4629.41 | 1710.32 | 5640.97 | 1622.52 | 94.87 | 386.66 | 8.35 | 316.81 | 18.52 | 5360.24 | 115.79 | 1646.72 | 96.28 | 3379.03 | 72.99 | 4629.41 | 1710.32 | 5640.97 | 1622.52 | 94.87 | 386.66 | 115.79 | 1646.72 | 96.28 | 3379.03 | 72.99 | | | | |
| 10m | 1319.64 | 679.92 | 1732.01 | 674.86 | 99.26 | 259.23 | 19.64 | 201.15 | 29.58 | 1616.13 | 122.47 | 673.50 | 99.06 | 1037.59 | 78.63 | 1319.64 | 679.92 | 1732.01 | 674.86 | 99.26 | 259.23 | 122.47 | 673.50 | 99.06 | 1037.59 | 78.63 | | | | |
| 15m | 599.48 | 408.15 | 857.42 | 443.03 | 96.22 | 191.83 | 32.00 | 145.53 | 35.66 | 762.57 | 127.21 | 407.44 | 99.83 | 527.02 | 87.91 | 599.48 | 408.15 | 857.42 | 443.03 | 96.22 | 191.83 | 127.21 | 407.44 | 99.83 | 527.02 | 87.91 | | | | |
| 20m | 392.13 | 286.87 | 544.36 | 338.82 | 95.37 | 150.06 | 38.27 | 112.28 | 39.14 | 463.35 | 118.16 | 282.01 | 98.31 | 351.88 | 89.74 | 392.13 | 286.87 | 544.36 | 338.82 | 95.37 | 150.06 | 118.16 | 282.01 | 98.31 | 351.88 | 89.74 | | | | |
| 30m | 209.91 | 166.33 | 270.28 | 128.76 | 89.94 | 100.14 | 47.70 | 73.62 | 44.26 | 234.16 | 111.55 | 161.89 | 97.33 | 193.03 | 91.96 | 209.91 | 166.33 | 270.28 | 128.76 | 89.94 | 100.14 | 111.55 | 161.89 | 97.33 | 193.03 | 91.96 | | | | |
| 50m | 90.21 | 76.94 | 104.87 | 64.85 | 84.29 | 53.79 | 59.62 | 38.77 | 50.39 | 95.17 | 105.50 | 74.16 | 96.39 | 84.64 | 93.83 | 90.21 | 76.94 | 104.87 | 64.85 | 84.29 | 53.79 | 105.50 | 74.16 | 96.39 | 84.64 | 93.83 | | | | |
| 100m | 25.51 | 23.33 | 25.88 | 101.48 | 80.47 | 18.88 | 74.03 | 13.33 | 57.13 | 25.51 | 100.02 | 22.30 | 95.59 | 24.28 | 95.19 | 25.51 | 23.33 | 25.88 | 101.48 | 80.47 | 18.88 | 100.02 | 22.30 | 95.59 | 24.28 | 95.19 | | | | |
| 5m | 4225.15 | 1671.50 | 4751.35 | 1517.10 | 90.76 | 661.58 | 15.66 | 314.87 | 18.84 | 4134.27 | 97.85 | 1475.43 | 88.27 | 3087.93 | 73.08 | 4225.15 | 1671.50 | 4751.35 | 1517.10 | 90.76 | 661.58 | 97.85 | 1475.43 | 88.27 | 3087.93 | 73.08 | | | | |
| 10m | 1330.99 | 705.34 | 1744.80 | 695.02 | 98.82 | 428.75 | 32.21 | 191.09 | 27.17 | 1385.64 | 104.11 | 654.27 | 93.02 | 1046.70 | 78.64 | 1330.99 | 705.34 | 1744.80 | 695.02 | 98.82 | 428.75 | 104.11 | 654.27 | 93.02 | 1046.70 | 78.64 | | | | |
| 15m | 625.54 | 414.21 | 988.31 | 494.44 | 96.00 | 309.24 | 49.44 | 134.97 | 32.59 | 768.46 | 122.85 | 402.90 | 97.27 | 535.81 | 85.66 | 625.54 | 414.21 | 988.31 | 494.44 | 96.00 | 309.24 | 122.85 | 402.90 | 97.27 | 535.81 | 85.66 | | | | |
| 20m | 395.49 | 285.96 | 655.07 | 265.38 | 92.10 | 239.69 | 60.61 | 103.18 | 36.08 | 497.56 | 125.81 | 276.40 | 96.66 | 347.64 | 87.90 | 395.49 | 285.96 | 655.07 | 265.38 | 92.10 | 239.69 | 125.81 | 276.40 | 96.66 | 347.64 | 87.90 | | | | |
| 30m | 207.25 | 163.71 | 348.07 | 136.78 | 83.55 | 158.20 | 76.33 | 67.52 | 41.25 | 255.09 | 123.09 | 156.11 | 95.36 | 188.58 | 90.99 | 207.25 | 163.71 | 348.07 | 136.78 | 83.55 | 158.20 | 123.09 | 156.11 | 95.36 | 188.58 | 90.99 | | | | |
| 50m | 88.68 | 75.70 | 144.48 | 56.91 | 75.18 | 88.83 | 94.53 | 35.88 | 47.39 | 102.34 | 115.39 | 70.73 | 93.43 | 68.45 | 90.42 | 88.68 | 75.70 | 144.48 | 56.91 | 75.18 | 102.34 | 115.39 | 70.73 | 93.43 | 68.45 | 90.42 | | | | |
| 100m | 25.32 | 23.17 | 36.92 | 16.04 | 69.21 | 28.11 | 111.01 | 12.54 | 54.13 | 27.26 | 107.67 | 21.22 | 91.59 | 20.89 | 20.89 | 25.32 | 23.17 | 36.92 | 16.04 | 69.21 | 27.26 | 107.67 | 21.22 | 91.59 | 20.89 | | | | | |

Tabelle 4: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage ohne Rück- und Verstärksleiter

| Gleisanlage maximaler Betrag magnetische Flussdichte | kein Gebäude (= 100 %) | | | hochpermeables Blech mit Fensteröffnungen | | | hochpermeables Blech ohne Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | | | |
|--|------------------------|-------------------|----------------------------|---|-------------------|----------------------------|--|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|---------|---------|-------|
| | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | | | |
| Erdgeschoss | 5m | 11506.50 | 7370.33 | 102.65 | 7103.62 | 96.38 | 2536.39 | 22.04 | 2212.86 | 30.02 | 11440.20 | 99.42 | 7196.32 | 97.64 | 10151.40 | 88.22 | 6693.93 | 90.82 |
| | 10m | 7025.11 | 4850.15 | 108.65 | 4694.62 | 96.79 | 1858.08 | 26.45 | 1689.98 | 34.84 | 7246.74 | 103.15 | 4774.16 | 98.43 | 6358.50 | 90.51 | 4455.91 | 91.87 |
| | 15m | 4686.05 | 3374.77 | 107.83 | 3235.68 | 95.88 | 1414.28 | 30.18 | 1321.37 | 39.15 | 4818.94 | 102.84 | 3319.99 | 98.38 | 4280.45 | 91.34 | 3125.26 | 92.61 |
| | 20m | 3281.30 | 2453.40 | 105.71 | 2329.44 | 94.95 | 1108.70 | 33.79 | 1056.43 | 43.06 | 3339.65 | 101.78 | 2409.81 | 98.22 | 3022.41 | 92.11 | 2287.96 | 93.26 |
| | 30m | 1817.92 | 1441.89 | 1859.13 | 1349.26 | 93.58 | 729.22 | 40.11 | 713.57 | 49.49 | 1818.86 | 100.05 | 1412.86 | 97.99 | 1697.03 | 93.35 | 1359.07 | 94.26 |
| | 50m | 773.47 | 658.65 | 759.47 | 608.74 | 92.42 | 399.83 | 51.69 | 382.80 | 58.12 | 760.80 | 98.36 | 644.34 | 97.83 | 733.68 | 94.86 | 628.65 | 95.45 |
| | 100m | 216.27 | 198.05 | 206.43 | 182.69 | 92.24 | 147.95 | 68.41 | 136.00 | 68.67 | 210.44 | 97.30 | 193.90 | 97.90 | 208.54 | 96.43 | 191.57 | 96.73 |
| | 5m | 13096.20 | 7589.17 | 123.41 | 7551.71 | 99.51 | 2344.40 | 17.90 | 2094.46 | 27.60 | 14865.50 | 113.51 | 7561.90 | 99.64 | 11125.70 | 84.95 | 6764.29 | 89.13 |
| | 10m | 7013.92 | 4719.70 | 124.31 | 4628.51 | 98.07 | 1683.99 | 24.01 | 1599.90 | 33.90 | 7983.17 | 113.82 | 4700.51 | 99.59 | 6253.80 | 89.16 | 4310.80 | 91.34 |
| | 15m | 4527.99 | 3256.79 | 121.18 | 3136.57 | 96.31 | 1321.25 | 29.18 | 1257.87 | 38.62 | 5055.85 | 111.66 | 3230.16 | 99.18 | 4112.54 | 90.82 | 3007.59 | 92.35 |
| 20m | 3164.11 | 2375.23 | 117.20 | 2250.90 | 94.77 | 1080.35 | 34.14 | 1011.10 | 42.57 | 3451.83 | 109.09 | 2345.84 | 98.76 | 2904.54 | 91.80 | 2209.40 | 93.02 | |
| 30m | 1770.19 | 1409.29 | 1966.91 | 1304.28 | 92.55 | 753.00 | 42.54 | 687.42 | 48.78 | 1861.27 | 105.15 | 1383.25 | 98.15 | 1647.50 | 93.07 | 1323.84 | 93.94 | |
| 50m | 763.21 | 650.65 | 788.54 | 588.66 | 90.47 | 420.42 | 55.09 | 369.70 | 56.82 | 770.75 | 100.99 | 635.03 | 97.60 | 721.25 | 94.50 | 618.03 | 94.99 | |
| 100m | 215.40 | 197.14 | 208.93 | 176.64 | 89.60 | 151.90 | 70.52 | 131.07 | 66.49 | 211.17 | 98.04 | 191.98 | 97.38 | 206.67 | 95.95 | 189.48 | 96.12 | |
| 1. Obergeschoss | 5m | 11676.00 | 6973.03 | 148.00 | 7164.68 | 102.75 | 2340.57 | 20.05 | 1857.32 | 26.64 | 15200.50 | 130.19 | 7100.10 | 101.82 | 9906.46 | 84.84 | 6221.33 | 89.22 |
| | 10m | 6487.48 | 4399.27 | 143.05 | 4365.01 | 99.22 | 1880.07 | 28.98 | 1447.61 | 32.91 | 8199.16 | 126.38 | 4436.12 | 100.84 | 5726.97 | 88.28 | 4007.82 | 91.10 |
| | 15m | 4221.98 | 3064.67 | 141.30 | 2944.09 | 96.07 | 1531.89 | 36.28 | 1152.66 | 37.61 | 5166.32 | 122.37 | 3062.07 | 99.92 | 3804.91 | 90.12 | 2819.64 | 92.00 |
| | 20m | 2979.82 | 2257.63 | 136.58 | 2109.51 | 93.44 | 1264.44 | 42.43 | 935.01 | 41.42 | 3530.69 | 118.49 | 2237.83 | 99.12 | 2718.63 | 91.23 | 2089.08 | 92.53 |
| | 30m | 1698.99 | 1361.38 | 2185.20 | 1220.05 | 89.62 | 887.55 | 52.24 | 642.04 | 47.16 | 1911.76 | 112.52 | 1333.53 | 97.95 | 1572.97 | 92.58 | 1268.40 | 93.17 |
| | 50m | 747.69 | 639.09 | 116.48 | 547.61 | 85.69 | 492.50 | 65.87 | 346.96 | 54.29 | 788.78 | 105.50 | 618.16 | 96.73 | 702.37 | 93.94 | 599.66 | 93.83 |
| | 100m | 214.04 | 196.10 | 223.61 | 163.14 | 83.19 | 178.43 | 83.36 | 122.45 | 62.44 | 213.81 | 99.89 | 188.06 | 95.90 | 203.54 | 95.09 | 185.32 | 94.50 |
| | 5m | 8980.75 | 5865.32 | 13670.30 | 6007.59 | 102.43 | 3875.21 | 43.15 | 1572.59 | 26.81 | 11817.20 | 131.58 | 5975.93 | 101.89 | 7298.63 | 81.27 | 5301.83 | 90.39 |
| | 10m | 5582.23 | 3924.97 | 166.23 | 3838.23 | 97.79 | 3074.92 | 55.08 | 1278.44 | 32.57 | 7428.11 | 133.07 | 3964.78 | 101.01 | 4744.99 | 85.00 | 3578.98 | 91.19 |
| | 15m | 3792.50 | 2810.49 | 1531.89 | 2609.77 | 92.86 | 2524.05 | 66.55 | 1042.11 | 37.08 | 4988.32 | 131.53 | 2798.93 | 99.59 | 3330.43 | 87.82 | 2568.44 | 91.39 |
| 20m | 2740.97 | 2107.31 | 4770.46 | 1867.29 | 88.61 | 2082.42 | 75.97 | 857.19 | 40.68 | 3532.30 | 128.87 | 2069.28 | 98.20 | 2459.85 | 89.74 | 1924.27 | 91.31 | |
| 30m | 1608.74 | 1300.10 | 173.44 | 1071.87 | 82.45 | 1449.28 | 90.09 | 597.11 | 45.93 | 1989.61 | 123.68 | 1247.56 | 95.96 | 1479.46 | 91.96 | 1182.52 | 90.96 | |
| 50m | 727.50 | 624.01 | 1194.94 | 474.55 | 76.05 | 779.12 | 107.10 | 324.97 | 52.08 | 843.08 | 115.89 | 582.40 | 93.33 | 680.69 | 93.57 | 563.78 | 90.35 | |
| 100m | 212.22 | 194.62 | 317.59 | 139.11 | 71.48 | 269.84 | 127.16 | 114.02 | 58.59 | 227.27 | 107.10 | 177.23 | 91.06 | 199.33 | 93.93 | 174.49 | 89.66 | |
| 2. Obergeschoss | 5m | 11676.00 | 6973.03 | 148.00 | 7164.68 | 102.75 | 2340.57 | 20.05 | 1857.32 | 26.64 | 15200.50 | 130.19 | 7100.10 | 101.82 | 9906.46 | 84.84 | 6221.33 | 89.22 |
| | 10m | 6487.48 | 4399.27 | 143.05 | 4365.01 | 99.22 | 1880.07 | 28.98 | 1447.61 | 32.91 | 8199.16 | 126.38 | 4436.12 | 100.84 | 5726.97 | 88.28 | 4007.82 | 91.10 |
| | 15m | 4221.98 | 3064.67 | 141.30 | 2944.09 | 96.07 | 1531.89 | 36.28 | 1152.66 | 37.61 | 5166.32 | 122.37 | 3062.07 | 99.92 | 3804.91 | 90.12 | 2819.64 | 92.00 |
| | 20m | 2979.82 | 2257.63 | 136.58 | 2109.51 | 93.44 | 1264.44 | 42.43 | 935.01 | 41.42 | 3530.69 | 118.49 | 2237.83 | 99.12 | 2718.63 | 91.23 | 2089.08 | 92.53 |
| | 30m | 1698.99 | 1361.38 | 2185.20 | 1220.05 | 89.62 | 887.55 | 52.24 | 642.04 | 47.16 | 1911.76 | 112.52 | 1333.53 | 97.95 | 1572.97 | 92.58 | 1268.40 | 93.17 |
| | 50m | 747.69 | 639.09 | 116.48 | 547.61 | 85.69 | 492.50 | 65.87 | 346.96 | 54.29 | 788.78 | 105.50 | 618.16 | 96.73 | 702.37 | 93.94 | 599.66 | 93.83 |
| | 100m | 214.04 | 196.10 | 223.61 | 163.14 | 83.19 | 178.43 | 83.36 | 122.45 | 62.44 | 213.81 | 99.89 | 188.06 | 95.90 | 203.54 | 95.09 | 185.32 | 94.50 |
| | 5m | 8980.75 | 5865.32 | 13670.30 | 6007.59 | 102.43 | 3875.21 | 43.15 | 1572.59 | 26.81 | 11817.20 | 131.58 | 5975.93 | 101.89 | 7298.63 | 81.27 | 5301.83 | 90.39 |
| | 10m | 5582.23 | 3924.97 | 166.23 | 3838.23 | 97.79 | 3074.92 | 55.08 | 1278.44 | 32.57 | 7428.11 | 133.07 | 3964.78 | 101.01 | 4744.99 | 85.00 | 3578.98 | 91.19 |
| | 15m | 3792.50 | 2810.49 | 1531.89 | 2609.77 | 92.86 | 2524.05 | 66.55 | 1042.11 | 37.08 | 4988.32 | 131.53 | 2798.93 | 99.59 | 3330.43 | 87.82 | 2568.44 | 91.39 |
| 20m | 2740.97 | 2107.31 | 4770.46 | 1867.29 | 88.61 | 2082.42 | 75.97 | 857.19 | 40.68 | 3532.30 | 128.87 | 2069.28 | 98.20 | 2459.85 | 89.74 | 1924.27 | 91.31 | |
| 30m | 1608.74 | 1300.10 | 173.44 | 1071.87 | 82.45 | 1449.28 | 90.09 | 597.11 | 45.93 | 1989.61 | 123.68 | 1247.56 | 95.96 | 1479.46 | 91.96 | 1182.52 | 90.96 | |
| 50m | 727.50 | 624.01 | 1194.94 | 474.55 | 76.05 | 779.12 | 107.10 | 324.97 | 52.08 | 843.08 | 115.89 | 582.40 | 93.33 | 680.69 | 93.57 | 563.78 | 90.35 | |
| 100m | 212.22 | 194.62 | 317.59 | 139.11 | 71.48 | 269.84 | 127.16 | 114.02 | 58.59 | 227.27 | 107.10 | 177.23 | 91.06 | 199.33 | 93.93 | 174.49 | 89.66 | |
| 3. Obergeschoss | 5m | 11676.00 | 6973.03 | 148.00 | 7164.68 | 102.75 | 2340.57 | 20.05 | 1857.32 | 26.64 | 15200.50 | 130.19 | 7100.10 | 101.82 | 9906.46 | 84.84 | 6221.33 | 89.22 |
| | 10m | 6487.48 | 4399.27 | 143.05 | 4365.01 | 99.22 | 1880.07 | 28.98 | 1447.61 | 32.91 | 8199.16 | 126.38 | 4436.12 | 100.84 | 5726.97 | 88.28 | 4007.82 | 91.10 |
| | 15m | 4221.98 | 3064.67 | 141.30 | 2944.09 | 96.07 | 1531.89 | 36.28 | 1152.66 | 37.61 | 5166.32 | 122.37 | 3062.07 | 99.92 | 3804.91 | 90.12 | 2819.64 | 92.00 |
| | 20m | 2979.82 | 2257.63 | 136.58 | 2109.51 | 93.44 | 1264.44 | 42.43 | 935.01 | 41.42 | 3530.69 | 118.49 | 2237.83 | 99.12 | 2718.63 | 91.23 | 2089.08 | 92.53 |
| | 30m | 1698.99 | 1361.38 | 2185.20 | 1220.05 | 89.62 | 887.55 | 52.24 | 642.04 | 47.16 | 1911.76 | 112.52 | 1333.53 | 97.95 | 1572.97 | 92.58 | 1268.40 | 93.17 |
| | 50m | 747.69 | 639.09 | 116.48 | 547.61 | 85.69 | 492.50 | 65.87 | 346.96 | 54.29 | 788.78 | 105.50 | 618.16 | 96.73 | 702.37 | 93.94 | 599.66 | 93.83 |
| | 100m | 214.04 | 196.10 | 223.61 | 163.14 | 83.19 | 178.43 | 83.36 | 122.45 | 62.44 | 213.81 | 99.89 | 188.06 | 95.90 | 203.54 | 95.09 | 185.32 | 94.50 |
| | 5m | 8980.75 | 5865.32 | 13670.30 | 6007.59 | 102.43 | 3875.21 | 43.15 | 1572.59 | 26.81 | 11817.20 | 131.58 | 5975.93 | 101.89 | 7298.63 | 81.27 | 5301.83 | 90.39 |
| | 10m | 5582.23 | 3924.97 | 166.23 | 3838.23 | 97.79 | 3074.92 | 55.08 | 1278.44 | 32.57 | 7428.11 | 133.07 | 3964.78 | 101.01 | 4744.99 | 85.00 | 3578.98 | 91.19 |
| | 15m | 3792.50 | 2810.49 | 1531.89 | 2609.77 | 92.86 | 2524.05 | 66.55 | 1042.11 | 37.08 | 4988.32 | 131.53 | 2798.93 | 99.59 | 3330.43 | 87.82 | 2568.44 | 91.39 |
| 20m | 2740.97 | 2107.31 | 4770.46 | 1867.29 | 88.61 | 2082.42 | 75.97 | 857.19 | 40.68 | 3532.30 | 128.87 | 2069.28 | | | | | | |

Tabelle 5: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage mit Rückleiter

| Gleisanlage RL maximaler Betrag magnetische Flussdichte | kein Gebäude (=100%) | | | hochpermeables Blech mit Fensteröffnungen | | | hochpermeables Blech ohne Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | | | |
|---|----------------------|-------------------|----------------------------|---|-------------------|----------------------------|--|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|---------|---------|-------|
| | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | | | |
| Erdgeschoss | 5m | 527.20 | 347.77 | 112.28 | 262.43 | 75.46 | 421.67 | 79.98 | 383.79 | 110.36 | 555.58 | 105.38 | 334.57 | 440.88 | 83.63 | 345.80 | 99.43 | |
| | 10m | 438.69 | 419.02 | 85.78 | 355.99 | 84.96 | 339.63 | 77.42 | 316.53 | 75.54 | 425.60 | 97.02 | 407.36 | 430.83 | 98.21 | 417.15 | 99.55 | |
| | 15m | 438.16 | 420.27 | 90.23 | 372.73 | 88.69 | 282.69 | 64.52 | 267.51 | 63.65 | 426.85 | 97.42 | 408.80 | 427.98 | 97.68 | 407.63 | 96.99 | |
| | 20m | 424.53 | 382.39 | 94.10 | 345.60 | 90.38 | 239.82 | 56.49 | 228.48 | 59.75 | 410.75 | 96.75 | 372.69 | 408.98 | 96.34 | 367.49 | 96.10 | |
| | 30m | 334.53 | 291.09 | 96.76 | 266.39 | 91.51 | 178.99 | 53.51 | 170.73 | 58.65 | 326.65 | 97.64 | 284.29 | 319.05 | 95.37 | 278.51 | 95.68 | |
| | 50m | 189.32 | 167.05 | 96.61 | 153.32 | 91.78 | 108.67 | 57.40 | 103.53 | 61.97 | 184.84 | 97.63 | 163.24 | 181.00 | 95.60 | 160.34 | 95.98 | |
| | 100m | 65.05 | 60.11 | 95.15 | 55.40 | 92.17 | 45.72 | 70.28 | 41.88 | 69.68 | 63.27 | 97.27 | 58.84 | 62.84 | 96.61 | 58.22 | 96.86 | |
| | 5m | 1319.63 | 590.36 | 116.01 | 509.30 | 86.27 | 460.27 | 34.88 | 384.91 | 65.20 | 1413.07 | 107.08 | 575.88 | 811.97 | 61.53 | 530.23 | 89.81 | |
| | 10m | 527.73 | 503.77 | 91.44 | 410.34 | 81.45 | 357.28 | 67.70 | 313.02 | 62.14 | 537.03 | 101.76 | 484.69 | 507.94 | 96.25 | 483.96 | 96.07 | |
| | 15m | 510.53 | 454.36 | 90.38 | 387.07 | 85.19 | 294.80 | 57.74 | 261.26 | 57.50 | 488.22 | 95.63 | 437.48 | 486.49 | 95.29 | 432.68 | 95.23 | |
| 1. Obergeschoss | 20m | 454.24 | 394.83 | 96.14 | 345.82 | 87.59 | 249.11 | 54.84 | 221.89 | 56.20 | 442.69 | 97.46 | 382.33 | 430.84 | 94.85 | 375.20 | 95.03 | |
| | 30m | 337.67 | 291.53 | 100.81 | 260.14 | 89.23 | 185.63 | 54.97 | 165.26 | 56.69 | 336.68 | 99.71 | 283.62 | 319.94 | 94.75 | 277.09 | 95.05 | |
| | 50m | 188.28 | 165.99 | 100.00 | 148.60 | 89.52 | 115.43 | 61.31 | 100.15 | 60.33 | 186.98 | 99.31 | 161.65 | 179.21 | 95.18 | 158.42 | 95.44 | |
| | 100m | 64.86 | 59.88 | 96.34 | 53.57 | 89.47 | 46.80 | 72.16 | 40.35 | 67.38 | 63.45 | 97.83 | 58.29 | 62.34 | 96.12 | 57.62 | 96.23 | |
| | 5m | 3117.06 | 1190.45 | 114.84 | 935.55 | 78.59 | 552.42 | 17.72 | 405.07 | 34.03 | 3573.84 | 114.65 | 1124.65 | 2195.43 | 70.43 | 977.69 | 82.13 | |
| | 10m | 930.67 | 649.72 | 86.46 | 475.30 | 73.16 | 426.70 | 45.85 | 306.34 | 47.15 | 899.67 | 96.67 | 604.51 | 800.95 | 86.06 | 588.65 | 90.60 | |
| | 15m | 621.62 | 499.76 | 96.52 | 394.03 | 78.84 | 348.43 | 56.05 | 249.95 | 50.01 | 599.25 | 96.40 | 472.76 | 568.23 | 91.41 | 462.42 | 92.53 | |
| | 20m | 491.52 | 409.94 | 106.60 | 336.63 | 82.12 | 293.17 | 59.65 | 210.49 | 51.35 | 492.82 | 100.26 | 391.98 | 456.67 | 92.91 | 382.04 | 93.19 | |
| | 30m | 340.79 | 291.69 | 113.23 | 245.50 | 84.17 | 218.67 | 64.17 | 155.91 | 53.45 | 352.30 | 103.38 | 280.86 | 319.78 | 93.84 | 273.31 | 93.70 | |
| | 50m | 186.62 | 164.55 | 110.91 | 138.24 | 84.01 | 134.70 | 72.18 | 94.22 | 57.26 | 191.05 | 102.38 | 158.34 | 176.35 | 94.50 | 154.85 | 94.10 | |
| 2. Obergeschoss | 100m | 64.56 | 59.66 | 103.16 | 49.50 | 82.96 | 55.02 | 85.23 | 37.71 | 63.20 | 64.10 | 99.29 | 57.17 | 61.47 | 95.22 | 56.43 | 94.58 | |
| | 5m | 3220.55 | 1439.89 | 105.83 | 925.06 | 64.24 | 971.03 | 30.15 | 424.66 | 29.49 | 3088.92 | 95.91 | 1259.72 | 2415.76 | 75.01 | 1159.51 | 80.53 | |
| | 10m | 1201.90 | 762.40 | 121.53 | 497.00 | 65.19 | 721.35 | 60.02 | 305.05 | 40.01 | 1183.80 | 98.49 | 679.44 | 996.24 | 82.89 | 652.50 | 85.59 | |
| | 15m | 714.21 | 537.51 | 143.09 | 378.09 | 70.34 | 582.12 | 81.51 | 243.12 | 45.23 | 858.42 | 105.35 | 490.33 | 632.46 | 88.55 | 474.16 | 88.21 | |
| | 20m | 522.62 | 421.64 | 154.45 | 308.83 | 73.24 | 487.45 | 93.27 | 202.41 | 48.01 | 574.70 | 109.96 | 389.32 | 476.48 | 91.17 | 376.86 | 89.38 | |
| | 30m | 342.08 | 290.44 | 161.98 | 217.35 | 74.84 | 358.20 | 104.71 | 148.41 | 51.10 | 386.32 | 112.93 | 269.78 | 318.18 | 93.01 | 261.70 | 90.10 | |
| | 50m | 184.29 | 162.60 | 159.17 | 119.88 | 73.72 | 214.08 | 116.16 | 89.00 | 54.74 | 204.56 | 111.00 | 149.98 | 172.96 | 93.85 | 146.52 | 90.11 | |
| | 100m | 64.15 | 59.34 | 147.80 | 42.24 | 71.18 | 83.22 | 129.73 | 35.18 | 59.29 | 68.01 | 106.01 | 53.94 | 60.23 | 93.89 | 53.19 | 89.64 | |
| | 3. Obergeschoss | 5m | 3220.55 | 1439.89 | 105.83 | 925.06 | 64.24 | 971.03 | 30.15 | 424.66 | 29.49 | 3088.92 | 95.91 | 1259.72 | 2415.76 | 75.01 | 1159.51 | 80.53 |
| | | 10m | 1201.90 | 762.40 | 121.53 | 497.00 | 65.19 | 721.35 | 60.02 | 305.05 | 40.01 | 1183.80 | 98.49 | 679.44 | 996.24 | 82.89 | 652.50 | 85.59 |
| 15m | | 714.21 | 537.51 | 143.09 | 378.09 | 70.34 | 582.12 | 81.51 | 243.12 | 45.23 | 858.42 | 105.35 | 490.33 | 632.46 | 88.55 | 474.16 | 88.21 | |
| 20m | | 522.62 | 421.64 | 154.45 | 308.83 | 73.24 | 487.45 | 93.27 | 202.41 | 48.01 | 574.70 | 109.96 | 389.32 | 476.48 | 91.17 | 376.86 | 89.38 | |
| 30m | | 342.08 | 290.44 | 161.98 | 217.35 | 74.84 | 358.20 | 104.71 | 148.41 | 51.10 | 386.32 | 112.93 | 269.78 | 318.18 | 93.01 | 261.70 | 90.10 | |
| 50m | | 184.29 | 162.60 | 159.17 | 119.88 | 73.72 | 214.08 | 116.16 | 89.00 | 54.74 | 204.56 | 111.00 | 149.98 | 172.96 | 93.85 | 146.52 | 90.11 | |
| 100m | | 64.15 | 59.34 | 147.80 | 42.24 | 71.18 | 83.22 | 129.73 | 35.18 | 59.29 | 68.01 | 106.01 | 53.94 | 60.23 | 93.89 | 53.19 | 89.64 | |

Tabelle 6: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage mit Verstärkungsleiter

| Gleisanlage VL maximaler Betrag magnetische Flussdichte | kein Gebäude (= 100%) | | | hochpermeables Blech mit Fensteröffnungen | | | hochpermeables Blech ohne Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------|----------------------------|---|-------------------|----------------------------|--|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|----------|-------|---------|-------|
| | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | | | | |
| Erdgeschoss | 5m | 14963.80 | 9871.01 | 15158.20 | 101.30 | 9544.60 | 96.69 | 3368.48 | 22.51 | 2927.76 | 29.66 | 14740.70 | 98.51 | 9639.78 | 97.66 | 13371.80 | 89.36 | 9007.74 | 91.25 |
| | 10m | 9489.00 | 6550.61 | 10242.80 | 107.94 | 6350.60 | 96.95 | 2461.72 | 25.94 | 2223.83 | 33.95 | 9746.74 | 102.72 | 6446.41 | 98.41 | 8603.40 | 90.67 | 6016.52 | 91.85 |
| | 15m | 6334.74 | 4528.15 | 6843.02 | 108.02 | 4351.90 | 96.11 | 1858.53 | 29.34 | 1725.84 | 38.11 | 6519.71 | 102.92 | 4455.79 | 98.40 | 5779.82 | 91.24 | 4187.13 | 92.47 |
| | 20m | 4399.30 | 3259.95 | 4671.13 | 106.18 | 3102.94 | 95.18 | 1445.32 | 32.85 | 1370.25 | 42.03 | 4487.67 | 102.01 | 3203.24 | 98.26 | 4044.79 | 91.94 | 3035.05 | 93.10 |
| | 30m | 2389.76 | 1880.69 | 2454.67 | 102.72 | 1763.21 | 93.75 | 937.83 | 39.24 | 914.68 | 48.64 | 2396.09 | 100.26 | 1843.35 | 98.01 | 2227.04 | 93.19 | 1770.25 | 94.13 |
| 1. Obergeschoss | 5m | 988.13 | 837.52 | 972.44 | 98.41 | 774.71 | 92.50 | 502.92 | 50.90 | 482.30 | 57.59 | 972.94 | 98.46 | 819.42 | 97.84 | 936.35 | 94.76 | 798.77 | 95.37 |
| | 10m | 267.75 | 244.81 | 255.73 | 95.51 | 225.88 | 92.27 | 182.38 | 68.12 | 167.74 | 68.52 | 260.56 | 97.31 | 239.68 | 97.90 | 258.10 | 96.39 | 236.75 | 96.71 |
| | 15m | 18596.20 | 10598.68 | 22096.40 | 118.50 | 10511.20 | 99.17 | 3188.70 | 17.15 | 2790.29 | 26.33 | 20486.00 | 110.16 | 10510.12 | 99.16 | 15764.10 | 84.77 | 9419.43 | 88.87 |
| | 20m | 9751.53 | 6455.77 | 12027.20 | 123.34 | 6345.96 | 98.30 | 2243.27 | 23.00 | 2107.30 | 32.64 | 11042.10 | 113.23 | 6427.31 | 99.56 | 8660.97 | 88.82 | 5880.48 | 91.09 |
| | 30m | 6174.04 | 4383.92 | 7508.20 | 121.61 | 4238.64 | 96.69 | 1716.10 | 27.80 | 1642.37 | 37.46 | 6913.71 | 111.98 | 4351.39 | 99.26 | 5590.31 | 90.55 | 4039.64 | 92.15 |
| 2. Obergeschoss | 5m | 2325.09 | 1836.52 | 2602.72 | 111.94 | 1705.05 | 92.84 | 962.89 | 41.41 | 880.93 | 47.97 | 2456.25 | 105.64 | 1803.98 | 98.23 | 2160.06 | 92.90 | 1722.98 | 93.82 |
| | 10m | 974.41 | 826.92 | 1011.09 | 103.76 | 749.23 | 90.60 | 529.11 | 54.30 | 465.81 | 56.33 | 986.34 | 101.22 | 807.33 | 97.63 | 919.93 | 94.41 | 784.93 | 94.92 |
| | 15m | 266.62 | 243.63 | 258.93 | 97.12 | 218.37 | 89.63 | 187.50 | 70.32 | 161.64 | 66.35 | 261.53 | 98.09 | 237.27 | 97.39 | 255.73 | 95.91 | 234.13 | 96.10 |
| | 20m | 18482.60 | 10174.93 | 26591.50 | 143.87 | 10512.81 | 103.32 | 3065.62 | 16.59 | 2477.10 | 24.35 | 23658.40 | 128.00 | 10362.72 | 101.85 | 15259.80 | 82.56 | 8964.36 | 88.10 |
| | 30m | 9251.32 | 6078.60 | 13346.50 | 144.27 | 6071.11 | 99.88 | 2435.19 | 26.32 | 1902.15 | 31.29 | 11681.50 | 126.27 | 6137.31 | 100.97 | 8087.64 | 87.42 | 5511.48 | 90.67 |
| 3. Obergeschoss | 5m | 5794.31 | 4132.00 | 5490.90 | 141.34 | 3998.26 | 96.76 | 1974.17 | 34.07 | 1501.15 | 36.33 | 7125.74 | 122.98 | 4135.89 | 100.09 | 5194.59 | 89.65 | 3791.89 | 91.77 |
| | 10m | 4005.80 | 2997.57 | 4884.56 | 137.07 | 2820.70 | 94.10 | 1622.77 | 40.51 | 1209.42 | 40.35 | 4780.06 | 119.33 | 2976.79 | 99.31 | 3641.98 | 90.92 | 2769.10 | 92.38 |
| | 15m | 2228.12 | 1771.04 | 2884.56 | 129.46 | 1595.84 | 90.11 | 1128.92 | 50.67 | 821.40 | 46.38 | 2523.08 | 113.24 | 1737.32 | 98.10 | 2058.71 | 92.40 | 1648.45 | 93.08 |
| | 20m | 953.65 | 811.51 | 1117.71 | 117.20 | 697.24 | 85.92 | 619.87 | 65.00 | 437.05 | 53.86 | 1010.05 | 105.91 | 785.51 | 96.80 | 895.01 | 93.85 | 761.09 | 93.79 |
| | 30m | 264.87 | 242.13 | 277.62 | 104.81 | 201.49 | 83.22 | 218.03 | 82.32 | 150.77 | 62.27 | 264.48 | 99.85 | 232.20 | 95.90 | 251.80 | 95.07 | 228.76 | 94.48 |
| 3. Obergeschoss | 5m | 14087.40 | 8542.63 | 20497.60 | 145.50 | 8822.64 | 103.28 | 5084.59 | 36.09 | 2064.43 | 24.17 | 18238.30 | 129.47 | 8701.94 | 101.86 | 11131.90 | 79.02 | 7633.54 | 89.36 |
| | 10m | 7975.78 | 5421.15 | 12968.30 | 162.60 | 5367.48 | 99.01 | 4033.12 | 50.57 | 1667.57 | 30.76 | 10575.80 | 132.60 | 5492.12 | 101.31 | 6673.75 | 83.68 | 4923.58 | 90.82 |
| | 15m | 5201.15 | 3782.18 | 8864.95 | 170.44 | 3557.57 | 94.06 | 3268.01 | 62.83 | 1350.85 | 35.72 | 6855.85 | 131.81 | 3350.28 | 99.95 | 4522.73 | 86.96 | 3451.88 | 91.27 |
| | 20m | 3676.63 | 2791.25 | 6373.29 | 173.95 | 2503.53 | 89.69 | 2684.54 | 75.02 | 1105.09 | 39.59 | 4761.39 | 129.50 | 2750.99 | 98.56 | 3277.93 | 89.16 | 2548.16 | 91.29 |
| | 30m | 2104.55 | 1687.80 | 3656.19 | 173.73 | 1404.40 | 83.21 | 1851.86 | 87.99 | 762.54 | 45.18 | 2619.61 | 124.47 | 1624.50 | 96.25 | 1929.23 | 91.67 | 1535.65 | 90.98 |
| 100m | 50m | 926.68 | 791.44 | 1527.60 | 164.85 | 604.52 | 76.38 | 980.60 | 105.82 | 408.89 | 51.66 | 1079.28 | 116.47 | 739.84 | 93.48 | 866.29 | 93.48 | 715.24 | 90.37 |
| | 100m | 262.52 | 240.38 | 393.70 | 149.97 | 171.93 | 71.52 | 332.56 | 126.68 | 140.47 | 58.43 | 281.67 | 107.29 | 218.97 | 91.09 | 246.58 | 93.93 | 215.52 | 89.66 |

Tabelle 7: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter

| Gleisanlage VL-RL maximaler Betrag magnetische Flussdichte | kein Gebäude (= 100%) | | | hochpermeables Blech mit Fensteröffnungen | | | hochpermeables Blech ohne Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | | |
|--|-----------------------|-------------------|----------------------------|---|-------------------|----------------------------|--|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|---------|-------|
| | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | max B in nT | mean B in nT | SF _{mean} in % | | |
| Erdgeschoss | 5m | 3872.90 | 2828.01 | 94.38 | 1180.47 | 30.48 | 1095.11 | 38.72 | 3765.02 | 97.21 | 2756.76 | 97.48 | 3521.81 | 90.93 | 2640.56 | 93.37 | |
| | 10m | 2773.87 | 2092.12 | 94.85 | 902.71 | 32.54 | 848.45 | 40.55 | 2769.35 | 99.84 | 2050.87 | 98.03 | 2572.67 | 92.75 | 1953.17 | 93.36 | |
| | 15m | 2055.89 | 1560.36 | 94.57 | 704.73 | 34.28 | 671.11 | 43.01 | 2072.89 | 100.83 | 1530.71 | 98.10 | 1904.12 | 92.62 | 1458.50 | 93.47 | |
| | 20m | 1530.91 | 1183.47 | 94.10 | 561.93 | 36.71 | 541.87 | 45.79 | 1544.76 | 100.90 | 1160.84 | 98.09 | 1422.04 | 92.89 | 1110.07 | 93.80 | |
| | 30m | 904.26 | 728.76 | 93.20 | 380.29 | 42.05 | 371.66 | 51.00 | 903.20 | 99.88 | 713.77 | 97.94 | 847.31 | 93.70 | 688.72 | 94.51 | |
| | 50m | 403.76 | 345.77 | 92.34 | 211.12 | 52.29 | 203.00 | 58.71 | 397.33 | 98.41 | 338.16 | 97.80 | 383.46 | 94.97 | 330.32 | 95.53 | |
| | 100m | 116.53 | 106.85 | 92.22 | 80.08 | 68.72 | 73.56 | 68.85 | 113.38 | 97.30 | 104.61 | 97.90 | 112.39 | 96.45 | 103.38 | 96.75 | |
| | 1. Obergeschoss | 5m | 4456.85 | 3082.22 | 94.92 | 1128.51 | 25.32 | 1064.41 | 34.53 | 4542.89 | 101.93 | 3018.71 | 97.94 | 4050.59 | 90.88 | 2826.71 | 91.71 |
| | | 10m | 2970.88 | 2125.80 | 94.78 | 850.66 | 28.63 | 814.60 | 38.32 | 3156.88 | 106.26 | 2092.47 | 98.43 | 2694.70 | 90.70 | 1962.53 | 92.32 |
| | | 15m | 2064.29 | 1541.26 | 94.22 | 683.83 | 33.13 | 643.50 | 41.75 | 2213.70 | 107.24 | 1517.96 | 98.49 | 1892.53 | 91.68 | 1432.24 | 92.93 |
| 20m | | 1506.86 | 1160.56 | 93.42 | 561.07 | 37.23 | 520.61 | 44.86 | 1604.93 | 106.51 | 1141.28 | 98.34 | 1391.78 | 92.36 | 1083.97 | 93.40 | |
| 30m | | 886.60 | 715.54 | 91.95 | 394.42 | 44.49 | 358.47 | 50.10 | 923.50 | 104.16 | 700.98 | 97.97 | 827.72 | 93.36 | 673.52 | 94.13 | |
| 50m | | 398.95 | 341.91 | 90.32 | 224.50 | 56.27 | 196.33 | 57.42 | 402.15 | 100.80 | 333.45 | 97.52 | 377.45 | 94.61 | 325.03 | 95.06 | |
| 100m | | 116.07 | 106.37 | 89.57 | 82.25 | 70.86 | 70.88 | 66.64 | 113.75 | 98.00 | 103.58 | 97.38 | 111.40 | 95.97 | 102.26 | 96.14 | |
| 2. Obergeschoss | | 5m | 5747.27 | 3320.57 | 96.19 | 1252.29 | 21.79 | 986.65 | 29.71 | 6489.67 | 112.92 | 3287.86 | 99.01 | 4802.55 | 83.56 | 2956.57 | 89.04 |
| | | 10m | 3063.56 | 2106.14 | 94.81 | 978.49 | 31.94 | 751.18 | 35.67 | 3592.12 | 117.25 | 2090.20 | 99.24 | 2713.17 | 88.56 | 1921.70 | 91.24 |
| | | 15m | 2024.89 | 1495.84 | 93.06 | 791.49 | 39.09 | 595.32 | 39.80 | 2363.08 | 116.70 | 1479.17 | 98.89 | 1832.73 | 90.51 | 1378.57 | 92.16 |
| | 20m | 1458.05 | 1122.35 | 91.39 | 653.17 | 44.80 | 483.85 | 43.11 | 1674.75 | 114.86 | 1104.68 | 98.43 | 1335.36 | 91.59 | 1040.09 | 92.67 | |
| | 30m | 859.10 | 695.72 | 88.62 | 462.25 | 53.81 | 335.23 | 48.18 | 952.23 | 110.84 | 679.06 | 97.61 | 797.31 | 92.81 | 648.82 | 93.26 | |
| | 50m | 391.64 | 336.35 | 85.42 | 262.39 | 67.00 | 184.41 | 54.83 | 411.38 | 105.04 | 324.87 | 96.59 | 368.24 | 94.03 | 315.75 | 93.88 | |
| | 100m | 115.37 | 105.76 | 83.12 | 95.62 | 82.88 | 66.12 | 62.52 | 114.98 | 99.66 | 101.39 | 95.87 | 109.73 | 95.11 | 99.95 | 94.50 | |
| | 3. Obergeschoss | 5m | 5456.78 | 3155.63 | 97.98 | 2097.75 | 38.44 | 871.71 | 27.62 | 7066.06 | 129.49 | 3186.76 | 100.99 | 4358.22 | 79.87 | 2792.51 | 88.49 |
| | | 10m | 2902.65 | 1991.00 | 92.70 | 1635.31 | 56.34 | 680.56 | 34.18 | 3738.65 | 128.80 | 1979.78 | 99.44 | 2483.25 | 85.55 | 1799.16 | 90.36 |
| | | 15m | 1911.16 | 1416.13 | 88.93 | 1323.72 | 69.26 | 546.83 | 38.61 | 2266.36 | 129.05 | 1391.68 | 98.27 | 1691.69 | 88.52 | 1287.45 | 90.91 |
| 20m | | 1379.68 | 1067.70 | 85.80 | 1088.26 | 78.88 | 448.20 | 41.98 | 1756.71 | 127.33 | 1037.40 | 97.16 | 1245.77 | 90.29 | 971.72 | 91.01 | |
| 30m | | 822.46 | 669.68 | 81.05 | 760.29 | 92.44 | 313.37 | 46.79 | 1013.17 | 123.19 | 638.81 | 95.39 | 758.59 | 92.23 | 608.19 | 90.82 | |
| 50m | | 382.04 | 329.07 | 75.66 | 417.39 | 109.25 | 173.05 | 52.59 | 442.05 | 115.71 | 306.39 | 93.11 | 357.67 | 93.62 | 297.15 | 90.30 | |
| 100m | | 114.43 | 105.07 | 71.41 | 145.93 | 127.53 | 61.64 | 58.67 | 122.36 | 106.94 | 95.65 | 91.03 | 107.47 | 93.92 | 94.20 | 89.65 | |

5.2.2 Tabellen der elektrischen Feldstärke

Tabelle 8: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Donaumast

| Donaumast maximaler Betrag elektrische Feldstärke | | kein Gebäude (=100%) | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | |
|---|------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | max E | mean E | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} |
| | | in V/m | in V/m | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % |
| Erdgeschoß | 5m | 520.13 | 268.33 | 123.59 | 23.76 | 29.18 | 10.88 | 2.00 | 0.38 | 1.13 | 0.42 |
| | 10m | 315.33 | 155.79 | 45.45 | 14.41 | 15.85 | 10.17 | 0.30 | 0.09 | 0.15 | 0.09 |
| | 15m | 178.54 | 90.67 | 28.93 | 16.21 | 1.75 | 1.93 | 0.49 | 0.27 | 0.27 | 0.30 |
| | 20m | 105.97 | 55.75 | 45.56 | 42.99 | 9.48 | 17.00 | 0.73 | 0.69 | 0.40 | 0.72 |
| | 30m | 42.61 | 23.80 | 10.74 | 25.21 | 3.03 | 12.75 | 0.70 | 1.63 | 0.37 | 1.55 |
| | 100m | 0.66 | 0.40 | 0.26 | 38.60 | 0.21 | 52.74 | 0.01 | 1.80 | 0.00 | 0.33 |
| 1. Obergeschoß | 5m | 608.81 | 311.03 | 380.59 | 62.51 | 57.48 | 18.48 | 2.46 | 0.40 | 1.47 | 0.47 |
| | 10m | 299.27 | 166.67 | 387.22 | 129.39 | 60.72 | 36.43 | 0.34 | 0.11 | 0.17 | 0.10 |
| | 15m | 163.23 | 95.67 | 95.91 | 58.76 | 6.01 | 6.29 | 0.79 | 0.48 | 0.39 | 0.40 |
| | 20m | 95.99 | 58.71 | 45.04 | 46.92 | 6.97 | 11.87 | 1.10 | 1.15 | 0.55 | 0.93 |
| | 30m | 38.46 | 25.10 | 14.68 | 38.18 | 2.81 | 11.19 | 1.05 | 2.73 | 0.50 | 1.98 |
| | 100m | 9.16 | 6.44 | 6.73 | 73.42 | 1.61 | 25.07 | 0.54 | 5.88 | 0.22 | 3.43 |
| 2. Obergeschoß | 5m | 663.25 | 323.62 | 1236.10 | 186.37 | 167.85 | 51.87 | 3.57 | 0.54 | 1.77 | 0.55 |
| | 10m | 292.70 | 165.51 | 260.88 | 89.13 | 49.22 | 29.74 | 0.40 | 0.14 | 0.17 | 0.10 |
| | 15m | 155.92 | 94.52 | 140.53 | 90.13 | 10.96 | 11.59 | 1.66 | 1.07 | 0.53 | 0.56 |
| | 20m | 91.64 | 58.25 | 72.75 | 79.39 | 7.39 | 12.69 | 2.17 | 2.37 | 0.71 | 1.22 |
| | 30m | 37.10 | 25.18 | 29.43 | 79.33 | 5.14 | 20.42 | 2.04 | 5.50 | 0.63 | 2.49 |
| | 100m | 8.97 | 6.55 | 9.69 | 107.99 | 3.26 | 49.73 | 1.06 | 11.80 | 0.27 | 4.16 |
| 3. Obergeschoß | 5m | 559.16 | 292.44 | 749.54 | 134.05 | 135.03 | 46.17 | 9.58 | 1.71 | 2.23 | 0.76 |
| | 10m | 265.28 | 153.87 | 283.67 | 106.93 | 41.47 | 26.95 | 1.88 | 0.71 | 0.15 | 0.10 |
| | 15m | 143.53 | 89.16 | 156.94 | 109.34 | 15.38 | 17.25 | 6.04 | 4.21 | 0.78 | 0.87 |
| | 20m | 85.47 | 55.66 | 116.42 | 136.21 | 12.75 | 22.91 | 7.16 | 8.38 | 0.99 | 1.77 |
| | 30m | 35.42 | 24.57 | 50.32 | 142.08 | 7.52 | 30.63 | 6.10 | 17.21 | 0.83 | 3.37 |
| | 100m | 8.80 | 6.54 | 10.83 | 123.09 | 4.18 | 63.82 | 2.76 | 31.36 | 0.34 | 5.21 |
| | | 0.63 | 0.48 | 2.95 | 469.76 | 1.03 | 214.51 | 0.11 | 18.00 | 0.00 | 0.91 |

Tabelle 9: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Tonnenmast

| Tonnenmast maximaler Betrag elektrische Feldstärke | | kein Gebäude (=100%) | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | |
|--|------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | max E | mean E | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} |
| | | in V/m | in V/m | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % |
| Erdgeschoß | 5m | 651.04 | 208.25 | 328.43 | 50.45 | 44.94 | 21.58 | 3.65 | 0.56 | 2.08 | 1.00 |
| | 10m | 157.65 | 47.83 | 305.97 | 194.08 | 67.41 | 140.94 | 2.80 | 1.78 | 1.59 | 3.33 |
| | 15m | 24.85 | 21.48 | 33.33 | 134.11 | 6.04 | 28.11 | 2.03 | 8.16 | 1.14 | 5.30 |
| | 20m | 26.26 | 20.76 | 13.64 | 51.94 | 4.18 | 20.12 | 1.50 | 5.70 | 0.83 | 4.00 |
| | 30m | 22.89 | 14.43 | 6.17 | 26.97 | 2.09 | 14.47 | 0.95 | 4.17 | 0.51 | 3.56 |
| | 100m | 8.42 | 5.29 | 1.21 | 14.35 | 0.79 | 14.93 | 0.46 | 5.48 | 0.23 | 4.41 |
| 1. Obergeschoß | 5m | 828.94 | 291.68 | 783.20 | 94.48 | 79.01 | 27.09 | 5.11 | 0.62 | 2.84 | 0.97 |
| | 10m | 208.78 | 81.71 | 259.97 | 124.52 | 72.68 | 88.95 | 3.85 | 1.84 | 2.16 | 2.64 |
| | 15m | 60.77 | 36.11 | 52.35 | 86.15 | 9.75 | 27.00 | 2.81 | 4.63 | 1.54 | 4.25 |
| | 20m | 33.56 | 25.33 | 4.38 | 13.04 | 2.23 | 8.82 | 2.10 | 6.26 | 1.11 | 4.40 |
| | 30m | 21.24 | 15.53 | 5.03 | 23.70 | 1.57 | 10.11 | 1.38 | 6.48 | 0.69 | 4.42 |
| | 100m | 7.55 | 5.58 | 2.15 | 28.48 | 0.99 | 17.70 | 0.70 | 9.30 | 0.31 | 5.50 |
| 2. Obergeschoß | 5m | 1069.84 | 367.53 | 726.42 | 67.90 | 81.70 | 22.23 | 9.22 | 0.86 | 3.68 | 1.00 |
| | 10m | 263.50 | 111.71 | 191.13 | 72.53 | 75.82 | 67.87 | 6.75 | 2.56 | 2.77 | 2.48 |
| | 15m | 90.17 | 49.93 | 28.91 | 32.06 | 9.52 | 19.06 | 4.98 | 5.52 | 1.95 | 3.91 |
| | 20m | 44.91 | 30.38 | 23.57 | 52.50 | 4.76 | 15.65 | 3.82 | 8.50 | 1.41 | 4.63 |
| | 30m | 22.01 | 16.27 | 9.49 | 43.14 | 2.12 | 13.05 | 2.57 | 11.70 | 0.86 | 5.26 |
| | 100m | 7.42 | 5.69 | 4.33 | 58.33 | 1.44 | 25.35 | 1.35 | 18.18 | 0.38 | 6.59 |
| 3. Obergeschoß | 5m | 1040.63 | 380.17 | 421.47 | 40.50 | 73.99 | 19.46 | 32.40 | 3.11 | 5.20 | 1.37 |
| | 10m | 286.50 | 128.84 | 384.34 | 134.15 | 87.43 | 67.86 | 22.67 | 7.91 | 3.84 | 2.98 |
| | 15m | 108.31 | 59.50 | 71.61 | 66.11 | 9.54 | 16.03 | 16.02 | 14.79 | 2.67 | 4.48 |
| | 20m | 53.43 | 34.35 | 61.20 | 114.54 | 7.70 | 22.41 | 12.34 | 23.09 | 1.89 | 5.49 |
| | 30m | 22.89 | 16.77 | 31.35 | 136.96 | 4.42 | 26.32 | 7.77 | 33.93 | 1.11 | 6.62 |
| | 100m | 7.33 | 5.70 | 11.64 | 158.75 | 2.27 | 39.72 | 3.56 | 48.60 | 0.46 | 8.13 |
| | | 0.92 | 0.76 | 2.48 | 269.92 | 0.72 | 94.85 | 0.61 | 66.35 | 0.07 | 8.89 |

Tabelle 10: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter

| Gleisanlage maximaler Betrag elektrische Feldstärke | | kein Gebäude (=100%) | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | |
|---|------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | max E | mean E | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} |
| | | in V/m | in V/m | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % |
| Erdgeschoß | 5m | 418.52 | 260.95 | 208.50 | 49.82 | 17.22 | 6.60 | 5.64 | 1.35 | 2.00 | 0.76 |
| | 10m | 246.89 | 164.91 | 108.15 | 43.80 | 9.56 | 5.80 | 6.32 | 2.56 | 2.23 | 1.35 |
| | 15m | 158.17 | 111.77 | 60.60 | 38.31 | 5.96 | 5.33 | 6.33 | 4.00 | 2.14 | 1.91 |
| | 20m | 108.28 | 80.06 | 36.69 | 33.88 | 4.04 | 5.05 | 6.00 | 5.54 | 1.88 | 2.35 |
| | 30m | 58.75 | 46.38 | 16.20 | 27.58 | 2.24 | 4.84 | 4.99 | 8.49 | 1.37 | 2.95 |
| | 50m | 24.71 | 21.02 | 5.43 | 21.99 | 0.97 | 4.62 | 3.20 | 12.94 | 0.70 | 3.35 |
| | 100m | 6.89 | 6.31 | 1.30 | 18.87 | 0.22 | 3.44 | 1.30 | 18.89 | 0.16 | 2.57 |
| 1. Obergeschoß | 5m | 409.06 | 247.86 | 348.59 | 85.22 | 23.80 | 9.60 | 10.07 | 2.46 | 2.57 | 1.04 |
| | 10m | 232.34 | 155.85 | 171.03 | 73.61 | 11.81 | 7.58 | 11.21 | 4.83 | 2.87 | 1.84 |
| | 15m | 149.50 | 106.60 | 97.15 | 64.98 | 7.21 | 6.77 | 11.24 | 7.52 | 2.74 | 2.57 |
| | 20m | 103.43 | 77.09 | 60.32 | 58.32 | 4.91 | 6.36 | 10.69 | 10.33 | 2.40 | 3.11 |
| | 30m | 57.06 | 45.26 | 27.94 | 48.96 | 2.73 | 6.04 | 8.89 | 15.58 | 1.73 | 3.83 |
| | 50m | 24.38 | 20.75 | 9.38 | 38.49 | 1.17 | 5.64 | 5.69 | 23.33 | 0.89 | 4.28 |
| | 100m | 6.86 | 6.28 | 2.22 | 32.38 | 0.28 | 4.44 | 2.23 | 32.47 | 0.22 | 3.47 |
| 2. Obergeschoß | 5m | 351.79 | 219.38 | 380.39 | 108.13 | 26.34 | 12.01 | 18.80 | 5.35 | 3.01 | 1.37 |
| | 10m | 206.85 | 141.82 | 199.43 | 96.41 | 13.85 | 9.76 | 21.03 | 10.17 | 3.35 | 2.36 |
| | 15m | 136.54 | 99.07 | 121.17 | 88.75 | 8.86 | 8.94 | 20.78 | 15.22 | 3.17 | 3.20 |
| | 20m | 96.37 | 72.79 | 79.38 | 82.38 | 6.14 | 8.44 | 19.34 | 20.07 | 2.74 | 3.76 |
| | 30m | 54.58 | 43.62 | 39.37 | 72.13 | 3.43 | 7.87 | 15.54 | 28.47 | 1.94 | 4.45 |
| | 50m | 23.87 | 20.38 | 14.08 | 59.01 | 1.46 | 7.18 | 9.48 | 39.74 | 0.96 | 4.73 |
| | 100m | 6.82 | 6.25 | 3.48 | 51.10 | 0.32 | 5.17 | 3.49 | 51.14 | 0.21 | 3.31 |
| 3. Obergeschoß | 5m | 270.63 | 182.17 | 319.93 | 118.22 | 28.65 | 15.73 | 36.91 | 13.64 | 3.44 | 1.89 |
| | 10m | 174.77 | 124.63 | 212.50 | 121.59 | 19.02 | 15.26 | 41.10 | 23.52 | 3.84 | 3.08 |
| | 15m | 120.84 | 89.92 | 145.78 | 120.64 | 13.66 | 15.19 | 39.35 | 32.56 | 3.58 | 3.98 |
| | 20m | 87.80 | 67.51 | 103.63 | 118.02 | 10.04 | 14.86 | 35.02 | 39.89 | 3.05 | 4.52 |
| | 30m | 51.50 | 41.55 | 57.03 | 110.75 | 5.90 | 14.21 | 26.36 | 51.18 | 2.11 | 5.09 |
| | 50m | 23.20 | 19.88 | 23.83 | 102.69 | 2.53 | 12.74 | 14.84 | 63.96 | 1.02 | 5.14 |
| | 100m | 6.76 | 6.20 | 6.18 | 91.44 | 0.60 | 9.62 | 4.91 | 72.60 | 0.22 | 3.54 |

Tabelle 11: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage mit Rückleiter

| Gleisanlage RL maximaler Betrag elektrische Feldstärke | | kein Gebäude (=100%) | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | |
|--|------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | max E | mean E | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} |
| | | in V/m | in V/m | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % |
| Erdgeschoß | 5m | 288.26 | 178.28 | 167.15 | 57.99 | 13.59 | 7.62 | 4.95 | 1.72 | 1.75 | 0.98 |
| | 10m | 168.09 | 113.92 | 76.32 | 45.40 | 6.87 | 6.03 | 5.16 | 3.07 | 1.83 | 1.60 |
| | 15m | 109.52 | 78.58 | 41.49 | 37.88 | 4.24 | 5.40 | 5.00 | 4.56 | 1.69 | 2.15 |
| | 20m | 76.32 | 57.17 | 26.67 | 34.94 | 2.89 | 5.06 | 4.66 | 6.11 | 1.46 | 2.56 |
| | 30m | 42.55 | 33.88 | 12.14 | 28.54 | 1.64 | 4.84 | 3.84 | 9.01 | 1.06 | 3.11 |
| | 50m | 18.42 | 15.73 | 3.88 | 21.05 | 0.72 | 4.59 | 2.46 | 13.34 | 0.54 | 3.44 |
| | 100m | 5.29 | 4.85 | 1.01 | 19.05 | 0.17 | 3.45 | 1.01 | 19.07 | 0.13 | 2.60 |
| 1. Obergeschoß | 5m | 253.01 | 162.68 | 246.66 | 97.49 | 16.64 | 10.23 | 8.82 | 3.49 | 2.25 | 1.39 |
| | 10m | 154.87 | 107.03 | 116.50 | 75.23 | 8.17 | 7.63 | 9.15 | 5.91 | 2.35 | 2.19 |
| | 15m | 103.31 | 75.04 | 66.31 | 64.19 | 5.10 | 6.79 | 8.88 | 8.60 | 2.17 | 2.89 |
| | 20m | 73.03 | 55.17 | 40.52 | 55.48 | 3.50 | 6.35 | 8.31 | 11.38 | 1.87 | 3.38 |
| | 30m | 41.41 | 33.12 | 19.27 | 46.55 | 2.00 | 6.04 | 6.84 | 16.52 | 1.34 | 4.03 |
| | 50m | 18.19 | 15.55 | 7.01 | 38.52 | 0.88 | 5.69 | 4.37 | 24.03 | 0.68 | 4.39 |
| | 100m | 5.27 | 4.82 | 1.72 | 32.69 | 0.21 | 4.45 | 1.73 | 32.79 | 0.17 | 3.50 |
| 2. Obergeschoß | 5m | 203.51 | 141.93 | 248.21 | 121.97 | 17.23 | 12.14 | 16.47 | 8.09 | 2.64 | 1.86 |
| | 10m | 137.42 | 97.68 | 135.02 | 98.26 | 9.54 | 9.77 | 17.15 | 12.48 | 2.74 | 2.81 |
| | 15m | 94.74 | 70.06 | 83.52 | 88.16 | 6.27 | 8.95 | 16.40 | 17.32 | 2.51 | 3.58 |
| | 20m | 68.37 | 52.31 | 57.44 | 84.02 | 4.40 | 8.40 | 15.03 | 21.99 | 2.13 | 4.08 |
| | 30m | 39.73 | 32.00 | 29.26 | 73.64 | 2.50 | 7.82 | 11.95 | 30.07 | 1.50 | 4.67 |
| | 50m | 17.83 | 15.28 | 10.65 | 59.74 | 1.09 | 7.11 | 7.29 | 40.88 | 0.74 | 4.85 |
| | 100m | 5.23 | 4.80 | 2.70 | 51.58 | 0.25 | 5.18 | 2.70 | 51.63 | 0.16 | 3.34 |
| 3. Obergeschoß | 5m | 177.95 | 123.49 | 238.20 | 133.86 | 21.42 | 17.35 | 32.32 | 18.17 | 3.02 | 2.44 |
| | 10m | 119.29 | 87.16 | 150.88 | 126.49 | 13.80 | 15.83 | 33.52 | 28.10 | 3.13 | 3.60 |
| | 15m | 84.89 | 64.15 | 103.46 | 121.87 | 9.92 | 15.46 | 31.06 | 36.58 | 2.83 | 4.42 |
| | 20m | 62.79 | 48.81 | 78.34 | 124.75 | 7.25 | 14.85 | 27.22 | 43.36 | 2.38 | 4.87 |
| | 30m | 37.65 | 30.59 | 43.89 | 116.59 | 4.29 | 14.02 | 20.26 | 53.83 | 1.63 | 5.32 |
| | 50m | 17.36 | 14.93 | 17.22 | 99.20 | 1.90 | 12.71 | 11.40 | 65.70 | 0.79 | 5.27 |
| | 100m | 5.19 | 4.76 | 4.73 | 91.18 | 0.46 | 9.61 | 3.80 | 73.27 | 0.17 | 3.57 |

Tabelle 12: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage mit Verstärkungsleiter

| Gleisanlage VL maximaler Betrag elektrische Feldstärke | | kein Gebäude (=100%) | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | |
|--|------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | max E | mean E | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} |
| | | in V/m | in V/m | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % |
| Erdgeschoß | 5m | 612.24 | 392.43 | 284.22 | 46.42 | 24.32 | 6.20 | 7.99 | 1.30 | 2.82 | 0.72 |
| | 10m | 374.27 | 250.91 | 161.70 | 43.20 | 14.37 | 5.73 | 9.11 | 2.43 | 3.22 | 1.28 |
| | 15m | 241.01 | 169.79 | 92.96 | 38.57 | 9.04 | 5.32 | 9.15 | 3.80 | 3.09 | 1.82 |
| | 20m | 164.46 | 121.01 | 56.51 | 34.36 | 6.11 | 5.05 | 8.68 | 5.28 | 2.72 | 2.25 |
| | 30m | 88.25 | 69.34 | 24.72 | 28.01 | 3.34 | 4.81 | 7.21 | 8.17 | 1.99 | 2.86 |
| | 50m | 36.46 | 30.92 | 8.11 | 22.23 | 1.42 | 4.58 | 4.46 | 12.22 | 1.05 | 3.39 |
| | 100m | 9.97 | 9.12 | 1.85 | 18.59 | 0.32 | 3.49 | 1.86 | 18.62 | 0.24 | 2.63 |
| 1. Obergeschoß | 5m | 642.33 | 385.92 | 544.45 | 84.76 | 37.85 | 9.81 | 14.24 | 2.22 | 3.63 | 0.94 |
| | 10m | 360.94 | 239.79 | 267.87 | 74.22 | 18.49 | 7.71 | 16.16 | 4.48 | 4.14 | 1.73 |
| | 15m | 229.60 | 162.47 | 151.12 | 65.82 | 11.09 | 6.82 | 16.26 | 7.08 | 3.96 | 2.44 |
| | 20m | 157.44 | 116.60 | 93.17 | 59.18 | 7.44 | 6.38 | 15.46 | 9.82 | 3.47 | 2.98 |
| | 30m | 85.69 | 67.63 | 42.56 | 49.67 | 4.07 | 6.01 | 12.85 | 15.00 | 2.51 | 3.72 |
| | 50m | 35.95 | 30.52 | 13.97 | 38.87 | 1.71 | 5.61 | 7.98 | 22.19 | 1.30 | 4.25 |
| | 100m | 9.93 | 9.07 | 3.15 | 31.78 | 0.41 | 4.51 | 3.16 | 31.88 | 0.32 | 3.55 |
| 2. Obergeschoß | 5m | 605.01 | 354.39 | 697.31 | 115.26 | 48.80 | 13.77 | 26.83 | 4.43 | 4.25 | 1.20 |
| | 10m | 328.63 | 220.30 | 326.36 | 99.31 | 22.37 | 10.15 | 30.66 | 9.33 | 4.82 | 2.19 |
| | 15m | 211.09 | 151.35 | 190.86 | 90.42 | 13.72 | 9.06 | 30.42 | 14.41 | 4.57 | 3.02 |
| | 20m | 146.92 | 110.09 | 122.79 | 83.57 | 9.33 | 8.48 | 28.34 | 19.29 | 3.96 | 3.60 |
| | 30m | 81.91 | 65.12 | 60.01 | 73.27 | 5.13 | 7.88 | 22.79 | 27.83 | 2.81 | 4.32 |
| | 50m | 35.18 | 29.95 | 20.93 | 59.49 | 2.14 | 7.15 | 13.37 | 38.00 | 1.44 | 4.80 |
| | 100m | 9.86 | 9.02 | 5.18 | 52.54 | 0.48 | 5.37 | 5.18 | 52.58 | 0.31 | 3.49 |
| 3. Obergeschoß | 5m | 464.08 | 294.81 | 572.28 | 123.31 | 50.17 | 17.02 | 52.57 | 11.33 | 4.85 | 1.65 |
| | 10m | 278.83 | 193.90 | 345.54 | 123.93 | 30.25 | 15.60 | 59.74 | 21.43 | 5.51 | 2.84 |
| | 15m | 187.03 | 137.35 | 228.12 | 121.97 | 20.96 | 15.26 | 57.38 | 30.68 | 5.16 | 3.76 |
| | 20m | 133.80 | 102.01 | 159.27 | 119.04 | 15.15 | 14.85 | 51.10 | 38.19 | 4.40 | 4.31 |
| | 30m | 77.17 | 61.96 | 86.06 | 111.51 | 8.79 | 14.18 | 38.42 | 49.78 | 3.04 | 4.91 |
| | 50m | 34.18 | 29.21 | 35.28 | 103.22 | 3.72 | 12.73 | 20.83 | 60.94 | 1.50 | 5.15 |
| | 100m | 9.77 | 8.95 | 8.96 | 91.65 | 0.85 | 9.51 | 7.08 | 72.49 | 0.30 | 3.40 |

Tabelle 13: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter

| Gleisanlage VL+RL maximaler Betrag elektrische Feldstärke | | kein Gebäude (=100%) | | Baustahlplatte mit Fensteröffnungen | | | | Baustahlplatte ohne Fensteröffnungen | | | |
|---|------|----------------------|---------|-------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| | | max E | mean E | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} | max E | SF _{max} | mean E | SF _{mean} |
| | | in V/m | in V/m | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % | in V/m | in % |
| Erdgeschoß | 5m | 442.80 | 290.08 | 219.17 | 49.50 | 18.72 | 6.46 | 7.19 | 1.62 | 2.54 | 0.88 |
| | 10m | 278.00 | 190.24 | 116.08 | 41.76 | 10.68 | 5.61 | 7.85 | 2.82 | 2.77 | 1.46 |
| | 15m | 183.48 | 131.23 | 70.92 | 38.65 | 6.91 | 5.26 | 7.72 | 4.20 | 2.61 | 1.99 |
| | 20m | 127.45 | 94.83 | 43.83 | 34.39 | 4.78 | 5.04 | 7.24 | 5.68 | 2.27 | 2.40 |
| | 30m | 69.95 | 55.33 | 19.89 | 28.44 | 2.69 | 4.86 | 5.97 | 8.53 | 1.64 | 2.97 |
| | 50m | 29.51 | 25.10 | 6.54 | 22.15 | 1.16 | 4.62 | 3.81 | 12.90 | 0.84 | 3.36 |
| | 100m | 8.23 | 7.54 | 1.38 | 16.78 | 0.28 | 3.77 | 1.38 | 16.80 | 0.23 | 3.01 |
| 1. Obergeschoß | 5m | 441.31 | 282.14 | 386.83 | 87.65 | 26.81 | 9.50 | 12.83 | 2.91 | 3.28 | 1.16 |
| | 10m | 268.14 | 182.49 | 193.62 | 72.21 | 13.61 | 7.46 | 13.92 | 5.19 | 3.57 | 1.96 |
| | 15m | 175.62 | 126.09 | 111.43 | 63.45 | 8.46 | 6.71 | 13.70 | 7.80 | 3.34 | 2.65 |
| | 20m | 122.49 | 91.65 | 69.97 | 57.12 | 5.81 | 6.34 | 12.89 | 10.52 | 2.90 | 3.16 |
| | 30m | 68.06 | 54.04 | 32.83 | 48.25 | 3.26 | 6.03 | 10.63 | 15.62 | 2.08 | 3.85 |
| | 50m | 29.12 | 24.79 | 11.25 | 38.64 | 1.39 | 5.61 | 6.76 | 23.23 | 1.06 | 4.29 |
| | 100m | 8.20 | 7.50 | 2.46 | 30.00 | 0.34 | 4.58 | 2.47 | 30.08 | 0.28 | 3.73 |
| 2. Obergeschoß | 5m | 434.48 | 264.83 | 513.71 | 118.24 | 36.00 | 13.60 | 24.16 | 5.56 | 3.83 | 1.45 |
| | 10m | 248.24 | 169.52 | 237.30 | 95.60 | 16.84 | 9.93 | 26.40 | 10.64 | 4.16 | 2.45 |
| | 15m | 163.05 | 118.27 | 141.35 | 86.69 | 10.63 | 8.99 | 25.63 | 15.72 | 3.86 | 3.26 |
| | 20m | 115.03 | 86.93 | 92.36 | 80.29 | 7.37 | 8.47 | 23.62 | 20.53 | 3.31 | 3.80 |
| | 30m | 65.24 | 52.15 | 45.86 | 70.29 | 4.14 | 7.94 | 18.85 | 28.89 | 2.33 | 4.46 |
| | 50m | 28.51 | 24.34 | 16.82 | 59.00 | 1.75 | 7.21 | 11.48 | 40.26 | 1.15 | 4.74 |
| | 100m | 8.14 | 7.46 | 3.94 | 48.36 | 0.42 | 5.68 | 3.94 | 48.39 | 0.30 | 3.97 |
| 3. Obergeschoß | 5m | 363.90 | 229.47 | 474.06 | 130.27 | 41.23 | 17.97 | 47.35 | 13.01 | 4.37 | 1.91 |
| | 10m | 216.53 | 151.63 | 267.45 | 123.51 | 24.00 | 15.83 | 51.44 | 23.76 | 4.75 | 3.13 |
| | 15m | 146.42 | 108.29 | 185.09 | 126.42 | 16.67 | 15.40 | 48.34 | 33.02 | 4.36 | 4.02 |
| | 20m | 105.60 | 81.01 | 129.16 | 122.31 | 12.10 | 14.94 | 42.59 | 40.33 | 3.67 | 4.53 |
| | 30m | 61.70 | 49.76 | 70.90 | 114.91 | 7.07 | 14.20 | 31.77 | 51.49 | 2.52 | 5.07 |
| | 50m | 27.73 | 23.76 | 28.68 | 103.42 | 3.01 | 12.68 | 17.80 | 64.20 | 1.21 | 5.09 |
| | 100m | 8.07 | 7.40 | 7.17 | 88.83 | 0.75 | 10.07 | 5.61 | 69.55 | 0.29 | 3.99 |

Mit Hilfe der 336 durchgeführten Berechnungen konnten einige, für die Größe des Feldes im interessanten Bereich, bedeutsame Parameter identifiziert werden:

- Abstand zur Feldquelle
- Effekt von Öffnungen im Schirm
- Wahl des Schirmmaterials
- Bauart der Gleisanlage

In weiterer Folge wird auf die einzelnen Möglichkeiten zur Feldreduktion eingegangen.

5.2.3 Abstandsvergrößerung

Die bautechnisch einfachste und zuverlässigste Lösung, die Größe des elektrischen und magnetischen Feldes zu verringern, ist eine Vergrößerung des Abstands.

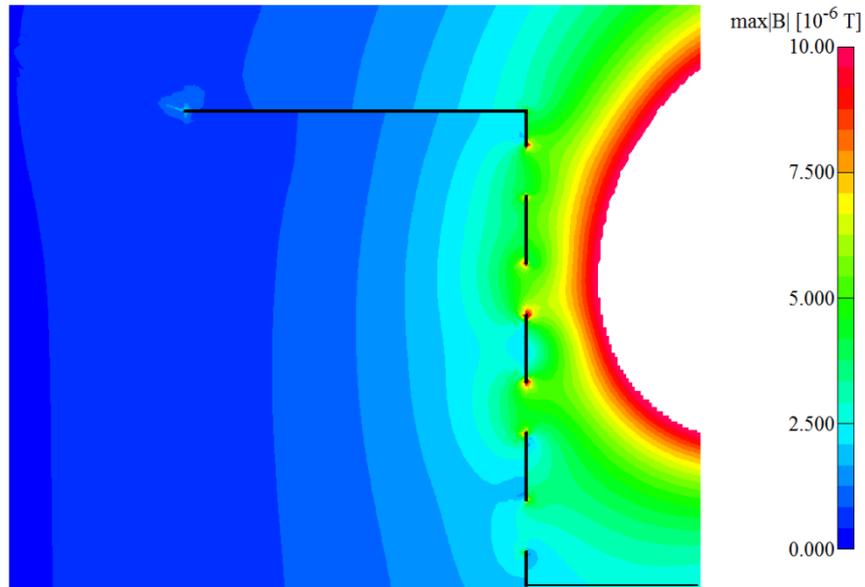


Abbildung 17: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 5 m Abstand - B-Feld

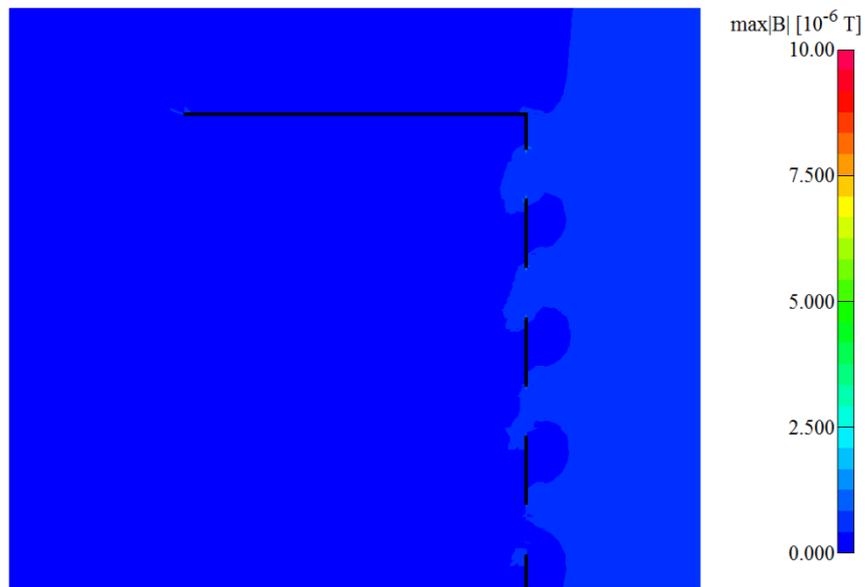


Abbildung 18: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 20 m Abstand - B-Feld

Abbildung 17 und Abbildung 18 stellen den Spitzenwert der magnetischen Flussdichte für eine Feldquelle Donaumast bei einem Gebäude mit Fenstern und Stahlschirmung dar.

Während der Abstand zur Feldquelle in Abbildung 17 $a=5$ m beträgt, sind es in Abbildung 18 $a=20$ m. Hier ist das Feld bei gleicher Farbskalierung kaum zu erkennen.

Abbildung 19 stellt die Abnahme des Feldes mit dem Abstand vom Gebäude in einem Diagramm dar. Man kann hier bereits gut die praktisch nicht vorhandene Schirmwirkung der Kombination Baustahl mit Fenster erkennen. Die Schirmung ist hierbei immer bei $x=10$ m angebracht. Werte von $x < 10$ m (im Diagramm links) befinden sich innerhalb des Gebäudes.

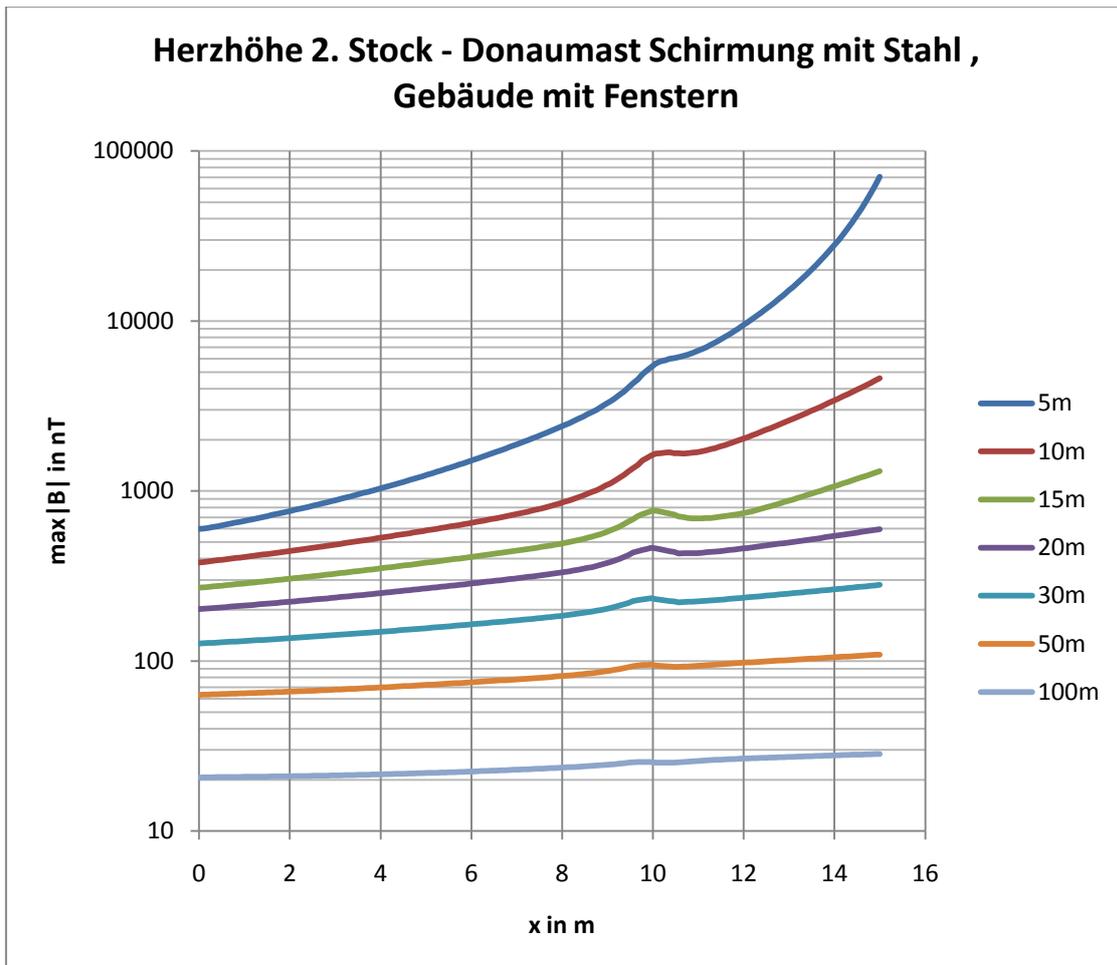


Abbildung 19: Gebäude mit Fenstern, Schirmung Baustahl, Donaumast, 2. Stock für verschiedene Abstände zur Feldquelle

Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen analog dazu die Verhältnisse für die elektrische Feldstärke. Die deutliche Feldverringeringung mit dem Abstand ist anhand der Feldbilder und im Diagramm gut zu erkennen. Hier ist weiters zu beachten, dass die Schirmung mit Baustahl gegenüber elektrischen Feldern deutlich besser funktioniert. Hierfür ist vor allem die gute Leitfähigkeit von Metall verantwortlich. Zum elektrischen Feld kann gesagt werden, dass die Gebäudehülle selbst auch einen großen Teil der elektrischen Felder schirmen kann, solange die Fenster des Gebäudes geschlossen bleiben.

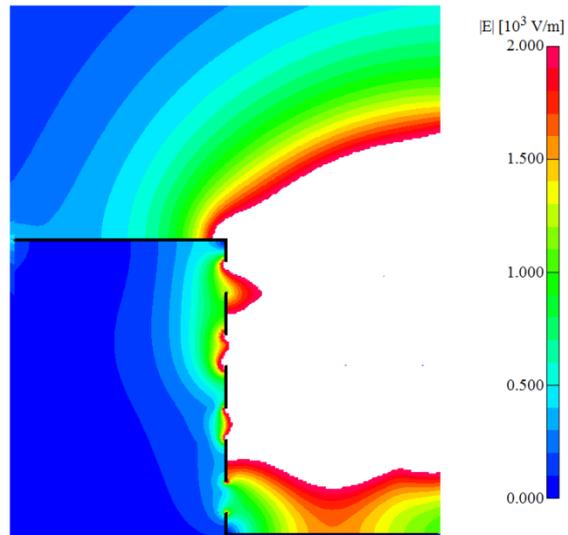


Abbildung 20: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 5 m Abstand - E-Feld

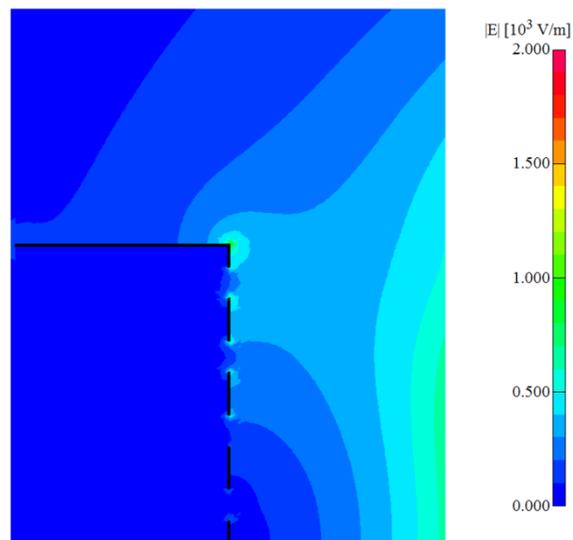


Abbildung 21: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 20 m Abstand - E-Feld

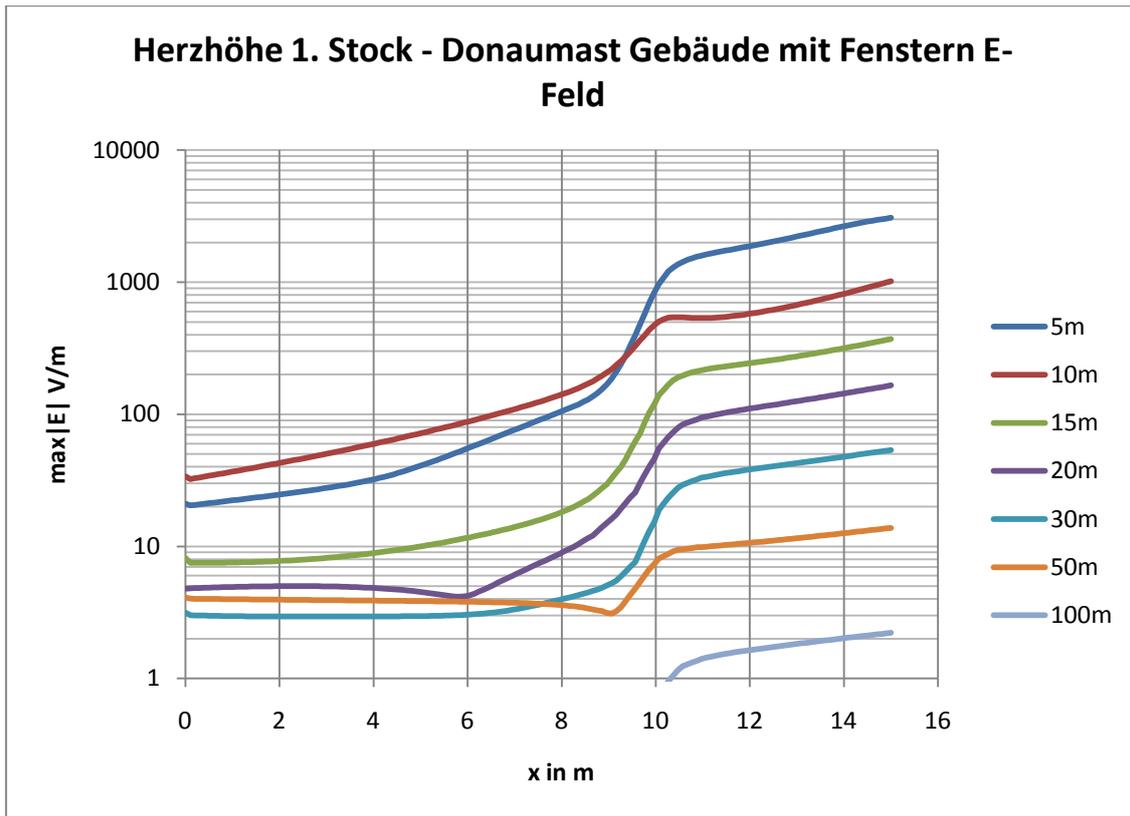


Abbildung 22: Gebäude mit Fenstern, Schirmung Baustahl, Donaumast, 1. Stock für verschiedene Abstände zur Feldquelle

5.2.4 Effekt der Fenster

Für eine effektive Schirmung wäre es das Beste, wenn die gesamte Gebäudefront geschlossen wäre. In der Praxis ist ein derartiges fensterloses Gebäude kaum denkbar.

Abbildung 23 und Abbildung 24 stellen vergleichend eine vollflächige Schirmung mit hochpermeablen Blech einer Schirmung mit Fensteröffnungen gegenüber. Durch diese Öffnungen ist der Schirmeffekt praktisch nicht mehr gegeben. In Abbildung 24 erkennt man ein weiteres Phänomen:

Da an der feldquellenabgewandten (im Diagramm linken) Seite des Gebäudes keine Schirmbleche angebracht sind, dringt das Feld von dieser Seite wieder ins Gebäude ein. Dies führt dazu, dass an dieser Stelle das Feld höher ist als im (strichliert dargestellten) ungeschirmten Fall.

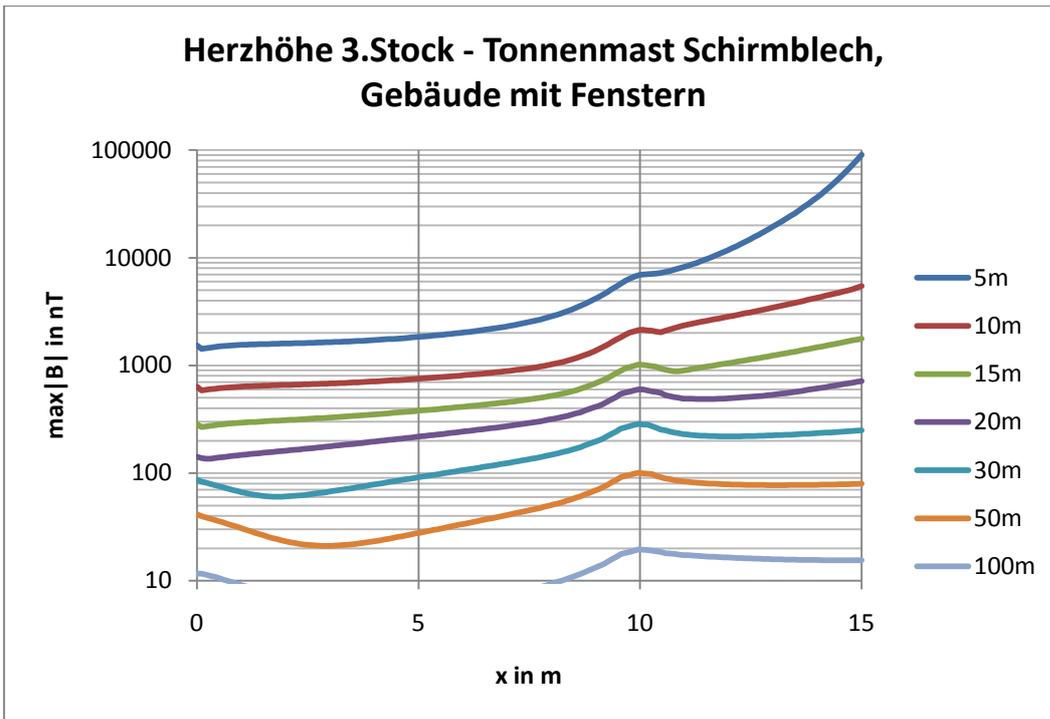


Abbildung 23: Gebäude mit Fenstern, Schirmblech, Tonnenmast, 3. Stock für verschiedene Abstände zur Feldquelle

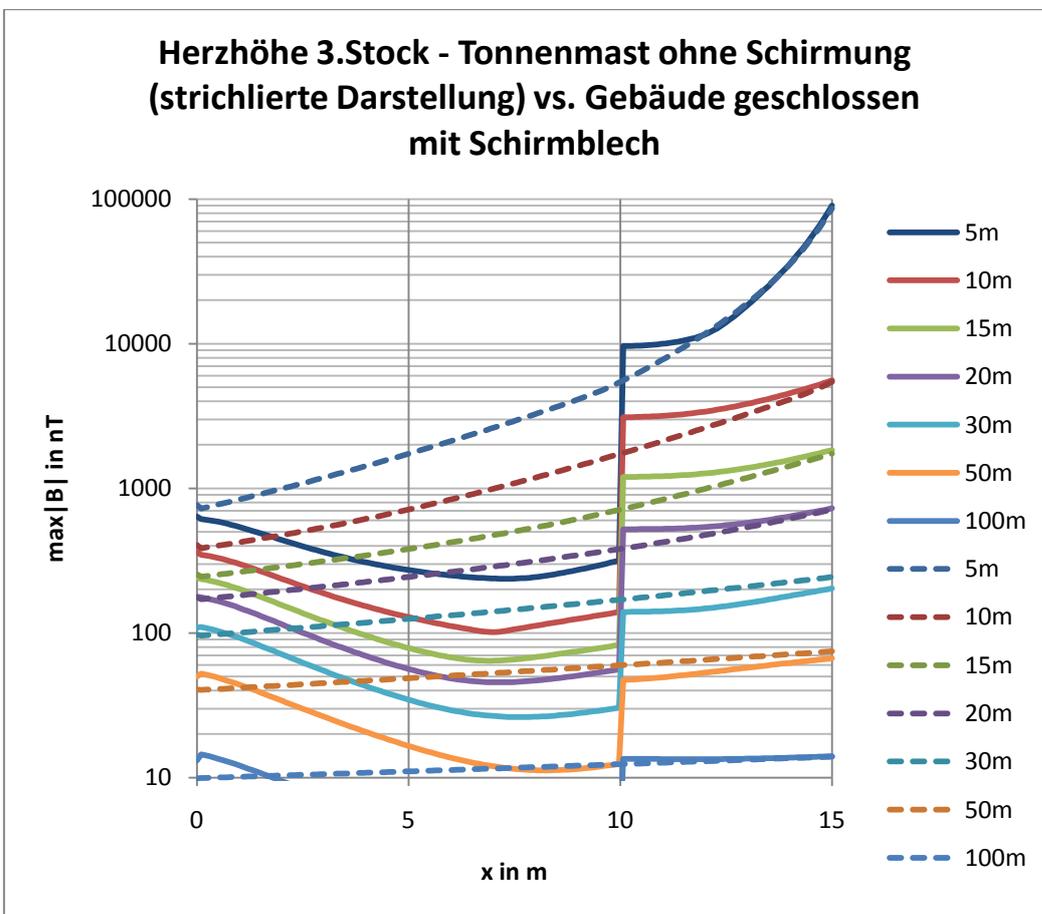


Abbildung 24: Tonnenmast 3. Stock B-Feld - Schirmblech ohne Fenster vs. ohne Schirmung für verschiedene Abstände zur Feldquelle

Abbildung 25 verdeutlicht noch einmal den Effekt, der durch die Berücksichtigung der Fensteröffnungen entsteht: Das Feld im Inneren des Gebäudes ist zwar *anders* als das Feld ohne Schirmung, man kann aber keine Schirmwirkung mehr erkennen.

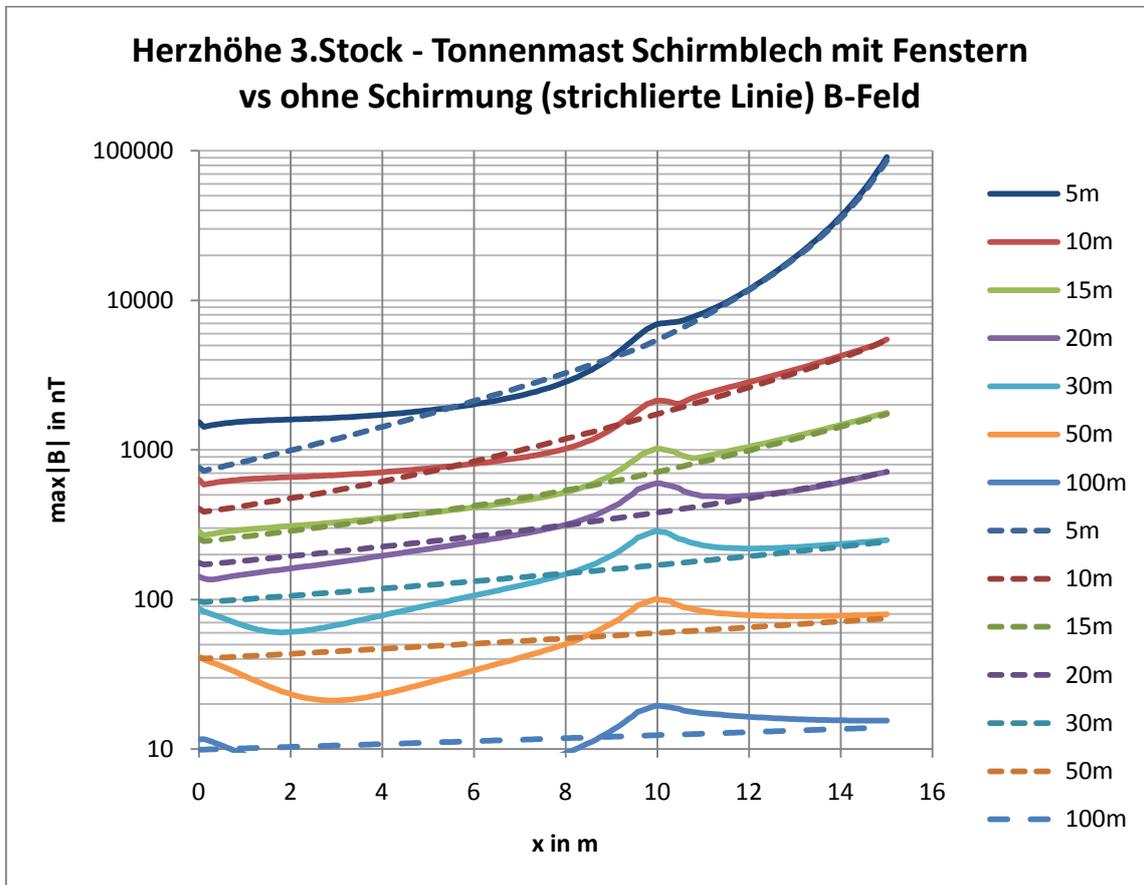


Abbildung 25: Tonnenmast 3. Stock B-Feld - Schirmblech mit Fenstern vs. ohne Schirmung für verschiedene Abstände zur Feldquelle

Vergleicht man den Effekt des Fensters beim elektrischen Feld, zeigt sich ein ähnliches Bild. Abbildung 26 stellt einen derartigen Fall dar. Hier ist die Feldstärke zwar im geschirmten Fall deutlich geringer, ein ausgeprägter Schirmeffekt kann aber nicht festgestellt werden.

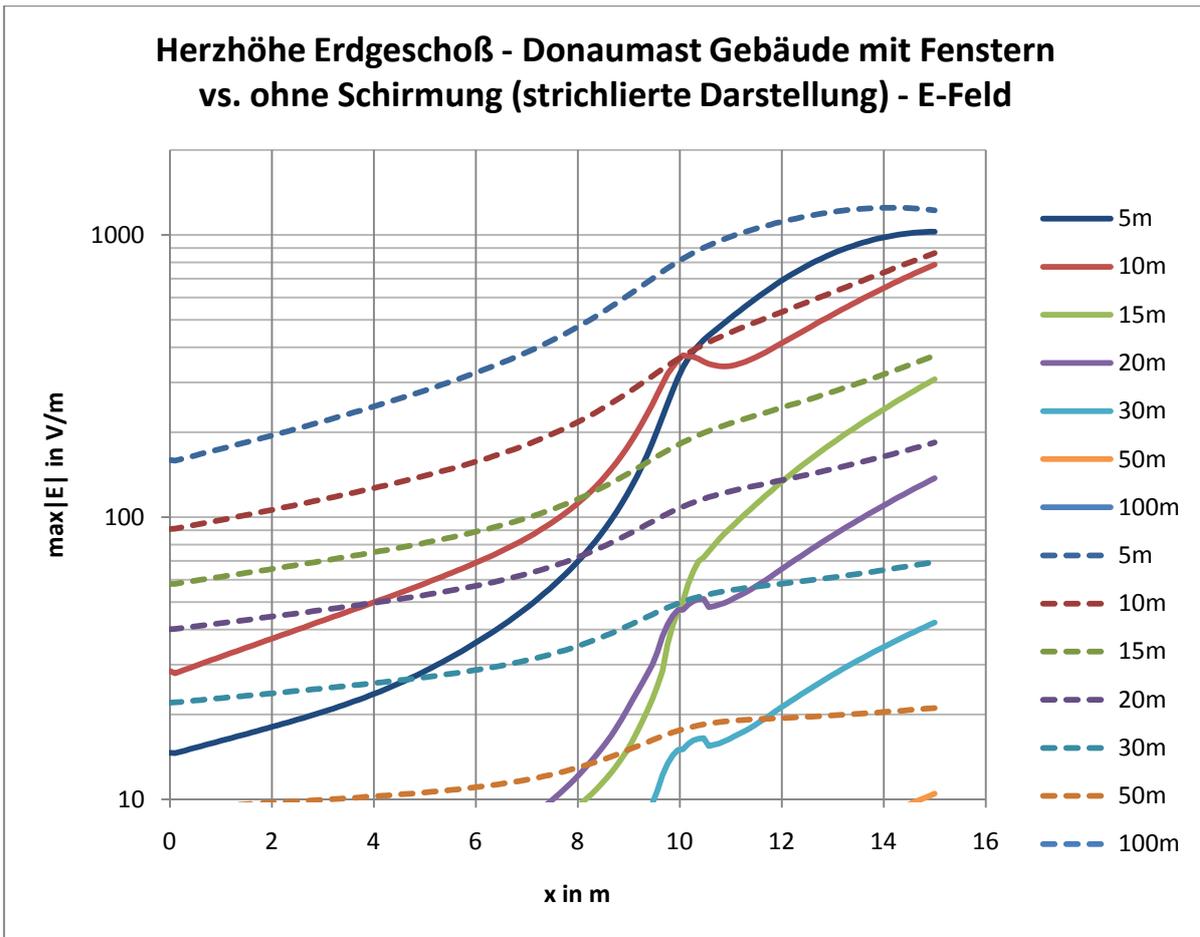


Abbildung 26: Donaumast Erdgeschoß E-Feld, Gebäude mit Fenstern vs. ohne Gebäude für verschiedene Abstände zur Feldquelle

5.2.5 Wahl des Schirmmaterials

Als Schirmvarianten wurden eine 5 cm dicke Metallplatte (auch Stahlschirmung genannt) mit $\mu_R=50$ und ein 3 mm dickes hochpermeables Blech mit $\mu_R=50000$ (auch Schirmblech genannt) verwendet.

Das Ergebnis und die Unterschiede stellen Abbildung 27 und

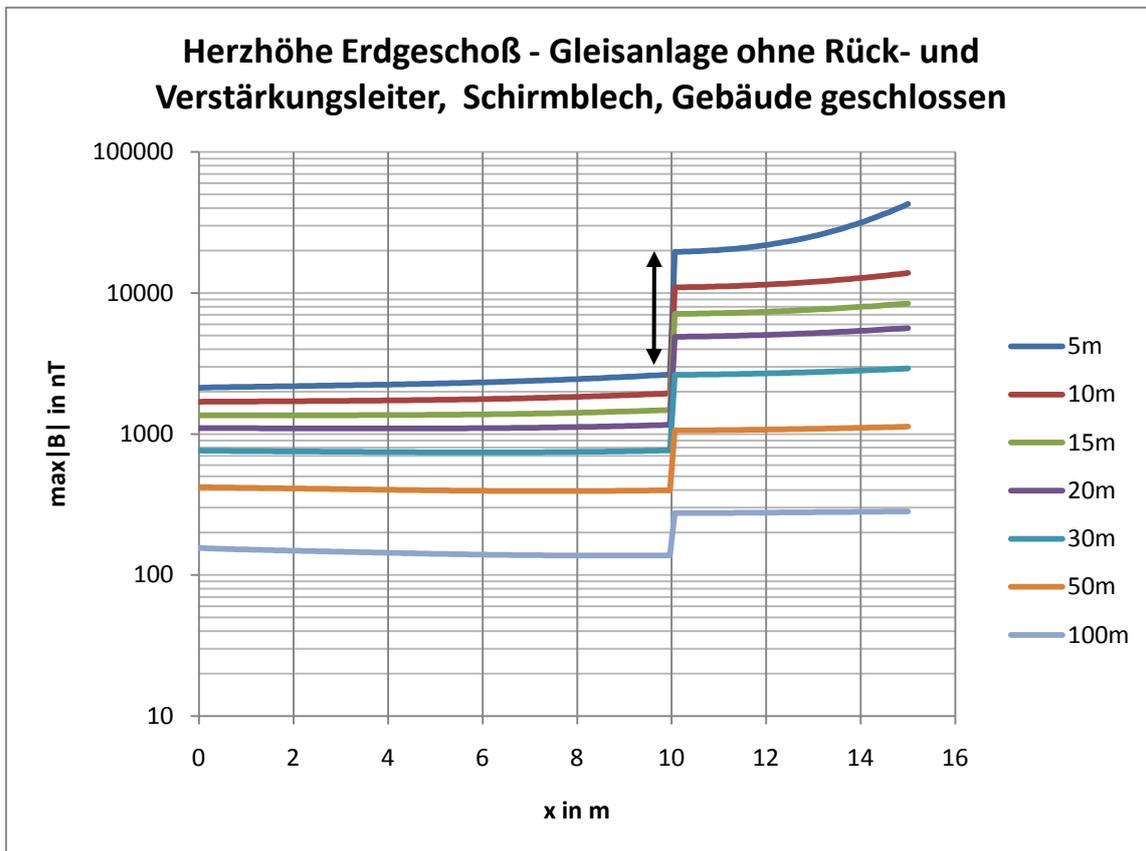


Abbildung 28 dar. Als Feldquelle wurde eine Gleisanlage ohne Verstärkungs- und Rückleiter gewählt.

Während sich der Schirmfaktor für die Metallplatte in der Größenordnung von <2 bewegt (siehe Pfeil in Abbildung 27), erreicht das Schirmblech Werte in der Größenordnung von 10 (siehe Doppelpfeil in Abbildung 28).

Für das elektrische Feld sind beide Schirmvarianten aufgrund der guten Leitfähigkeit von Metall gleichwertig.

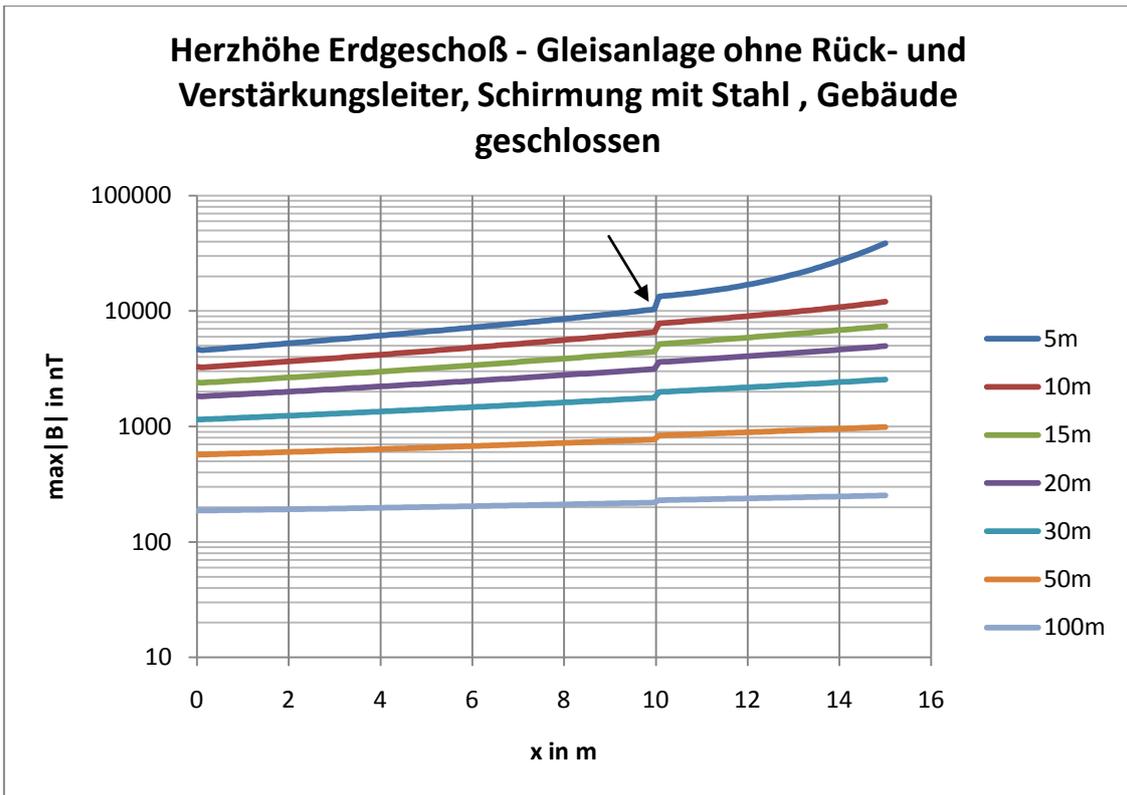


Abbildung 27: Gleisanlage ohne Verstärkungs- und Rückleiter - geschlossenes Gebäude Stahlplatte - B-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle

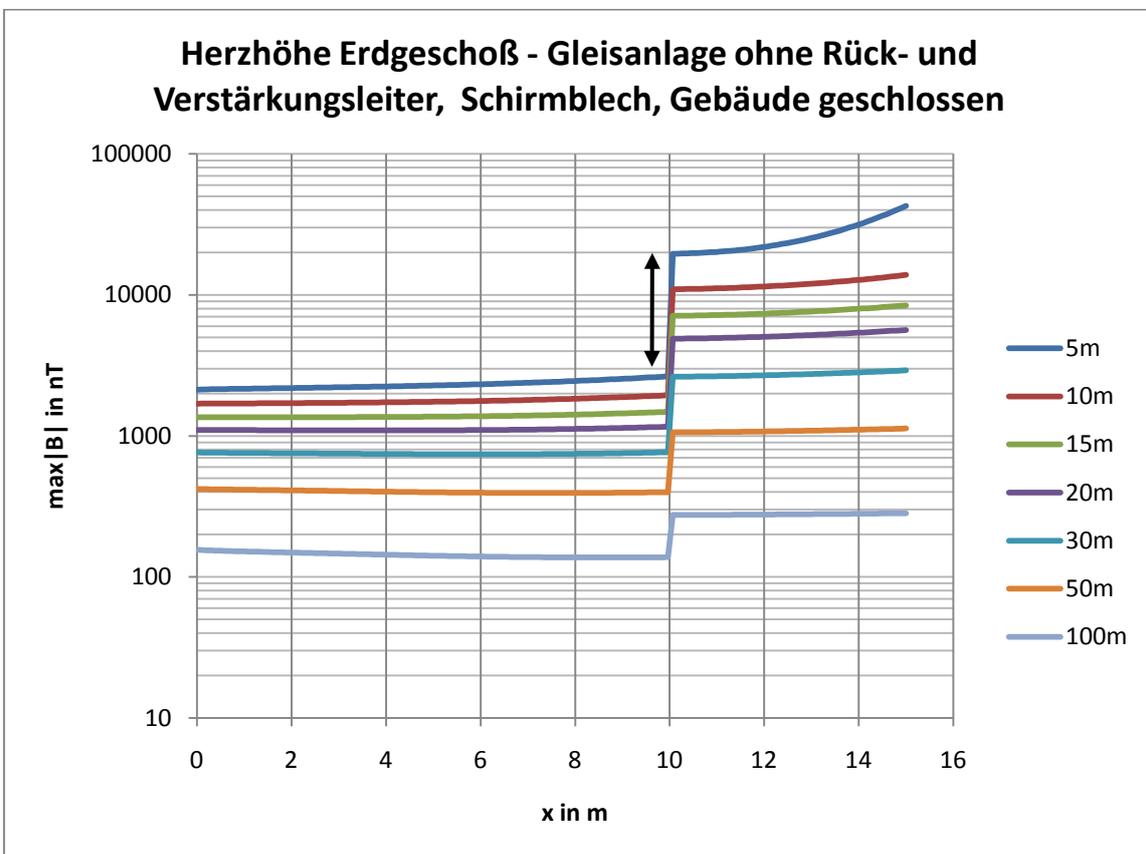


Abbildung 28: Gleisanlage ohne Verstärkungs- und Rückleiter - geschlossenes Gebäude Schirmblech - B-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle

5.2.6 Ausführung der Gleisanlage

Bei der Gleisanlage gibt es 4 mögliche Ausführungsformen.

- Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter
- Gleisanlage mit Verstärkungsleiter
- Gleisanlage mit Rückleiter
- Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter

Abbildung 29 stellt eine Gleisanlage mit und eine Gleisanlage ohne Rückleiter gegenüber. Man erkennt, dass der Rückleiter die magnetische Flussdichte um etwa einen Faktor 2 verringert (siehe Doppelpfeil in Abbildung 29). Einen weitaus geringeren Effekt hat der Rückleiter auf die elektrische Feldstärke (Abbildung 30).

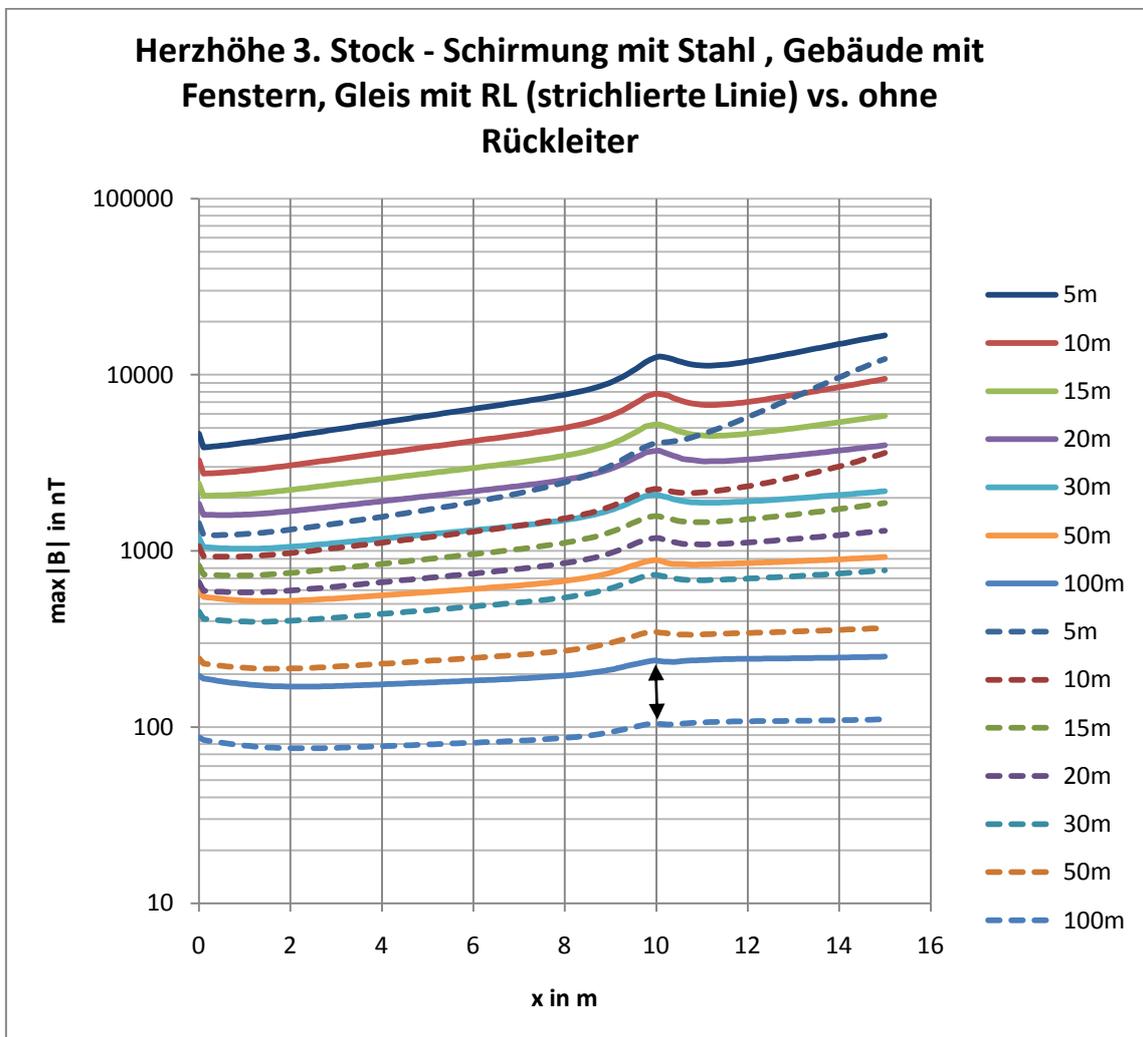


Abbildung 29: Darstellung des Effekts eines Rückleiters bei einer Gleisanlage – B-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle

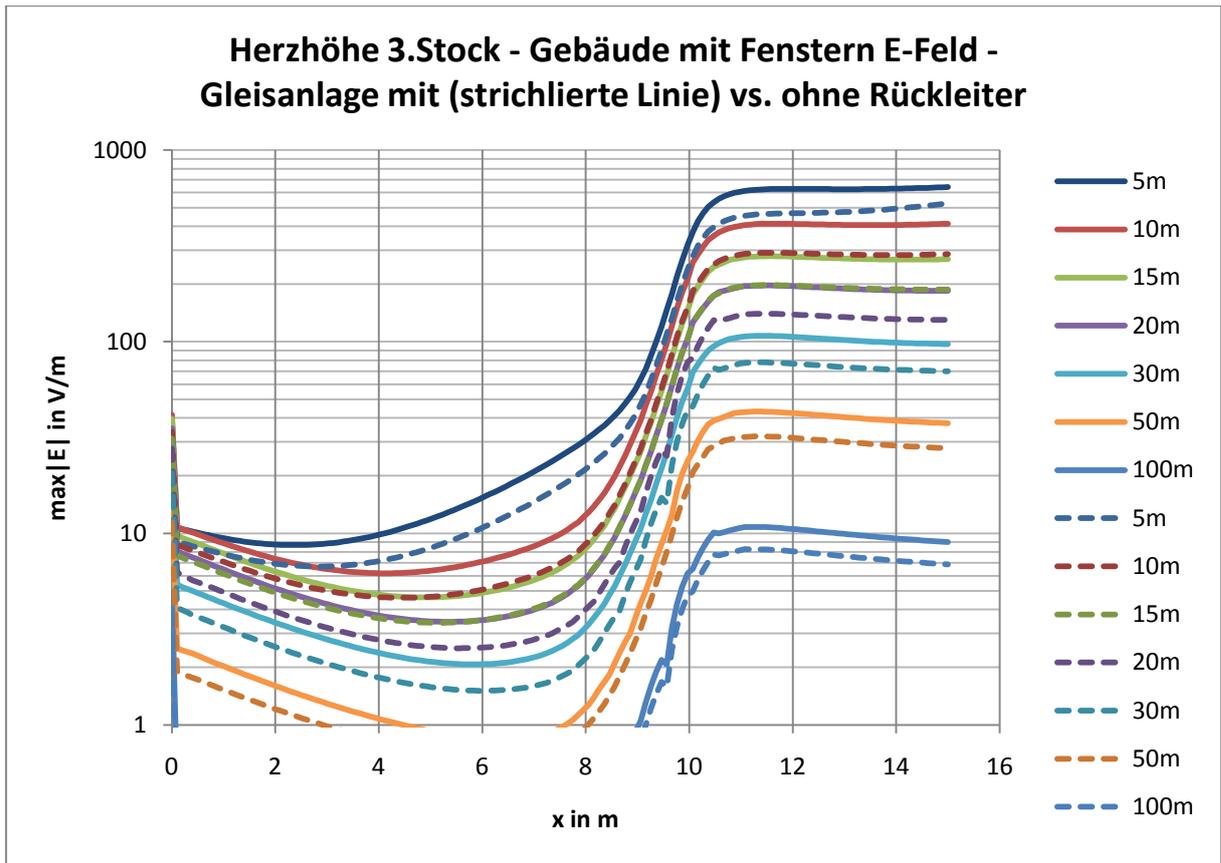


Abbildung 30: Darstellung des Effekts eines Rückleiters bei einer Gleisanlage – E-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle

6 Diskussion

Die vorliegende Arbeit kann einige Antworten für die Krankenhausplanung liefern und weist die Richtung für weitere Beschäftigung mit diesem Thema. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse aufgeführt:

6.1 Grenzwerte

6.1.1 Grenzwertfindung

Die Suche nach Grenzwerten für die Exposition mit elektrischen und magnetischen Feldern gestaltete sich schwieriger als erwartet.

Allgemein kann gesagt werden, dass der Hinweis auf mögliche Beeinträchtigungen von medizinischen elektrischen Geräten zwar an vielen Stellen enthalten ist, Grenzwertangaben fehlen jedoch zum größten Teil.

Neben den einschlägigen Normen *ÖVE/ÖNORM E 8007:2007* (5), *EN 45502-1:1997* (3), *EN 45502-2-1:2004* (4), *EN 45502-2-2:2008* (10) und *EN 60601-1-2:2007* (2), sowie neben den Richtlinien der Europäischen Union *RL 93/42 EWG* (14) und *RL 90/385 EWG* (15) und den Gesetzen *Medizinproduktegesetz* (11), *Elektrotechnikgesetz* (12) und *Nullungsverordnung* (13), die nur grundlegende Anforderungen festlegen, gibt es auch weitere Schriften, die Grenzwerte nennen.

Bei einem Normentwurf (6), der sich im Endstadium seines Zulassungsprozesses befindet, kann man noch davon ausgehen, dass dieser in absehbarer Zeit als Norm verabschiedet wird. Eine Heranziehung dieser Grenzwerte scheint deshalb vor allem unter dem Gesichtspunkt mangelnder anderer Grenzwerte zulässig und entspricht im hier betrachteten Fall auch der gängigen Praxis.

Weniger unmittelbar stellt sich der Weg zur Verwendbarkeit anderer Publikationen dar. Es ist unklar, welchen Stellenwert *Guidelines* (16) oder *Fachinformationen* (17) haben. Was unter welchen Umständen schädlich ist oder sein könnte, wird von vielen grundsätzlich durchaus ernst zu nehmenden Gruppen verschieden dargestellt. Für Techniker erscheint es naheliegend, Grenzwertvorschläge von technischen Fachgremien heranzuziehen, was in der vorliegenden Arbeit auch der Fall ist. Demnach wird im niederfrequenten Bereich die Gefahr einer unerwünschten Reizwirkung auf Muskeln oder Nerven als Kriterium gewählt und als Basisgrenzwert deswegen eine Stromdichte festgelegt. Es existiert außerdem eine Vielzahl an epidemiologischen Untersuchungen (siehe beispielsweise (19), (20), (21)) welche höchst unterschiedliche Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten magnetischen Feldern und neurodegenerativen Erkrankungen oder Krebserkrankungen

finden. Die Problematik, dass epidemiologische Studien bei geringen Fallzahlen (wie sie bei seltenen Erkrankungen meist auftreten) keine zuverlässigen Prognosen liefern können ist lange bekannt. Bereits 1994 veröffentlichte das Wissenschaftsmagazin *Science* einen Artikel über die Gefährlichkeit von Hot Dogs (22). Demnach erhöht der regelmäßige Konsum dieser Speise das Leukämierisiko bei Kindern viermal so stark wie bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern. Dieser Artikel spricht auch die Tatsache an, dass es praktisch nicht möglich ist, alle relevanten Cofounder (= weitere zu beachtende Unterschiede zwischen exponierter Gruppe und Kontrollgruppe) zu identifizieren und entsprechend zu berücksichtigen (siehe dazu auch *Leitgeb: Machen elektromagnetische Felder krank*¹⁵). Die vorhandenen Ergebnisse sind nicht ausreichend um eine eindeutige Aussage zu treffen und die Exposition, soweit in diesen Arbeiten abgeschätzt oder gemessen, liegt weit unter den derzeit geltenden Grenzwerten. Diese Umstände haben dazu geführt, dass diese Effekte keinen Niederschlag in den Schutzüberlegungen fanden.

Dass die Legislative auch andere Bedenken ernst nimmt, zeigt sich am Beispiel der Schweiz (23). Dort wird zwischen einem Immissionsgrenzwert, der den Vorschlägen der ICNIRP folgt, und einem Anlagegrenzwert (=Emissionsgrenzwert) unterschieden. Der Anlagegrenzwert ist jenes Feld, welches alleine von einer bestimmten Anlage erzeugt wird. Dieser Wert beträgt für neu errichtete Bahnanlagen $B_{\max, \text{eff}}=1 \mu\text{T}$ im zeitlichen 24-h-Mittelwert, für neu errichtete Hochspannungsleitungen $B_{\max, \text{eff}}=1 \mu\text{T}$, jeweils gemessen an so genannten *Orten mit empfindlicher Nutzung*. Das sind Räume in denen sich Personen regelmäßig während längerer Zeit aufhalten sowie Kinderspielplätze und auch unbebaute Grundstücke mit entsprechender Widmung. Wie auch die Grenzwerte der ICNIRP sind die Schweizer Grenzwerte auf den Schutz der Allgemeinbevölkerung ausgelegt und gelten nicht für berufliche Exposition.

6.1.2 Grenzwertdefinition für den praktischen Gebrauch

Da die Basisgrenzwerte nicht praxistauglich anwendbar sind, müssen messtechnisch einfach zugängliche Referenzwerte bestimmt werden. Dies eröffnet einen neuen Freiheitsgrad in der Grenzwertfindung. Eine Heterogenität ergibt sich für das magnetische Feld in der Frage, ob eine magnetische Feldstärke oder eine magnetische Flussdichte angegeben wird. Es werden sowohl Spitzenwerte als auch Effektivwerte angegeben. Es gibt keine Grenzwertangabe, die eine Vorschrift für das Vorgehen bei gleichzeitigem Auftreten von elektrischem und

¹⁵ (24) Seite 61ff

magnetischem Feld **und** bei gleichzeitigem Auftreten von Feldern mehrerer Frequenzen bereit hält.

Der menschliche Körper vereint einen heterogenen Aufbau mit einem nichtlinearen, zeitvarianten Verhalten und verschließt sich somit mehrfach einer mathematisch-analytischen Behandlung. Existierende Simulationsmodelle können jeweils nur bestimmte Fälle berechnen. Meist wird daher ein Referenzwert aufgrund hochgradiger Vereinfachung des Systems für einen Worst-Case-Fall abgeschätzt. Aufgrund dieser Tatsache ist es sehr wahrscheinlich, dass eine Überschreitung der Referenzwerte keine Überschreitung der Basisgrenzwerte zur Folge hat.

6.2 Feldberechnungen

6.2.1 Einschränkungen

Die Feldberechnungen wurden an einem 2D Modell durchgeführt. Dies bedingt gewisse Einschränkungen:

- Es kann nur der Fall eines (theoretisch unendlich langen) parallelen Verlaufs von Gebäudefront und Feldquelle berechnet werden.
- Strukturen an der Gebäudefront (z.B. Säulen entlang der Fensterfront) können nicht simuliert werden.
- Die Schirmmaterialien wurden ebenfalls homogen modelliert. Eine Berechnung eines Schirmgitters ist beispielsweise nicht möglich.

Die verwendete 2D Software EleFAnT2D ermöglicht die Eingabe von Strukturen in ein vorher vorbereitetes Gitter. Dies hat den Vorteil, dass einfache Anordnungen schnell modelliert werden können. Die Verwendung beliebig geformter Strukturen ist damit nicht möglich. Die maximale Anzahl der verfügbaren Elemente ist programmtechnisch begrenzt. Dies bringt den Vorteil einer Berechnungszeit von weniger als eine Minute bis maximal einige Minuten pro Berechnung verknüpft mit dem Nachteil einer möglicherweise geringeren Genauigkeit.

6.2.2 Wahl des Masttyps

Berechnet wurden 110-kV-Hochspannungsfreileitungen vom Masttyp Donau und Tonne mit einer Betriebsspannung von $U_{B,eff}=123\text{ kV}$ und einem Phasenstrom von $I_{Ph,eff}=670\text{ A}$

Im ausgeführten Berechnungsbeispiel kann keinem Mast ein eindeutiger Vorzug eingeräumt werden. Bei Betrachtung der magnetischen Flussdichte und einem Abstand zwischen

Gebäude und Leitung von bis zu 20 m treten durchwegs beim Donaumast geringere Werte auf. Erhöht man den Abstand weiter erzeugt eine Leitung mit Tonnenmasten geringere Felder.

Noch unterschiedlicher fällt die Betrachtung für das elektrische Feld aus, denn hier spielen sowohl Leitungstyp als auch das betrachtete Stockwerk und der Abstand zur Leitung eine erhebliche Rolle. Es ist anzunehmen, dass in den Berechnungsfällen auch die Leitungshöhe eine entscheidende Rolle spielt. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann deswegen keiner der beiden betrachteten Masttypen allgemein bevorzugt werden. Sollte der Fall auftreten, dass bei einem Bauvorhaben eine Einflussmöglichkeit auf die Ausführungsform der Masten besteht, muss diese Entscheidung durch individuelle Berechnungen begründet werden.

Der Grenzwert nach EN 60601-1-2 (2) von $B_{\max, \text{eff}}=3,77 \mu\text{T}$ oder $B_{\max, \text{spitze}}=5,33 \mu\text{T}$ wird im Berechnungsbeispiel im ungeschirmten Fall bis auf eine Ausnahme (Tonnenmast 5 m Abstand – 3. Obergeschoß) nicht überschritten. Nur durch ungünstige Anwendung von Schirmmaßnahmen treten teilweise höhere Werte auf, für Details dazu siehe 6.2.4.

6.2.3 Ausführungsform der Gleisanlage

Einen großen Effekt auf die Höhe der entstehenden Felder hat die Verwendung eines Rückleiters. Die Maximalwerte der magnetischen Flussdichte können damit bis um einen Faktor 8 reduziert werden, die Mittelwerte bis um einen Faktor >4 .

Auch auf die Größe des elektrischen Feldes wirkt sich ein Rückleiter in allen Fällen positiv aus. In diesem Fall kann also die Verwendung eines Rückleiters durchwegs empfohlen werden.

Im gewählten Berechnungsbeispiel ist der Verstärkungsleiter an der, dem Gebäude zugewandten, Seite der Gleisanlage angebracht. Die Verwendung eines Verstärkungsleiters bewirkt daher eine deutliche Erhöhung der magnetischen Flussdichte innerhalb des Gebäudebereiches.

6.2.4 Sinnhaftigkeit von Schirmmaßnahmen

Obwohl für die Schirmung mit normalem ferromagnetischen Metall (Annahme: $\mu_R=50$) eine massive Metallplatte mit einer Dicke von 5 cm gewählt wurde, die in dieser Form in der Praxis nicht mehr denkbar wäre, zeigt sich für das magnetische Feld nur eine äußerst geringe Schirmwirkung. Dass dies nicht unbedingt ein Nachteil sein muss, erkennt man

durch eine Betrachtung des als zweite Variante berechneten Schirmblechs (Dicke=3 mm, $\mu_R=50000$).

Führt man die Schirmung lückenhaft aus, wie es sich beispielsweise durch Fensterauslässe zwangsläufig ergibt, geht die Schirmwirkung zum größten Teil verloren, das Schirmblech wirkt in dieser Konstellation hauptsächlich feldverzerrend. Man erzielt damit in einem großen Anteil der berechneten Fälle den Effekt, dass die Maximalwerte der magnetischen Flussdichte im Gebäude mit Schirmung höher sind als ohne Schirmung. Sogar im Vergleich der Mittelwerte tritt der Fall häufig auf, dass das Feld im geschirmten Gebäude über dem des ungeschirmten Gebäudes liegt.

Wenn eine Schirmung des magnetischen Feldes als unbedingt nötig erscheint, ist sie nur mit hochpermeablen Blechen und in dichter Ausführung (ohne Fenster) sinnvoll.

Für das elektrische Feld ist in fast allen Fällen der Mittelwert mit einer durch Fenster perforierten Schirmung etwas niedriger als im Berechnungsfall ohne Gebäude. Die Überhöhung des maximalen Feldwertes tritt allerdings auch hier auf.

Für das erheblich einfacher zu schirmende elektrische Feld hat auch die Gebäudehülle selbst einen merkbaren Schirmeffekt. Allerdings sollte in diesem Fall das Öffnen der Fenster nicht möglich sein, um nicht wieder die Schirmwirkung zu zerstören.

In einem praktisch anzunehmenden Fall, in dem eine Gebäudefront ohne Fenster als kaum durchführbar erscheint, ist es nach vorliegenden Berechnungsergebnissen die beste Variante, auf eine Schirmung an der Gebäudefassade komplett zu verzichten. Im Falle eines Reduktionsbedarfs von Feldern ist eine vorgelagerte Schirmung (ähnlich einer Lärmschutzwand) zu prüfen oder es sind feldverändernde Maßnahmen an der Quelle selbst (z.B. Änderung der Leiterverdrillung) zu überlegen.

6.3 Grenzwertanwendung auf das Modell

Illustrativ wird der Grenzwert für die magnetische Flussdichte aus der DIN EN 60601-1-2 (2) von $B_{\max, \text{eff}}=3,77 \mu\text{T}^{16}$ auf den Fall eines ungeschirmten Gebäudes neben einer Hochspannungsfreileitung mit Donaumasten und neben einer elektrifizierten Gleisanlage mit Rückleiter angewandt.

Für die Auswertungen wird als Einheit $\max|B|$ in nT verwendet. Hierbei ist $|B|$ auf die Länge des in der Ebene (bzw. im 3D-Fall im Raum) liegenden Feldvektors an einem Punkt bezogen. Im zeitlichen Verlauf über eine Periode wird dann von dieser Länge das Maximum ermittelt. Es gilt also, den erhaltenen Feldwert nicht mit dem Effektivwert des Grenzwertes, sondern mit dessen Spitzenwert zu vergleichen. Diesen Spitzenwert erhält man für

¹⁶ (2) Punkt 6.2.8.1 Magnetfelder mit Netzfrequenz

sinusförmige Signale durch Multiplikation mit $\sqrt{2}$, also $B_S = 3,77\sqrt{2} = 5,33 \mu T$. Abbildung 31 und Abbildung 32 illustrieren diese Fälle, bei denen der Grenzwert innerhalb des Gebäudes ($x < 10m$) auch ohne Schirmung nicht überschritten wird. Da die EN 60601-1-2 keine Grenzwerte für die magnetische Flussdichte bei $f=16,67 \text{ Hz}$ nennt wurde auch für die Gleisanlage der Grenzwert für $f=50 \text{ Hz}$ herangezogen. Da bei allen betrachteten Normen und Publikationen die Grenzwerte für $f=16,67 \text{ Hz}$ höher liegen jene als für $f=50 \text{ Hz}$, wird davon ausgegangen, dass die Grenzwertausnutzung nicht höher sein kann als im gezeigten Beispiel.

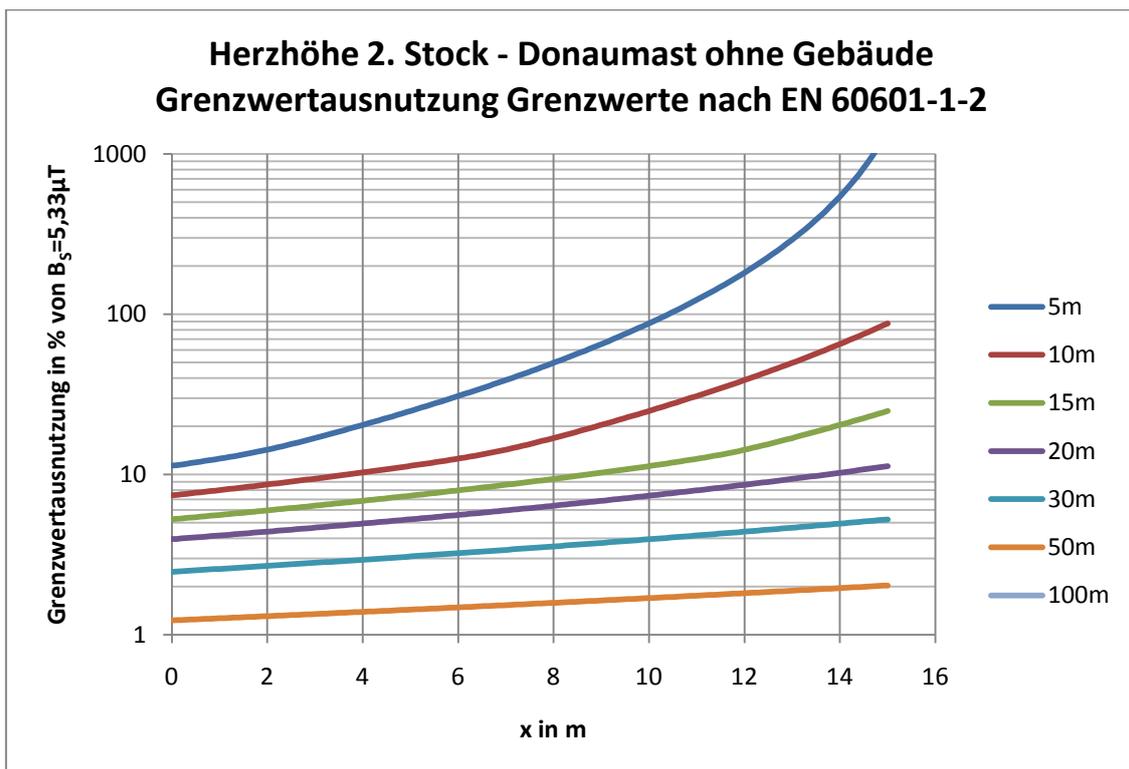


Abbildung 31: Ausnützung des Grenzwerts für magnetische Flussdichte nach EN 60601-1-2 an einer Hochspannungsfreileitung Masttyp Donau

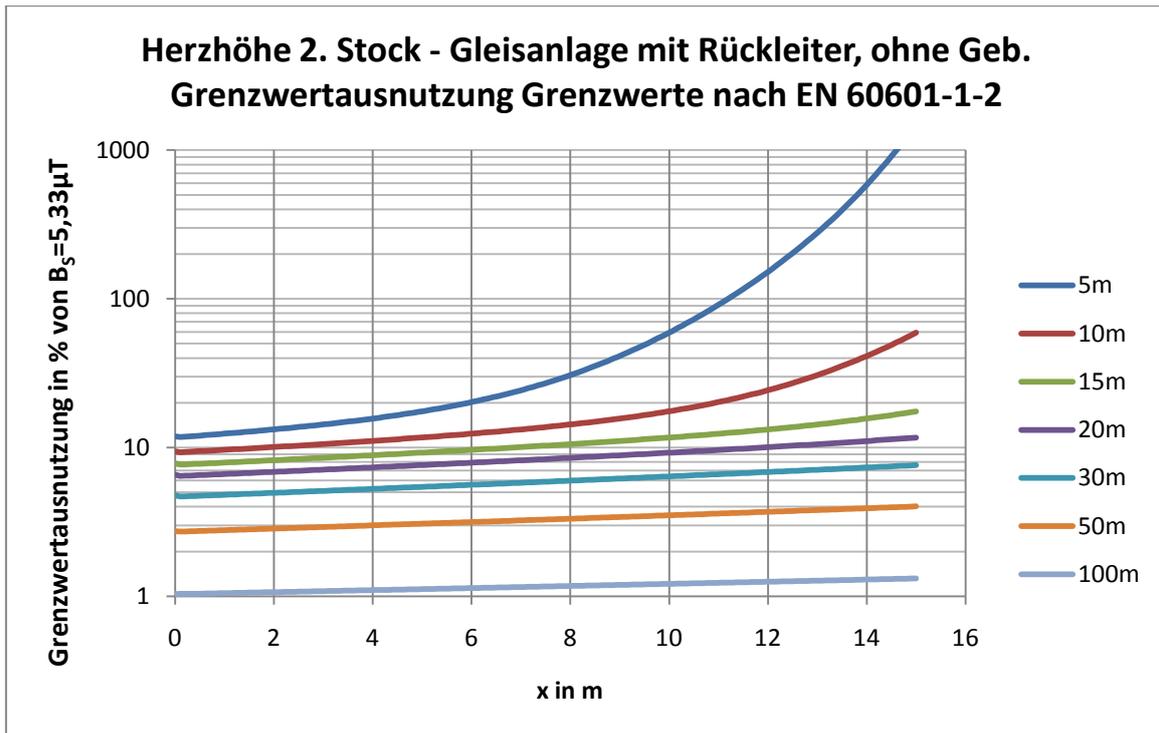


Abbildung 32: Ausnutzung des Grenzwerts für magnetische Flussdichte nach EN 60601-1-2 an einer elektrifizierten Gleisanlage mit Rückleiter

Die für Krankenhäuser oft genannten Grenzwerte von $B_{\max\text{EMG,SS}}=100\text{ nT}$, $B_{\max\text{EEG,SS}}=200\text{ nT}$ und $B_{\max\text{EKG,SS}}=400\text{ nT}$ sind informative Bestandteile einer Norm¹⁷ und sind gedacht, um empfindliche Messungen elektrischer Körpersignale (EKG, EEG, EMG) zu ermöglichen. Sie sind nur direkt an der Patientenposition einzuhalten. Hier sollte bereits bei der Planung des Krankenhauses eine entsprechende Lage für einen derartigen Messraum, auf einer der Feldquelle abgewandten Seite, überlegt werden. Alternativ dazu kann eine Einzelraumschirmung durchgeführt werden, allerdings muss der Raum für diesen Zweck fensterlos sein. Gerade bei derart kleinen Flussdichten darf das Krankenhaus selbst als Feldquelle nicht außer Acht gelassen werden.

Implantierbare Medizingeräte wie Herzschrittmacher messen zwar auch ein EKG Signal, können aber durch die Messung direkt am Herzen höhere Pegel erreichen und sind durch das umliegende, gut leitfähige Gewebe auch besser geschützt. Allerdings sollte bei unipolaren Geräten die Schleifenbildung aus Herzschrittmacher – Elektrode – umgebendes Gewebe besondere Beachtung finden.

¹⁷ (5) Anhang D, Punkt D3 Seite 59

6.4 Schutzziele

Innerhalb eines Krankenhauses sind im NF-Bereich die kleinsten festgelegten Grenzwerte zum Schutz der verwendeten medizinischen Geräte vor Störungen festgelegt ($B_{\text{eff,max}}=3,77\mu\text{T}$). Alle Grenzwerte für Personen im NF-Bereich, gleichgültig ob Allgemeinbevölkerung oder Implantatträger, liegen um einen Faktor >10 darüber. Es mag auf den ersten Blick widersinnig erscheinen, dass Geräte „besser“ geschützt werden als Menschen. Allerdings handelt es sich bei einem Krankenhaus um einen räumlich begrenzten Bereich, was eine strengere Einschränkung der Grenzwerte ermöglicht. Implantatträger und natürlich erst recht die Allgemeinbevölkerung sollten sich hingegen möglichst frei bewegen können, was eine zu große Einschränkung der Grenzwerte schwierig macht. Auch wenn es im ersten Moment skurril erscheinen mag, darf nicht vergessen werden, dass auch Implantatträger irgendwie durch die raue EMV-Umgebung außerhalb eines Krankenhauses kommen müssen um überhaupt ins Gebäude zu gelangen. Da die Felder im Außenbereich eines nahe an einer Bahntrasse oder Hochspannungsleitung gelegenen Krankenhauses durchaus auch die Grenzwerte für Personen mit Implantaten überschreiten können, sollte bereits bei der Planung daran gedacht werden, einen Eingang ins Haus auf der feldquellenabgewandten Seite vorzusehen. Ein eventueller Patienten- oder Besuchergarten in der Nähe der Feldquelle ist bei Grenzwertüberschreitungen mit entsprechenden Warnhinweisen zu versehen, oder bei Überschreitung der Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung selbstverständlich in diesem Bereich zu sperren.

Weiters gilt es zu bemerken, dass die Existenz von Herzschrittmachern mit nicht bekannter Störfestigkeit einen Widerspruch zur EN 60601-1-2:2007 (2) darstellt. Dort wird dem Hersteller für den Fall, dass er die Störfestigkeitspegel für die Messung von Patientensignalen verringert, auferlegt, anzugeben, bei welchen Pegeln das Gerät die Anforderungen der Norm erfüllt, welche Eigenschaften die elektromagnetische Gebrauchsumgebung aufweisen muss, damit das Gerät bestimmungsgemäß arbeitet und wie diese Gebrauchsumgebung sichergestellt werden kann.

Bei der ganzen Betrachtung darf nicht vergessen werden, dass es eine Gruppe von Herzschrittmachern und damit von Implantatträgern gibt, bei denen die Störfestigkeit des Gerätes nicht definiert und nicht bekannt ist. Hier sollte im Sinne einer „prudent avoidance“ ein Austausch dieser Geräte zumindest in Erwägung gezogen werden. Neben dem Kostenfaktor gilt es hierbei natürlich auch das Risiko einer nicht unbedingt nötigen Operation gegen das Risiko möglicher Schadensfälle, verursacht durch eine zu geringe Störfestigkeit des Gerätes, abzuwägen.

6.5 Weiterführende Überlegungen

Um realitätsnäher arbeiten zu können, sollte eine Lösung für eine Berechnung von 3D Modellen in Betracht gezogen werden.

Ein interessantes Fallbeispiel in diesem Zusammenhang ist eine Modellierung, die die Hausinstallation und angeschlossene, in Betrieb befindliche Verbraucher mit berücksichtigt um einen Vergleich der „selbst erzeugten“ Felder mit den Immissionen von außen berechnen zu können.

Falls weiterführende Berechnungen am 2D Modell vorgenommen werden, ist die Berechnung einer elektrifizierten Gleisanlage in gespiegelter Ausführung, also mit Rück- und Verstärkungsleiter auf der dem Gebäude abgewandten Seite, von Interesse.

Für die Berechnungen können vergleichende Messungen durchgeführt werden.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

1. **Goerke, Heinz.** *Medizin und Technik: 3000 Jahre ärztliche Hilfsmittel für Diagnostik und Therapie.* München : Callwey, 1988. ISBN 3 7667 0857 0.
2. **CENELEC, CEN.** *EN 60601-1-2:2007 Medizinische elektrische Geräte Teil 1-2: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit - Ergänzungsnorm: Elektromagnetische Verträglichkeit - Anforderungen und Prüfungen (IEC 60601-1-2:2007).*
3. **CEN, CENELEC.** *EN45502-1:1997 Aktive implantierbare medizinische Geräte Teil 1: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit, Aufschriften und vom Hersteller zur Verfügung zu stellende Informationen.*
4. **CENELEC, CEN.** *EN 45502-2-1:2004 Aktive implantierbare medizinische Geräte -Teil 2-1: Besondere Festlegungen für aktive implantierbare medizinische Geräte zur Behandlung von Bradyarrhythmie (Herzschrittmacher).*
5. **ÖNORM, ÖVE.** *ÖVE/ÖNORM E 8007:2007 Starkstromanlagen in Krankenhäusern und medizinisch genutzten Bereichen außerhalb von Krankenhäusern.*
6. **VDE, DIN.** *E DIN VDE 0848-3-1:2002 Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln bei Einwirkung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich von 0Hz bis 300GHz (Entwurf).*
7. **CENELEC, CEN.** *EN 61000-4-4:2004 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-4: Prüf und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen schnelle transiente elektrische Störgrößen/Bursts.*
8. —. *EN 61000-4-5:2006 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-5: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen Stoßspannungen.*
9. —. *EN 61000-4-8:1993+A1:2001 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-8: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen Magnetfelder mit energietechnischen Frequenzen (Einschließlich Änderung A1 2001).*
10. —. *EN 45502-2-2:2008 Aktive implantierbare Medizingeräte - Teil 2-2: Besondere Festlegungen für aktive implantierbare medizinische Produkte zur Behandlung von Tachyarrhythmie (einschließlich implantierbaren Defibrillatoren).*
11. **Bundesrecht.** *Bundesgesetz betreffend Medizinprodukte (Medizinproduktegesetz - MPG) in der konsolidierten Fassung vom 14.9.2009.*

12. —. *Bundesgesetz über Sicherheitsmaßnahmen, Normalisierung und Typisierung auf dem Gebiete der Elektrotechnik (Elektrotechnikgesetz 1992 - ETG 1992) in der konsolidierten Fassung vom 16.9.2009.*
13. —. 322. *Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Anforderungen an öffentliche Verteilungsnetze mit der Nennspannung 400/230 V und an diese angeschlossene Verbraucheranlagen zur grundsätzlichen Anwendung der Schutzmaßnahme. Nullung (Nullungsverordnung), 1998.*
14. **Rat, Europäischer.** *Richtlinie 93/42/EWG des Rates vom 14. Juni 1993 über Medizinprodukte (letzte 21.09.2007).*
15. —. *Richtlinie des Rates vom 20. Juni 1990 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über aktive implantierbare medizinische Geräte (letzte Änderung am 21.09.2007).*
16. **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP).** *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300GHz). Health Physics. 1998, Bd. 74 (4), 494-522.*
17. **Österreichisches Elektrotechnisches Komitee - OEK.** *Fachinformation: Personen mit aktiven Implantaten in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. s.l. : Allgemeine Unfallversicherungsanstalt, 2009.*
18. **Silvester, M.V.K. Chari & P.P.** *Finite Elements in Electrical and Magnetical Field Problems.* Chichester : John Wiley & Sons, 1980. ISBN 0 471 27578 6.
19. **Schoenfeld, et al.** *Electromagnetic Fields and Breast Cancer on Long Island : A Case-Control Study. American Journal of Epidemiology. 2003, 158, 47-58.*
20. **E V Willet, et al.** *Occupational exposure to electromagnetic fields and acute leukaemia: analysis of a case-control study. Occup Environ Med. 2003, 60:577-683.*
21. **Birgitta Floderus, et al.** *Incidence of selected cancers in Swedish railway workers, 1961-79. Cancer Causes and Control. 1994, 5,189-194.*
22. *Hot Dog Hazards. Science. 1994, 264: p1255.*
23. **Schweizerischer Bundesrat.** *Verordnung 814.270 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung - Stand vom 1. September 2009.*
24. **Leitgeb, Norbert.** *Machen elektromagnetische Felder krank? Graz : Springer, 2000. ISBN 3-211-83420-6.*

7.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Grundgitter zur Eingabe der verschiedenen Feldquellen | 12 |
| Abbildung 2: Darstellung des Problemaufbaus (Beispiel Schirmung mit Fenster, Donaumast, 5 m Abstand) | 14 |
| Abbildung 3: Donaumast Quelle: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Donaumast.jpg GNU Free Document License | 16 |
| Abbildung 4: Schematische Darstellung der Leiterseilanordnung Donaumast | 17 |
| Abbildung 5: Tonnenmast | 18 |
| Abbildung 6: Schematische Darstellung der Leiterseilbelegung Tonnenmast | 19 |
| Abbildung 7: Schematische Darstellung Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter | 20 |
| Abbildung 8: Schematische Darstellung Gleisanlage mit Rückleiter | 21 |
| Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Gleisanlage mit Verstärkungsleiter | 22 |
| Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter | 23 |
| Abbildung 11: Stahl Oberleitungsmast der deutschen Bahn mit Rück- und Verstärkungsleiter aus http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stahl-Oberleitungsmast_Deutsche_Bahn.jpg - GNU Free Document License | 24 |
| Abbildung 12: Schematische Darstellung der gewählten Auswertehöhen | 25 |
| Abbildung 13: Referenzwert für Allgemeinbevölkerung elektrische Feldstärke nach ICNIRP31 | |
| Abbildung 14: Referenzwert für Allgemeinbevölkerung magnetische Flussdichte nach ICNIRP | 32 |
| Abbildung 15: Grenzwert für Personen mit Herzschrittmachern elektrische Feldstärke nach OKE (17) | 34 |
| Abbildung 16: Grenzwert für Personen mit Herzschrittmachern magnetische Flussdichte nach OKE (17) | 35 |
| Abbildung 17: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 5 m Abstand - B-Feld | 48 |
| Abbildung 18: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 20 m Abstand - B-Feld | 48 |
| Abbildung 19: Gebäude mit Fenstern, Schirmung Baustahl, Donaumast, 2. Stock für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 49 |
| Abbildung 20: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 5 m Abstand - E-Feld | 50 |
| Abbildung 21: Gebäude mit Fenstern - Schirmung mit Stahl - Donaumast in 20 m Abstand - E-Feld | 50 |
| Abbildung 22: Gebäude mit Fenstern, Schirmung Baustahl, Donaumast, 1. Stock für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 51 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 23: Gebäude mit Fenstern, Schirmblech, Tonnenmast, 3. Stock für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 52 |
| Abbildung 24: Tonnenmast 3. Stock B-Feld - Schirmblech ohne Fenster vs. ohne Schirmung für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 52 |
| Abbildung 25: Tonnenmast 3. Stock B-Feld - Schirmblech mit Fenstern vs. ohne Schirmung für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 53 |
| Abbildung 26: Donaumast Erdgeschoß E-Feld, Gebäude mit Fenstern vs. ohne Gebäude für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 54 |
| Abbildung 27: Gleisanlage ohne Verstärkungs- und Rückleiter - geschlossenes Gebäude Stahlplatte - B-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 56 |
| Abbildung 28: Gleisanlage ohne Verstärkungs- und Rückleiter - geschlossenes Gebäude Schirmblech - B-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 56 |
| Abbildung 29: Darstellung des Effekts eines Rückleiters bei einer Gleisanlage – B-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 57 |
| Abbildung 30: Darstellung des Effekts eines Rückleiters bei einer Gleisanlage – E-Feld für verschiedene Abstände zur Feldquelle | 58 |
| Abbildung 31: Ausnützung des Grenzwerts für magnetische Flussdichte nach EN 60601-1-2 an einer Hochspannungsfreileitung Masttyp Donau | 64 |
| Abbildung 32: Ausnützung des Grenzwerts für magnetische Flussdichte nach EN 60601-1-2 an einer elektrifizierten Gleisanlage mit Rückleiter | 65 |

7.3 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Stromaufteilung nach ohmschen Leitungswiderständen | 14 |
| Tabelle 2: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Donaumast | 38 |
| Tabelle 3: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Tonnenmast..... | 39 |
| Tabelle 4: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter | 40 |
| Tabelle 5: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage mit Rückleiter..... | 41 |
| Tabelle 6: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage mit Verstärkungsleiter | 42 |
| Tabelle 7: Ergebnisse für die magnetische Flussdichte - Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter | 43 |
| Tabelle 8: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Donaumast..... | 44 |
| Tabelle 9: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Tonnenmast | 44 |
| Tabelle 10: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage ohne Rück- und Verstärkungsleiter | 45 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 11: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage mit Rückleiter | 45 |
| Tabelle 12: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage mit Verstärkungsleiter . | 46 |
| Tabelle 13: Ergebnisse für die elektrische Feldstärke - Gleisanlage mit Rück- und Verstärkungsleiter..... | 46 |