

**Energieanlagenoptimierung im Hinblick auf die
Schweizer NIS - Verordnung**

Diplomarbeit

im Studiengang Elektrische Energietechnik

an der

Fachhochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

vorgelegt von

René Zempel

Berlin, 15.10. 2002

Berlin 2002, (C) Copyright FGEU mbH.

Alle Angaben und Daten dieser Diplomarbeit sind vertraulich. Vervielfältigung, Reproduktion und Weitergabe an dritte Personen, Unternehmen und Institutionen, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der FGEU mbH. Die Diplomarbeit ist nur den Korrektoren sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

1.EINLEITUNG.....	1
2.ZIELSTELLUNG.....	2
3.SCHWEIZER VERORDNUNG ÜBER DEN SCHUTZ VOR NICHTIONISIERTER STRAHLUNG (NISV)	
3.1. Immissionsbegrenzungen und Anlagengrenzwerte	3
3.2. Vergleich der Anforderungen von NISV und BImSchV	8
4.THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUR NUMERISCHEN BERECHNUNG MAGNETISCHER FELDER	
4.1. Magnetische Felder	10
4.2. Klassifizierung elektrischer und magnetischer Felder.....	13
4.3. Lorenzkraft	15
4.4. Das Gesetz von Biot-Savart	17
4.5. Die Software WinField	20
5.BERECHNUNG VON NETZSTATIONEN MIT WINFIELD	
5.1. Allgemeine Vorbetrachtungen	22
5.1.1 Netzstationen	24
5.1.2 Kompensationsverhalten.....	26
5.2. Transformatoren und Niederspannungsverteilungen	
5.2.1. Stromschienen	32
5.2.2. Leistungsschalter und Sicherungen	33
5.2.3. Elektrische Verbindungen	34
5.2.4. Niederspannungsverteilung.....	38
5.2.5. Starkstromverbindungen	45
5.2.6. Transformatoren.....	48
5.2.6.1. EMV Transformatoren	54
5.3. Mittelspannungseinspeisefelder	56

6. OPTIMIERUNGSMABNAHMEN AN NETZSTATIONEN	
6.1. Standortverlegung	57
6.2. Abschirmung	58
6.2.1. Grundlagen	59
6.2.2. Berechnung der Schirmdämpfung mit WinField	64
6.2.3. Schirmplatten	65
6.2.4. Niederspannungsverteilungen.....	68
6.2.5. Transformatoren.....	75
6.2.6. Leiter	78
7. ÜBERPRÜFUNG DER VERBESSERUNGSMABNAHMEN AN NETZSTATIONEN	81
8. KOSTENBEURTEILUNG DER OPTIMIERUNGSMABNAHMEN	84
8.1. Stromleitungen	95
8.2. Niederspannungsverteilungen	96
8.3. Transformatoren.....	98
9.ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	99
10.ANHANG A	102
11.ANHANG B	123
12.ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	130
13.LITERATURVERZEICHNIS	132

1 Einleitung

Anlagen, die mit elektrischen Komponenten ausgerüstet sind, erzeugen zwangsläufig elektrische und magnetische Felder, die durch Spannungen und Ströme hervorgerufen werden. Je nach Leistung und Betriebsspannung der Anlage, variieren die Feldstärken.

Dabei beschränkt sich Ihre Wirkung nicht nur auf die zu verrichtende Arbeit, wie z.B. Krafterzeugung mittels Motor, sondern auch auf andere Geräte oder Organismen.

Den Einfluss, den die ungewollten Felder mit ihren unterschiedlichen Frequenzen und Intensitäten haben, werden in dem Begriff der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) zusammengefasst. In der EMV (engl. electromagnetic compatibility, EMC) kommen auch andere Vorgänge wie elektrostatische Körperentladungen (electrostatic discharge ESD), elektrostatische Mobiliarentladungen, Gewitter oder Sendereinstrahlung zum tragen.

In dieser Diplomarbeit geht es vorrangig um Spannungen und Ströme elektrischer Systeme im niederfrequenten (NF) Bereich und ihre Wirkung auf den umliegenden Raum. Hierzu werden Netzstationen einer genaueren Betrachtung unterzogen, in wie fern diese die Grenzwerte einhalten und welche Verbesserungsmöglichkeiten noch bestehen.

Durch den Umstand, dass es sich bei den Transformatorstationen um NF - Anlagen (50 Hz) handelt, können elektrische und magnetische Felder getrennt voneinander ausgewertet werden.

2 Zielstellung

Die hier verfasste Arbeit über die magnetischen Felder, in Hinsicht auf die Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) vom 23. Dezember 1999, baut grundsätzlich auf den vorangegangenen Diplomarbeiten des Diplomingenieurs (FH) Kupke [3] und des Diplomingenieurs (FH) Faesing [4] auf. Die von ihnen erbrachten Erkenntnisse und Verbesserungen sind im Rahmen der Bundes – Immissionsschutz Verordnung betrachtet worden. Weiterführend soll nun eine Überprüfung der Anlagen, in Voraussicht, dass sich die Grenzwerte noch weiter verringern werden, stattfinden.

Transformatorstationen, welche durch ihre starken Felder gekennzeichnet sind, spielen eine hervorgehobene Rolle bei den Untersuchungen. Da diese Anlagen mehrere Komponenten besitzen, sind auch verschiedene Quellen vorhanden, die zum gesamten Feld beitragen. Deshalb werden die einzelnen Elemente analysiert, um ihren Beitrag zur Verunreinigung der Umgebung festzustellen und diese durch geeignete Gegenmaßnahmen zu verringern. Nach dieser Prüfung soll die gesamte Anlage erneut bewertet, und Rückschlüsse auf eine Realisierbarkeit der Verordnung für alte und neue Anlagen erbracht werden.

3 Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)

3.1 Immissionsbegrenzungen und Anlagengrenzwerte

Durch die stetige Erhöhung des Komforts der Zivilisation steigt auch der Energieverbrauch. Dieser Bedarf wird meist durch elektrische Leistung gedeckt. Um diese Leistung mittels Strom an den Verwendungsort zu transportieren, ist eine Erweiterung der Energieübertragungssysteme und eine bessere Auslastung der Einrichtung erforderlich. Damit steigt aber auch die Intensität der magnetischen Felder, was wiederum eine Belastung für den menschlichen Organismus darstellen kann.

Die meisten Länder besitzen eine gesetzliche Regelung zur Begrenzung von EMF Expositionen, die sich an den Grenzwertempfehlungen der ICNIRP (Internationalen Strahlenschutzkommission für nicht-ionisierende Strahlung) orientiert. Allerdings ist die ICNIRP nur eine Empfehlung zum Schutz vor akuten, thermischen bzw. muskelreizenden Wirkungen elektromagnetischer Felder, wie sie erst bei sehr hohen Feldstärken auftreten. Das Risiko durch Langzeiteffekte wird dabei nicht berücksichtigt.

Aus dem Grund der Vorsorgesicherheit ist eine strengere Regelung durch die Schweizer Behörden zum Schutz der Menschen vor schädlicher und lästiger nichtionisierender Strahlung angedacht und übernommen worden.

Eine Verringerung der Werte der magnetischen Flussdichte macht nur bis zu bestimmten Größen einen Sinn. Da das uns ständig umgebende statische Erdmagnetfeld mit rund 40 bis 50 μT (in unseren Breitengraden), nach eine Schätzung der WHO zufolge eine natürliche Feldstärke von rund 1pT hat, bei einer Frequenz von 50 Hz, [5] ist eine Grenzwertabsenkung auf Null nicht sinnvoll. Weitergehend gibt es bis jetzt noch keine wissenschaftlich bestätigten Erkenntnisse über die schädliche Wirkung von Feldern unterhalb von 1 μT auf biologische Organismen.

Strahlung ist der allgemeine Begriff für den physikalischen Transport von Energie durch Wellen oder Teilchen durch den Raum. Man unterscheidet bei der Strahlung in ionisiert (radioaktiv) und nicht ionisiert (elektromagnetische).

So können beispielsweise radioaktive Strahlen die Ionisation der Materie bewirken. Allgemein bedeutet ionisieren (Ionisation) die Bildung elektrisch geladener Atome oder Moleküle, die man dann als Ionen bezeichnet.

Elektromagnetische Strahlung sind Wellen, die durch Schwingung oder Beschleunigung elektrischer Ladungen entstehen. Diese elektromagnetischen Wellen haben, wie ihr Name ausdrückt, eine elektrische und eine magnetische Komponente. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung erstreckt sich von Wellen mit extrem hoher Frequenz und entsprechend kleiner Wellenlänge bis zu extrem niedriger Frequenz und großer Wellenlänge. [13]

Da die Leiterlängen von niederfrequenten Feldern sehr groß sein müssen, wird meistens nicht von Strahlung gesprochen. Zum Beispiel ist eine Leiterlänge von mindestens 6000 km nötig, um eine Abstrahlung eines 50 Hz Feldes zu ermöglichen.

Die Grundlagen der nichtionisierenden Strahlungsverordnung wurde vom Schweizer Bundesrat in den Artikeln des Umweltschutzgesetzes vom 7. Oktober 1983 und den Artikel des Raumplanungsgesetzes vom 22. Juni 1979 am 23. Dezember 1999 festgelegt.

Die NISV teilt sich grundsätzlich in zwei Bereiche auf, erstens in den Anlagen-grenzwert (AGW) und zweitens in den Immissionsgrenzwert (IGW). Der Anlagen-grenzwert ist eine Emissionsbegrenzung für die von einer Anlage allein erzeugte Strahlung (Ausstoß) und der Immissionsgrenzwert ist darauf bedacht, die Einwirkung von Strahlung auf den Menschen zu regeln.

Für diese Arbeit ist aber der erste Fall von Interesse, da er den Grenzwert für den maßgebenden Betriebszustand (Nennleistung) von Transformatorenstationen auf $1\mu\text{T}$ festlegt.

Die Artikel, die von Bedeutung für diese Arbeit sind, werden hier kurz angegeben. [13]

⇒ Art.2 beschäftigt sich mit dem Geltungsbereich der NIS - Verordnung.

Sie regelt die Begrenzung der Emissionen ortsfester Anlagen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz (Strahlung).

Weiterhin ermittelt und beurteilt sie die Immissionen von Strahlungen.

Sie regelt nicht die Begrenzung der Emissionen von Strahlung in Betrieben auf das Betriebspersonal, von medizinischen Produkten, militärischen Anlagen oder von elektrischen Geräten wie Mobiltelefon, Kochherde, usw.

⇒ Art.4 Vorsorgliche Emissionsbegrenzung.

Anlagen müssen so erstellt und betrieben werden, dass sie die Grenzwerte einhalten.

Falls keine Vorschriften für die Anlage vorhanden sind, kann die Behörde eine Emissionsbegrenzung anordnen.

⇒ Art.5 Ergänzende und verschärfte Emissionsbegrenzung.

Werden die Immissionsgrenzwerte durch eine oder mehrere Anlagen überschritten, kann die Behörde ergänzende oder verschärfte Emissionsbegrenzungen anordnen bis zur Einhaltung der Grenzwerte.

⇒ Art. 7 Sanierungspflicht

Altanlagen, die nicht den Art. 4 und Art. 5 entsprechen, müssen saniert werden.

⇒ Art.12 Kontrolle

Die Behörde überwacht die Einhaltung der Emissionsbegrenzung durch Messungen, Berechnungen oder stützt sich auf Ermittlungen Dritter.

Gewährt die Behörde Ausnahmen der Anlagengrenzwerte, so wird die erzeugte Strahlung periodisch gemessen.

Sie kontrolliert innerhalb von sechs Monaten, ob die Anordnungen befolgt werden und die Angaben über den Betrieb zutreffen.

⇒ Art.13 Geltung der Immissionen

Immissionsgrenzwerte müssen überall dort eingehalten werden, wo sich Menschen aufhalten können und gleichzeitig die Strahlung gleichmäßig auf den ganzen menschlichen Körper einwirkt.

⇒ Art. 20 Übergangsbestimmungen

Die Sanierungsverfügung nach Art. 7 erfolgt innerhalb von zwei Jahren. Für nicht dringliche Fälle kann die Frist ausnahmsweise überschritten werden.

⇒ Art. 21 Inkrafttreten

Diese Verordnung trat am 1. Februar 2000 in Kraft.

⇒ Anhang 22 Transformatorstationen

Als Anlage gelten stromführende Teile einer Transformatorstation einschließlich der Niederspannungsverteilung und der Niederspannungsverbindung. Dabei sind im Geltungsbereich nur die Anlagen, die von Hoch- auf Niederspannung transformieren.

⇒ Anhang 24

Der Anlagengrenzwert für den Effektivwert der magnetischen Flussdichte beträgt $1\mu\text{T}$

Die örtliche Einhaltung für die Anlagen- und Immissionsgrenzwerte für Transformatorstationen beträgt bei den Seitenwänden 20 cm, der unteren Grenze 20 cm ab Boden und der oberen Grenze 200 cm ab Boden. Zum besseren Verständnis sind diese Grenzen in den Abbildungen 3.1.-1 bis 3.2.-3 veranschaulicht.

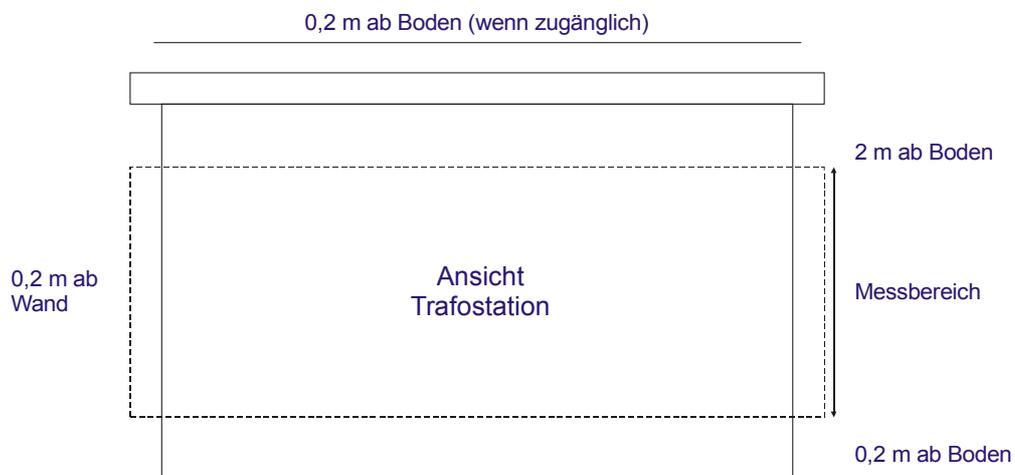
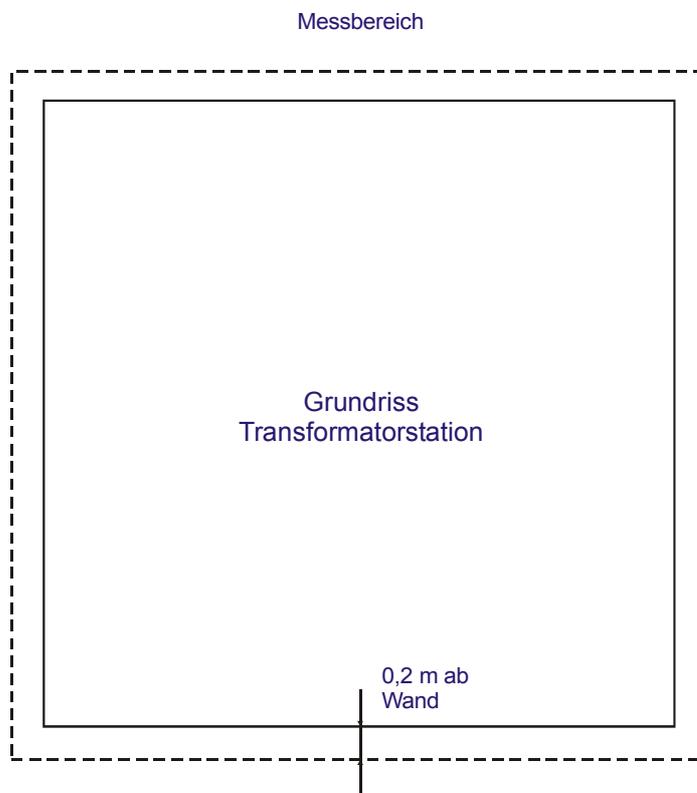


Abb. 3.1.-1 Grenzliniendarstellung einer Netzstation größer 2 m für die Seitenansicht



Abb. 3.1.-2 Grenzliniendarstellung einer Netzstation kleiner 2 m für die Seitenansicht



Grafik 3.1.-3 Grenzliniendarstellung einer Netzstation für die Draufsicht

3.2 Vergleich der Anforderungen von NISV und BImSchV

Die BImSchV gilt für ortsfeste Anlagen im Hochfrequenzbereich von 10 bis 300.000 Megahertz mit einer Sendeleistung ab 10 W EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung) und im Niederfrequenzbereich nur bei 50 Hz und $16\frac{2}{3}$ Hz über 1000 V. Die NISV hingegen gilt für ortsfeste Anlagen von 0 – 300.000 MHz Strahlung von mindestens 6 W ERP (äquivalente Strahlungsleistung). Wobei die äquivalente Strahlungsleistung die der Antenne zugeführte Sendeleistung, multipliziert mit dem Antennengewinn in Hauptstrahlrichtung, bezogen auf den Halbwellendipol ist. Geregelt werden in den Verordnungen nicht die Wirkungen auf elektrische oder elektronische medizinische Implantate oder Orten, die vom Menschen nur vorübergehend genutzt werden. Weiterhin regelt die NISV nicht die Strahlung auf Betriebspersonal, militärische Anlagen oder elektrische Geräte.

Ausnahmen bei den Anlagengrenzwerten können bei der Schweizer Verordnung gewährt werden, wenn nachgewiesen wird, dass alle Maßnahmen der Begrenzung der Strahlung, wie ein anderer Standort oder eine Abschirmung, die technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar sind, getroffen wurden. Die Bundesverordnung kann in Einzelfällen Ausnahmen zulassen, wenn nachgewiesen wird, dass die Art und Dauer der Auslastung und der tatsächliche Aufenthalt von Personen im Einwirkungsbereich der Anlage nicht zu erwarten oder im Einzelfall unverhältnismäßig sind.

Um die Anlagengrenzwerte zu ermitteln, werden in beiden Mess- und Berechnungsverfahren angegeben, die allerdings aus unterschiedlichen Quellen bezogen werden. Die BImSchV bezieht sich auf die DIN VDE 0848 Teil 1 aus dem Mai 1995 und die NISV aus der BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft). Die Grenzwerte der deutschen Verordnung liegen um ein hundertfaches höher als die der Schweizer, was zu gravierenden Unterschieden in der Anlagenkonstruktion und -planung führen kann.

Eine Überschreitung der Werte wird in dem Rahmen der BImSchV zugelassen, das im niederfrequenten Bereich kurzzeitig mehr als hundert vom hundert mit einer maximal Dauer von 5 vom Hundert des Beurteilungszeitraumes und die der elektrischen Feldstärke nicht mehr als hundert vom Hundert außerhalb von Gebäuden zugelassen ist. Mit der Voraussetzung, dass die Berührungsspannung keine unzumutbare Belästigung der Nachbarschaft hervorruft. Im Hochfrequenzbereich darf keine Überschreitung erfolgen, mit Ausnahme gepulste elektromagnetische Felder, wobei hier ein Überschreiten vom 32fachen der Grenzwerte erlaubt ist.

Bei der NIS – Verordnung ist eine kurzzeitige Überschreitung der Grenzwerte nicht zulässig. Die Behörde kann Ausnahmen bewilligen, wenn der Inhaber nachgewiesen hat, dass alle Maßnahmen zur Begrenzung der Strahlung, wie Standort oder Abschirmung, die technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar sind, getroffen wurden.

Die Schweizer Verordnung unterteilt und verfügt über mehrere Teilbereiche für Frei- und Kabelleitungen zur Übertragung von elektrischer Energie, Transformatorstationen, Unterwerke und Schaltanlagen, elektrische Hausinstallationen, Eisenbahnen und Straßenbahnen, Sendeanlagen für Mobilfunk und drahtlose Teilnehmeranschlüsse, Sendeanlagen für Rundfunk und übrige Funkanwendungen, sowie Radaranlagen. Weiterhin hat die NISV noch zusätzliche Bestimmungen über Immissionsgrenzwert für den induzierten Körperableitstrom, Berührungsstrom und für mehrere Frequenzen.

Sie erlassen die Grenzwerte bis 10 GHz über das Mittel eines Sechsinuten Intervalls des Effektivwertes, der als maßgebenden Betriebszustand die Nennleistung hat.

Der ausschlaggebende Primäreffekt von niederfrequenten Feldern liegt in der Nervenreizung beim Menschen und Störungserscheinungen von Geräten bis hin zu ihrer Zerstörung. Als Sekundäreffekte können Haarsträubungen, Augentäuschungen und Belästigungen durch Entladungserscheinungen auftreten. [1] Bei Gerätschaften mit technischer Ausrüstung muss eine Verträglichkeitsprüfung in der Hinsicht geschehen, dass keine Selbststörung, Störauswirkungen von außen oder eine Störung des Nachbarn vorliegt. [2]

4 Theoretische Grundlagen zur numerischen Berechnung magnetischer Felder

4.1 Magnetische Felder

Ein Feld ist allgemein eine physikalische Größe, die nicht nur in einem einzigen Punkt, sondern im gesamten Raum wirksam und damit messbar ist. Ein Feld kann daher mathematisch beschrieben werden, als:

$$Z=Z(X,Y,Z;t)$$

Als Grundlage der elektromagnetischen Feldberechnung werden die Maxwell'schen Gleichungen herangezogen.

Die erste Maxwell'sche Gleichung besagt: Das Integral der magnetischen Feldstärke \vec{H} einer geschlossenen Umlauflinie ist gleich dem gesamten, durch diese Fläche, hindurchfließenden Strom I . Diese wird als Durchflutungsgesetz bezeichnet (4.1.-1).

Mit dem Durchflutungsgesetz lässt sich bei einem stationären Vorgang (siehe Abschnitt 4.2.) an einem beliebigen Punkt außerhalb des stromdurchflossenen Leiters die magnetische Feldstärke berechnen. Als Grundbedingung gilt hier, dass der Betrag der magnetischen Feldstärke $|\vec{H}|$ längs des bekannten Integrationsweges konstant sein muss (4.1.-4).

$$\Theta = \oint \vec{H} d\vec{s} \quad \text{4.1.-1}$$

Wählt man als Integrationsweg, zur Bildung der mag. Umlaufspannung, eine Feldlinie im Radius r , so kann man statt des Skalarproduktes $\vec{H} \cdot d\vec{s}$ die Beträge der Vektoren schreiben, denn \vec{H} liegt stets in Richtung des zugehörigen Wegelements $d\vec{s}$. (Abb. 4.1.-1) Damit ist der Winkel zwischen ihnen 0° . (4.1.-2)

$$\vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot ds \cdot \cos(\vec{H}, d\vec{s}) = H \cdot ds \quad 4.1.-2$$

$$= \oint H ds \quad 4.1.-3$$

$$= H \oint ds \quad 4.1.-4$$

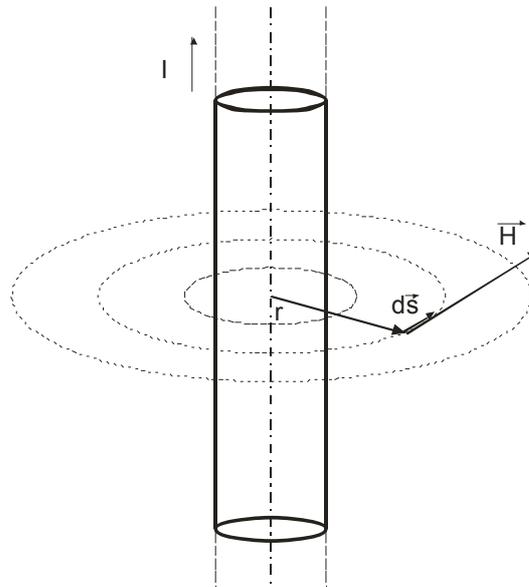


Abb. 4.1.-1 Magnetische Umlaufspannung um einen langen, geraden Leiter

Da hier der Umfang des Kreises mit dem Radius r gleich der Summe der Wegelemente $\oint ds$ ist, kann die Länge der Feldlinien mit $2\pi r$ angegeben werden. Die Durchflutung der vom Integrationsweg berandeten Fläche ist die Stromstärke I :

$$I = H \cdot 2\pi \cdot r \quad 4.1.-5$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad 4.1.-6$$

Die Gleichung 4.1.-6 gilt aber nur für kreisförmige Magnetfelder, wie sie durch lange geradlinige, runde Leiter erzeugt werden.

Das zweite Maxwellsche Gesetz (Induktionsgesetz) besagt, dass sich eine zeitliche Änderung der Flussdichte B innerhalb eines Flächenanteils dA als Induktion einer Umlaufspannung längs dieser Flächenberandung auswirkt.

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\int \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{A} \quad 4.1.-7$$

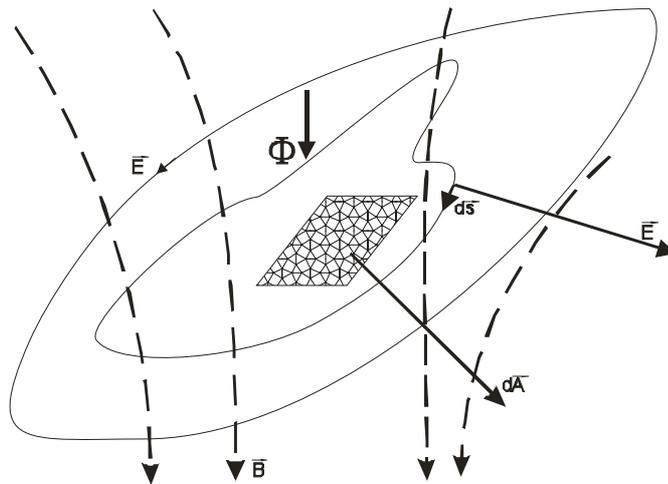


Abb. 4.1.-2 Bildung des Umlaufintegrals der elektrischen Feldstärke E um einen magnetischen Fluss Φ

Das Induktionsgesetz zeigt den Zusammenhang zwischen dem elektrischem und dem magnetischem Feld.

4.2 Klassifizierung elektrischer und magnetischer Felder

Hinsichtlich der Bewegung von Ladungsträgern können vier Arten von Feldern unterschieden werden. Ausgehend vom statischen, zum stationären, über das quasistationäre und nichtstationäre Feld. Dabei kann das Quasistationäre als Sonderfall des nichtstationären Feldes bezeichnet werden. Bei diesem Feld ist nur ein sich langsam verändernder Stromfluss vorhanden, Wechselstrom.[14]

Das **statische Feld** ist dadurch gekennzeichnet, dass kein elektrischer Stromfluss und keine zeitliche Änderung ($d/dt=0$) des Feldes vorliegt. Es entspricht der ruhenden elektrischen Ladung eines aufgeladenen Kondensators. Dies bedeutet, dass kein Magnetfeld (4.2.-1), keine Spannungsinduktion (4.2.-2) und kein Strom im Leiter oder Nichtleiter vorhanden sind.

$$\oint_s \vec{H} d\vec{s} = 0 \quad 4.2.-1$$

$$\oint_s \vec{E} d\vec{s} = 0 \quad 4.2.-2$$

Das **stationäre Feld**. Man bezeichnet ein elektromagnetisches Feld als stationär, wenn alle Feldgrößen keine Funktion der Zeit sind. Der Unterschied zum statischen Feld ist durch einen konstanten Gleichstrom gekennzeichnet, der ein gleichbleibendes magnetisches Feld (4.2.-3) um den stromdurchflossenen Leiter aufbaut. Dies entspricht einem ruhenden Elektromagneten. Folglich findet keine Spannungsinduktion statt (4.2.-4). Das magnetische Feld hat dabei keine Rückwirkung auf das elektrische Feld.

$$\oint_s \vec{H} d\vec{s} = \sum_0 I_{ges} = konst. \quad 4.2.-3$$

$$\oint_s \vec{E} d\vec{s} = 0 \quad 4.2.-4$$

Das **quasistationäre Feld** zeichnet sich durch ein sich zeitlich langsam änderndes Feld aus ($d/dt \neq 0$, z.B. 50 Hz). Da es ein Sonderfall des nichtstationären Feldes ist, mit der Einschränkung, dass das elektrische und das magnetische Feld noch entkoppelt sind, können wiederum die Maxwellschen Gleichungen 4.1.-1 und 4.1.-7 angewendet werden.

Es ist noch keine Wellenausbreitung vorhanden. Allerdings eine Wirbelkopplung zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Feld.

Mit dem sich änderndem Magnetfeld wird hier schon eine Induktion einer Spannung in Leiterschleifen möglich.

Das **nichtstationäre Feld** besitzt ein sich zeitlich schnell veränderndes Feld ($d/dt \gg 0$, MHz-GHz) mit einem Stromfluss. Es kann zur Ausbreitung mit einer elektromagnetischen Welle kommen, da hier eine Kopplung des elektrischen und des magnetischen Felds vorliegt. Diese Feldart wird durch die vollständigen Maxwellschen Gleichungen (Abschnitt 4.1) beschrieben.

$$\Theta = \oint \vec{H} d\vec{s} \quad 4.2.-5$$

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = - \int \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{A} \quad 4.2.-6$$

4.3 Lorenzkraft

Die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld kommt dadurch zustande, dass auf jede bewegte Ladung dQ eine Kraft $d\vec{F}$ wirkt, die sich auf den Leiter überträgt.

Die gesamte einwirkende Kraft, innerhalb und außerhalb des Leiters, auf die Ladung Q im Magnetfeld wird als Lorenz – Kraft (Abb. 4.3.-1) bezeichnet. [8]

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad 4.3.-1$$

In Worten kann man die Gleichung folgendermaßen erfassen:

Bewegt sich eine Ladung Q mit der Geschwindigkeit v durch ein Magnetfeld der magnetischen Induktion B , so wirkt auf die Ladung eine Kraft. Diese wirkt senkrecht zu v und senkrecht zu B . [6]

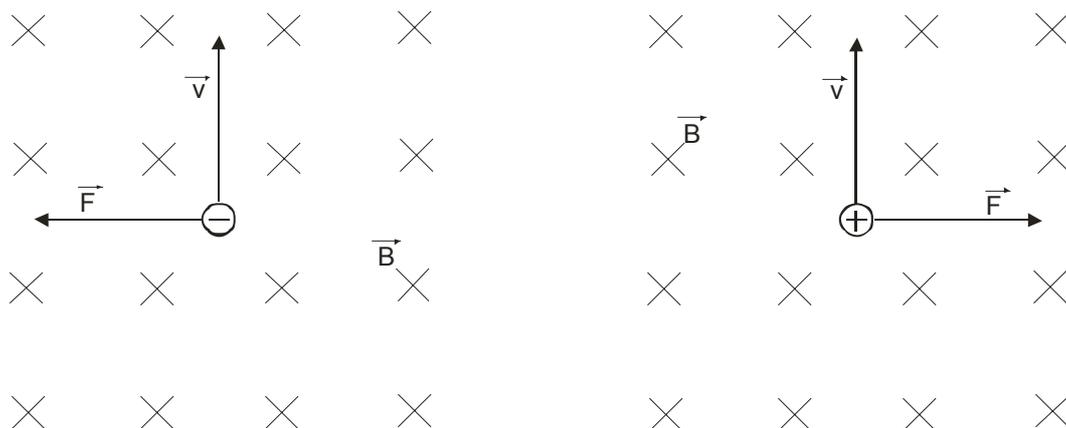


Abb. 4.3.-1 Lorenzkraft auf eine bewegte Ladung

Weiterführend kann nun die Kraft für zwei parallel stromdurchflossene Leiter durch die Gleichung 4.3.-2 berechnet werden.

$$F_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d} \quad 4.3.-2$$

In der Abb. 4.3.-2 ist die Gleichung 4.3.-2 verdeutlicht.

Aus ihr kann man ermitteln, dass sich bei zwei entgegengesetzten Leiterströmen eine Abstoßungskraft einstellt. Das magnetische Feld zieht sich um die Leiter herum zusammen, es findet eine Verstärkung zwischen den Leitern statt. Dieser Effekt wird als Kompensation bezeichnet, siehe Abschnitt Kompensationsverhalten.

Bei zwei parallelen Strömen in den Leitern erfolgt eine Anziehungskraft. Des weiteren findet eine Überlagerung der Feldlinien statt, womit sich das Feld nach außen hin erhöht, es wird größer.

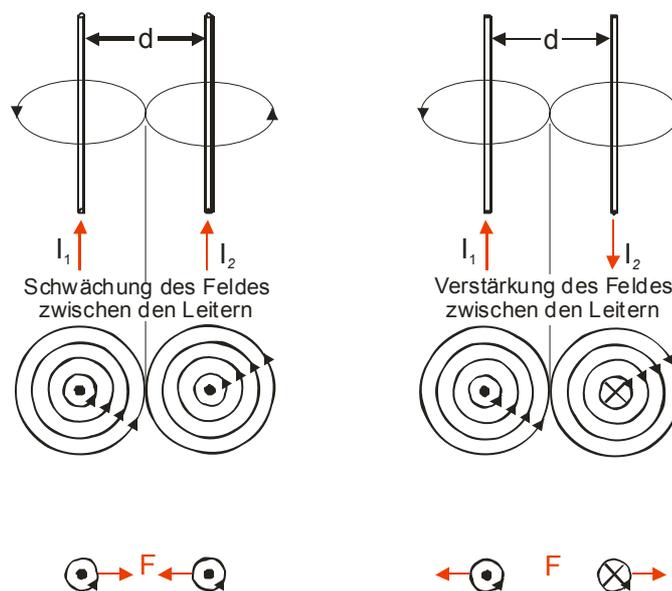


Abb. 4.3.-2 Kraft zwischen zwei parallelen stromdurchflossenen Leitern

4.4 Das Gesetz von Biot-Savart

Die Software der Firma FGEU zur Berechnung von magnetischen Feldern besteht in den Grundzügen aus der analytischen Formel zur Betrachtung von geraden linienförmigen Leitern nach dem Gesetz von Biot und Savart. Mit ihm kann die magnetische Feldstärke $d\vec{H}$, eines differenziellen Elements $d\vec{s}$ einer unendlich dünnen Strombahn i im Abstand r ermittelt werden.

$$d\vec{H}(r,i) = \frac{i}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad \mathbf{4.4.-1}$$

$$d\vec{H}(r,i) = \frac{i}{4\pi} \frac{[ds \cdot r \cdot \sin(d\vec{s}, \vec{r})]}{r^3} \quad \mathbf{4.4.-2}$$

In Abb. 4.4.-1 ist die Gleichung 4.4.-1 grafisch vereinfacht dargelegt.

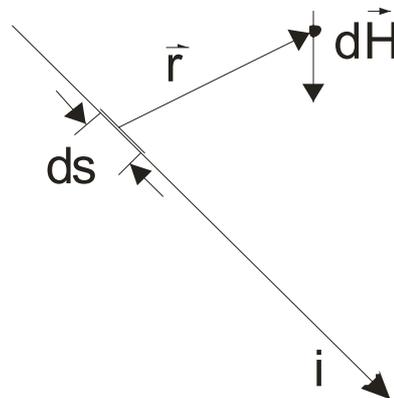


Abb. 4.4.-1 Feldstärke des Punktes P im Abstand r des stromführenden Leiters i

Die Summe aller dH – Werte, die von differenziellen Strombahnelementen erzeugt werden, ist gleich der entstehenden Feldstärke H in der Nähe eines räumlich ausgedehnten Strombahnstückes W .

Wenn an allen Stellen einer geschlossenen Strombahn zur gleichen Zeit der gleiche Strom i fließt (siehe Abschnitt 4.2. Quasistationäre Felder), spricht die

zeitliche Laufzeitänderung zu keinen nennenswerten Stromunterschieden führt, kann man alle dH – Werte addieren. [2]

$$H(W, i, r) = i \int_W dH(r) \quad 4.4.-3$$

Die Integration der Feldstärke $H(r)$ führt bei einem geraden Leiterteil im Abstand r zu der Gleichung:

$$H(r) = \frac{i}{2\pi r} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad 4.4.-4$$

Grafisch kann sich die Gleichung in Abb. 4.4.-2 verdeutlichen lassen.

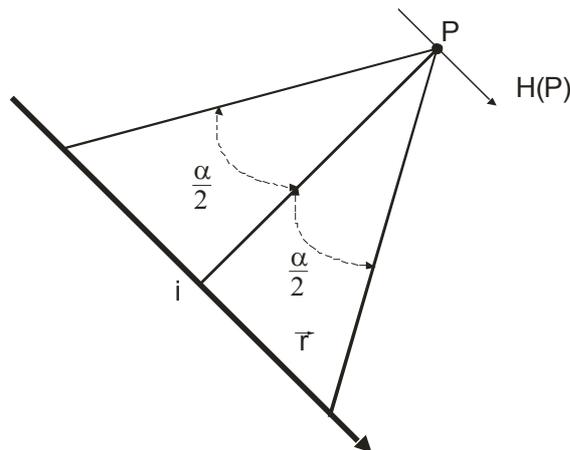


Abb. 4.4.-2 Feldstärke des Punktes P im Abstand r von einem geraden Drahtstück unter Berücksichtigung des Winkels α

Wenn man nun den Leiter unendlich lang verlängert und unter dem Winkel von 180° betrachtet, herrscht in seiner Nähe, im Abstand r , die Feldstärke:

$$H_\infty(r) = \frac{i}{2\pi r} \quad 4.4.-5$$

Ersetzt man nun noch die magnetische Feldstärke H durch die magnetische Flussdichte B , so ergibt sich die Gleichung 4.4.-6. Weiterhin ist durch den Umstand, dass die Ausbreitung der magnetischen Felder durch die Permeabilität $\mu_r = 1$ der Luft keine Änderung erfährt, eine Vereinfachung möglich. Damit kann die Gleichung 4.4-7 für einen einfachen stromdurchflossenen Leiter abgeleitet werden.

$$B_{\infty}(r) = \mu \frac{i}{2\pi r} \quad \mathbf{4.4.-6}$$

$$B = \mu_0 \frac{i}{2\pi r} \quad \mathbf{4.4.-7}$$

4.5 Software WinField

Das im Abschnitt 4.4 angegebene analytische Berechnungsverfahren nach Biot und Savart wird in dem Grundprogramm WinField, aus dem Hause FGEU für die Feldsimulation von linienförmigen Leitern, bei sich langsam ändernden Feldern genutzt. Näherungsweise können auch andere Objektformen simuliert werden. In erweiterten Versionen ist die Berechnung auch für Hochfrequenzfelder möglich.

Zum testen kann man aus der Bibliothek verschiedene vorgefertigte Stationen oder auch Anlagenteile mit einander kombinieren. Falls das nicht ausreicht, ist ein eigenständiges Erstellen mittels CAD vorgesehen.

Die Kalkulationen sind in parallelen frei wählbaren Höhen der Ebenen ausführbar.

Für die Berechnung von Feldern wird in dem Programm, die zu untersuchende Fläche, in viele kleinere Flächen aufgeteilt. Bei dieser Rasterung kann man durch die Wahl der Rastergröße die Genauigkeit des Feldes, um das zu untersuchenden Objekt, bestimmen. Dabei ist es aber nicht zweckmäßig die Rasterung auf die kleinste Größe zu stellen, da sich mit jeder Halbierung der Rastergröße die Berechnungspunkte vervierfachen. So ist man von der Rastergröße $dx = dy = 0,2$ m mit 2601 Punkten schnell auf 10201 Punkten bei $dx = dy = 0,1$ m einer 25 m² Fläche. Das Hauptproblem dabei ist die Zeit, die ein Computer beansprucht, um das Feld zu berechnen. So benötigt eine Pentium MMX – 233 MHz Computer mit 148 MB RAM für die Komplettstation 1 zwischen kleiner <1 s bei einer Maschenweite von $0,8$ m bis 2368 s bei $0,013$ m. Eine Verbesserung kann hier die Interpolation bringen. Dabei werden je nach Einstellung ein oder mehrere Punkte interpoliert. Um den Interpolationsfehler zu verringern, kann man mit der Option der dynamischen Interpolation arbeiten. Bei starken Unstimmigkeiten zwischen zwei Punkten wird nicht mehr interpoliert sondern wieder gerechnet. Das kann allerdings bei ungünstigen Feldformen zu einer Verlängerung der Rechenzeit über das Maß der normalen Rechnung hinausführen. Dies ist damit zu begründen, dass erst zwischen zwei Punkten interpoliert wird, die Werte dann verglichen und jetzt konkret berechnet werden.

Aus der Tabelle A 4.5.-1 bis A 4.5.-3 im Anhang konnte für das Raster eine Größe von $0,05$ m mit hinreichender Genauigkeit zum Zeitaufwand bestimmt werden. Gestützt wird diese Entscheidung durch den Umstand, dass selbst bei den Messungen Sonden dieser Fläche verwendet werden und damit kein genaueres Ergebnis erzielt werden kann. Auf eine Interpolation wird verzichtet, da der interessante Wert für die Berechnungen keine starken Feldunterschiede in

dem zu untersuchenden Entfernungen aufweist und somit zu Fehlern in den Untersuchungen führen könnte.

Bei der Untersuchung von Anlagen wird immer zur Berechnung der worst case Fall angenommen. Das heißt, die Anlage ist mit den maximalen Strömen ausgelastet und eine Schirmwirkung der Gehäuse ist vernachlässigt. Damit liegt die Berechnung der mag. Felder immer unter denen, in realen Transformatorstationen und Stationsteilen, was eine zusätzliche Sicherheit bringt.

5 Berechnung von Netzstationen mit WinField

5.1 Allgemeine Vorbetrachtungen

Um die Strom – Wärmeverluste bei der Übertragung von elektrischer Energie gering zu halten, wird mit hohen bis sehr hohen Spannungen gearbeitet. Hier unterscheidet man grundsätzlich vier Spannungsebenen. Sie sind je nach Höhe der Spannung für den Transport über kurze oder lange Strecken geeignet. Europaweit kann man damit charakterisieren:

1. überregional → Höchstspannung mit 220/380 kV
2. überregional/regional → Hochspannung von 60 kV bis 150 kV
3. überregional/örtlich → Mittelspannung von 1 kV bis 60 kV
4. örtlich → Niederspannung unter 1kV.

Laut Aufgabenstellung sind nur die Mittelspannungsebene mit 20 KV und die Niederspannungsebene mit 400 V von Interesse. Damit wir von einer Spannungsebene zur nächsten gelangen, werden Transformatorstationen eingesetzt.

In den Stationen kann man vier maßgebliche Bestandteile gruppieren. Ein Anlagenteil ist die Mittelspannungseinspeisung, womit die Leistungsübernahme aus dem übergeordneten Netz erfolgt. Der Transformator ist für die Abspannung von 20 KV zu 0,4 KV nötig. Zur koordinierten Abgabe der Leistung an die Verbraucher verwendet man Niederspannungsverteilungen. Damit die Energie ihren Bestimmungsort erreichen kann, muss der Strom über elektrisch leitende Verbindungen, wie Kabel transportiert werden.

Für die Untersuchung kommen schon fertige Stationen aus dem Programm WinField zur Anwendung.

In den Berechnungen wird vorrangig die Termini Höhe, oben, unten, links und rechts verwendet. Mit Höhe ist die Messhöhe der Untersuchung bei der Frontbetrachtung gemeint, siehe Bild 5.1.-2. Bei den Begriffen oben, unten, links und rechts, ist eine Betrachtung von Oben mit der Messhöhe $Z = 1\text{m}$ angedacht worden. Siehe Bild 5.1.-1.

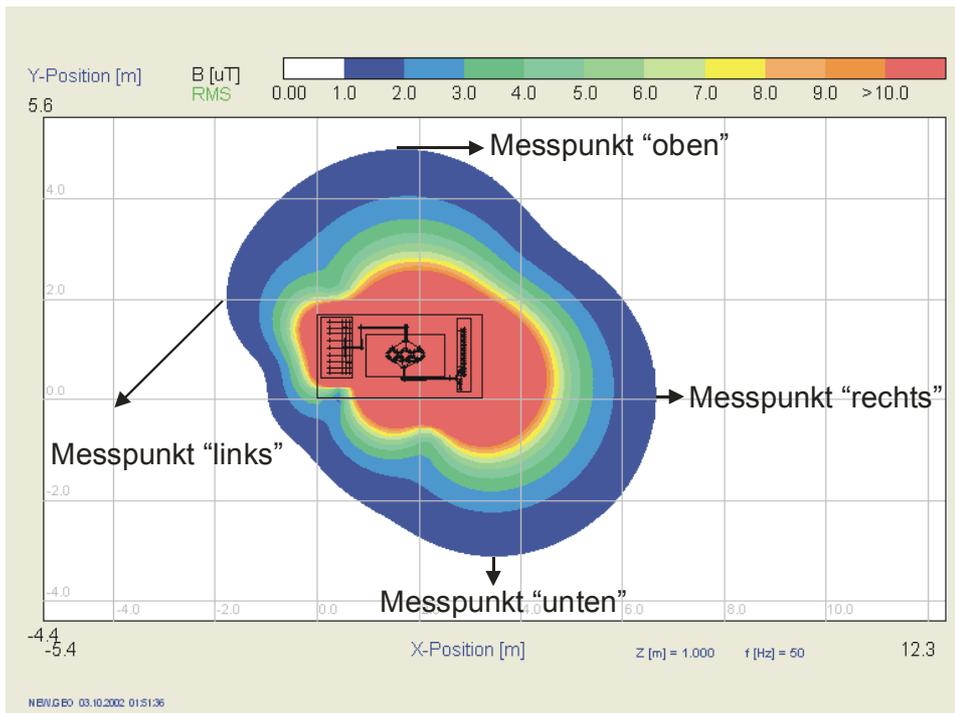


Bild 5.1.-1 Ansicht einer Transformatorstation von oben

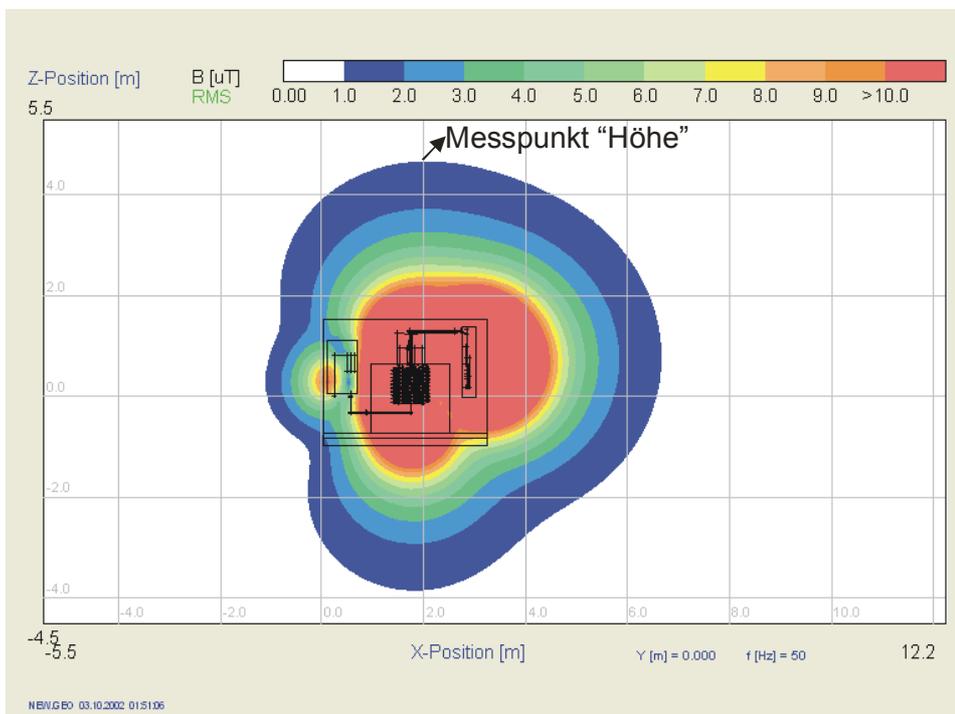


Bild 5.1.-2 Ansicht einer Transformatorstation von der Seite

5.1.1 Netzstationen

Aufgrund der Komplexität der Transformatorstationen, die durch die einzelnen Komponenten hervorgerufen werden, ist es sinnvoll, diese Einheiten im ersten Schritt einzeln zu betrachten.

Durch die verschiedenen Quellen wird ein verzerrtes Gesamtfeld erzeugt, das sich am besten beheben lässt, wenn die einzelnen Elemente in ihrer Strahlungseigenschaft verringert und im nachhinein mit einer Kompensation der einzelnen Felder versucht wird, die Umweltbelastungen in geregelten Dimensionen zu halten.

In den vorhergehenden Diplomarbeiten sind schon Unterteilungen nach der Stärke der Feldverursachungen in den Stationen dargelegt. Als stärkste Verursachung ist immer die NVT anzusehen, weil hier die größten Ströme auftreten. Danach folgen die Mittelspannungsschaltanlage, der Transformator und als letztes die Stromverbindungen.

Die Flussdichteverteilung für eine Anlage im Bereich $1 \mu\text{T}$ ist im Bild 5.1.1.-1 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Grenzwerte nach mehreren Metern erst eingehalten werden. Als Vergleich ist die gleiche Anlage für den Wert von $100 \mu\text{T}$ angegeben, Bild 5.1.1.-2.



Bild 5.1.1.-2 Trafostation1 für $100 \mu\text{T}$

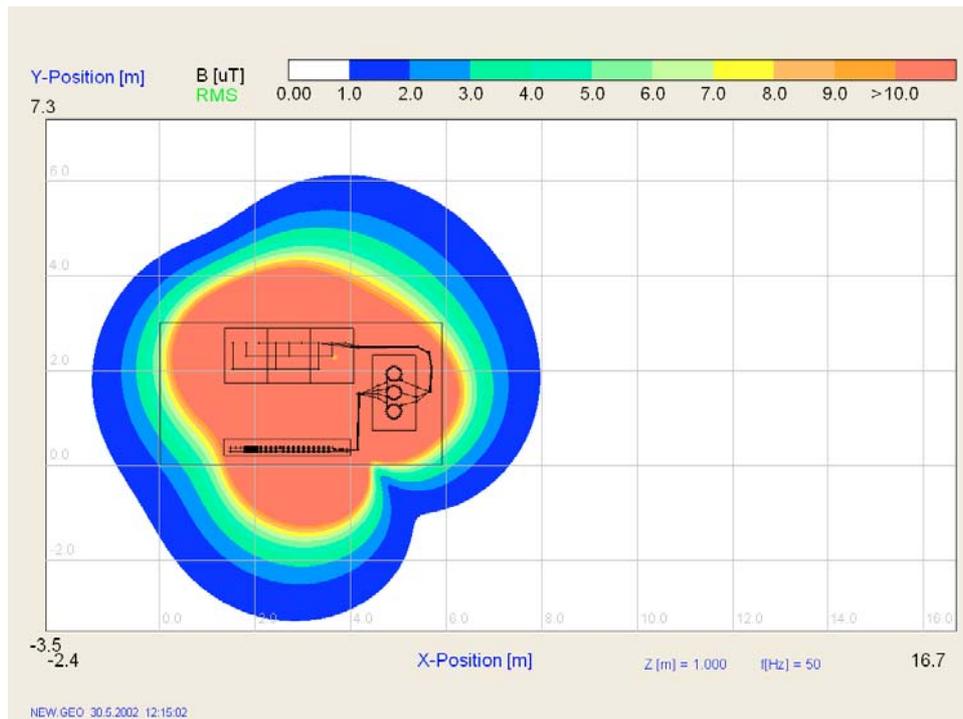


Bild 5.1.1.-1 Trafostation 1 für 1 μT

Aus den Bildern ist gut zu erkennen, dass eine Optimierung der Transformatorstationen auf die Werte der NISV durch den vergrößerten Flussdichtbereich, auch mit den Verbesserungsmaßnahmen der vorhergehenden Diplomarbeiten nicht leicht zu erfüllen ist. Darum sind in den nächsten Abschnitten Verbesserungsmöglichkeiten für die Einzelnen Anlagenteile vorgestellt.

Die im Anhang aufgeführten Tabellen und Bilder werden mit dem Index A für Anhang A und B für den Anhang B versehen. Der Anhang B, welcher nur aus Bildern besteht, ist zum Vergleich zwischen den optimierten und den normalen Netzstationen vorbehalten.

5.1.2 Kompensationsverhalten

Um die Kompensationseigenschaften und das Verhalten des magnetischen Feldes deutlich zu machen, sind in den nachfolgenden Bildern einzelne Leiter mit 500 V Nennspannung und einem Strom von 0.4 kA in unterschiedlichen Positionen und Stromflussrichtungen angegeben.

Im ersten Bild sind vier Leiter in Ringausführung dargestellt. Der geschlossene Stromkreis erzeugt ein rein rundes Feld, das durch die Kompensation der sich gegenüberliegenden, entgegengesetzten, gleichlangen Stromleitern einstellt. Dies ist der Idealfall, welcher in realen Anordnungen nie auftreten kann, aber gut zu Vergleichszwecken dient.

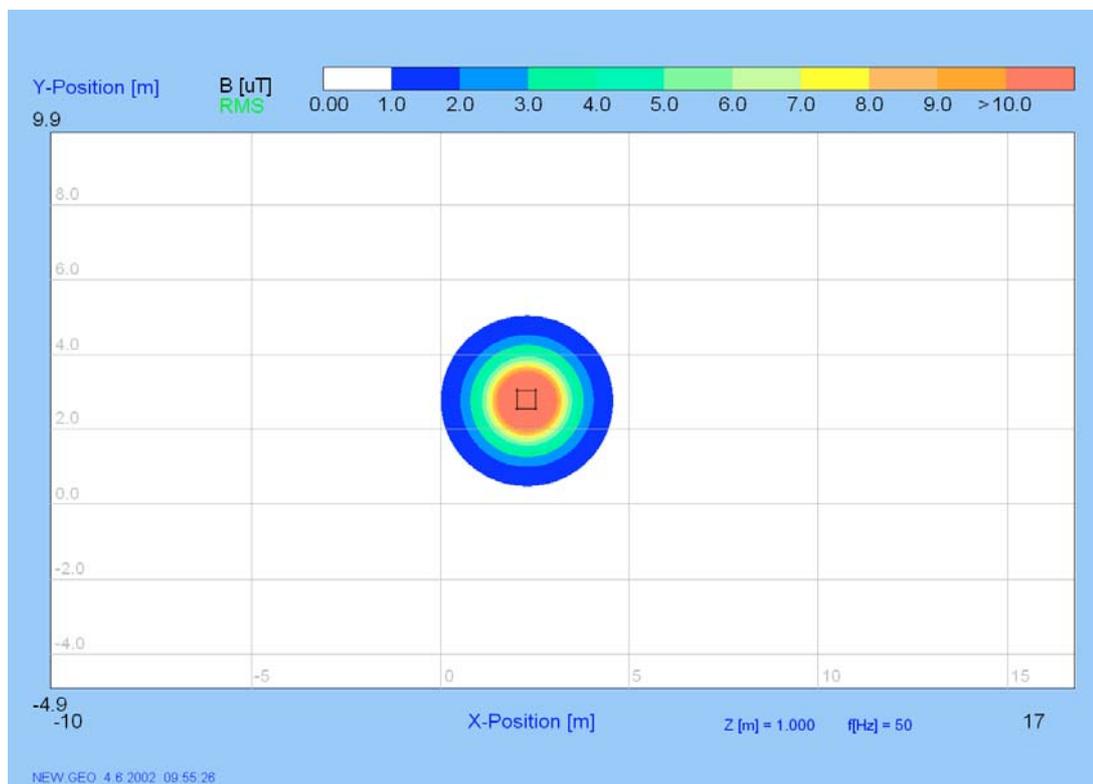


Bild 5.1.2.-1 Vierleiter in geschlossener Ringausführung mit gleicher Stromrichtung

In der zweiten Anordnung ist einer der Leiter entfernt worden, um eine Leiterschleife zu simulieren. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Feldverteilung zu den Seiten hin nicht mehr kompensiert. Damit vergrößert sich die magnetische Flussdichte zur linken Seite und erzeugt damit ein „erdnussförmig“ vergrößertes Feld. Die unteren und oberen Leiter kompensieren sich noch immer, tragen dennoch durch den „Randeffekt“ zur Veränderung bei.

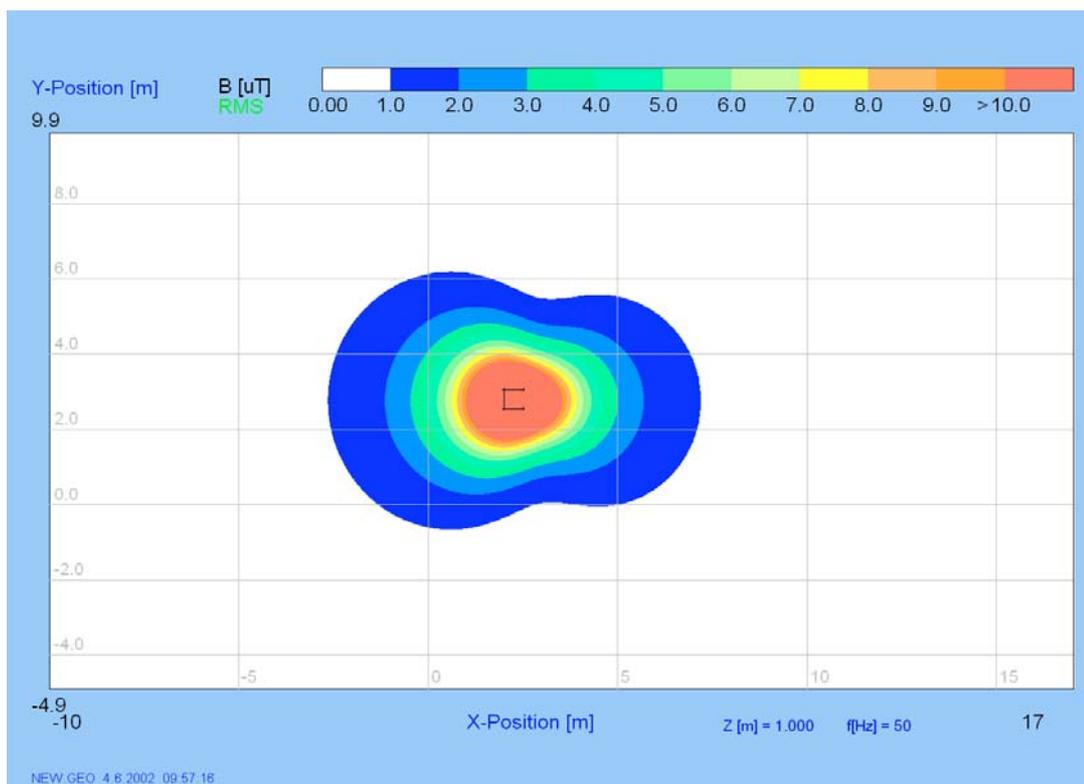


Bild 5.1.2.-2 Drei Leiter in Schleifenanordnung mit gleicher Stromrichtung, rechts geöffnet

Die gleiche Beobachtung kann gemacht werden, wenn die andere Seite der Leiterschleife fehlt. Hier ist im Gegensatz zur vorausgegangenen Untersuchung die Feldverzerrung zur rechten Seite klar zu erkennen. Von einer Löschung der oberen und unteren Leiter muss kein Gebrauch gemacht werden, da dies zum gleichen Ergebnis führen würde.

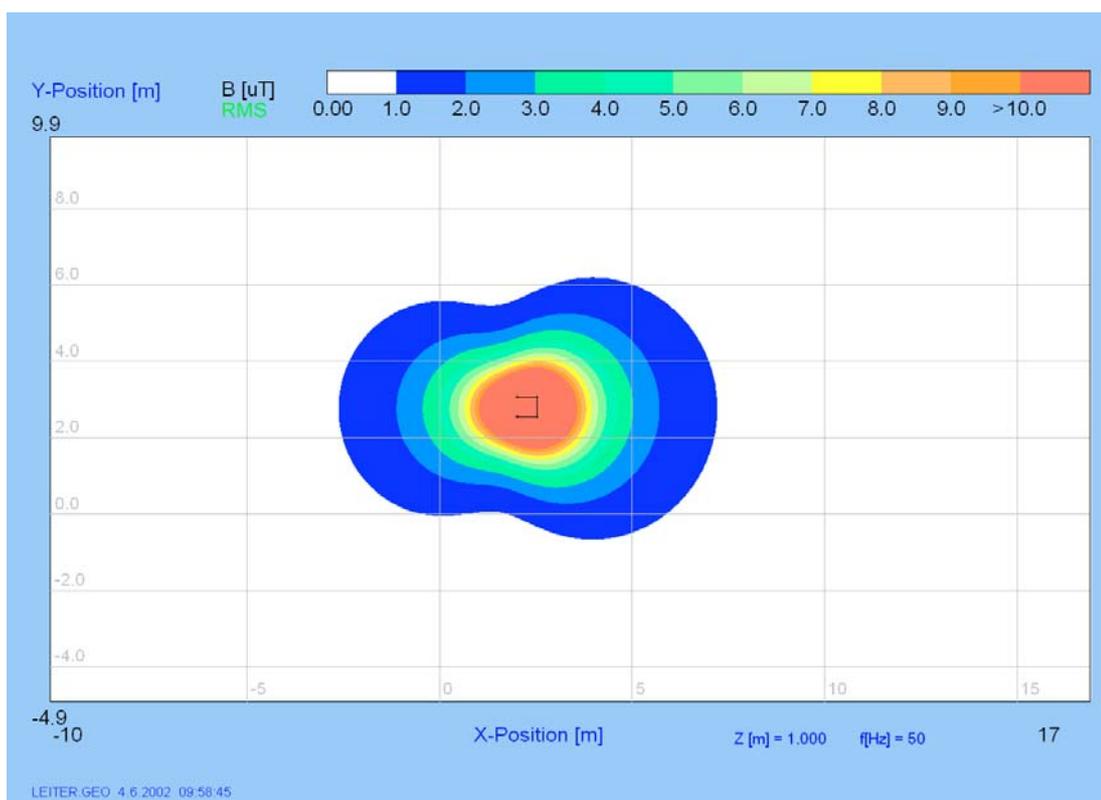


Bild 5.1.2.-3 Drei Leiter in Schleifenanordnung mit gleicher Stromrichtung, links geöffnet

Beim nächsten Versuchsaufbau wurden die beiden Verbindungen an der rechten und linken Seite gelöscht. Damit ist eine Änderung eingetreten, die zu erwarten war. Die Kompensation der invers angeordneten Leiter sollte das Feld klein halten, dennoch ist eine leichte Vergrößerung eingetreten, zusammen mit einer Ausweitung der seitlichen Felder. Diese Ursache liegt auch wieder im Randeffekt der kurzen Leiter, was aber keine praktische Anordnung ist. Es soll nur der Fehler aufgezeigt werden, da bei den Berechnungen mit der Software, durch Vereinfachungen bei der Simulation diese Ungenauigkeiten entstehen können.

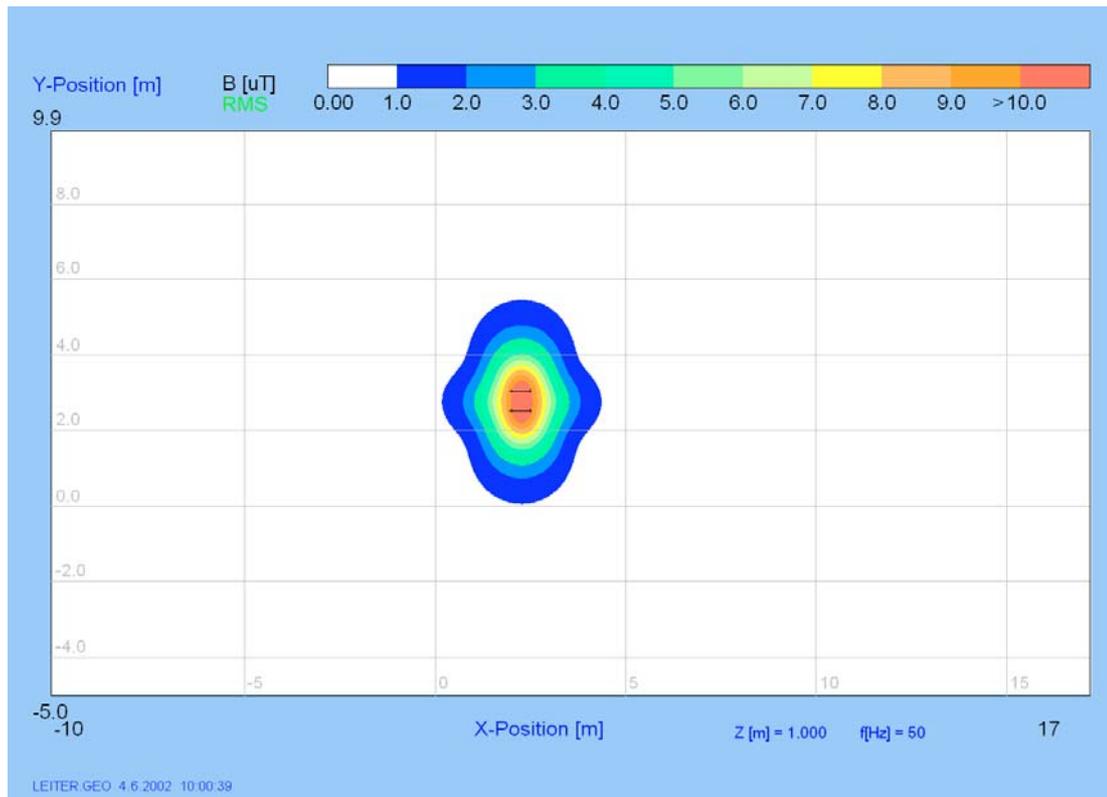


Bild 5.1.2.-4 Zwei Leiter mit paralleler Anordnung und entgegengesetzter Stromrichtung

Weitergehend konnte nun ein sehr stark vergrößertes Feld nach oben und unten erzeugt werden, was mit der gleichen Stromrichtung beider Leiter zu tun hat. Das Ergebnis ist dadurch zu erklären, dass hier keine Kompensation mehr, sondern eine Abstoßung der Felder stattfindet. Dieser Effekt konnte durch das Fehlen der seitlichen Leiter der Anordnung und durch gleiche Stromrichtung der noch übrigen hergestellt werden.

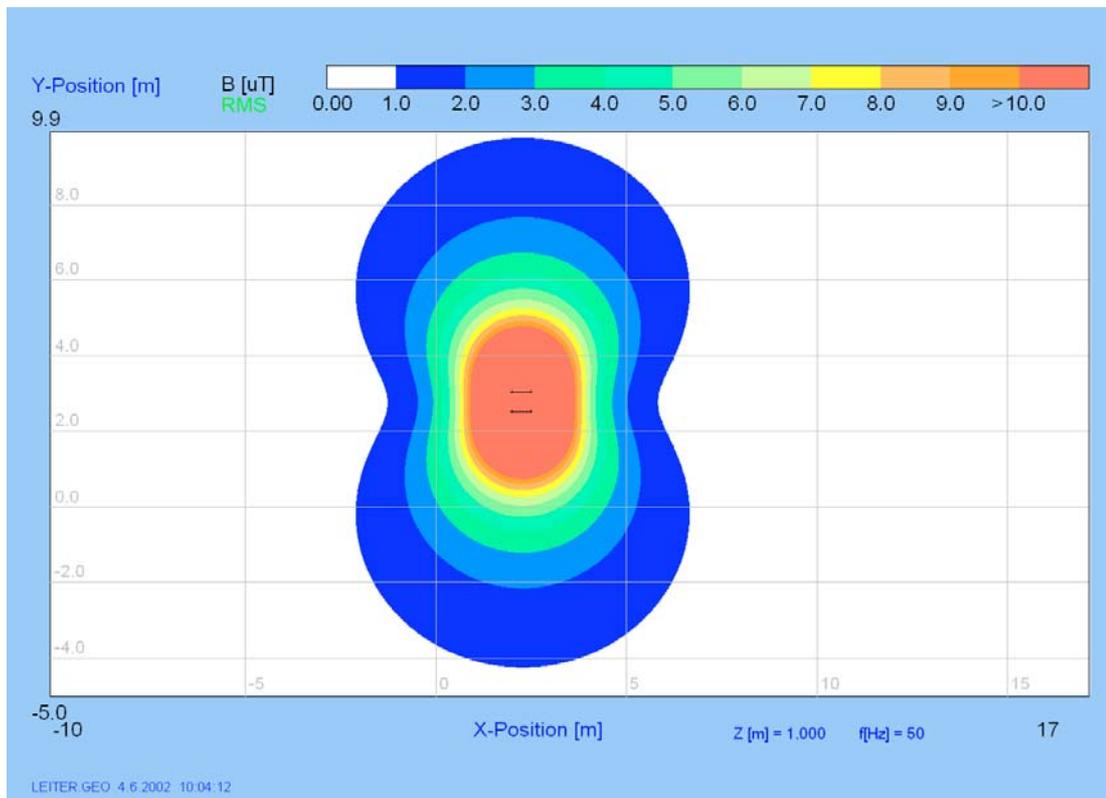


Bild 5.1.2.-5 Zwei Leiter mit paralleler Anordnung und gleicher Stromrichtung

Bei dem letzten Bild handelt es sich nur um einen Leiter. Damit kann ein normales Feld aufgezeigt werden. Es ist allerdings zu beachten, dass sich nun wiederum der schon von dem Dipl. Ing. (FH) Kupke beschriebene Randeffect einstellt.

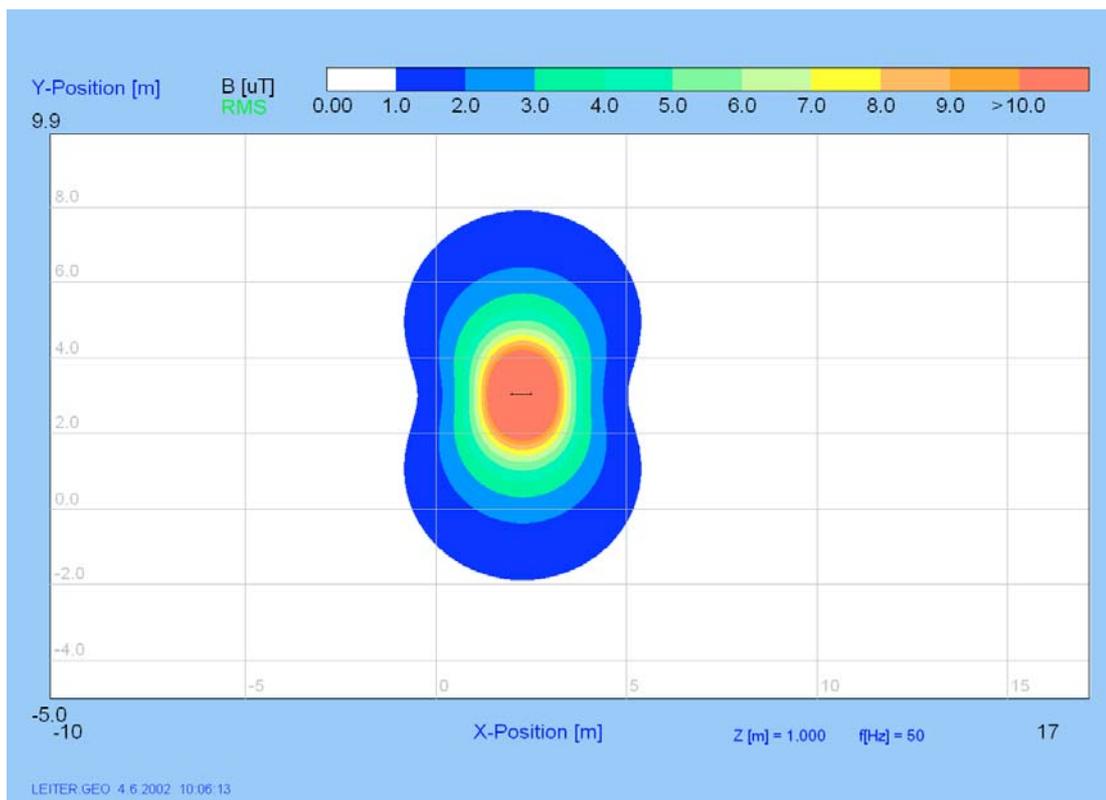


Bild 5.1.2.-6 Einfacher Leiter

Das Resümee, was aus der Untersuchung geschlossen werden kann, ist die Wichtigkeit der Anordnung und Stromrichtung der Leiter.

Für eine geringe Feldgröße ist es nötig, die Stromrichtung zwischen zwei Leitern immer entgegengesetzt und parallel anzuordnen, damit sich die Felder kompensieren können.

5.2 Transformatoren und Niederspannungsverteilungen

5.2.1 Stromschienen

In Niederspannungsverteilungen und Mittelspannungsschaltfeldern werden vorrangig Stromschienen verwendet. Sie bieten den großen Vorteil der besseren Bearbeitungsmöglichkeit und Steifheit, was in engen Räumen und bei Kurzschlüssen eine Stärke ist.

Bei einer Untersuchung wurde von dem Dipl. Ing.(FH) Faesing die Frage aufgeworfen, wie genau sich Stromschienen mit Hilfe der Software WinField berechnen lassen und welche Möglichkeiten es gibt, die Berechnungen zu verbessern.

Bei der Analyse wurden anfangs die Stromschienen durch 671 einzelne Rundleiter dargestellt. Dies führte zu einer Erhöhung der Flussdichte des magnetischen Feldes. Weitergehend ist untersucht worden, wie viele Leiter gebraucht werden, um ein hinreichend genaues Bild zu erzeugen. Das Ergebnis zeigte, dass es ausreichend ist, die Stromschiene mit wenigen Leitern nachzubilden, um ein maximale Differenz von weniger als 1,5 % zu den vorherigen verwendeten 671 Leitern herzustellen.

Für diese Diplomarbeit zeigten die Ergebnisse, dass eine Ummodellierung der Stromschienen nicht nötig ist, da hier in einer Entfernung gearbeitet wird, wo die Fehler eine Größe erreicht haben, die keine Beachtung mehr erfordern.

5.2.2 Leistungsschalter und Sicherungen

Der Leistungsschalter (LS) hat in der Niederspannungsverteilung vielseitige Aufgaben zu erfüllen, wie Kupplungs-, Einspeiseschalter oder auch als Sicherung. Die größte Bedeutung für die Analyse ist der Verwendung als Einspeiseschalter zuzuschreiben, da hier der größte Strom auftreten und somit zur Feldbeeinflussung beitragen kann.

Aufgrund der von Faesing gemachten Untersuchungen konnte dem Schalter eine Bedeutung für die Feldbeeinflussung an der linken Seite und Vorderseite der Niederspannungsverteilung nachgewiesen werden. Dieses resultierte daraus, dass sich der Leistungsschalter näher am Gehäuse befand als die gerade Stromschiene. Es zeigte sich eine Unstimmigkeit von 2,7% bis 3,5% auf der linken Seite und 3,7% bis 12% zur Vorderseite zwischen der nachgebildeten Strombahn, was in der Realität einem Leistungsschalter entspricht und der Stromschiene, ohne Leistungsschalter.

Die Werte sind allerdings ohne die Schirmwirkung des LS – Gehäuses und auch der NVT untersucht worden. Hinzu kommt noch, dass sich die Ergebnisse wieder auf den Nahbereich beziehen, was dazu führt, dass von einer Änderung in den weiterführenden Analysen abzusehen ist.

Bei den Sicherungen (SI) handelt es sich um ein reines Schutzgerät, das die Anlagen, Geräte und Menschen vor Überströmen bzw. Kurzschlüssen schützen soll, was allerdings zu ihrer Zerstörung führt. Im Gegensatz zu den Leistungsschaltern können Sicherungen nicht eingestellt werden, sie müssen über das Strom – Zeit Diagramm vor dem Einsatz bestimmt werden.

Bei den Sicherungen wurde wiederum untersucht, in wieweit sich eine Felddifferenz aufbaut, wenn sie einmal als gerade, abgewinkelte oder als exakte Nachbildung Verwendung findet. Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass eine exakte Nachbildung der Sicherungsleisten unnötig wäre. Mit einer abgewinkelten Strombahn lassen sich Ergebnisse reproduzieren, die nur um ein wenig geringer sind.

Bei der geraden Strombahn hingegen ist ein um 20,5% geringeres Feld im Abstand von 40 cm für die rechte Seite der NVT berechnet worden, an den anderen Seiten ist das Feld ohne einen nennenswerten Unterschied geblieben. Aber durch die geringe Flussdichte an der rechten Seite von nur 11,7 μT ist eine Veränderung bei weiteren Untersuchungen nicht von Bedeutung, da es sich meist um Schirm- oder Kompensationsmaßnahmen handelt.

5.2.3 Elektrische Verbindungen

Die für den Transport von elektrischer Energie verwendeten Medien können Freileitungen, Stromschienen; Kabel, Leitungen, Supraleiter und alle anderen leitfähigen Objekte sein. Diese Medien bestehen aus elektrisch leitfähigen Materialien. Je nach Größe des spezifischen elektrischen Widerstandes Ω , ist es wirtschaftlich, ein Material zu nutzen oder nicht, denn je höher der Widerstand des Materials ist, umso höher sind die Wärmeverluste.

Zu den mit extrem geringem Widerstand gehören die Supraleiter, wie es sie unter Keramiken gibt. Diese können aber nur mit so hohem Aufwand betrieben werden, dass eine technische Nutzung nur im Versuchslabor Anwendung findet. Für den täglichen Gebrauch werden Aluminium- und Kupferleiter genutzt. Je nach Einsatzgebiet als Stromschiene, Leitung oder Kabel. [6]

Um ein magnetisches Feld zu erzeugen, wird ein Stromfluss benötigt. Dieser kann aber nur durch leitfähige Materialien, mittels Anlegen einer Spannung an ein geschlossenes System entstehen. In unserem Fall wären dies die Einspeise-, Verbindungs-, Abgangskabel und die Stromschienen der Transformatorstation. Da sie teilweise sehr hohe Ströme führen, aber auch im hohen Grade vorhanden sind, ist eine genauere Betrachtung sinnvoll.

In der Analyse von Herrn Kupke ist ein Einfluss der Leiterlänge auf den magnetischen Fluss B im Programm verwiesen worden, der sogenannte Randeffect. Dieser entsteht, wenn stromführende Teile ohne weitere Verbindung im Raum hinterlassen werden. In der Realität ist dies nicht möglich, da für einen Stromfluss ein geschlossenes System vorhanden sein muss. Aber im Berechnungsprogramm wird diese Funktion benötigt, um die Komplexität der Versuche gering zu halten. Anhand einer kurzen Untersuchung soll nochmals aufgezeigt werden, wie sich dieser Effekt auf das Feld auswirkt.

Bei der ersten Untersuchung, für die Länge der Leiter, wurde ein Drehstromsystem mit einem Abstand von 0,15 m zwischen den Phasen verwendet. Jeder einzelne Leiter ist mit 1000 A bei 400 V belastet worden. Der Messpunkt liegt immer drei Meter über der Mitte der Leitung.

Längentest

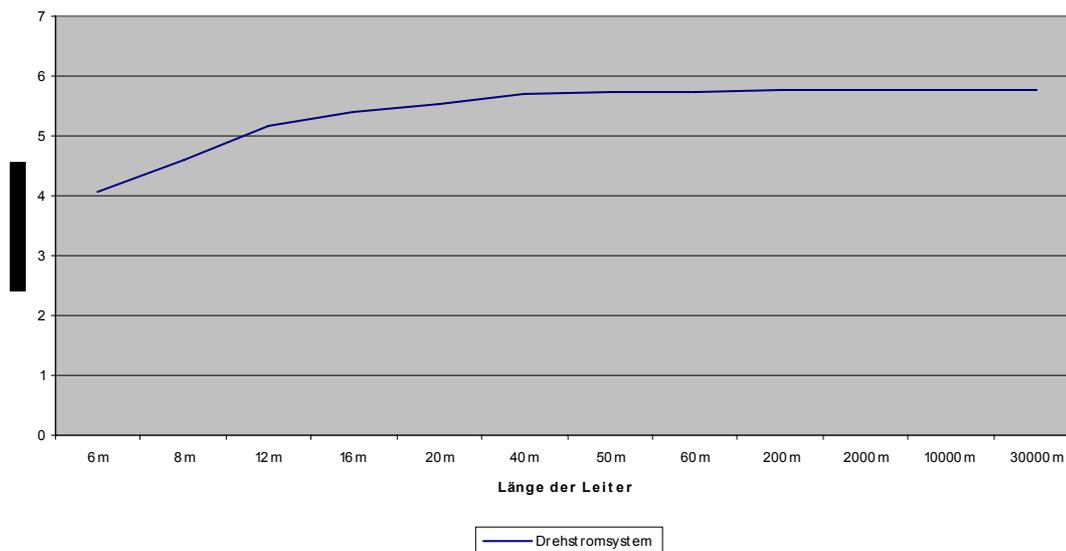


Diagramm 5.2.3-1 Überprüfung des Einflusses der Leiterlänge auf das mag. Feld

Aus dem Diagramm 5.2.3.-1 ist abzulesen, dass sich der magnetische Fluss B mit zunehmender Länge dem Wert 5,8 annähert. Bei noch größeren Längen kann kein nennenswerter Nutzen mehr erzielt werden.

Eine numerische Überprüfung des Ergebnisses für die Leiter kann man durch die angepasste Formel 5.2.3-1, für unendlich lange gerade Leiter, nach Biot und Savart ermitteln. [3] Dadurch, dass die Gleichung nur für unendlich lange Leiter gilt, entstehen Rechenungenauigkeiten die mit verlängerten Leitern ausgeglichen werden sollen. Weil mit längeren auch die Zuverlässigkeit des Ergebnisses steigt.

$$B = \mu_0 \frac{\sqrt{3}I}{2\pi} \frac{a}{r^2} \quad \mathbf{5.2.3.-1}$$

Im Abstand von 3 m beträgt der analytisch errechnete Wert von $B = 5,774 \mu\text{T}$. Mit einer Leiterlänge von 10 km kann dieser Wert fast erreicht werden, die Unstimmigkeit beträgt gerade mal 0,19%. Eine weitere Verlängerung würde nichts verändern. Um bei den Nachbildungen von Netzstationen nicht unnötig lange Stromschienen zu verwenden, kann aus der Tabelle A 5.2.3.-1 im Anhang der Wert von 50 m abgeleitet werden. Er bietet noch eine ausreichende Genauigkeit von 0,9%.

Aber in dieser Untersuchung ist eine neue Erkenntnis gemacht worden. Es wurde beobachtet, dass sich bei den kurzen Enden ein kleineres Feld einstellt, als bei dem analytisch gewonnenen. Um diesen Faktor näher zu betrachten, ist eine zweite Untersuchung gemacht worden. In der Realität sind solche Fehler nicht möglich, da nur geschlossene Systeme einen Strom führen können.

Dafür wurde die Grundgleichung 4.2.-6 für einen Leiter zum Abstand r umgestellt.

$$r = \mu_0 \frac{I}{2\pi B} \quad \text{5.2.3.-2}$$

Mit der Annahme, dass die Flussdichte $B = 1\mu\text{T}$ ist, kann somit der zu erwartende Abstand berechnet werden.

Er beträgt für den einzelnen Leiter mit 1kA Belastung genau 200 m.

Für die gemessenen Werte in Abhängigkeit von der Leiterlänge sind allerdings erstaunliche Ergebnisse erbracht worden, siehe hierzu Tab. A 5.2.3.2.-1 im Anhang oder das Diagramm 5.2.3.-2.

Einwirkung der Länge eines Leiters auf das mag. Feld

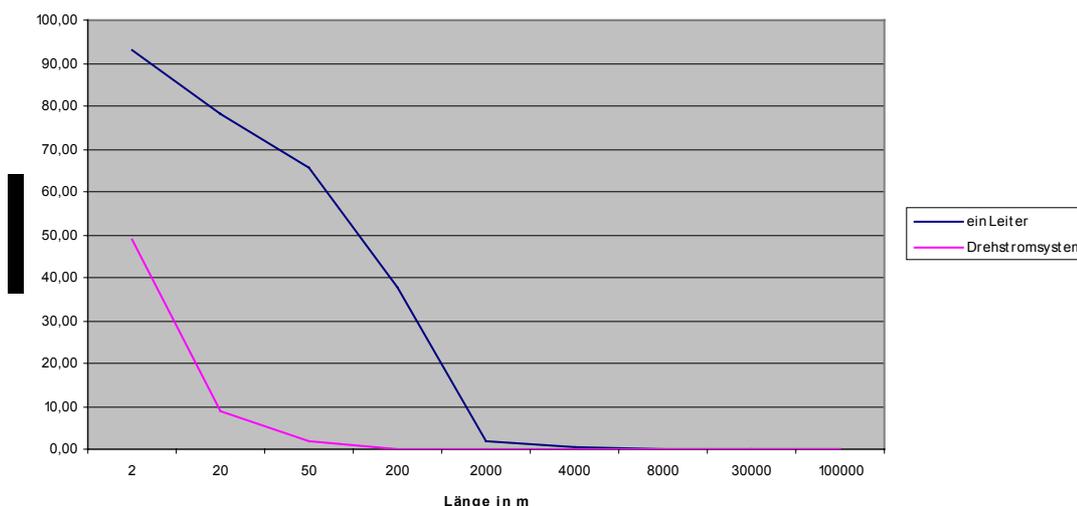


Diagramm 5.2.3.-2 Vergleich des Einflusses durch die Leiterlänge und Anzahl auf das mag. Feld

Die Ungenauigkeit der 2 m langen Leiter zu dem errechneten Wert ist mit 92,94 % so hoch, dass sich Fehler einstellen, die nichts mehr mit den realen Ergebnissen zu tun haben. Gebrauchsfähige Resultate kommen erst mit einer Länge von über vier Kilometern zustande, hier beträgt die Abweichung nur noch 0,48%. Weiter hinaus kann es bis zur genauen Übereinstimmung mit dem analytischen Wert gebracht werden.

Zur weiteren Verifizierung wurde nun aus der Gleichung 5.2.3.-1 nach dem Abstand r umgestellt. Mit dem Ergebnis der Gleichung 5.2.3.-3.

$$r = \sqrt{\mu_0 \frac{\sqrt{3}I}{2\pi} \frac{a}{B}} \quad \mathbf{5.2.3.-3}$$

Die schwerwiegenden Änderungen konnten in dem dritten Versuch nicht nochmals bestätigt werden. Eine gravierende Änderung tritt hier erst ab unter 20 m ein, siehe hierzu Tabelle A 5.2.3.-3 im Anhang und Diagramm 5.2.3.-2. Dies kann nur bedeuten das sich mit der Häufung von Leitungen der Fehler so stark verringert, dass es genügen würde die Leiter mit 200 m auslaufen zu lassen. Im zweiten Versuch betrug der Unterschied 37,5%, in der dritten Untersuchung nur noch 0,14%.

Die Bilanz kann insoweit gezogen werden, da es in den Niederspannungsverteilungen eine sehr hohe Häufung von Drehstromsystemen gibt, womit man ohne weiteres ein kürzeres Auslaufen der freien Leitungen annehmen könnte. Dies wird allerdings aus Sicherheitsgründen nicht gemacht, da manchmal auch vereinzelte Systeme auftreten können und der Fehler bei 200 m klein genug ist um diese Unsicherheit abzufangen.

5.2.4 Niederspannungsverteilungen

Niederspannungsverteilungen und Schaltschränke haben die Aufgabe, den Netzstrom an einen oder mehrere Abnehmer, wie Gebäudeinstallationen, Motorstromversorgung und/oder an Unterverteilungen weiterzureichen.

Ihrer Bestimmung zu folge benötigen sie spezifizierte Betriebsmittel, um dem zu entsprechen. In zahlreichen Betriebsmittelkombinationen werden Schütze, Messgeräte, Regel- und Steuereinrichtungen miteinander vereinigt.

Fast alle Niederspannungsschaltanlagen sind in der Norm DIN EN 60439-1 (VDE 0660 Teil 500) unter dem Begriff Niederspannungs- Schaltgerätekombinationen abgehandelt.

Aus dieser Norm werden nur die Grundlegendsten angeführt.

Mit der Schaltgerätekombination (SK) ist eine Zusammenfassung einer oder mehrerer Niederspannungsschaltgeräte mit den zugehörigen Betriebsmitteln zum Steuern, Messen, Melden und der Schutz- und der Regeleinrichtungen etc., unter Aufsicht der Hersteller gemeint. Diese können als typgeprüfte Niederspannungs- Schaltgerätekombinationen (TSK) oder partielle typgeprüfte Niederspannungs- Schaltgerätekombinationen (PTSK) ausgeliefert werden.

Bei der TSK handelt es sich um eine Schaltgerätekombination die ohne wesentliche Abweichungen vom genormten Grundtyp oder –system abweicht. Die PTSK besteht aus nicht genormten Bauteilen, die vor der Inbetriebnahme einer einzelnen Stückprüfung unterzogen werden müssen. Erst nach Bestehen der Prüfung ist dessen Einsatz normgerecht.

Die Unterteilung in PTSK und TSK bedeutet nicht eine Einteilung in Qualitätsgruppen, sie sind gleichwertig. [9]

Für genauere Informationen ist die in dem Literaturverzeichnis aufgeführte Diplomarbeit des Herren Faesing [4] oder andere einschlägige Literatur wie z.B. [9] zu verwenden.

Bei Untersuchungen einzelner Verteilungen, konnte man eine Abweichung der Feldkonturen zwischen den berechneten und den zu erwartenden feststellen, siehe [3]. Um dies zu verbessern hat Herr Kupke eine Veränderung so realisiert, dass eine Ausdehnung der Niederspannungsanschlüsse das Feldbild optimiert. Da wir in einem noch größeren Anschauungsbereich arbeiten, ist dies nicht mehr ausreichend.

Um das analytisch erstellte Feld den realen Feldern anzupassen, musste einleitend geklärt werden, worauf diese Unsymmetrie beruhte. Durch den vorhergehenden Abschnitt konnte man leicht den Randeffect als Fehlerquelle verifizieren. Deshalb ist es nötig, die freien Einspeisungen und Abgänge zu verlängern.

Die nachfolgenden Bilder verdeutlichen die einzelnen Schritte.

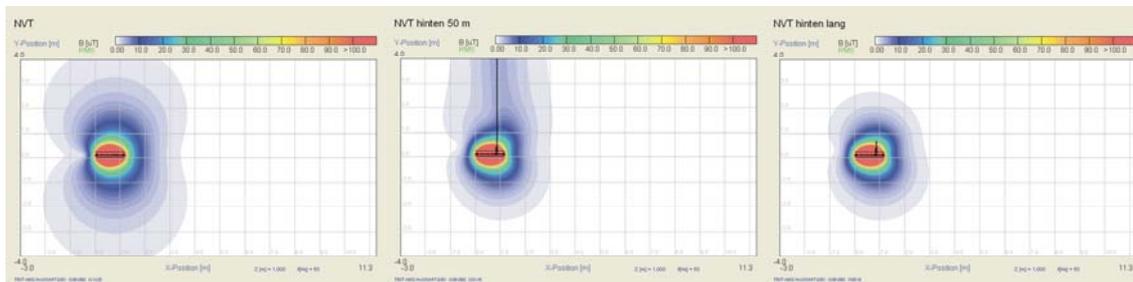


Bild 5.2.4.-1

Bild 5.2.4.-2

Bild 5.2.4.-3

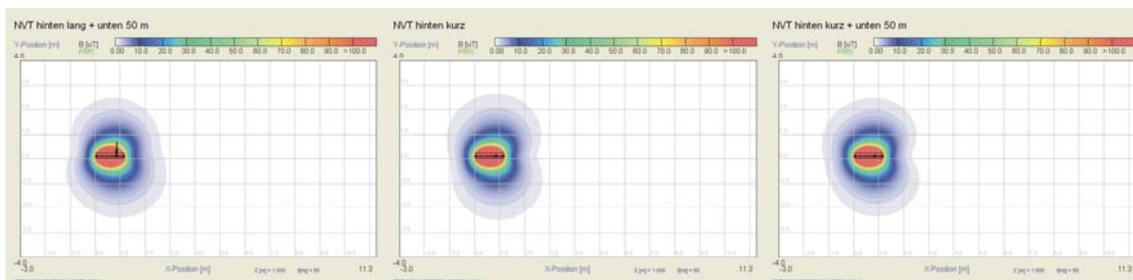


Bild 5.2.4.-4

Bild 5.2.4.-5

Bild 5.2.4.-6

Darstellung der mag. Flussdichteverteilung mit schrittweiser Veränderung der Anschlüsse einer NVT von oben.

Nach dem Bild 5.2.4.-1 ist das „normale Feld“ der NVT einer Erdnuss ähnlich. Aber eine weit entfernte Betrachtung des magnetischen Feldes müsste sich einem Kreis annähern, was hier nicht der Fall ist. Für eine Verbesserung sind nun schrittweise Änderungen durch den Anschluss mit unterschiedlich langen kompensierten Leitern an der Einspeisung und die einfache Verlängerung der Abgänge durchgeführt worden.

Es erfolgte im ersten Schritt eine Verlängerung der Einspeisekabel um 50 m, was das Feld nach unten verkleinerte aber dennoch eine Optimierung durch die hohen Ströme der ankommenden Kabel verhindert. Dies konnte durch eine Verkürzung der Kabel erreicht werden, Bild (5.2.4.-3).

Eine Erweiterung, wie die von Herrn Kupke um 200 m, ist nicht nötig, da hier die Einspeisungsleitung das Feld maßgeblich bestimmt. Die Ausbauung der Anschlüsse um 50 m reicht aus.

Damit sich das Feldbild noch mehr dem Idealfall annähert, sind die Einspeisekabel auf ein Minimum reduziert.

Für weitere Analysen ist festzuhalten, dass die NVT die bestmögliche Feldform dann erreicht, wenn die Abgangskabel um 50 m verlängert und die Einspeisekabel nach der ersten Phasenkreuzung ausgeführt sind. Siehe hierzu Bild 5.2.4.-6.

Weiterhin ist ein gegensätzlicher Trend der Feldgröße zu beobachten. Mit der erweiterten Längenausdehnung der Abgangskabel verringert sich das Feld, was im umgekehrten Verhältnis, wie die der in dem vorherigen Abschnitt gemachten Erkenntnisse, steht.

Zur Verbesserung der Niederspannungsschaltfelder werden nun einzelne konstruktive Maßnahmen nacheinander durchgeführt. Die in diesem Abschnitt erbrachten Erkenntnisse werden in dieser Untersuchung mit einfließen.

Durch die Diplomarbeit des Herren Faesing sind schon folgende Erkenntnisse über die Verbesserung der Niederspannungsverteilung eröffnet worden.

1. Die Einspeisung wird in die Mitte der NVT verlegt
2. Es sollte eine gleichmäßige Auslastung der Abgänge erfolgen.
3. Halbierung mit rückseitiger Aneinanderstellung der NVTs ist förderlich.
4. Und eine zusätzliche Phasenoptimierung des Punktes 3.

Diese Verbesserungen konnten sich in einer kurzen Reproduktion der Untersuchung bestätigen lassen.

Da man die NISV – Grenzen nur schwer erreichen kann, ist hier eine Anwendung aller vier Punkte erforderlich.

Bei einigen Verteilungen zeigte sich eine symmetrische Aufteilung der Abgänge als nicht möglich. Die Zahl der Abnahmeeinrichtungen ist hier ungerade und somit nicht korrekt verteilbar. Diesem Umstand zu folge ist eine weitere Untersuchung angesetzt worden. Das Ziel ist eine optimale Lösung hierfür zu finden. Um dies zu bewerkstelligen ist ein Grundmodell nach den Kriterien von Faesing erstellt worden. Es besitzt zehn Abgänge mit jeweils 80 A Strom und demzufolge eine Einspeisung mit 800 A, Bild 5.2.4.-7.

Grundmodell

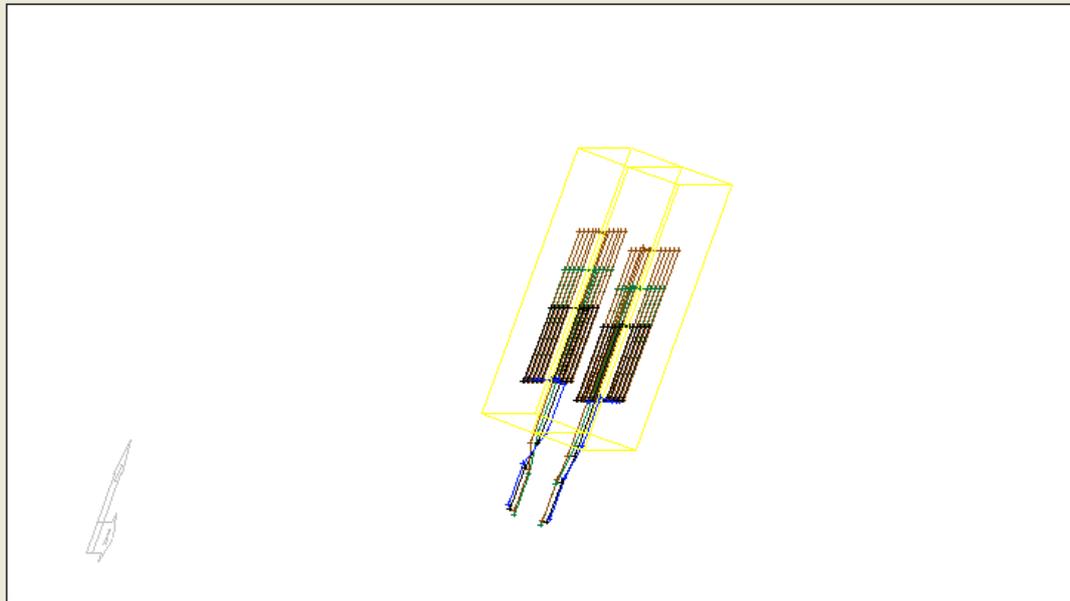


Bild 5.2.4.-7 3D Ansicht einer verbesserten NVT

Nun wurde das Grundmodell verändert. In den ersten Versionen ist ein Test für eine ungleichmäßige Belastung bei konstanter Abgangsanzahl gemacht worden. Hierzu belegte man die Einspeisung der zwei Lastträger links und zwei Lastträger rechts mit nur 40 A, zudem auch links außen und rechts innen und umgekehrt.

Weiter ist die Belastung von einer Seite mit zwei, mit um die Hälfte reduzierten, Strömen untersucht worden.

Als letztes ergab sich eine Änderung an einer Seite mit vier und zusätzlich für die hintere Hälfte der NVT mit nur drei Schienensystemen.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle A 5.2.4.-1 im Anhang zu sehen.

Bei der ersten Anordnung ergab sich die Variante, dass sich die beiden verringerten Abgänge links und rechts außen befinden müssen. Oben und unten ergab sich eine Verschlechterung des Feldes, im Vergleich zur Originalanordnung, von 0,7% und 1%.

Im zweiten Versuch muss je nach der zu verringernden Seite für die Anordnung gewählt werden. Denn eine Verbesserung auf der einen Seite bringt eine Verschlechterung auf der anderen. Deshalb ist nur ein Fall spezifische Anwendung denkbar.

In der letzten Untersuchung konnte man feststellen, dass sich bei einer ungleichen Anzahl von Abgängen das Feld insgesamt verringert, da auch ein Teil des Stromes fehlt. Zum zweiten ist die Variante der Anordnung zu wählen, die innen keine Schienensysteme haben, dies entspräche dem Fall links/rechts, innen fehlt (Tab. A 5.2.4.-1). Damit kann man immer ein verbessertes Feldbild erzeugen. Es kann von einer Besserung von maximal 21 % und im schlechtesten Fall 2 % betragen.

Aus den Versuchen kann nun die Schlussfolgerung gezogen werden, dass sich bei reduzierten Strömen eine Verlagerung nach außen bezahlt macht, und fehlende Abgänge innen sein müssten.

Mit den bestimmten Eigenschaften die im Vorfeld ermittelt wurden, konnten nun die gesamten Niederspannungsverteilungen einer Optimierung unterzogen werden. Die gesamten Ergebnisse und Messwerte sind im Anhang in den Tabellen A 5.2.4-2 bis A 5.2.4.-6 aufgeführt.

Daraus geht eindeutig eine Verbesserung des Feldes der NVTs hervor. Dies ist ohne Ausnahme und mit einigen Unterschreitungen des Grenzwertes anzugeben. Alle Werte beziehen sich auf die Entfernung, wo die magnetische Flussdichte von $0,999 \mu\text{T}$ eingehalten wird.

Zur Veranschaulichung ist die NVT 8 mit der normalen Anordnung und mit verbesserter Anordnung in den Bildern 5.2.4.-8 bis 5.2.4.-11 dargestellt.

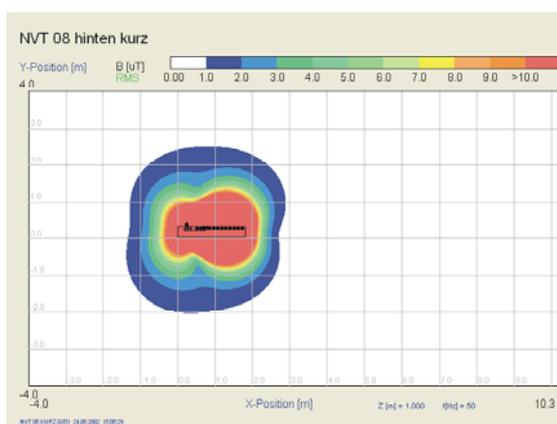


Bild 5.2.4.-8

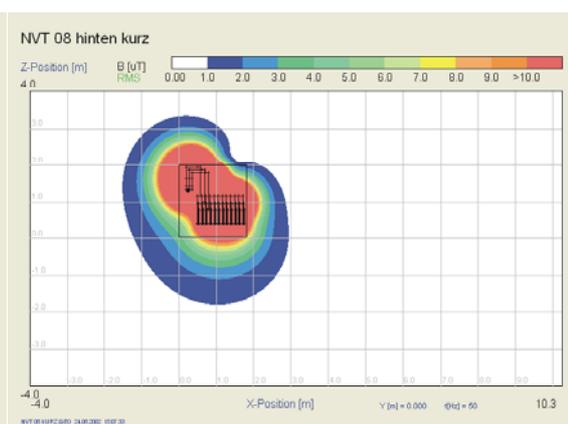


Bild 5.2.4.-9

Flussdichteverteilung der NVT 8 von oben und von der Seite

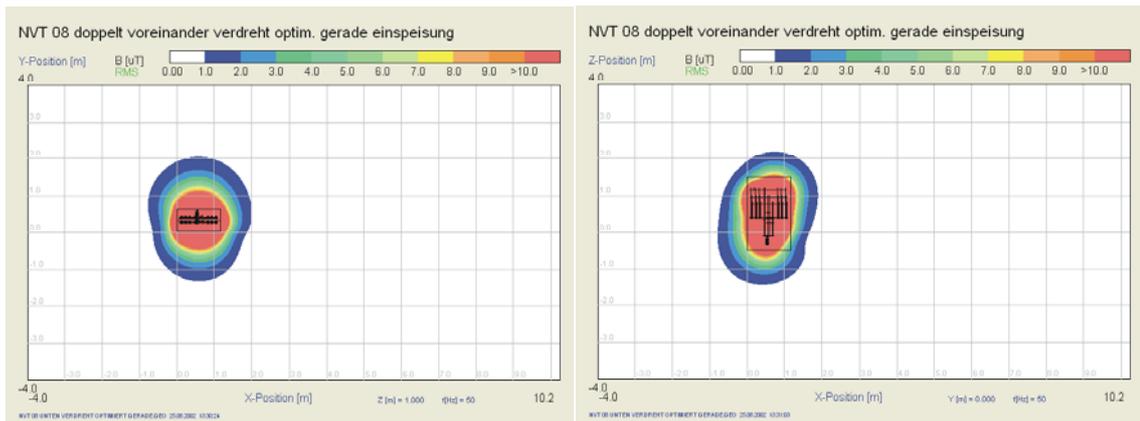


Bild 5.2.4.-10

Bild 5.2.4.-11

Flussdichteverteilung verbesserten der NVT 8 von oben und von der Seite

Die Niederspannungsverteilung 8 kann als Referenz für alle anderen Verteilungen dienen.

Bei der Verbesserung wurde Niederspannungsverteilung halbiert und rückseitig aneinander gestellt. Die Einspeisung ist in die Mitte der halbierten Verteilung gelegt und die Sammelschienensystems der halbierten Verteilungen zueinander optimiert worden.

Mit Feldminderungen von bis zu 73 % (zum Gesamtenfeld) ist der Einsatz der verbesserten Verteilung von entscheidendem Wert. Das soll heißen, dass sich der Anlagengrenzwert um 73 % näher an der NVT befindet als vorher.

prozentuale Verbesserung zum Gesamtfeld

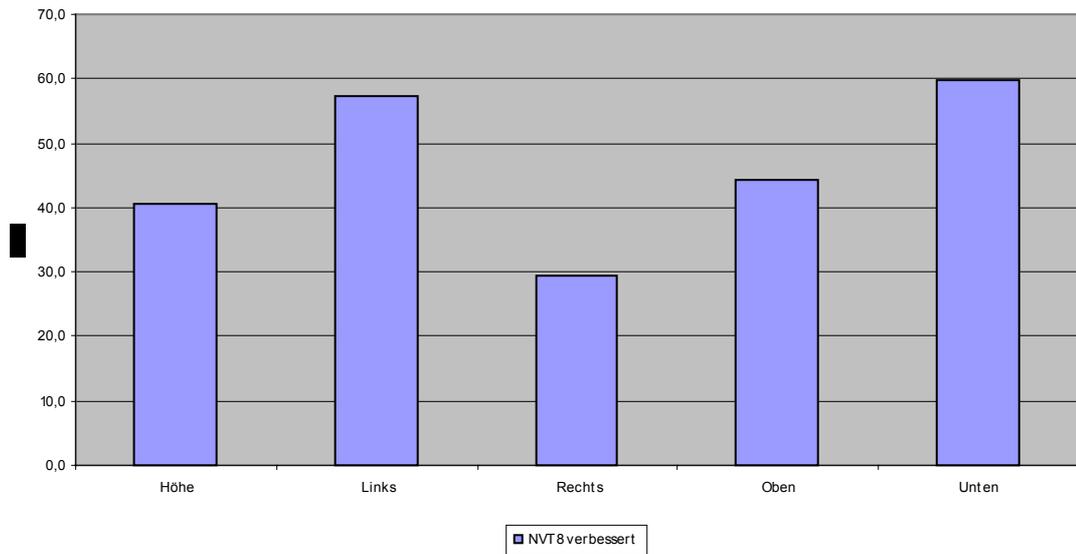


Diagramm 5.4.2.-1 Prozentuale Verbesserung der NVT 8 zum normalen Feld

Entfernungsüberschreitung des Grenzwertes

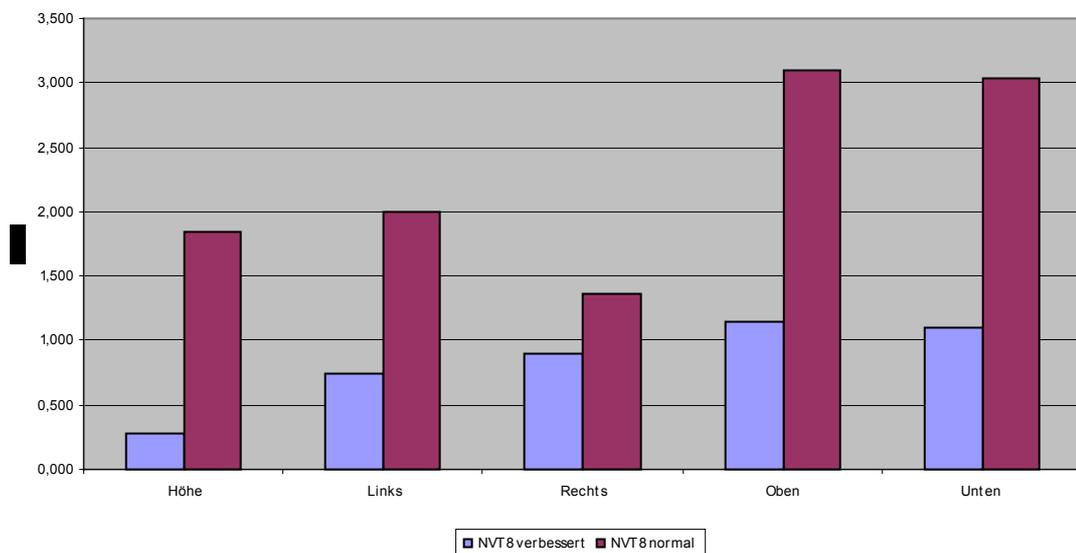


Diagramm 5.2.4.-2 Überschreitung der Grenzwerte der NISV bei der NVT 8

Das Diagramm 5.2.4.-2 verdeutlicht, um wie viel Meter der AGW Grenzwert überschritten wird. Bei der verbesserten NVT zeigt sich sogar vereinzelt ein Unterschreiten des Grenzwertes. Deshalb ist eine Schirmung vom jetzigen Standpunkt aus unabdingbar, wie in den späteren Abschnitten 6.2.4. dargelegt.

5.2.5 Starkstromverbindungen

In den Stationen konnte ein starker Einfluss der elektrisch leitenden Verbindungen auf das mag. Feld nachgewiesen werden, was zu einer näheren Betrachtung dieser Verbindungen führte.

Die Leiter sind für den Transport des Stromes von einem Anlagenteil zum nächsten, zu den Verbrauchern aber auch zur Station selbst verantwortlich. Dabei ist die Höhe des zu leitenden Stromes für die magnetische Flussdichte von erhöhter Bedeutung. Um diesen Einfluss zu mindern, ist in der nachfolgenden Untersuchung ein Optimierungsversuch unternommen worden.

Dazu splittete man ein Dreidrehstromsystem mit drei Kabeln zu ein Dreidrehstromsystem mit sechs Kabeln auf. Im nächsten Schritt verschob man die Phasen solange bis es ein Optimum der Anordnung ergab. Zur näheren Erläuterung der Phasenbelegung ist das Bild 5.2.5.-1, mit einem sechs Leiter (Doppel-) System gedacht.

Die Bedeutungen sind:

1	0°
2	120°
3	240°

Zum testen kam ein Drehstromsystem mit einem Strom von 1kA zum Einsatz. Bei den weiteren Tests führen die sechs Leiter je 0,5 A um die gleiche Leistung aufrechtzuerhalten. Dabei waren auch hier alle Leiter 0,15 m (von Mitte zu Mitte) voneinander entfernt und 20 Km lang. Der Messpunkt liegt bei $y = 0$, was der Mitte der Anordnung von 10 Km gleich zusetzen ist.

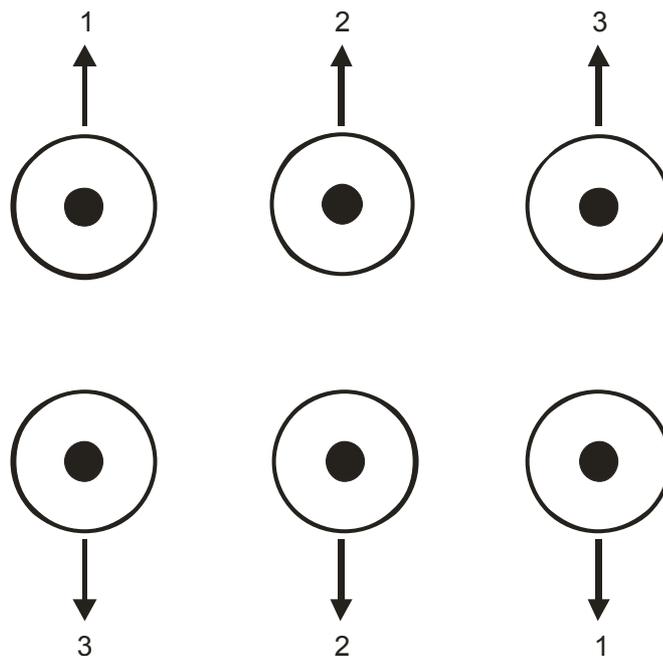


Bild 5.2.5.-1 Phasenbelegung der Leiter ($1=0^\circ$; $2 = 120^\circ$; $3= 240^\circ$)

In der Tab. A 5.2.5.-1 sind die Messergebnisse der Berechnung für die Unterschreitung des Anlagengrenzwertes in Abhängigkeit der Entfernung dargestellt. Man kann aus der Tabelle erkennen, dass sich die optimale Phasenordnung durch die am Rand befindlichen inversen und in der Mitte die gleiche Phase ist (123 ersten drei Leiter, 321 die zweiten drei Leiter).

Das nachfolgende Bild veranschaulicht die Verbesserung vom normalen einfachen System zum verbesserten Phasendoppelsystem. Die Optimierung verringert die Entfernung bis zum Einhalten des Grenzwertes um ein Drittel, von vormals sieben Metern auf zwei Meter. Damit fehlen noch rund 1,9 m bis die $1\mu\text{T}$ Feldstärke eingehalten wird. Da die Kabel nicht so tief verlegt werden, entsteht durch diesen Sachverhalt noch ein Untersuchungsbedarf.

Phasenoptimierung an Kabeln

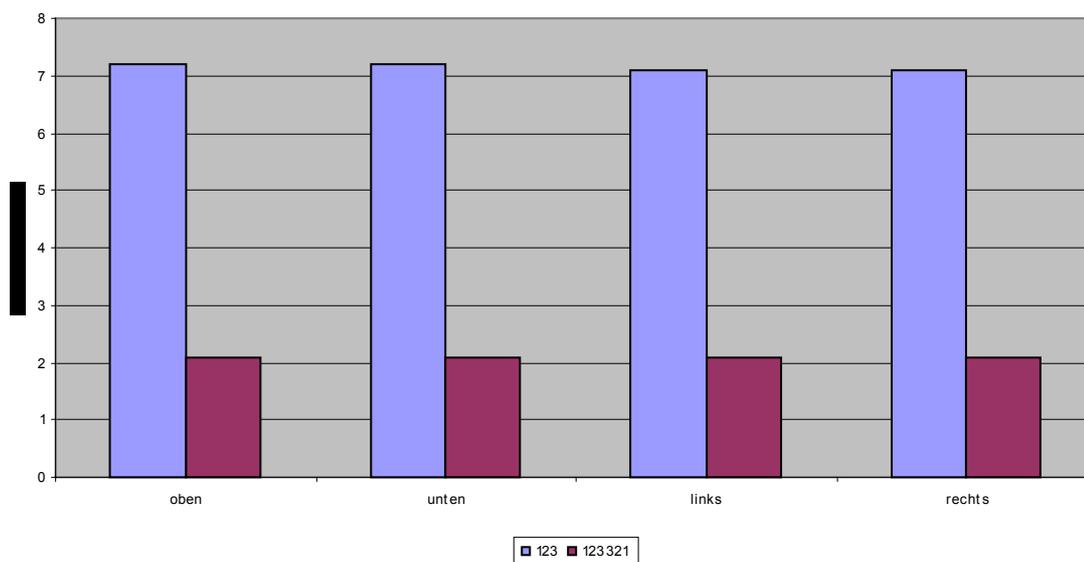


Diagramm 5.2.5.-1 Vergleich der Phasenoptimierung zwischen dem einfachen Drehstromsystem und einem sechsfach System.

Für die Verringerung des Feldes kann also eine phasenoptimierte Doppelverlegung verwendet werden. Diese muss aber bis an die Anschlüsse des Gerätes heranführen, um die beste Wirkung zu erzielen. Eine Erweiterung auf noch mehr Kabel macht schon durch die Probleme des Anschlusses, sowie durch den erhöhten Aufwand bei der Verlegung keinen Sinn. Deshalb ist eine Lösung durch Schirmung noch in Betracht zu ziehen.

5.2.6 Transformatoren

Transformatoren werden aus den Gebieten Ausführung, Bauart und Verwendungszweck ausgewählt. Dabei kann bei der Ausführung zwischen den Leistungs- (LT), Spar-(SpT) und Zusatztransformatoren(ZT) gewählt werden. Der LT oder auch Vollasttransformator kennzeichnet sich durch eine rein induktive Leistungsübertragung mit galvanisch getrennten Systemen aus. Der ZT hat die gleichen Eigenschaften wie der LT, zusätzlich aber eine in Reihe geschaltete Wicklung, um dessen Spannung zu ändern. Beim SpT sind die Leitungsenden leitend miteinander verbunden, die Energieübertragung findet teils leitend, teils induktiv statt.

Bei den Bauarten wird eine Einteilung nach Klassen unternommen. Im einzelnen gibt es die Klasse A: Trockentransformatoren, Klasse B: Öltransformatoren und die Klasse K, die fast den selben Aufbau wie die Öltransformatoren aber eine synthetische Flüssigkeit mit Brennpunkt über 300⁰C zum isolieren und kühlen besitzt.

Im letzten Gebiet gibt es vier verschiedene Unterteilungen. In der ersten sind Transformatoren für die Energieversorgung enthalten. Für Industrietransformatoren gibt es die Gruppe zwei. Bei drei und vier handelt es sich um Bahn- und Sondertransformatoren. Netzstationen bedienen sich meist der Energieversorgungs-, Leistungstransformatoren der Klasse B. [9]

Die Transformatoren (Umspanner) sind in der Station für die Herabtransformation der Spannung verantwortlich. Sie übertragen Energie von System eins zu System zwei. Dabei stellt sich niederspannungsseitig (Abnahmeseite) ein hoher Strom ein, der ein starkes Magnetfeld mit sich bringt. Das Feld ist nicht so bedeutend wie das der Niederspannungsverteilung, da sich das Feld mit $1/r^3$ vom Umspanner aus verringert. Trotzdem ist es für das Gesamtfeld von so großer Bedeutung, dass sich eine Untersuchung anbietet.

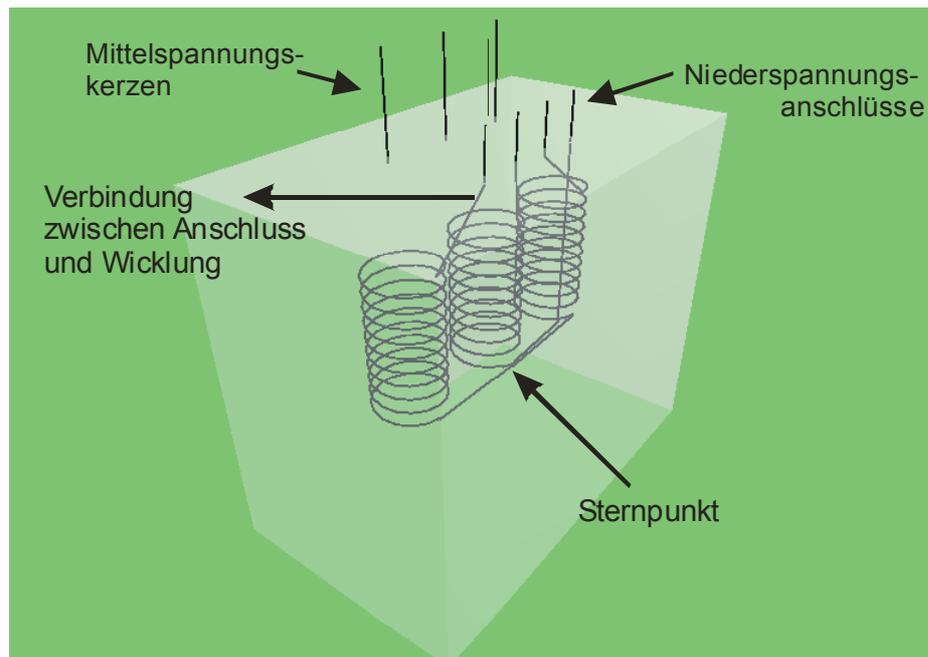


Bild 5.2.6.-1 Transformator in 3D Ansicht, wie er in der Software verwendet wird.

Der in dem Bild 5.2.6.-1 gezeigte Transformator besitzt in der Simulation nur die Niederspannungswicklungen, um den Einfluss der Spulen zum Feld deutlich zu machen, weil hier die höheren Ströme auftreten. In der Realität wird das Streufeld aber von den Mittelspannungswicklungen erzeugt, da die Niederspannungswicklungen von den Spulen der MS – Seite eingeschlossen sind.

Als erstes musste man in der Simulation für den Transformator ein verbessertes Feldbild erzeugen, da bei der Einzelbetrachtung ein unnatürlich verzerrtes Feld entstand. Siehe hierzu Bild 5.2.6.-2 und 5.2.6.-3.

Die Messhöhe betrug für die Draufsicht $Z = 1 \text{ m}$ und für die Frontansicht $Y = 0 \text{ m}$ ab der Gehäuseoberfläche.

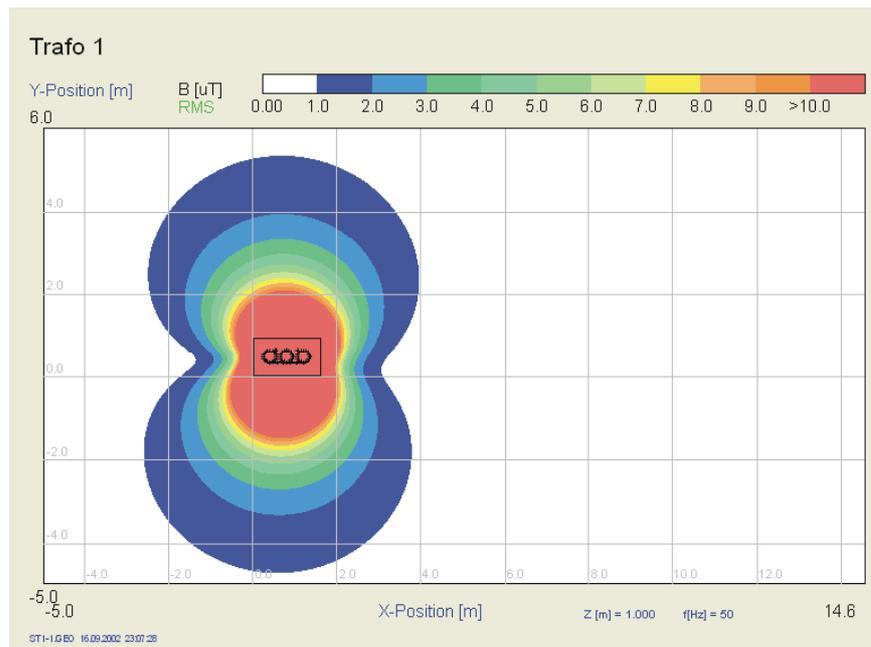


Bild 5.2.6.-2 Felddarstellung eines Transformators von oben

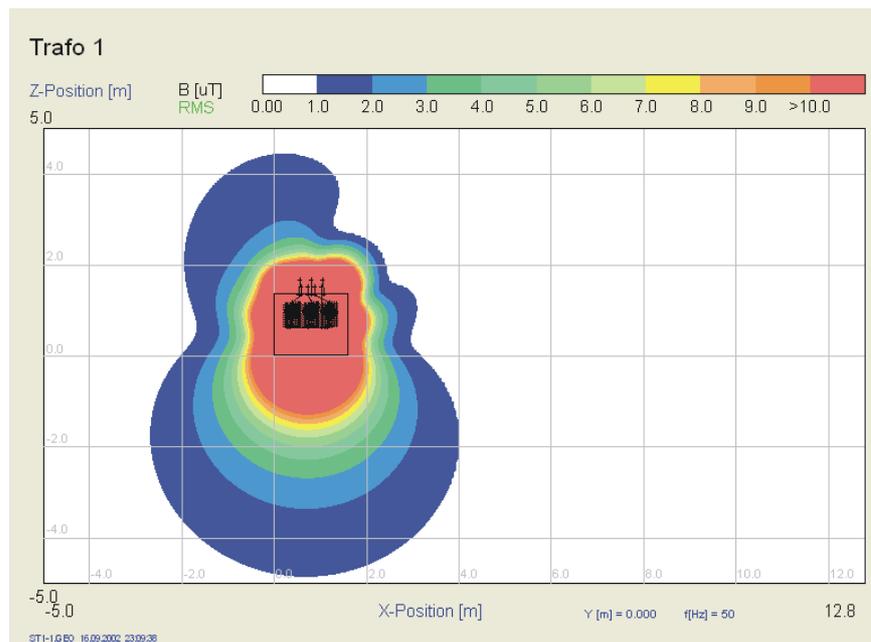


Bild 5.2.6-3 Felddarstellung eines Transformators von der Seite

Es wurde nun stufenweise eine Veränderung an den Kabelanschlüssen des Umspanners vorgenommen.

Im ersten Schritt ist der Einfluss der Leiterlänge für den Anschluss verdeutlicht dargestellt.

Im zweiten fand eine Umgestaltung der Transformatorkerzenanschlüsse statt. Die Veränderung vollzog sich so, dass zuerst die Querverbindungen zu den

Spulenden (Sternpunkt), danach die Verbindungen (von den Wicklungen) oben und dann beide entfernt wurden, siehe Bild 5.2.6.1. Dies ergab zunächst eine Verschlechterung des Feldes. Aber durch den vorher bekannten Randeffekt konnte noch ein Schritt weiter gegangen werden. Die Niederspannungsanschlüsse sind am Ende, im Abstand von jeweils 5mm, mit den gleichen Leistungsmerkmalen (Strom, Phase und Spannung) zwei Querverbindungen belegt, wie in Bild 5.2.6.-4 darlegt.

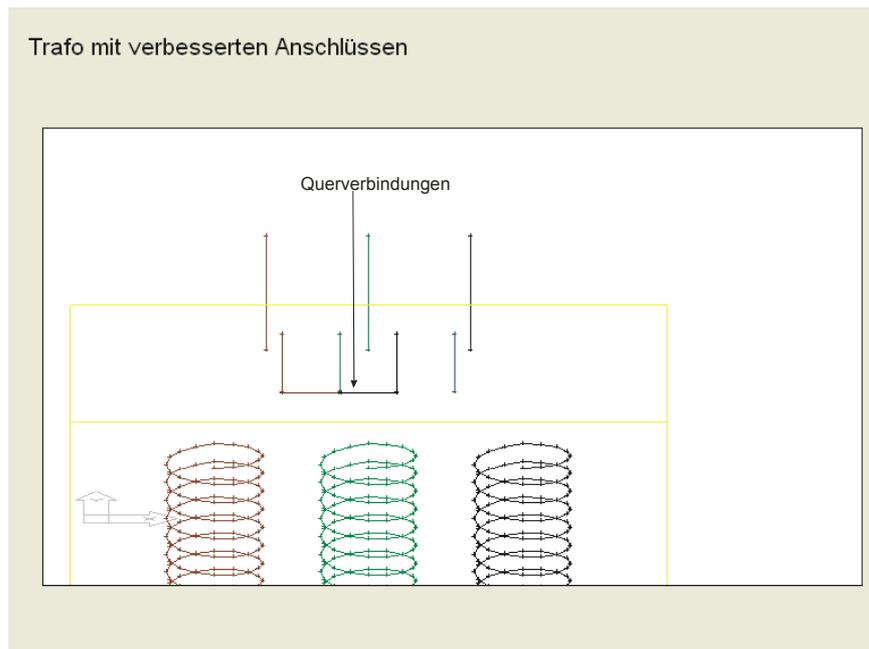


Bild 5.2.6.-4 3D Ansicht eines verbesserten Transformators, mit Queranschlüssen an der Niederspannungsseite

Mit den Bildern 5.2.6.-5 bis 5.2.6.-12 sind die Maßnahmen und ihre Effekte verdeutlicht. Es genügt hier die Ansicht von Oben, um ein ausreichend klares Bild zu erhalten.

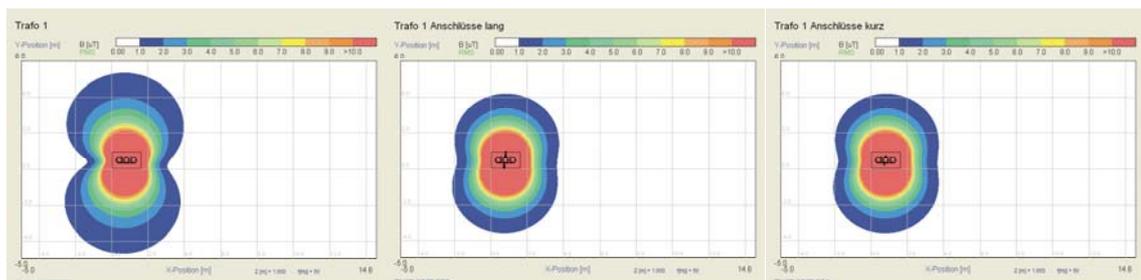


Bild 5.2.6.-5

Bild 5.2.6.-6

Bild 5.2.6.-7

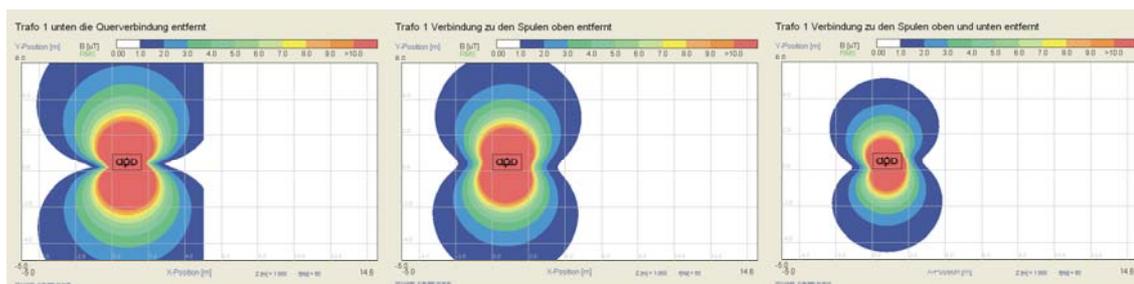


Bild 5.2.6.-8

Bild 5.2.6.-9

Bild 5.2.6.-10

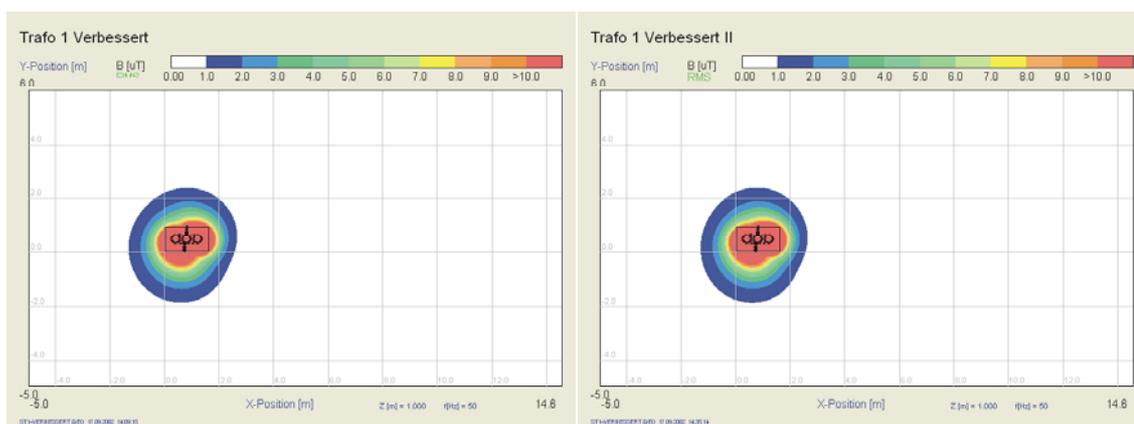


Bild 5.2.6.-11

Bild 5.2.6.-12

Darstellung der Schrittweisen Verbesserung des Transformatorfeldes mit Hilfe von Konstruktivenänderungen, Bild 5.2.6.-5 bis Bild 5.2.6.-11.

Die ersten drei Bilder 5.2.6.-5 bis 5.2.6.-7 lassen erkennen, dass bei den Anschlüssen der Kabel ein starker Einfluss vorliegt. Das bessere Feld ergibt sich bei denen mit Leiter, wobei die Länge eine untergeordnete Rolle spielt. Es genügt den Trafo mit kurzen Kabeln nachzubilden, da sich mit einer Verlängerung keine wesentliche Besserung des ovalen Feldzustandes zeigt und auch die Rechenzeit verlängert. Siehe Tabelle A 5.2.6.-1.

Mit dieser Erkenntnis wurden die weiteren Analysen des Trafos versehen.

In der nächsten Versuchsreihe, siehe Bilder 5.2.6.-8 bis 5.2.6.-10, ist die oben schon angeführte schrittweise Entfernung der Verbindungen zwischen den Spulen und zwischen den Spulen und den Anschlüssen verfolgt worden. Durch die fehlenden Verknüpfungen traten extreme Änderungen der Feldverhältnisse und deren Größe auf. Damit lässt sich beweisen, dass die Feldverzerrungen von diesen Verbindungen erzeugt werden und sich gleichzeitig zum Teil kompensieren. Deshalb sind sie entfernt worden, um dann die Kerzennachbildungen mittels Querverbindungen zu verbessern, damit wie in Abschnitt 5.1.2. beschrieben eine Leiterschleife erzeugt wird, was auch zum gewünschten Erfolg führte. Dies machen die Bilder 5.2.6.-11, 5.2.6.-12 und die Tabelle A 5.2.6.-1 deutlich.

Insgesamt ist eine Feldverkleinerung schon mit einer verbesserten Simulation des Umspanners eingetreten. Dabei ist es von unerheblichen Wert ob zwei zusätzliche Querverbindungen mittelspannungsseitig vorhanden sind. Für Berechnungen ist ein Anbringen von Verbindungen auf der Niederspannungsseite ausreichend, da hier die höchsten Ströme entstehen. In der Höhe ergibt sich damit eine Feldminderung von 21,5%. Oben, unten, links und rechts sind es jeweils 55%; 60,5%; 48,5% und 33%. Dieser Erfolg ist auf die Aufhebung des Randeffectes (Abschnitt 5.1.2.) zurückzuführen. Hierbei ist es zu einer Annäherung, zu einem geschlossenen System gekommen, was diesen Effekt nicht aufweist.

Damit wird für nachfolgende Analysen der Transformator mit Verbindungen der NS-Seite und kurzen Kabelanschlüssen verwendet.

Der nächste Versuch beschäftigte sich mit dem Einfluss der Spulen. Da sie nicht so hohe Ströme, rund 25mal kleiner als die der Niederspannungsseite des Umspanners führen, ist ihnen kein großer Einfluss zugeschrieben. Im Vergleich sind alle Umspanner nochmals, aber ohne Spulen, berechnet worden; Tabelle A 5.2.6.-2.

Da es erhebliche Differenzen zwischen der linken Seite von fast 25 % zur normalen und rechts immer hin noch 17 % zu normal gibt, ist trotz erheblicher Zeiteinsparung von einem Weglassen der Spulen abzusehen.

5.2.6.1 EMV Transformatoren

Die Verbesserungen nach Abschnitt 5.2.6. können nun für einen 630 KVA – 20 KV – 4 % Öl angewendet werden, um das von ihm erzeugte Feld zu berechnen. Weiter wird nun dieser Transformator zu einem EMV reduzierten Umspanner umgebaut, um das von ihm erzeugte Feld zu minimieren. Zu diesem Zweck sind die Maße der Informationsbroschüre der Firma Rauscher und Stoecklin für diesen Transformatortyp entnommen worden.

Die Basisveränderung dieses EMV Umspanners besteht in der Verlegung der Transformatorkerzen von Oben nach unten, um eine Minimierung des Feldes in der Höhe zu erreichen. Zweitens können dadurch die Niederspannungsanschlüsse im Dreieck angeordnet werden, um eine gegenseitige Kompensation zu erreichen.

Bei den Messwerten muss allerdings beachtet werden, dass sich bei normalen Umspannern die Messhöhe um die Kerzengröße erweitert, da immer ab dem Gehäuseende gemessen wird. Außerdem würde die Messung genau neben einem Leiter erfolgen und diese verfälschen. Es kommt zu einem Höhenunterschied von 0,14 m.

Eine Gegenüberstellung der beiden Transformatoren ist auf der nächsten Seite in Tab. 5.2.6.1.-1 zu sehen.

alle Werte in μT					
	Trafo normal	Trafo normal	Trafo normal	EMV Trafo	EMV Trafo
	0,2 über Gehäuse	0,2 über Kerzen	0,55 ü. Kerzen	0,2	0,55
Höhe	522,037	11,811	6,913	10,471	5,363
oben	12,62	12,62	5,473	9,196	5,394
unten	27,707	27,707	18,271	20,477	14,865
links	12,413	12,413	5,3	10,308	4,728
rechts	12,378	12,378	4,162	10,978	4,154
alle Werte in %; im Vergleich zum normalen Trafo in der Messhöhe 0,2 m					
Höhe	-	0,0	41,5	11,3	54,6
oben	-	0,0	56,6	27,1	57,3
unten	-	0,0	34,1	26,1	46,3
links	-	0,0	57,3	17,0	61,9
rechts	-	0,0	66,4	11,3	66,4

Tabelle 5.2.6.1.-1 Gegenüberstellung des EMV Transformatoren zum normalen Umspanner

Aus der Tabelle geht eine Besserung durch den EMV optimierten Trafo hervor. Durch den versetzten Messpunkt ist dies auf den ersten Blick jedoch nicht so eindeutig. Deshalb wurde zusätzlich die Messhöhe vom Gehäuse des normalen Transformators hinzugenommen.

Schon durch eine Erhöhung des Messpunktes um 0,35 m verringert sich bei der Anwendung eines normalen Umspanners das Feld zwischen 34,1 % und 66 %. Trotzdem kann mit einem EMV reduzierten Gerät eine Verbesserung von nochmals 13 % in derselben Höhe erreicht werden.

Die Anwendung eines EMV Transformators ist durch eine Verbesserung von 11,3 % bei 0,2 m Messhöhe und auch durch die anderen ermittelten Werte empfehlenswert. Des weiteren ist es von großem Vorteil, dass dieser Wert bei einer geringeren Höhe erreicht wurde und somit sind noch Reserven vorhanden. Aber auch hier können die Anlagengrenzwerte noch nicht eingehalten werden.

Aus diesem Grund erfolgt eine Untersuchung der Schirmmöglichkeit in den nächsten Abschnitten 6.2.5.

5.3 Mittelspannungseinspeisefelder

Zu dieser Bezeichnung gehören Schaltanlagen über 1KV und kleiner gleich 52 KV. Gleichzeitig werden sie unter den Bestimmungen der DIN EN 60298 oder DIN VDE 0101 begriffsbestimmt. Schaltfelder solcher Art werden mit festgelegten Mindestabständen gegenüber spannungsführenden und geerdeten Teilen aufgestellt. Durch eine geschickte Umformung und den Einsatz von Isoliermitteln ist eine Verringerung der Mindestabstände mit einer Prüfung in diesem Bereich, geprüfte Anschlusszone, erlaubt. Bei metallgekapselten Schaltfeldern kommen in der Regel typgeprüfte Schaltanlagen zum Einsatz, mittels Prototyp. [9]

Die Anwendung dieser Schaltanlagen beschränkt sich auf die Trennung oder die Hinzuschaltung der Netzstationen zum übergeordneten Netz.

Da diese Anlagenteile über große Abstände zu den einzelnen geerdeten, spannungsführenden Teilen und auch zum Personenschutz verfügen muss, ist hier eine Umgestaltung und Optimierung nur sehr schwer möglich. Außerdem besitzt der Anlagenteil nicht den Stellenwert wie der Transformator, Kabeln oder die Niederspannungsverteilung für das magnetische Feld. Die Abgänge der MVT sind mit rund 20 A für das magnetische Feld von einer untergeordneten Priorität. Als einfacher und effektiver kann auch hier wieder die Schirmung des Anlagenteils angenommen werden. Weitergehende Informationen sind im Abschnitt Schirmung für MVT angeführt.

6 Optimierungsmaßnahmen an Netzstationen

6.1 Standortverlegung

Eine Standortverlegung ist bei alten wie bei neuen Anlagen schwer. In den älteren kann man vereinzelt die Niederspannungsverteilung und Mittelspannungseinspeisefelder verlegen, da meist großzügig dimensioniert wurde und noch Platz vorhanden ist. Es dürfen aber keine Sicherheitsabstände zu Wänden oder anderen Anlagenteilen verletzt werden. Dies schränkt die Möglichkeiten beträchtlich ein. Kabel hingegen kann man fast immer verlegen, da diese keinen großen Bestimmungen unterliegen oder Platzbedarf haben. Beim Transformator ist Standortverlegung meist ausgeschlossen, weil die Transformatorräume großes Gewicht aufnehmen müssen, eine extra Belüftungsanlage benötigen und speziellen Brandschutzgesetzen unterliegen. Der Transformator austausch muss gewährleistet sein und meist eine in den Boden eingelassene Ölauffangwanne besitzen.

Neue Anlagen sind meist kompakte Stationen, die auf engstem Raum alles miteinander vereinen und damit keinen Platz für Verlegungen jeglicher Art bieten.

Die Standortverlegung verschafft aber nicht den Nutzen wie sie mit der Umgestaltung oder der Abschirmung denkbar ist. Eine Feldminderung ist in diesem Sinne nicht ausführbar, das Feld wird lediglich verschoben. Dieses Mittel kann, nur bei geringfügiger Überschreitung der Grenzwerte, Abhilfe schaffen.

Besser wäre hier eine Abgrenzung der Anlage durch Zäune. Damit würden größere Abstände erreicht werden, die das Einhalten der Grenzwerte zulassen, aber nur unter der Voraussetzung, dass der Standort dies gestattet.

Somit kommt das als letzte Eventualität in Frage, da sich mit der Optimierung im Abschnitt 5.2. und der Abschirmung, wie im nächsten Abschnitt 6.2. gezeigt, stärkere Verbesserungen erreichen lassen.

6.2 Abschirmung

In den ersten Analysen konnte man für jeden Anlagenteil eine Überschreitung der NIS – Anlagegrenzwerte, auch bei Optimierung feststellen. Dies zu beheben ist wahrscheinlich mittels Schirmung möglich. Für die Prüfung der Eventualität des Sachverhaltes ist dieses Kapitel gewidmet.

Um eine genaue Aussage treffen zu können, müssen verschiedene Materialien auf ihre Wirksamkeit und wirtschaftlichen Nutzen kontrolliert werden.

Da es unterschiedliche Verfahren bei der Lösung des Problems gibt, müssen zuerst die verschiedenen Verfahren erläutert und danach bewertet werden.

6.2.1 Grundlagen

Von physikalischen Gesichtspunkten gibt es zwei Methoden um eine Abschirmung zu ermöglichen, erstens das magnetische Gegenfeld und zweitens die magnetische Nebenschlüsse.

Zum Schirmen von Anlagen mit Hilfe des ersten Falles werden Gegenfelder von einem Gehäuse mit gut elektrisch leitfähigen (γ) Materialien erzeugt. Dabei wird in die Leiterschleife oder dem Schirm eine Spannung induziert, wobei in dem leitfähigen Schirmmaterial ein Stromfluss erzeugt wird, der dem erzeugenden Feld entgegenwirkt. Dieses Verfahren ist als Lenzscheregel bekannt. Das Prinzip des entgegenwirkenden Feldes, verursacht durch induzierte Wirbelströme, kommt nur bei sich schnell verändernden Feldern (HF) zu guten Ergebnissen. Siehe Abbildung 6.2.1.-1.

Im niederfrequenten Bereich sind wegen der unvermeidbaren ohmschen Verluste nur sehr schwache Wirkungen ausgebildet. Da im Gleichfeld keine Induktion vorhanden ist, erfolgt auch keine Schirmung. Die besten Arbeitsfrequenzen beginnen ab 1 KHz. [2]

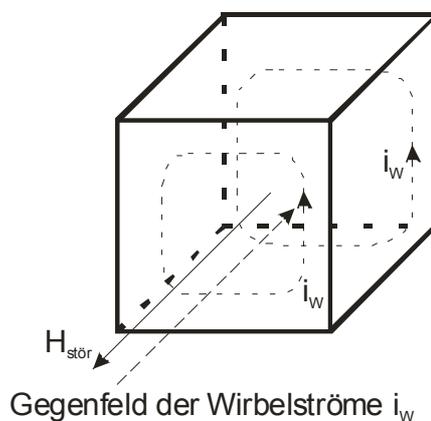


Abb. 6.2.1.-1 Wirkung der Gegenfeldschirmung eines Gehäuses durch Ausbildung von Wirbelströmen innerhalb des Gehäuses.

Zum Errechnen der Eindringtiefe spielen die Schirmeigenschaften, wie Schirmdicke, Schirmfrequenz und Leitfähigkeit eine Rolle. Wenn 63% absorbiert sind, ist dort die Eindringtiefe zuende.

Man kann sagen, dass die Schirmdämpfung eine Funktion der Leitschichtdicke (Eindringtiefe) (δ) und der Wandstärke (d) ist. Siehe dazu Bild in der Literatur [14] Seite 17.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad \mathbf{6.2.1.-1}$$

Aus der Gleichung lässt sich schließen, dass sich mit steigender Frequenz oder auch mit Erhöhung der Permeabilität die Eindringtiefe verringert.

Dabei benötigen die Ferromagnetischen Werkstoffe auf Grund ihrer hohen Permeabilität keine großen Eindringtiefen. Wenn durch niedrige Frequenzen verursachte hohe Eindringtiefen entstehen, z.B. für Aluminium ist $\delta \approx 12$ cm kommt die Schirmwirkung durch indiziertes Gegenfeld nicht zum tragen, da meist keine so großen Schirmdicken verwendet werden.

Zum Schutz vor Magnetfelder mit tiefen Frequenzen (50 Hz) und Gleichströmen kommt das Prinzip des Nebenschlussverfahrens zum Einsatz. Hierbei werden Materialien mit hoher Permeabilität (μ_r) genutzt, was aber auf Kosten der Leitfähigkeit geht.

Dabei werden drei Untergruppen nach den Permeabilitätswerten gebildet. Diamagnetischen Stoffe besitzen einen $\mu_r < 1$ (Gold, Wasser), die Paramagnetischen Stoffe weisen ein μ_r von rund 1 auf (Aluminium, Luft) und die Ferromagnetischen Stoffe mit $\mu_r \gg 1$ (Dynamoblech, Sonderlegierungen) sind in diesem Fall von Interesse.

Mit steigender Permeabilität verringert sich ihr magnetischer Widerstand (R_m), siehe Gleichung 6.2.1.-2. Die Stoffe besitzen aber, wie schon erwähnt, eine geringe Leitfähigkeit. Deshalb können sich hier keine Wirbelströme zur Kompensation des Feldes ausbilden.

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad \mathbf{6.2.1.-2}$$

Zur Berechnung der Schirmdämpfung von Ferromagnetischen Stoffen verwendet man die Gleichung 6.2.1.-3.

$$a_s = 20 \cdot \lg\left(1 + c \cdot \frac{\mu_r \cdot d}{r_0}\right) \quad \mathbf{6.2.1.-3}$$

Dabei ist c eine Formkonstante, sie beträgt für quaderförmige Figuren 0,4 und 0,66 für die Kugelform. Die Entfernung von der Mitte des Gehäuses bis zum Schirmrand bezeichnet man hier als r_0 .

Die Wirkungsweise, die hier zum tragen kommt, baut auf die Verteilung der Feldlinien im Raum auf. Da sich die Feldlinien immer den Weg mit dem geringsten magnetischem Widerstand suchen, ziehen sie den Weg durch die hochpermeable Gehäusewand vor. Siehe Abbildung 6.2.1.-2. [2]

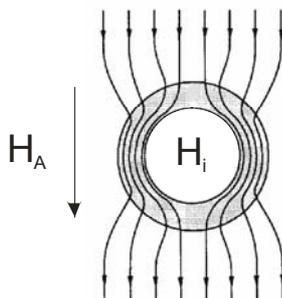


Abb. 6.2.1.-2 Wirkprinzip des Nebenschlussverfahrens (Bypassverfahren)

Versucht man das Nebenschlussverfahren für hohe Frequenzen anzuwenden, verstärkt sich der Skineneffekt, welcher durch eine große Permeabilität begünstigt wird. Auch die schlechte Leitfähigkeit sind Gründe die es nicht ratsam machen, im großen Frequenzbereich zu arbeiten.

In einer qualitativen Gegenüberstellung der beiden Methoden für gleich große und gleich dicke gut magnetisch (hochpermeabel) und gut elektrisch leitender Abschirmgehäuse bei tiefen Frequenzen, im Abb. 6.2.1.-3, kann das jeweilige Dämpfungsverhalten bei steigender Frequenz eine prinzipielle Erläuterung erfahren.

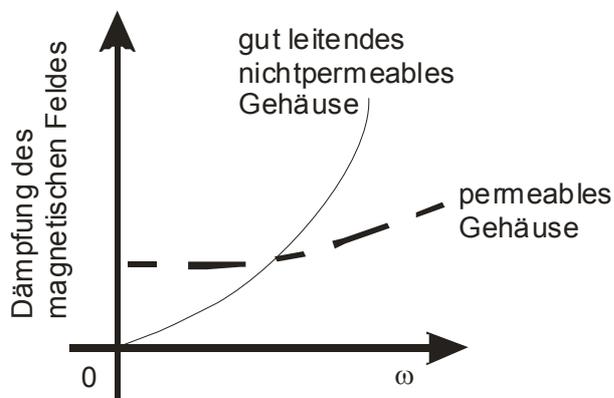


Abb. 6.2.1.-3 Vergleich der Schirmdämpfung zwischen nichtpermeablen und permeablen Gehäusen bei unterschiedlichen Frequenzen.

Für die Schirmung geringer Frequenzen ist deutlich zu sehen das permeable Gehäuse von großem Vorteil sind.

Da durch Bearbeitungsvorgänge, z.B. Biegen, die Permeabilität stark beeinträchtigt wird, müssen die bearbeiteten hoch Permeablen Werkstoffe neuen metallurgischen Prozessen unterzogen oder gleich in den gewünschten Formen und auch Größen bestellt werden.

Große Öffnungen in Gehäusen sind für Materialien mit geringem magnetischem Widerstand kein Problem. Die Feldlinien streben schon weit vor dem Eindringen in die Abschirmzone der Wand mit kleinem magn. Widerstand zu und weichen so der Öffnung des Schirmes aus. Im Gegensatz dazu ist ein Loch oder Unterbrechung für die induzierte Gegenstrommethode ein Problem, da hier eine Beeinträchtigung des Stromflusses stattfindet. Um dem Problem entgegenzuwirken, können die Löcher mit gelochtem Blechen oder Maschen abgedeckt werden.

Es ist auch noch zu beachten, dass sich eine Schirmung mittels Ferromagnetischer Stoffe nicht bis zu unendlich großen Feldstärken eignet. Bei hohen magnetischen Beanspruchungen treten schnell Sättigungserscheinungen auf, wie in Abbildung 6.2.1.-4 gezeigt.

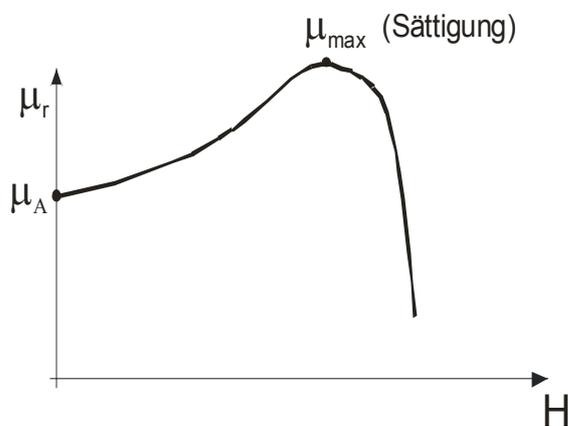


Abb. 6.2.1.-4 Verlauf der Permeabilitätszahl μ_r in Abhängigkeit von der Feldstärke H

Man sieht wie sich die Permeabilität mit steigender Feldstärke bis zum Sättigungspunkt erhöht und danach schnell abfällt(siehe auch Hysteresekurven). Wie genau der Kurvenverlauf ist, hängt von dem Werkstoff und dessen Vorbe-

handlung ab. [2] Die Sättigungswirkung der Verwendeten μ - Schilder in den Abschnitten 6 liegt bei $5 \mu\text{T}$.

Um die beiden Verfahren und ihre Wirkung besser miteinander vergleichen zu können, gebraucht man den Schirmfaktor. Er ist Einheitenlos und errechnet sich wie folgt:

$$S = \frac{H_1}{H_2} \quad \mathbf{6.2.1.-4}$$

Es wird der Quotient der Feldstärke H_1 , bei normaler Feldwirkung und H_2 bei Schirmung gebildet.

Für die logarithmische Darstellung der Schirmdämpfung (a_s in dB) kommt die Gleichung 6.2.1.-5 zur Anwendung. [14]

$$a_s = 20 \cdot \lg \frac{H_1}{H_2} \quad \mathbf{6.2.1.-5}$$

Es ist schon abzusehen, dass sich normale Schirme mit hoher Leitfähigkeit für den Dämpfung von niederfrequenten Feldern (Wechselstrom) nicht bezahlt machen. Da sie ihre Wirkung, bedingt durch die hohe Eindringtiefe, nicht entfalten können.

Die Schirmung mit hochpermeablen Materialien kann zu einem guten Erfolg führen. Von großem Vorteil ist auch die Tatsache, dass Öffnungen oder gar nicht geschirmte Seiten zu keiner wesentlichen Änderung der Schirmdämpfung führen.

6.2.2 Berechnung der Schirmdämpfung mit WinField

Durch eine Erweiterung des Programms WinField ist es, im Gegensatz zu Faesing Betrachtungsmöglichkeiten, nun möglich beide Schirmungsarten zu berechnen.

Die Berechnung für das Wirbelstromverfahren ist dabei gleich geblieben. In der Option „Metallplatte“ kann man Platten in selbst gewählten Größen und Stärken von Aluminium, Stahl und Kupfer erstellen. Zur Simulation werden geschlossene Leiterschleifen als Stromkreisersatz zur Ausbildung von Wirbelströmen verwendet. Für eine exakte Betrachtung sind unendlich viele kleine Leiterschleifen nötig. Da dies durch den Rechenaufwand begrenzt ist, kann nur eine näherungsweise Berechnung der Wirbelströme, mittels 10x10 cm großen Schleifen, im Programm Anwendung finden. Aus diesem Grund sind die Metallplatten als Gitter dargestellt.

Für die Berechnung des Nebenschlussverfahrens wird in der Toolbar ein Blockmanager angegeben. Damit lassen sich die zu schirmenden Objekte in einen oder auch mehrere Blöcke zusammenfassen. Jeder einzelne Block kann über die Anweisung „Schirmung“ mit der Eingabe des Schirmfaktors einen anderen Schirmfaktor erhalten. Weil nun jedes Objekt nicht mehr mit einer zusätzlich erzeugten Metallplatte versehen ist, erleichtert sich der Umgang mit den Schirmverfahren. Die Wirkung des Schirmfaktors beruht hier auf der Absenkung des Stromes, d.h. im Vergleich verhält sich ein erzeugtes Schirmgehäuse wie die Senkung des Stromes um den gleichen Faktor.

Die Berechnungen der Schirmfaktoren in dem Programm erfolgen hier komplex nach Kaden.

6.2.3 Schirmplatte

Es ist erforderlich, das Schirmungsmittel zu bestimmen, mit dem eine Einhaltung der Anlagengrenzwerte ermöglicht wird. Da es zum einen die konventionelle Methode mit Paramagnetischen und die neuen mit Ferromagnetischen Stoffen gibt, sind zum Vergleich beide Methoden überprüft worden.

In dem Programm WinField kann man bei der Erzeugung von Metallplatten zwischen den Optionen limitierte Schleifen oder ohne limitierte Schleifen wählen. Dabei werden Schleifengrößen von 10x10 cm bis 10x10 m Platten und ab 10x10 m, 20x20 cm große Schleifen angeboten. Diese Funktion ohne limitierte Leiterschleifen ist aber erst bei Größen von mehr als 1x1 m frei gegeben, da es unter diesen Maßen ein zu ungenaue Schirmung ergibt. Bei der Limitierung von den Schleifen erzeugt das Programm immer Leiterschleifen von einem zehntel der Plattengröße. Wenn nun eine Platte die Abmaße von 10x10 m hat, ist damit die Schleifenanzahl auf 100 festgelegt. Bild 6.2.3.-1

Würde man nun die gleiche Platte ohne Limitierung erzeugen, ergäbe sich das Bild 6.2.3.-2. Da hier 2500 Schleifen vorhanden sind, ist die Simulation erheblich genauer, aber die Berechnungszeit auch länger.

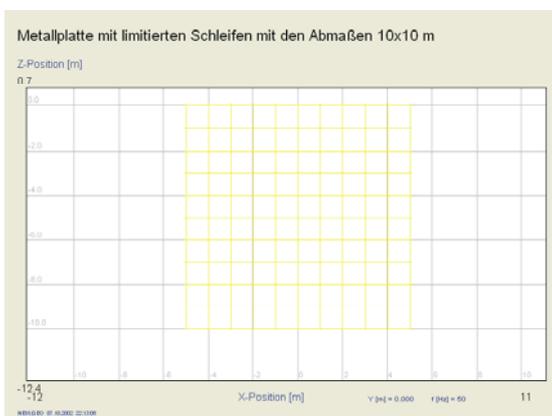


Bild 6.2.3.-1

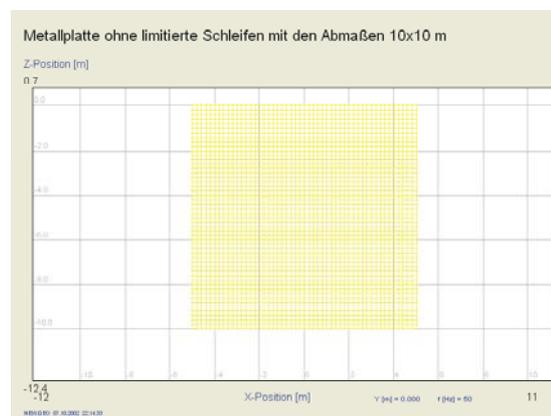


Bild 6.2.3.-2

Gegenüberstellung der Schirmplatten mit limitierte und ohne limitierte Schleifen.

Im Vergleich der beiden Methoden konnte eine Berechnungszeit von 43 s für eine angepasste 10 mm starke Schirmplatte der NVT 1 - Rückwand (2,65x1,95 m) ohne limitierte Schleifen erzielt werden. Bei eingeschalteter Limitierung verkürzte sich die Rechenzeit auf 2 s. Da aber eine Differenz von 63,1 % zwischen den Schirmdämpfungen besteht, muss das genauere Berechnungsverfahren (ohne limitierte Schleifen) Anwendung finden. Im Diagramm 6.2.3.-3. kann man für verschiedene Materialstärken die Schirmdämpfungsunterschiede ablesen. Es ist zu erkennen, dass immer erhebliche Differenzen zwischen den Verfahren

vorliegen. Damit wird noch deutlicher gezeigt, dass die Flusssdichte nur mit der Option ohne „limitierte Schleifen“ für große Metallplatten berechnet werden sollte.

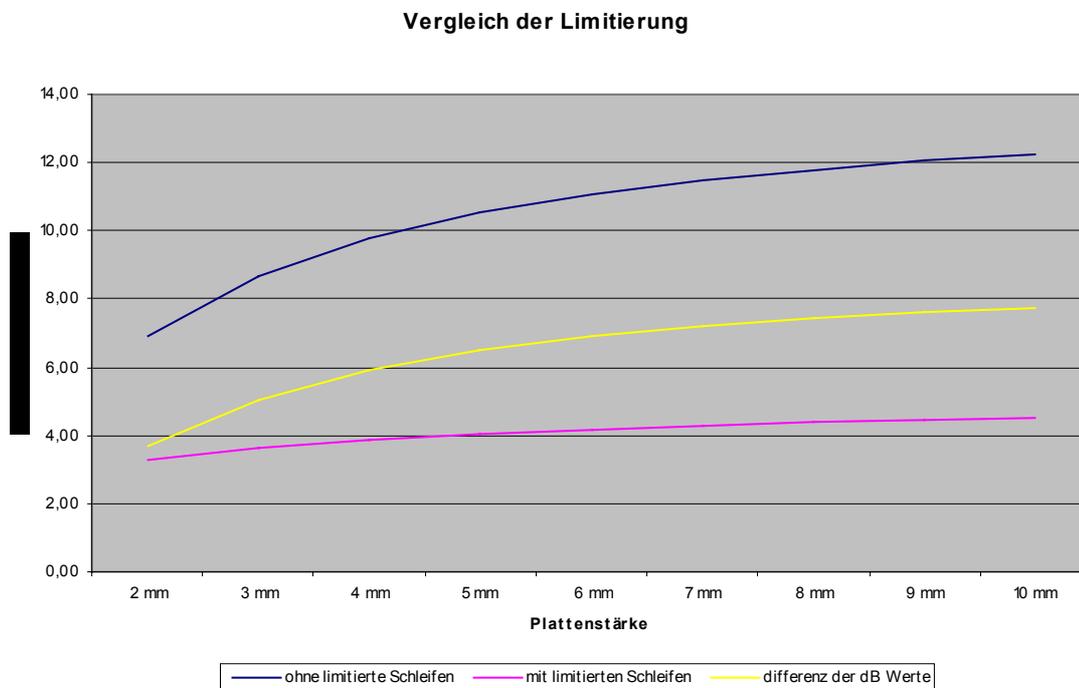


Diagramm 6.2.3.-3 Vergleich der Schirmdämpfung verschiedenerer Plattenstärken mit und ohne Limitierung.

Mit dem ermittelten Berechnungsverfahren (ohne Limitierung) kann man nun die Untersuchung des geeigneten Schirmmaterials fortführen.

Die verwendeten Materialien sind Kupfer (Cu), Aluminium (Al) und Stahl (St). Die Auswahl ist durch die im Programm implementierte Option „Metallplatte“ begrenzt. Weiterhin kann durch die Option nur die Wirbelstrombeeinflussung berechnet werden. Was für Stahl, der eine Permeabilität $\mu_r = 450$ hat, nicht korrekt ist. Dieser Werkstoff besitzt magnetische Eigenschaften, dass beruhend auf dem Prinzip des Nebenschlussverfahrens, Anwendung findet, siehe Abschnitt 6.2.1.

Dem unten gezeigten Diagramm 6.2.3.-4 ist zu entnehmen, dass sich alle Werte der Schirmdämpfung für jedes Material asymptotisch ihrem jeweiligen Grenzwert annähern. Das lässt erkennen, dass sich mit steigender Plattenstärke die Schirmdämpfung erhöht aber sie stetig kleiner wird. So tritt bei einer 3 mm Kupferplatte eine Verbesserung von 69,8 %, bei 4 mm - 72,3 %, 5 mm - 73,8%

und 6 mm - 74,8 % auf. Dies bedeutet, dass eine 1 mm Plattenverstärkung die Verbesserung von 2,5 %, zwischen 3 mm und 4mm ergibt.

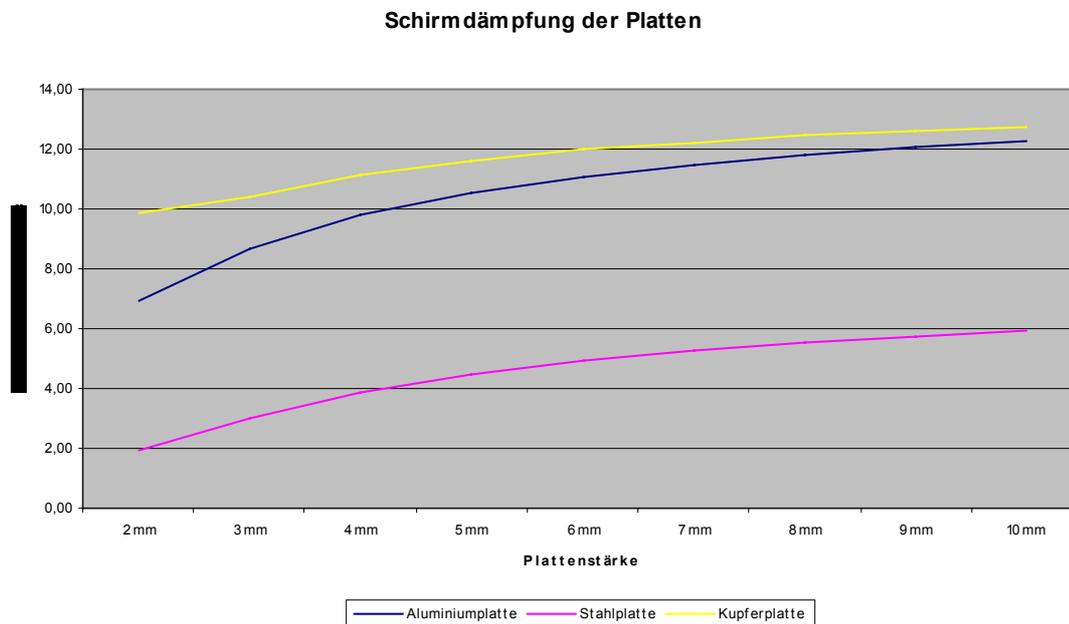


Diagramm 6.2.3.-4 Vergleich der Schirmdämpfung verschiedener Materialien in Abhängigkeit der Plattenstärke.

Vergleicht man nun die prozentualen Unterschiede der zwischen 4 mm und 5 mm Materialdicke, stellt sich eine Differenz von 1,5 % ein. Von 5 mm zu 6 mm beträgt sie nur noch 1 %. Da sich die anderen Werkstoffe ähnlich verhalten, lässt sich daraus schlussfolgern, dass eine Materialverstärkung bis ins unendliche nicht die gewünschten Erfolge erzielt. Den besten Nutzen bringt hier eine Plattenstärke von 4 mm. Sie weist das beste Verhältnis zwischen den Werkstoffdicken und Schirmdämpfung auf.

Vergleicht man daraufhin die Materialien miteinander, zeigt sich, dass Kupfer die besten Dämpfung mit 11,1 dB besitzt. Aluminium liegt im Mittelfeld mit 9,8 dB und Stahl hat nur eine Dämpfung von 3,8 dB. Damit müsste eigentlich Kupfer vorrangig verwendet werden. Aber durch die Überprüfung der Kosten im Abschnitt 8.2. ist für die Wirbelstromschirmung Aluminium das geeigneteste Material der drei getesteten.

Damit kann nun in den nächsten Abschnitten eine Schirmung für die Anlagenteile erstellt werden. Man verwendet hierzu den Werkstoff Aluminium mit einer Materialstärke von 4 mm, da sich dies als am günstigsten herausstellte.

6.2.4 Niederspannungsverteilung

Die im Abschnitt 5.2.4 untersuchten Optimierungsmaßnahmen brachten Verbesserung von bis zu 73 %. Da die Anlagengrenzwerte dennoch mehr als einen Meter überschritten werden (in einzelnen Bereichen), ist die Anwendung von Schirmen unentbehrlich. Nach der Bestimmung des Werkstoffes und dessen Materialstärke unter Kapitel 6.2.3 kann man dazu übergehen, Niederspannungsverteilungen zu schirmen. Man kann hier auf eine zusätzliche Untersuchung der MVT verzichten, weil der Schirmfaktor bei beiden Abschirmungen identisch ist und ein ähnlicher Grundaufbau besteht.

In diesem Abschnitt werden die beiden Methoden der Schirmung mit Paramagnetischen und Ferromagnetischen Stoffen miteinander verglichen. Dazu bekommt die NVT1 eine komplette Abschirmung rundherum und oben. Weil unten die Einspeise- und die Abgangskabel vorhanden sind, vor allem aber, weil eine Schirmung nach unten nicht relevant ist, erfolgt hier keine Schirmung.

Mit der neuen Programmapplikation ist es wesentlich einfacher Untersuchungen dieser Art durchzuführen. Dazu ist eine Bestimmung des Schirmfaktors der Materialien nötig. Zu diesem Zweck erfolgt für die Aluminiumschirmung eine kurze Versuchsreihe. Dabei ist die NVT 1 und die NVT 4 rundum (ohne unten) mit 4 mm Al - Platten verkleidet worden, siehe Bild 6.2.4.-1.

NVT ST1 mit 4 mm Al - Schirm

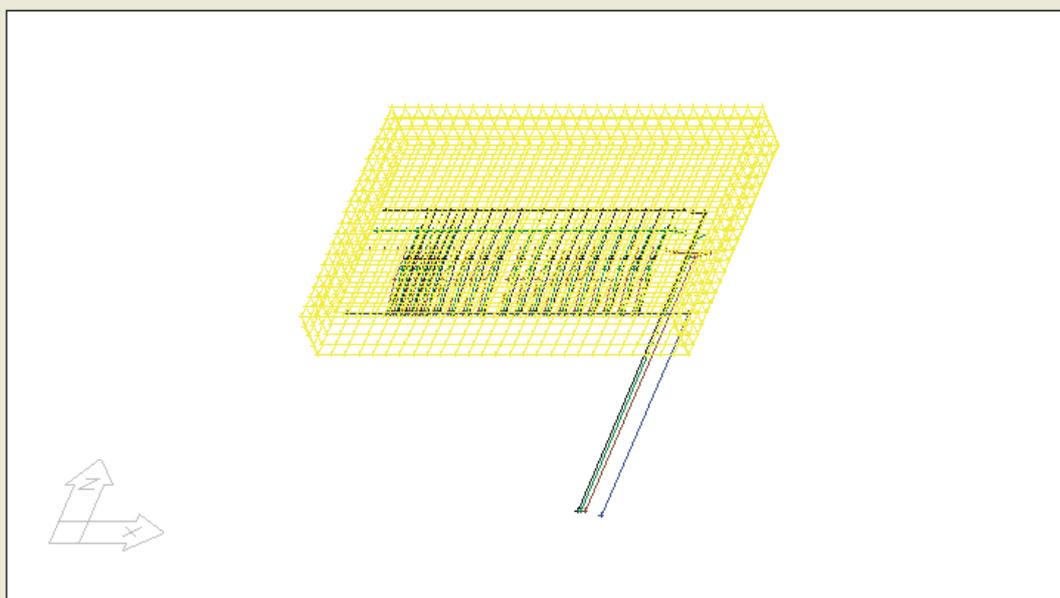


Bild 6.2.4.-1 3D Ansicht einer vollständig geschirmten NVT.

Der Abstand der Platten ist dem normalen Gehäuseabstand angepasst. Der Messpunkt liegt 20 cm vom Gehäuse entfernt, Tabelle 6.2.4.-1.

Rückwand	mit Schirm	normal	
	B in μT	B in μT	S
NVT 1	41,66	151,069	3,6
NVT 4	122,314	431,887	3,5

Tabelle 6.2.4.-1 Vergleich des Schirmfaktors der NVT 1 und der NVT 4.

Aus der Tabelle 6.2.4.-1 ist ein durchschnittlicher Schirmfaktor von rund 3,5 zu ermitteln. Dieser Wert stimmt ungefähr mit den von Faesing angegebenen und die in der Schirmungstabelle zur Verfügung gestellten Faktoren, der neuen Anwendung im Programm, überein. Weiterhin ist zu erkennen, dass durch eine einfache Wirbelstromschirmung die Flussdichte verringert wird, es aber noch nicht ausreicht, um die Grenzwerte einzuhalten. Mit diesem Schirm ist eine Überschreitung der Grenzen von $40,66 \mu\text{T}$ noch wesentlich zu hoch. Darum kommt nun ein neues Schirmverfahren der Firma cfw zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um Materialien mit sehr hohen Permeabilitäten, sogenannte μ -

Schilder. in Bild 6.2.4.-2. Die Schirmung einer Verteilung mit diesem Werkstoff erfolgt als Komplettsystem der Firma cfw (PowerMan). Dies wird auch als Anlagengrenzwertsanierung (AGW) bezeichnet.

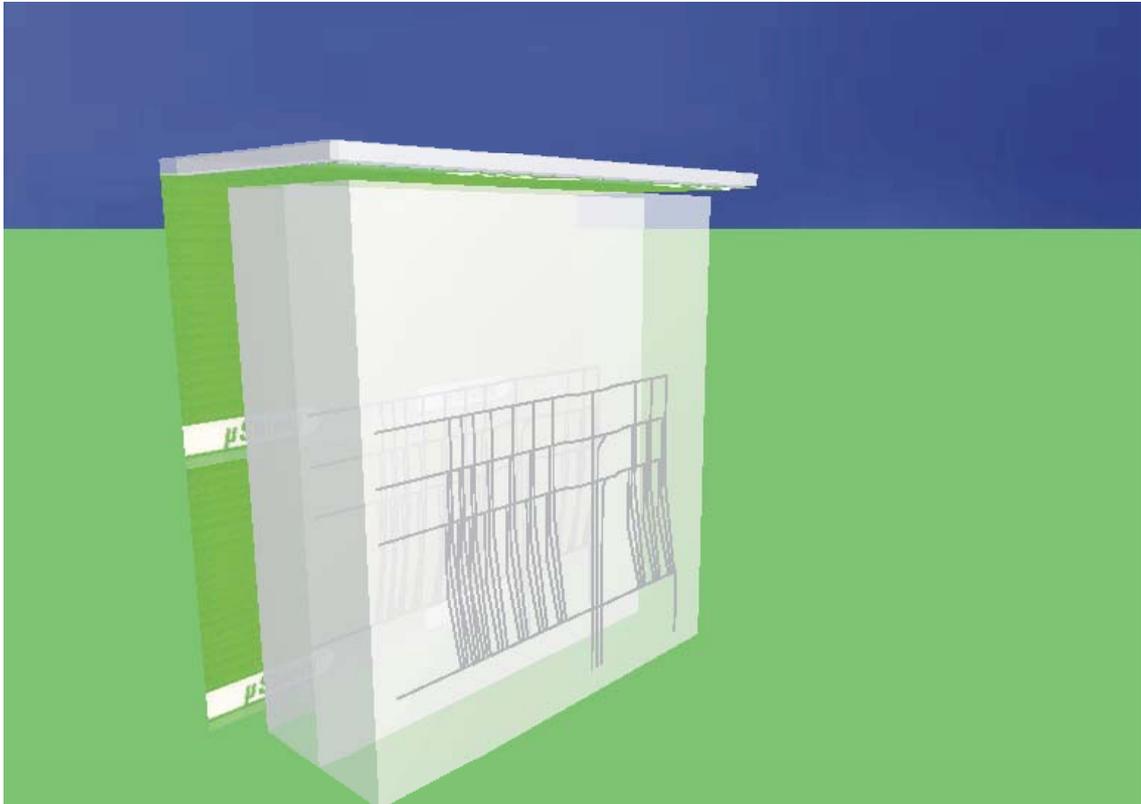


Bild 6.2.4.-2 3D Darstellung des PowerMan einer NVT.

Mit ihnen lassen sich sehr viel höhere Schirmdämpfungen realisieren. Durch die von der Firma bereitgestellten Unterlagen konnte man einen Schirmfaktor von 38 an der Rückseite einer 630 kVA Verteilung berechnen, Bild A 6.2.4.-1. Im direkten Vergleich sind damit μ - Schild um das 10fache besser als die einfachen Aluminiumabschirmungen.

Nun wird versucht, die Niederspannungsverteilung mit allen Möglichkeiten und Kombinationen unter den Anlagengrenzwert von $1 \mu\text{T}$ zu bringen. Dazu sind die Verteilungen eins und zwei als Versuchsobjekte ausgewählt und berechnet worden. Die Messung erfolgt zum einen in der Entfernung von 0,2 m, dort wo der Grenzwert einzuhalten ist und zum anderen bei 0,999 μT , dort wo der Grenzwert eingehalten wird.

Aus den Werten im Anhang der Tabellen A 6.2.4.-2 und A 6.2.4.-3 kann man verschiedene Schlüsse ziehen. Zum einen ist es noch nicht möglich die Grenzwerte überall einzuhalten, obwohl die verbesserten Niederspannungsverteilungen mit dem PowerMan abgeschirmt wurden. Die Differenz zwischen dem Grenzwert und den gemessenen Werten liegt nur noch bei 1,1 μT für den höchsten Wert. Im Gegensatz zu vorher bestand noch ein Unterschied zur normalen Anlage von 180,5 μT . Das ist eine Senkung um 99,4 %. Der hohe Prozentsatz sagt aus, wie gut die Optimierung und der PowerMan zusammen wirken. Für sich alleine betrachtet, erzielt die Verbesserung nur 54,9 % und die Abschirmung 97,7 %. Es ist zu sehen, dass eine Reduzierung der Werte am Anfang noch schnell voranschreitet, mit zunehmenden Annäherungen an den Grenzwert aber schwierig wird. Betrachtet man nun dies aus dem Blickwinkel der Entfernung bis zum Einhalten der Grenzen, kann man folgendes ermitteln:

Bei der Optimierung erfährt das Feld eine Verringerung von 1,1 m und für die Schirmung von 0,6 m, siehe Diagramme 6.2.4-3 und 6.2.4.-4. Eine Kombination beider Mittel bringt die Flussdichte auf 0,1 m an den Grenzwert heran. Dadurch, dass die NVT in einem Raum steht, kann die normale Mauerstärke von 0,2 m zu den normalen Grenzen hinzu addiert werden. Damit ist eine Einhaltung der Grenzwerte gewährleistet. Der Aluminiumschirm kann zwar das Feld schwächen aber im Allgemeinen nicht überzeugen, Bild 6.2.4.-6 bis Bild 6.2.4.-9. Das zeigt, dass Wirbelstromschirme bei so extremen Feldreduzierungen nicht anwendbar sind.

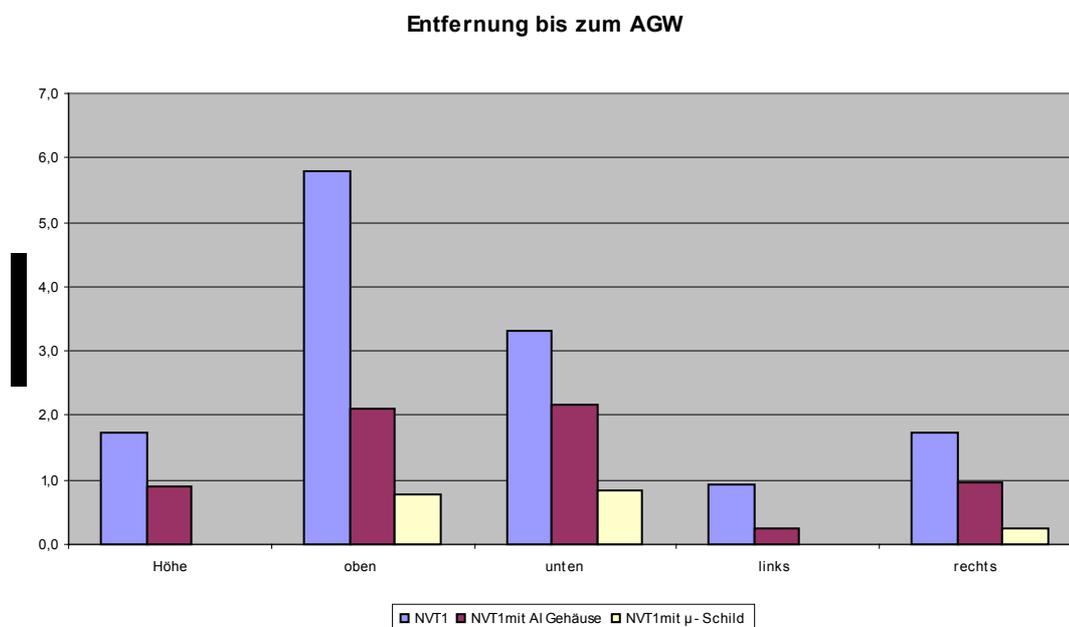


Diagramm 6.2.4.-3 Vergleich der NVT 1 mit unterschiedlichen Schirmen, bis zum Einhalten der Grenzwerte.

Entfernung bis zum AGW

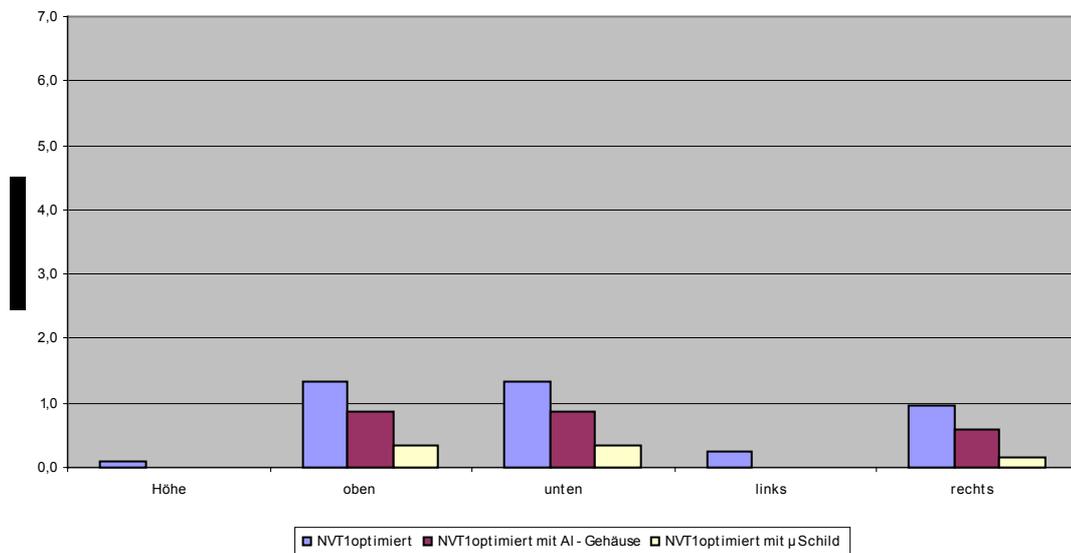


Diagramm 6.2.4.-4 Vergleich der verbesserten NVT 1 mit unterschiedlichen Schirmen, bis zum einhalten der Grenzwerte.

Zeigt man nun im Diagramm 6.2.4.-5 wie stark die Schirmdämpfungen für die einzelnen Abstände und Verteilungen sind, kann man sehen, dass die Schirmdämpfung sehr unterschiedlich ausfällt, obwohl überall der gleiche Schirmfaktor angewandt wurde. Einige Werte sind nicht mehr messbar gewesen, so dass man keine Schirmdämpfung errechnen konnte.

Schirmdämpfung der NVT

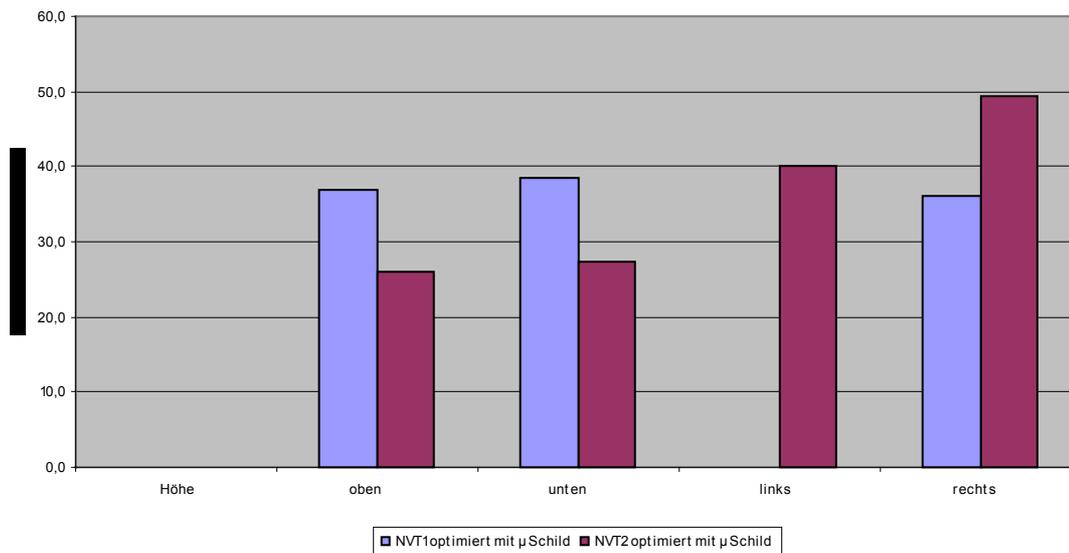


Diagramm 6.2.4.-5 Vergleich der Schirmdämpfung zwischen der NVT 1 und der verbesserten NVT 1 mit μ -Schild.

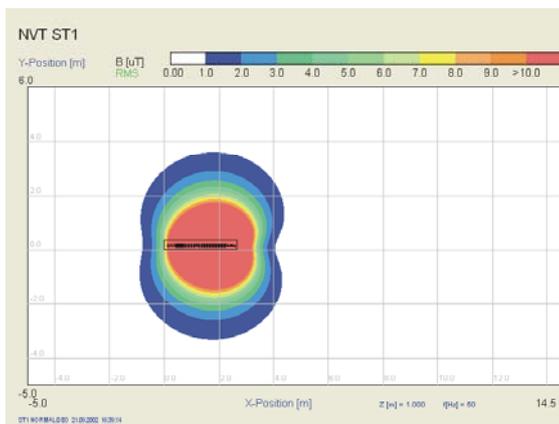


Bild 6.2.4.-6

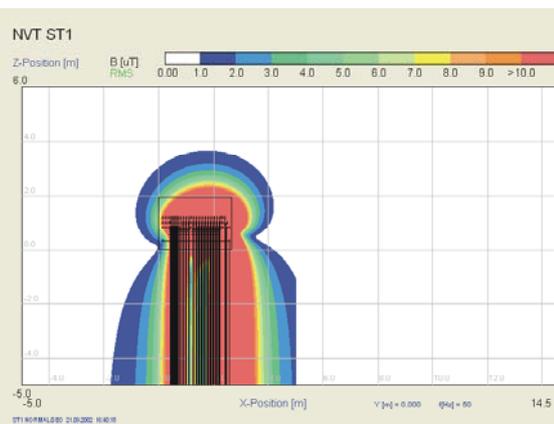


Bild 6.2.4.-7

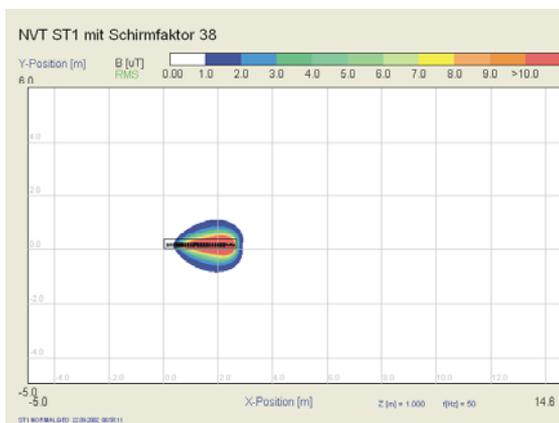


Bild 6.2.4.-8

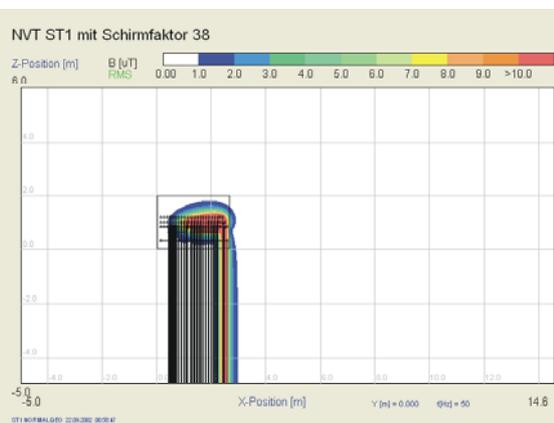


Bild 6.2.4.-9

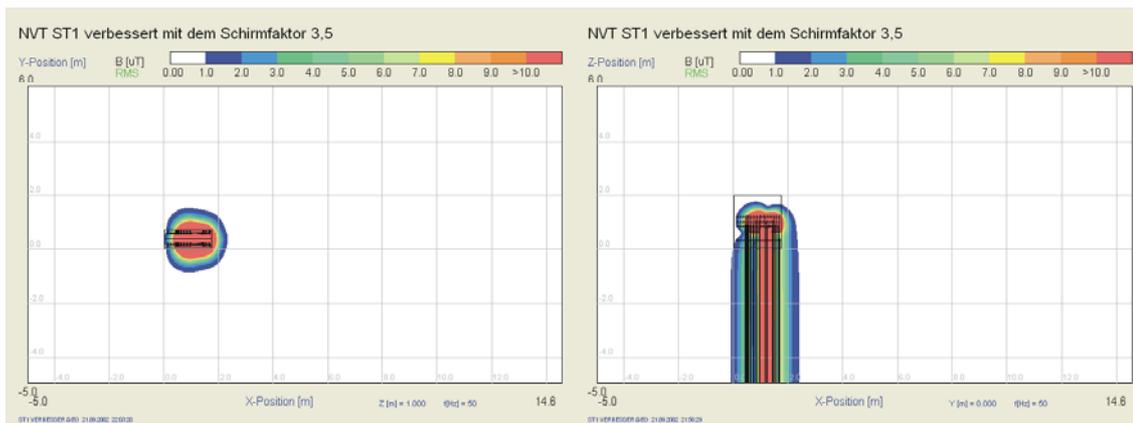


Bild 6.2.4.-10

Bild 6.2.4.-11

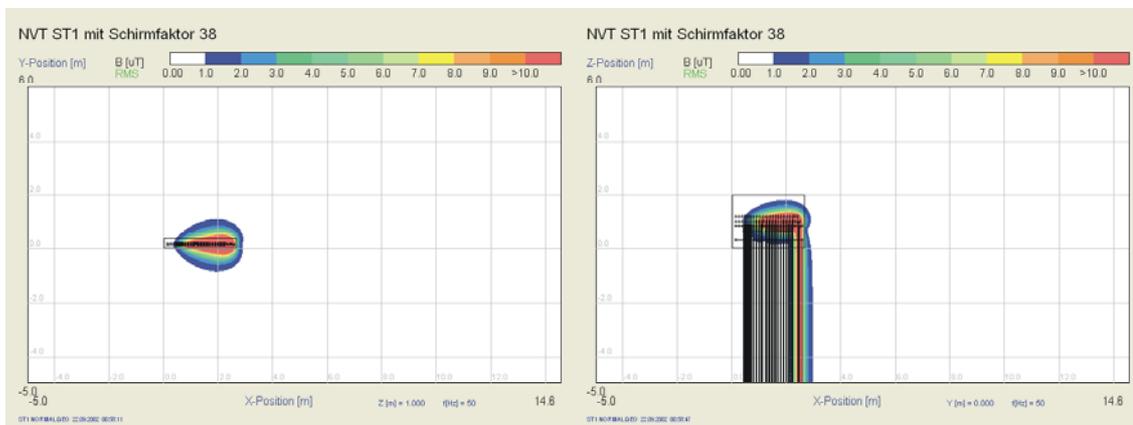


Bild 6.2.4.-12

Bild 6.2.4.-13

Schrittweise Entwicklung für die Verbesserung der mag. Flussdichte der NVT1, Bild 6.2.4.-6 bis Bild 6.2.4.-13.

In den Bildern 6.2.4.-6 bis 6.2.4.-13 ist die schrittweise Verbesserung der Niederspannungsverteilung 1, mit Optimierung, Aluminiumschirme ($S=3,5$) und dem PowerMan ($S=38$) grafisch verdeutlicht.

Allgemein kann für alle Niederspannungsverteilungen dieser Untersuchung gesagt werden, dass die Aussicht auf Einhaltung der Grenzwerte nur mit einer optimierten und mit dem PowerMan geschirmten Verteilung besteht. Eine Anwendung der normalen Aluminiumschirmung ist hier nicht ausreichend.

Für die MVT besteht noch Optimierungsbedarf, da wie bei der normalen NVT eine Schirmung nicht ausreichend ist. Das könnte in den Trafostationen zu Problemen führen, weil sich beide Anordnungen meist sehr dicht an den Wänden befinden.

6.2.5 Transformatoren

Bei dem Transformator ist eine Abschirmung, durch die Wärmeentwicklung bei der Transformation erschwert. Da man hier große Öffnungen für die Belüftung lassen muss, kommt eine Wirbelstromabschirmung nicht in Frage. Die für die Minderung des Feldes verantwortlichen Wirbelströme können sich nicht richtig ausbilden, deshalb ist eine Abschirmung durch ferromagnetische Materialien ratsam. Hierzu gibt es auch von der Firma cfw ein spezielles Schirmsystem namens TrafoMan, Bild 6.2.5.-1.

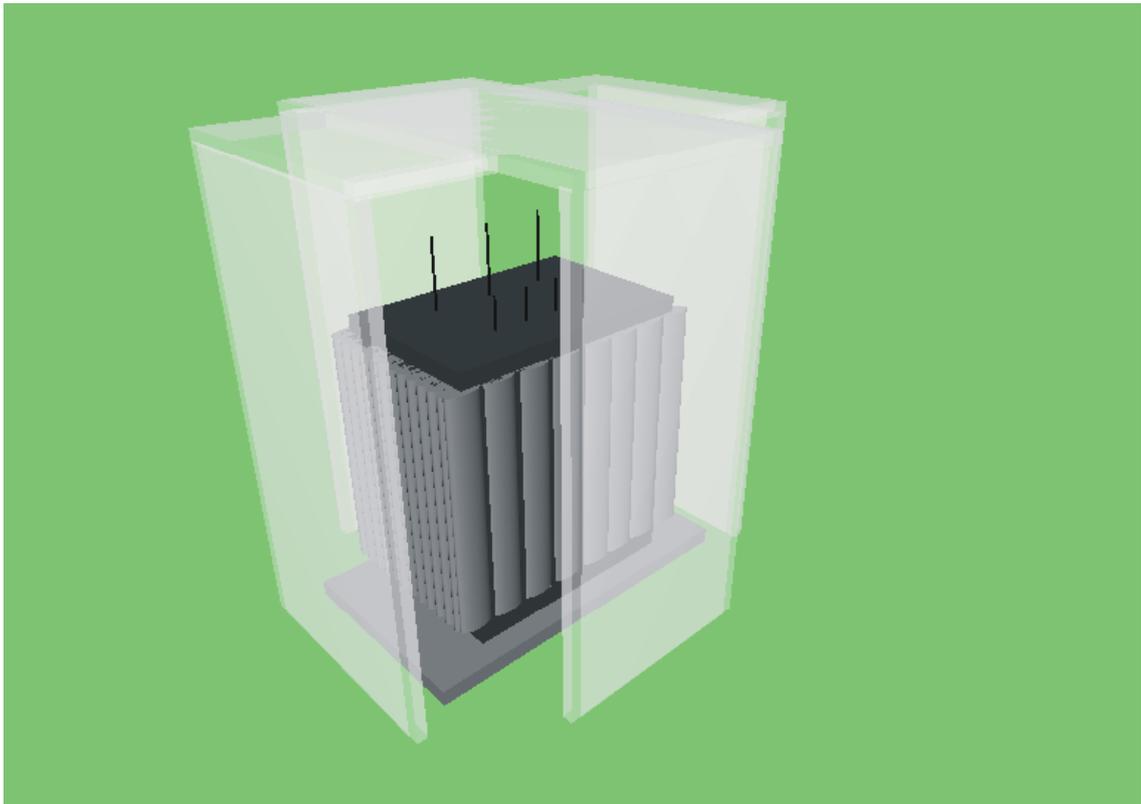


Bild 6.2.5.-1 3D Ansicht eines Transformators mit TrafoMan

Der Schirmfaktor des TrafoMan kann man aus dem Bild A 6.2.5.-1 im Anhang ermitteln. Weil der interessante Wert für die Feldstärke bei 0,2 m (vom Schirm ausgehend), zur Berechnung des Schirmfaktors ohne TrafoMan nicht mehr angezeigt wird aber noch ansteigt, ist eine Interpolation nach Newton notwendig. Die Feldstärke mit Schirmung bleibt in diesem Bereich konstant.

Dazu müssen drei Punkte aus dem Bild A 6.2.5.-1 ausgelesen und in einem sog. Steigungs- oder Differenzenschema eingetragen werden (Tab. 6.2.5.-1). Mit Hilfe dieses Schemas kann man nun die Koeffizienten für das Näherungspolynom berechnen.

k	x _k	y _k	I	II	III
0	0	2,05			
				2,76	
1	0,5	3,43			3,52
				6,28	
2	1	6,57			5,13333333
				17,5	11,22
3	1,5	15,32			

Koeffizienten $a_0=2,05$ $a_1=2,76$ $a_2=3,52$ $a_3=5,13$

Tabelle 6.2.5.-1 Steigungs- und Differenzschema

Mit den ermittelten Koeffizienten ist es nun möglich das Näherungspolynom aufzustellen:

$$y = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) + a_3(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2)$$

$$= 2,05 + 2,76(x - x_0) + 3,52(x - x_0)(x - x_1) + 5,13(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2)$$

Die Lösung des Polynoms:

$$y = 5,133x^3 - 4,18x^2 + 3,56x + 2,05 \quad \mathbf{6.2.5.-1}$$

Durch das gelöste Polynom ist es nun möglich den fehlenden Wert zu berechnen. Tabelle 6.2.5.-2

	interpoliert	Abgelesenen
x in m	B in μT	B in μT
1,5	15,3	15,3
1,75	10,0	10
2	6,6	6,6
2,25	4,5	4,5
2,5	3,4	3,4
2,75	2,8	2,8
3	2,1	2,1
1,2	24,9	
1	33,5	

Tabelle 6.2.5.-2 Gegenüberstellung der Interpolations- und der Ablesewerte

Für 0,2 m (entspricht 1 m im Bild A6.2.5.-1) ist eine Feldstärke von 33,5 μT ohne Schirmung berechnet und mit Schirm $B = 1,5 \mu\text{T}$ abgelesen worden. Daraus ergibt sich ein Schirmfaktor von $S \approx 22$.

Weitergehend ist nun eine Betrachtung der Schirmwirkung zwischen einem einfachen und einem EMV Transformator möglich. Dabei ist zu beachten, dass der TrafoMan einen Mindestabstand von 0,15 m zwischen Transformator und Wand benötigt, um eingesetzt zu werden. Mit einer angenommenen Wanddicke, von 0,2 m, vergrößert sich der Messabstand von 0,2 m auf 0,55 m zur Seite. Aufgrund des hohen Schirmfaktors und der großen Messentfernung ist bei beiden Varianten keine Grenzwertüberschreitung vorhanden.

Beide Umspanner kann man deshalb bei Anwendung eines Schirmes nutzen, wenn die benötigten Abstände vorhanden sind.

6.2.6 Leiter

Bei den Leitern ist eine Verbesserung durch den Einsatz von Doppelkabeln und Phasenoptimierung durchführbar. Wie in Abschnitt 5.2.5 gezeigt, ermöglicht man damit eine Reduzierung des Feldes von normaler 7,2 m auf 2,1 m, was rund 70,8 % sind. Bis zur Einhaltung der Anlagengrenzwerte benötigt man noch 1,9 m, mit Stationswänden nur 1,7 m. Um das zu erreichen, sind Schirme ein gutes Hilfsmittel.

Die Analyse erfolgt wieder mit einem Aluminiumschirm und eine von der Firma cfw gebauten Trassenabschirmung.

Den Schirmfaktor für den cfw Kabelkanal muss man, wie in Abschnitt 6.2.6 aus dem Bild A 6.2.6.-1, interpolieren.

Das Lösungspolynom lautet hier:

$$y = 5,88x^3 - 5,59x^2 + 3,56x + 1,03 \quad \text{6.2.6.-1}$$

Mit Hilfe des Polynoms 6.2.6.-1 kann für den Messabstand von $x = 0,2$ m der Schirmfaktor mit $S \approx 27$ bestimmt werden.

Demzufolge gilt für die Untersuchung, das der Al Schirm mit $S = 3,5$ um das 7,7 Fache kleiner ist.

Im Zuge des Vergleiches werden die Anordnungen für ein einfaches Drehstromsystem (Bild 6.2.6.-1) mit unterschiedlichen Schirmen (Bild 6.2.6.-2, 6.2.6.-3) und ein Drehstromsystem mit optimierter Sechsheiteranordnung (Bild 6.2.6.-4) und Schirmung (Bild 6.2.6.-5, 6.2.6.-6) überprüft. Die Leiter haben hier die gleichen Eigenschaften, wie in den vorhergehenden Untersuchungen (5.2.5.).

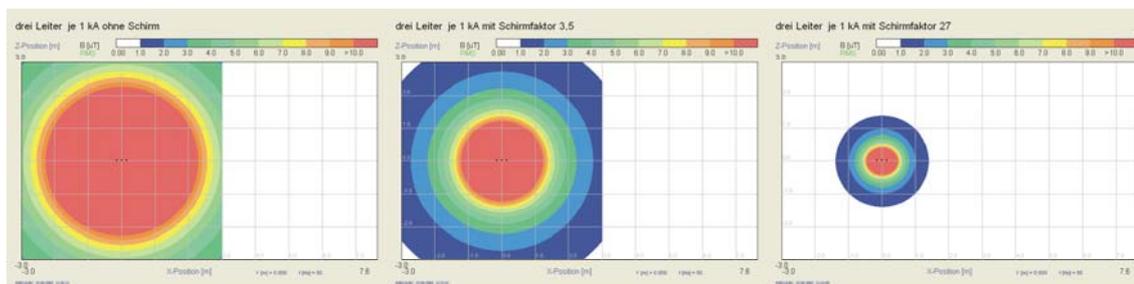


Bild 6.2.6.-1

Bild 6.2.6.-2

Bild 6.2.6.-3

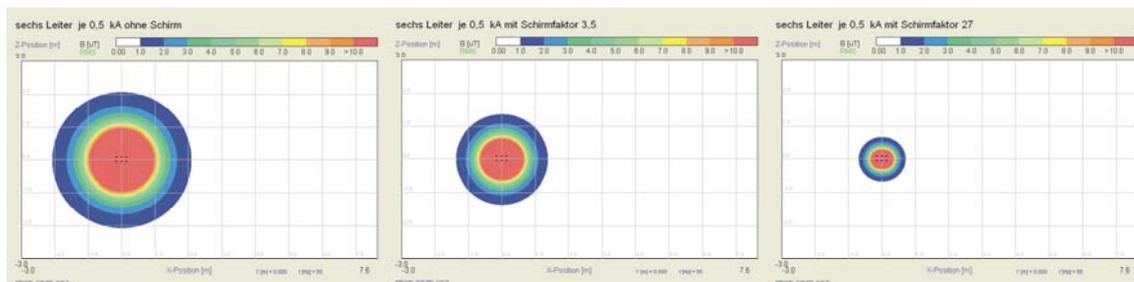


Bild 6.2.6.-4

Bild 6.2.6.-5

Bild 6.2.6.-6

Wirkungen unterschiedlicher Schirme auf ein einfaches und einem doppel Drehstromsystem.

Es ist eine Verringerung des Feldes in jedem Schritt der Untersuchung zu sehen (Bild 6.2.6.-1 bis 6.2.6.-6). Dabei minimiert sich die Flussdichte mit zunehmendem Schirmungsaufwand immer weniger, d.h. anfangs ist die Feldgröße einfacher zu korrigieren. Damit soll ausgedrückt werden, dass ein einfaches Drehstromsystem mit cfw Schirmung fast die gleiche Wirkung hat, wie ein Sechslitersystem mit Aluminiumschirmung (Diagramm 6.2.6.-1). Für eine Annäherung an den Anlagengrenzwert erhöht sich der Aufwand fast exponentiell. Bis zum Einhalten der Grenzwerte sollte die Kabeltrasse daher so verlegt werden, dass man die Grenzwerte an der Außenwand einhält. Die Kosten für eine zusätzliche Platte oder Schirme um die Flussdichte von 1 μT einzuhalten, wären nicht rentabel.

Entfernung bis zum AGW

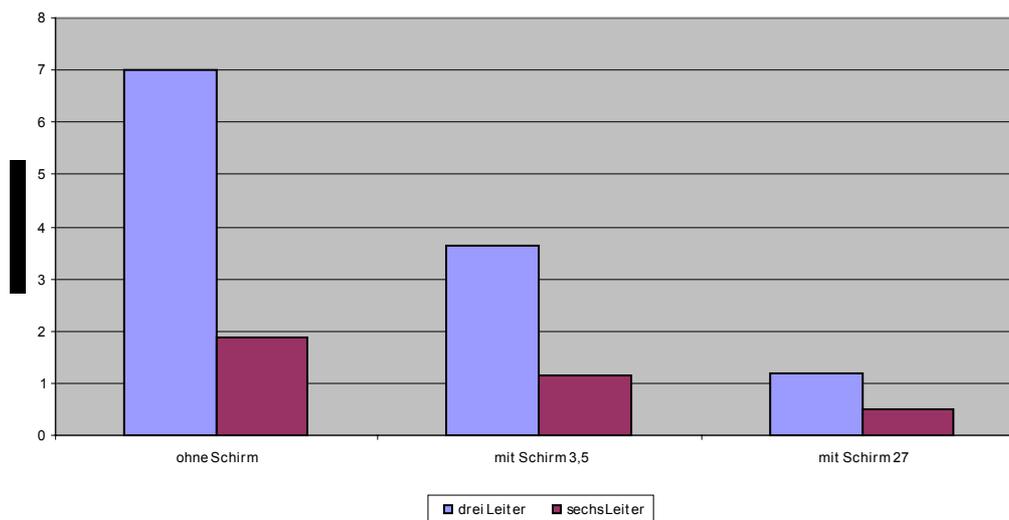


Diagramm 6.2.6.-1 Vergleich der Entfernung bis zum Einhalten der AGW von Sechs,- und Dreileitersystemen mit und ohne Schirm.

Die Schirmdämpfungen in dem Diagramm 6.2.6.-2 bringen deutlich heraus wie hoch die Schirmdämpfung bei der Kombination von verschiedenen Methoden ist. Das beste Ergebnis kann man mit dem Sechsheiter und zusätzlicher cfw Abschirmung erzielen, hier wird die Feldstärke um mehr als 98 % gesenkt.

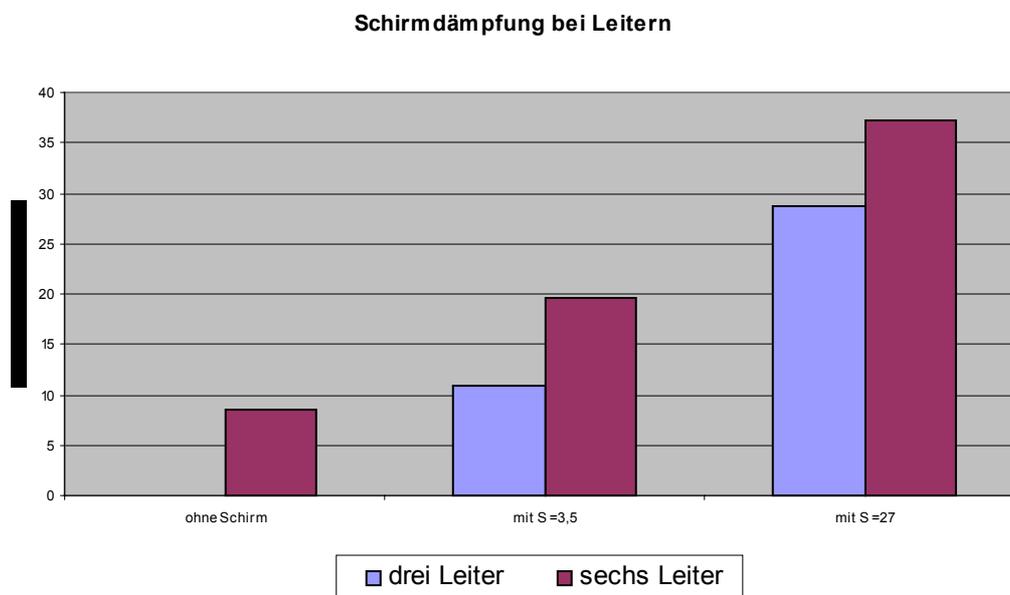


Diagramm 6.2.6.-2 Vergleich der Schirmdämpfung unterschiedlicher Leiteranordnungen und Schirme.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Einhaltung der Grenzwerte nicht so einfach möglich ist. Es müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden falls sich die Kabel sehr dicht an der Wand befinden. Die Anbindung der Station an das über- und untergeordnete Netz muss nochmals getestet werden, inwiefern eine Dämpfung des Erdreiches besteht, um den Einfluss der Kabel zum Gesamtfeld soweit zu verringern, damit eine Einhaltung der Grenzwerte gewährleistet wird. Da in dieser Diplomarbeit nur der Einfluss der Station von Bedeutung ist, sind die Kabel, wie in den Abschnitten zuvor festgelegt, in das Erdreich um 200 m verlängert und wurden nicht weiter betrachtet.

7 Überprüfung der Verbesserungsmaßnahmen an Netzstationen

In den vorangegangenen Kapiteln sind für alle Anlagenteile Optimierungs- und Schirmungsmaßnahmen durchgeführt worden. Weil sie zum Teil sehr unterschiedlichen konstruktiven Anordnungen unterliegen, fielen die Lösungen auch ungleich aus. Trotzdem konnte man für jedes Objekt eine Optimierung allein durch die Umgestaltung der Form oder mit zusätzlichen Hilfsmitteln erzielen. Da dies meist noch nicht ausreichend war, fanden verschiedene Methoden der Schirmung Verwendung. In fast allen Fällen konnte damit die Einhaltung der Grenzwerte erzwungen werden. Allein die Kabel mit ihren hohen Strömen bereiten noch Probleme.

Um nun festzustellen inwiefern sich die einzelnen Optimierungs- und Schirmungsmaßnahmen der Komponenten auf das Gesamtfeld der Netzstationen auswirken, werden in diesem Kapitel 7 normale Stationen und verbesserte Anlagen miteinander verglichen, wobei mit verbesserten Anlagen, die Verbesserung der einzelnen Komponenten als ganzes gemeint ist.

In allen Trafostationen wurde die Bodenplatteunterkante auf $z = 0$ gesetzt. Weiterhin sind alle Einspeise- und Abgangskabel auf 200 Meter in die Tiefe verlängert. Die Ermittlung der magnetischen Flussdichte geschah immer an der Stelle der größten Feldstärke, da die Station den Anlagengrenzwert an allen Punkten einhalten muss, im Abstand von 0,2 m von der Stationswand. Die Messung seitlich von der Station erfolgt einen Meter in die Anlage hinein.

Zum Testen der unterschiedlichen Möglichkeiten wie:

- Normale Station
- Normale Station und Aluminiumabschirmung der Komponenten
- Normale Station und cfw Abschirmung der Komponenten
- Verbesserte Station
- Verbesserte Station und Aluminiumabschirmung der Komponenten
- Verbesserte Station und cfw Abschirmung der Komponenten
- Umgestaltung der verbesserten Station mit cfw Abschirmung,

ist die Netzstation 3 als Versuchsobjekt ausgewählt worden.

Vergleicht man die normale Station Bilder 7.-1 mit den verbesserten Anlagen Bild 7.-3 ist zu beobachten, dass sich eine Feldstärkenminderung um die verbesserten Anlagenteile zur linken Seite einstellt, was eine positive Eigenschaft

ist. Die Schirmdämpfung beträgt damit rund $S = 2,7$ dB. Der Einfluss fällt aber durch die Mittelspannungseinspeisefelder mit ihren hohen Stromdurchschleifungen zum Gesamtfeld nicht so stark ins Gewicht. An den anderen Seiten tritt damit keine deutlich messbare Feldstärkenverringering auf. Überraschend konnte eine neue Beobachtung gemacht werden. Die magn. Flussdichte ist im Grenzbereich von 0,2 m zur linken Seite zurückgegangen, das Gesamtfeld betrachtet auf den $1\mu\text{T}$ Grenzwert verschlechterte sich um 47 %, d.h. das Feld erweiterte sich noch um rund 0,6 m. Unten wie rechts trat eine leicht Feldverbesserung von 1,7 % bzw. 1 % auf. Daraus lässt sich erkennen, dass die Komponenten in einer Station sich gegeneinander so beeinflussen, dass die Feldgröße, nur durch das Umstellen der Anlagenteile oder Änderung des Eigenfeldes eines Teiles, in seiner Größe (für $1\mu\text{T}$) verringert oder erhöht werden kann. In der Station 3 ist der Hauptverursacher das Mittelspannungseinspeisefeld für die Feldgröße. Für die Feldstärke in der Nähe der linken Seite sind die Niederspannungsverteilungen und die Transformatoren verantwortlich. Versucht man nun die Feldgröße zu verringern, müsste nach diesen Erkenntnissen die MVT Schirmung bei der normalen, wie bei der verbesserten Station fast dieselben Wirkungen erzielen. Das kann mit den Werten der Tabelle A 7.-1 bestätigt werden.

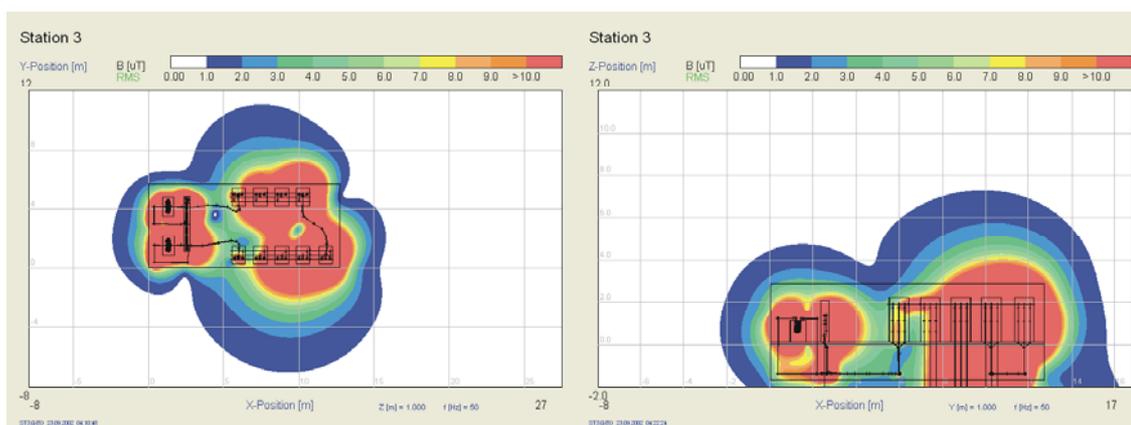


Bild 7.-1

Bild 7.-2

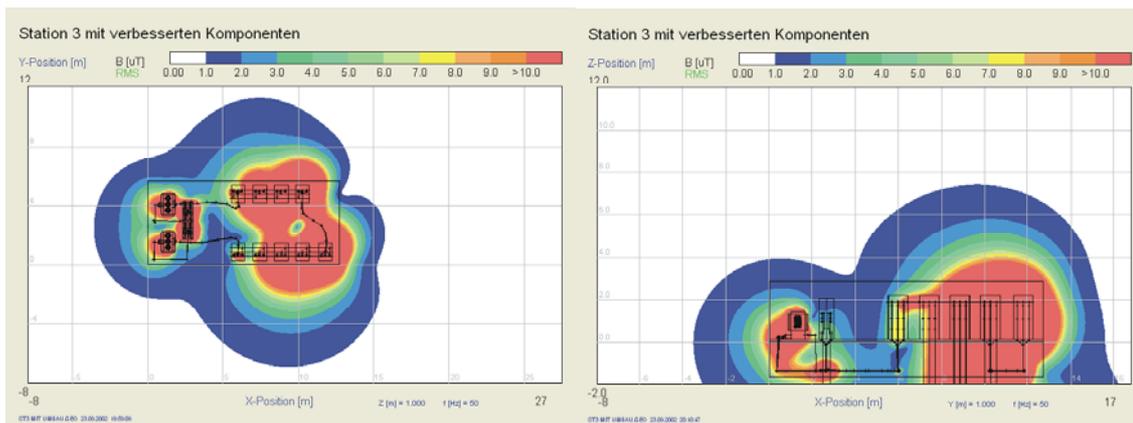


Bild 7.-3

Bild 7.-4

Vergleichsdarstellung des magn. Feldes der Station 3, zwischen normalen und verbesserten Komponenten, Bild 7.-1 bis Bild 7.-4.

Verbesserung ST 3

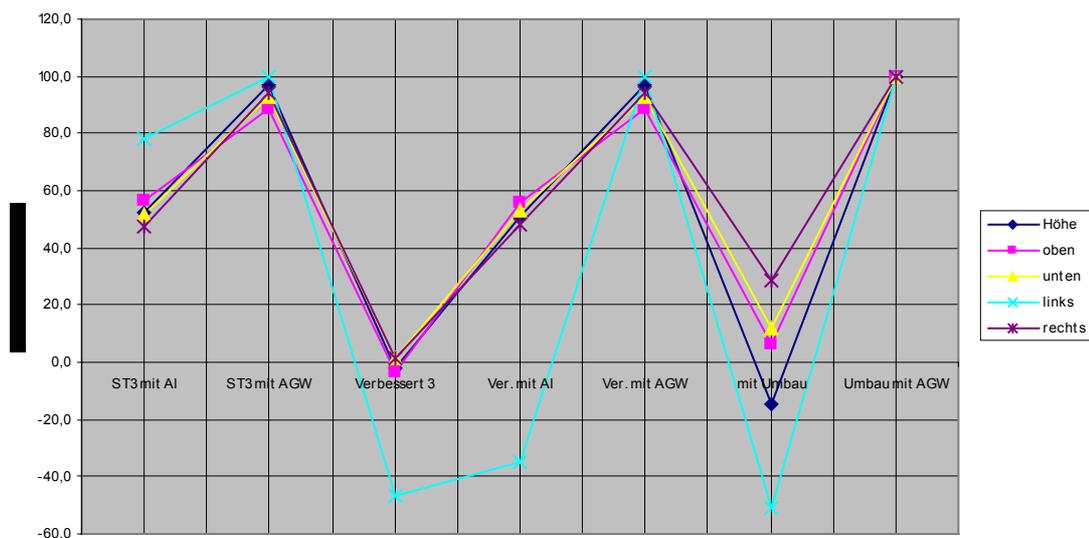


Diagramm 7.-1 Vergleich der prozentualen Verbesserung der einzelnen Maßnahmen zur Feld Verringerung.

Die Anlagen erfuhren bei der Schirmung mit Aluminium (alle Komponenten) eine Schirmdämpfung von durchschnittlich 10 dB mit einer Feldgrößenminderung um 47,5% bis 77,8 %. Da die normale und die verbesserte Anlage fast dieselben Werte aufzeigen, reicht es nur eine Station darzustellen, siehe Bild 7.-5 und 7.6. Eine Ausnahme bildet hier die linke Seite der Anlage. Durch die Konzentration der NVT und der Transformatoren erfährt das Feld der MVT eine

Verschiebung und Abstoßung, durch die anderen Felder, zur linken Seite hin. Damit dieser Fehler noch behoben wird, muss man die Feldeinwirkungen der MVT verringern. Das kann mit den von der Firma cfw entwickelten Aschmaßnahmen erfolgen. Es ergab sich für die Schirmung mit μ Schildern eine Dämpfung von rund 30 dB und eine Feldverringerng um 88,7 % bis 100 % für die normale und die verbesserten Anlagen. Mit dieser Maßnahme konnte man eine Feldminderung an allen Stellen erreichen, Bild 7.-7 und 7.-8. Da das Feld der MVT nun nicht mehr die Ausdehnung hat, konnte es nicht mehr nach links abgestoßen werden, was zu einer Verringerung des Feldes um 100 % führte. Das heißt, es dringt kein Feld über $1\mu\text{T}$ aus der Anlage. Damit man die Grenzwerte an allen Stellen der Anlage einhält, müssen die Mittelspannungsfelder umgesetzt werden. Da in der Anlage genug Platz vorhanden ist, stellt das kein Problem dar. Dazu stellt man die Mittelspannungseinspeisefelder rückseitig aneinander, in die Mitte des Raumes, um das Feld zu konzentrieren.

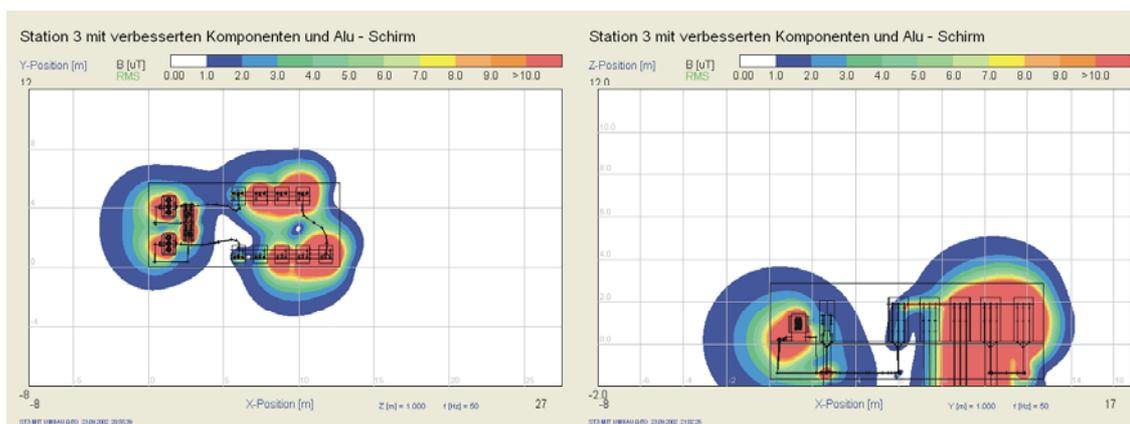


Bild 7.-5

Bild 7.-6

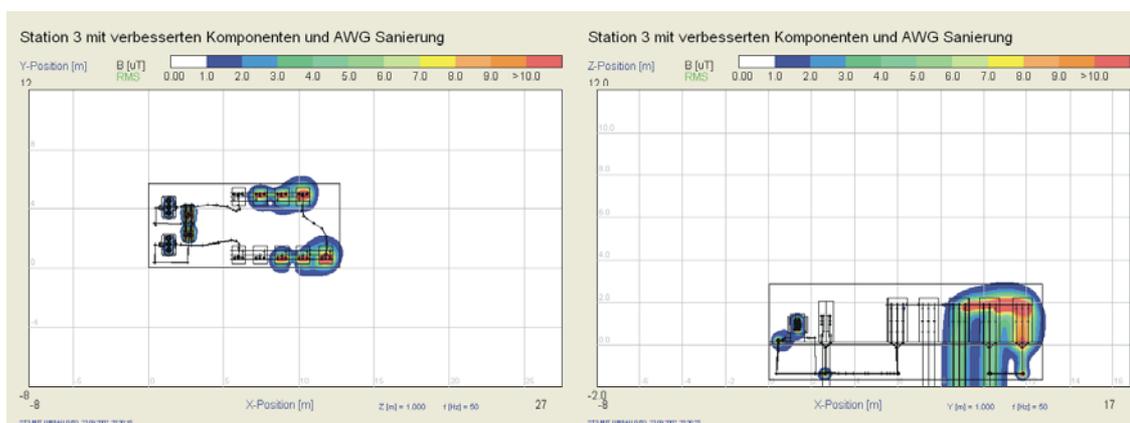


Bild 7.-7

Bild 7.-8

Vergleichsdarstellung des magn. Feldes der verbesserten Station 3, zwischen Aluminiumschirm und μ - Schildern Anwendung, Bild 7.-5 bis Bild 7.-8.

Die umgebaute Anlage mit den verbesserten Komponenten zeigte grundlegend eine Minderung der Feldstärke in allen Bereichen von 4,8 dB bis 20 dB. Die Feldgröße verhielt sich dabei nicht so. Oben, unten und rechts erfolgte eine Feldschmälerung, hingegen in der Höhe und nach links eine Erweiterung um 14,8% und 50,8 %. Dies kann man wieder durch die Abstoßung des umschließenden MVT Feldes der anderen Felder erklären, Bild 7.-9 und 7.-10.

Schirmt man nun diese Trafostation mit den μ Schildern ab, ist eine Einhaltung der Grenzwerte bei maximaler Last garantiert, Bild 7.-11 und 7.-12.

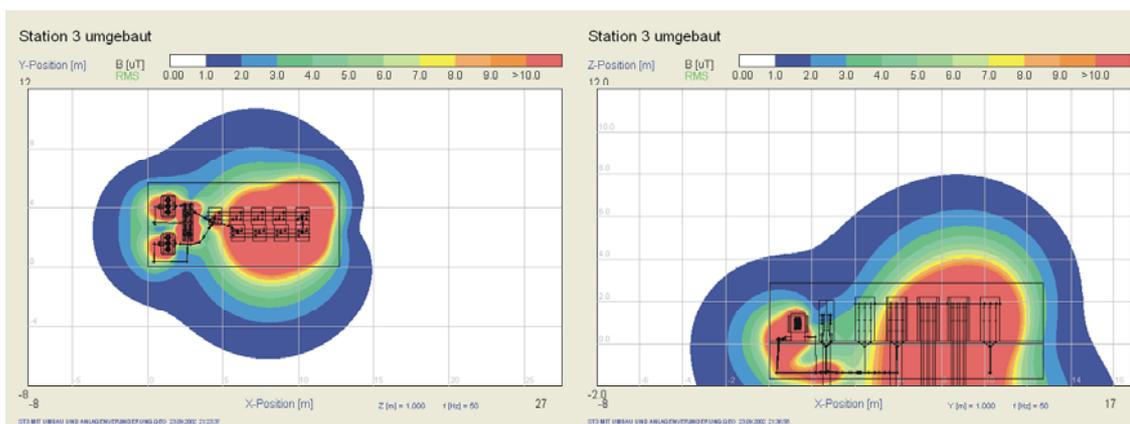


Bild 7.-9

Bild 7.-10

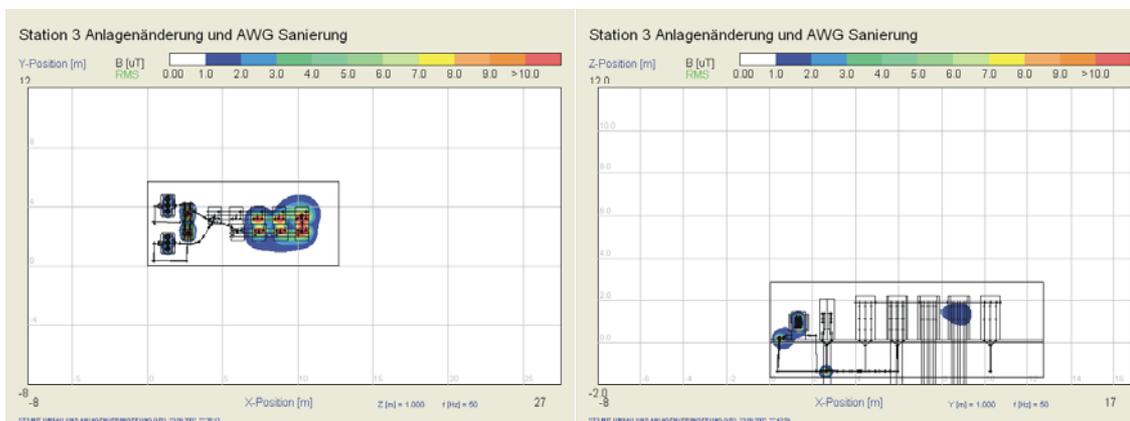


Bild 7.-11

Bild 7.-12

Vergleichsdarstellung des mag. Feldes der veränderten Station 3 mit verbesserten Komponenten, zwischen μ - Schirmen Anwendung und ohne Schirm, Bild 7.-5 bis Bild 7.-8.

Resultierend kann gesagt werden, dass sich die Felder mit den optimierten Komponenten verringern lassen. Es können dabei Feldabstoßungen zwischen den Feldern auftreten, was bei ungünstigen Anordnungen zu einer Feldvergrößerung führt. Weiterhin ist die Aussage möglich, dass eine Feldstärkeminde-

rung nicht gleich eine Feldverkleinerung zur Folge hat. Deshalb muss jede Trafostation für sich untersucht und optimiert werden.

Eine Schirmung ist unabwendbar, um die Grenzwerte einzuhalten. Die Aluminiumschirmung reicht nie aus, um den Werten der NISV gerecht zu werden.

Dafür muss man immer Abschirmung mit hoch permeablen Werkstoffen einsetzen. Bei Bedarf findet eine Umstellung der Geräte innerhalb der Anlage statt.

Mit diesen Erkenntnissen können nun die anderen Stationen einer Analyse unterzogen werden.

Für die anderen Anlagen ist deshalb die Entfernung bis zum Einhalten des Grenzwertes wichtiger, als die Feldstärke B in 0,2 m von der Stationswand. Alle Stationswerte sind in der Tabelle A 7.-2 im Anhang aufgeführt. Mit der Entfernung ist die Überschreitung des Grenzwertes in m gemeint, wobei die prozentuale Differenz angibt, um wie viel das Feld verringert wurde.

Die Gegenüberstellung ist bei allen Anlagen gleich ausgefallen. Es fand ein Vergleich der Trafostationen mit normalem Aufbau zu Stationen mit optimierten Komponenten und cfw Abschirmung statt.

Es zeigte sich, dass man bei allen Stationen, nur durch die Anwendung von optimierten Geräten keine ausreichenden Resultate erzielen konnte. Deshalb sind noch zusätzlich μ - Schirme angebracht worden.

Die Station 1 wies bei normaler Verbesserung in allen Bereichen eine Verringerung des Feldes bis auf die linke Seite auf. Es dehnte sich um 0,8 m mehr aus als vorher. Dort ist der Einfluss der MVT wieder zum tragen gekommen. Das beste Resultat konnte nach unten mit 1,9 m gewonnen werden. Es erklärt sich dadurch, dass eine Platzierung einer optimierten NVT in der Mitte der Station stattfand. Nimmt man nun noch die Schirmung hinzu kann, außer bei der linken Seite mit 0,2 m und 0,4 m nach oben, das Feld um 100 % minimiert werden. Eine Umstellung der MVT kann man hier leider nicht durchführen, da dies die Räumlichkeiten nicht erlauben. (Anhang B Bild B 7.-1 bis 7.-4)

Abstand bis AGW der NVT1

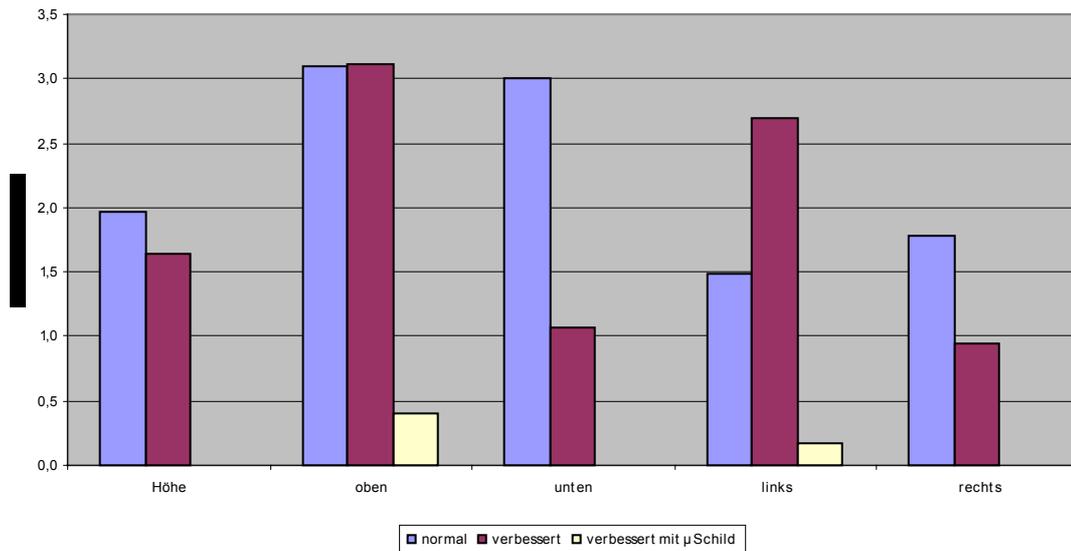


Diagramm 7.-2 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 1.

Die Station 2 zeigt unten, mit 0,7 m, eine leichte Erhöhung gegenüber den einfachen Anlagen. Dies gründet auf den Niederspannungsanschlüssen der EMV Transformatoren. Die Anschlüsse sind näher an der Wand geführt, da sie zur Seite weggehen und damit das Feld erweitern. Die höchste Feldreduzierung ist im Bereich über der Station mit 1,4 m gemacht worden.

Der Einfluss durch die MVT ist durch eine erhöhte Entfernung von der Wand in den Hintergrund gerückt. Da auch hier noch keine ausreichenden Resultate erzielt werden konnten, ist die Anwendung einer Schirmung nicht zu vermeiden. Hiermit kann man das gesamte Feld auf unter 1 μ T im Abstand von 0,2 m der Anlage verkleinern.

Somit ist die NIS – Verordnung eingehalten. (Anhang B Bild B 7.-5 bis 7.-8)

Abstand bis AGW der NVT 2

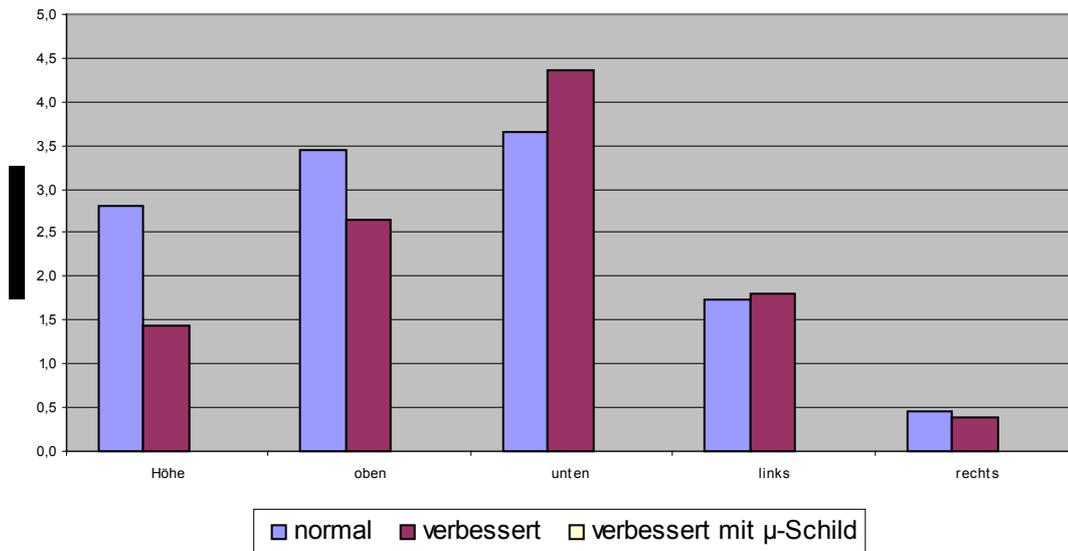


Diagramm 7.-3 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 2.

Die Station 3 hat bei den optimierten Komponenten gegenüber der normalen Anordnung eine Schwäche auf der linken Seite von 1,1 m. Diese Anlage ist in diesem Abschnitt schon erläutert worden, so dass nur das Ergebnis mit dem Umbau, von einer 100%tigen Feldminderung angegeben werden kann. (Anhang B Bild B 7.-9 bis 7.-12)

Abstand bis AGW der NVT 3

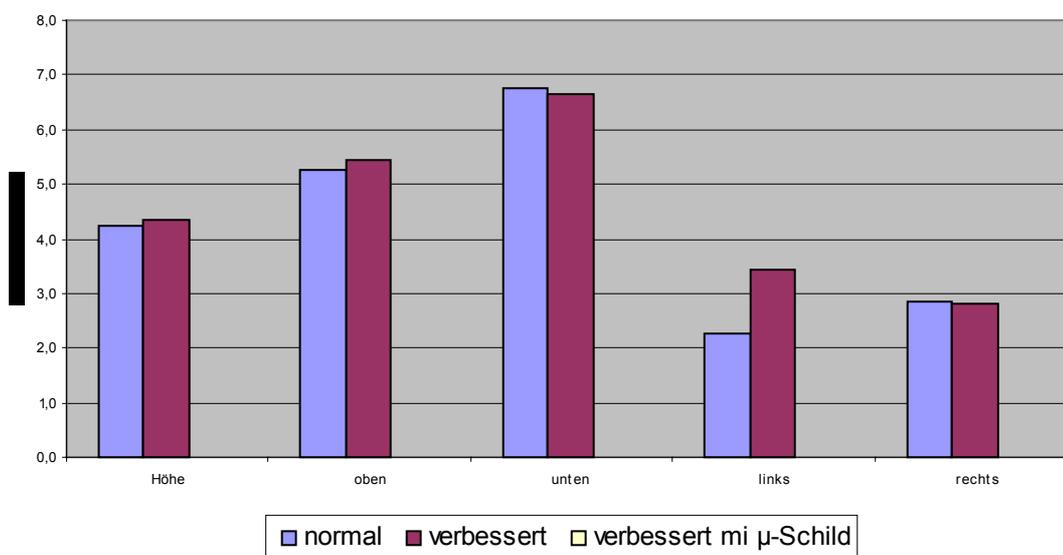


Diagramm 7.-4 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 3.

Die Station 4 weist ihre größte Schwäche von 0,4 m zwischen dem optimierten Anlagenteilen und den normalen auf. Die Quelle ist wieder eindeutig der MVT, mit ihren hohen Durchschleifströmen zuzuschreiben, kann aber mittels ihrer geringen Stationsabmaße nicht behoben werden. Das beste Ergebnis zeigt sich in der Höhe mit 1 m Verbesserung. Setzt man nun noch Schirmmaßnahmen ein, ist eine Feldminderung um 100 % bis auf die linke Seite mit 88,1 % möglich. Dies ist durch die MVT bedingt, da sich hier noch unkompenzierte Ströme befinden, beträgt die Entfernung bis zur Einhaltung des Grenzwertes 0,3 m. (Anhang B Bild B 7.-13 bis 7.-16)

Abstand bis AGW der NVT4

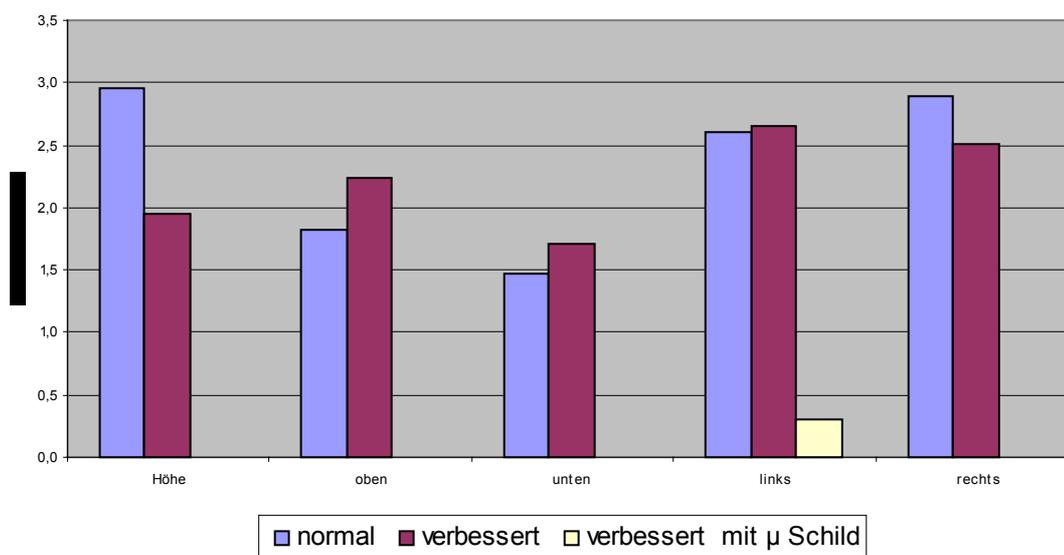


Diagramm 7.-5 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 4.

Station 5 zeigt allerorts eine Verbesserung, wobei das beste Ergebnis über der Anlage mit einer Minimierung um 1,1 m erlangt werden konnte. Da trotzdem noch eine Überschreitung der Grenzwerte von 1,7 m bis 2,6 m auftrat, muss hier noch geschirmt werden. Damit lässt sich bis auf oben mit 89,6 %, was hier ungefähr 0,3 m entspricht, eine Feldminderung von 100 % erzielen. Als Ursache können die Mittelspannungseinspeisefelder angegeben werden. Durch die kleine Bauweise ist ein Umplatzieren der MVT stark erschwert, da keine Sicherheitsabstände, wie für Fluchtwege behindert werden dürfen. (Anhang B Bild B 7.-17 bis 7.-20)

Abstand bis AGW der NVT 5

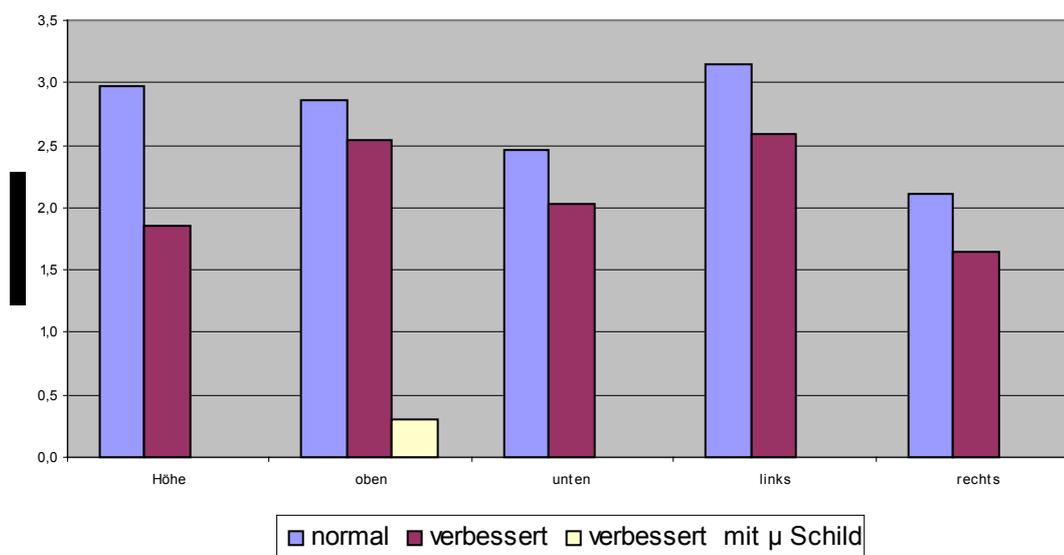


Diagramm 7.-6 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 5.

Die Station 8 hat nur Feldminderungen in allen Bereichen durch den Einsatz von optimierten Anlagen aufzuweisen. Die stärkste Minimierung tritt dabei über der Station mit 2,2 m auf. Eine Anwendung der cfw – Schirme ist aber auch hier unabkömmlich. Damit unterschreitet die gesamte Anlage die Werte der Schweizer Verordnung. (Anhang B Bild B 7.-21 bis 7.-24)

Abstand bis AGW der NVT 8

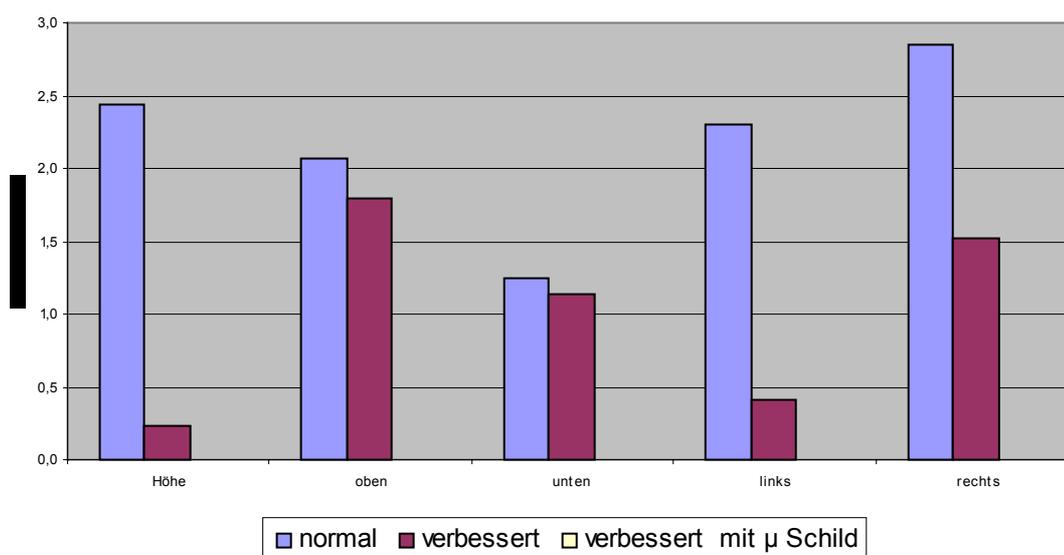


Diagramm 7.-7 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 8.

Die Station 9 weist auch, wie die Transformatorstation 8 mit der Anwendung der optimierten Geräte ohne Ausnahme, eine Feldverringerng auf. Das beste Ergebnis kann wieder über die Station mit 1 m erzielt werden. Da man auch hier noch nicht die Grenzwerte einhält, muss die Schirmung zum Einsatz kommen. Diesmal zeigt sich, dass die Einspeisung der NVT das Einhalten der Anlagen-grenzwerte verhindert. Da sie an der unteren rechten Ecke der Station platziert ist, treten hier auch die Störquellen mit 0,2 m, d.h. eine Feldverringerng für unten 93,9 % und rechts 92,8 %, auf. Als Gegenmaßnahmen kann keine Verschiebung der Niederspannungsverteilung durchgeführt werden, weil es sich um eine Kompaktstation handelt, wo die Abstände auf ein Mindestmaß reduziert sind. Es bleiben also nur noch die Möglichkeiten der Anstandshaltung und der Einbringung einer zusätzlichen Schirmplatte. (Anhang B Bild B 7.-25 bis 7.-28)

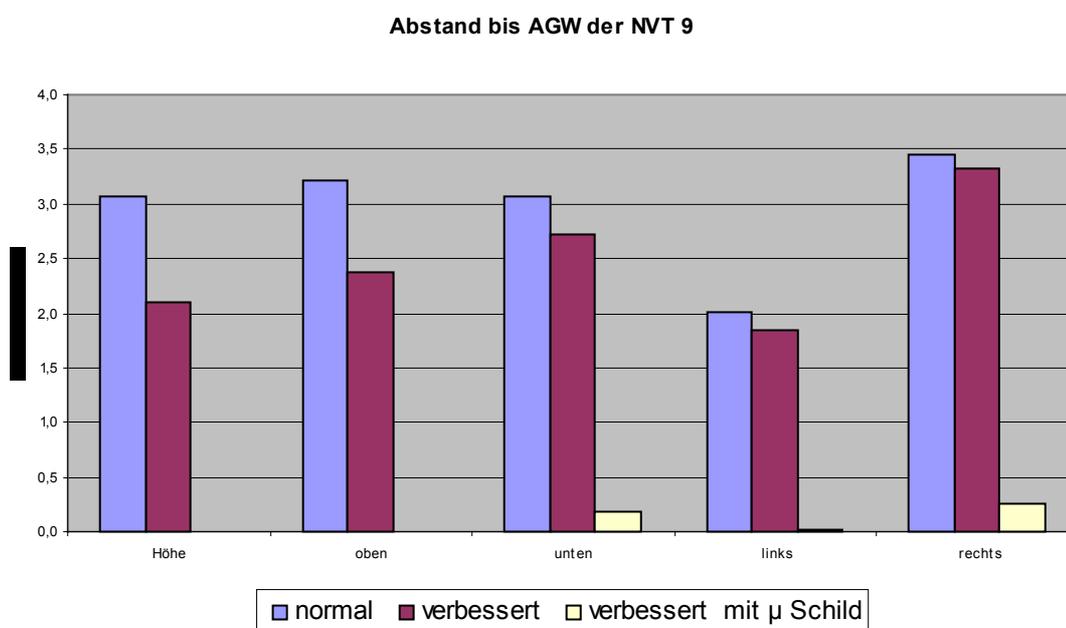


Diagramm 7.-8 Vergleich zwischen den Verbesserungsmaßnahmen, bis zum Einhalten der AGW Grenzen, der Station 9.

Es wird deutlich gezeigt, dass man allein durch die optimierten Komponenten eine zum Teil sehr große Feldminderung erzeugen kann. Diese reicht aber nicht aus, um die Grenzwerte der Schweizer NIS- Verordnung einzuhalten. Dafür ist zusätzlich eine hoch Permeable Abschirmung notwendig, welche unter schlechten Bedingungen auch noch keine Einhaltung garantiert. Von sieben verbesserten und geschirmten Anlagen sind drei in der Lage, auch mit Ände-

rungen, die Grenzwerte zu unterschreiten. Die anderen müssten über Modifikationen und extra Einsatz von Schirmen angepasst werden.

Weiter konnte beobachtet werden, dass sich die Anwendung optimierter Anlagenteile auch negativ auf das Gesamtfeld auswirken kann. Dabei findet eine Abstoßung des Feldes, das die verbesserten Felder umgibt, statt. Das führt dazu, dass sich das Feld an einigen Stellen ausdehnt, obwohl die Feldstärke in der Nähe sinkt. Dies wurde meistens durch das Feld der MVT verursacht. Mit den hohen Spannungen, die in dieser Anlagenkomponente vorliegen, ist eine Optimierung für die EMV gerechte Anwendung schwer zu bewerkstelligen. Vorerst bleibt nur die Abschirmung zum Mindern des Feldes.

8 Kostenbeurteilung der Optimierungsmaßnahmen

Die in den vorherigen Kapiteln gemachten Erkenntnisse über die Verbesserungsmöglichkeiten des Feldes, werden in diesem Abschnitt einer Kosten- Leistungsrechnung unterzogen. Denn nicht jede Optimierung ist wirtschaftlich vertretbar.

Für die Berechnung werden die Preise vom 24.09.2002 verwendet, da es in den Metallbörsen täglich zu Schwankungen kommt und somit nicht jede angewandte Quelle zum gleichen Ergebnis führt. Dennoch kann eine Tendenz über die Gebrausfähigkeit der Optimierungsmaßnahme angegeben werden. Dabei muss aber bedacht werden, dass man hier nur die Wirkung des Wirbelstromeffektes, außer für die μ - Schilde, bei den Materialien vergleicht.

8.1 Starkstromleitungen

Im Abschnitt 6.2.6 sind die Optimierungsmaßnahmen beschrieben, die zu einer Verringerung des mag. Feldes führen. Daraus können die Kosten pro dB für die Schirmdämpfung berechnet werden.

Zur Berechnung dient ein Niederspannungs-Kunststoffkabel NYY-J 4x240 mm². Die Kosten des Kabels errechnen sich aus dem normalen Kabelpreis von 18,26 €/m und dem Kupferzuschlag von 16,58 €/m, dies macht einen Gesamtpreis für 100 Meter von 3.484,00 €.

Die einzelnen Leiter sind jeweils mit 1KA Strom belastet und auf 20 km verlängert, um den Randeffect für die Schirmung zu verringern.

Für den Kabelkanal kommen Aluminiumplatten mit 4 mm für 90€/m² und CFW-Trassenabschirmung zum Einsatz. Es werden hier allerdings keine Installations- bzw. Umbaukosten mitbetrachtet.

Für den einfachen Kabelkanal wurden die Maße 100 x 0,40 x 0,20 m verwendet, für den Doppelkanal ist 100 x 0,4 x 0,4 m. Hierbei ist zu beachten, dass im Doppelkanal zwei Kabel vorhanden sind.

	Dämpfung in dB	Mehrkosten	€/dB	Mehrkosten in %
einfach Kabel	1,00	0,00	0,00	0,00
doppel Kabel	8,59	3.484,00	405,64	100,00
einfach Kanal mit Al Schirm	10,90	7.316,00	671,14	209,99
doppel Kanal mit Al-Schirm	19,53	17.884,00	915,86	513,32
einfach μ Kanal	28,63	keine Angaben		
doppelt μ Kanal	37,22	keine Angaben		

Tab. 8.1 – 1 Kostenübersicht für verschiedene Feldverringernungsmaßnahmen für Kabel.

Aus der Tabelle ist abzulesen, dass die Kosten für 1 dB Schirmdämpfung mit dem Grad der Dämpfung steigt, d.h. umso stärker ein Feld gedämpft wird je mehr kostet 1 dB. Daraus kann man ableiten, dass man die Kosten durch eine genaue Planung erheblich senken kann. Würde man eine Feldverringernung, von 8,5 dB benötigen, so ist dies mit doppelt verlegten (kompensierten) Kabeln oder durch eine einfache Drehstromanordnung mit Al – Schirmung zu bewerkstelligen. Die reinen Materialkosten für die Doppelverlegung würden für 100 m 6.968 € betragen, für die einfache Al – Schirmung 10.800 €. Damit entstehen Mehrkosten von 55 %, die vermieden werden könnten, da hier die Anwendung einer Doppelleitung ausreicht.

8.2 Niederspannungsverteilung

Bei den Niederspannungsverteilungen ist eine größere Auswahl von Verbesserungsmethoden vorhanden.

Der Umbau oder auch die Verschiebung der Verteilung können fast ausschließlich nur bei Neuprojektierungen von Anlagen angewendet werden. Vereinzelt ist dies auch bei Altanlagen möglich, aber da meist kein Platz vorhanden oder zu teuer ist wird von einer Einbeziehung in die Kostenbetrachtung abgesehen. Bei einer Neuerrichtung einer Station wird die Belastung für eine abgewandelte Bauart gering ausfallen.

Als erstes werden die Abschirmungskosten für 4 mm starke Metallplatten, mit Hilfe der NVT 1 betrachtet.

Hierzu werden gängige Materialien wie Aluminium, Kupfer und Stahl verwendet. Die Tagespreise der einzelnen Platten betragen:

Cu	= 245 €/m ²
Al	= 90 €/m ²
St	= 40€/m ²

Material	Dämpfung	Schirmfaktor	Preise	Kostenverhältnis
	in dB		in €	In €/dB
St	3,84	1,56	40,00	10,42
AL	9,78	3,08	90,00	9,20
Cu	11,14	3,61	245,00	21,99

Tab. 7.2 -1 Kosten - Leistungsvergleich zwischen den Materialien

Die in der Tabelle angegebenen Werte lassen den eindeutigen Schluss zu, das Aluminium das beste Preis- Leistungsverhältnis besitzt. Kupfer schirmt am stärksten ab, ist aber im Gegensatz zu den anderen zu teuer, um eingesetzt zu werden. Stahl kann seinerseits nicht durch seine Wirbelstromdämpfung überzeugen. Die Bypasswirkung von Stahl konnte leider nicht mit einbezogen werden, da es in der Option „Platte“ der Software nicht mit berechnet wird.

Zweitens wird nun durch die vorhergehende Betrachtung ein Vergleich zwischen einem PowerMan und einer komplett geschirmten NVT mittels Aluminiumplatten möglich. Es wird wieder von Installationskosten abgesehen.

Die abzuschirmende Fläche hat eine Größe von 12,63 m². Damit lässt sich ein Preis für die 4 mm Aluminiumabschirmung von 1.136,48 € errechnen. Die Belastung durch die PowerMan – Abschirmung liegt mit 4054,2 € wesentlich höher, ist aber durch den erheblich besseren Schirmfaktor genauer zu betrachten. Beim direkten Dämpfungsvergleich zwischen der AGW - Abschirmung mit 128,32 €/dB und Aluminium mit 104,44 €/dB ist ein leichte Differenz zu Ungunsten der AWG - Abschirmung zu erkennen.

Eine Schlussfolgerung kann nun in soweit gezogen werden, dass bei einer erheblichen Schirmdämpfung der PowerMan vorzuziehen ist, da hier die Kosten für eine erweiterte Dämpfung niedrig ausfallen. Bei geringerem Schirmungsbedarf ist die Aluminiumabschirmung ausreichend und damit die kostengünstigere Variante.

8.3 Transformator

Bei den Transformatoren gibt es wiederum zwei Möglichkeiten der Feldverringern. Zum einen kann ein EMV reduzierter Transformator verwendet werden, was meist nur bei Neuerrichtung oder Auswechslung defekter Transformatoren genutzt werden kann, oder zum anderen die Schirme der CFW EMV - Consulting AG.

Die erste Möglichkeit bietet den Vorteil der besseren Zugänglichkeit zu den einzelnen Transformatorbestandteilen, wie Kerzen oder Kabel. Aber durch sein größeres Feld, im Vergleich zur AGW Abschirmung, kann er wiederum nur eingeschränkt eingesetzt werden. Der große Nachteil liegt aber in den teuren Umbauarbeiten bei Alt – Anlagen, die meist nicht über den ausreichenden Platzbedarf verfügen und die Kosten für den Erwerb eines zusätzlichen EMV - Transformators steigern. Der Preis ist deshalb sehr individuell und schwer abzuschätzen.

Die zweite Möglichkeit ist von größerer Bedeutung. Hiermit kann jeder Transformator geschirmt werden, der bis zu den Außenwänden einen Abstand von mindestens 0,15 m aufweist. Die Kosten ohne Einbau liegen für ein TrafoMan TRM 205/M bei 5.881,20 €, mehr Informationen gibt es unter der Internetseite www.cfw.ch.

Durch Kombination kann das Feld wesentlich verringert werden, was sich wiederum in den Kosten niederschlägt. Das wiederum kann den Preis für eine Anlage so stark erhöhen, dass es den Kosten/Nutzen garantiert übersteigt. Deshalb ist auch hier eine genaue Planung anzuraten.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit sollte untersucht werden, ob die Einhaltung der nicht ionisierenden Strahlungsverordnung für die magnetische Flussdichte bei Netzstationen realisierbar ist.

Da der vorgeschriebene Anlagengrenzwert von $1\mu\text{T}$ (bei 50 Hz) weit unter dem der BImSchV liegt, konnten Maßnahmen, die in den vorhergehenden Arbeiten nur geringe Auswirkungen zeigten, von erheblicher Bedeutung sein. Deshalb sind die Verbesserungen der Anlagenkomponenten nochmals untersucht und erneut bewertet worden.

Zu diesem Zweck fand die Berechnung des magnetischen Feldes mit Hilfe des Programms WinField der Firma FGEU statt. Diese Software, zur Ermittlung der magnetischen Flussdichte, basiert auf dem Gesetz nach Biot und Savart. Die so errechneten Felder der Anlagen und Komponenten sind worst case Fälle, da der Materialeinfluss von Gehäusen nicht beachtet und die Anlagen maximal ausgelastet wurden.

Es wurde festgestellt, dass die magn. Felder bei Betrachtung der $1\mu\text{T}$ Isolinien, (in Entfernungen von einigen Metern) zu Unsymmetrien führten. Meist war dies auf den Randeffect zurückzuführen und konnte mit der Verlängerung der nicht angeschlossenen Leiter behoben werden. In einigen Fällen reichte es auch, die Leiter kurz und verdreht auszuführen.

Als Hauptverursacher konnte man die Niederspannungsverteilung ermitteln, wodurch die meiste Aufmerksamkeit dieser Gerätekombination zufiel. In den ersten Tests konnte man feststellen, dass bei der normalen NVT bis zum Einhalten der Grenzwerte mehrere Meter nötig sind.

Eine Feldverbesserung konnte dann durch eine konstruktive Veränderung erzielt werden. Dabei stellte man die halbierte NVT phasenoptimiert rückseitig aneinander und verlegte die Einspeisung in die Mitte. So konnten, bis auf eine Ausnahme, sehr gute Ergebnisse von bis zu 95 % erzielt werden. Die Verringerung des Feldes lag im Durchschnitt bei rund 42 %. Für die Einhaltung der Grenzwerte ist das aber noch nicht ausreichend, weshalb man noch zusätzlich Schirme verwendete.

Als nicht nützlich für 50 Hz erwiesen sich Schirme, die auf dem Wirbelstromprinzip basieren. Wirksame Ergebnisse konnten dabei mit dem Bypassverfahren (Nebenschluss) erzielt werden. Die von der Firma cfw bereitgestellten Schirme konnten die Flussdichte bis auf 0,3 m an die NVT heranbringen. Rech-

net man nun noch eine Mauerstärke von 0,2 mit ein, so kann der Grenzwert überall eingehalten werden.

Die Mittelspannungsschaltfelder erzeugen nach der NVT die stärksten Felder. Weil hier wenige Leiter in großen Abständen vorhanden sind, fällt die Feldstärke geringer ab als beim Transformator. Eine Optimierung der Konstruktion erwies sich hier nicht für alle Stationen als anwendbar und sehr schwierig. Darum ist in dieser Diplomarbeit darauf verzichtet worden. Zur Feldminderung kamen wieder die Schirme der Firma cfw zum Einsatz. Trotzdem konnte man eine Überschreitung der Grenzwerte feststellen, was sich später auch als Nachteil zeigen sollte.

Für die Verringerung der Flussdichte eines Transformators konnte ein EMV reduzierter Transformator eingesetzt werden. Er minimierte vor allem das Feld in Richtung der Z Achse. Man konnte bei beiden Umspannern mit dem cfw – Schirm für Transformatoren die Feldgröße soweit verkleinern, dass kein Feld oberhalb von $1\mu\text{T}$ außerhalb der Anlagenmauern zu messen ist. Darum ist es nicht unbedingt notwendig ein EMV Transformator einzusetzen, wenn noch eine Schirmung nötig ist.

Zum Stromtransport zwischen der NVT und der MVT sind Kabel erforderlich. Da diese auch die hohen Ströme leiten, die in den Komponenten vorhanden sind, konnte nicht darauf verzichtet werden, sie zu untersuchen.

Das Feld der Kabel fällt im Gegensatz zu den anderen Anlagenteilen nur mit $\frac{1}{r}$

ab. Darum sind die Entfernungen bis zum Erreichen der Grenzwerte sehr groß, bei einem Drehstromsystem mit 1kA Belastung erst über 7,2 m. Um die Bedingungen der NIS – Verordnung einzuhalten, wurde ein kompensiertes Doppelsystem mit cfw – Trassenabschirmung eingesetzt.

Es konnte aber keine befriedigende Lösung damit erzielt werden, da man die Grenzwerte erst ab 0,7 m unterschreitet.

Diese Erkenntnisse konnte man nun für die Anlagen verwenden.

Jetzt sind alle optimierten Anlagenteile mit Schirmen in die Transformatorstationen integriert worden. Damit war es möglich die Felder für drei Anlagen so zu verringern, das man die Anlagengrenzwerte unterschritt. Für die anderen vier Stationen ergaben sich nur wenige Zentimeter bis zum Einhalten der Grenzwerte.

Geht man davon aus, dass es sich bei den Berechnungen um den worst case Fall handelt, so ist im normalen Betrieb keine Grenzwertüberschreitung für die NIS – Verordnung vorhanden.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die mag. Flusssdichte mit optimierten Anlagenkomponenten gesenkt werden kann, aber eine Einhaltung der Grenzwerte erst durch die Anwendung von hoch permeablen Werkstoffen möglich ist. Wiederum ist es andererseits auch nicht möglich nur die Schirme einzusetzen, da sich viele Stationen erst durch das Optimieren der Komponenten unter die Grenzwerte begeben. Die Kosten, welche durch einen solchen Umbau und durch die Abschirmung entstehen, sind noch akzeptabel. Beginnt man schon in der Planungsphase mit der Auswahl von EMV reduzierten Teilen und besserer Platzierung, kann dadurch noch gespart werden. Mit der Verwendung von Feldberechnungssoftware kann man im Planungsstadium schon wirksame Veränderungen vornehmen.

Sollten die Grenzwerte der NISV auch hier in Deutschland geltend gemacht werden, müsste man für jede Anlage die anzuwendenden Maßnahmen bestimmen, um nicht unnötig Kosten für Änderungen auszugeben. Problematisch können Kompaktanlagen sein, da durch ihre kleine Bauweise die optimierten Komponenten wenig Platz finden, da sie veränderte Abmaße besitzen die nicht passgenau mit den normalen sind.

Würden neue Untersuchungen krankheitsverursachende Auswirkungen für noch geringere Felder beweisen können, müssten die Grenzwerte wahrscheinlich noch mehr gesenkt werden. Die daraus resultierenden Änderungen für die Anlagen sind wahrscheinlich nur noch durch Neukonstruieren der gesamten Station und aller Komponenten, Verwendung von noch besseren Schirmen, durch Abgrenzen der Transformatorstationen zu stark genutzten Flächen und Wahl anderer Standorte einzuhalten.

10 Anhang A

Tabelle A 4.3.-1

Tabellen A 4.5.-1 bis A 4.5.-3 Rastergrößenbestimmung für WinField

Rastergröße dx/dz in m	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
Rechenzeit in s	<1	2	9	34	157	563	2368
Maximalwert	10,845	12,986	13,059	13,098	13,098	13,108	13,108
Durchschnitt	2,287	2,46	2,555	2,604	2,608	2,627	2,643
S	2,327	2,385	2,414	2,429	2,415	2,392	2,427
Abweichung							
in % für Xmax	-17,264	-0,93	-0,374	-0,076	-0,076	0	0
in % für X _{Durchschnitt}	6,05	3,71	-2,54	0,08	-2,5	-3,43	-2,02

Tabelle A 4.5.-2

Rastergröße	0,05				0,025			
Interpolations- Schritte	1	2	3	4	1	2	3	4
Rechenzeit	81	56	43	35	346	213	177	136
Maximalwert	13,098	13,097	13,059	13,097	13,105	13,102	13,105	13,102
Durchschnitt	2,495	2,495	2,495	2,495	2,438	2,438	2,438	2,438
S	2,375	2,375	2,375	2,375	2,328	2,328	2,328	2,328
in % für Xmax	-0,076	-0,084	-0,374	-0,084	-0,023	-0,046	-0,023	-0,046
in % für X _{Durchsch.}	0,73	0,73	0,73	0,73	-1,57	-0,157	-1,57	-1,57
interpol. Error	0,17%	3,18%	0,57%	0,83%	0,06%	0,10%	0,17%	0,23%
dynamische Interpolation								
Rechenzeit	85	94	128	145	333	232	176	202
Maximalwert	13,098	13,098	13,098	13,098	13,105	13,102	13,108	13,108
Durchschnitt	2,495	2,495	2,495	2,495	2,438	2,438	2,438	2,438
S	2,375	2,375	2,375	2,375	2,328	2,328	2,328	2,328
in % für Xmax	-0,076	-0,076	-0,076	-0,076	-0,023	-0,046	0	0
in % für X _{Durchsch.}	0,73	0,73	0,73	0,73	-1,57	-1,57	-1,57	-1,57
interpo.Error	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%	0,04%	0,07%	0,10%	0,09%

Tabelle A-4.5.-3

Rastergröße	0,013				0,007
Interpolations-					
schritte	1	2	3	4	1
Rechenzeit	1261	853	612	478	-
Maximalwert	13,108	13,106	13,104	13,106	anderer
Durchschnitt	2,517	2,517	2,522	2,479	Rechner
S	2,366	2,366	2,368	2,362	für
in % für Xmax	0	-0,015	-0,03	-0,015	Referenz-
in % für $X_{\text{Durchschnitt}}$	1,61	1,61	1,81	0,08	wert
interpol. Error	0,04%	0,03%	0,06%	0,08%	-
dynamische					
Interpolation					
Rechenzeit	1213	835	621	499	-
Maximalwert	13,108	13,106	13,104	13,106	13,108
Durchschnitt	2,474	2,479	2,474	2,479	2,477
S	2,361	2,362	2,361	2,362	2,34
in % für Xmax	0	-0,015	-0,03	-0,015	0
in % für $X_{\text{Durchschnitt}}$	-0,12	0,08	-0,12	0,08	0
interpo.Error	0,03%	0,03%	0,04%	0,06%	-

Tabelle A 5.2.3.-1

Vergleichsmessung für die Längenbestimmung von Drehstromsystemen

Leiterlänge	Berechnet	Werte	Differenz
	in μT	in μT	in %
	5,774		
6 m		4,073	29,46
8 m		4,609	20,18
12 m		5,153	10,76
16 m		5,395	6,56
20 m		5,519	4,42
40 m		5,699	1,30
50 m		5,722	0,90
60 m		5,733	0,71
200 m		5,758	0,28
2000 m		5,761	0,23
10000 m		5,763	0,19
30000 m		5,763	0,19

Tabelle A 5.2.3.-2

Vergleichsmessung für die Längenbestimmung von Einzelleitern

Länge in m	Messung in m	Berechnet in m	Differenz in %
		200	
2	14,126		92,94
20	44,16		77,92
50	68,529		65,74
200	124,974		37,51
2000	196,296		1,85
4000	199,039		0,48
8000	199,576		0,21
30000	199,981		0,01
100000	200		0,00

Tabelle A 5.2.3.-3

Vergleichsmessung für die Längenbestimmung von Drehstromsystemen

Länge in m	Messung in m	Berechnet in m	Differenz in %
		7,208	
2	3,685		48,876
20	6,586		8,629
50	7,07		1,915
200	7,198		0,139
2000	7,207		0,014
4000	7,207		0,014
8000	7,207		0,014
30000	7,207		0,014
100000	7,207		0,014

Tabelle A 5.2.4.-1

Vergleich bei unsymmetrischem Aufbau von NVT - Abgängen

	Art	Höhe	oben	unten	links	rechts
alles in m	Grundmodell	2,846	2,487	1,987	1,232	2,930
2x2 halbiertes	4 Mitte	2,671	2,273	1,773	1,124	2,729
2x2 halbiertes	4 außen	2,661	2,289	1,790	1,094	2,699
2 links außen	2 rechts innen	2,692	2,300	1,801	1,092	2,739
2 links innen	2 rechts außen	2,639	2,418	1,918	0,983	2,724
	2 links außen	2,796	2,545	2,045	1,030	2,870
	2 links innen	2,778	2,396	1,896	1,171	2,841
	2 rechts außen	2,715	2,552	2,021	1,049	2,827
	2 rechts innen	2,744	2,523	2,023	1,047	2,848

Noch zu Tabelle A 5.2.4.-1

Vergleich bei unsymmetrischem Aufbau von NVT - Abgängen

Art		Höhe	oben	unten	links	rechts
alles in m	Grundmodell					
eine Seite nur vier Leiter						
links	4 vorn 4 hinten	2,799	2,424	1,923	1,159	2,85
hinten 3	außen fehlt	2,776	2,459	2,509	1,122	2,828
	innen fehlt	2,765	2,29	1,976	1,148	2,809
rechts	4 vorn 4 hinten	2,71	2,366	1,865	1,189	2,778
hinten 3	außen fehlt	2,661	2,293	2,019	1,221	2,75
	innen fehlt	2,662	2,226	1,976	1,199	2,734
alles in %		Höhe	oben	unten	links	rechts
Grundmodell						
2x2 halbierter	4 Mitte	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2x2 halbierter	4 außen	0,374	-0,704	-0,959	2,669	1,099
2 links außen	2 rechts innen	-0,786	-1,188	-1,579	2,847	-0,366
2 links innen	2 rechts außen	1,198	-6,379	-8,178	12,544	0,183
	2 links außen	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2 links innen	0,644	5,855	7,286	-13,689	1,010
	2 rechts außen	2,897	-0,275	1,174	-1,845	1,498
	2 rechts innen	1,860	0,864	1,076	-1,650	0,767
eine Seite nur vier Leiter						
links	4 vorn 4 hinten					
hinten 3	außen fehlt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	innen fehlt	0,396	6,873	21,244	-2,317	0,672
rechts	4 vorn 4 hinten					
hinten 3	außen fehlt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	innen fehlt	-0,038	2,922	2,130	1,802	0,582

Tabelle A 5.2.4.-2

Messwerte der normalen und verbesserten Niederspannungsverteilungen

NVT 1										
Höhe in m	Links	Rechts	Oben	Unten	Abmaße der Verteilungen in m					
Normal	in m	in m	in m	in m	Normal	Links	Rechts	Oben	Unten	
3,680	0,918	4,373	3,615	3,329	1,950	0,000	2,650	0,350	0,000	
Verbessert1					Verbessert					
2,029	0,241	2,708	2,019	1,322	1,950	0,000	1,737	0,700	0,000	
NVT 2										
Normal					Normal					
3,833	1,453	6,900	4,135	3,816	1,950	0,000	4,200	0,350	0,000	
Verbessert 2					Verbessert					
2,574	0,815	3,539	2,307	1,607	1,950	0,000	2,723	0,700	0,000	
NVT 3										
Normal					Normal					
3,737	1,625	4,128	3,740	3,368	1,950	0,000	1,440	0,350	0,000	
Verbessert 3					Verbessert					
2,454	0,639	1,904	1,962	1,262	1,950	0,000	0,487	0,700	0,000	
NVT 4										
Normal					Normal					
3,507	1,648	2,840	2,614	2,212	1,980	0,000	1,800	0,320	0,000	
Verbessert 4					Verbessert					
2,869	1,246	2,097	1,989	1,348	1,980	0,000	1,016	0,640	0,000	
NVT 5										
Normal					Normal					
3,636	1,832	3,501	3,273	2,943	1,300	0,000	1,400	0,250	0,000	
Verbessert5					Verbessert					
2,359	0,894	2,251	1,960	1,460	1,300	0,000	0,962	0,500	0,000	
NVT 8										
Normal					Normal					
3,843	2,196	3,469	3,634	3,240	1,800	0,000	1,900	0,340	0,000	
Verbessert 8					Verbessert					
2,281	0,938	2,452	2,020	1,303	1,800	0,000	1,360	0,680	0,000	
NVT 9										
Normal					Normal					
3,886	2,735	4,044	4,105	3,915	1,390	0,000	1,470	0,280	0,000	
Verbessert 9					Verbessert					
2,329	0,959	2,117	2,232	1,672	1,390	0,000	1,164	0,560	0,000	

Tabelle A 5.2.4.-3

Verbesserung der NVTs für 0,999 µT ab dem Gehäuse

Verbesserung im Vergleich zum Gehäuseabstand					
Verbesserung	Höhe	Links	Rechts	Oben	Unten
um %					
NVT 1	95,4	73,7	43,6	59,6	60,3
NVT 2	66,9	43,9	69,8	57,5	57,9
NVT 3	71,8	60,7	47,3	62,8	62,5
NVT 4	41,8	24,4	-3,9	41,2	39,1
NVT 5	54,7	51,2	38,6	51,7	50,4
NVT 8	76,5	57,3	30,4	59,3	59,8
NVT 9	62,4	64,9	63,0	56,3	57,3

Tabelle A 5.2.4.-4

Prozentuale Verbesserung der NVTs zum Gesamtfeld

Verbesserung im Vergleich zum Gesamtfeld					
Verbesserung	Höhe	Links	Rechts	Oben	Unten
um %					
NVT 1	44,9	73,7	38,1	44,1	60,3
NVT 2	32,8	43,9	48,7	44,2	57,9
NVT 3	34,3	60,7	53,9	47,5	62,5
NVT 4	18,2	24,4	26,2	23,9	39,1
NVT 5	35,1	51,2	35,7	40,1	50,4
NVT 8	40,6	57,3	29,3	44,4	59,8
NVT 9	40,1	64,9	47,7	45,6	57,3

Tabelle A 5.2.4.-5

Überschreitung der Grenzwerte bei 0,2 m für normale NVTs

Entfernungsüberschreitung des Grenzwertes bei dem Normalen Aufbau					
in 0,2 m	Höhe	Links	Rechts	Oben	Unten
in m					
NVT 1	1,530	0,718	1,523	3,065	3,129
NVT 2	1,683	1,253	2,500	3,585	3,616
NVT 3	1,587	1,425	2,488	3,190	3,168
NVT 4	1,327	1,448	0,840	2,094	2,012
NVT 5	2,136	1,632	1,901	2,823	2,743
NVT 8	1,843	1,996	1,369	3,094	3,040
NVT 9	2,296	2,535	2,374	3,625	3,715

Tabelle A 5.2.4.-6

Überschreitung der Grenzwerte bei 0,2 m für verbesserte NVTs

Entfernungsüberschreitung des Grenzwertes beim Verbessertenaufbau					
in 0,2 m	Höhe	Links	Rechts	Oben	Unten
	in m	in m	in m	in m	in m
NVT 1	-0,121	0,041	0,771	1,119	1,122
NVT 2	0,424	0,615	0,616	1,407	1,407
NVT 3	0,304	0,439	1,217	1,062	1,062
NVT 4	0,689	1,046	0,881	1,149	1,148
NVT 5	0,859	0,694	1,089	1,260	1,260
NVT 8	0,281	0,738	0,892	1,140	1,103
NVT 9	0,739	0,759	0,753	1,472	1,472

Tabelle A 5.2.5.-1

Optimierung der Phasenordnung für ein Drehstromsystem

		alles in m				
erste	zweite	Anzahl	oben	unten	links	rechts
123		drei	7,207	7,207	7,1	7,1
123	123	sechs	7,09	7,09	7,09	7,09
123	213	sechs	6,708	6,709	6,685	6,734
123	231	sechs	5,1	5,1	5,1	5,1
123	321	sechs	2,077	2,077	2,084	2,084
123	312	sechs	5,1	5,1	5,1	5,1
123	132	sechs	6,709	6,71	6,735	6,684

Tabelle A 5.2.6.-1

Transformatoranschlussveränderung

Messung bei 0,999 μ T	Front	Draufsicht, Messhöhe 1m				Rechenzeit in s
		Höhe in m	oben in m	unten in m	links in m	
Normal	4,473	5,366	4,727	2,622	3,954	34
Anschlüsse lang	5,388	4,21	3,608	2,163	3,739	40
Anschlüsse kurz	5,361	4,211	3,608	2,113	3,714	36
	in %	in %	in %	in %	in %	
lang zu normal	- 20,46	21,54	23,67	17,51	5,44	
kurz zu normal	- 19,85	21,52	23,67	19,41	6,07	
Querbalken unter NS Ver. I	3,506	2,398	1,863	1,345	2,644	34
Verbesserung II Querbalken unter NS + HS	3,607	2,406	1,869	1,314	2,62	34
	in %	in %	in %	in %	in %	
Verbessert I zu normal	21,62	55,31	60,59	48,70	33,13	
Verbessert II zu normal	19,36	55,16	60,46	49,89	33,74	

Tabelle A 5.2.6.-2

**Vergleich zwischen mit und ohne Spule beim Transformator
(siehe dazu auch Tab. A 5.2.6.-1)**

Messung bei 0,999 μ T	Front	Draufsicht, Messhöhe				Rechenzeit in s
		1m				
	Höhe in m	oben in m	unten in m	links in m	rechts in m	
normal ohne Spule	4,41	5,36	4,721	2,561	3,907	nicht Messbar
Anschlüsse lang	5,415	4,175	3,581	2,191	3,824	3
Anschlüsse kurz	5,393	4,176	3,58	2,129	3,796	1
	in %	in %	in %	in %	in %	
normal ohne zu mit Spule	1,41	0,11	0,13	2,33	1,19	
lang ohne zu mit Spule	-0,50	0,83	0,75	-1,29	-2,27	
kurz ohne zu mit Spule	-0,60	0,83	0,78	-0,76	-2,21	
Querbalken unter NS Ver. I	3,495	2,241	1,765	1,011	2,189	3
Verbesserung II	3,611	2,227	1,77	0,985	2,173	3
Querbalken unter NS + HS						
	in %	in %	in %	in %	in %	
Verbes. I ohne zu mit Spule	0,31	6,55	5,26	24,83	17,21	
Verbes. II ohne zu mit Spule	-0,11	7,44	5,30	25,04	17,06	

Tabelle A 6.2.3.-1

Vergleich zwischen Limitierung und ohne Limitierung

Platte für die Rückwand der NVT 1 angepasst					ohne Platte		
Messentpunkt (1,3; 0,2; 1) alles in m					in μT		
Aluminiumplatte					181,469		
ohne limitierte Schleifen			mit limitierten Schleifen				
Plattenstärke	B in μT	Zeit	B in μT	Zeit			
2 mm	81,738		124,742				
3 mm	66,79		119,256				
4 mm	58,85		116,045				
5 mm	53,989		113,815				
6 mm	50,728		112,208				
7 mm	48,4		110,805				
8 mm	46,652		109,605				
9 mm	45,288		108,915				
10 mm	44,193		43 s		107,783	2 s	Differenz der
							beiden
Plattenstärke	Dämpfung	Schirmfaktor	Dämpfung	Schirmfaktor	Dämpfungen		
	in dB		in dB		in dB		
2 mm	6,93	2,22	3,26	1,45	3,67		
3 mm	8,68	2,72	3,65	1,52	5,04		
4 mm	9,78	3,08	3,88	1,56	5,90		
5 mm	10,53	3,36	4,05	1,59	6,48		
6 mm	11,07	3,58	4,18	1,62	6,90		
7 mm	11,48	3,75	4,28	1,64	7,19		
8 mm	11,80	3,89	4,38	1,66	7,42		
9 mm	12,06	4,01	4,43	1,67	7,62		
10 mm	12,27	4,11	4,53	1,68	7,74		

Tabelle A 6.2.3.-2

Vergleich der Wirbelstromabschirmung von Metallplatten

Plattenstärke	Aluminiumplatte	Stahlplatte	Kupferplatte
	B in μT	B in μT	B in μT
2 mm	81,738	145,327	58,239
3 mm	66,790	128,477	54,850
4 mm	58,850	116,621	50,320
5 mm	53,989	108,642	47,585
6 mm	50,728	103,019	45,739
7 mm	48,400	98,915	44,427
8 mm	46,652	95,979	43,312
9 mm	45,288	93,622	42,487
10 mm	44,193	91,785	41,782
	Verbesserung	Verbesserung	Verbesserung
	in %	in %	in %
2 mm	55,0	19,9	67,9
3 mm	63,2	29,2	69,8
4 mm	67,6	35,7	72,3
5 mm	70,2	40,1	73,8
6 mm	72,0	43,2	74,8
7 mm	73,3	45,5	75,5
8 mm	74,3	47,1	76,1
9 mm	75,0	48,4	76,6
10 mm	75,6	49,4	77,0
ohne Abschirmung der NVT1 ist B = 181,469 μT			

noch zu Tabelle A 6.2.3.-2

Vergleich der Wirbelstromabschirmung von Metallplatten

Plattenstärke	Aluminiumplatte	Stahlplatte	Kupferplatte
	B in μT	B in μT	B in μT
	Schirmfaktor	Schirmfaktor	Schirmfaktor
2 mm	2,2	1,2	3,1
3 mm	2,7	1,4	3,3
4 mm	3,1	1,6	3,6
5 mm	3,4	1,7	3,8
6 mm	3,6	1,8	4,0
7 mm	3,7	1,8	4,1
8 mm	3,9	1,9	4,2
9 mm	4,0	1,9	4,3
10 mm	4,1	2,0	4,3
	Dämpfung	Dämpfung	Dämpfung
	in dB	in dB	in dB
2 mm	6,9	1,9	9,9
3 mm	8,7	3,0	10,4
4 mm	9,8	3,8	11,1
5 mm	10,5	4,5	11,6
6 mm	11,1	4,9	12,0
7 mm	11,5	5,3	12,2
8 mm	11,8	5,5	12,4
9 mm	12,1	5,7	12,6
10 mm	12,3	5,9	12,8

Bild A 6.2.4.-1

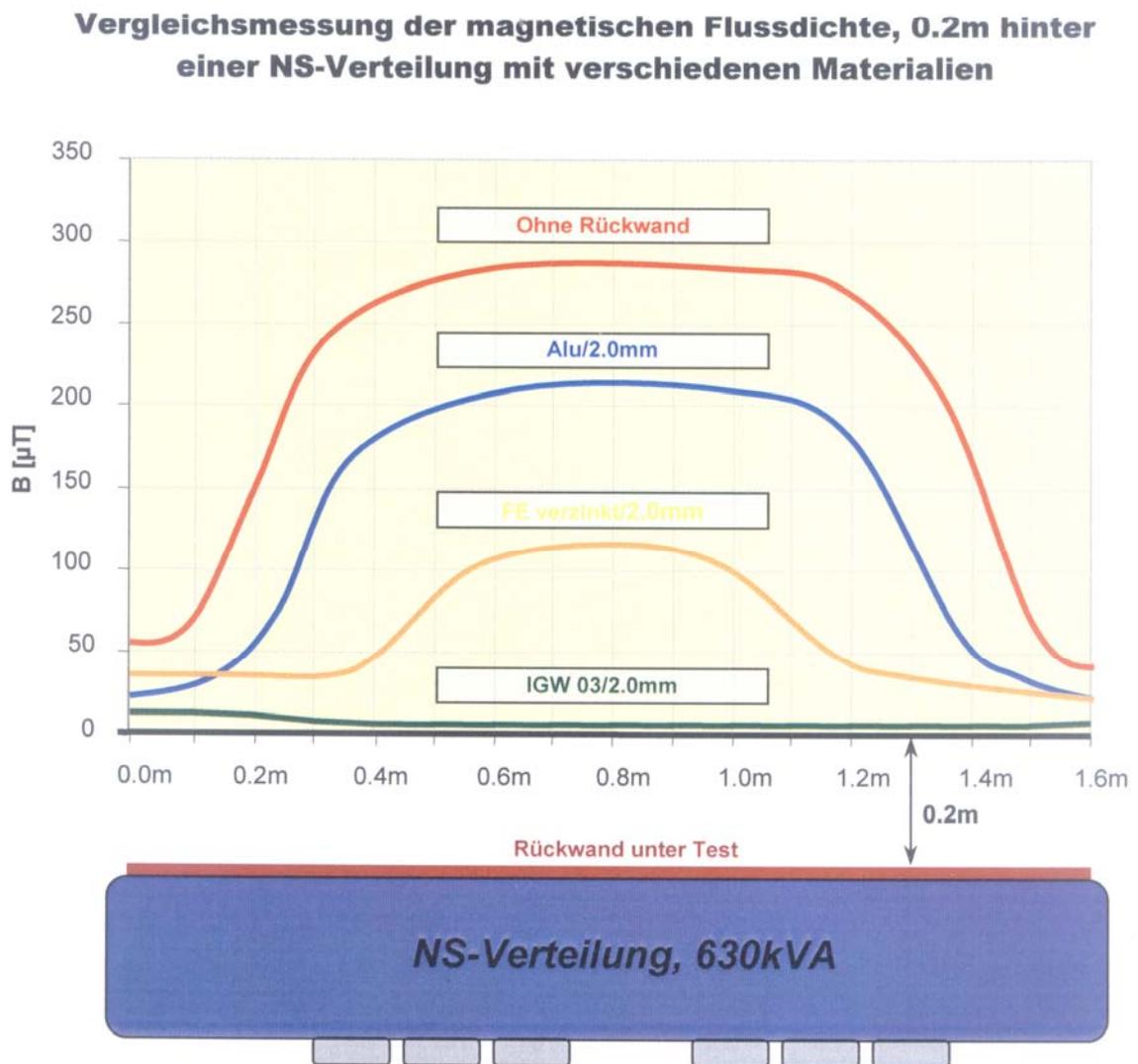


Tabelle 6.2.4.-2

Schirmung einer normalen und einer optimierten NVT

	NVT 1		Al Gehäuse		Gehäuse-	μ Schild	
	Entfern.	Feldstärke	Entfernung	Feldstärke	abmaße	Entfernung	Feldstärke
	in m	in μ T	in m	in μ T		in m	in μ T
Höhe	1,730	12,667	0,891	3,618	1,950	-	-
oben	5,80	151,069	2,098	5,749	0,350	0,782	4,093
unten	3,329	181,469	2,159	55,192	0,000	0,841	5,083
links	0,918	3,757	0,243	1,071	0,000	-	-
rechts	1,723	44,63	0,955	12,705	2,650	0,247	1,175
NVT 1 optimiert							
Höhe	0,079	0,532	-	-	1,950	-	-
oben	1,319	81,030	0,856	23,189	0,700	0,332	2,133
unten	1,322	82,544	0,858	23,570	0,000	0,334	2,171
links	0,241	1,176	0,003	0,336	0,000	-	-
rechts	0,971	26,416	0,585	7,567	1,737	0,146	0,696

Tabelle 6.2.4.-3

Schirmung einer normalen und einer optimierten NVT

	NVT 2		Al Gehä- se	Al Gehä- se	Gehäuse- abmaße	μ Schild	μ Schild
	Entfern.	Feldstärke	Entfernung	Feldstärke		Entfernung	Feldstärke
	in m	in μ T	in m	in μ T		in m	in μ T
Höhe	1,883	18,249	1,010	5,221	1,950	-	-
oben	3,785	55,596	2,486	15,884	0,350	0,904	6,687
unten	3,816	63,61	2,534	18,173	0,000	0,971	11,145
links	1,453	61,129	0,876	17,567	0,000	0,279	1,609
rechts	2,700	180,526	1,699	51,757	4,200	0,568	4,755
NVT 2 optimiert							
Höhe	0,624	2,975	0,149	0,849	1,950	-	-
oben	1,607	35,204	0,991	10,051	0,700	0,372	2,746
unten	1,607	35,155	0,991	10,053	0,000	0,372	2,739
links	0,815	23,228	0,479	6,637	0,000	0,132	0,613
rechts	0,816	23,585	0,477	6,764	2,723	0,131	0,620

Bild A 6.2.5.-1

Schirmungsdiagramm für TrafoMan

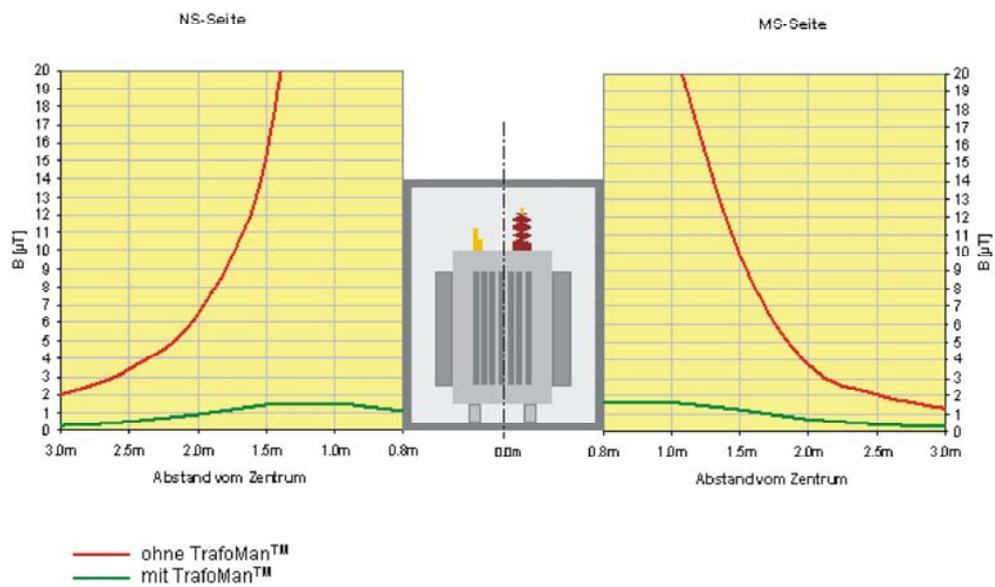


Bild A 6.2.6.-1

Schirmungsdiagramm für die cfw Trassenabschirmung

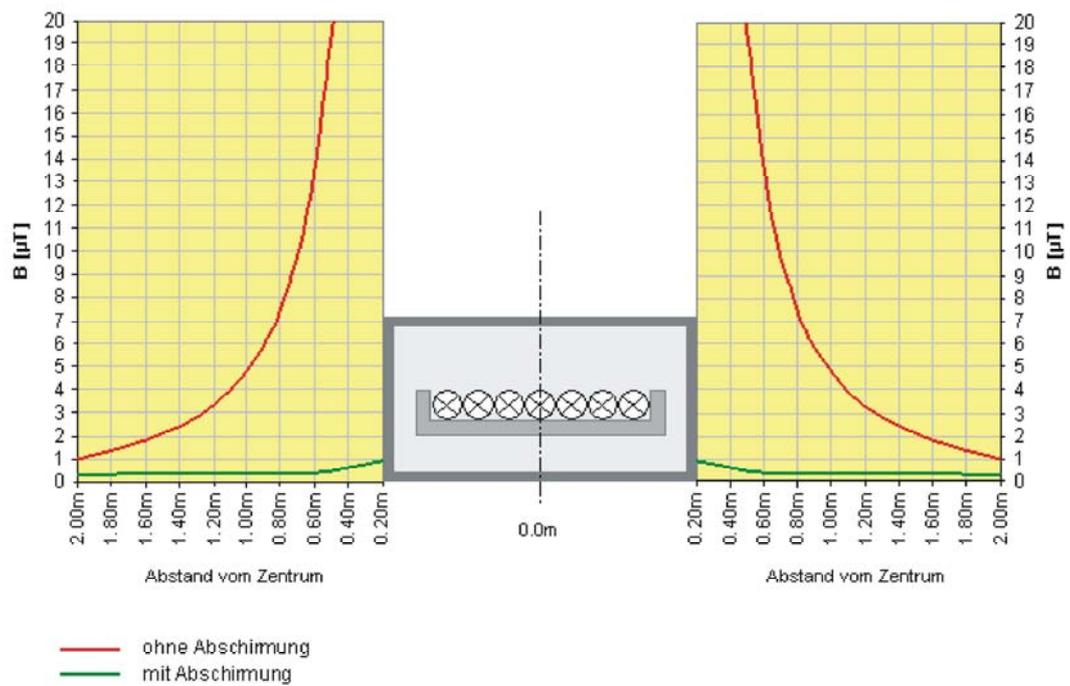


Tabelle A 6.2.6.-1

Schirmungseigenschaften von Leitern

	ohne Schirm	mit Schirm 3,5	mit Schirm 27
	Flussdichte	Flussdichte	Flussdichte
drei Leiter	in μ T	in μ T	in μ T
oben	909,197	259,19	33,678
sechs Leiter			
oben	338,234	96,007	12,523
Verbesserung in %			
drei Leiter			
oben	0,0	71,5	96,3
sechs Leiter			
oben	62,8	89,4	98,6

Tabelle A 7.-1

Schrittweise Verbesserung und Schirmung der NVT 3

normal	Entfernung Flussdichte		Aluminiumschirm		AGW - Sanierung	
	in m	in μ T	in m	in μ T	in m	in μ T
Höhe	4,45	26,244	2,135	7,498	0,126	0
oben	5,454	86,251	2,371	23,39	0,617	2,154
unten	6,969	51,233	3,37	14,636	0,519	1,348
links	2,465	9,316	0,546	2,237	0	0
rechts	3,032	28,996	1,591	10,277	0,178	0,946
verbessert						
Höhe	4,556	26,372	2,183	7,665	0,129	0
oben	5,636	86,865	2,428	23,437	0,617	2,154
unten	6,85	51,255	3,257	14,624	0,52	1,349
links	3,625	6,851	3,33	6,556	0	0
rechts	3	29,046	1,577	8,301	0,178	0,946
verbessert + umbau						
Höhe	5,111	15,025	-	-	0	0
oben	5,098	9,853	-	-	0	0
unten	6,135	9,15	-	-	0	0
links	3,718	6,855	-	-	0	0
rechts	2,167	2,875	-	-	0	0

noch zu Tabelle A 7.-1

Schrittweise Verbesserung und Schirmung der NVT 3

normal			Aluminiumschirm		AGW - Sanierung	
	Verringerung in %	Dämpfung in dB	Verringerung in %	Dämpfung in dB	Verringerung in %	Dämpfung in dB
Höhe	-	-	52,02	10,88	97,17	-
oben	-	-	56,53	11,33	88,69	32,05
unten	-	-	51,64	10,88	92,55	31,60
links	-	-	77,85	12,39	100,00	-
rechts	-	-	47,53	9,01	94,13	29,73
verbessert						
Höhe	-2,38	-0,04	50,94	10,69	97,10	-
oben	-3,34	-0,06	55,48	11,32	88,69	32,05
unten	1,71	0,00	53,26	10,89	92,54	31,59
links	-47,06	2,67	-35,09	3,05	100,00	-
rechts	1,06	-0,01	47,99	10,86	94,13	29,73
verbessert + umbau						
Höhe	-14,85	4,84	-	-	100,00	-
oben	6,53	18,84	-	-	100,00	-
unten	11,97	14,96	-	-	100,00	-
links	-50,83	2,66	-	-	100,00	-
rechts	28,53	20,07	-	-	100,00	-

Tabelle A 7.-2

Vergleich zwischen den normalen und verbesserten Stationen

			verbessert	Verbesserung
	normal	verbessert	mit μ Schild	mit μ Schild
	Entfernung in m	Entfernung in m	Entfernung in m	um in %
ST 1				
Höhe	2,0	1,6	0,0	100,0
oben	3,1	3,1	0,4	87,0
unten	3,0	1,1	0,0	100,0
links	1,5	2,7	0,2	88,0
rechts	1,8	1,0	0,0	100,0
ST 2				
Höhe	2,8	1,4	0,0	100,0
oben	3,5	2,6	0,0	100,0
unten	3,7	4,4	0,0	100,0
links	1,7	1,8	0,0	100,0
rechts	0,4	0,4	0,0	100,0
ST 3				
Höhe	4,3	4,4	0,0	100,0
oben	5,3	5,4	0,0	100,0
unten	6,8	6,7	0,0	100,0
links	2,3	3,4	0,0	100,0
rechts	2,8	2,8	0,0	100,0
ST 4				
Höhe	3,0	2,0	0,0	100,0
oben	1,8	2,2	0,0	100,0
unten	1,5	1,7	0,0	100,0
links	2,6	2,7	0,3	88,1
rechts	2,9	2,5	0,0	100,0
ST 5				
Höhe	3,0	1,9	0,0	100,0
oben	2,9	2,5	0,3	89,6
unten	2,5	2,0	0,0	100,0
links	3,1	2,6	0,0	100,0
rechts	2,1	1,7	0,0	100,0
ST 8				
Höhe	2,4	0,2	0,0	100,0
oben	2,1	1,8	0,0	100,0
unten	1,2	1,1	0,0	100,0
links	2,3	0,4	0,0	100,0
rechts	2,9	1,5	0,0	100,0
ST 9				
Höhe	3,1	2,1	0,0	100,0
oben	3,2	2,4	0,0	100,0
unten	3,1	2,7	0,2	93,9
links	2,0	1,8	0,0	99,5
rechts	3,5	3,3	0,2	92,8

11 Anhang B

Station 1	Abmaße: 5,9x3,0x3,0 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	630 kVA, NS-Seite 909 A
Transformatoren: 630 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 18,2 A, Durchschleifungen 400 A

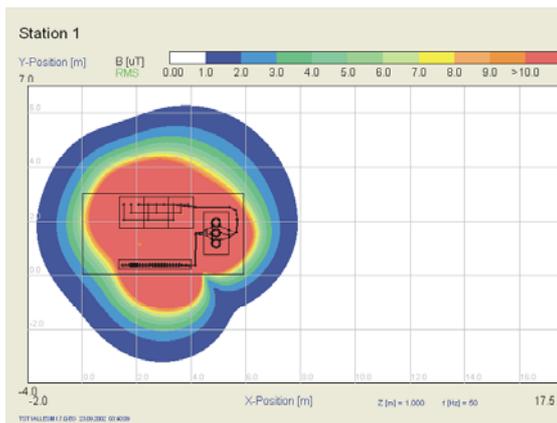


Bild B 7.-1

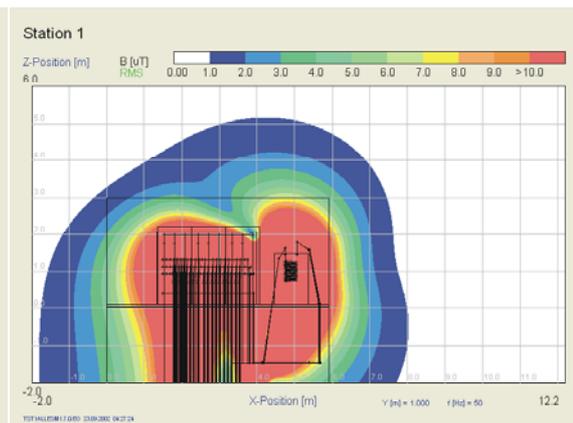


Bild B 7.-2

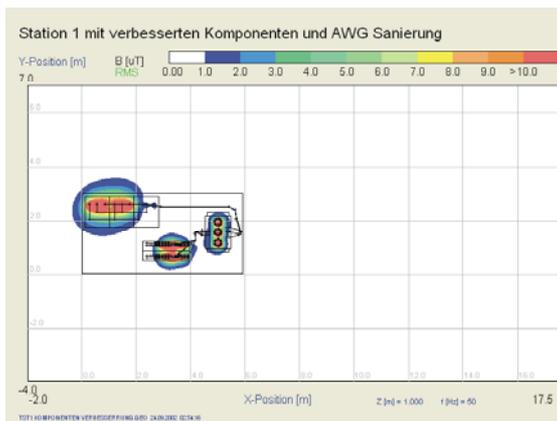


Bild B 7.-3

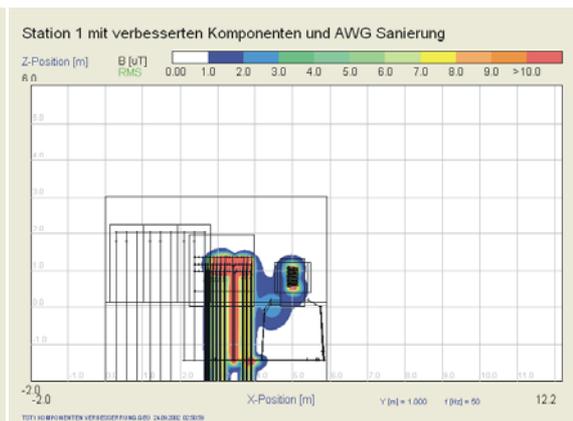


Bild B 7.-4

Station 2	Abmaße: 11,85x5,4x2,9 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	2x630 kVA, NS-Seite 2x909 A
Transformatoren: 2x630 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 2x18,2 A, Durchschleifungen 2x400 A

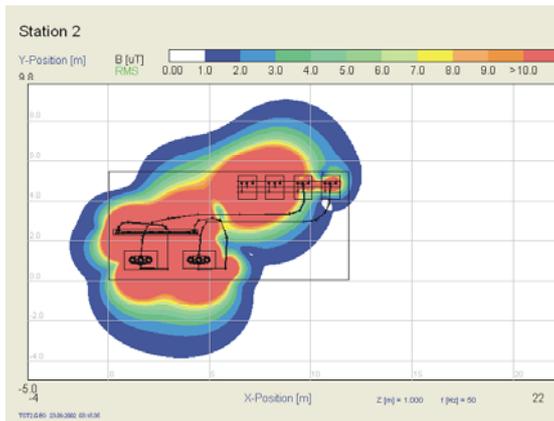


Bild B 7.-5

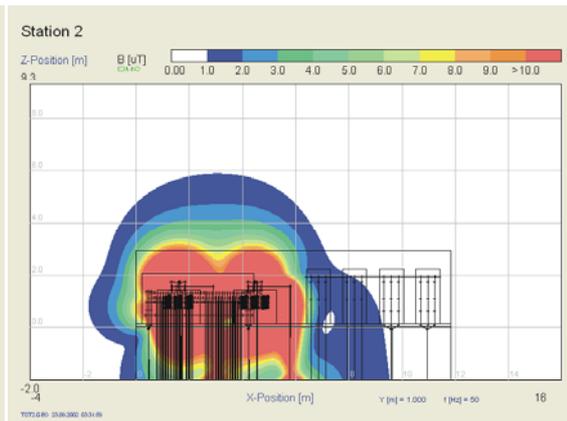


Bild B 7.-6

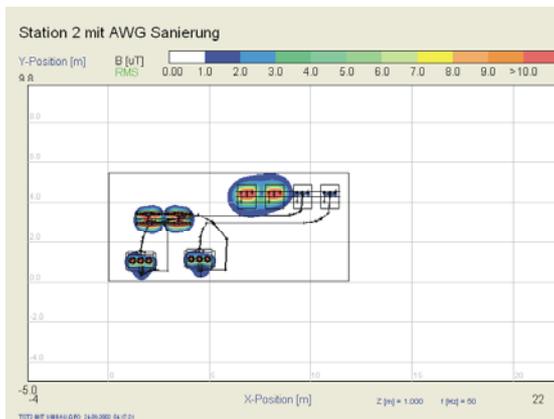


Bild B 7.-7

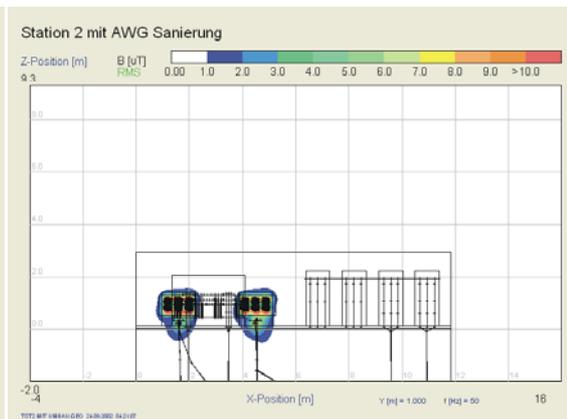


Bild B 7.-8

Station 3	Abmaße: 12,7x5,6x2,85 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	2x400 kVA, NS-Seite 2x577 A
Transformatoren: 2x400 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 2x11,5 A, Durchschleifungen 2x300 A

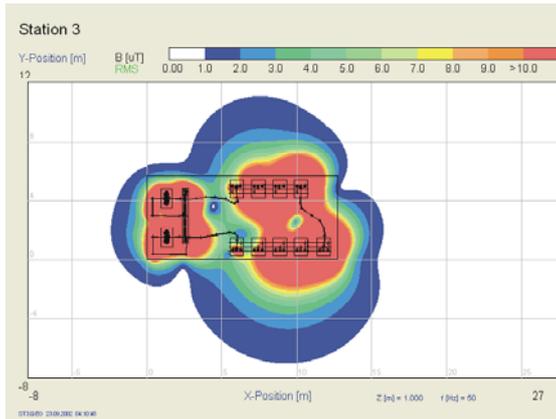


Bild B 7.-9

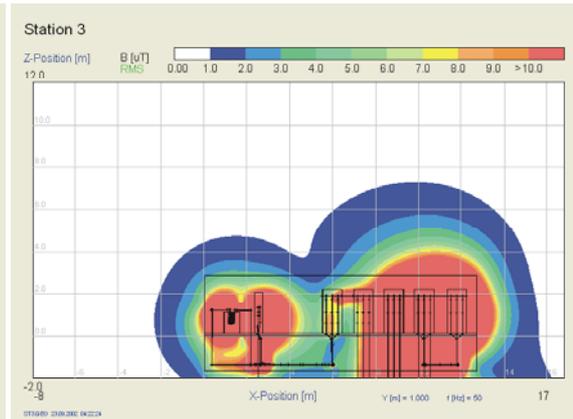


Bild B 7.-10

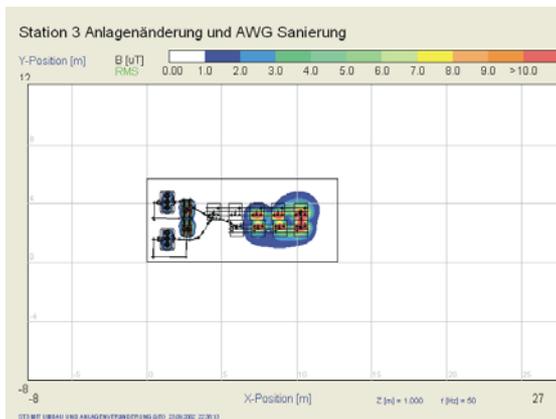


Bild B 7.-11

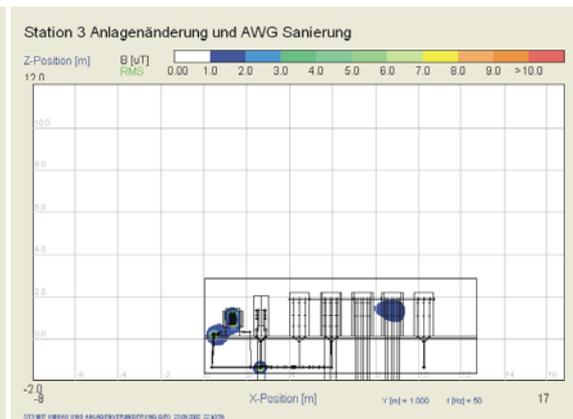


Bild B 7.-12

Station 4	Abmaße: 5,0x3,0x2,45 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	630 kVA, NS-Seite 909 A
Transformatoren: 630 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 18,2 A, Durchschleifungen 268 A

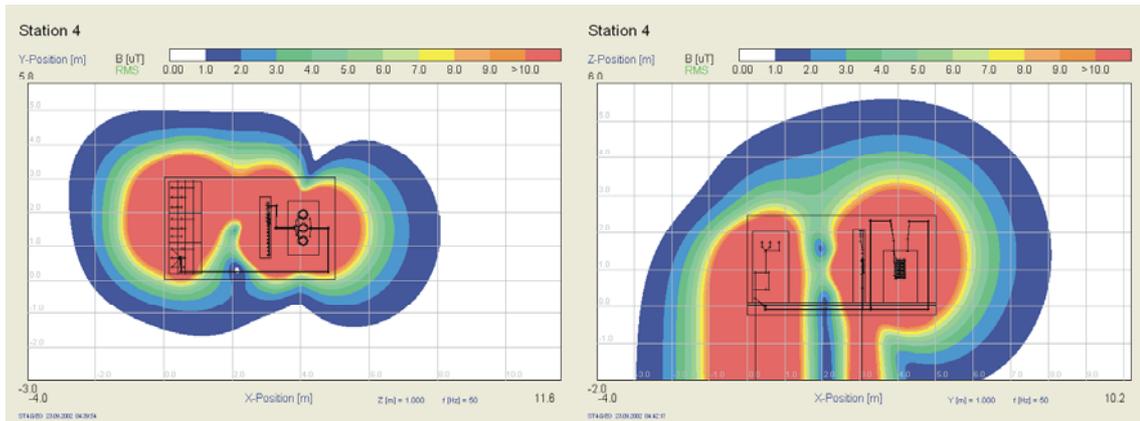


Bild B 7.-13

Bild B 7.-14

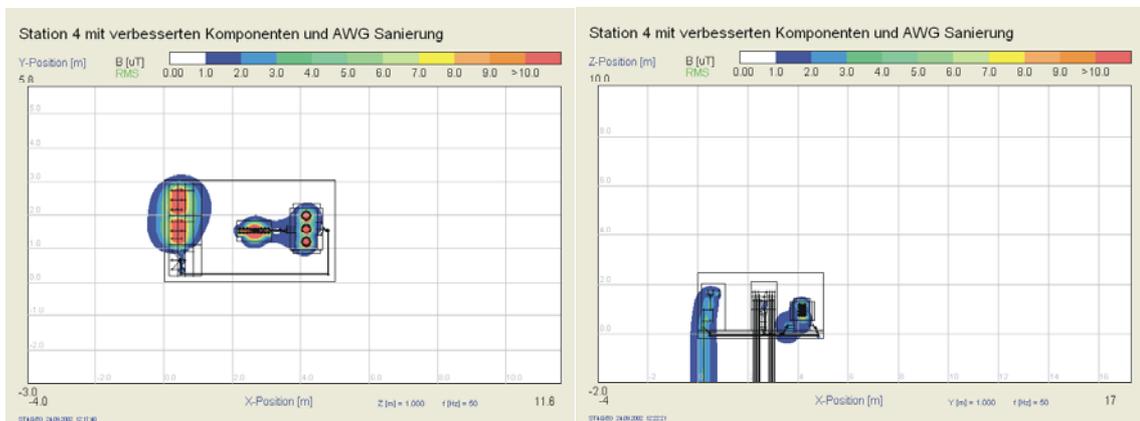


Bild B 7.-15

Bild B 7.-16

Station 5	Abmaße: 3,5x2,4x2,1 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	630 kVA, NS-Seite 909 A
Transformatoren: 630 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 18,2 A, Durchschleifungen 268 A

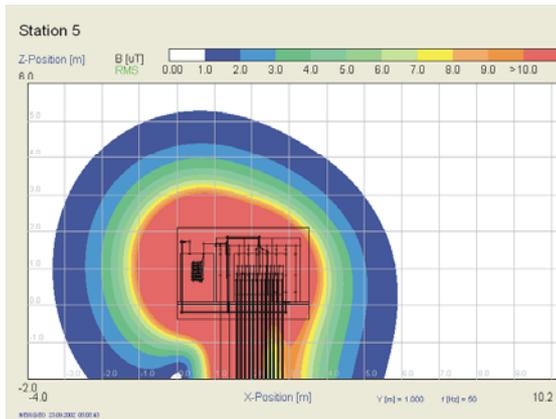


Bild B 7.-17

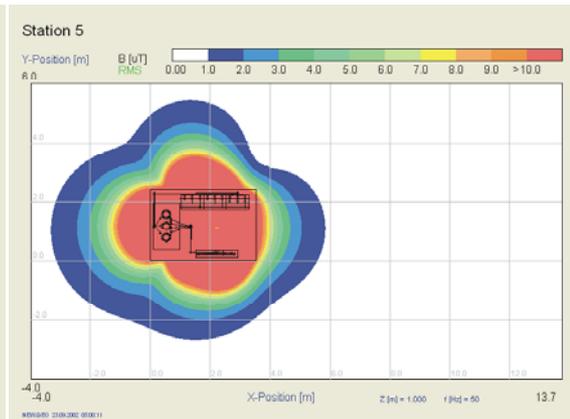


Bild B 7.-18



Bild B 7.-19

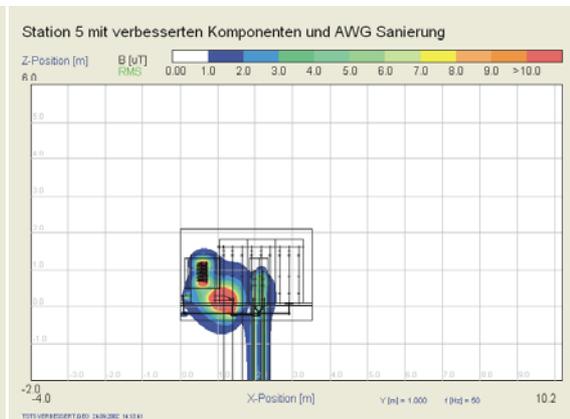


Bild B 7.-20

Station 8	Abmaße: 4,2x3,0x2,95 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	630 kVA, NS-Seite 909 A
Transformatoren: 630 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 18,2 A, Durchschleifungen 630 A

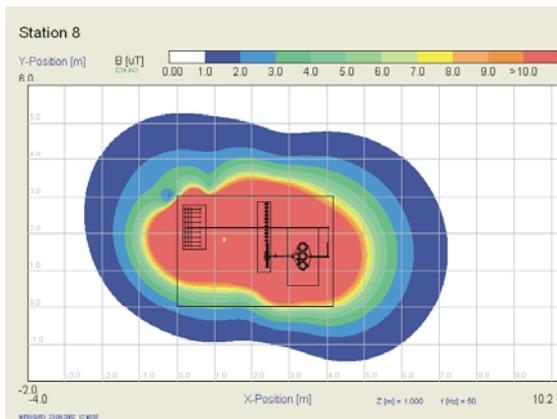


Bild B 7.-21

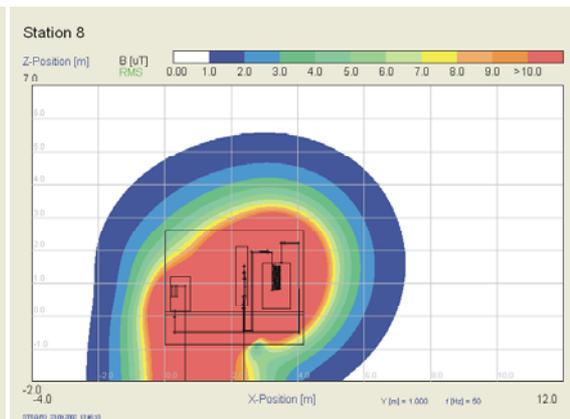


Bild B 7.-22

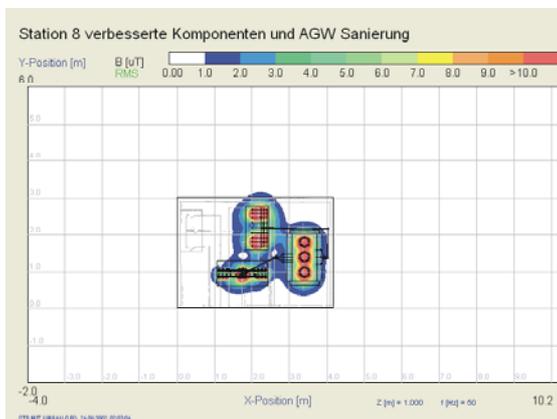


Bild B 7.-23

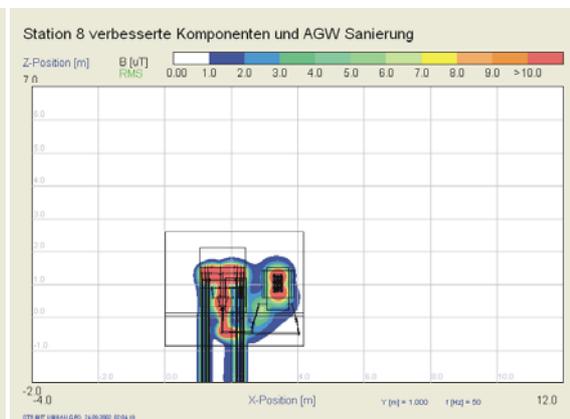


Bild B 7.-24

Station 9	Abmasse: 3,25x1,65x2,35 m
Komponenten der Station :	Belastung:
400 V - NVT, 20 kV-Schaltanlage,	630 kVA, NS-Seite 909 A
Transformatoren: 630 kVA, 20/0,4 kV	HS-Seite 18,2 A, Durchschleifungen 200 A

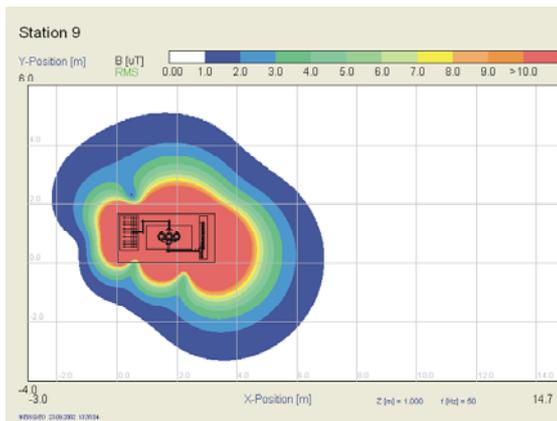


Bild B 7.-25

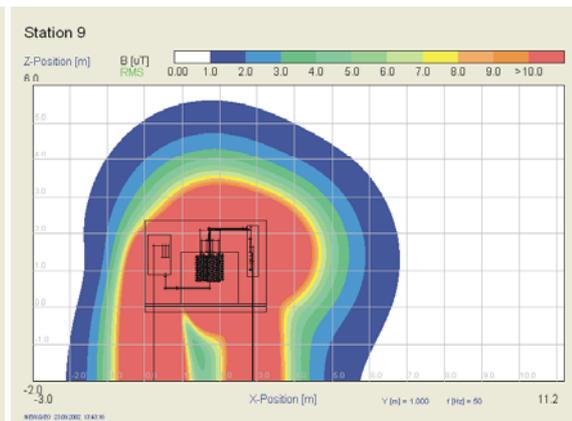


Bild B 7.-26

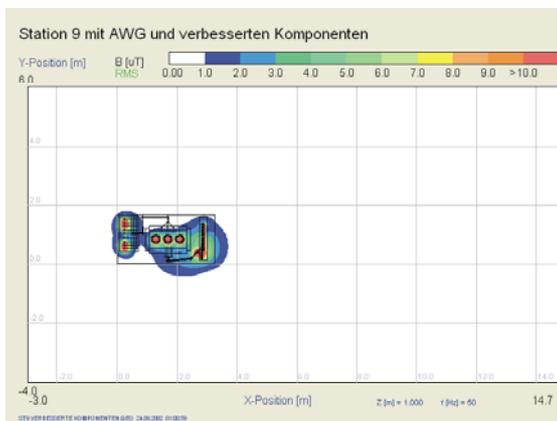


Bild B 7.-27

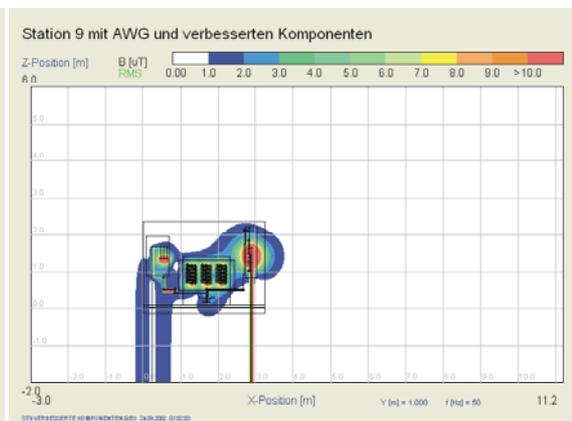


Bild B 7.-28

12 Abkürzungen und Formelzeichen

AGW	Anlagengrenzwert
Al	Aluminium
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
CAD	Computer Aided Design (Computer unterstütztes Zeichenprogramm)
DIN	Deutsche Industrienorm
Cu	Kupfer
EMF	Elektromagnetische Felder
EIRP	äquivalente isotrope Strahlungsleistung
EMV/EMC	Elektromagnetische Verträglichkeit/electromagnetic compatibility
ERP	äquivalente Strahlungsleistung
ESD	elektrostatische Körperentladung (elrtrostatic discharge)
FGEU	Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie
FH	Fachhochschule
ICNIRP	internationale Strahlenschutzkommission für nicht ionisierende Strahlung
IGW	Immissionsgrenzwert
LS	Leistungsschalter
mag.	magnetisch
MS	Mittelspannung
MVT	Mittelspannungsverteilung/Mittelspannungseinspeisefeld
NF	Niederfrequenz
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
NS	Niederspannung
NVT	Niederspannungsverteilung
PTSK	Partiell typgeprüfte Schaltgerätekombination
SI	Sicherung
Sp	Spannung
St	Stahl
ST	Station
Str	Strom
TSK	Typgeprüfte Schaltgerätekombination

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
a	Abstand zwischen zwei Phasen	m
a_s	Schirmdämpfung	dB
B	magnetische Flussdichte	T, Vs/m ²
d	Dicke	m
ds	infinitesimales Wegelement	
dA	infinitesimales Flächenelement	
δ	Eindringtiefe	m
E	elektrisches Feld	V/m
f	Frequenz	Hz
H	magnetische Feldstärke	A/m
I	Strom	A
γ	spez. Leitfähigkeit	m/Ωmm ² , MS/m
n	Anzahl	
N	Windungszahl	
ϕ	magnetischer Fluss	Wb, Vs
r	Abstand vom Leitermittelpunkt	m
r_0	Radius eines Leiters	m
S	Scheinleistung	VA
s	Wegstrecke	m
t	Zeit	s
U	Spannung	V
u_{ind}	Induktionsspannung	V
μ	Permeabilität	Vs/Am
μ_0	magnetische Feldkonstante	Vs/Am
$\mu_r \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	Permeabilitätszahl	

13 Literaturverzeichnis

- [1] **K. Müller, E. Habinger**; *EMC Kompenium* 1997;
KM Verlag & Kongress, München
- [2] **Arnold Rodewald**; *Elektromagnetische Verträglichkeit* Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 2000
- [3] **Kupke**, Diplomarbeit „*Optimierung der magnetischen Flussdichte an Netzstationen*“, 18.02.2000 FGEU
- [4] **Faesing**, Diplomarbeit „*Magnetische Flussdichte an Niederspannungsverteilungen*“, 30.08.2000 FGEU mbH
- [5] **Bundesamt für Umwelt**, Wald und Landschaft (BUWAL), *Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder 2. Teil: Frequenzbereich 10 Hz bis 100 KHz*, 1993
- [6] **Eckbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer**; *Physik für Ingenieure*; Springer Verlag; 1997
- [7] **Lothar Papula**; *Mathematische Formelsammlung*; Vieweg, 1998; 5.Auflage
- [8] **A.Führer, K.Heidemann, W.Nerreter**; *Grundgebiete der Elektrotechnik*, Band 1: Stationäre Vorgänge 6. Auflage; Carl Hanser Verlag München Wien
- [9] **ABB** Calor Emag Taschenbuch; *Schaltanlagen*; 10.Auflage; Cornelsen Verlag
- [10] **A.Führer, K.Heidemann, W.Nerreter**; *Grundgebiete der Elektrotechnik*, Band 2: Zeitabhängige Vorgänge 6. Auflage; Carl Hanser Verlag München Wien
- [11] **Bundesregierung**; *26.BImSchV – Verordnung über elektromagnetische Felder*; 16.Dezember 1996

- [12] **Bundesrat**; *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung*; 23.Dezember 1999
- [13] Microsoft® Encarta® Professional 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation
- [14] **Gehrke**; Seminarunterlagen: „EMV“
- [15] Internetrecherchen

Erklärung zur Diplomarbeit

Ich versichere, dass ich meine Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Berlin, den 15.10.2002

René Zempel