



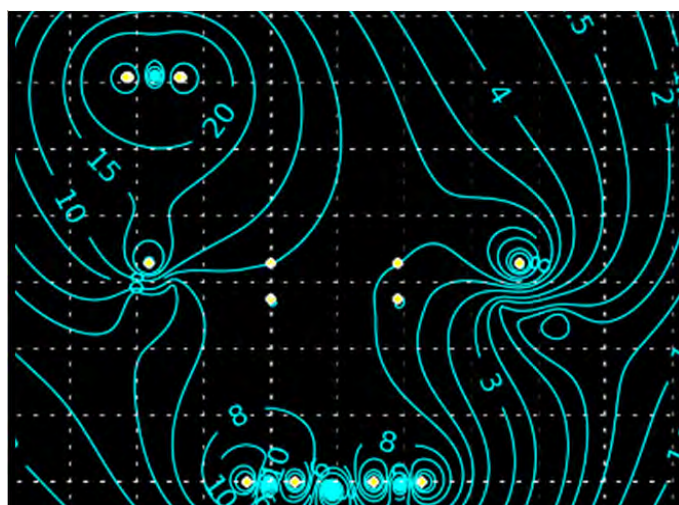
## Massnahmen zur Reduktion der Magnetfelder bei mit Wechselstrom betriebenen Eisenbahnen

# Dokumentation der Ergebnisse (WEB)

ECH-240.07-013  
Version 1.0

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

ENOTRAC AG  
Seefeldstrasse 8  
CH-3600 Thun  
Tel. +41 (0)33 346 66 11  
Fax +41 (0)33 346 66 12  
e-mail: [info@enotrac.com](mailto:info@enotrac.com)  
[www.enotrac.com](http://www.enotrac.com)



Freigegeben  
05.03.2014

ECH-240.07-013.V1.0.Bericht\_Massn\_Reduktion\_EMF\_WEB.doc

© ENOTRAC AG

## Aktuelle Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
1.0	05.03.2014	Freigegeben	S. Nydegger	H. Voegeli	H. Voegeli

## Vorherige Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben

## Änderungen seit der vorherigen Version

--

## Impressum / Urheberrecht

Dieses Dokument wurde durch ENOTRAC AG (Thun) im Auftrag des BAFU erarbeitet und im 2014 auf Deutsch veröffentlicht. Kapitel 1 ist auf Französisch und Italienisch übersetzt. Für den Inhalt ist allein ENOTRAC als Auftragnehmer verantwortlich. Für das Dokument und den darin dargestellten Gegenstand erhält das BAFU das Nutzungs- und Urheberrecht. Vervielfältigung, Bekanntgabe an Dritte oder Verwertung seines Inhalts über die vorgesehene Nutzung hinaus sind ohne schriftliche Zustimmung verboten.

Inhalt:

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Ausgangslage / Zweck	5
1.2	Zusammenfassung	6
1.2.1	Erkenntnisse aus den Simulationen und den Kostenbetrachtungen	6
1.2.2	Massnahmen mit guten Nutzen/Kosten-Verhältnis	8
1.2.3	Vorgehen zur Evaluierung einer geeigneten Massnahme	9
1.3	Résumé	10
1.3.1	Conclusions tirées des simulations et de l'évaluation des coûts	10
1.3.2	Mesures avec un bon rapport avantages-coûts	12
1.3.3	Processus pour la définition d'une mesure	13
1.4	Riepilogo	14
1.4.1	Risultati delle simulazioni e valutazioni dei costi	14
1.4.2	Soluzioni che presentano un buon rapporto costi/benefici	16
1.4.3	Procedimento per la definizione delle soluzioni	17
<b>2</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>19</b>
2.1	Vorgehen	19
2.1.1	Aufzeigen Nutzen	19
2.1.2	Ermitteln Aufwand	20
2.1.3	Ableiten Massnahmen mit gutem Nutzen/Kosten-Verhältnis	20
2.2	Theoretische Grundlagen	20
2.3	Wahl der Basismodelle	21
2.4	Beschreibung möglicher Massnahmen	22
2.4.1	Allgemeine Rahmenbedingungen / Grundlagen	22
2.4.2	Untersuchte Massnahmen	26
2.5	Übersicht der durchgeführten Simulationen	30
2.6	Gewählter Ansatz für den Vergleich unter den Varianten	31
2.7	Beschreibung der Simulations-Tools der ENOTRAC	32
2.7.1	SIMNET	32
2.7.2	EMFCALC	33
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Basismodelle</b>	<b>34</b>
3.1	Fahrleitungs-Querprofil (Leiteranordnung)	34
3.1.1	Allgemeines zu den Leiteranordnungen	34
3.1.2	Einspur-Fahrleitung N-FL (mit Hilfsleitung)	35
3.1.3	Einspur-Fahrleitung R-FL (mit Hilfsleitung)	35
3.1.4	Doppelspur-Fahrleitung	36
3.1.5	Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke	36
3.1.6	Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke	37
3.2	Leiterdaten	37
3.2.1	Freileiter	37
3.2.2	Schienen	38
3.2.3	Kabel	38
3.3	Längsprofil	39

3.3.1	Modelle der Streckenfahrleitungen	39
3.3.2	Modelle der Bahnhofsfahrleitungen	40
3.4	In die Modelle eingespeister Strom	41
3.5	Verbindungen zwischen Leitern	41
3.6	Rückleistersystem	41
3.7	Modell der Erde	42
<b>4</b>	<b>Simulationsergebnisse</b>	<b>43</b>
4.1	Einspur-Fahrleitung N-FL	44
4.2	Einspur-Fahrleitung R-FL	48
4.3	Doppelspur-Fahrleitung	53
4.4	Bahnhofsfahrleitung, Einspurstrecke	58
4.5	Bahnhofsfahrleitung, Doppelspurstrecke	62
4.6	Bestimmen des Nutzens der einzelnen Massnahmen	65
4.7	Beurteilung / Bemerkung zum Nutzen	67
<b>5</b>	<b>Abschätzen des Aufwandes der Massnahmen</b>	<b>68</b>
5.1	Annahmen/Bemerkungen zur Bestimmung der Kosten	68
5.2	Allgemeines zur Beurteilung des Aufwandes	70
<b>6</b>	<b>Zusammenstellung der Massnahmen</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>Referenzen, Glossar</b>	<b>75</b>
7.1	Referenzen, Grundlagedokumente	75
7.2	Glossar	75
<b>8</b>	<b>Anhang A: Einzelplots</b>	<b>77</b>
8.1	Einzelplots: Einspur-Fahrleitung N-FL	77
8.2	Einzelplots: Einspur-Fahrleitung R-FL	80
8.3	Einzelplots: Doppelspur-Fahrleitung	83
8.4	Einzelplots: Bahnhofsfahrleitung, Einspurstrecke	86
8.5	Einzelplots: Bahnhofsfahrleitung, Doppelspurstrecke	88

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Ausgangslage / Zweck

Seit dem 1. Februar 2000 ist in der Schweiz die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung NISV [1] in Kraft, worin auch Grenzwerte und deren Anwendung bei Fahrleitungen von Eisenbahnen geregelt sind. Inzwischen konnten mit der Anwendung und Umsetzung der NISV [1] bei Eisenbahnen weitreichende Erfahrungen gewonnen werden.

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU erstellt. Sie soll mögliche Massnahmen an der Fahrleitungsanlage konkret auf ihr Potential zur Verringerung der magnetischen Flussdichte wie auch ihren Aufwand beurteilen. Dabei wird von einer nicht beeinflussbaren Strombelastung der Fahrleitungsanlage ausgegangen. Durch eine Reduktion der Strombelastung, z.B. Ändern des Speisesystems oder Umgestaltung des Energieversorgungsnetzes, könnte die Magnetfeldbelastung verkleinert werden. Da die Magnetfeldstärke annähernd proportional zum Strom ist, kann aus den in diesem Bericht dargestellten Magnetfeldverteilungen herausgelesen werden, welchen Effekt eine Stromreduktion haben würde.

---

En français:

### **Situation initiale et but**

*L'ordonnance suisse sur la protection contre le rayonnement non ionisant ORNI [1] est entrée en force le 1<sup>er</sup> février 2000. Cette ordonnance définit des valeurs limites de densité de champ magnétique et leur application pour les installations ferroviaires. Depuis lors, beaucoup d'expérience a pu être accumulée dans le cadre de la mise en œuvre de l'ORNI [1].*

*La présente étude a été réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV. Elle a pour but l'évaluation de mesures d'optimisation des installations de la ligne de contact: leur potentiel de réduction de la densité du champ magnétique ainsi que les investissements nécessaires à leur mise en œuvre. L'intensité du courant est ici admise comme donnée fixe. En réalité, la densité du champ magnétique pourrait être réduite par une diminution de l'intensité du courant, par exemple grâce à une modification du système d'alimentation ou de la topologie du réseau. Cependant, la densité de champ magnétique étant dans une large mesure proportionnelle au courant, on peut déduire des illustrations de répartition du champ magnétique quels seraient les effets d'une baisse du courant.*

---

Italiano:

### **Situazione iniziale / Obiettivo**

*A partire dal 1. Febbraio 2000 è entrata in vigore, in Svizzera, l'ordinanza relativa alle radiazioni non-ionizzanti ORNI [1], la quale ne definisce i valori limite e l'applicazione in prossimità di linee*

*ferroviarie. Dal momento dell'attuazione della direttiva ORNI [1], è stata accumulata una considerevole esperienza.*

*Il presente studio è stato redatto su mandato dall'Ufficio federale dell'ambiente. Esso ha lo scopo di valutare le possibili misure di installazione della linea di contatto per la riduzione dell'intensità del campo magnetico e stimarne i costi di realizzazione. Questo studio si basa sul fatto che la quantità di corrente nel sistema di catenaria non è modificabile. L'intensità del campo magnetico potrebbe essere ridotta grazie a una riduzione dell'intensità di corrente, per esempio modificando il sistema di alimentazione o la topologia della rete di alimentazione. Poiché l'intensità del campo magnetico è approssimativamente proporzionale alla corrente, gli effetti di una riduzione dell'intensità di corrente possono essere dedotti dai grafici di intensità del campo magnetico.*

## 1.2 Zusammenfassung

In einem ersten Schritt werden sinnvolle typische Fahrleitungsanordnungen (Basismodelle) als Ausgangslage definiert. Die dabei definierten Basismodelle sind:

- 1) Einspur-Fahrleitung N-FL
- 2) Einspur-Fahrleitung R-FL
- 3) Doppelspur-Fahrleitung
- 4) Bahnhoffahrleitung einer Einspurstrecke
- 5) Bahnhoffahrleitung einer Doppelspurstrecke

Für diese typischen Anordnungen (Basismodelle) werden anschliessend denkbare technische Massnahmen zur Reduktion der Magnetfeldbelastung hinsichtlich deren Nutzen untersucht. Für diese Untersuchungen kommen die Berechnungsprogramme SIMNET für die Bestimmung der Stromverteilung und EMCALC für die Berechnung der Magnetfeldstärke zur Anwendung. Aus diesen Berechnungen wird der Nutzen abgeleitet und definiert, ob dieser beidseitig der Bahntrasse, einseitig oder einseitig zu Lasten der anderen Seite ausfällt.

Für jede der betrachteten Massnahmen wird in einem nächsten Schritt der zur Realisierung erforderliche Aufwand geschätzt. Im Aufwand werden einerseits die Kosten und andererseits aber auch die Umsetzbarkeit oder sonstige Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Das Zusammenführen von Nutzen und Aufwand lässt anschliessend den Schluss zu, welche der untersuchten Massnahmen ein gutes Nutzen/Kosten-Verhältnis haben.

### 1.2.1 Erkenntnisse aus den Simulationen und den Kostenbetrachtungen

Die Auswertung der Simulationsergebnisse der einzelnen untersuchten Massnahmen führt zu folgenden Erkenntnissen:

- Eine Optimierung der Anordnung der Rückleiter bringt einen mittleren bis hohen Nutzen. Daher lohnt es sich, bei der Planung von Fahrleitungsanlagen auf die Anordnung der Rückleiter besonders zu achten. Hierzu folgende Anmerkung: Wie die Ergebnisse zeigen, bringt das Anbringen eines Rückleiterseils möglichst nahe zum Fahrdraht, wie in Anhang 1 Ziffer 55 und 56 der NISV [1] grundsätzlich vorgeschrieben, nicht in jedem Fall den besten Nutzen. Vielmehr sollte darauf geachtet werden, dass die Rückleiterseile möglichst nahe an die Strom führenden Leiter gebracht werden, was nicht unbedingt der Fahrdraht ist, sondern auch eine Hilfs- oder Umgehungsleitung sein kann.
- Die Installation eines zusätzlichen Rückleiterseils kann einen mittleren bis hohen Nutzen bringen (beidseitig wirksam), bedingt jedoch, dass dieses über eine gewisse Länge angebracht wird. Dabei ist eine Länge von mindestens 300 m – 1'000 m zu berücksichtigen, je länger desto besser. Bis zu einer Länge von 4-5 km nimmt der Nutzen stetig zu, ab einer Länge von rund 5 km ist der zusätzliche Nutzen jedoch nur noch marginal. Im Bereich von 300 – 1'000 m ist diese Lösung hinsichtlich Kosten noch im Rahmen. Bei einer Installation über einen längeren Bereich (> 1 km) wird diese Massnahme aber sehr teuer.
- Kostengünstig sind Massnahmen, welche nur punktuell auf einer beschränkten Abschnittslänge (100 m) eingesetzt werden.
- Mit dem System Booster-Transformator wird bei Einspurstrecken auf der dem Rückleiterseil gegenüberliegenden Seite des Bahntrassees ein sehr hoher Nutzen erzielt. Für einen punktuellen Einsatz weist das Booster-Transformer-System somit ein sehr gutes Nutzen/Kosten-Verhältnis auf.
- Eine Verkabelung der jeweiligen Strom führenden und somit Feld verursachenden Leiter, auch nur für 100 m, bringt einen sehr hohen Nutzen. Je nach Anordnung der Kabelleitung ist die Massnahme gar auf beiden Seiten des Bahntrassees wirksam. Jedoch ist diese Lösung auch eine teure Massnahme. Aus Sicht der Kosten sollte daher die Kabelleitung möglichst kurz gehalten werden.
- Das Isolieren einer Schiene in Längsrichtung (Isolierstösse) bringt einen hohen Nutzen (beidseitig). Gleichzeitig scheint diese auch relativ kostengünstig. Bei dieser Massnahme sind jedoch gewisse Vorbehalte hinsichtlich Akzeptanz angebracht. Es ist davon auszugehen, dass die Isolierstösse in den Schienen relativ häufig ausgewechselt werden müssen (Überwalzen durch die Züge), beim Rollmaterial ein höherer Verschleiss entsteht und dass durch die Isolierstösse eine grössere Lärmbelastung hervorgerufen wird.
- Im Bahnhofsbereich ist das Verschieben der Umgehungsleitung mit zusätzlicher Installation eines Rückleiterseils eine Massnahme mit sehr hohem Nutzen mit relativ niedrigen Kosten. Jedoch ist sie nur einseitig wirksam sowie meist zu Lasten der anderen Seite.
- Für die Bahnhofsfahrleitung wurde die Verkabelung der Hilfs- oder Umgehungsleitung bei Einspurstrecken untersucht. Diese Massnahme bringt einen sehr hohen Nutzen ist jedoch mit entsprechenden Kosten verbunden (mittelhoch). Anmerkung: für die Doppelspurstrecke können die gleichen Ergebnisse oder Erkenntnisse verwendet werden, da hier anstelle der Hilfsleitung die zusätzliche Umgehungsleitung verkabelt wird (Verkabelung der Strom führenden Leiter).
- Das Überbrücken der Fahrleitung durch eine Hilfsleitung (Freileitung), und einer optimierten Anordnung derselben (mit Rückleiter), bringt einen hohen Nutzen, jedoch zu Lasten der anderen Seite. Die Kosten für diese Massnahme, da sie punktuell angewandt wird, sind relativ niedrig.
- Das Tauschen der Hilfs- und Umgehungsleitung im Bahnhofsbereich, zwar eine sehr kostengünstige Massnahme, bringt jedoch keinen bedeutenden Nutzen.
- Das Autotransformator-System weist zwar einen sehr hohen Nutzen auf, vor allem dadurch begründet, dass der massgebende Strom nur halb so hoch ist als bei einer konventionellen 1x15 kV Energieversorgung. Demgegenüber stehen jedoch die beträchtlichen Kosten für die



Umsetzung, da diese Massnahme jeweils für einen ganzen Speiseabschnitt umgesetzt werden muss (in der Regel für 20-30 km).

- Eine Unterscheidung zwischen R-FL und N-FL ist grundsätzlich nicht erforderlich. Die Wirksamkeit der Massnahmen ist bei beiden etwa identisch.

## 1.2.2 Massnahmen mit guten Nutzen/Kosten-Verhältnis

Basismodell	Massnahme	Kosten	Nutzen	Wirksamkeit	Bemerkung
Einspur-Fahrleitung	Im Bereich des OMEN einen zusätzlichen Rückleiter in der Nähe zur Hilfsleitung installieren, auf einer Länge zwischen 300 m – 1'000 m.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Im Bereich des OMEN die Hilfsleitung verkabeln, auf einer Länge von rund 100 m	Mittel	Hoch	Beidseitig	
	Im Bereich des OMEN die Schienen unterbrechen (mit Isolierstössen) und mit Rückleiterseilen entsprechend überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Mittel	Hoch	Beidseitig	Vorbehalt, siehe oben
	Im Bereich des OMEN den Einsatz von einem Booster-Transformator-System vorsehen.	Mittel	Sehr hoch	Einseitig	
Doppelspur-Fahrleitung	Im Bereich des OMEN zusätzliche Rückleiter installieren, auf einer Länge zwischen 300 m – 1'000 m.	Mittel	Mässig	Beidseitig	
	Fahrleitung im Bereich des OMEN mit einer Hilfsleitung als Freileiter überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Niedrig	Mittel	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Fahrleitung im Bereich des OMEN mit einer Kabelleitung überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Mittel	Hoch bis sehr hoch	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Im Bereich des OMEN die Schienen unterbrechen (alle 4 Schienen, mit Isolierstössen) und mit Rückleiterseilen entsprechend überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Mittel	Hoch	Beidseitig	Vorbehalt, siehe oben
	Autotransformatorsystem über den ganzen Speisesektor	Sehr hoch	Sehr hoch	Beidseitig	Vorbehalt, siehe oben



Basismodell	Massnahme	Kosten	Nutzen	Wirksamkeit	Bemerkung
Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke	Bestehender Rückleiter zur Hilfs- und Umgehungsleitung verschieben.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Über den ganzen Bahnhofsbereich einen zusätzlichen Rückleiter nahe zu den Hilfs- und Umgehungsleitungen installieren.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Tauschen der Hilfs- und der Umgehungsleitung.	Niedrig	Marginal	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Im Bereich des OMEN die Hilfs- und Umgehungsleitungen verkabeln (rund 100 m)	Mittel	Sehr hoch	Beidseitig	
Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke	Bestehende Rückleiter zu den Umgehungsleitungen verschieben.	Niedrig	Hoch	Beidseitig	
	Über den ganzen Bahnhofsbereich einen zusätzlichen Rückleiter nahe zu den Umgehungsleitungen installieren.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Verschieben der Umgehungsleitungen in die Trasseemitte im Bereich des OMEN (sowie mit 2 Rückleitern ausrüsten).	Niedrig	Sehr hoch	Einseitig	
	Verschieben der Umgehungsleitung, so dass je Seite eine Leitung geführt wird (sowie mit 2 Rückleitern ausrüsten).	Niedrig	Sehr hoch	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Im Bereich des OMEN die Hilfs- und Umgehungsleitungen verkabeln (rund 100 m)	Mittel	Sehr hoch	Beidseitig	

Tabelle 1-1: Zusammenstellung der Massnahmen mit gutem Nutzen/Kosten-Verhältnis (Kopie von Tabelle 6-1 auf Seite 73)

Wichtig: diese Bewertung basiert auf den in vorliegender Studie erarbeiteten Bewertungs-Skalen. Es ist durchaus denkbar, dass in gewissen Fällen (projektspezifisches Umfeld) die eine oder andere Massnahme, welche hier nicht mit gutem Nutzen erscheint, geeignet sein kann (oder umgekehrt).

### 1.2.3 Vorgehen zur Evaluierung einer geeigneten Massnahme

Zur Evaluierung geeigneter Massnahmen, um die Magnetfeldbelastung an einer Problemstelle zu reduzieren, kann nach folgendem Schema vorgegangen werden:

- 1) Zusammenstellen der Rahmenbedingungen nach folgenden Fragestellungen:
  - a) Um welche Fahrleitungsanordnung handelt es sich (welches der Basismodelle passt)?
  - b) Nur einseitig ein Problem?
  - c) Bei einseitigem Problem: darf auf der anderen Seite durch die Massnahme die magnetische Feldbelastung zunehmen?
  - d) Wie hoch muss der Nutzen der Massnahme sein (in %), damit der Anlagegrenzwert der NISV bei den OMEN eingehalten wird?
- 2) Mit den zusammengestellten Angaben aus dem ersten Punkt kann mithilfe der Tabellen in Kapitel 4 (ab Seite 43) eine oder mehrere geeignete Massnahmen bestimmt werden (hinsichtlich Nutzen).
- 3) Mithilfe von Richtpreisen kann anschliessend ermittelt werden, welche der gewählten Massnahmen mit welchem Kostenrahmen verbunden sind.
- 4) Dies bildet nun eine Basis zur Abwägung des weiteren Vorgehens.

## 1.3 Résumé

Différentes configurations ont été définies comme base pour l'étude des mesures d'optimisation. Ces modèles de référence sont:

- 1) Voie simple, ligne de contact NFL
- 2) Voie simple, ligne de contact RFL
- 3) Voie double
- 4) Ligne de contact en gare, voie simple
- 5) Ligne de contact en gare, voie double

Sur la base de ces différents modèles de référence, des mesures de réduction du champ magnétique et leurs effets ont été analysés. Les logiciels SIMNET et EMFCALC ont été utilisés respectivement pour déterminer la répartition du courant entre les conducteurs et pour le calcul de l'intensité du champ magnétique. Les résultats ont permis d'analyser l'influence des différentes mesures et de définir si le bénéfice se fait ressentir des deux côtés du tracé, d'un seul côté ou d'un seul côté mais aux dépens de l'autre.

Dans une seconde phase, les investissements nécessaires ont été évalués pour chacune des mesures analysées. Ceci non seulement en termes de coûts mais aussi de possibilités de mise en œuvre et d'éventuelles particularités à considérer.

La mise en commun du potentiel d'optimisation et des investissements permet au final de déterminer le rapport avantages-coûts des mesures analysées.

### 1.3.1 Conclusions tirées des simulations et de l'évaluation des coûts

L'analyse des résultats de simulations pour les différentes mesures étudiées mène aux conclusions suivantes:

- Une réorganisation de la disposition des conducteurs de retour apporte des avantages moyens à élevés. Il est ainsi important, dans la phase de planification d'installations de lignes de contact, de porter attention au placement des conducteurs de retour. Remarque: les résultats montrent que le fait de placer la corde de retour au plus proche du fil de contact, comme le prescrivent de manière générale les chiffres 55 et 56 de l'annexe 1 de l'ORNI [1], ne permet pas toujours d'amener les résultats escomptés. En effet, ce n'est pas toujours la ligne de contact qui conduit les plus grands courants, mais parfois les lignes auxiliaires ou détournées. La corde de retour devrait alors se trouver au plus proche du conducteur qui présente le courant le plus élevé.
- L'installation d'une corde de retour supplémentaire peut apporter des avantages moyens à élevés (des deux côtés du tracé) à condition qu'elle soit installée sur une certaine distance. Une longueur minimale de 300 m à 1'000 m est à prendre en compte. Plus la valeur est élevée, plus grande est l'efficacité jusqu'à une longueur de 4 à 5 km. Au-delà de 5 km, l'augmentation de l'efficacité devient marginale. Dans les longueurs de 300 m à 1'000 m, cette solution reste intéressante en termes de coûts. Sur de plus grandes distances (> 1 km), elle devient cependant très chère.
- Les mesures économiquement avantageuses sont celles qui sont mises en œuvre de manière ponctuelle sur des secteurs restreints (ordre de grandeur : 100 m).
- Avec le système de transformateur élévateur de tension, une grande amélioration peut être apportée sur les tronçons à une seule voie, du côté opposé à la corde de retour. Pour un emploi ponctuel, le Booster-Transformer permet donc un très bon rapport avantages/coûts.
- Les conducteurs qui présentent les plus grands courants sont aussi ceux qui contribuent le plus à l'émission du champ magnétique. Le fait de câbler ceux-ci, même sur seulement 100 m, améliore grandement la situation. Selon la disposition des câbles, les effets peuvent même être ressentis des deux côtés du tracé. Cette mesure s'avère en revanche très coûteuse. Pour cette raison, la distance câblée devrait être réduite au minimum.
- L'isolation d'un rail dans le sens de la longueur, grâce à des joints isolants, apporte une grande amélioration des deux côtés du tracé. Cette mesure est en soi relativement bon marché, avec toutefois certaines réserves : les joints doivent être changés relativement souvent (écrasement provoqué par le passage des trains) et le bruit généré est important.
- Dans le secteur de la gare, le déplacement de la ligne détournée et l'installation d'une corde de retour supplémentaire se révèlent être une mesure qui présente de grands avantages. Elle est par contre efficace d'un seul côté du tracé et souvent aux dépens de l'autre.
- Dans le secteur de la gare, le câblage de la ligne auxiliaire ou de la ligne détournée apporte une grande amélioration des deux côtés du tracé. Cette mesure a été analysée pour une voie simple. Pour le cas d'une double voie, les mêmes résultats / conclusions restent cependant valables. Dans ce cas, c'est la ligne détournée de la deuxième voie qui est câblée à la place de la ligne auxiliaire (câblage du conducteur qui présente le plus grand courant).
- La déviation du courant de transit de la ligne de contact dans une ligne auxiliaire (aérienne) et un positionnement optimisé de celle-ci (avec conducteur de retour au plus proche) apporte une très grande amélioration, toutefois au dépend du second côté du tracé.
- Le fait de permuter la position la ligne auxiliaire et la ligne détournée dans le secteur de la gare n'apporte pas d'avantages significatifs.
- Le système avec autotransformateur présente de grands avantages, principalement lié au fait que le courant est réduit de moitié par rapport à celui d'un système d'alimentation standard 1x15 kV. Les coûts sont en revanche conséquents, car l'utilisation de ce système oblige une modification de l'ensemble de la section électrique (en règle générale 20-30 km).
- De manière générale, il n'est pas nécessaire de différencier les lignes de contact RFL des NFL : l'efficacité des mesures est pratiquement identique pour les deux systèmes.

### 1.3.2 Mesures avec un bon rapport avantages-coûts

Modèle de référence	Mesure	Coût	Avantage	Effet	Remarque
Voie simple	Installation d'une corde de retour supplémentaire sur 300 m à 1'000 m, proche de la ligne auxiliaire, dans le secteur du LUS (Lieu à Utilisation Sensible).	Bas	Moyen	Des deux côtés	
	Câblage de la ligne auxiliaire sur environ 100 m, dans le secteur du LUS.	Moyen	Élevé	Des deux côtés	
	Isolation des rails dans le secteur du LUS (joints isolants) et déviation du courant dans des cordes de retour sur environ 100 m.	Moyen	Élevé	Des deux côtés	Avec réserve, voir plus haut
	Dans le secteur du LUS, utilisation d'un transformateur élévateur de tension	Moyen	Très élevé	D'un seul côté	
Voie double	Dans le secteur du LUS, installation d'une corde de retour supplémentaire sur 300 m à 1'000 m .	Moyen	Modéré	Des deux côtés	
	Dans le secteur du LUS, détourner le courant de la ligne de contact dans une ligne auxiliaire (aérienne) d'environ 100 m.	Bas	Moyen	D'un seul côté, aux dépens du second	
	Dans le secteur du LUS, détourner le courant de la ligne de contact dans un câble d'environ 100 m.	Moyen	Élevé à très élevé	D'un seul côté, aux dépens du second	
	Isolation des 4 rails dans le secteur du LUS (joints isolants) et déviation du courant dans des cordes de retour sur environ 100 m.	Moyen	Élevé	Des deux côtés	Avec réserve, voir plus haut
	Utilisation d'un autotransformateur sur une section électrique entière	Très élevé	Très élevé	Des deux côtés	Avec réserve, voir plus haut

Modèle de référence	Mesure	Coût	Avantage	Effet	Remarque
Voie simple, en gare	Déplacer la corde de retour existante en direction de la ligne auxiliaire ou détournée.	Bas	Moyen	Des deux côtés	
	Dans tout le secteur de la gare, installation d'une corde de retour supplémentaire proche de la ligne auxiliaire ou détournée.	Bas	Moyen	Des deux côtés	
	Permuter la ligne auxiliaire et la ligne détournée.	Bas	Marginal	D'un seul côté, aux dépens du second	
	Dans le secteur du LUS, câbler la ligne auxiliaire et la ligne détournée sur environ 100 m.	Moyen	Très élevé	Des deux côtés	
Voie double, en gare	Déplacer la corde de retour existante en direction de la ligne détournée.	Bas	Élevé	Des deux côtés	
	Dans tout le secteur de la gare, installation d'une corde de retour supplémentaire proche de la ligne détournée.	Bas	Moyen	Des deux côtés	
	Dans le secteur du LUS, déplacement de la ligne détournée au centre du tracé (et installation de 2 cordes de retour).	Bas	Très élevé	D'un seul côté	
	Modification de la ligne détournée afin qu'un conducteur se trouve de chaque côté du tracé (et installation d'une corde de retour proche de chaque conducteur).	Bas	Très élevé	D'un seul côté, au dépend du second	
	Dans le secteur du LUS, câbler la ligne détournée sur environ 100 m.	Moyen	Très élevé	Des deux côtés	

Tabelle 1-2: Mesures présentant un bon rapport avantages-coûts

Remarque importante: ce classement se base sur la grille d'évaluation développée pour la présente étude. Selon les circonstances et l'environnement spécifiques au projet, il est possible que certaines mesures qui sont ici mal notées se révèlent adaptées (et inversement).

### 1.3.3 Processus pour la définition d'une mesure

Le processus présenté ci-dessous permet de déterminer les mesures visant à réduire le champ magnétique à un endroit critique:

- 1) Définition des conditions-cadres grâce aux questions suivantes:

- a) De quelle disposition des conducteurs s'agit-il (basé sur quel modèle de référence)?
  - b) Le problème se situe-t-il d'un seul côté?
  - c) Si le problème est situé d'un seul côté: est-ce que l'intensité du champ magnétique peut augmenter du second côté?
  - d) Quelles doivent être les effets de la mesure (en %) afin que la valeur limite de l'installation selon l'ORNI soit respectée?
- 2) Grâce aux différentes données rassemblées au point 1), une ou plusieurs mesures peuvent être déterminées grâce aux tableaux présentés dans le chapitre 4 (à partir de la page 43).
  - 3) À l'aide des coûts estimés pour les mesures sélectionnées, il est possible de vérifier si ces mesures sont réalisables dans le budget donné.
  - 4) Les résultats obtenus par ce processus servent de base pour la suite.

## **1.4 Riepilogo**

Diverse disposizioni di conduttori (modelli base) sono stati definiti come riferimento. I modelli base sono:

- 1) Binario singolo, catenaria N-FL
- 2) Binario singolo, catenaria R-FL
- 3) Doppio binario (R-FL)
- 4) Catenaria in stazione, binario singolo
- 5) Catenaria in stazione, doppio binario

Con riferimento a tali tipiche disposizioni dei conduttori (modelli base), vengono analizzate le possibilità tecniche per la riduzione dell'intensità di campo magnetico e la loro efficacia. Per queste analisi, sono stati utilizzati i programmi di calcolo SIMNET per la determinazione della distribuzione di corrente nei conduttori e EMCALC per calcolare l'intensità del campo magnetico. Per ciascuna delle misure proposte, è stata determinata l'efficacia della riduzione dell'intensità di campo magnetico, osservando nel contempo se essa si manifesta su entrambi i lati della linea ferroviaria, su un lato soltanto oppure su un unico lato ma a scapito dell'altro.

L'investimento necessario per la realizzazione di ognuna delle misure analizzate è stimato nella fase successiva. Vengono valutati non soltanto l'investimento economico, ma anche la realizzabilità e l'impatto generale delle misure.

La valutazione comparata dei vantaggi ottenibili a fronte dei relativi costi permette infine di stabilire quali misure abbiano un buon rapporto costi/benefici.

### **1.4.1 Risultati delle simulazioni e valutazioni dei costi**

L'analisi dei risultati della simulazione, relativi ad ogni misura esaminata, porta alle seguenti conclusioni:

- L'ottimizzazione della disposizione del circuito di ritorno determina un vantaggio da medio ad elevato. E' pertanto importante, durante la fase di pianificazione dell'installazione della linea di contatto, prestare attenzione alla disposizione dei conduttori di ritorno. Nota: i risultati mostrano come la posa di una fune di terra il più vicino possibile al filo di contatto, come prescritto al punto 55 e 56 dell'allegato 1 del decreto [1] non permette sempre di ottenere i risultati migliori. Piuttosto, si deve garantire che la fune di terra sia posta il più vicino possibile al conduttore interessato dalla più elevata intensità di corrente, il quale non è necessariamente sempre il filo di contatto, ma può anche essere una linea ausiliaria o la linea di circonvallazione.
- L'installazione di una fune di terra vedi sopra può determinare un vantaggio da medio ad elevato su entrambi i lati della linea ferroviaria, tuttavia richiede che venga posata per una certa distanza. Deve essere presa in considerazione una lunghezza minima di 300 m - 1.000 m, con efficacia maggiore al crescere di tale lunghezza. Fino ad una lunghezza di 4-5 km, l'efficacia continua a crescere, ma, a partire da una lunghezza di 5 km, l'efficacia marginale è minima. Nell'intervallo da 300 a 1.000 m, questa soluzione si dimostra interessante in termini di costo, mentre l'installazione su un intervallo più lungo (> 1 km), presenta dei costi molto elevati.
- Economicamente efficienti sono le misure che vengono utilizzate puntualmente per settori di lunghezza limitata (100 m).
- Per i sistemi a binario singolo, il sistema con trasformatori booster mostra una notevole efficacia nel lato opposto della linea ferroviaria rispetto al quale viene installato. Per un'installazione puntuale, il sistema con trasformatori booster presenta quindi un ottimo rapporto costi/benefici.
- I conduttori interessati dalle correnti maggiori sono quelli che producono la maggior parte del campo magnetico. Il cablaggio del conduttore, anche solo per 100 m, mostra un'efficacia molto elevata. A seconda della disposizione dei cavi, la misura si può dimostrare efficace anche su entrambi i lati della linea ferroviaria. Tuttavia, questa soluzione risulta essere onerosa. A causa dei costi, la linea in cavo deve essere ridotta al minimo.
- L'isolamento di un binario in senso longitudinale (tramite giunti isolati), apporta vantaggi sostanziali su entrambi i lati. Allo stesso tempo, questa soluzione sembra essere relativamente poco costosa. Alcune limitazioni di impiego di tale misura sono però da considerare. Da un lato si può ritenere che i giunti debbano essere sostituiti abbastanza frequentemente nelle rotaie (schiacciamento dei giunti e deformazione dell'estremità delle rotaie causato dal transito dei treni); inoltre, questa misura genera un considerevole inquinamento acustico.
- Nella tratta in stazione, lo spostamento della linea di circonvallazione con contemporanea installazione di una fune di terra supplementare si è dimostrata una soluzione molto efficace. Tuttavia, questa soluzione è efficace solo da un lato, solitamente a scapito dell'altro.
- E' stato esaminato, nella tratta in stazione, il cablaggio della linea ausiliaria o della linea di circonvallazione per una tratta a binario singolo. Per una tratta a doppio binario, sono applicabili le stesse conclusioni; in questo caso la linea di circonvallazione viene cablata al posto di quella ausiliaria (cablaggio dei conduttori percorsi dalla maggiore corrente).
- Il bypass della linea di contatto, con conseguente deviazione della corrente di trazione, tramite una linea ausiliaria (aerea), ed una disposizione ottimizzata degli stessi conduttori (con un conduttore di ritorno), mostra notevole efficacia, ma a scapito dell'altro lato.
- Invertire la posizione della linea ausiliaria e della linea di circonvallazione, nella tratta in stazione, non determina vantaggi significativi.
- Il sistema con autotrasformatore presenta notevole efficacia, principalmente legata al fatto che il valore della corrente risulta essere solo la metà rispetto ad un sistema di alimentazione 1x15 kV convenzionale. Tuttavia, i costi di realizzazione sono notevoli, dal momento che tale soluzione deve essere attuata per l'intera lunghezza di una sezione di alimentazione (di solito 20-30 km).



- Una distinzione tra R-FL e N-FL non è necessaria. L'efficacia delle soluzioni attuate è praticamente identica.

## 1.4.2 Soluzioni che presentano un buon rapporto costi/benefici

Modello base	Misura	Costi	Beneficio	Efficacia	Commento
Linea di contatto, binario singolo	Installazione di un conduttore di ritorno supplementare, di lunghezza fra 300 m e 1'000 m, in prossimità della linea ausiliaria nei settori LUS	Basso	Medio	Da ambedue i lati	
	Cablaggio della linea ausiliaria per una lunghezza di 100 m nei settori LUS	Medio	Elevato	Da ambedue i lati	
	Isolamento di una rotaia nei settori LUS tramite giunti isolanti. Deviazione della corrente nella fune di terra per una lunghezza di 100 m.	Medio	Elevato	Da ambedue i lati	Con riserva, vedi sopra
	Nelle zone LUS installare un sistema booster transformer.	Medio	Molto elevato	Da un lato	
Linea di contatto, binario doppio	Installazione di un conduttore di ritorno supplementare, di lunghezza fra 300 m e 1'000 m, in prossimità della linea ausiliaria nei settori LUS	Medio	Moderato	Da ambedue i lati	
	Nelle zone LUS deviare la corrente della linea di contatto su una linea ausiliaria (aerea) per una lunghezza di 100 m.	Basso	Medio	Da un lato, ma a danno dell'altra parte	
	Nelle zone LUS deviare la corrente della linea di contatto tramite un cavo per una lunghezza di 100 m.	Medio	Elevato , fino a molto elevato	Da un lato, ma a danno dell'altra parte	
	Isolamento delle rotaie nei settori LUS tramite dei giunti isolanti (tutte e 4 le rotaie). Deviazione della corrente nella fune di terra per una lunghezza di 100 m.	Medio	Elevato	Da ambedue i lati	Con riserva, vedi sopra
	Utilizzo di un autotrasformatore per un'intera sezione di alimentazione	Molto Elevato	Molto Elevato	Da ambedue i lati	Con riserva, vedi sopra

Modello base	Misura	Costi	Beneficio	Efficacia	Commento
Linea di contatto in stazione, binario singolo	Spostare i conduttori di ritorno esistenti in direzione della linea ausiliaria o della linea di ritorno	Basso	Medio	Da ambedue i lati	
	Lungo tutta la tratta in stazione, installazione di un conduttore di ritorno supplementare in prossimità della linea ausiliaria o della linea di ritorno	Basso	Medio	Da ambedue i lati	
	Invertire la posizione della linea ausiliaria o della linea di ritorno	Basso	Marginale	Da un lato, ma a danno dell'altro	
	Cablare la linea ausiliaria e la linea di circonvallazione nei settori LUS per una lunghezza di 100 m	Medio	Molto Elevato	Da ambedue i lati	
Linea di contatto in stazione, doppio binario	Spostare il conduttore di ritorno esistente in direzione della linea di ritorno	Basso	Elevato	Da ambedue i lati	
	Lungo tutta la tratta in stazione, installazione di un conduttore di ritorno supplementare in prossimità della linea di ritorno	Basso	Medio	Da ambedue i lati	
	Nelle zone LUS, spostamento della linea di circonvallazione al centro della tratta (e installazione di due funi di terra)	Basso	Molto Elevato	Da un lato	
	Spostamento della linea di circonvallazione in modo che un conduttore si trovi da ciascun lato della linea (e installazione di due funi di terra)	Basso	Molto Elevato	Da un lato, ma a danno dell'altro	
	Cablaggio della linea ausiliaria e della linea di circonvallazione nei settori LUS per una lunghezza di 100 m	Medio	Molto Elevato	Da ambedue i lati	

Tabelle 1-3: Soluzioni che presentano un buon rapporto costi/benefici

Importante: questa valutazione si basa sulla scala di valutazione sviluppata per il presente studio. Si può ipotizzare che in taluni casi (specifiche condizioni) alcune soluzioni possano risultare meno opportune (o viceversa).

### 1.4.3 Procedimento per la definizione delle soluzioni

La valutazione delle misure appropriate per ridurre l'intensità del campo magnetico può essere affrontata secondo il seguente schema:

- 1) Definizione delle condizioni generali in base alle seguenti domande:
  - a) Di quale configurazione si tratta (quale dei modelli di base è applicabile)?
  - b) Il problema è riscontrato soltanto da un lato?
  - c) In caso di problema unilaterale: è possibile aumentare l'intensità del campo magnetico dal lato opposto?
  - d) Quanta dovrebbe essere la riduzione del campo magnetico a causa delle misure adottate (in%) per garantire che il limite delle esposizioni prescritto in ORNI [1] venga rispettato?
- 2) Utilizzando i dati raccolti al punto è possibile determinare una o più misure da adottare, utilizzando le tabelle nel capitolo 4 (da pagina 43).
- 3) In base alla stima dei costi per ciascuna delle misure, risulta possibile verificare se dette misure sono realizzabili nei limiti del budget.
- 4) I risultati ottenuti costituiscono una base per ulteriori valutazioni.

## 2 ALLGEMEINES

### 2.1 Vorgehen

Ziel ist es, anhand typischer Fahrleitungsanordnungen der Schweiz den Nutzen von möglichen technischen Massnahmen zur Reduzierung der nichtionisierenden Strahlung aufzuzeigen und die dabei notwendigen Kosten abzuschätzen. Daraus können anschliessend Massnahmen mit gutem Nutzen/Kosten-Verhältnis abgeleitet werden.

#### 2.1.1 Aufzeigen Nutzen

Der Nutzen ist im vorliegenden Bericht definiert als "Reduktion der magnetischen Flussdichte an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN)". In einem ersten Schritt werden geeignete typische Fahrleitungsanordnungen (Basismodelle) als Ausgangslage definiert. Die ausführliche Erläuterung zur Herleitung dieser Basismodelle ist in Kapitel 2.3 zu finden. Die dabei definierten Basismodelle sind:

- 1) Einspur-Fahrleitung:
  - a) N-FL mit Hilfsleitung
  - b) R-FL mit Hilfsleitung
- 2) Doppelspur-Fahrleitung
  - a) R-FL ohne Hilfsleitung
- 3) Bahnhofsfahrleitung
  - a) einer Einspurstrecke, mit Umgehungsleitung
  - b) einer Doppelspurstrecke, mit Umgehungsleitungen

Es wird hier davon ausgegangen, dass sämtliche Fahrleitungstypen mit Rückleiterseilen ausgerüstet sind (Stand der Technik, gefordert durch NISV [1]). Diese typischen Fahrleitungsanordnungen werden anschliessend in der Mehrleitersimulations-Software SIMNET der ENOTRAC modelliert (Beschreibung Kapitel 2.7). Hierbei werden weitere wichtige Einflussgrössen wie der eingespeiste Strom, die Länge des Speiseabschnitts, das Kettenwerk, das Gleis, die Übergänge gegen Erde oder die Beschaffenheit der Erde mit realistischen Werten festgelegt. Eine wichtige Grundlage für die Bestimmung dieser Parameter lieferten unter anderem die von ENOTRAC im Jahr 2002 durchgeführten Studien für das BAV, insbesondere der Bericht [4] über die Sensitivitätsanalyse.

Für diese typischen Anordnungen (Basismodelle) wurden anschliessend Einflussfaktoren (denkbare Massnahmen) zur Reduktion der Magnetfeldbelastung, wie die Lage der Leiter, die Leiterquerschnitte, Zusatzleiter, Speisesystem, Verkabelung, Rückleiter, Gleisunterbrüche hinsichtlich deren Nutzen untersucht. Die einzelnen Massnahmen sind in Kapitel 2.4 näher erläutert. Grundsätzlich geht es darum, die örtlichen Lagen der Strömflüsse so zu verändern, dass die resultierenden Magnetfelder minimal werden. Für diese Untersuchungen kommen die Berechnungsprogramme SIMNET für die Bestimmung der Stromverteilung und EMCALC für die Berechnung der Magnetfeldstärke zur Anwendung. Beide Simulationstools sind mehrfach durch Messungen validiert und eine Beschreibung findet sich in Kapitel 2.7.

Das Ergebnis der Berechnungen wird einerseits für jede untersuchte Variante grafisch (Vergleich der ISO-Linien mit/ohne Massnahme) aufgeführt und andererseits der Nutzen gegenüber dem Basismodell in Prozent in einer Tabelle aufgezeigt.

Zur einheitlicheren Beurteilung und besseren Vergleichbarkeit wird der Nutzen jeder Massnahme, also die Reduktion der Magnetfeldbelastung gegenüber dem Basismodell, mittels eines Bewertungssystems klassifiziert. Diese Klassifizierung bildet die Basis zur Bildung der Kosten- und Nutzen-Analyse.

## **2.1.2 Ermitteln Aufwand**

Für jede der betrachteten Massnahmen wird in einem nächsten Schritt der für die Realisierung erforderliche Aufwand geschätzt. Im Aufwand werden einerseits die Kosten berücksichtigt, jedoch werden auch die Umsetzbarkeit oder sonstige Rahmenbedingungen diskutiert. Die Kosten werden anhand von Erfahrungswerten aus der Praxis bestimmt.

## **2.1.3 Ableiten Massnahmen mit gutem Nutzen/Kosten-Verhältnis**

Die Zusammenführung des ermittelten Nutzens und der Kosten zeigt schlussendlich, welche der Massnahmen technisch gut und auch wirtschaftlich vertretbar sind. Diese Erkenntnisse liefern die Basis für die erarbeiteten Schlussfolgerungen.

## **2.2 Theoretische Grundlagen**

Ein Strom durchflossener Leiter verursacht ein elektromagnetisches Feld. Die Grösse des Feldes ist abhängig von der Stromstärke und der Distanz zum Leiter. Bei Fahrleitungen fliesst der Hinstrom durch eben die Oberleitung (Kettenwerk bestehend aus Fahrdrabt und Tragseil) und der Rückstrom durch das Geleise und die Erde. Die Feldkomponenten der einzelnen Leiter führen zu einem resultierenden Magnetfeld. Dabei führen die Hinströme und Rückströme zu einer teilweisen Kompensation. Bei der ganzen Situation nicht veränderbar sind einerseits die örtlichen Lagen des Kettenwerks und der Schienen. Beeinflussbar ist hier hingegen, wie viel Strom in diesen Leitern fliesst. Durch geeignete Massnahmen können diese Ströme auch in anderen Leitern an anderen örtlichen Lagen (beispielsweise als Kabel im Boden) geführt werden.

Nebst dem Kettenwerk und den Schienen sind in der Regel noch weitere Leiter an der Stromübertragung respektive Rückführung beteiligt. Als Beispiele dafür gelten Speiseleitungen, Umgehungsleitungen, Hilfsleitungen, Verstärkungsleitungen, Rückleiterseile, Rückleiter oder Kabelschirme. Diese Leiter lassen sich in ihrer Lage und die Verbindungen mit dem Hinleiter- und Rückleitersystem derart anordnen, dass die resultierende Magnetfeldstärke minimiert oder verlagert wird.

## 2.3 Wahl der Basismodelle

Die Basismodelle sollen typische Fahrleitungsanordnungen, wie sie in der Schweiz auftreten, abdecken. Der Fokus liegt hier bei Standard-Anordnungen – es wird hier explizit nicht auf Sonderlösungen oder spezielle Anordnungen eingegangen.

In der Schweiz sind die Bahnstrecken grösstenteils als Einspur- oder Doppelspurstrecken ausgeführt, weshalb bei der vorliegenden Untersuchung der Fokus auch auf diesen beiden Streckentypen liegt.

Des weitern wird zwischen Strecken- und Bahnhofsfahrleitungen unterschieden. Während bei den Streckenfahrleitungen sich der Hinstrom auf das Kettenwerk und allfällige Hilfsleitungen verteilt, fliesst im Bereich der Bahnhofsfahrleitung der Strom primär in den Umgehungsleitungen. Zudem wird in vorliegender Untersuchung bei den Bahnhofsfahrleitungen zwischen zwei Bereichen unterschieden:

- 1) Der Bahnhofsbereich selbst, welcher meist als mehrgleisige Anlage ausgeführt ist. Der Bahnhof weist in der Regel mehr Gleise auf als die eigentliche Strecke. Dementsprechend bleibt für die Anordnung von Leitern (wie die Umgehungsleitungen) hier mehr Raum zur Verfügung.
- 2) Der Bereich zwischen der Ausfahr- respektive Einfahrweiche und der Streckentrennung zwischen Bahnabschnitt und Streckenabschnitt. In diesem Bereich verfügt die Fahrleitungsanlage bereits über die gleiche Anzahl der Gleise und Anordnung der Leiter wie auf der anschliessenden Strecke. Der Abschnitt befindet sich jedoch noch im Bahnhofsbereich, in welchem der Hauptstrom in den Umgehungsleitungen fliesst.

Der Abschnitt 2 ist bei Nachweisen gemäss NISV [1] meist der problematischere, da sich einerseits in diesem Bereich häufig auf beiden Seiten der Gleise OMEN befinden und andererseits gegenüber dem Bahnhofsbereich weniger Raum besteht, um die Leiterführung der Strom führenden Umgehungsleitungen anzupassen. Der Bahnhofsbereich selbst ist wegen der grösseren Anzahl Gleise in der Regel relativ breit ausgeführt, weshalb hier die Einhaltung der NISV [1] durch eine optimierte Leiterführung meist gelöst werden kann. Aus diesem Grund liegt der Fokus in der vorliegenden Studie bei Bahnhöfen beim Bereich 2. Da im Bahnhofsbereich der Hauptteil des Stromes in den Umgehungsleitungen fliesst, spielt grundsätzlich die Konfiguration der Oberleitung (Fahrdraht, Tragseil) eine untergeordnete Rolle. Jedoch fliesst bei der Einspurstrecke mit N-FL ein grösserer Strom in den Hilfsleitungen als bei R-FL (und somit weniger in der Umgehungsleitung), weshalb eine unsymmetrischere Belastung zwischen Hilfs- und Umgehungsleitung zu erwarten ist. Aus diesem Grund wurde im Modell für die Simulationen der Bahnhofsfahrleitung mit Einspur von einer N-FL und für Doppelspur von einer R-FL ausgegangen.

Bei den Einspurstrecken wird davon ausgegangen, dass jeweils eine Hilfsleitung vorhanden ist. Diese Konfiguration ist bei vielen Einspur-Bahnen anzutreffen, da mit lediglich einem Fahrdraht und einem Tragseil die Stromtragfähigkeit des Fahrleitungssystems zu gering ist und vor allem auch eine Bypassmöglichkeit zur Fahrleitung geschaffen werden soll.

Zudem wird in der vorliegenden Studie bei den Einspurstrecken zwischen einer N-FL (Tragseil 50 Staku, einem rund 6 mal schlechteren elektrischen Leiter im Vergleich zum Fahrdraht) und einer R-FL (Tragseil 92 Staku, ähnlich guter elektrischer Leiter wie der Fahrdraht) unterschieden, da hier der Einfluss des Tragseils auf die Stromverteilung (insbesondere auf die Hilfsleitung) und somit auf das magnetische Feld einen wesentlichen Einfluss hat. Bei der Doppelspurstrecke als auch den Bahnhofsfahrleitungen wird nicht zwischen R-FL und N-FL unterschieden, weil hier in der Regel keine Hilfsleitung vorhanden ist bzw. der Strom in der Fahrleitung gering ist (fliesst über die Umgehungsleitung). Bei diesen Modellen wird von einer R-FL ausgegangen.

Aus oben stehenden Überlegungen ergeben sich für die Betrachtungen die folgenden Basismodelle:





- Strombelastung reduzieren und somit direkt die Magnetfeldbelastung senken. Zum Beispiel durch Ändern des Speisesystems oder Umgestaltung des Energieversorgungsnetzes (was allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist).
- Kombination der oben aufgeführten Absätze.

#### **2.4.1.1 Ändern der Lage der Leiter**

Wie bereits eingangs dieses Kapitels erwähnt, sind die Lage von Schienen und Kettenwerk grundsätzlich gegeben. Änderbar sind die Lage von beispielsweise Rückleiterseilen oder Hilfs-, Speise- oder Umgehungsleitungen. Dabei sind im Grundsatz zwei Varianten denkbar:

- 1) Verschieben von Strom führenden Leitern weg von Orten mit empfindlicher Nutzung. Beispielsweise eine Umgehungsleitung vom Rand in die Mitte des Bahntrassees versetzen oder als Kabel in den Boden verlegen.
- 2) Verschieben von Strom führenden Rückleitern möglichst nahe zu den Strom führenden Hinleitern, wie beispielsweise die Rückleiterseile anstelle auf Höhe Fahrleitung nahe an die Hilfs- oder Umgehungsleitungen installieren.

#### **2.4.1.2 Erhöhung Leiterquerschnitte**

Durch die Erhöhung des Leiterquerschnittes (entweder durch einen Ersatz von beispielsweise 95 mm<sup>2</sup> Cu auf 150 mm<sup>2</sup> Cu oder durch die Erhöhung von 1x95 mm<sup>2</sup> Cu auf 2x95 mm<sup>2</sup> Cu) wird die Stromverteilung innerhalb des Fahrleitungssystems zugunsten des verstärkten Leiters beeinflusst.

Dadurch dass einerseits die Schienen elektrisch gute Leiter darstellen und andererseits ein Grossteil des Rückstromes durch die Erde fliesst, bleibt in den Rückleiterseilen, welche durch ihre Nähe die Felder von Fahr- und allfälligen Hilfs-, Speise- oder Umgehungsleitungen kompensieren sollen, meist ein verhältnismässig geringer Strom. Um einen grösseren Anteil des Rückstroms in den Rückleiterseilen zu führen, ist in einem gewissen Mass die Erhöhung des Leiterquerschnittes sinnvoll. Zudem ist eine möglichst nahe Anbringung zu den Strom führenden Hinleitern anzustreben (d.h. unter Umständen Ändern der Lage der Leiter), damit durch die magnetische Kopplung ein möglichst grosser Strom in den Rückleiterseilen fliessen kann, was wiederum die Kompensation der magnetischen Felder begünstigt.

#### **2.4.1.3 Stromfluss in einem exponierten Leiter unterbrechen**

Wie mehrfach gesagt, sind Lage von Schienen und Kettenwerk gegeben. Die in diesen Leitern fliessenden Ströme erzeugen ein Magnetfeld. Dadurch dass Fahrleitung und Schiene systembedingt relativ weit auseinander liegen, ist die Kompensation der Felder nicht optimal.

Wird ein Leiter, wie die Schiene, elektrisch unterbrochen und gleichzeitig der Stromfluss des Leiters auf einen Alternativpfad umgeleitet, welcher sich näher zu den Strom führenden Gegenleitern befindet, kann eine bessere Kompensation erreicht werden. Dieses Prinzip kann auf das Kettenwerk wie auch auf die Schienen angewendet werden. Jedoch ist diese Massnahme nur punktuell (wenige 100 m) wirksam und nicht über eine weite Strecke.

#### 2.4.1.4 Einsatz von Booster-Transformatoren

Mit dem Einsatz von sogenannten Booster-Transformatoren wird versucht, den in der Erde fliessende Rückstrom möglichst im Rückleittersystem der Bahn zu halten. Booster-Transformatoren sind einphasig und mit einem Übersetzungsverhältnis 1:1 ausgeführt und werden zwischen dem Oberleitungssystem (Hinstrom) und den Schienen oder den Rückleiterseilen (Rückstrom) geschaltet. Zum Prinzip siehe nachfolgende Skizze:

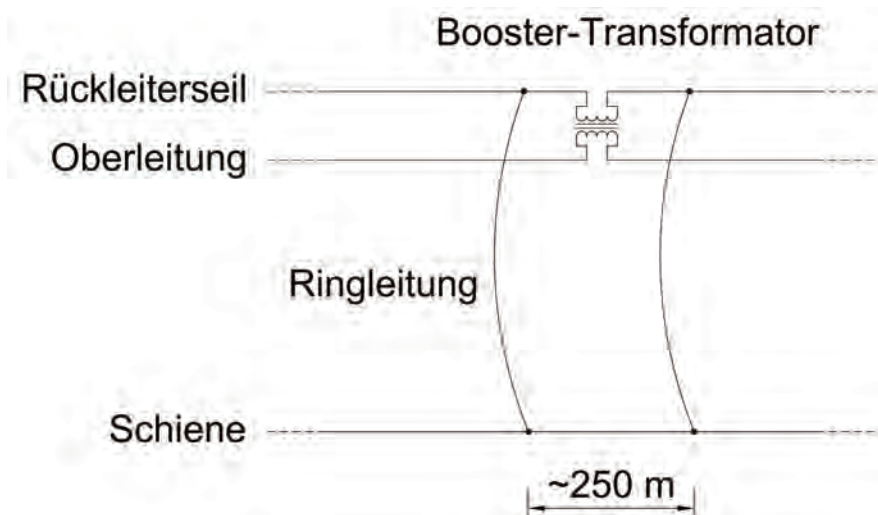


Abbildung 2-1: Prinzip Booster-Transformator

Im Sinne der besseren Kompensation der magnetischen Feldbelastung wird hier als Massnahme ein Booster-Transformator zwischen Fahrleitung und Rückleittersystem betrachtet. Durch den Booster-Transformator wird der Rückstrom gezwungen, auf den rund 250 m zwischen den beiden Rückleiterquerverbindungen vor und nach dem Booster-Transformator in den Rückleiterseilen zu fließen. Dadurch können die beiden Strompfade für Hin- und Rückstrom nahe zueinander geführt werden, was eine bessere Kompensation der Magnetfelder bringt. Da im Bereich zwischen den beiden Rückleiterquerverbindungen der ganze Strom im Rückleiterseil fliesst, muss in diesem Bereich zusätzlich zum Booster-Transformator das Rückleiterseil verstärkt werden (Rückleiterseile müssen zusammen eine ähnliche Stromtragfähigkeit aufweisen, wie die Oberleitung).

In der Schweiz steht ein solches System noch nicht im Einsatz. In anderen Ländern werden Booster-Transformator-Systeme jedoch bereits zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) zu Sicherungsanlagen verwendet.

#### 2.4.1.5 Umsetzen eines Autotransformator-Systems

Die Traktions-Energieversorgung über das Autotransformator-System wird in der Regel bei sehr grossen Unterwerks-Abständen eingesetzt. Im Gegensatz zum "konventionellen" Einphasen-System im Bahnbereich erfolgt hierbei die Versorgung mit beispielsweise 2x15 kV (+/- 15 kV, zueinander 180 ° phasenverschoben). Eine Phase wird auf die Fahrleitung gelegt und die andere über einen sogenannten Negativ-Feeder geführt. In regelmässigen Abständen befinden sich Autotransformatoren, welche zwischen die beiden Leiter geschaltet werden. Dadurch wird gegenüber dem Einphasen-System eine Verdoppelung der Speisespannung erreicht, wobei die Ströme in der Fahrleitung (Hinstrom) und im Negativ-Feeder (Rückstrom) fließen.

Diese Speiseart bringt hinsichtlich der magnetischen Belastung die folgenden Vorteile:

- a) Dadurch, dass mit 2x15 kV eine doppelte Spannung vorliegt, fliesst bei gleichem Leistungsbedarf (gleicher Betrieb) nur der halbe Strom. Somit ist die magnetische Feldbelastung auch entsprechend kleiner.
- b) Dadurch, dass die Rückstromführung vorwiegend im Negativ-Feeder erfolgt (nur im Abschnitt zwischen zwei Autotransformatoren, in welchem sich ein Zug befindet, fliesst ein Strom in den Schienen) und dabei der Negativ-Feeder relativ nahe an die Fahrleitung angeordnet werden kann, wird eine bessere Kompensation der magnetischen Felder als beim herkömmlichen Einphasen-System erreicht.

Grundsätzlich ist für einen sauberen Vergleich des Autotransformator-Systems mit Fahrleitungs-Anordnungen des 1x15 kV-Systems der angewendete Ansatz mit dem massgebenden Strom nur bedingt anwendbar. Der massgebende Strom steht im Prinzip stellvertretend für die Belastung beim OMEN für einen bestimmten Betrieb. Bei sämtlichen der untersuchten Szenarien mit 1x15 kV resultiert beim OMEN für einen bestimmten Betrieb jeweils der gleiche massgebende Strom. Da sich nun beim Autotransformator-System der Lastfluss entlang der Strecke bei gleichem Betrieb anders verteilt als beim herkömmlichen 1x15 kV, ist ein 1:1-Vergleich über den gewählten Ansatz mit dem massgebenden Strom nur bedingt aussagekräftig. Für einen fairen Vergleich wären dynamische Lastflussrechnungen erforderlich, damit der Einfluss der betrieblichen Aspekte auf die Strombelastung und somit die Magnetfeldbelastung beim OMEN in beiden Fällen gleich berücksichtigt wird. Jedoch hat der reduzierte Strom aufgrund der doppelten Spannung einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Magnetfeldbelastung als der genannte Aspekt, weshalb für die vorliegenden Betrachtungen ein vereinfachter Ansatz ausreicht (ohne Lastflusssimulationen).

Damit diesem genannten betrieblichen Unterschied Rechnung getragen wird, wurde für die vorliegende Studie folgender Ansatz verwendet: Ein Autotransformator ist jeweils bei der Einspeisung (km 2.000), in der Mitte (km 7.000) und am Ende (km 12.000) platziert. Das OMEN liegt, analog zu den anderen Modellen, bei km 6.775 (siehe auch Abbildung 3-3). Da es beim Autotransformator-System für die Stromverteilung stark darauf ankommt, wo sich die Last im Vergleich zum Autotransformator befindet, wird angenommen, dass im zeitlichen Mittel sich 50 % der Last vor km 7.000 und 50 % der Last danach befinden. So wird für 2 verschiedene Standorte der Last (km 6.000 und km 8.000) die Magnetfeldbelastung am OMEN berechnet und anschliessend aus beiden der Mittelwert gebildet.

Anmerkung: in der Schweiz ist zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Studie noch keine Bahnlinie mit Autotransformator-System elektrifiziert. Geplant ist von der SBB, ein solches System zwischen Cadenazzo (Bellinzona / Giubiasco) und Luino zu realisieren.

### 2.4.1.6 Strombelastung reduzieren

Durch die Reduktion der Strombelastung im Fahrleitungssystem wird direkt auch die Magnetfeldbelastung gesenkt. Eine solche Reduktion kann unterschiedlich erfolgen:

- **Spannungserhöhung:** Durch das Erhöhen der Netzspannung zum Beispiel von 11 kV auf 15 kV oder von 15 kV auf 25 kV resultieren entsprechend kleinere Ströme. Dies ist jedoch bei einer bestehenden Infrastruktur, wie in der Schweiz, nicht realistisch.
- **Transfer- /Transit-Ströme unterbinden:** bei einem doppelseitig versorgten Speiseabschnitt fliessen häufig Transferströme. Durch Einbau einer Schutzstrecke (ändern der Netzstruktur!) können diese Ströme unterbunden werden. Dies jedoch mit dem Nachteil, dass einerseits eine schlechtere Spannungshaltung resultiert und andererseits ein aus anderen Gründen eben gewünschte Leistungsaustausch nicht mehr möglich ist.

- **Betriebsströme reduzieren:** durch eine Reduzierung des Verkehrs auf einem betrachteten Abschnitt nehmen auch die Ströme und somit die Magnetfeldbelastung ab. Dies kann zum Beispiel direkt durch eine Reduktion des Angebotes erfolgen, was in heutiger Zeit aber eher eine undenkbbare Massnahme ist. Aber auch durch Energie-effizientes Rollmaterial kann eine Reduktion der Betriebsströme erzielt werden. Anmerkung: heute findet tendenziell eher eine Zunahme der Betriebsströme statt – also eigentlich das Gegenteil.

## 2.4.2 Untersuchte Massnahmen

Bemerkung zur gewählten Reihenfolge und Bezeichnung der Varianten/Massnahmen: die Bezeichnung der Massnahmen erfolgt in der Reihenfolge, in welcher die Berechnungen durchgeführt worden sind. Die gewählte Reihenfolge in den Tabellen und Grafiken entspricht jedoch der logischen Zusammengehörigkeit (und nicht der chronologischen).

### 2.4.2.1 Einspurfahrleitung N-FL

Varianten ID	Massnahme	Erläuterung
ES_NFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	Zum bestehenden Rückleiter 95 mm <sup>2</sup> Cu wird auf Höhe Hilfsleitung ein zusätzliches Rückleiterseil 150 mm <sup>2</sup> Cu installiert.
ES_NFL_06	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	Wie bei ES_NFL_01  Zur Länge: Grenznutzenberechnungen haben gezeigt, dass eine sinnvolle installierte Länge im Bereich von 300 m bis 1 km liegt.
ES_NFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	Wie bei ES_NFL_01  Zur Länge: Grenznutzenberechnungen haben gezeigt, dass eine sinnvolle installierte Länge im Bereich von 300 m bis 1 km liegt.
ES_NFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	Die als Freileitung ausgeführte Hilfsleitung wird verkabelt und in den Boden verlegt. Es wird ein 400 Cu / 30 Cu Kabel berücksichtigt sowie ein parallel verlegtes Rückleiterkabel 1x150 mm <sup>2</sup> Cu. Die Verkabelung erfolgt lediglich auf einer Länge von 100 m (ca. 2 Mastabstände)
ES_NFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	Wie bei ES_NFL_03 jedoch über eine Länge von 300 m.
ES_NFL_05	Schienen Isolieren (Gleisunterbrüche)	Beide Schienen sind beim OMEN unterbrochen, wobei mit 2x150 mm <sup>2</sup> Cu Rückleiterseilen nahe an der Hilfsleitung der Alternativpfad gebildet wird. Dies über eine Länge von 100 m.

Tabelle 2-1: Erläuterung der mit Simulationen untersuchten Massnahmen für die Einspurstrecke N-FL

## 2.4.2.2 Einspurfahrleitung R-FL

Varianten ID	Massnahme	Erläuterung
ES_RFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	Zum bestehenden Rückleiter 95 mm <sup>2</sup> Cu wird auf Höhe Hilfsleitung ein zusätzliches Rückleiterseil 150 mm <sup>2</sup> Cu installiert.
ES_RFL_07	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, 1 km	Wie bei ES_RFL_01 Zur Länge: Grenznutzenberechnungen haben gezeigt, dass eine sinnvolle installierte Länge im Bereich von 300 m bis 1 km liegt.
ES_RFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	Wie bei ES_RFL_01 Zur Länge: Grenznutzenberechnungen haben gezeigt, dass eine sinnvolle installierte Länge im Bereich von 300 m bis 1 km liegt.
ES_RFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	Die als Freileitung ausgeführte Hilfsleitung wird verkabelt und in den Boden verlegt. Es wird ein 400 Cu / 30 Cu Kabel berücksichtigt sowie ein parallel verlegtes Rückleiterkabel 1x150 mm <sup>2</sup> Cu. Die Verkabelung erfolgt lediglich auf einer Länge von 100 m (ca. 2 Mastabstände),
ES_RFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	Wie bei ES_RFL_03 jedoch über eine Länge von 300 m.
ES_RFL_05	Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km	Wie bei ES_RFL_03 jedoch über eine Länge von 10'000 m (gesamte Modelllänge).
ES_RFL_06	Booster-Transformator, Länge 250 m	Beim OMEN wird ein Booster-Transformator zwischen Fahrleitung und Rückleiterseil geschaltet. Zusätzlich wird im Bereich des Booster Transformators (~250 m) das Rückleiterseil verstärkt (siehe auch Kapitel 2.4.1.4 ).

Tabelle 2-2: Erläuterung der mit Simulationen untersuchten Massnahmen für die Einspurstrecke R-FL

### 2.4.2.3 Doppelspur-Fahrleitung

Varianten ID	Massnahme	Erläuterung
DS_RFL_01	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 5 km	Zum bestehenden Rückleiter 95 mm <sup>2</sup> Cu wird ein zusätzliches Rückleiterseil 150 mm <sup>2</sup> Cu installiert.
DS_RFL_08	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km	Wie bei DS_RFL_01 Zur Länge: Grenznutzenberechnungen haben gezeigt, dass eine sinnvolle installierte Länge im Bereich von 300 m bis 1 km liegt.
DS_RFL_02	Fahrleitung Gleis 1 mit Hilfsleitung (als Freileitung) überbrückt (Länge: 100 m)	Die Fahrleitung eines Gleises wird längs mit einem Streckentrenner elektrisch getrennt. Die Überbrückung erfolgt je 50 m vor und nach dem Trenner über eine Hilfsleitung 2x95 mm <sup>2</sup> Cu. Zusätzlich wird ein Rückleiterseil 1x150 mm <sup>2</sup> in die Nähe zur Hilfsleitung angebracht.
DS_RFL_03	Fahrleitung Gleis 1 mit Kabelleitung überbrückt, Kabel links von Gleis 1 platziert (Länge: 100 m)	Wie bei DS_RFL_02, jedoch erfolgt die Überbrückung mittels 400 mm <sup>2</sup> / 30 mm <sup>2</sup> Cu Kabel mit Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu. Angeordnet wird die Kabelleitung im Boden links von Gleis 1.
DS_RFL_04	Fahrleitung Gleis 1 mit Kabelleitung überbrückt, Kabel rechts von Gleis 2 platziert (Länge: 100 m)	Wie bei DS_RFL_03, jedoch erfolgt die Führung auf der anderen Trasseeseite rechts von Gleis 2.
DS_RFL_05	Fahrleitung Gleis 1+2 mit Kabelleitung überbrückt, Kabel links von Gleis 1 platziert (Länge: 100 m)	Wie DS_RFL_03, jedoch werden beide Fahrleitungen überbrückt. Die Führung der Kabel erfolgt im Boden auf der linken Seite von Gleis 1.
DS_RFL_06	Schienen unterbrochen (alle vier Schienen), mit 4 mal 150 mm <sup>2</sup> Cu Rückleiterseilen über 100 m überbrückt	Alle 4 Schienen sind beim OMEN unterbrochen, wobei mit je Seite 2x150 mm <sup>2</sup> Cu Rückleiterseilen nahe an der Fahrleitung der Alternativpfad gebildet wird. Dies über eine Länge von 100 m.
DS_RFL_07	Autotransformatorsystem (Negativ-Feeder)	Es wird ein Autotransformatorsystem +/- 15 kV mit 2 Sektoren (3 Autotransformatoren) berücksichtigt (siehe auch Kapitel 2.4.1.5).

Tabelle 2-3: Erläuterung der mit Simulationen untersuchten Massnahmen für die Doppelspur-Fahrleitung



#### 2.4.2.4 Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke

Varianten ID	Massnahme	Erläuterung
BHF_ES_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Hilfs-/ und Umgehungsleitungen	Zum bestehenden 95 mm <sup>2</sup> Cu wird auf Höhe Hilfs-/ und Umgehungsleitung ein zusätzliches Rückleiterseil 150 mm <sup>2</sup> Cu installiert.  Dieses zusätzliche Rückleiterseil wird nur im Bereich des Bahnhofs angebracht (900 m).
BHF_ES_02	Bestehender Rückleiter (95 mm <sup>2</sup> Cu) in die Nähe der Umgehungsleitungen verschieben	Der bestehende Rückleiter (1x95 mm <sup>2</sup> Cu), welcher auf Fahrdrathöhe angebracht ist, wird zu den Strom führenden Leitern der Hilfs- und Umgehungsleitung verschoben.
BHF_ES_03	Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung	Die Stromverteilung zwischen Umgehungs- und Hilfsleitung ist nicht gleich. Aus diesem Grund wird die Lage der beiden Leiter vertauscht (links / rechts).
BHF_ES_04	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, über den ganzen Bahnhofs-bereich (900 m)	Die Hilfs- und Umgehungsleitung werden je mit 2x240 mm <sup>2</sup> Cu / 47 mm <sup>2</sup> Al über die ganze Bahnhofs-länge von 900 m verkabelt. Parallel dazu wird je Kabel ein Rückleiter 1x95 mm <sup>2</sup> Cu geführt.  Die Kabel werden links des Gleises platziert.
BHF_ES_05	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, nur über 100 m	Wie BHF_ES_04, jedoch nur für 100 m verkabeln (ca. 2 Mastabstände).

Tabelle 2-4: Erläuterung der mit Simulationen untersuchten Massnahmen für die Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke

#### 2.4.2.5 Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke

Varianten ID	Massnahme	Erläuterung
BHF_DS_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	Zum bestehenden 95 mm <sup>2</sup> Cu wird auf Höhe Umgehungsleitung ein zusätzliches Rückleiterseil 150 mm <sup>2</sup> Cu installiert.  Dieses zusätzliche Rückleiterseil wird nur im Bereich des Bahnhofs angebracht (900 m).
BHF_DS_02	Bestehende Rückleiter (95 mm <sup>2</sup> Cu) in die Nähe der Umgehungsleitungen verschieben	Die bestehenden Rückleiter (2x95 mm <sup>2</sup> Cu), welche auf Fahrdrathöhe angebracht sind, werden zu den Strom führenden Leitern der Umgehungsleitung verschoben.
BHF_DS_03	Verschieben Umgehungsleitungen: Trasseemitte (inkl. zusätzlicher Rückleiter)	Die auf den Masten auf der linken Seite des Bahntrassees verlaufenden Umgehungsleitungen werden in die Mitte zwischen Gleis 1 und 2 versetzt.  Zusätzlich werden bei den Umgehungsleitungen 2 zusätzliche Rückleiterseile (je 150 mm <sup>2</sup> Cu) angebracht.
BHF_DS_04	Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine Umgehungsleitung	Um die Last auf beide Seiten des Trassees aufzuteilen, wird pro Seite eine Umgehungsleitung geführt.

Tabelle 2-5: Erläuterung der mit Simulationen untersuchten Massnahmen für die Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke



## 2.5 Übersicht der durchgeführten Simulationen

Varianten ID	Massnahme	Simulations-ID <sup>1</sup>
<b>Einspur-Fahrleitung N-FL</b>		
<b>ES_NFL_00</b>	<b>Basismodell</b>	r_p240p07m001v02_1_130725_192201
ES_NFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	r_p240p07m001v03_111_130826_161540
ES_NFL_06	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	r_p240p07m001v03_111_130826_164848
ES_NFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	r_p240p07m001v02_97_130730_090012
ES_NFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	r_p240p07m001v02_98_130730_090033
ES_NFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	r_p240p07m001v02_99_130730_090051
ES_NFL_05	Schienen Isolieren (Gleisunterbrücke)	r_p240p07m001v03_106_130809_092402
<b>Einspur-Fahrleitung R-FL</b>		
<b>ES_RFL_00</b>	<b>Basismodell</b>	r_p240p07m001v02_8_130725_192244
ES_RFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	r_p240p07m001v03_107_130821_160238
ES_RFL_07	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, 1 km	r_p240p07m001v03_107_130821_160058
ES_RFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	r_p240p07m001v02_100_130730_090116
ES_RFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	r_p240p07m001v02_13_130726_181733
ES_RFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	r_p240p07m001v02_15_130725_192341
ES_RFL_05	Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km	r_p240p07m001v02_18_130725_192406
ES_RFL_06	Booster-Transformator	r_p240p07m001v03_114_130927_09032
<b>Doppelspurfahrleitung R-FL</b>		
<b>DS_RFL_00</b>	<b>Basismodell</b>	r_p240p07m001v02_19_130725_192424
DS_RFL_01	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 5 km	r_p240p07m001v02_21_130725_192451
DS_RFL_08	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km	r_p240p07m001v03_108_130821_170854
DS_RFL_02	Fahrleitung Gleis 1 mit Hilfsleitung (als Freileitung) überbrückt (Länge: 100 m)	r_p240p07m001v02_22_130730_104120
DS_RFL_03	Fahrleitung Gleis 1 mit Kabelleitung überbrückt, Kabel links von Gleis 1 platziert (Länge: 100 m)	r_p240p07m001v02_101_130730_090132
DS_RFL_04	Fahrleitung Gleis 1 mit Kabelleitung überbrückt, Kabel rechts von Gleis 2 platziert (Länge: 100 m)	r_p240p07m001v02_102_130730_090152
DS_RFL_05	Fahrleitung Gleis 1+2 mit Kabelleitung überbrückt, Kabel links von Gleis 1 platziert (Länge: 100 m)	r_p240p07m001v02_104_130730_090234
DS_RFL_06	Schienen unterbrochen (alle vier Schienen), mit 4 mal 150 mm <sup>2</sup> Cu Rückleiterseil über 100 m überbrückt	r_p240p07m001v03_109_130823_180803
DS_RFL_07	Autotransformatorsystem (Negativ-Feeder)	r_p240p07m001v03_113_131105_09425

<sup>1</sup> Diese ID wird von der Simulations-Software SIMNET automatisch vergeben und wird hier zum Zweck der Qualitätssicherung aufgeführt.

Varianten ID	Massnahme	Simulations-ID <sup>1</sup>
<b>Bahnhofahrleitung, Einspurstrecke</b>		
<b>BHF_ES_00</b>	<b>Basismodell</b>	r_p240p07m001v02_31_130730_085954
BHF_ES_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	r_p240p07m001v02_36_130725_192556
BHF_ES_02	Bestehender Rückleiter (95 mm <sup>2</sup> Cu) in die Nähe der Umgehungsleitungen verschieben	r_p240p07m001v02_45_130725_192621
BHF_ES_03	Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung	r_p240p07m001v02_55_130725_192641
BHF_ES_04	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, über den ganzen Bahnhofsbereich (900 m)	r_p240p07m001v02_60_130726_111413
BHF_ES_05	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, nur über 100 m	r_p240p07m001v02_105_130730_090258
<b>Bahnhofahrleitung, Doppelspurstrecke</b>		
<b>BHF_DS_00</b>	<b>Basismodell</b>	r_p240p07m001v02_65_130725_192726
BHF_DS_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	r_p240p07m001v02_71_130725_192755
BHF_DS_02	Bestehende Rückleiter (95 mm <sup>2</sup> Cu) in die Nähe der Umgehungsleitungen verschieben	r_p240p07m001v02_77_130725_192823
BHF_DS_03	Verschieben Umgehungsleitungen: Trasseemitte (inkl. zusätzlicher Rückleiter)	r_p240p07m001v02_78_130726_134542
BHF_DS_04	Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine Umgehungsleitung	r_p240p07m001v02_79_130726_104551

Tabelle 2-6: Übersicht der Simulationen

## 2.6 Gewählter Ansatz für den Vergleich unter den Varianten

Die Simulationen für die Berechnung der Magnetfelder werden mit dem standardisierten Strom von 100 A pro Streckengleis durchgeführt (die Magnetfelder respektive die magnetische Flussdichte sind direkt abhängig vom Strom). Um den Nutzen einzelner Massnahmen im Vergleich zur Basisvariante zu quantifizieren, wurden die folgenden beiden Ansätze gewählt:

1. Der Grenzabstand von Bauten zur Parzellengrenze liegt in der Schweiz in der Regel zwischen 3 m und 5 m (dieser ist jeweils auf Gemeinde-Ebene geregelt). Ausgehend davon, werden jeweils im Abstand von 3 m und 5 m links und rechts vom Grenzverlauf des Bahntrassees die höchsten resultierenden magnetischen Flussdichten verglichen und deren Reduktion in % in Bezug zur Basisvariante gebracht. Dabei wird angenommen, dass sich die Parzellengrenze 5 m ab jeweils Gleismitte (zum nächsten Gleis) befindet.
2. Angelehnt an die NISV [1] werden die ISO-Linien der 1 µT, welche sich beim definierten Strom von 100 A pro Streckengleis ergeben, grafisch aufgezeichnet und miteinander verglichen. Diese Auswertung soll qualitativ den Nutzen der Massnahmen aufzeigen.

Hinweis: Das Verhältnis Strom zur magnetischen Flussdichte ist proportional (eine Verdoppelung des Stromes führt zu einer Verdoppelung der Magnetfeldstärke). Zwischen Strom und seitlicher Ausdehnung besteht jedoch kein proportionales (lineares) Verhältnis, weshalb sich der Abstand der einzelnen Isolinien (beispielsweise der 1 µT-Kurve) nicht im gleichen Verhältnis ändert wie der Strom.

## **2.7 Beschreibung der Simulations-Tools der ENOTRAC**

### **2.7.1 SIMNET**

Das Softwarewerkzeug SIMNET dient der Berechnung von Strömen und Spannungen in einem Netzwerk mit parallel verlaufenden Leitern, also wie dies typischerweise in einer Bahntrasse mit Fahrdrabt, Tragseil, Speiseleitungen, Feeder, Rückleiterseilen, Schienen und Kabel der Fall ist. Das Programm gelangt insbesondere zur Anwendung bei der

- Berechnung der Rückstromführung in Tunneln und auf offener Strecke (Rückleiterseilen, Schienen, Armierung, Erdreich etc.)
- Berechnung der Stromaufteilung zwischen verschiedenen, parallel verlaufenden Hin- und Rückleitern
- Berechnung der magnetischen Flussdichte bei einer bestimmten Leiteranordnung und Leiterbelastung
- Berechnung der Impedanzen für verschiedene Fahrleitungs- und Rückleitungskonfigurationen als Grundlage für FABEL
- Berechnung der Beeinflussung von parallel verlaufenden Signal- und Fernmeldekabeln
- Ermittlung von Spannungen und Potenzialen von Leitern und der Erde in Kurzschlussfällen und während des Normalbetriebs
- Abschätzung der Auswirkungen von Erdungen und unterschiedlichen Leiteranordnungen

SIMNET führt eine Netzwerkberechnung unter Berücksichtigung einer beliebig langen Aneinanderreihung von Abschnitten durch, die jeweils aus parallelen Leitern und Verbindungen (Impedanzen, Quellen) zwischen den Leitern und nach Erde bestehen. Die Berechnung erfolgt für eine wählbare Frequenz. Basierend auf den ermittelten Stromverteilungen kann mit EMFCALC (siehe Kapitel 2.7.2) anschliessend die resultierende magnetische Flussdichte in senkrecht zu den Leitern stehenden Ebenen berechnet werden.

Für jede in einem System vorkommende Leiteranordnung (Trasseotyp) werden die geometrischen und physikalischen Daten der Leiter in einer Bibliothek abgelegt. Zu den Leiterdaten gehören: Position jedes Leiters im Querschnitt-Koordinatensystem, Leiterdurchmesser, relative Permeabilität, spezifischer Gleichstromwiderstand, Ableitungswiderstand nach Erde. Ebenso wird eine Bibliothek aller Querverbindungen zwischen den Leitern angelegt, z. B. für Einspeisungen, Verbraucher (Züge), Erdverbindungen, Masterdungen, Leiterverbindungen etc. Der zu untersuchende Streckenabschnitt wird modelliert, indem die vorkommenden Leiteranordnungen als Abschnitte entsprechender Länge aneinander gereiht und die verschiedenen Arten von Querverbindungen an den gewünschten Stellen platziert werden.

SIMNET berechnet aufgrund der Modelldaten die ohmschen Widerstände, die Eigeninduktivitäten und die Kapazitätsbeläge der einzelnen Leiter, die induktiven und kapazitiven Kopplungen sämtlicher Leiter untereinander und nach Erde. Dabei wird die Stromverdrängung in den Leitern ebenso berücksichtigt wie die erwartete Erdstromtiefe und der Erdwiderstand.

## **2.7.2 EMFCALC**

EMFCALC ist ein Programm zur Berechnung des magnetischen Feldes im Bereich einer Eisenbahnstrecke. Als Grundlage für eine Berechnung mit EMFCALC dient die mit SIMNET ermittelte Stromverteilung auf die verschiedenen Leiter.

EMFCALC berechnet die magnetische Flussdichte in Ebenen, die senkrecht zu den Leitern stehen. Die Flussdichte wird an vordefinierten Punkten in diesen Ebenen berechnet. Der Abstand dieser Punkte kann vom Benutzer gewählt werden. Für jede Berechnung kann ein Bereich mit feiner Auflösung (Nahbereich) und ein solcher mit gröberer Auflösung (Fernbereich) festgelegt werden.

### **3 BESCHREIBUNG DER BASISMODELLE**

Nachfolgend werden die für die Bildung der Basismodelle verwendeten Parameter beschrieben. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgte unter anderem basierend auf den Erkenntnissen aus den Sensitivitäts-Betrachtungen [5] im Rahmen der Erarbeitung des BAV-Katalogs im Jahr 2002. In dieser Studie [5] wurde der Einfluss einzelner Parameter auf die Magnetfeldkurven sehr ausführlich untersucht.

Für einen sauberen Vergleich zwischen den einzelnen Varianten (Massnahmen zu Basismodell) ist es wichtig, dass die Basiswerte unter den einzelnen Varianten identisch sind. Es ist nicht das Ziel der vorliegenden Studie, die Einflüsse einzelner Parameter mittels Sensitivitäts-Analysen zu untersuchen.

Die vorliegend verwendeten Werte bilden Standardwerte ab. Selbstverständlich sind in der Praxis zu den hier verwendeten Parametern (wie die Leiteranordnung) abweichende Werte zu finden. Doch haben diese Parameter auf die Aussage zum in vorliegender Studie betrachteten Nutzen von Massnahmen zur Reduzierung der Magnetfelder zumeist nur einen geringen Einfluss.

#### **3.1 Fahrleitungs-Querprofil (Leiteranordnung)**

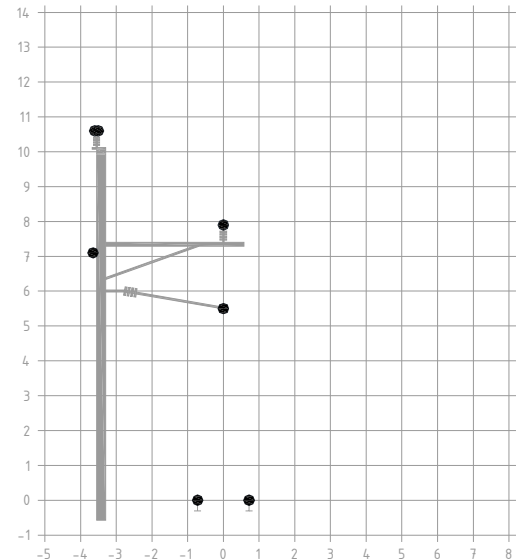
##### **3.1.1 Allgemeines zu den Leiteranordnungen**

In den nachfolgenden Abschnitten sind die gewählten Leiteranordnungen für die definierten Basismodelle dargestellt. Dabei gilt:

- In den aufgeführten Positionen der Leiter ist jeweils die Höhe des Aufhängepunktes angegeben (ohne Berücksichtigung des Seildurchhangs). Der Seildurchhang von Leitern wie Tragseil, Hilfsleitung, Rückleiterseile oder Umgehungsleitungen wird in der Simulation dann aber wie folgt berücksichtigt: Aufhängepunkt des Leiters –  $\frac{1}{3}$  der Systemhöhe, wobei die Systemhöhe die Differenz der Höhen von Fahrdrabt und Tragseil ist.
- die entsprechenden Angaben zu den Leitertypen sind im darauffolgenden Kapitel 3.2 zu finden.

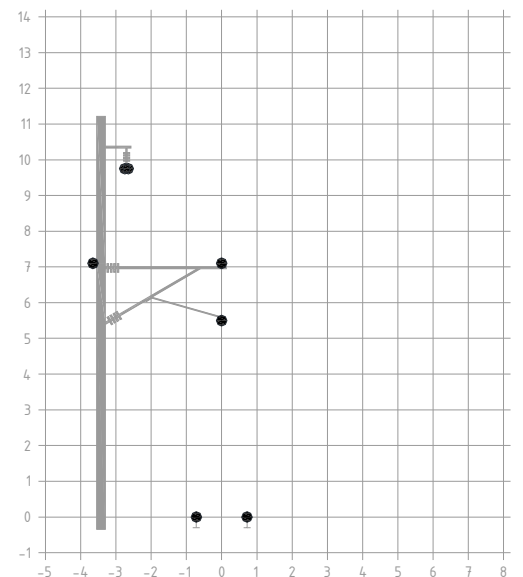
### 3.1.2 Einspur-Fahrleitung N-FL (mit Hilfsleitung)

Bezeichnung	Leitertyp	x-pos [m]	y-pos [m]
Fahrdraht Gleis 1	107 Cu	0.00	5.50
Tragseil Gleis 1	50 StCu	0.00	7.90
Schiene links Gleis 1	Schiene SBB VI	-0.72	0.00
Schiene rechts Gleis 1	Schiene SBB VI	0.72	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 1	95 Cu	-3.65	7.10
Hilfsleitung Leiter 1 Gleis 1	95 Cu	-3.50	10.60
Hilfsleitung Leiter 2 Gleis 1	95 Cu	-3.60	10.60



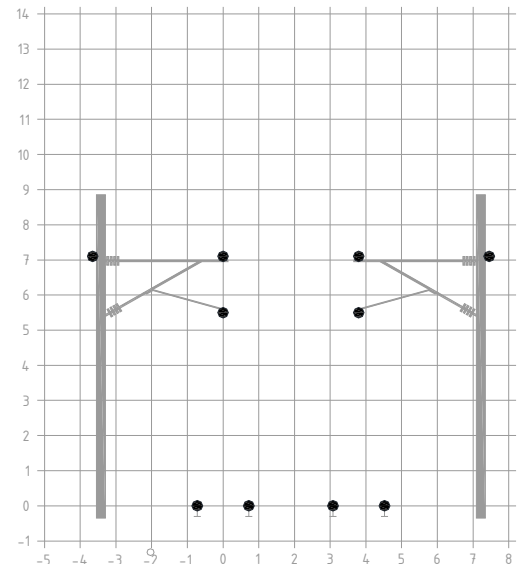
### 3.1.3 Einspur-Fahrleitung R-FL (mit Hilfsleitung)

Bezeichnung	Leitertyp	x-pos [m]	y-pos [m]
Fahrdraht Gleis 1	107 Cu	0.00	5.50
Tragseil Gleis 1	92 StCu	0.00	7.10
Schiene links Gleis 1	Schiene SBB VI	-0.72	0.00
Schiene rechts Gleis 1	Schiene SBB VI	0.72	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 1	95 Cu	-3.65	7.10
Hilfsleitung Leiter 1 (Gleis 1)	95 Cu	-2.75	9.75
Hilfsleitung Leiter 2 (Gleis 1)	95 Cu	-2.65	9.75



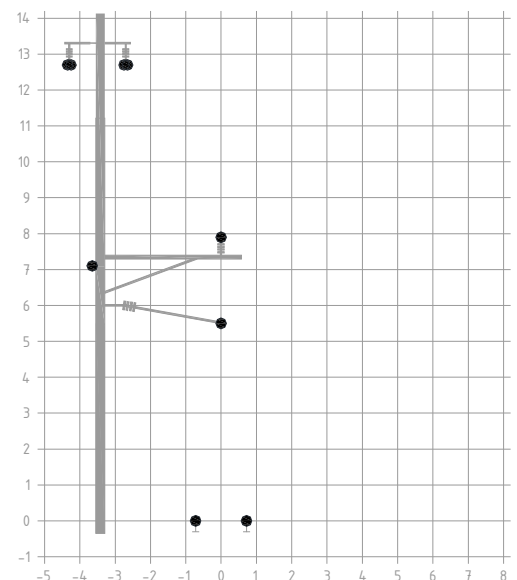
### 3.1.4 Doppelspur-Fahrleitung

Bezeichnung	Leitertyp	x-pos [m]	y-pos [m]
Fahrdraht Gleis 1	107 Cu	0.00	5.50
Tragseil Gleis 1	92 StCu	0.00	7.10
Schiene links Gleis 1	Schiene SBB VI	-0.72	0.00
Schiene rechts Gleis 1	Schiene SBB VI	0.72	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 1	95 Cu	-3.65	7.10
Fahrdraht Gleis 2	107 Cu	3.80	5.50
Tragseil Gleis 2	92 StCu	3.80	7.10
Schiene links Gleis 2	Schiene SBB VI	3.08	0.00
Schiene rechts Gleis 2	Schiene SBB VI	4.52	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 2	95 Cu	7.45	7.10



### 3.1.5 Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke

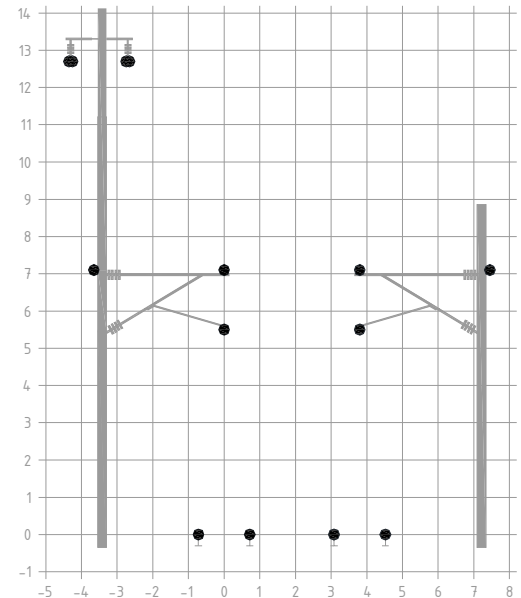
Bezeichnung	Leitertyp	x-pos [m]	y-pos [m]
Fahrdraht Gleis 1	107 Cu	0.00	5.50
Tragseil Gleis 1	50 StCu	0.00	7.90
Schiene links Gleis 1	Schiene SBB VI	-0.72	0.00
Schiene rechts Gleis 1	Schiene SBB VI	0.72	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 1	95 Cu	-3.65	7.10
Umgehungsleitung Leiter 1 Gleis 1	95 Cu	-2.75	12.70
Umgehungsleitung Leiter 2 Gleis 1	95 Cu	-2.65	12.70
Hilfsleitung Leiter 1 Gleis 1	95 Cu	-4.35	12.70
Hilfsleitung Leiter 2 Gleis 1	95 Cu	-4.25	12.70





### 3.1.6 Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke

Bezeichnung	Leitertyp	x-pos [m]	y-pos [m]
Fahrdrabt Gleis 1	107 Cu	0.00	5.50
Tragseil Gleis 1	92 StCu	0.00	7.10
Schiene links Gleis 1	Schiene SBB VI	-0.72	0.00
Schiene rechts Gleis 1	Schiene SBB VI	0.72	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 1	95 Cu	-3.65	7.10
Umgehungsleitung Leiter 1 Gleis 1	95 Cu	-2.75	12.70
Umgehungsleitung Leiter 2 Gleis 1	95 Cu	-2.65	12.70
Fahrdrabt Gleis 2	107 Cu	3.80	5.50
Tragseil Gleis 2	92 StCu	3.80	7.10
Schiene links Gleis 2	Schiene SBB VI	3.08	0.00
Schiene rechts Gleis 2	Schiene SBB VI	4.52	0.00
Rückleiterseil 1 Gleis 2	95 Cu	7.45	7.10
Umgehungsleitung Leiter 1 Gleis 2	95 Cu	-4.35	12.70
Umgehungsleitung Leiter 2 Gleis 2	95 Cu	-4.25	12.70



## 3.2 Leiterdaten

### 3.2.1 Freileiter

Leiterbezeichnung	Radius [mm]	DC-Widerstand [ $\Omega/m$ ]	rel. Permeabilität	Ableitung gegen Erde [S/m]
Fahrdrabt 107 Cu	6.125	$0.167 \cdot 10^{-3}$	1	0
Tragseil 92 StCu	6.150	$0.222 \cdot 10^{-3}$	1	0
Tragseil 50 StCu	4.500	$1.000 \cdot 10^{-3}$	1	0
Leiter 95 mm <sup>2</sup> Cu	6.250	$0.195 \cdot 10^{-3}$	1	0
Leiter 150 mm <sup>2</sup> Cu	7.850	$0.123 \cdot 10^{-3}$	1	0

Tabelle 3-1: Für das Modell notwendige Daten der verwendeten Freileitungen

### 3.2.2 Schienen

Leiterbezeichnung	Radius [mm]	DC-Widerstand [ $\Omega/m$ ]	rel. Permeabilität	Ableitung gegen Erde [S/m]
Schiene SBB VI	108.000	$0.030 \cdot 10^{-3}$	50	0.001

Tabelle 3-2: Für das Modell notwendige Daten der verwendeten Schienen

Bemerkung:

- Wie die Sensitivitäts-Betrachtungen in [4] zeigen, ist der Einfluss des gewählten Schienen-Typs auf die Magnetfelder vernachlässigbar klein. Aus diesem Grund wird in allen Modellen einheitlich vom Schienen-Typ SBB VI, dem bei SBB häufig eingesetzten Typ, ausgegangen.
- Die Schienen werden in den Basismodellen als durchgehend leitend angenommen (keine in Längsrichtung isolierten Schienen).
- Gemäss Erfahrungswerten der SGK C3 [2] für ein Gleis in Schotterbett auf Kiesunterbau mit Beton- oder Eisenschwellen ohne Isolation beträgt der Ableitungsbelag (Ableitung gegen Erde) pro Schiene 1 S/km (0.001 S/m).

### 3.2.3 Kabel

Angelehnt an die Kabel-Standards der SBB wird bei den Betrachtungen für kabelverlegte Hinleiter von Hochspannungskabeln für 30/18 kV entweder 240 Cu / 47 Al (Typ XDME) oder 400 Cu / 30 Cu (Typ XDCuT) ausgegangen.

Kabeltyp	Leiter	Radius aussen [mm]	Radius innen [mm]	DC-Widerstand [ $\Omega/m$ ]	Kapazität [ $\mu F/km$ ]	rel. Permeabilität	Ableitung gegen Erde [S/m]
240 Cu / 47 Al	Leiter 240 mm <sup>2</sup> Cu	9.40		$0.077 \cdot 10^{-3}$	0.24253	1	0
	Schirm 47 mm <sup>2</sup> Al	19.55	18.70	$0.600 \cdot 10^{-3}$		1	0
400 Cu / 30 Cu	Leiter 400 mm <sup>2</sup> Cu	11.80		$0.047 \cdot 10^{-3}$	0.32017	1	0
	Schirm 30 mm <sup>2</sup> Cu	21.80	20.00	$0.542 \cdot 10^{-3}$		1	0

Tabelle 3-3: Für das Modell notwendige Daten der verwendeten Kabel für Hinleiter (mit Schirm)

Parallel zu den Hinleiterkabeln werden jeweils Rückleiterkabel (ohne Schirm) verlegt. Für die Untersuchung wird im Modell jeweils für 240 Cu / 47 Al ein 95 Cu-Kabel und für 400 Cu / 30 Cu ein 240 Cu-Kabel berücksichtigt.

Leiterbezeichnung	Radius [mm]	DC-Widerstand [ $\Omega/m$ ]	rel. Permeabilität	Ableitung gegen Erde [S/m]
Kabel 95 mm <sup>2</sup> Cu	6.250	$0.195 \cdot 10^{-3}$	1	0
Kabel 240 mm <sup>2</sup> Cu	9.400	$0.077 \cdot 10^{-3}$	1	0

Tabelle 3-4: Für das Modell notwendige Daten der verwendeten Kabel (T-Seil) der Rückleiter (ohne Schirm)

### 3.3 Längsprofil

Anmerkung:

Im Modell wird das Hin- und Rückleitersystem jeweils 2 km vor der Quelle und 2 km nach dem Verbraucher weitergeführt. Dies ist notwendig, damit der Erdstrom, welcher sich über die Schienenableitung ergibt, korrekt berücksichtigt wird.

#### 3.3.1 Modelle der Streckenfahrleitungen

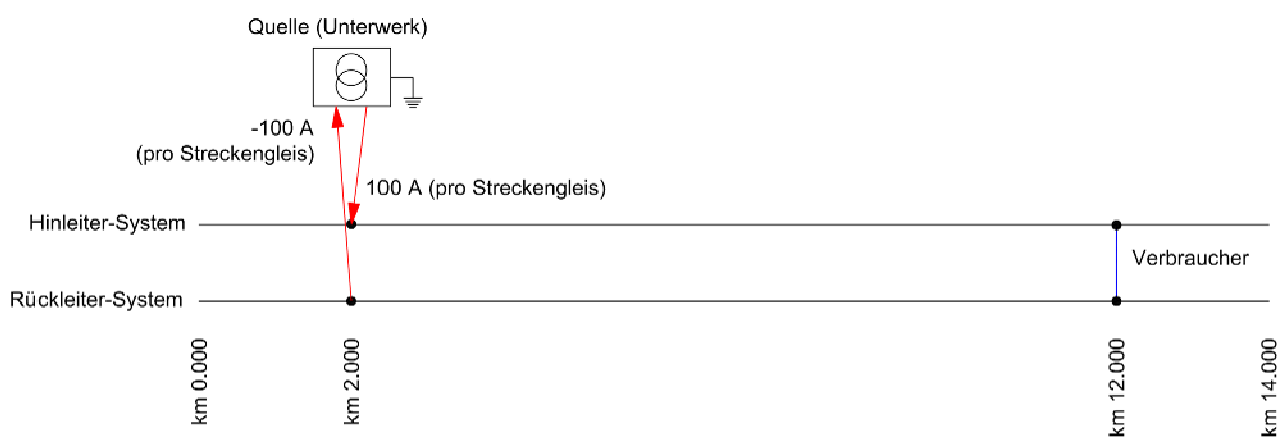


Abbildung 3-1: Aufbau des Modells in Längsrichtung für die Modelle der Streckenfahrleitungen

### 3.3.2 Modelle der Bahnhofsfahrleitungen

Beim Bahnhof wird von folgenden Gegebenheiten ausgegangen:

- Es wird von einem 400 m langen Bahnhof ausgegangen (Gleisanlage). Reisezüge in der Schweiz weisen maximal eine Länge von rund 400 m auf. Elektrisch ist der Abschnitt je Seite als 250 m länger angenommen (Auszugslänge), d.h. es resultiert eine totale Länge von 900 m.
- Der Bahnhof befindet sich in der Mitte des Modells.
- Der Bahnhof verfügt über eine Umgehungsleitung.

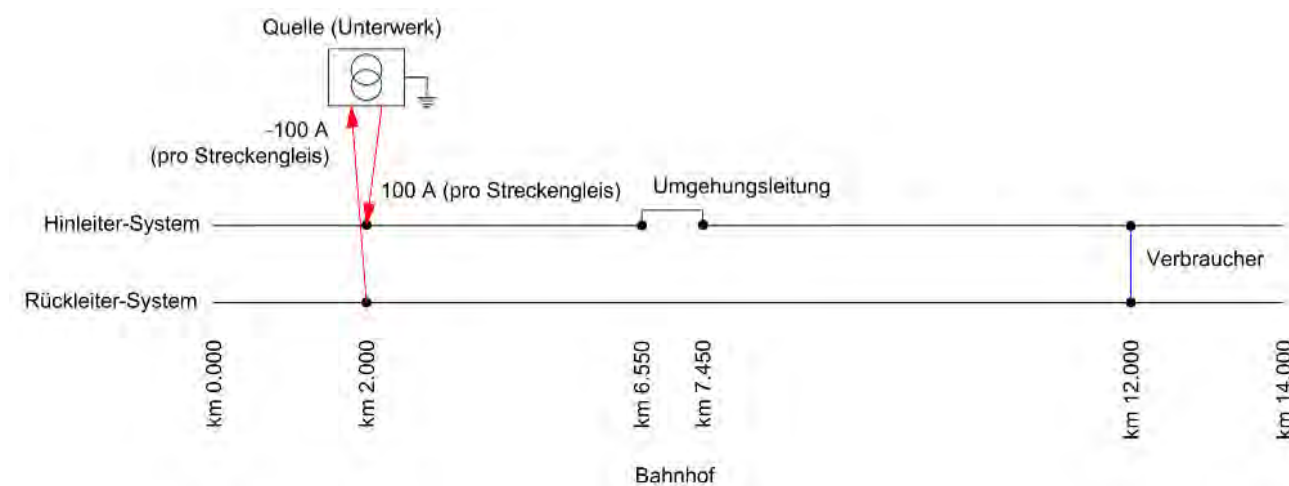


Abbildung 3-2: Aufbau des Modells in Längsrichtung für die Modelle der Bahnhofsfahrleitungen

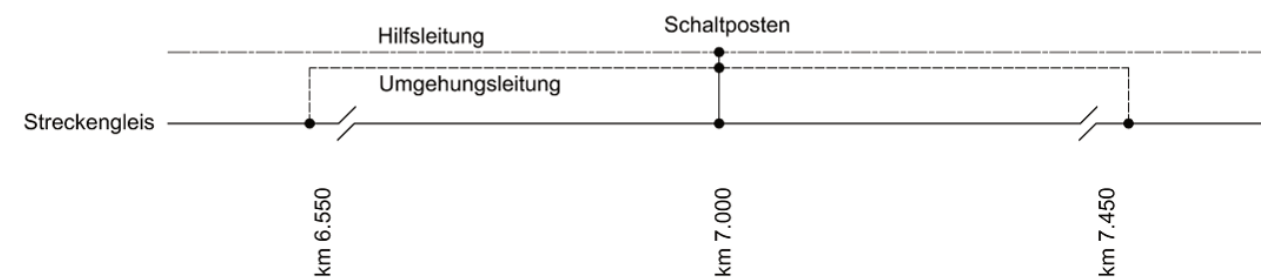


Abbildung 3-3: Detailaufbau Bahnhof Einspurstrecke

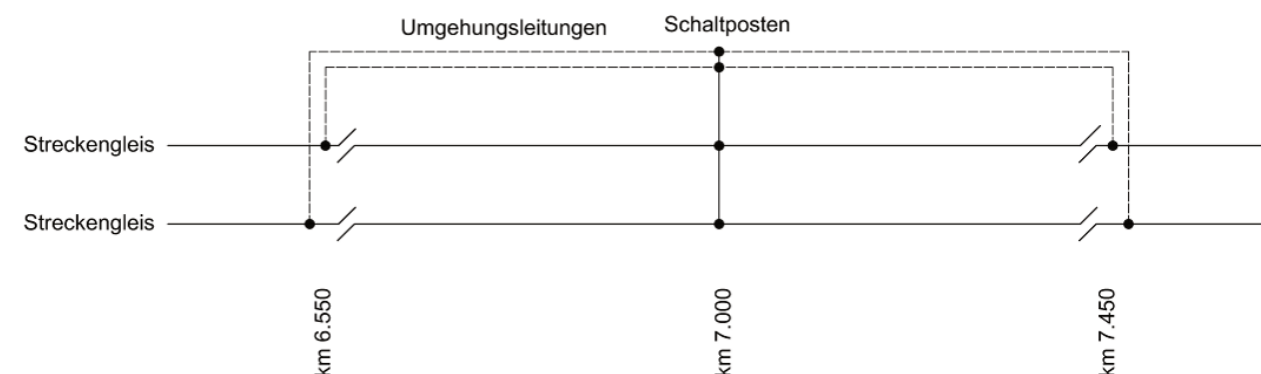


Abbildung 3-4: Detailaufbau Bahnhof Doppelspurstrecke

### 3.4 In die Modelle eingespeister Strom

Da das Verhältnis von Strom zur Magnetfeldstärke (oder der magnetischen Flussdichte) proportional ist, kann für den Strom grundsätzlich ein beliebiger Wert verwendet werden (stimmt nicht ganz, da die Stromverdrängung in den Leitern, insbesondere den Schienen, stromabhängig ist, was aber nur einen geringen Einfluss hat). Für eine einfache Umrechnung der Felder wird als Basisstrom 100 A pro Streckengleis (16.7 Hz) verwendet. Dieser Strom wird in den Modellen bei der Einspeisestelle auf das Fahrleitungssystem eingeprägt, verläuft dann bis zum Verbraucher, fließt über das Rückleitersystem und der Erde zurück zur Einspeisestelle und wird dort über die Schienen wieder abgeführt (siehe obige Abbildung 3-1).

Anmerkung: für die Simulationen der Massnahme Autotransformator-System, welche mit 2x15 kV grundsätzlich eine doppelte Spannung aufweist, wird ein äquivalenter Strom von 50 A verwendet (siehe auch Kapitel 2.4.1.5).

### 3.5 Verbindungen zwischen Leitern

Querverbindungen Tragseil – Fahrdraht:	alle 50 m mit 0.001 $\Omega$
Querverbindung Kettenwerk – Hilfsleiter:	jeweils mit 0.001 $\Omega$ bei der Einspeisung und beim Verbraucher
Querverbindung Kettenwerk – Umgehungsleitung:	jeweils mit 0.001 $\Omega$ vor respektive nach der Streckentrennung der Bahnhoffahrleitung (Abbildung 3-4)
Querverbindung Kettenwerk zwischen Gleisen:	jeweils mit 0.001 $\Omega$ bei der Einspeisung, beim Bahnhof (Schaltposten) und beim Verbraucher

### 3.6 Rückleitersystem

Basierend auf Erfahrungswerten werden für das Rückleitersystem die folgenden Werte verwendet:

- Unterwerks Erdung: 100 m $\Omega$
- Masterdung: alle 50 m mit 25  $\Omega$  pro Mast
- Querverbindung Schiene – Schiene: alle 250 m mit 0.001  $\Omega$  (Ringleitung)
- Querverbindung Gleis – Gleis: alle 250 m mit 0.001  $\Omega$  (Ringleitung)
- Querverbindung Rückleiterseil – Gleis: alle 250 m mit 0.001  $\Omega$  (Ringleitung)

### 3.7 Modell der Erde

In SIMNET wird die Erde über den spezifischen Erdwiderstand und die Erdstromtiefe modelliert. Basierend auf Erfahrungswerten werden dabei für alle Modelle die folgenden Werte verwendet:

Erdwiderstand: 160  $\Omega m$ , berechnet durch SIMNET nach Formel:

$$\rho = \frac{547}{f^{0.434}} [\Omega m], \text{ wobei } f = \text{Netzfrequenz (16.7 Hz)}$$

Erdstromtiefe: 2000 m, automatisch berechnet durch SIMNET mit der Formel:

$$\text{Erdstromtiefe } T = 655 \sqrt{\frac{\rho}{f}} [m], \text{ wobei } f = \text{Netzfrequenz (16.7 Hz)}$$

## 4 SIMULATIONSERGEBNISSE

In diesem Kapitel sind pro Basismodell die Ergebnisse der Simulationen einerseits in tabellarischer und andererseits in grafischer Form aufgeführt.

In den Tabellen ist jeweils die pro Simulation aufgetretene maximale magnetische Flussdichte in  $\mu\text{T}$  im Abstand von 3 m und 5 m links und rechts ab Bahntrasse (siehe auch Kapitel 2.6) aufgelistet (grösste Ausdehnung der Isolinien). Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Parzellengrenze des an die Bahn angrenzenden Grundstücks 5 m ab Gleismitte befindet. Das heisst, die Tabellen enthalten die Ergebnisse für die maximalen Flussdichten im Abstand von 8 m bzw. 10 m zur Gleismitte bei Einspurstrecken oder zur Mitte des näheren Gleises bei Doppelspurstrecken. Im ersten Block ist das Maximum über den ganzen Höhenbereich angegeben. In 2 weiteren Blöcken wird zwischen zwei Bereichen der Höhe unterschieden:

- unterer Bereich (Gebäude bis zu ca. 2-Stöcken): vertikal von -2 m bis 6 m ab SOK
- oberer Bereich (hohe Gebäude): vertikal von 6 m bis 15 m ab SOK

Zudem ist in einer zweiten Tabelle jeweils der Nutzen der untersuchten Massnahme im Vergleich zum Basismodell in % zur Basisvariante dargestellt, wobei das Basismodell als 100 % gilt.

In den anschliessenden Grafiken sind für die durchgeführten Simulationen die ISO-Linien der magnetischen Flussdichte im Bereich der Modellmitte (km 6.775) dargestellt, wobei jeweils die ISO-Linien der Massnahmen (blau) im Vergleich zum Basismodell (rot) stehen. Die dabei dargestellten Flussdichten basieren auf dem Strom von 100 A pro Gleis. Die im vorliegenden Kapitel aufgeführten Grafiken zeigen für den einfacheren Vergleich nur die 0.5  $\mu\text{T}$ , 1  $\mu\text{T}$  sowie 2  $\mu\text{T}$ -Linien. Einzelplots zu jeder Variante mit einer grösseren Auflösung sind als Anhang in Kapitel 8 zu finden.

Die beim betrachteten Querschnitt aktiven Leiter (Strom führend) des Basismodells werden als schwarze Punkte abgebildet.



## 4.1 Einspur-Fahrleitung N-FL

Magnetische Flussdichte [ $\mu\text{T}$ ]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
ES_NFL_00	Basismodell	1.66	2.49	1.24	0.96	1.45	1.93	1.24	0.95	1.66	2.49	1.24	0.96
ES_NFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	1.16	1.71	0.97	0.75	0.99	1.26	0.97	0.75	1.16	1.71	0.97	0.75
ES_NFL_06	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	1.28	1.85	1.07	0.84	1.09	1.37	1.07	0.84	1.28	1.85	1.07	0.84
ES_NFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	1.45	2.10	1.16	0.90	1.28	1.65	1.16	0.90	1.45	2.10	1.16	0.90
ES_NFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	0.99	1.32	0.96	0.75	0.99	1.32	0.96	0.75	0.85	0.98	0.96	0.75
ES_NFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	0.95	1.26	0.95	0.75	0.95	1.26	0.95	0.75	0.81	0.93	0.95	0.75
ES_NFL_05	Schienen Isolieren (Gleisunterbrücke)	0.96	1.37	1.01	0.82	0.75	0.83	1.01	0.82	0.96	1.37	1.01	0.82

Tabelle 4-1: Maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse für die untersuchten Massnahmen mit Einspur-Fahrleitung N-FL

Reduktion der magnetischen Flussdichte zum Basismodell [%]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
ES_NFL_00	Basismodell	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
ES_NFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	30%	31%	22%	22%	32%	35%	22%	22%	30%	31%	22%	22%
ES_NFL_06	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	23%	26%	14%	12%	25%	29%	14%	12%	23%	26%	14%	12%
ES_NFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	13%	16%	7%	6%	12%	14%	7%	6%	13%	16%	7%	6%
ES_NFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	41%	47%	23%	21%	32%	32%	23%	21%	49%	61%	23%	21%
ES_NFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	43%	49%	23%	21%	34%	35%	23%	21%	51%	63%	23%	21%
ES_NFL_05	Schienen Isolieren (Gleisunterbrücke)	42%	45%	19%	15%	49%	57%	19%	14%	42%	45%	19%	15%

Tabelle 4-2: Reduktion der magnetischen Flussdichte im Vergleich zur Basisvariante für die maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse

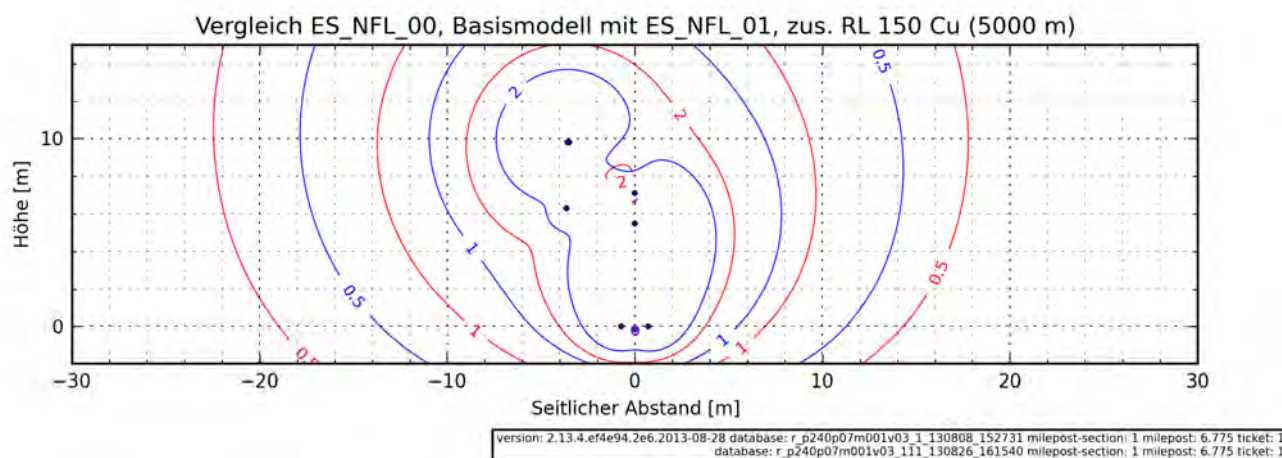


Abbildung 4-1: ES\_NFL\_01, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 5 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_NFL\_00, Basismodell (rot)

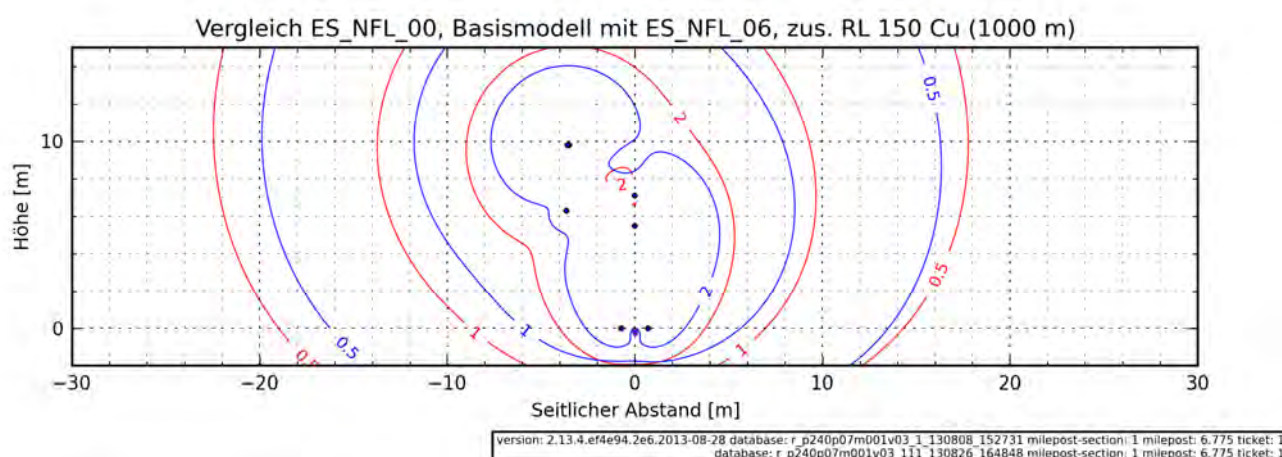


Abbildung 4-2: ES\_NFL\_06, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 1 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_NFL\_00, Basismodell (rot)

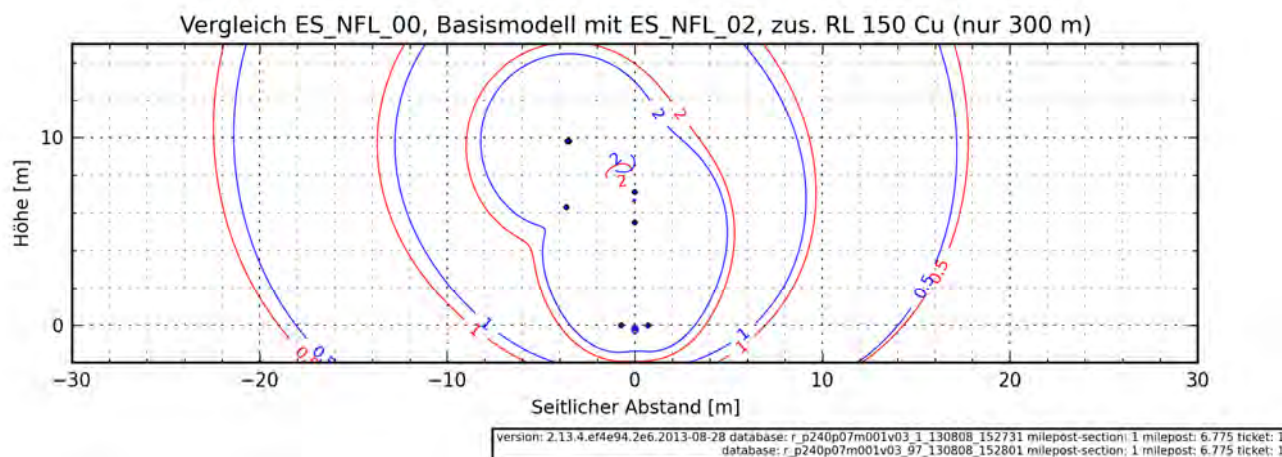


Abbildung 4-3: ES\_NFL\_02, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 300 m: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_NFL\_00, Basismodell (rot)

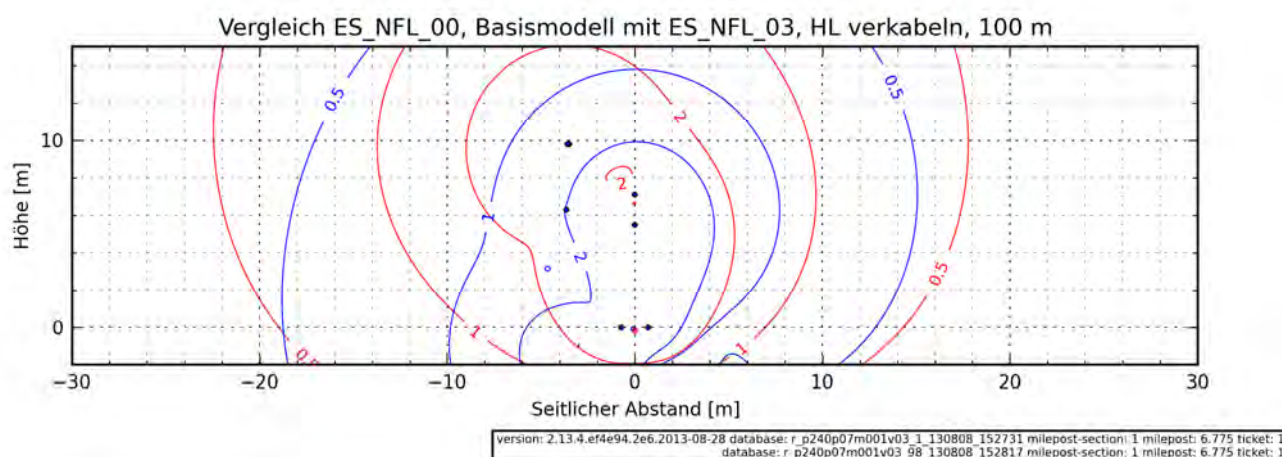


Abbildung 4-4: ES\_NFL\_03, Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_NFL\_00, Basismodell (rot)

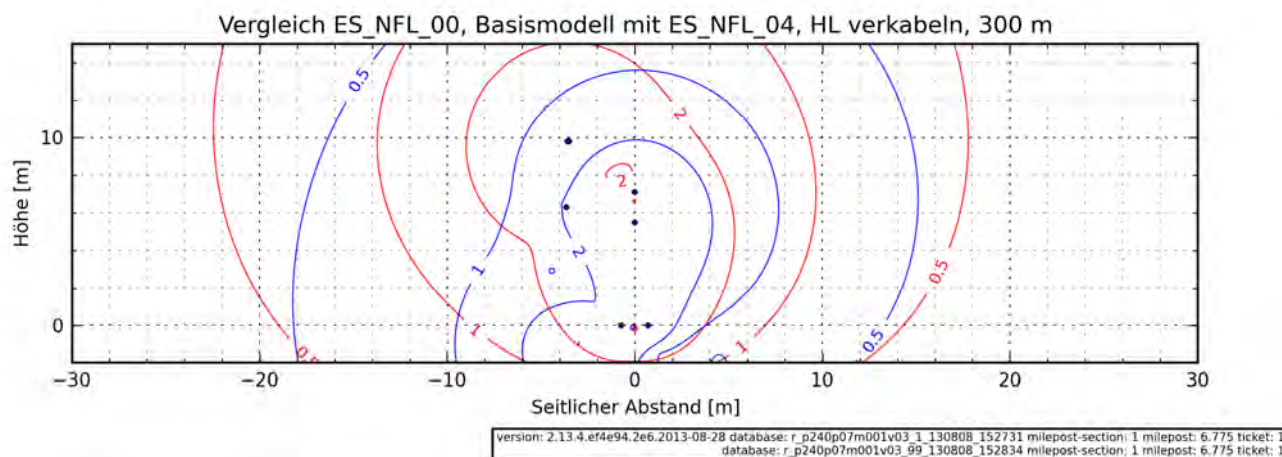


Abbildung 4-5: ES\_NFL\_04, Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_NFL\_00, Basismodell (rot)

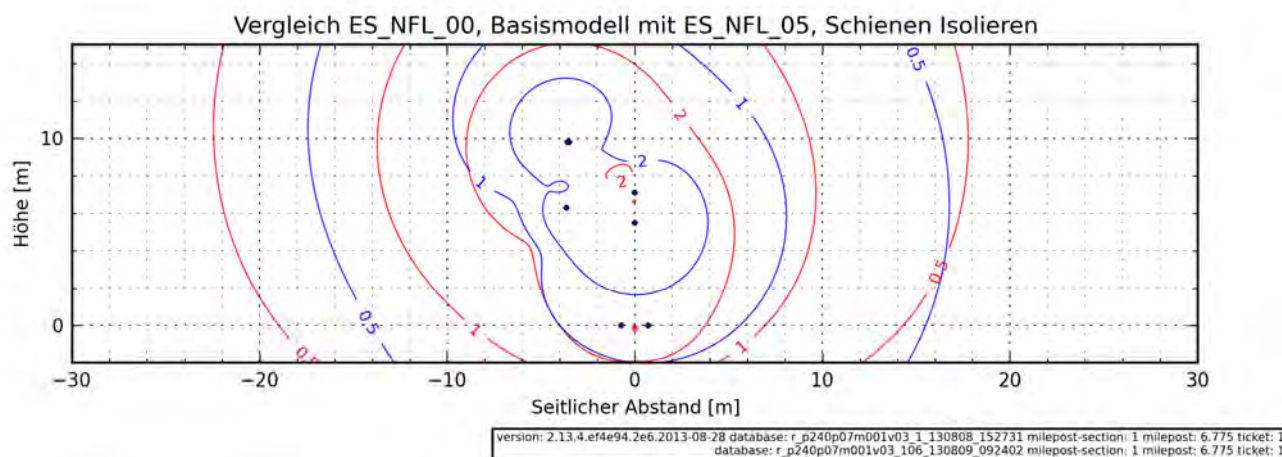


Abbildung 4-6: ES\_NFL\_05, Schienen längs isoliert (Gleisunterbrüche), Länge 100 m: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_NFL\_00, Basismodell (rot)



## 4.2 Einspur-Fahrleitung R-FL

Magnetische Flussdichte [ $\mu\text{T}$ ]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
ES_RFL_00	Basismodell	1.34	1.88	1.35	1.03	1.24	1.63	1.35	1.03	1.34	1.88	1.35	1.03
ES_RFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	0.94	1.30	1.07	0.81	0.87	1.10	1.07	0.81	0.94	1.30	1.07	0.81
ES_RFL_07	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	1.06	1.43	1.17	0.91	0.93	1.16	1.15	0.89	1.06	1.43	1.17	0.91
ES_RFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	1.21	1.65	1.26	0.97	1.14	1.48	1.26	0.96	1.21	1.65	1.26	0.97
ES_RFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	0.88	1.12	1.06	0.82	0.88	1.12	1.06	0.82	0.83	0.98	1.06	0.82
ES_RFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	0.85	1.08	1.06	0.82	0.85	1.08	1.05	0.82	0.80	0.93	1.06	0.82
ES_RFL_05	Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km	0.56	0.75	0.67	0.50	0.56	0.75	0.66	0.50	0.44	0.48	0.67	0.50
ES_RFL_06	Booster-Transformator	1.02	1.97	0.45	0.32	1.01	1.91	0.45	0.32	1.02	1.97	0.45	0.32

Tabelle 4-3: Maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse für die untersuchten Massnahmen mit Einspur-Fahrleitung R-FL

Reduktion der magnetischen Flussdichte zum Basismodell [%]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
ES_RFL_00	Basismodell	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
ES_RFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	29%	31%	21%	21%	30%	32%	21%	21%	29%	31%	21%	21%
ES_RFL_07	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	21%	24%	14%	12%	25%	29%	15%	13%	21%	24%	14%	12%
ES_RFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	9%	12%	7%	6%	8%	9%	7%	6%	9%	12%	7%	6%
ES_RFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	34%	40%	21%	20%	29%	31%	22%	20%	38%	48%	21%	20%
ES_RFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	37%	43%	22%	21%	32%	34%	22%	20%	41%	50%	22%	21%
ES_RFL_05	Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km	58%	60%	51%	51%	55%	54%	51%	51%	67%	74%	51%	51%
ES_RFL_06	Booster-Transformator	24%	-5%	67%	69%	19%	-18%	67%	69%	24%	-5%	67%	69%

Tabelle 4-4: Reduktion der magnetischen Flussdichte im Vergleich zur Basisvariante für die maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse

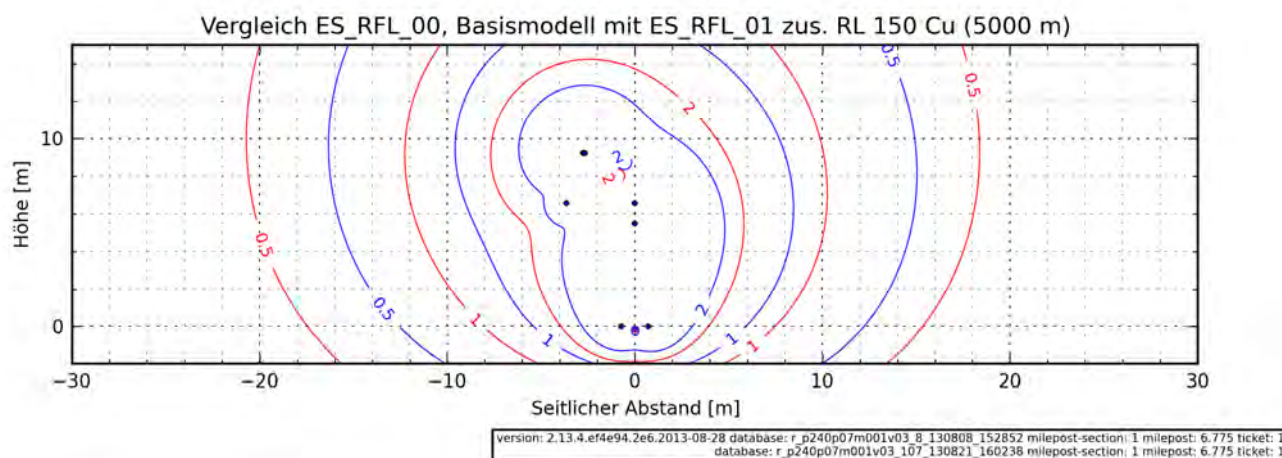


Abbildung 4-7: ES\_RFL\_01, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 5 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_RFL\_00, Basismodell (rot)

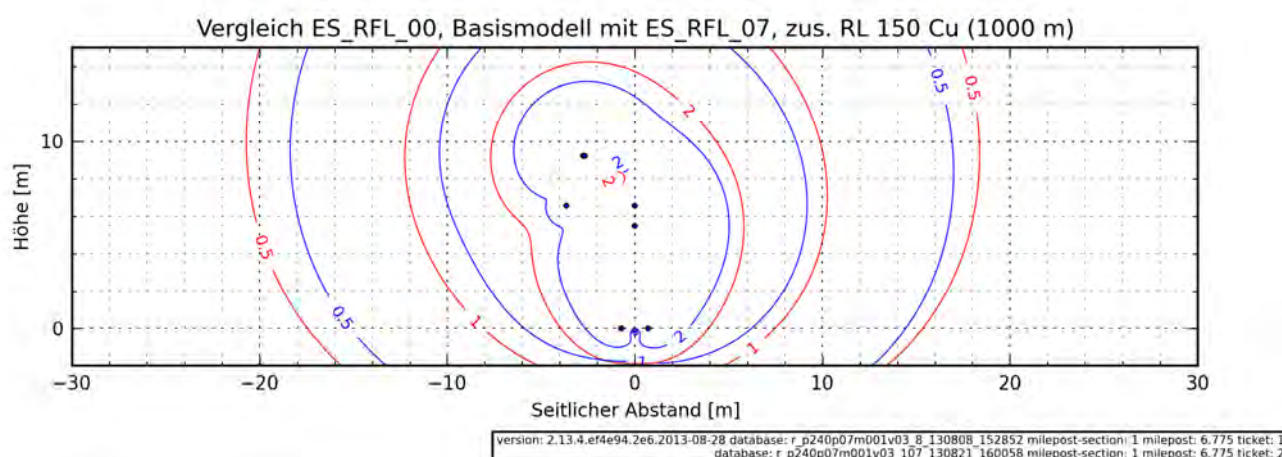


Abbildung 4-8: ES\_RFL\_07, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 1 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_RFL\_00, Basismodell (rot)





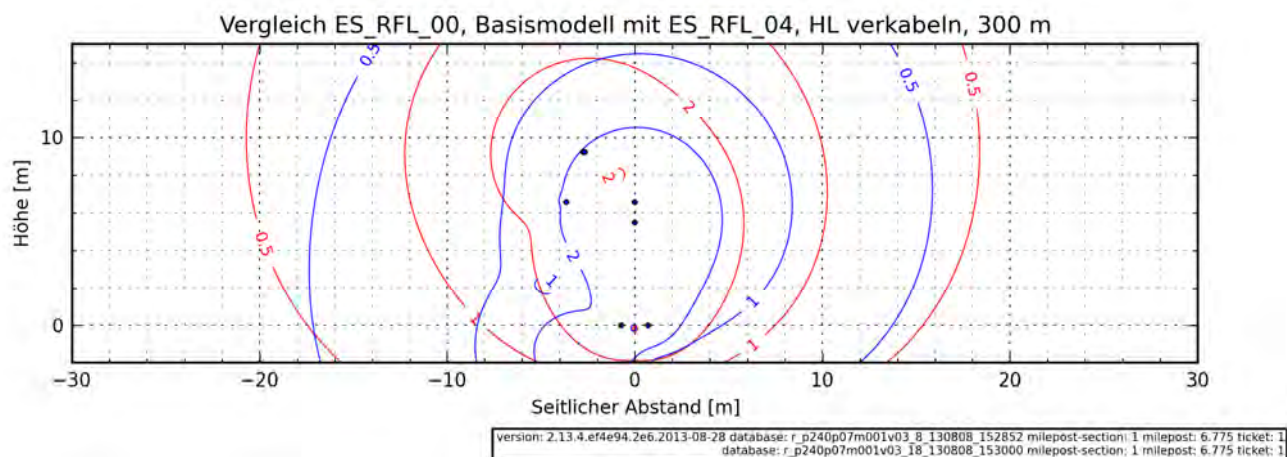


Abbildung 4-11: ES\_RFL\_04, Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_RFL\_00, Basismodell (rot)

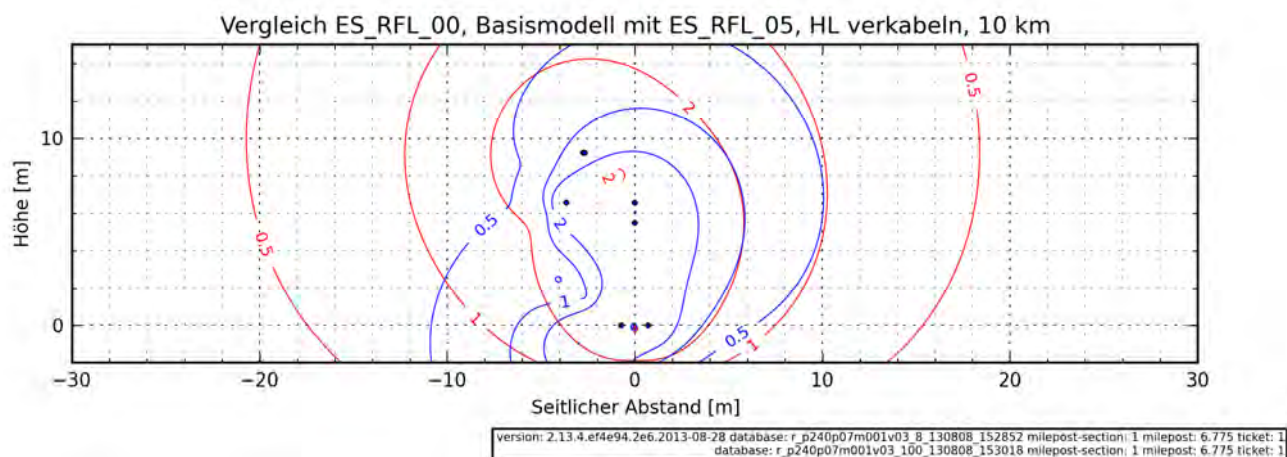


Abbildung 4-12: ES\_RFL\_05, Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_RFL\_00, Basismodell (rot)

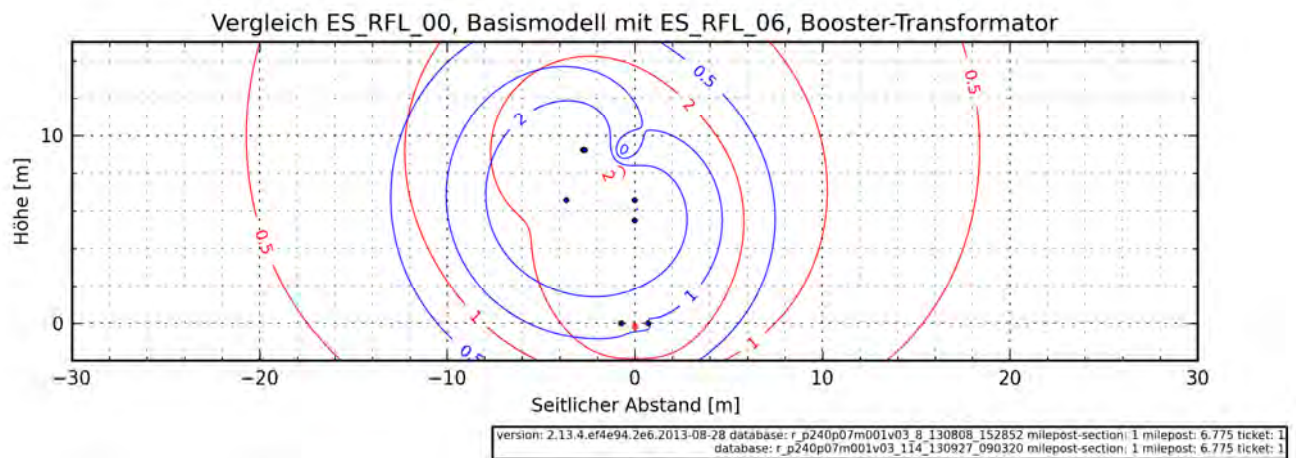


Abbildung 4-13: ES\_RFL\_06, Booster-Transformator: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit ES\_RFL\_00, Basismodell (rot)

## 4.3 Doppelspur-Fahrleitung

Magnetische Flussdichte [ $\mu\text{T}$ ]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
DS_RFL_00	Basismodell	1.27	1.60	1.60	1.27	1.26	1.60	1.60	1.26	1.27	1.59	1.59	1.27
DS_RFL_01	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 5 km	0.86	1.12	1.12	0.86	0.78	0.94	0.94	0.78	0.86	1.12	1.12	0.86
DS_RFL_08	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km	0.97	1.23	1.23	0.97	0.91	1.09	1.09	0.91	0.97	1.23	1.23	0.97
DS_RFL_02	FL Gleis 1 mit HL überbrückt	0.94	1.18	2.99	2.12	0.86	1.04	2.65	2.00	0.94	1.18	2.99	2.12
DS_RFL_03	FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, links	1.27	1.81	1.37	1.05	1.27	1.81	1.37	1.05	0.80	0.83	1.37	1.05
DS_RFL_04	FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, rechts	0.67	0.83	2.03	1.49	0.61	0.75	2.03	1.49	0.67	0.83	1.43	1.24
DS_RFL_05	FL Gleis 1+2 mit Kabel überbrückt, links	2.30	3.48	0.84	0.56	2.30	3.48	0.84	0.55	1.46	1.73	0.84	0.56
DS_RFL_06	Schienen Isolieren (Gleisunterbrüche)	0.78	1.03	1.03	0.78	0.78	1.03	1.03	0.78	0.67	0.84	0.84	0.67
DS_RFL_07	Autotransformatorsystem (Negativ-Feeder)	0.53	0.78	0.78	0.53	0.53	0.78	0.78	0.53	0.50	0.77	0.77	0.50

Tabelle 4-5: Maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse für die untersuchten Massnahmen mit Doppelspurstrecke

Reduktion der magnetischen Flussdichte zum Basismodell [%]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
DS_RFL_00	Basismodell	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
DS_RFL_01	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 5 km	32%	30%	30%	32%	38%	41%	41%	38%	32%	30%	30%	32%
DS_RFL_08	Zusätzliche Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km	23%	23%	23%	23%	28%	32%	32%	28%	23%	23%	23%	23%
DS_RFL_02	FL Gleis 1 mit HL überbrückt	26%	26%	-88%	-68%	32%	35%	-66%	-59%	26%	26%	-88%	-68%
DS_RFL_03	FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, links	0%	-13%	14%	17%	-1%	-13%	14%	17%	37%	48%	14%	17%
DS_RFL_04	FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, rechts	47%	48%	-27%	-18%	52%	53%	-27%	-18%	47%	48%	10%	2%
DS_RFL_05	FL Gleis 1+2 mit Kabel überbrückt, links	-82%	-118%	48%	56%	-82%	-118%	48%	56%	-15%	-9%	47%	56%
DS_RFL_06	Schienen Isolieren (Gleisunterbrüche)	38%	35%	35%	38%	38%	35%	35%	38%	47%	47%	47%	47%
DS_RFL_07	Autotransformatorsystem (Negativ-Feeder)	58%	51%	51%	58%	58%	51%	51%	58%	60%	52%	52%	60%

Tabelle 4-6: Reduktion der magnetischen Flussdichte im Vergleich zur Basisvariante für die maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse

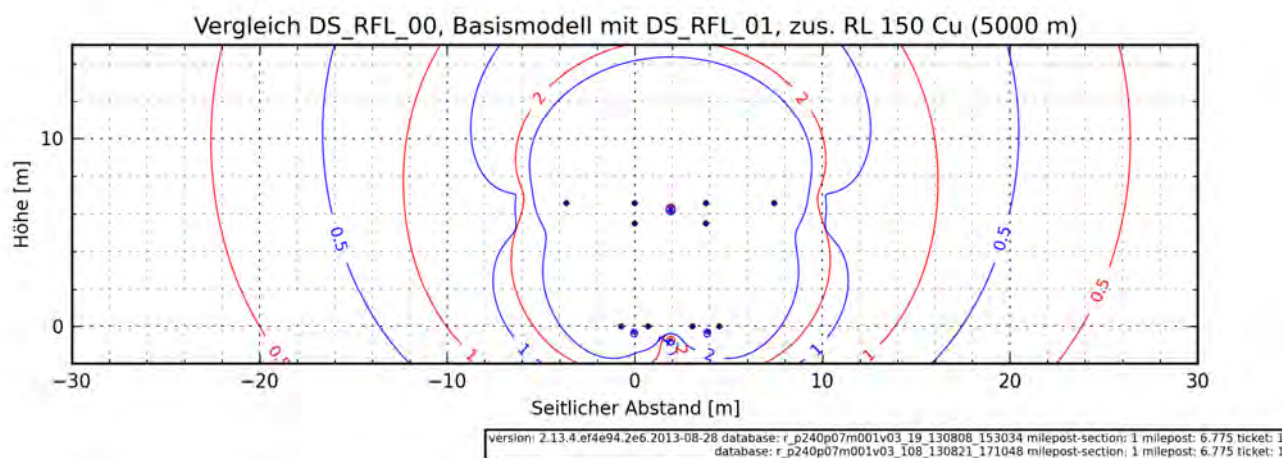


Abbildung 4-14: DS\_RFL\_01, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 5 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)

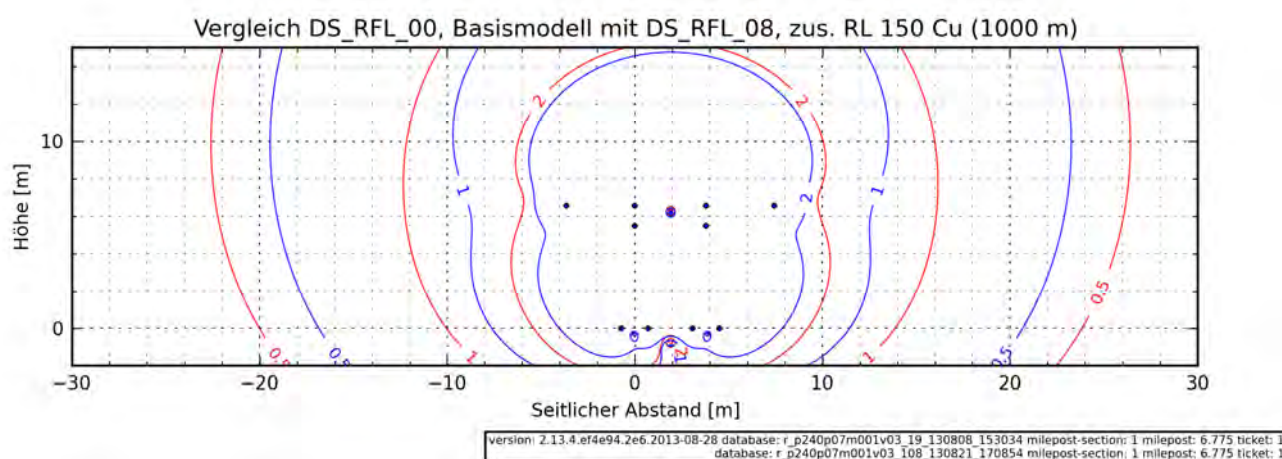


Abbildung 4-15: DS\_RFL\_08, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)



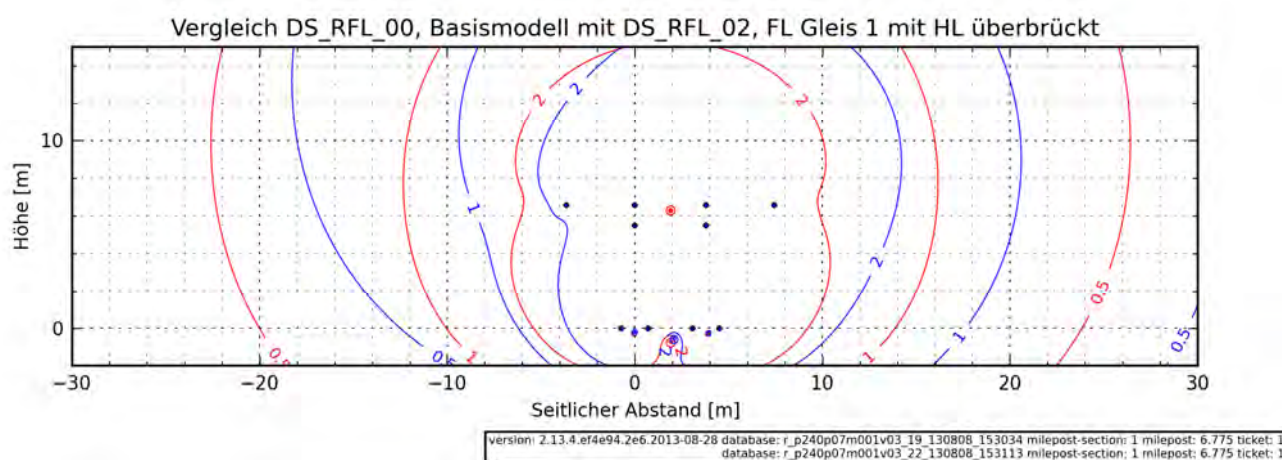


Abbildung 4-16: DS\_RFL\_02, FL Gleis 1 mit HL überbrückt: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)

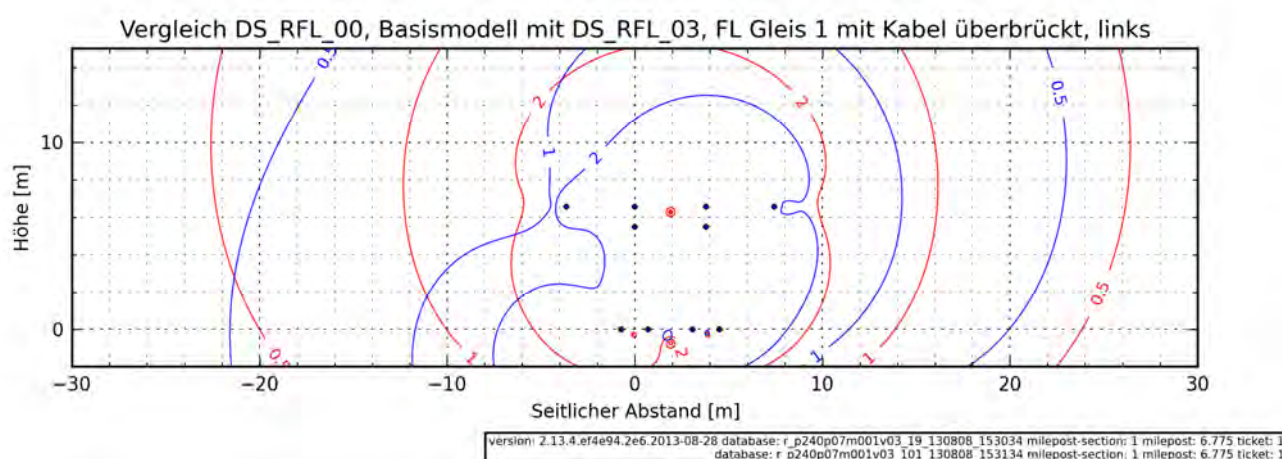


Abbildung 4-17: DS\_RFL\_03, FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, links: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)

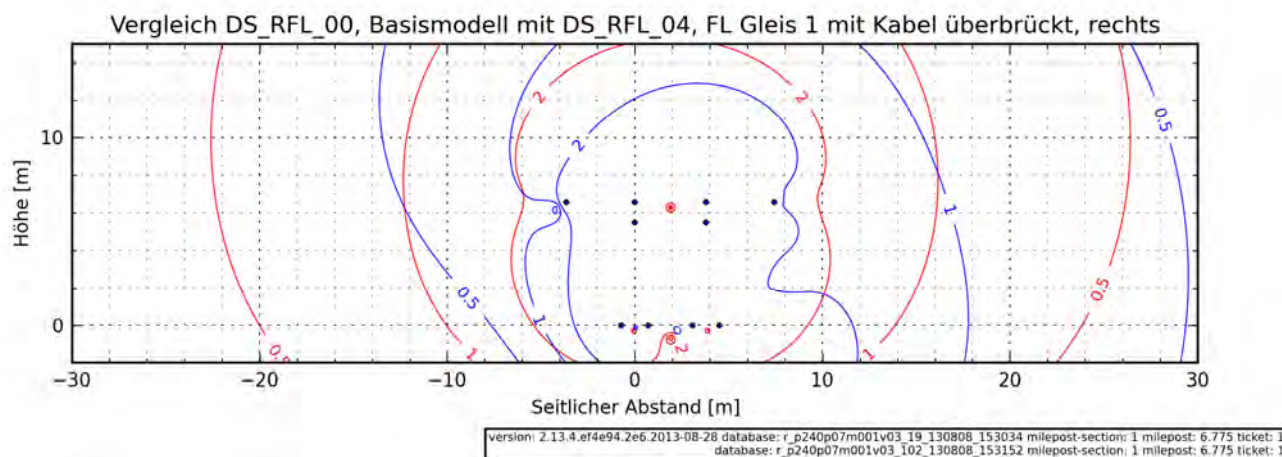


Abbildung 4-18: DS\_RFL\_04, FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, rechts: Iso-Linien der magnetischen Flusssdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)

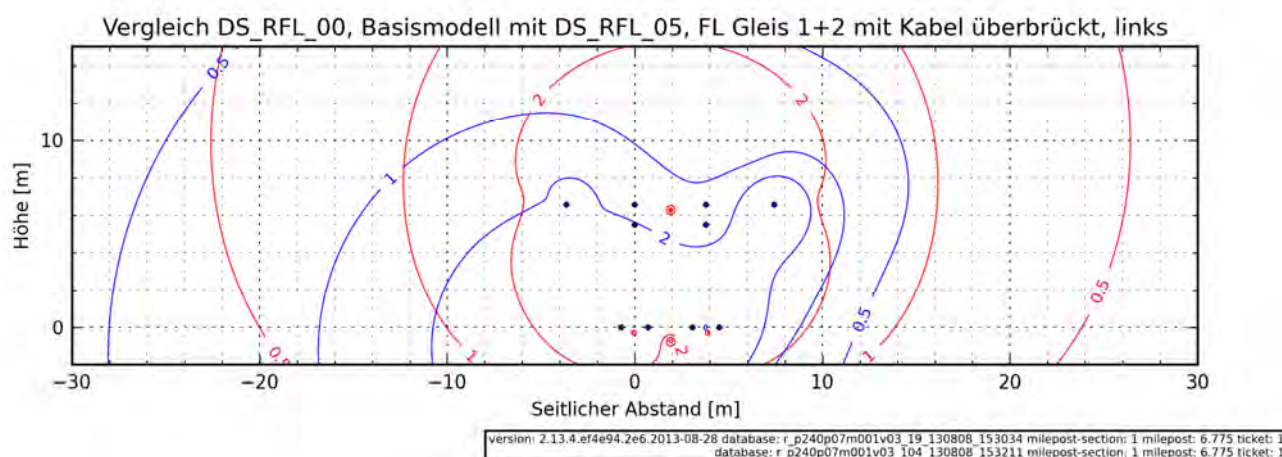


Abbildung 4-19: DS\_RFL\_05, FL Gleis 1+2 mit Kabel überbrückt, links: Iso-Linien der magnetischen Flusssdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)

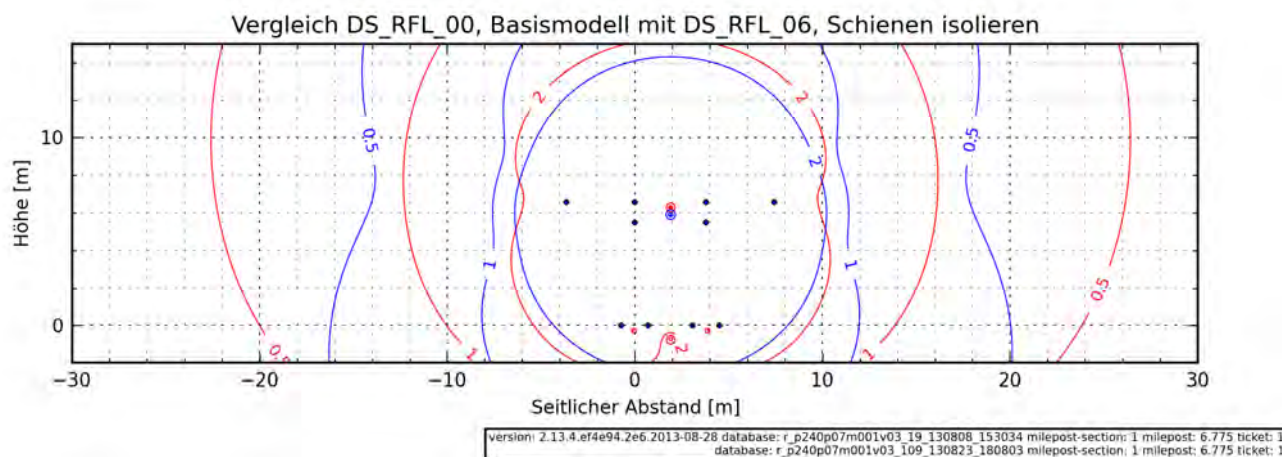


Abbildung 4-20: DS\_RFL\_06, Schienen unterbrochen, mit 4 zus. RL 150 mm<sup>2</sup> Cu überbrückt: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)

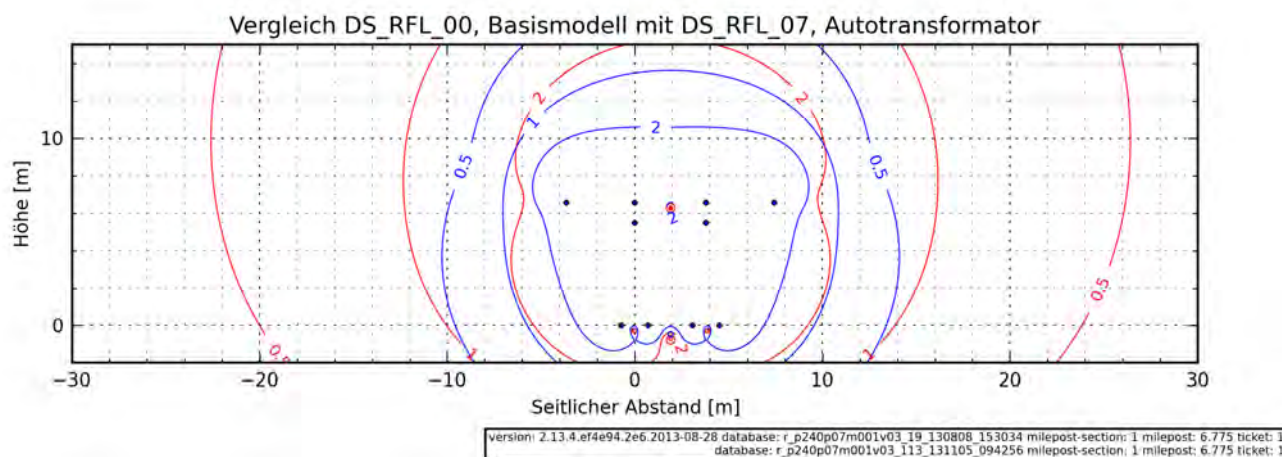


Abbildung 4-21: DS\_RFL\_07, Autotransformator: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit DS\_RFL\_00, Basismodell (rot)



## 4.4 Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke

Magnetische Flussdichte [ $\mu\text{T}$ ]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
BHF_ES_00	Ohne (Basismodell)	2.61	4.16	1.33	1.05	1.94	2.58	1.24	0.97	2.61	4.16	1.33	1.05
BHF_ES_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	2.02	3.21	1.01	0.82	1.40	1.77	0.89	0.72	2.02	3.21	1.01	0.82
BHF_ES_02	Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben	2.22	3.45	1.15	0.93	1.67	2.13	1.07	0.85	2.22	3.45	1.15	0.93
BHF_ES_03	Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung	2.55	4.03	1.34	1.06	1.91	2.54	1.25	0.98	2.55	4.03	1.34	1.06
BHF_ES_04	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 900 m	1.37	1.99	0.68	0.58	1.37	1.99	0.68	0.58	0.89	1.04	0.56	0.50
BHF_ES_05	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 100 m	1.51	2.21	0.62	0.55	1.51	2.21	0.62	0.55	1.01	1.16	0.53	0.48

Tabelle 4-7: Maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse für die untersuchten Massnahmen bei Bahnhoffahrleitung Einspurstrecke

Reduktion der magnetischen Flussdichte zum Basismodell [%]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
BHF_ES_00	Ohne (Basismodell)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BHF_ES_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	23%	23%	24%	22%	28%	31%	28%	25%	23%	23%	24%	22%
BHF_ES_02	Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben	15%	17%	13%	12%	14%	17%	14%	12%	15%	17%	13%	12%
BHF_ES_03	Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung	2%	3%	-1%	-1%	2%	2%	-1%	-1%	2%	3%	-1%	-1%
BHF_ES_04	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 900 m	48%	52%	49%	44%	30%	23%	45%	40%	66%	75%	58%	52%
BHF_ES_05	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 100 m	42%	47%	53%	48%	22%	14%	50%	43%	61%	72%	60%	54%

Tabelle 4-8: Reduktion der magnetischen Flussdichte im Vergleich zur Basisvariante für die maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse

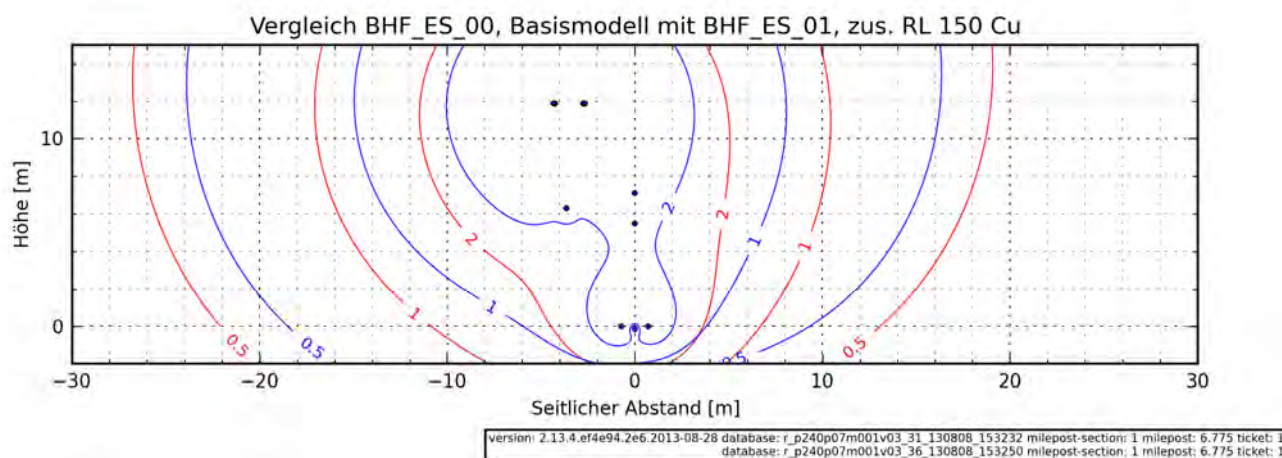


Abbildung 4-22: BHF\_ES\_01, Zusätzliche Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_ES\_00, Basismodell (rot)

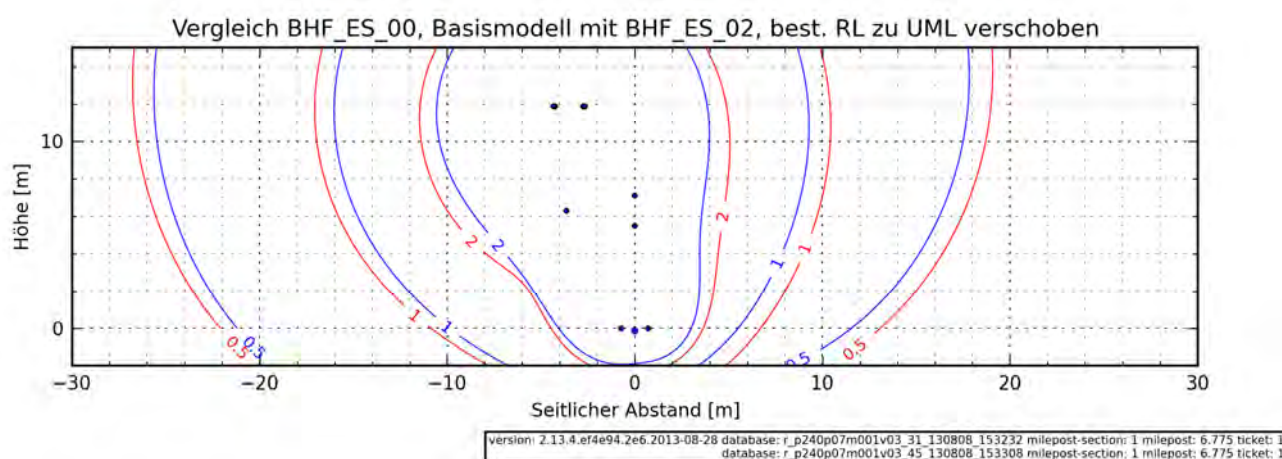


Abbildung 4-23: BHF\_ES\_02, Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_ES\_00, Basismodell (rot)

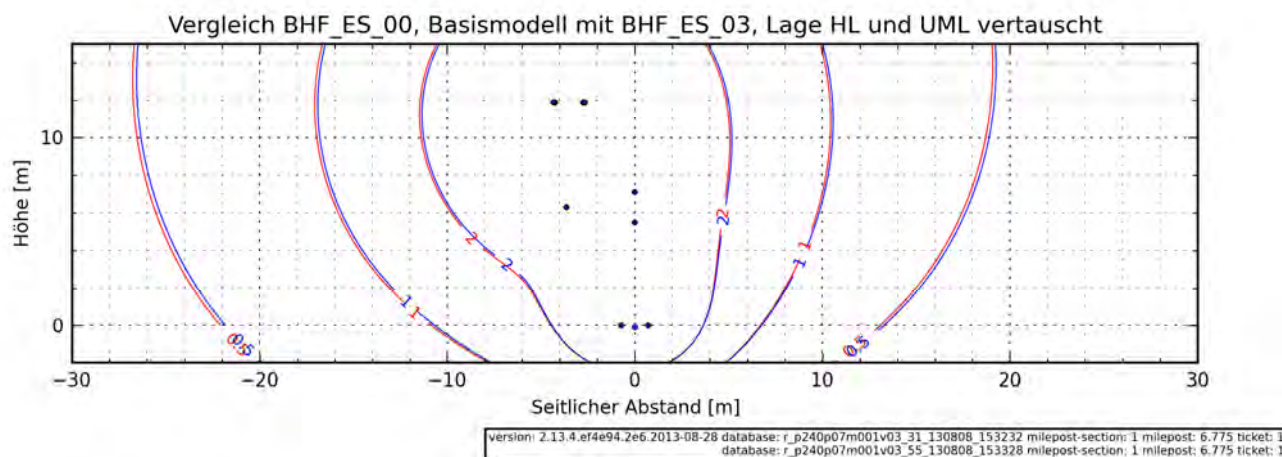


Abbildung 4-24: BHF\_ES\_03, Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_ES\_00, Basismodell (rot)

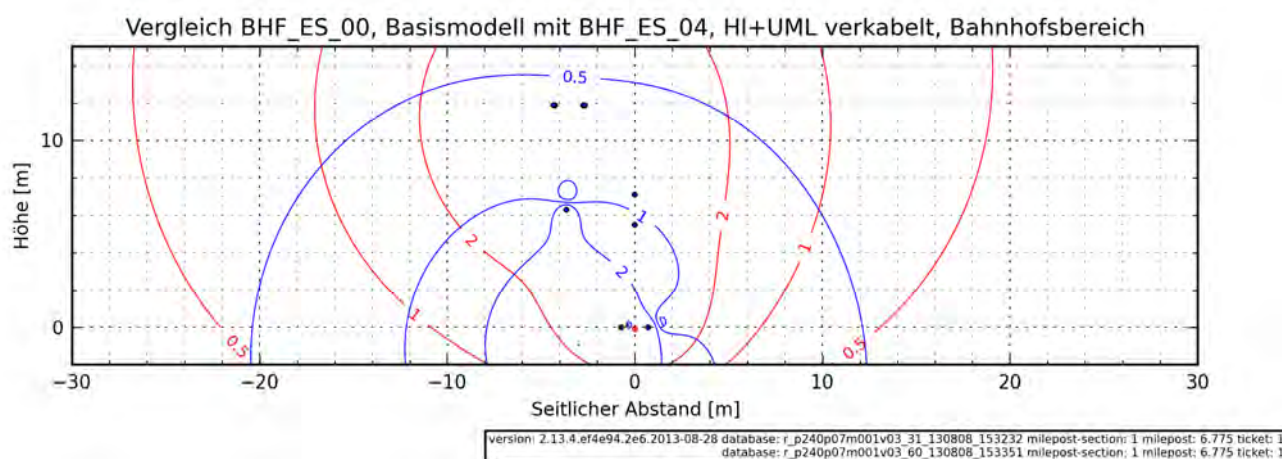


Abbildung 4-25: BHF\_ES\_04, Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 900 m (ganzer Bahnhofsbereich): Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_ES\_00, Basismodell (rot)

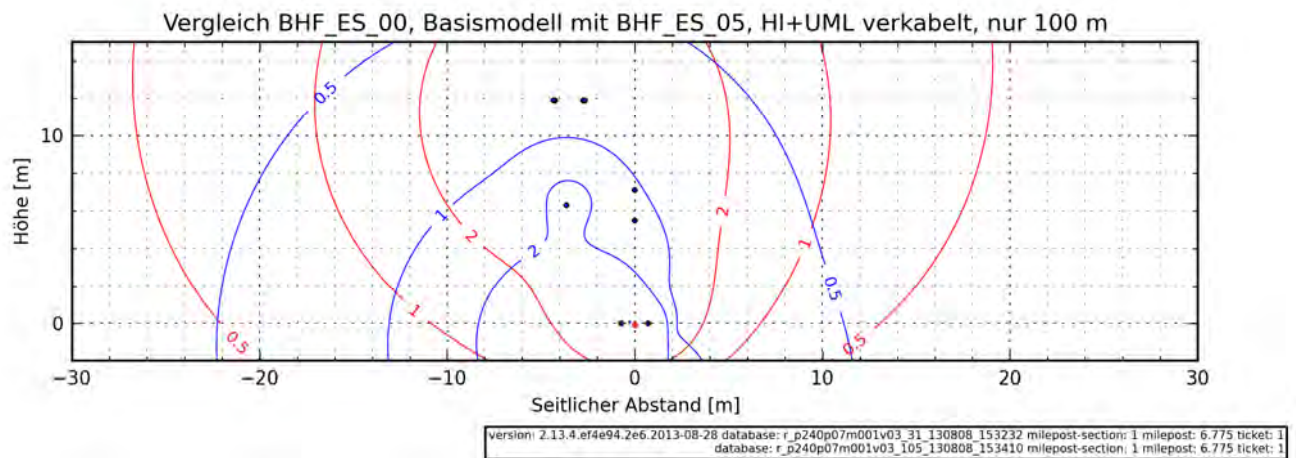


Abbildung 4-26: BHF\_ES\_05, Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 100 m: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_ES\_00, Basismodell (rot)

## 4.5 Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke

Magnetische Flussdichte [µT]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
BHF_DS_00	Ohne (Basismodell)	4.93	7.91	2.04	1.52	3.74	4.94	1.74	1.35	4.93	7.91	2.04	1.52
BHF_DS_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	3.74	6.02	1.43	1.10	2.68	3.45	1.16	0.92	3.74	6.02	1.43	1.10
BHF_DS_02	Bestehende Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben	3.52	5.56	1.36	1.10	2.63	3.35	1.33	1.05	3.52	5.56	1.36	1.10
BHF_DS_03	Verschieben Umgehungsleitungen: Trasseemitte	1.49	1.98	1.98	1.49	1.22	1.52	1.53	1.22	1.49	1.98	1.98	1.49
BHF_DS_04	Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine	2.17	3.03	3.10	2.21	1.87	2.40	2.43	1.89	2.17	3.03	3.10	2.21

Tabelle 4-9: Maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse für die untersuchten Massnahmen bei Bahnhoffahrleitung Doppelspurstrecke

Reduktion der magnetischen Flussdichte zum Basismodell [%]		y-Bereich: -2 – 15 m				y-Bereich: -2 – 6 m				y-Bereich: 6 – 15 m			
Variante	Beschreibung	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r	5 m l	3 m l	3 m r	5 m r
BHF_DS_00	Ohne (Basismodell)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BHF_DS_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	24%	24%	30%	28%	28%	30%	34%	32%	24%	24%	30%	28%
BHF_DS_02	Bestehende Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben	29%	30%	33%	28%	30%	32%	24%	22%	29%	30%	33%	28%
BHF_DS_03	Verschieben Umgehungsleitungen: Trasseemitte	70%	75%	3%	2%	67%	69%	13%	9%	70%	75%	3%	2%
BHF_DS_04	Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine	56%	62%	-52%	-45%	50%	51%	-39%	-40%	56%	62%	-52%	-45%

Tabelle 4-10: Reduktion der magnetischen Flussdichte im Vergleich zur Basisvariante für die maximale magnetische Flussdichte in 3 m und 5 m Entfernung ab Bahntrasse



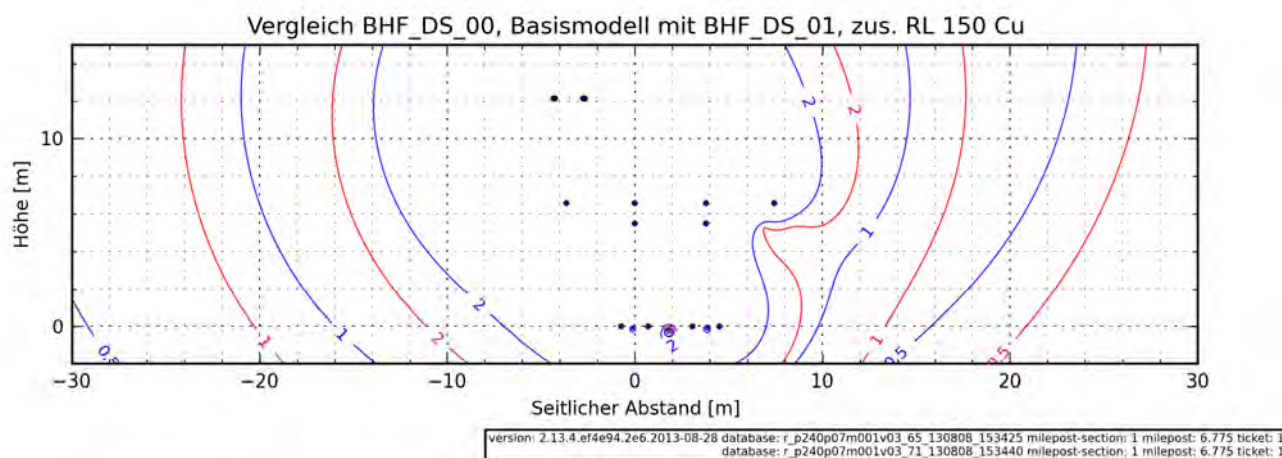


Abbildung 4-27: BHF\_DS\_01, Zusätzliche Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_DS\_00, Basismodell (rot)

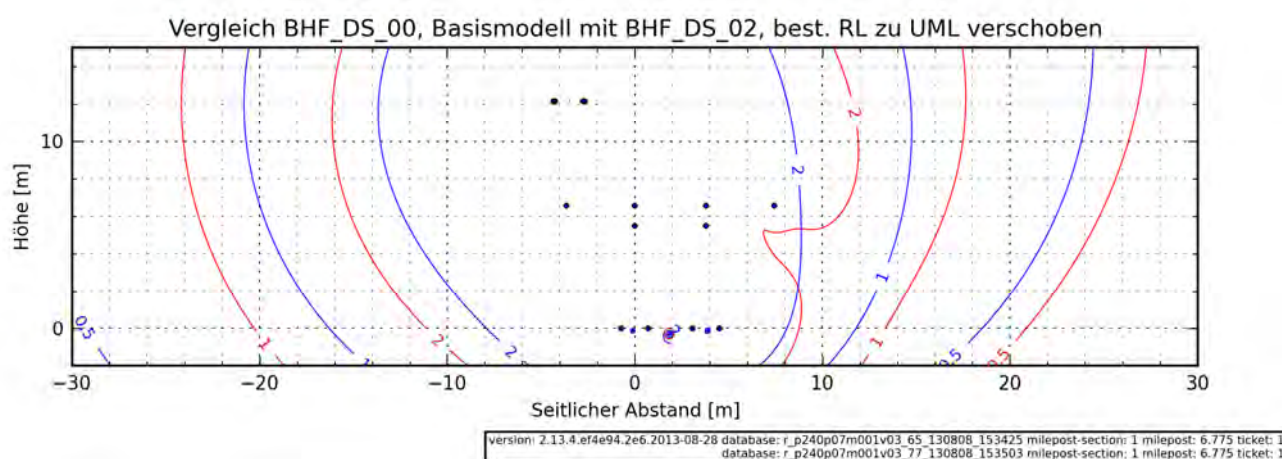


Abbildung 4-28: BHF\_DS\_02, Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_DS\_00, Basismodell (rot)

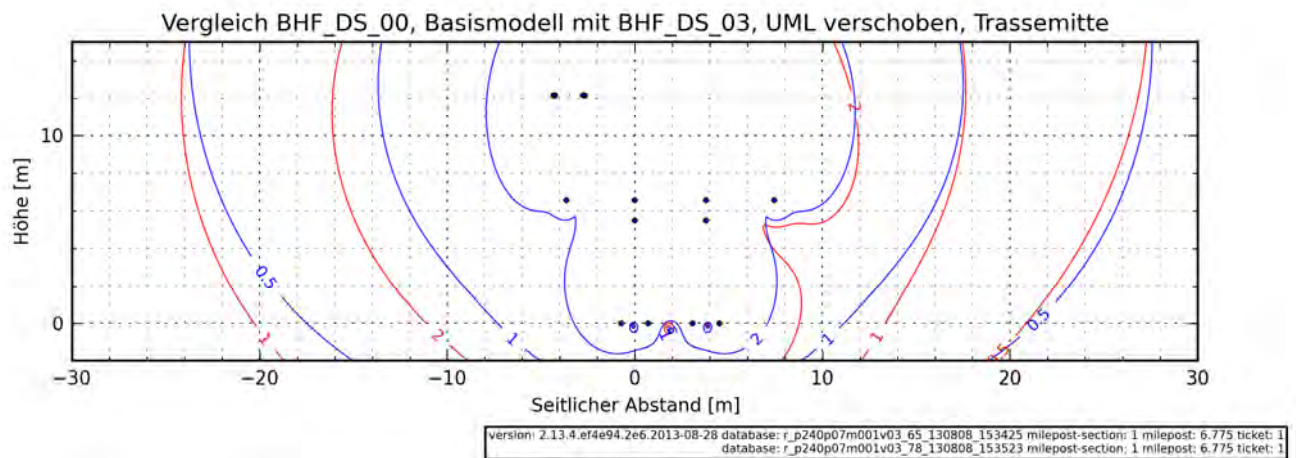


Abbildung 4-29: BHF\_DS\_03, Verschieben Umgehungsleitungen: Trassemitte, inkl. zusätzlicher Rückleiter bei Umgehungsleitung: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_DS\_00, Basismodell (rot)

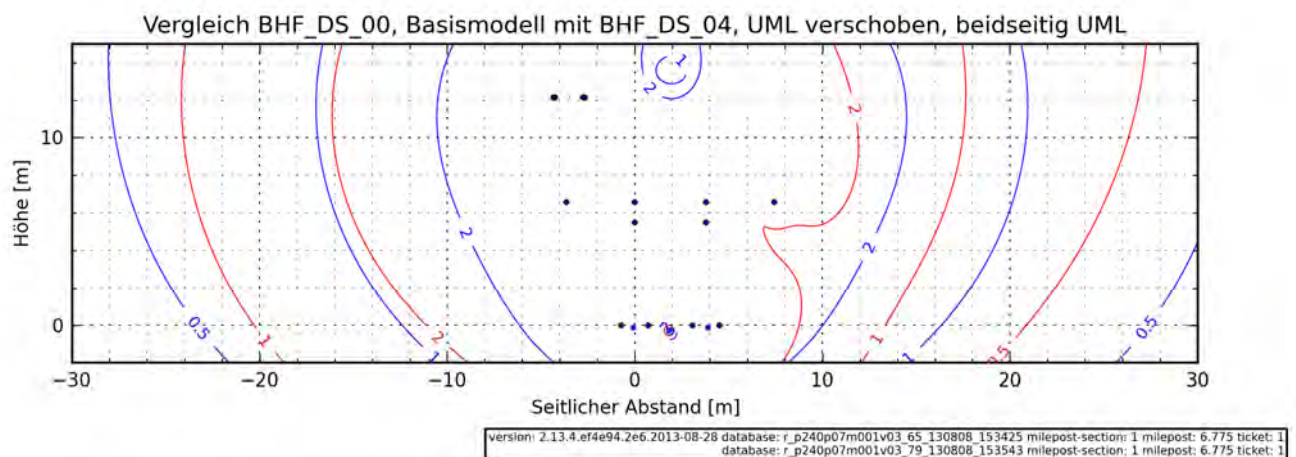


Abbildung 4-30: BHF\_DS\_04, Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine Umgehungsleitung: Iso-Linien der magnetischen Flussdichte (blau), Vergleich mit BHF\_DS\_00, Basismodell (rot)



## 4.6 Bestimmen des Nutzens der einzelnen Massnahmen

Als Basis für die Beurteilung wird der Nutzen mit Punkten von 0-5 bewertet, wobei folgende Bewertungsskala angewendet wird. Die vergebenen Punkte werden anschliessend für die Kosten- und Nutzen-Analyse weiterverwendet.

Punkte	Reduktion gegenüber Basismodell	Beschreibung (Qualitativ)
5	50 % ... 100 %	Sehr hoher Nutzen
4	30 % ... 49.9 %	Hoher Nutzen
3	15 % ... 29.9 %	Mittlerer Nutzen
2	5 % ... 14.9 %	Kleiner Nutzen
1	0 % ... 4.9 %	Marginaler Nutzen
0	< 0 %	Ungenügend / Verschlechterung

Tabelle 4-11: Benotung der Reduktion der magnetischen Flussdichte gegenüber dem Basismodell

Die nachfolgende Tabelle enthält jeweils die aus obiger Skala resultierenden Punkte pro Trasse-Seite sowie das Punkte-Maximum der beiden Seiten. Zudem werden die Massnahmen in folgende Kategorien unterteilt, wobei als wirksam eine Punktezahl von mindestens 2 betrachtet wird:

- Kategorie 1: Beidseitig wirksam
- Kategorie 2: Einseitig wirksam
- Kategorie 3: Einseitig wirksam zu Lasten der anderen Seite

Variante	Beschreibung	Linke Seite	Rechte Seite	Max.	Kat.
<b>Einspur-Fahrleitung N-FL</b>					
ES_NFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	4	3	4	1
ES_NFL_06	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	3	2	3	1
ES_NFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	3	2	3	1
ES_NFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	4	3	4	1
ES_NFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	4	3	4	1
ES_NFL_05	Schienen Isolieren (Gleisunterbrüche)	4	3	4	1
<b>Einspur-Fahrleitung R-FL</b>					
ES_RFL_01	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 5 km	4	3	4	1
ES_RFL_07	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 1 km	3	2	3	1
ES_RFL_02	Zusätzlicher Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu, Länge 300m	2	2	2	1
ES_RFL_03	Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m	4	3	4	1
ES_RFL_04	Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m	4	3	4	1
ES_RFL_05	Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km	5	5	5	1
ES_RFL_06	Booster-Transformator	3	5	5	1
<b>Doppelspur-Fahrleitung</b>					
DS_RFL_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 5 km	4	4	4	1
DS_RFL_08	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km	3	3	3	1
DS_RFL_02	FL Gleis 1 mit Hilfsleitung (Freileitung) überbrückt	3	0	3	3
DS_RFL_03	FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, links	0	3	3	3
DS_RFL_04	FL Gleis 1 mit Kabel überbrückt, rechts	4	0	4	3
DS_RFL_05	FL Gleis 1+2 mit Kabel überbrückt, links	0	5	5	3
DS_RFL_06	Schienen Isolieren (Gleisunterbrüche)	4	4	4	1
DS_RFL_07	Autotransformatorsystem (Negativ-Feeder)	5	5	5	5
<b>Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke</b>					
BHF_ES_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	3	3	3	1
BHF_ES_02	Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben	3	2	3	1
BHF_ES_03	Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung	1	0	1	3
BHF_ES_04	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 900 m	5	4	5	1
BHF_ES_05	Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 100 m	4	5	5	1
<b>Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke</b>					
BHF_DS_01	Zus. Rückleiter 150 mm <sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen	3	3	3	1
BHF_DS_02	Bestehende Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben	3	4	4	1
BHF_DS_03	Verschieben Umgehungsleitungen: Trasseemitte	5	1	5	2
BHF_DS_04	Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine	5	0	5	3

Tabelle 4-12: Punktebewertung des Nutzens der Massnahmen, basierend den Werten 3 m links/rechts vom Bahntrasse (über den ganzen Höhenbereich)

## 4.7 Beurteilung / Bemerkung zum Nutzen

Die Ergebnisse des Nutzens der einzelnen untersuchten Massnahmen führen zu folgenden Erkenntnissen und Bemerkungen:

- Eine Optimierung der Anordnung der Rückleiter bringt einen mittleren bis hohen Nutzen. Daher lohnt es sich, bei der Planung von Fahrleitungsanlagen auf die Anordnung der Rückleiter besonders zu achten.
- Die Installation eines zusätzlichen Rückleiterseils kann einen mittleren bis hohen Nutzen bringen (beidseitig wirksam), bedingt jedoch, dass dieses über eine gewisse Länge angebracht wird. Dabei ist eine Länge von mindestens 300 m – 1'000 m zu berücksichtigen, je länger desto besser. Bis zu einer Länge von 4-5 km nimmt der Nutzen stetig zu, ab einer Länge von rund 5 km ist der zusätzliche Nutzen jedoch nur noch marginal.
- Eine Verkabelung der jeweiligen Strom führenden und somit Feld verursachenden Leiter, auch nur für 100 m, bringt einen sehr hohen Nutzen. Je nach Anordnung der Kabelleitung ist die Massnahme gar auf beiden Seiten des Bahntrassees wirksam.
- Das Isolieren einer Schiene in Längsrichtung (unterbrechen mit Isolierstössen) bringt einen hohen Nutzen (beidseitig). Sie wirkt jedoch nur punktuell. Anmerkung: bei dieser Massnahme sind jedoch gewisse Vorbehalte hinsichtlich Akzeptanz angebracht (siehe auch Kapitel 5.1).
- Mit dem System Booster-Transformator wird bei einer Einspurstrecke der den Rückleiterseilen gegenüberliegenden Seite ein sehr hoher Nutzen erzielt (jedoch nur auf ca. 250 m). Auf der Seite mit den Rückleiterseilen resultiert im nahen Bereich zur Bahn jedoch keine Verbesserung, es ist gar eine kleine Verschlechterung zu sehen. Mit steigender Entfernung zum Bahntrasse nimmt der Nutzen gegenüber der Basisvariante jedoch zu. Dies ist dadurch begründet, dass der ganze Strom durch die Rückleiterseile fliesst und somit ein entsprechendes Feld entsteht. Daher wurde der Nutzen der Massnahme vorliegend für die Einspurstrecke aufgezeigt, da bei dieser die Rückleiterseile auf eine Seite geführt werden können. Bei der Doppelspurstrecke sind beidseitig Rückleiterseile notwendig, d.h. es findet zwar eine Kompensation statt, im Nahbereich zur Bahn, in welchem sich auch OMEN befinden können, ist aber keine Verbesserung zu erwarten.
- Im Bahnhofsbereich ist das Verschieben der Umgehungsleitung mit zusätzlicher Installation eines Rückleiterseils eine Massnahme mit sehr hohem Nutzen. Jedoch ist sie nur einseitig wirksam zu Lasten der anderen Seite.
- Das Überbrücken der Fahrleitung durch eine Hilfsleitung (Freileitung), und einer optimierten Anordnung derselben (mit Rückleiter), bringt einen hohen Nutzen, jedoch zu Lasten der anderen Seite.
- Das Tauschen der Hilfs- und Umgehungsleitung im Bahnhofsbereich bringt keinen bedeutenden Nutzen.
- Eine Unterscheidung zwischen R-FL und N-FL ist grundsätzlich nicht erforderlich. Die Wirksamkeit der Massnahmen ist bei beiden etwa identisch.
- Für die Bahnhoffahrleitung wurde die Verkabelung der Hilfs- oder Umgehungsleitung bei Einspurstrecken untersucht. Für die Doppelspurstrecke können die gleichen Ergebnisse oder Erkenntnisse verwendet werden, da hier anstelle der Hilfsleitung die zusätzliche Umgehungsleitung verkabelt wird (Verkabelung der Strom führenden Leiter).
- Das Autotransformator-System bringt einen sehr hohen Nutzen. Hauptgrund ist dabei die halbe Strombelastung.

## 5 ABSCHÄTZEN DES AUFWANDES DER MASSNAHMEN

### 5.1 Annahmen/Bemerkungen zur Bestimmung der Kosten

Die Abschätzung der Kosten basiert auf Schätzungen für die standardisierten Situationen. Dabei gelten folgende Annahmen und Bemerkungen:

Zusätzlicher Rückleiter	Die zusätzlichen Seile werden an die bestehenden Masten montiert (Mastdimensionierung unverändert).
Rückleiter verschieben	<p>Dies ist nur eine Massnahme für bestehende Anlagen (bei Neuanlagen kann man es ja bereits dementsprechend planen/bauen).</p> <p>Das bestehende Rückleiterseil kann wiederverwendet werden (keine zusätzlichen Materialkosten für den Leiter)</p> <p>Die Seile werden an die bestehenden Masten montiert (Mastdimensionierung unverändert)</p>
Umgehungsleitung verschieben	<p>Dies ist nur eine Massnahme für bestehende Anlagen (bei Neuanlagen kann man es ja bereits dementsprechend planen/bauen).</p> <p>Bestehendes Joch weist genügend Tragfähigkeit für den notwendigen Jochaufsatz.</p> <p>Die bestehenden Leiter der Umgehungsleitung können wiederverwendet werden (keine zusätzlichen Materialkosten für diese Leiter)</p> <p>Es werden zudem zusätzliche Rückleiter 2x150 mm<sup>2</sup> montiert (eigentlich Massnahmen-Kombination mit zusätzlichen Rückleitern).</p> <p>Das Schieben ist primär im Ein- und Ausfahrbereich des Bahnhofs erforderlich (schmales Trasse). Aus diesem Grund werden für die Ermittlung der Kosten von 300 m ausgegangen.</p>
Schiene isolieren	<p>Die zusätzlichen Seile werden an die bestehenden Masten montiert (Mastdimensionierung unverändert).</p> <p>Es ist davon auszugehen, dass die Isolierstösse in den Schienen relativ häufig ausgewechselt werden müssen, da diese durch die Räder der Fahrzeuge "überwalzt" werden. Dem wurde in den Kosten entsprechend Rechnung getragen. Ein Ersatz bringt zudem zwingend eine Gleissperrung mit sich, was wiederum einen negativen Einfluss auf die Verfügbarkeit hat.</p> <p>Zudem ist zu berücksichtigen, dass durch die Isolierstösse die Lärmbelastung zunimmt.</p>

## Verkabeln

Kabel werden in einem Kabelrohrblock verlegt (und es ist noch kein Rohrblock vorhanden).

Es wird von einem  $400 \text{ mm}^2 / 30 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  Kabel ausgegangen mit parallelem Rückleiter  $1 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ .

Anmerkung: im Netz der SBB ist bereits eine grosse Länge an Kabelleitungen installiert. Kabelleitungen beeinflussen durch ihr kapazitives Verhalten die Netzresonanzfrequenz, was unter gewissen Umständen zu Resonanzschwingungen führen kann (zum Beispiel angeregt durch ein Stromrichterfahrzeug). Dem Verlegen von Kabeln sind somit Grenzen gesetzt respektive das Verlegen der Kabel könnte zu anderweitigen Folgekosten führen.

## Booster Transformator

Nebst der Installation des Booster-Transformators (direkt beim OMEN, siehe auch Kapitel 2.4.1.4) müssen auf einem Bereich von 250 m (zwischen zwei Rückleiterquerverbindungen) die Rückleiter mit  $2 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$  verstärkt werden (Kompensation der Schienen als rückstromführende Leiter). Anmerkung: die Wirksamkeit dieses Systems ist örtlich beschränkt auf den Bereich zwischen den 2 Rückleiterquerverbindungen, also auf rund 250 m.

## Autotransformer-System

Ein Autotransformatorsystem bedingt den Umbau eines ganzen Speisesektors. Als Sektorlänge wird für die Kostenberechnungen von 30 km ausgegangen, wobei ein Autotransformator alle 10 km platziert wird.

Das Autotransformatorsystem ist somit wohl nur eine Massnahme für neue Anlagen / Strecken. Die angegebenen Kosten stellen den Mehraufwand gegenüber einer konventionellen, einphasigen Fahrleitung dar (d.h., die Kosten für den Negativ-Feeder, die Autotransformatoren, den speziellen Transformator im UW... ). Dabei wird in vorliegendem Beispiel die doppelspurige Strecke betrachtet.

Anmerkung: Bei einer Einspur-Strecke würde die Fahrleitung in der Regel bereits mit einer Hilfsleitung ausgeführt. Diese Hilfsleitung kann gerade als Negativ-Feeder verwendet werden. D.h., gegenüber der herkömmlichen Lösung entsteht bei der Einspur-Strecke durch den Negativ-Feeder materiell kein Mehraufwand, der Zusatzaufwand umfasst im Wesentlichen die Autotransformatoren und den speziellen Transformator im UW. Für eine 30 km lange Einspur-Strecke kann gegenüber der Doppelpur-Strecke ungefähr von rund der Hälfte der Kosten ausgegangen werden.

## 5.2 Allgemeines zur Beurteilung des Aufwandes

Es kann nicht allgemein gültig beurteilt werden, ob eine Massnahme zur Einhaltung der NISV [1] verhältnismässig respektive unverhältnismässig ist. Daher sind auch nachfolgende Auswertungen und Bemerkungen hinsichtlich des Aufwandes der Massnahmen nur qualitativ gehalten. Die Überlegungen zur Verhältnismässigkeit der Kosten, insbesondere von teuren Massnahmen, sind jeweils im Kontext mit dem konkreten Projekt anzustellen. Denn in dieser Beurteilung spielen projektspezifische Aspekte, wie beispielsweise die gesamte Projektsumme oder die Nutzungsintensität an den profitierenden OMEN (Anzahl Personen, Aufenthaltsdauer) eine wichtige und entscheidende Rolle. Dazu folgende Bemerkungen/Überlegungen:

Gemäss NISV sind zur Einhaltung des Anlagegrenzwertes Massnahmen umzusetzen, die wirtschaftlich tragbar sind. Die wirtschaftliche Tragbarkeit kann dabei nur im Gesamtkontext des spezifischen Projektes beurteilt werden. Beispiel: Bei einer Gesamtsumme eines Projektes von 500'000 CHF scheint eine Massnahme von 100'000 CHF wohl unverhältnismässig, bei einem Projekt von mehreren Millionen CHF wäre diese dann aber durchaus vertretbar. Hierbei kann als Grössenordnung für die Kosten für den Bau einer Fahrleitung von 450'000 CHF/km für eine Einspurstrecke und von 800'000 CHF/km bei einer Doppelspurstrecke ausgegangen werden<sup>2</sup>.

Zur Beurteilung der Verhältnismässigkeit der Massnahmen könnte auch ein Vergleich der "Nutzungsintensität" an den OMEN herangezogen werden. Ein mögliches Mass hierfür (als Erläuterung des Begriffs "Nutzungsintensität"): Anzahl der sich an den betreffenden OMEN aufhaltenden Personen, für welche die Massnahme einen Nutzen bringt (d.h. der Anlagegrenzwert würde nach der Umsetzung der Massnahme eingehalten). Zudem kann in diese Betrachtung für eine weitere Differenzierung noch die Aufenthaltszeit der Personen beim OMEN miteingezogen werden. So können die Kosten jeweils in den Bezug zu den von der Massnahme profitierenden Personen und deren eigentlichen Aufenthaltsdauer gestellt werden. Zur besseren Erläuterung folgende Szenarien:

- a) Durch eine bestimmte Massnahme mit Kosten von 200'000 CHF könnte die NISV bei einem Bürogebäude komplett eingehalten werden. Davon würden 100 Personen profitieren, die sich täglich 8 h am OMEN aufhalten, was total 800 Personenstunden respektive 250 CHF / Personenstunde ergibt.
- b) Beim gleichen Gebäude könnte mit einer weniger effektiven Massnahme jedoch mit Totalkosten von lediglich 50'000 CHF der Anlagegrenzwert bei 80 % der Arbeitsplätze eingehalten werden, als für 80 Personen. Das heisst, total 640 Personenstunden, was 78 CHF/Personenstunde ergibt. → mit 25 % der Kosten wird dabei ein Nutzen von 80 % erreicht.
- c) Für die Einhaltung der NISV bei 3 Einfamilienhäusern wäre für die dafür notwendige Massnahme mit Kosten von 50'000 CHF zu rechnen. Davon würden 12 Personen profitieren, wobei sich diese durchschnittlich 16 h am OMEN aufhalten, was total 192 Personenstunden respektive 260 CHF / Personenstunde ergibt. Der spezifische Wert ist also im ähnlichen Rahmen wie bei Szenario a).

Nur diese 3 Szenarien zeigen bereits, dass sich die Beurteilung der Verhältnismässigkeit schwierig gestaltet und diese somit nicht pauschal und generisch für eine Massnahme bestimmt werden kann. Es ist auch nicht Ziel dieser Studie, eine Schwelle für einen solchen spezifischen Wert zu definieren.

<sup>2</sup> Diese Werte sind nur als Richtwert zu verstehen ist. Projektspezifische Rahmenbedingungen, wie Anzahl Kurven oder die Art der Fahrleitung, spielen dabei eine wesentliche Rolle

Im Rahmen des Erstellens der Studie wurde auch der Ansatz diskutiert, die Kosten in den Bezug zur Anzahl der profitierenden OMEN zu setzen. Es zeigt sich aber, dass die Anzahl der profitierenden OMEN nur bedingt als Indiz für die Verhältnismässigkeit der Kosten der Massnahme dient. Zur Erläuterung folgendes Beispiel: auf einem Abschnitt von 200 m, auf welchem eine Massnahme eine Verbesserung erzielt, profitieren

- in einem Fall 10 einzelne Gebäude, z.B. Einfamilienhäuser → im Sinne der NISV [1] total 10 OMEN.
- und in einem anderen Fall nur ein 200 m langes Gebäude, z.B. ein Büro-Gebäude, oder gar nur unbebautes Land in einer Bauzone → im Sinne der NISV [1] somit total nur 1 OMEN.



## 6 ZUSAMMENSTELLUNG DER MASSNAHMEN

Nachfolgende Tabelle zeigt zusammengefasst für die einzelnen Basismodelle die Massnahmen und deren Beurteilung.

Basismodell	Massnahme	Kosten	Nutzen	Wirksamkeit	Bemerkung
Einspur-Fahrleitung	Im Bereich des OMEN einen zusätzlichen Rückleiter in der Nähe zur Hilfsleitung installieren, auf einer Länge zwischen 300 m – 1'000 m.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Im Bereich des OMEN die Hilfsleitung verkabeln, auf einer Länge von rund 100 m	Mittel	Hoch	Beidseitig	
	Im Bereich des OMEN die Schienen unterbrechen (mit Isolierstössen) und mit Rückleiterseilen entsprechend überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Mittel	Hoch	Beidseitig	Vorbehalt, siehe unten
	Im Bereich des OMEN den Einsatz von einem Booster-Transformator-System vorsehen (Wirksamkeit ca. 250 m).	Mittel	Sehr hoch	Einseitig	
Doppelspur-Fahrleitung	Im Bereich des OMEN zusätzliche Rückleiter installieren, auf einer Länge zwischen 300 m – 1'000 m.	Mittel	Mässig	Beidseitig	
	Fahrleitung im Bereich des OMEN mit einer Hilfsleitung als Freileiter überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Niedrig	Mittel	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Fahrleitung im Bereich des OMEN mit einer Kabelleitung überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Mittel	Hoch bis sehr hoch	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Im Bereich des OMEN die Schienen unterbrechen (alle 4 Schienen, mit Isolierstössen) und mit Rückleiterseilen entsprechend überbrücken, dies auf einer Länge um 100 m.	Mittel	Hoch	Beidseitig	Vorbehalt, siehe unten
	Autotransformatorsystem über den ganzen Speisesektor	Sehr hoch	Sehr hoch	Beidseitig	Vorbehalt, siehe unten

Basismodell	Massnahme	Kosten	Nutzen	Wirksamkeit	Bemerkung
Bahnhoffahrleitung, Einspurstrecke	Bestehender Rückleiter zur Hilfs- und Umgehungsleitung verschieben.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Über den ganzen Bahnhofsbereich einen zusätzlichen Rückleiter nahe zu den Hilfs- und Umgehungsleitungen installieren.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Tauschen der Hilfs- und der Umgehungsleitung.	Niedrig	Marginal	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Im Bereich des OMEN die Hilfs- und Umgehungsleitungen verkabeln (rund 100 m)	Mittel	Sehr hoch	Beidseitig	
Bahnhoffahrleitung, Doppelspurstrecke	Bestehende Rückleiter zu den Umgehungsleitungen verschieben.	Niedrig	Hoch	Beidseitig	
	Über den ganzen Bahnhofsbereich einen zusätzlichen Rückleiter nahe zu den Umgehungsleitungen installieren.	Niedrig	Mittel	Beidseitig	
	Verschieben der Umgehungsleitungen in die Trasseemitte im Bereich des OMEN (sowie mit 2 Rückleitern ausrüsten).	Niedrig	Sehr hoch	Einseitig	
	Verschieben der Umgehungsleitung, so dass je Seite eine Leitung geführt wird (sowie mit 2 Rückleitern ausrüsten).	Niedrig	Sehr hoch	Einseitig, zu Lasten der anderen Seite	
	Im Bereich des OMEN die Hilfs- und Umgehungsleitungen verkabeln (rund 100 m)	Mittel	Sehr hoch	Beidseitig	

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Massnahmen

Zu der Tabelle folgende Bemerkungen:

- Kostengünstig sind Massnahmen, welche nur punktuell auf einer beschränkten Abschnittslänge (~ 100 m) eingesetzt werden.
- Die Unterbrechung der Schienen (Isolierstösse) bringt einen grossen Nutzen und scheint auch relativ kostengünstig (jedenfalls bei Einspurstrecken). Wie bereits unter Kapitel 5.1 erwähnt, ist hier jedoch eine gewisse Zurückhaltung angebracht. Einerseits ist davon auszugehen, dass die Isolierstösse in den Schienen relativ häufig ausgewechselt werden müssen und andererseits entsteht durch die Isolierstösse eine grössere Lärmbelastung.
- Für die Bahnhoffahrleitung wurde die Verkabelung der Hilfs- oder Umgehungsleitung bei Einspurstrecken untersucht. Für die Doppelspurstrecke können die gleichen Ergebnisse oder Erkenntnisse verwendet werden, da hier anstelle der Hilfsleitung die zusätzliche Umgehungsleitung verkabelt wird (Verkabelung der Strom führenden Leiter).
- Das System Booster-Transformator wurde für die Einspurstrecke untersucht. Bei dieser ist einseitig ein sehr hoher Nutzen festzustellen. Bei der Doppelspurstrecke kann jedoch nicht von einem ähnlichen Nutzen ausgegangen werden. Bei der Doppelspurstrecke sind beidseitig Rückleiterseile notwendig, d.h. es findet zwar eine Kompensation statt, im Nahbereich zur Bahn ist aber keine Verbesserung zu erwarten. Bei der Doppelspurstrecke ist somit bei doppelten Kosten mit einem deutlich kleineren Nutzen (oder gar kein Nutzen) zu rechnen. In der Schweiz ist dieses System noch nicht im Einsatz. In anderen Ländern werden Booster-Transformator-Systeme zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) beispielsweise zu Sicherungsanlagen verwendet.
- Eine Unterscheidung zwischen R-FL und N-FL ist grundsätzlich nicht erforderlich.
- Das Verkabeln von Leitungen hat zwar einen sehr hohen Nutzen, ist jedoch meist eine eher teure Massnahme.
- Das Anbringen von zusätzlichen Rückleiterseilen ist beim punktuellen Einsatz eine relativ kostengünstige Massnahme mit mittlerem bis hohem Nutzen. Jedoch, je länger der Abschnitt, desto teurer wird die Massnahme. Zudem ist eine minimale Länge von 300 m - 1'000 m für einen optimalen Nutzen erforderlich.
- Ein Autotransformatorsystem bedingt den Umbau eines ganzen Speisesektors. Dadurch ist diese sehr teuer und aufwändig, obschon sie vom Nutzen her eine sehr gute Massnahme ist. Daher ist das Autotransformator-System als Massnahme einzig und allein zur Reduktion der Magnetfeldbelastung in der Regel wohl eher nicht realistisch.
- Ein mögliches Vorgehen zur Evaluierung einer für ein konkretes Projekt geeigneten Massnahme ist in Kapitel 1.2.3 (Seite 9) aufgeführt.

## 7 REFERENZEN, GLOSSAR

### 7.1 Referenzen, Grundlagedokumente

Ref-Nr	Titel	ID	Datum	Autor
[1] NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung NISV	814.710	01.07.2012	Schweizer Recht
ORNI	Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant ORNI			
ORNI	Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti ORNI			
[2] C3 SGK	Richtlinie zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen	C3	2011-5	SGK
[3] BAV_Kat	Magnetfelder von typischen Fahrleitungsanordnungen in der Schweiz: Katalog	MagCH12d	09.04.2002	ENOTRAC AG
[4] BAV_Sen	Magnetfelder von typischen Fahrleitungsanordnungen in der Schweiz: Modellrechnungen und Sensitivitätsanalyse	BAVMF21d.tec	09.04.2002	ENOTRAC AG
[5] BAV-Ref	Magnetfelder von typischen Fahrleitungsanordnungen in der Schweiz: Referenzwerte und Quellennachweis	SIMRef15d.tec	09.04.2002	ENOTRAC AG

Tabelle 7-1: Referenzen

### 7.2 Glossar

Begriff	Beschreibung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAV	Bundesamt für Verkehr
Cu	Kupfer
ENOTRAC	Ingenieurunternehmen für Eisenbahntechnik, Verfasser der vorliegenden Studie
Hilfsleitung	Wird parallel zur Fahrleitung geführt und dient zu dessen Verstärkung. Fahrleitung und Hilfsleitung sind jeweils bei den Schaltposten elektrisch miteinander verbunden.
N-FL	SBB Fahrleitungstyp: Fahrdraht 107 mm <sup>2</sup> Cu, Tragseil Staku 50 mm <sup>2</sup>
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
OMEN	Orte mit empfindlicher Nutzung (gemäss NISV)
R-FL	SBB Fahrleitungstyp: Fahrdraht 107 mm <sup>2</sup> Cu, Tragseil Staku 92 mm <sup>2</sup>
SGK	Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
SOK	Schienenoberkante

Begriff	Beschreibung
Speiseleitung	Dient der Speisung der Fahrleitung ab Unterwerk.
Staku	Stahl-Kupfer (oder auch StCu)
StCu	Stahl-Kupfer (oder auch Staku)
Umgehungsleitung	Dient bei Stationen oder Bahnhöfen mit sogenannten Bahnhoffahrleitungen (Fahrleitung über Streckentrenner von der Strecke elektrisch getrennt) zur Umgehung/Weiterführung des Stromes der Fahrleitung.
Kettenwerk	System Fahrdrat und Tragseil

Tabelle 7-2: Verwendete Begriffe und Abkürzungen Deutsch

Begriff	Beschreibung
OFEV	Office fédéral de l'environnement
Cu	Cuivre
ENOTRAC	Bureau d'ingénieurs spécialisé dans la technique ferroviaire, auteur de la présente étude
Ligne auxiliaire	Ligne qui longe la ligne de contact et qui sert au renforcement de celle-ci. La ligne de contact et la ligne auxiliaire sont raccordées ensemble aux postes d'enclenchement.
NFL	Type de ligne de contact CFF : fil de contact 107 mm <sup>2</sup> Cu, câble porteur Staku 50 mm <sup>2</sup>
ORNI	Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant
LUS	Lieu à utilisation sensible (selon l'ORNI)
RFL	Type de ligne de contact CFF : fil de contact 107 mm <sup>2</sup> Cu, câble porteur Staku 92 mm <sup>2</sup>
Staku	Acier-cuivre (all. : Stahl-Kupfer)
Ligne détournée	Ligne qui sert à détourner le courant de transit dans le secteur d'une gare.

Tabelle 7-3: Notions utilisées et abréviations (Verwendete Begriffe und Abkürzungen Französisch)

Begriff	Beschreibung
UFAM	Ufficio federale dell'ambiente
Cu	Rame
ENOTRAC	Società di ingegneria specializzata nella tecnologia ferroviaria, autore del presente studio
Ligne auxiliaire	Linea lungo la catenaria che serve come supporto. La linea ausiliaria e quella di contatto sono collegate fra loro nelle posizioni di aggancio.
NFL	Tipologia di catenaria FFS : filo di contatto 107 mm <sup>2</sup> Cu, cavo portante Staku 50 mm <sup>2</sup>
ORNI	Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti ORNI
LUS	Luoghi a utilizzazione sensibile (secondo ORNI)
RFL	Tipologia di catenaria FFS : filo di contatto 107 mm <sup>2</sup> Cu, cavo portante Staku 92 mm <sup>2</sup>
Staku	Rame-Acciaio (all. : Stahl-Kupfer)
Linea di ritorno	Linea consente di deviare la corrente di trazione nella tratta di una stazione

Tabelle 7-4: Nozioni utilizzate e abbreviazioni (Verwendete Begriffe und Abkürzungen Italienisch)

## 8 ANHANG A: EINZELPLOTS

### 8.1 Einzelplots: Einspur-Fahrleitung N-FL

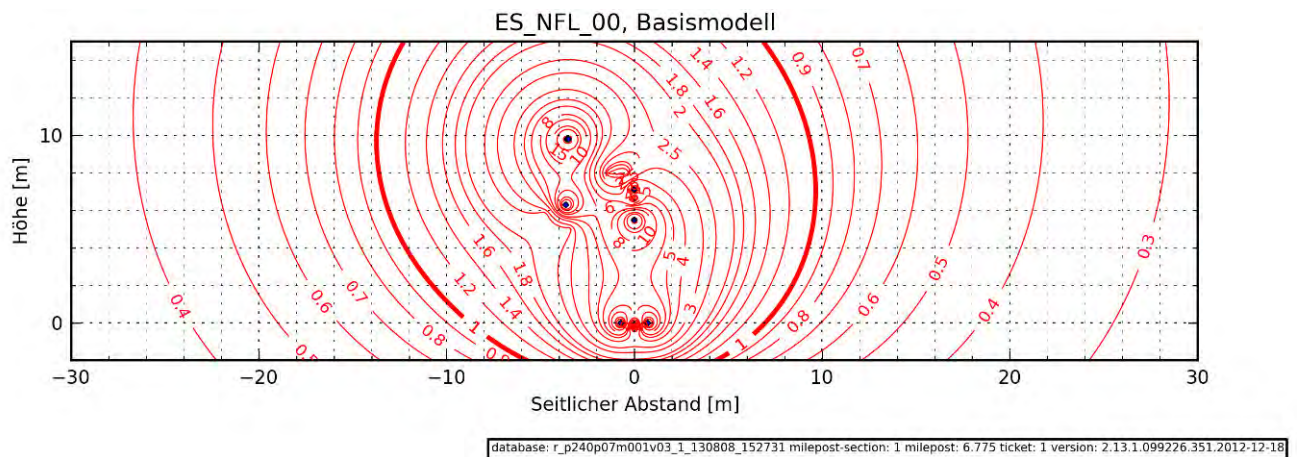


Abbildung 8-1: ES\_NFL\_00, Basismodell: Linien der magnetischen Flussdichte

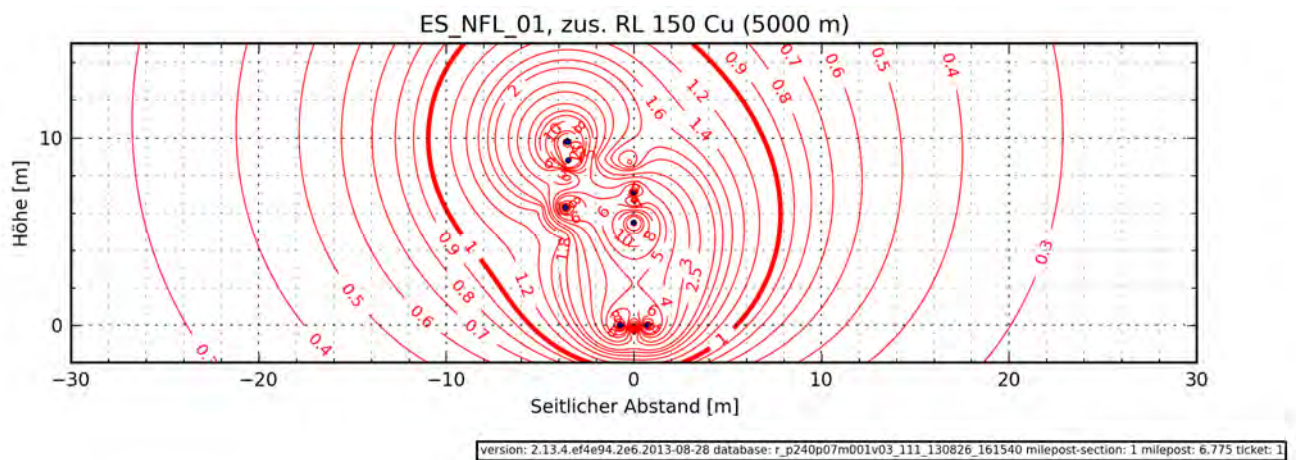


Abbildung 8-2: ES\_NFL\_01, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm² Cu, Länge 5 km: Linien der magnetischen Flussdichte



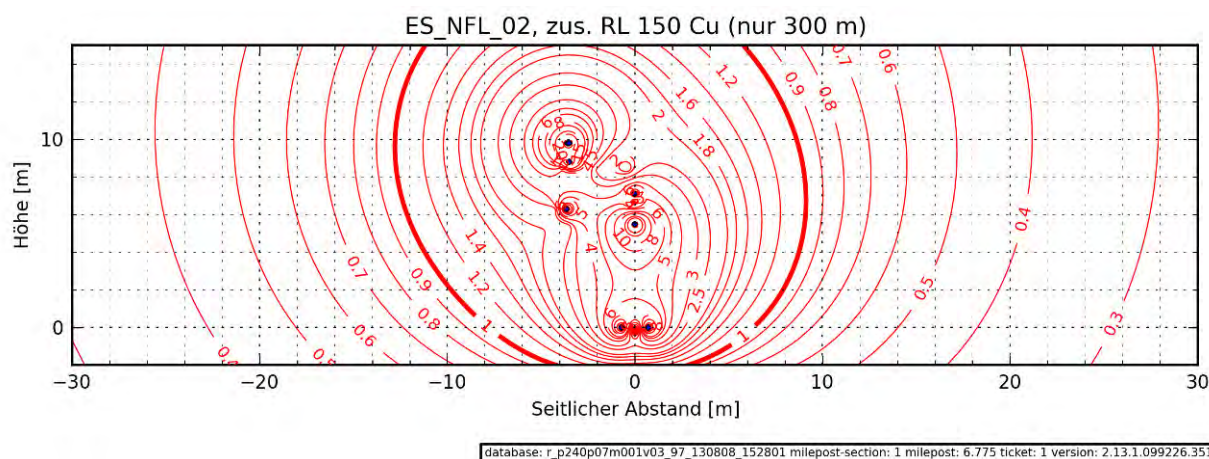


Abbildung 8-3: ES\_NFL\_02, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 300 m: Linien der magnetischen Flussdichte

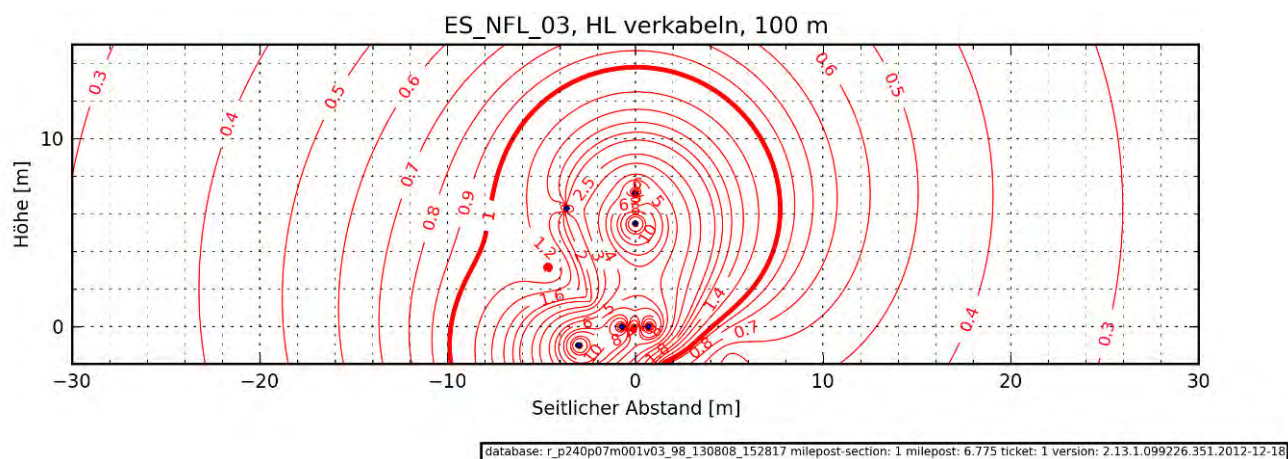


Abbildung 8-4: ES\_NFL\_03, Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m: Linien der magnetischen Flussdichte

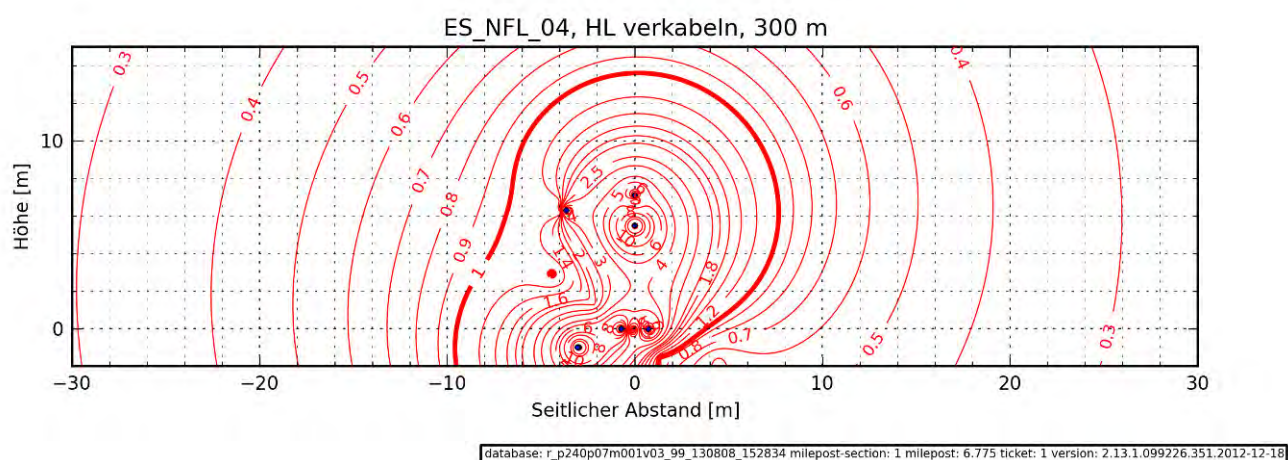


Abbildung 8-5: ES\_NFL\_04, Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m: Linien der magnetischen Flussdichte

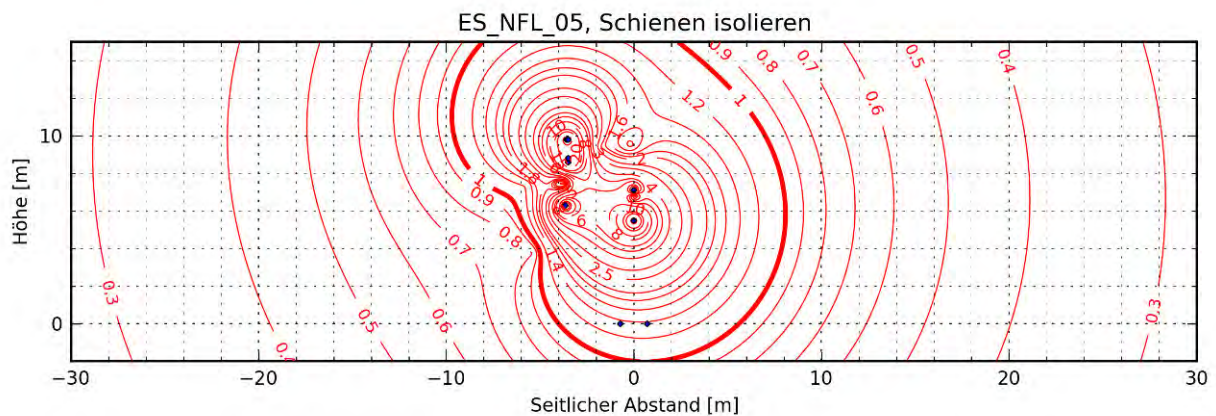


Abbildung 8-6: ES\_NFL\_05, Schienen längs isoliert (Gleisunterbrüche), Länge 100 m: Linien der magnetischen Flussdichte

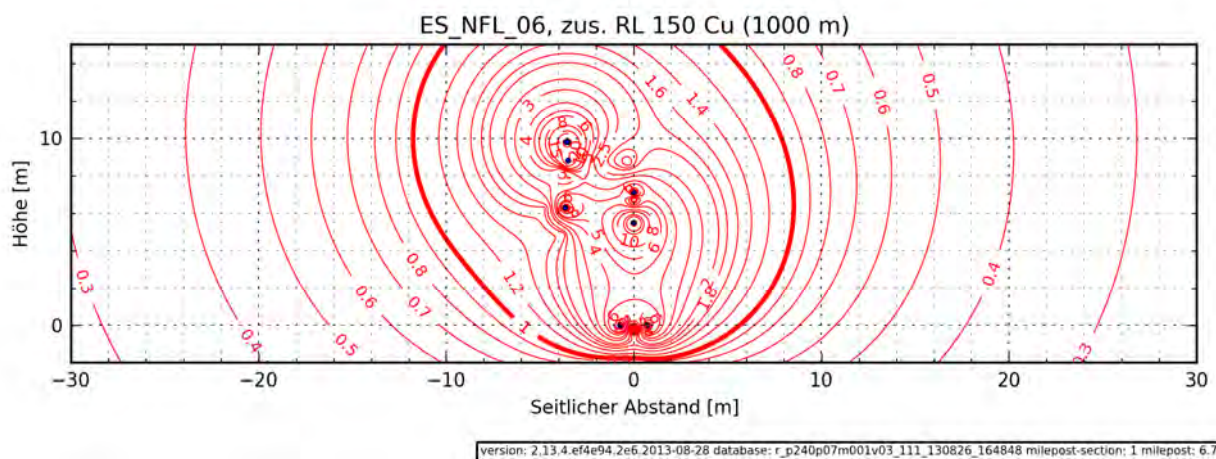


Abbildung 8-7: ES\_NFL\_06, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 1 km: Linien der magnetischen Flussdichte



## 8.2 Einzelplots: Einspur-Fahrleitung R-FL

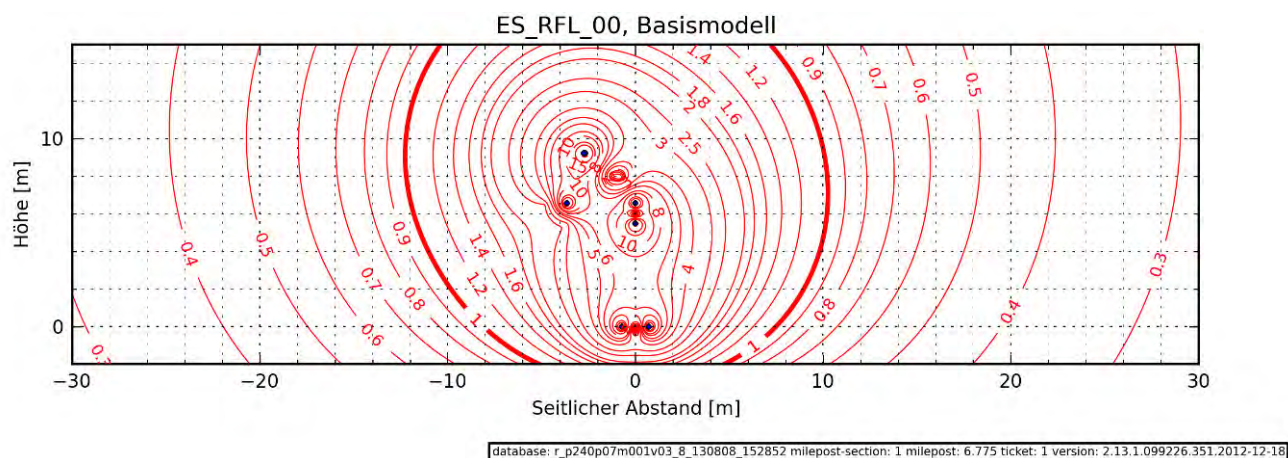


Abbildung 8-8: ES\_RFL\_00, Basismodell: Linien der magnetischen Flussdichte

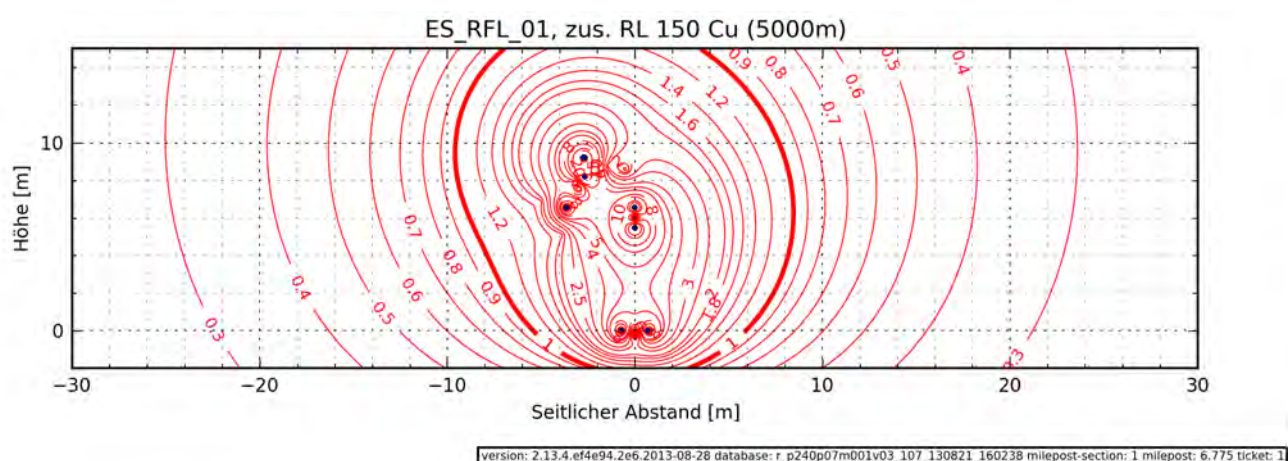


Abbildung 8-9: ES\_RFL\_01, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm² Cu, Länge 5 km: Linien der magnetischen Flussdichte

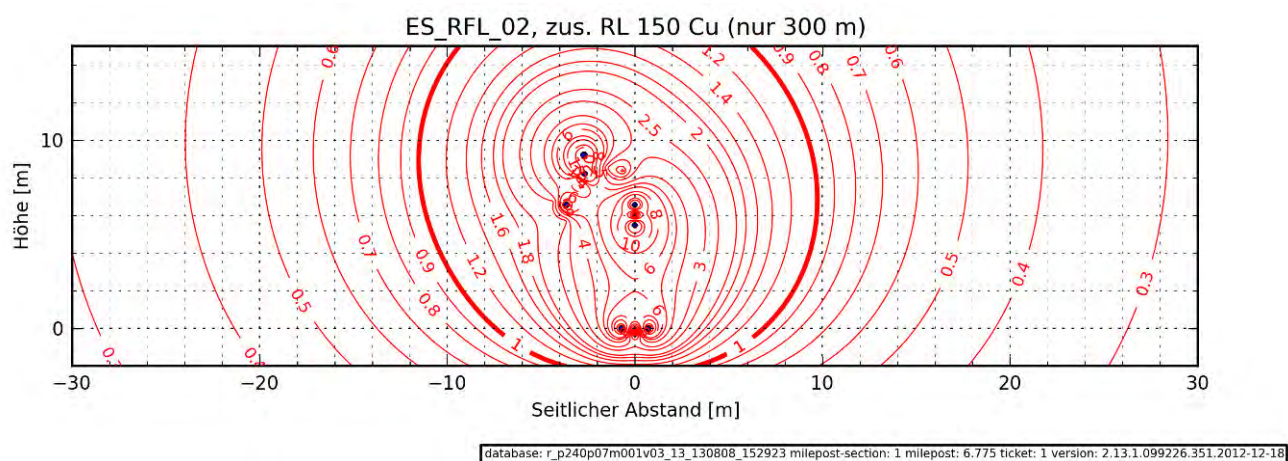


Abbildung 8-10: ES\_RFL\_02, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm² Cu, Länge 300 m: Linien der magnetischen Flussdichte



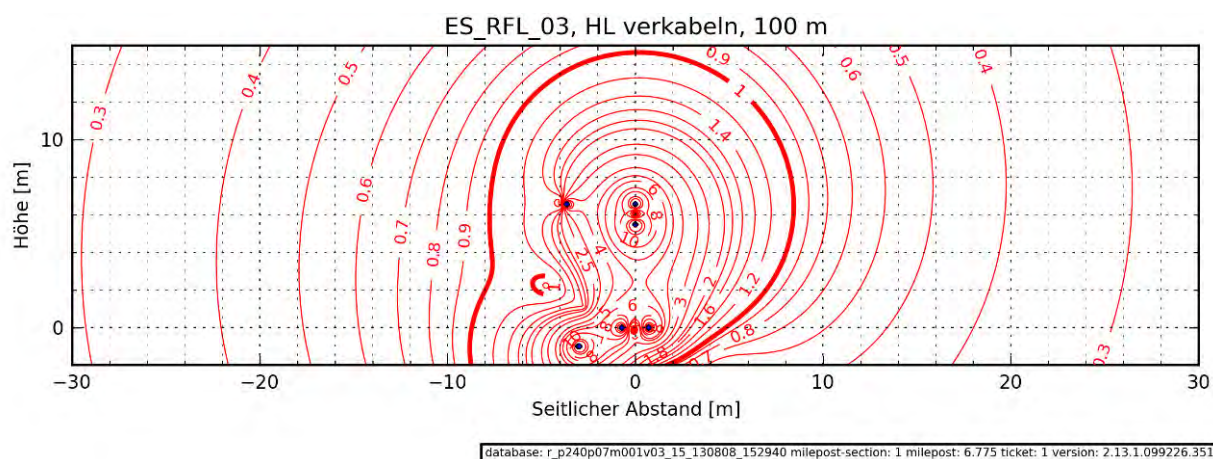


Abbildung 8-11: ES\_RFL\_03, Hilfsleitung verkabeln, Länge 100 m: Linien der magnetischen Flussdichte

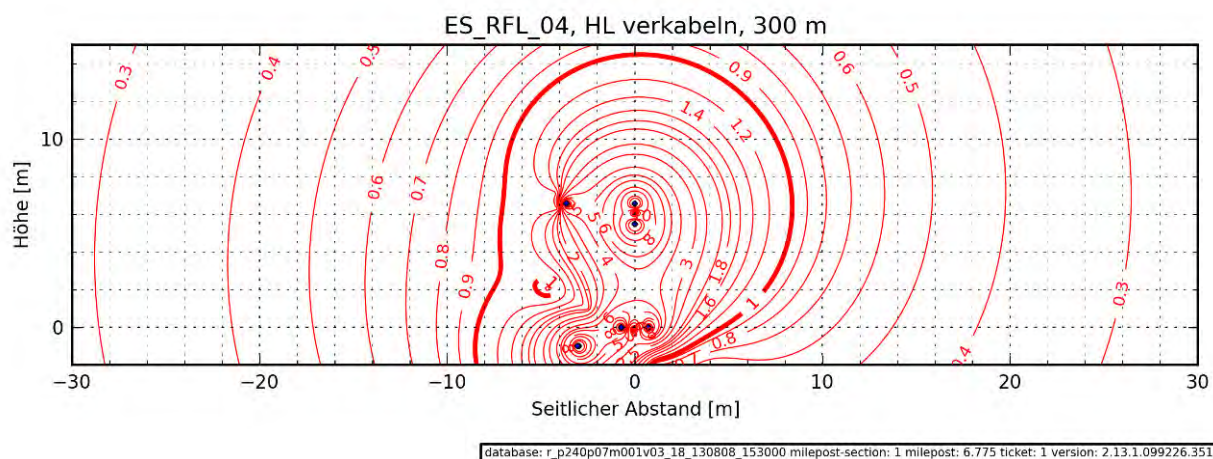


Abbildung 8-12: ES\_RFL\_04, Hilfsleitung verkabeln, Länge 300 m: Linien der magnetischen Flussdichte

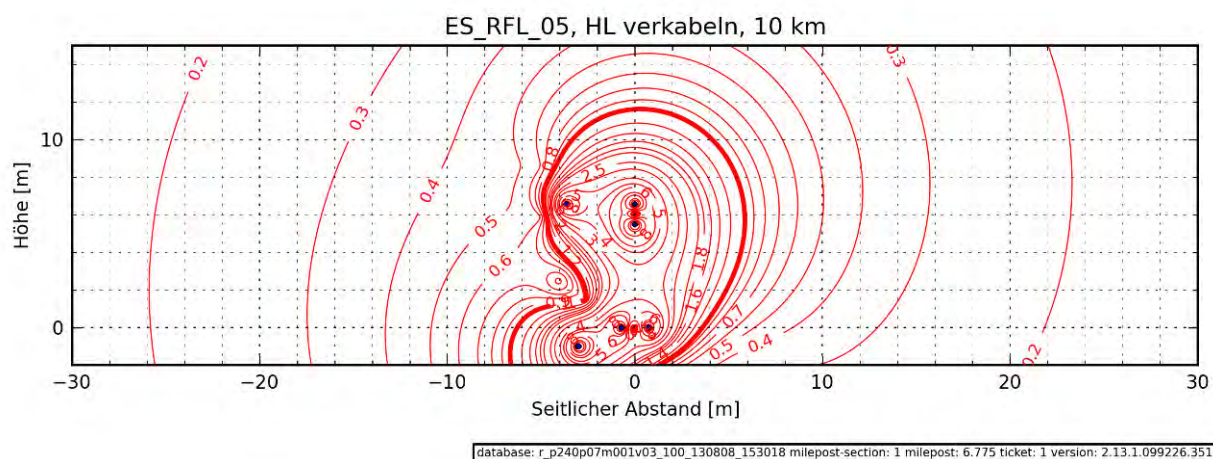


Abbildung 8-13: ES\_RFL\_05, Hilfsleitung verkabeln, Länge 10 km: Linien der magnetischen Flussdichte

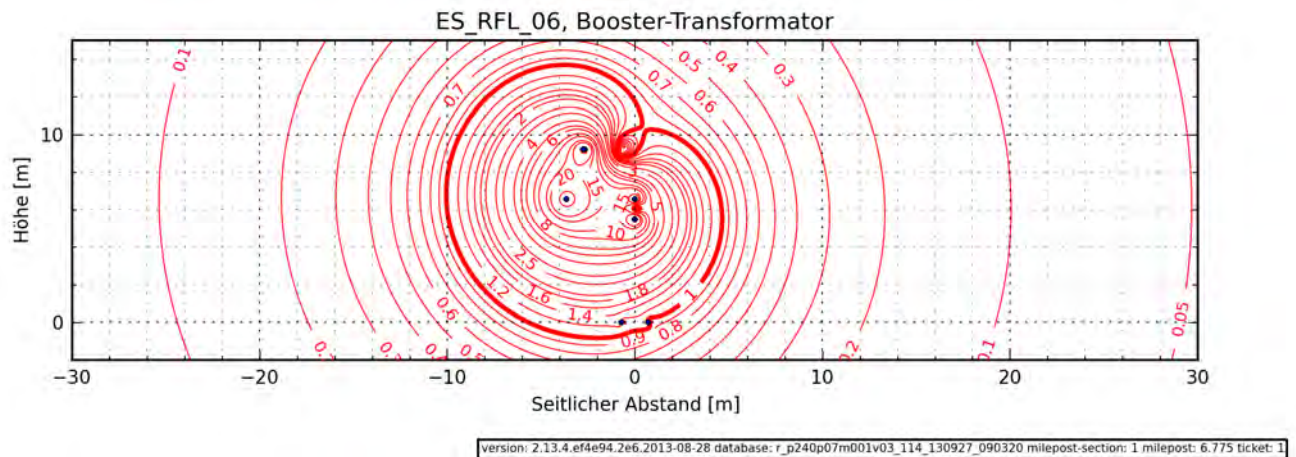


Abbildung 8-14: ES\_RFL\_06, Booster-Transformator: Linien der magnetischen Flussdichte

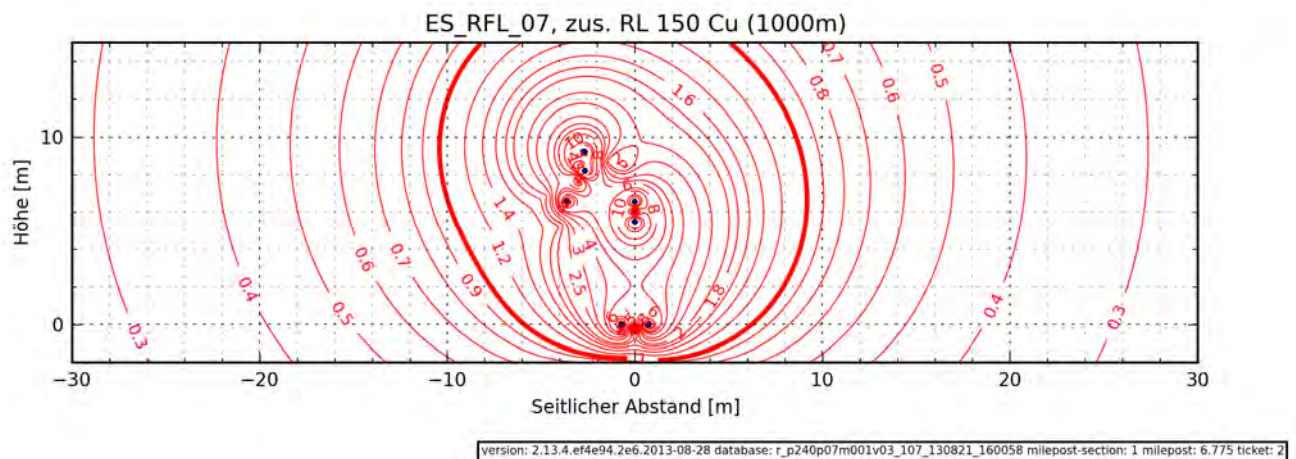


Abbildung 8-15: ES\_RFL\_07, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu, Länge 1 km: Linien der magnetischen Flussdichte



### 8.3 Einzelplots: Doppelspur-Fahrleitung

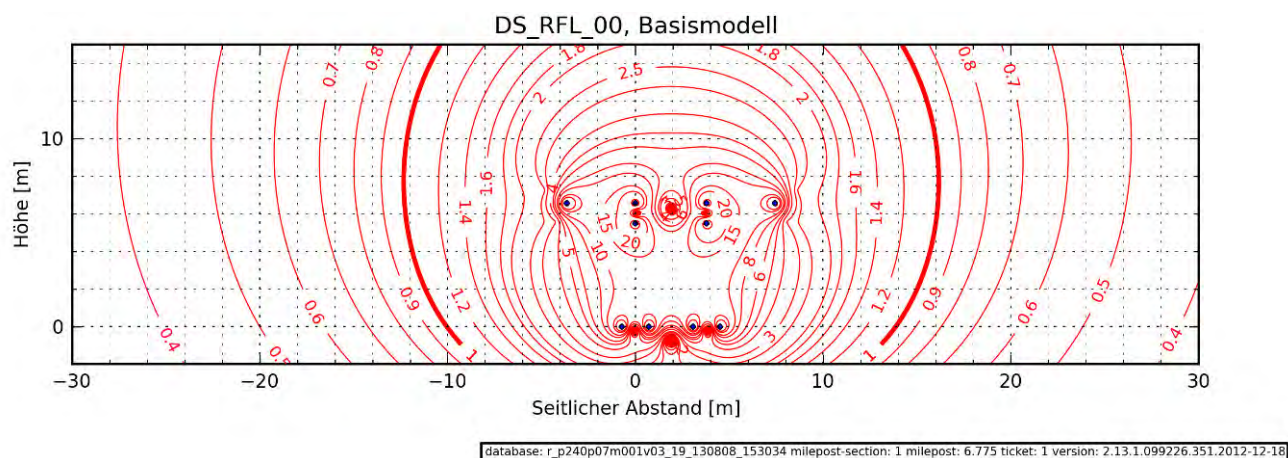


Abbildung 8-16: DS\_RFL\_00, Basismodell: Linien der magnetischen Flussdichte

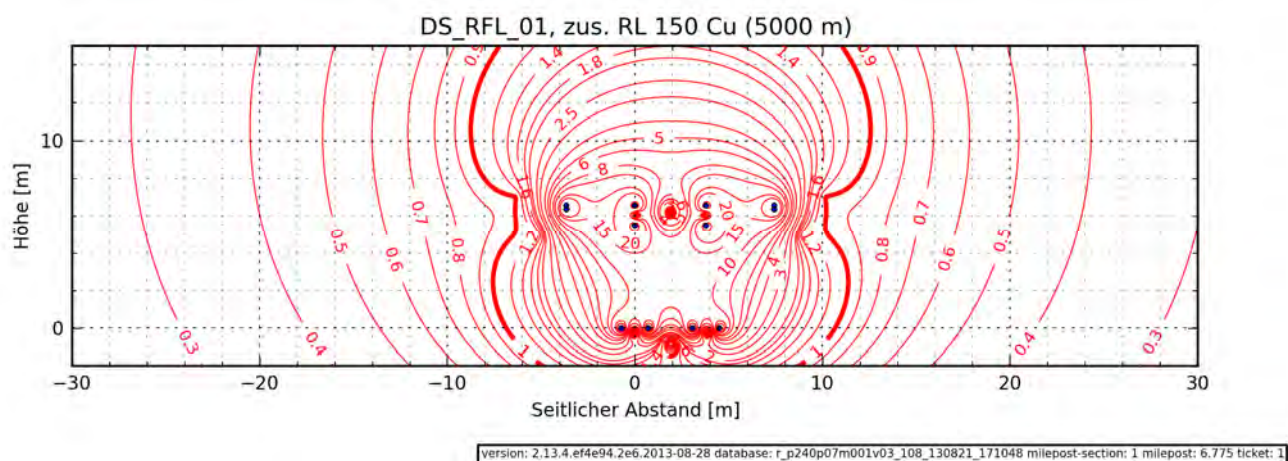


Abbildung 8-17: DS\_RFL\_01, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm² Cu (pro Gleis), Länge 5 km: Linien der magnetischen Flussdichte

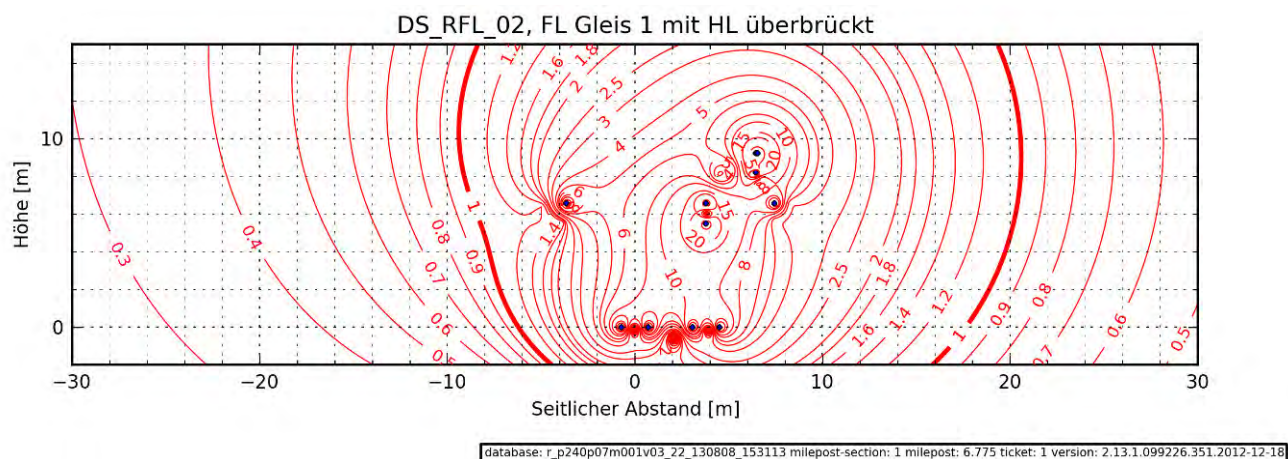
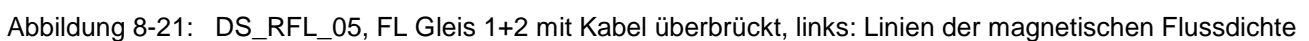
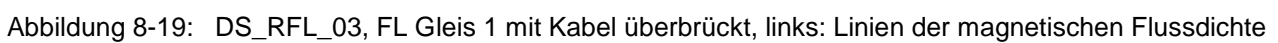


Abbildung 8-18: DS\_RFL\_02, FL Gleis 1 mit HL überbrückt: Linien der magnetischen Flussdichte







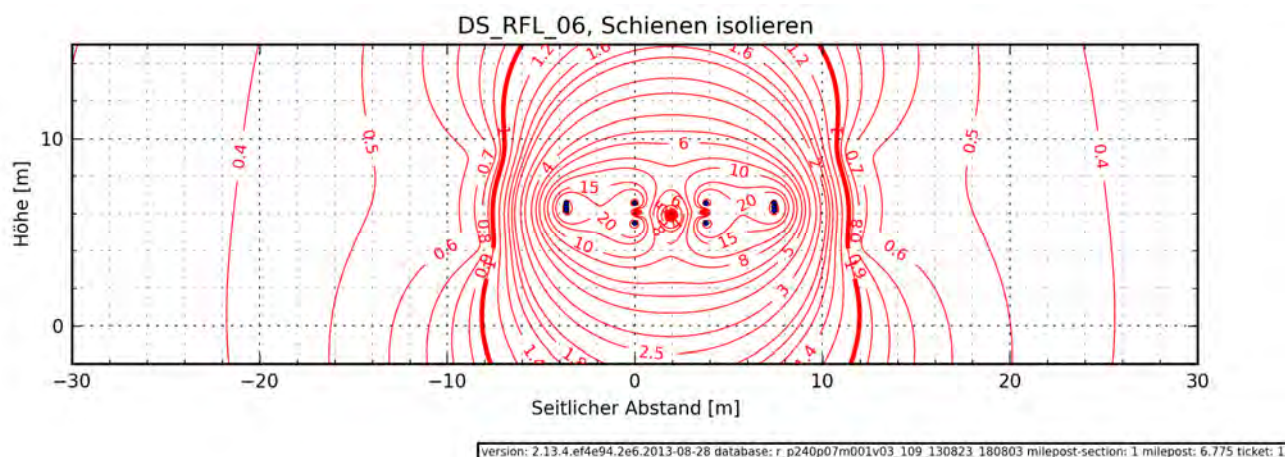


Abbildung 8-22: DS\_RFL\_06, Schienen unterbrochen, mit 4 zus. RL 150 mm<sup>2</sup> Cu überbrückt: Linien der magnetischen Flussdichte

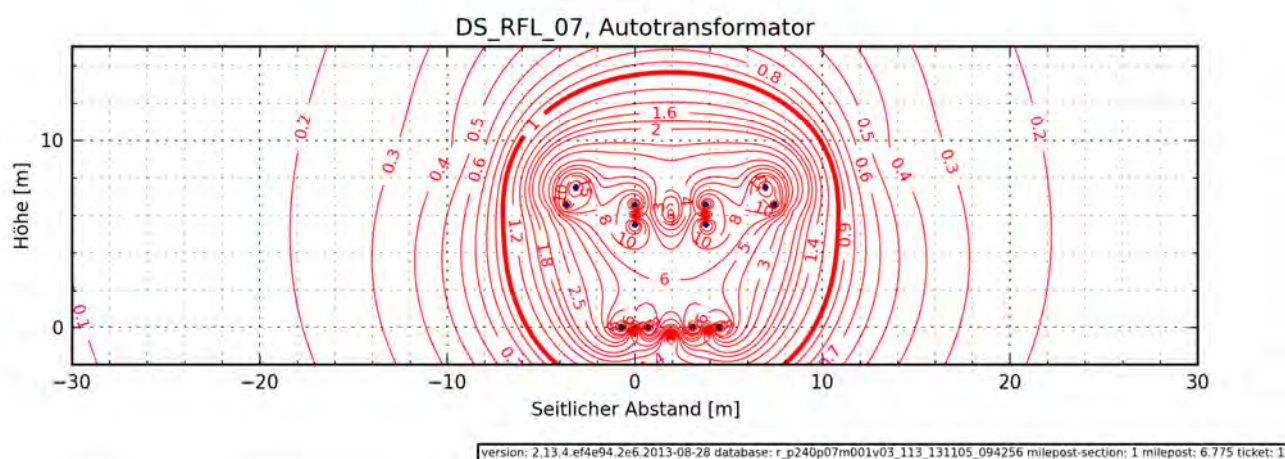


Abbildung 8-23: DS\_RFL\_07, Autotransformatorsystem (Negativ-Feeder): Linien der magnetischen Flussdichte

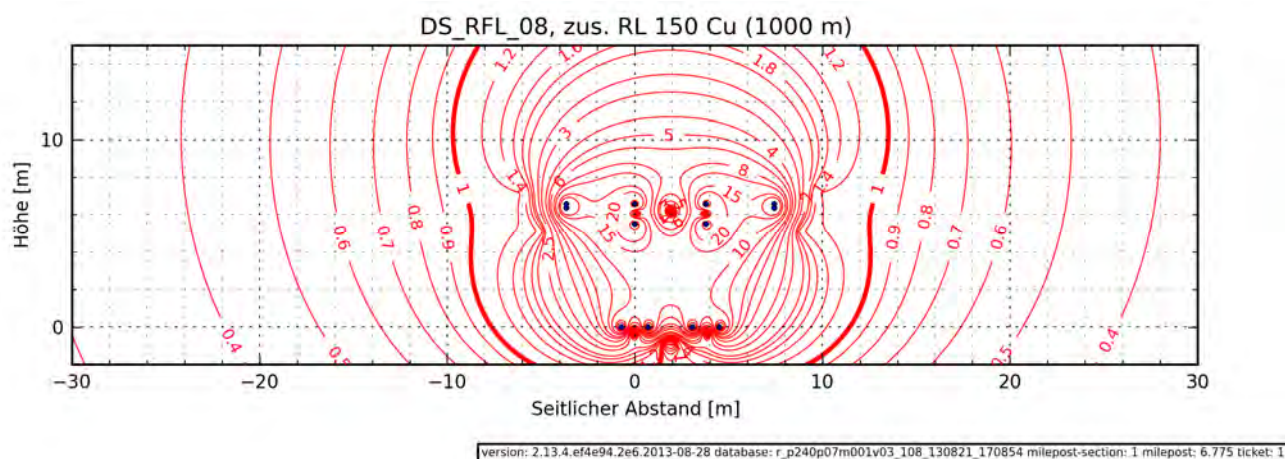


Abbildung 8-24: DS\_RFL\_08, Zusätzlicher Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu (pro Gleis), Länge 1 km: Linien der magnetischen Flussdichte



## 8.4 Einzelplots: Bahnhofsfahrleitung, Einspurstrecke

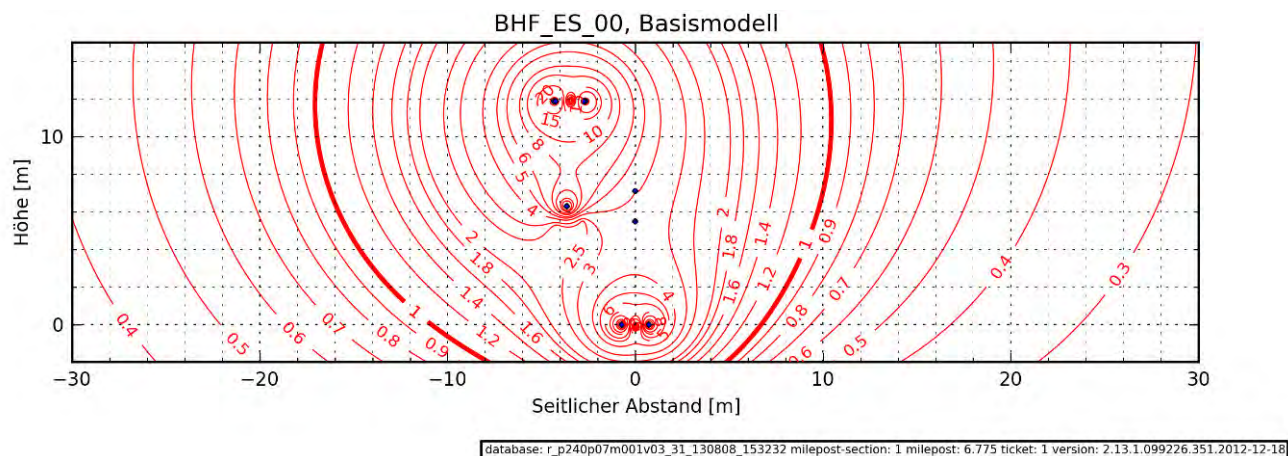


Abbildung 8-25: BHF\_ES\_00, Basismodell: Linien der magnetischen Flussdichte

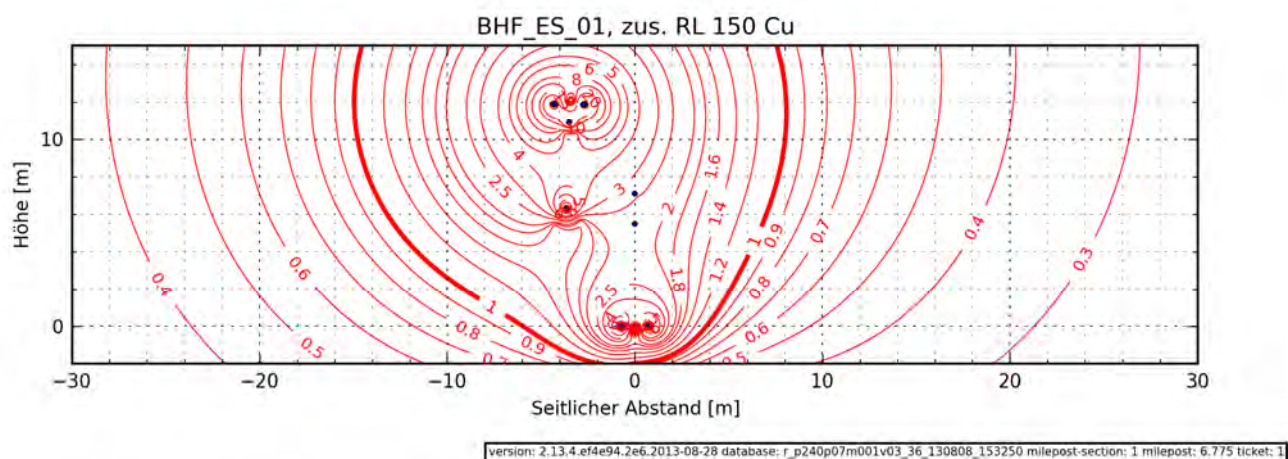


Abbildung 8-26: BHF\_ES\_01, Zusätzliche Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen: Linien der magnetischen Flussdichte

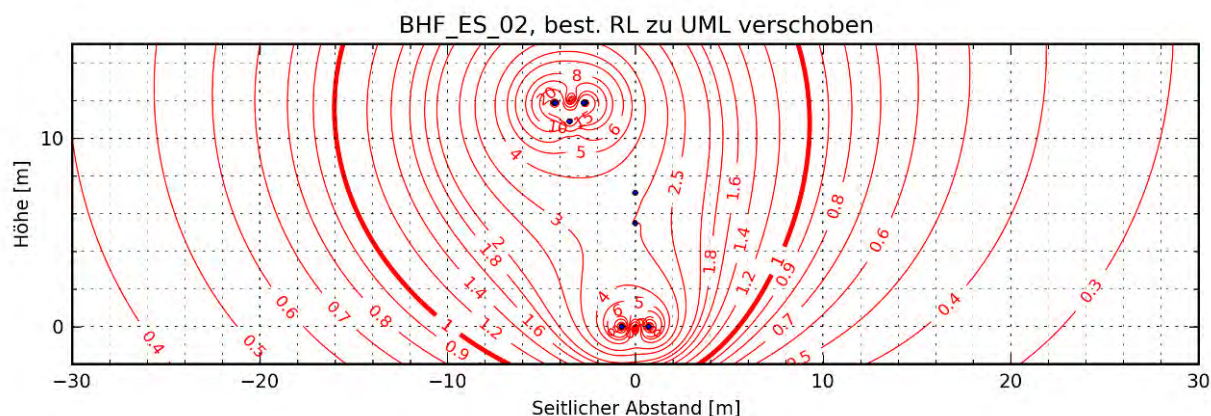


Abbildung 8-27: BHF\_ES\_02, Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben: Linien der magnetischen Flussdichte

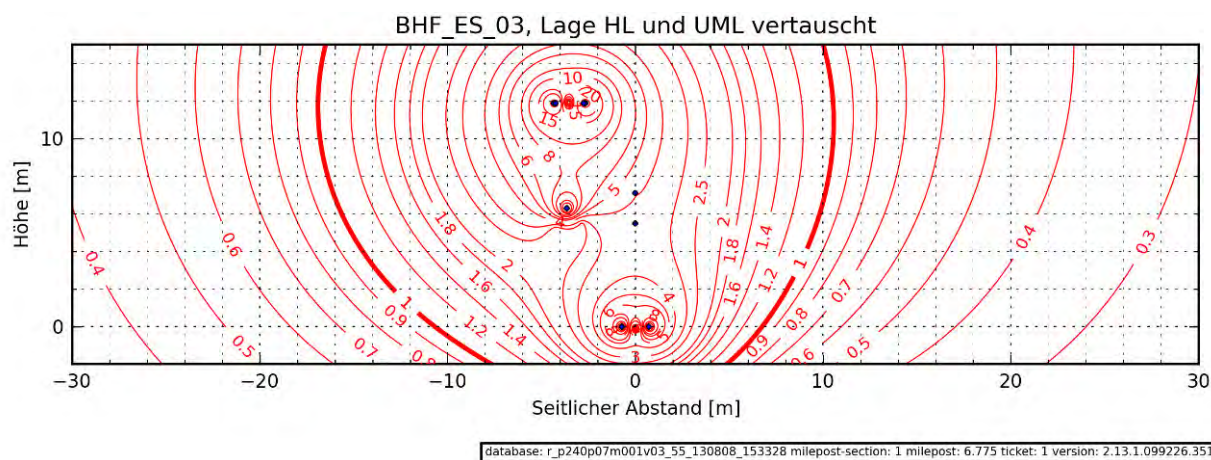


Abbildung 8-28: BHF\_ES\_03, Tauschen Lage der Hilfsleitung mit der Umgehungsleitung: Linien der magnetischen Flussdichte

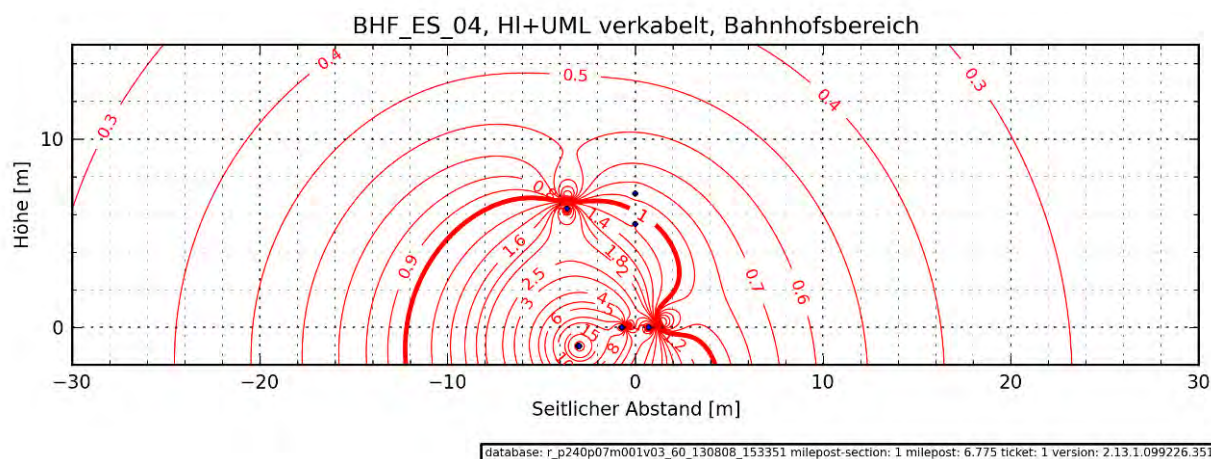


Abbildung 8-29: BHF\_ES\_04, Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 900 m (ganzer Bahnhofsbereich): Linien der magnetischen Flussdichte



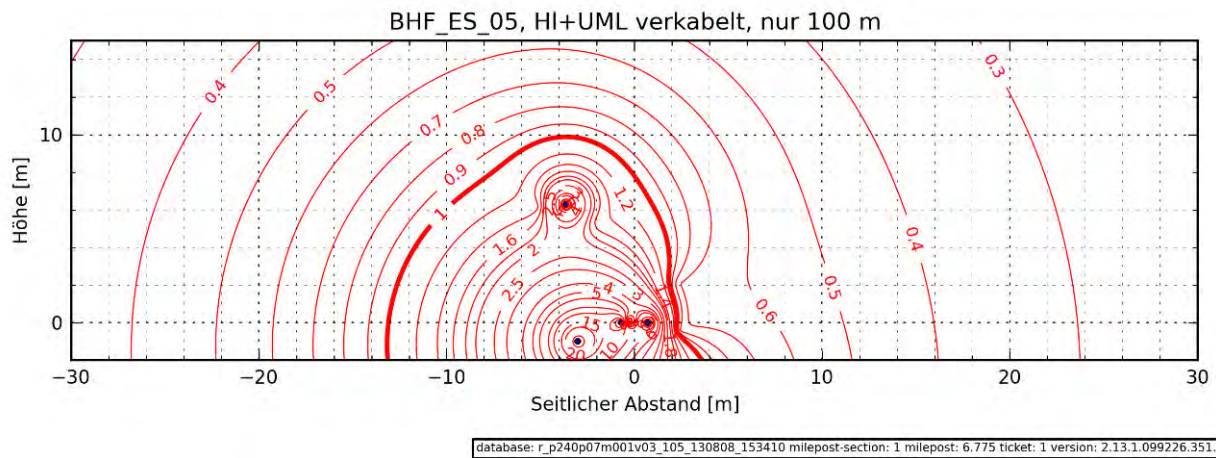


Abbildung 8-30: BHF\_ES\_05, Hilfs- und Umgehungsleitung verkabeln, 100 m: Linien der magnetischen Flussdichte

## 8.5 Einzelplots: Bahnhofsfahrleitung, Doppelspurstrecke

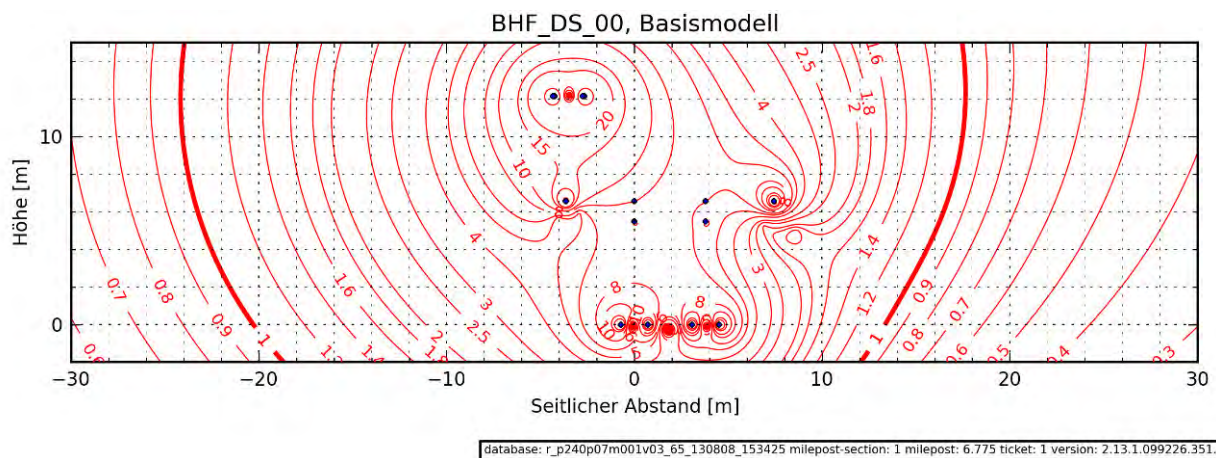


Abbildung 8-31: BHF\_DS\_00, Basismodell: Linien der magnetischen Flussdichte

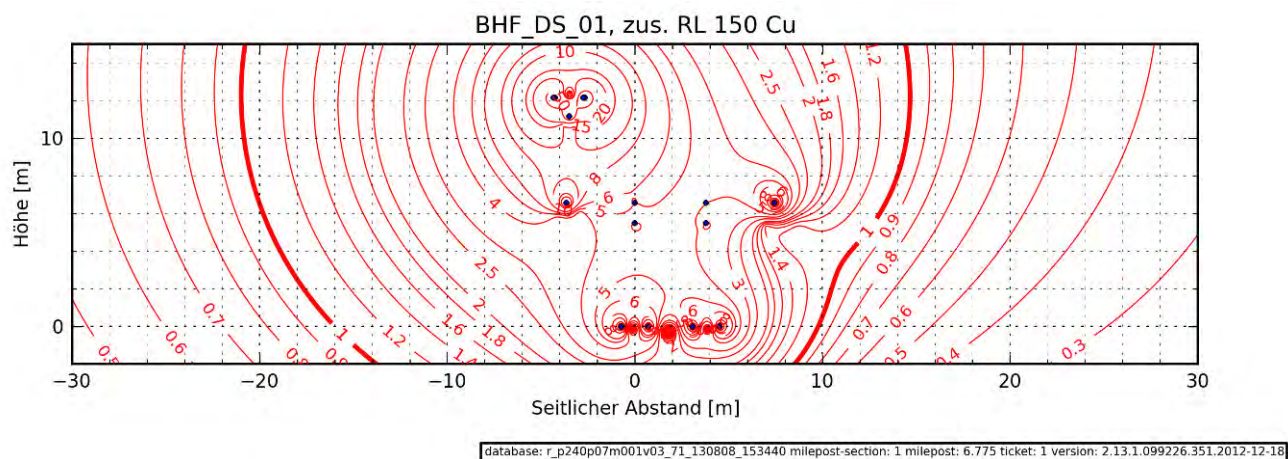


Abbildung 8-32: BHF\_DS\_01, Zusätzliche Rückleiter 150 mm<sup>2</sup> Cu bei Umgehungsleitungen: Linien der magnetischen Flussdichte

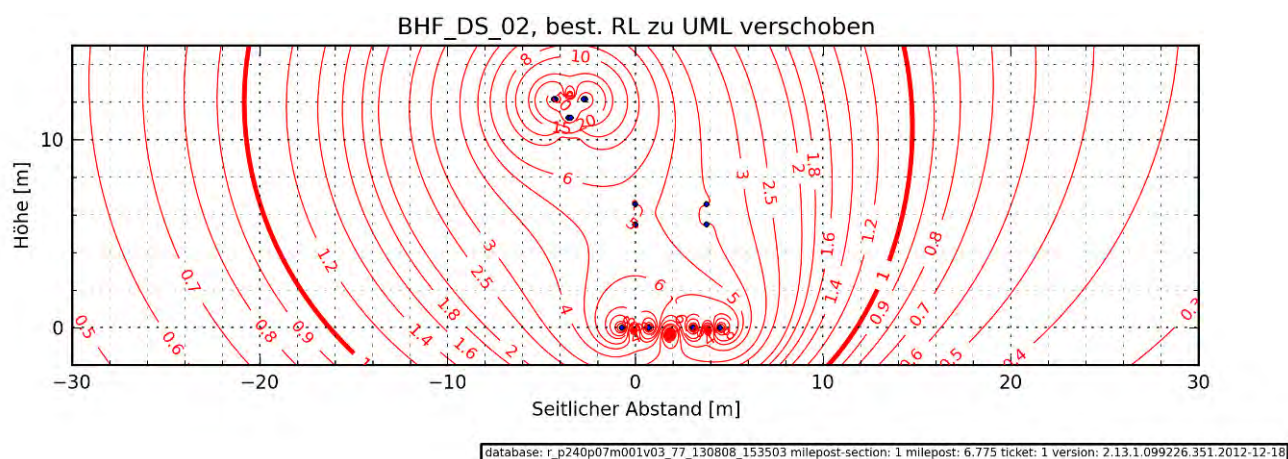


Abbildung 8-33: BHF\_DS\_02, Bestehender Rückleiter zu Umgehungsleitungen schieben: Linien der magnetischen Flussdichte

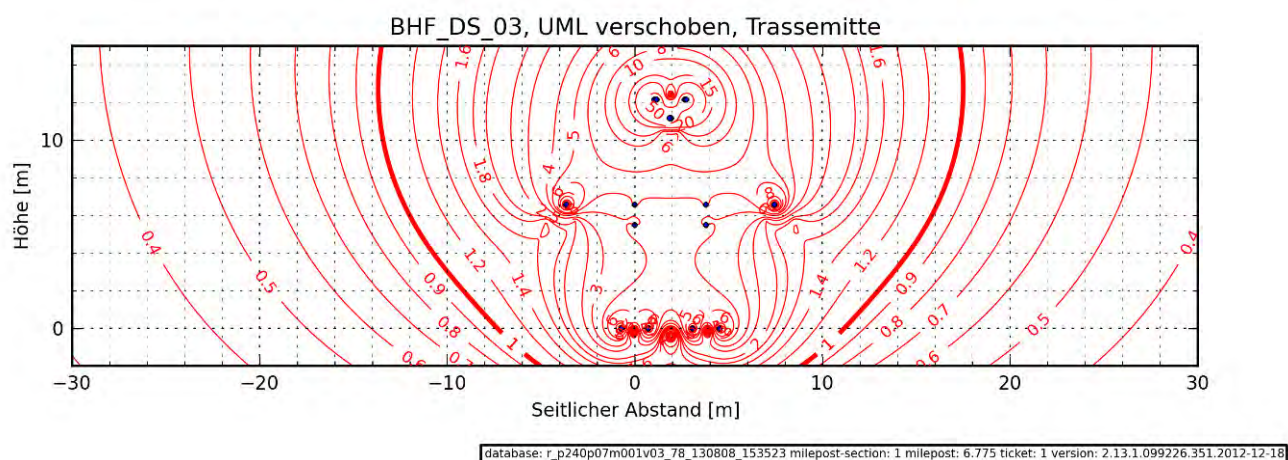


Abbildung 8-34: BHF\_DS\_03, Verschieben Umgehungsleitungen: Trassemitte, inkl. zusätzlicher Rückleiter bei Umgehungsleitung: Linien der magnetischen Flussdichte



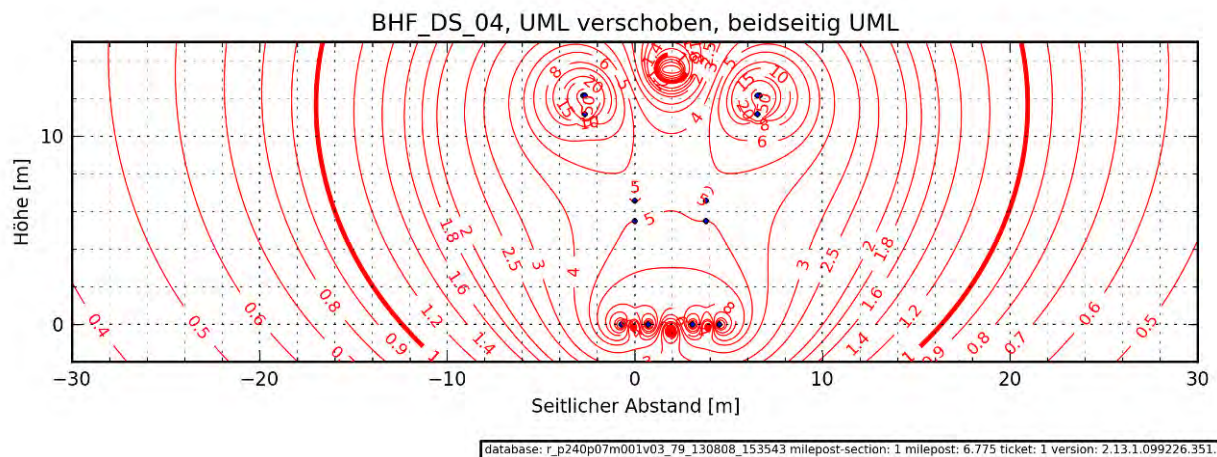


Abbildung 8-35: BHF\_DS\_04, Verschieben Umgehungsleitungen: pro Seite eine Umgehungsleitung: Linien der magnetischen Flussdichte