

Optimierung der magnetischen Flußdichte an Netzstationen

Diplomarbeit

im Studiengang Elektrische Energietechnik

an der

Fachhochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

vorgelegt von

Stephan Kupke

Berlin, 18. 02. 2000

Berlin 2000, (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 UND ZIELSTELLUNG | 5 |
| 2 | SYSTEMATISIERUNG VON NETZSTATIONEN GEMÄß DER UNTERSCHIEDLICHEN BAUAUSFÜHRUNGEN | 7 |
| 2.1 | Aufgaben und Betriebsweise einer Netzstation | 8 |
| 2.2 | Allgemeines zu den Komponenten einer Netzstation | 9 |
| 2.3 | Allgemeine Anforderungen an Schaltanlagen | 11 |
| 2.3.1 | Mittelspannungsschaltanlagen | 11 |
| 2.3.2 | Niederspannungsschaltanlagen | 13 |
| 2.4 | Unterscheidung der Netzstationen nach den Bauausführungen | 15 |
| 3 | ERÖRTERUNG DER RECHTSGRUNDLAGEN | 16 |
| 3.1 | Regelung für Arbeit und Umwelt | 17 |
| 3.1.1 | 26. Bundes- Immissionsschutzverordnung | 22 |
| 3.1.2 | Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit BGV B11 | 23 |
| 3.2 | Elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten | 24 |
| 4 | ANALYSE DER VERURSACHER DES MAGNETISCHEN FELDES VON NETZSTATIONEN | 25 |
| 4.1 | Theoretische Grundlagen | 25 |
| 4.1.1 | Die Divergenz eines Vektorfeldes | 26 |
| 4.1.2 | Die Rotation eines Vektorfeldes | 26 |
| 4.2 | Berechnungsverfahren nach Biot-Savart | 28 |
| 4.3 | Die Verteilung der Magnetflußdichte unendlich langer geradliniger Grundanordnungen und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen | 31 |
| 4.3.1 | Vergleich der analytischen Lösungen mit der Berechnung nach Biot-Savart von idealen Grundanordnungen | 31 |
| 4.3.2 | Betrachtung von Optimierungsmaßnahmen | 36 |
| 4.4 | Analyse der magnetischen Flußdichteverteilung an Netzstationen | 38 |
| 4.4.1 | Herangehensweise an die Analyse | 38 |
| 4.4.2 | Darstellung der berechneten Ergebnisse | 39 |
| 4.4.2.1 | Darstellung einer Beispielstation | 39 |
| 4.4.3 | Bewertungskriterien der Analyse | 41 |
| 4.4.4 | Bewertung der Maxima nach der Nennleistung der Station | 43 |
| 4.4.5 | Bewertung der Maxima nach den Abmessungen der Station | 45 |
| 4.4.5.1 | Normierung der Grundrißfläche als Funktion der speisenden Leistung | 46 |
| 4.4.6 | Bewertung der Maxima nach der Betriebsweise der Station | 51 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4.7 | Bewertung der Anlagenkomponenten nach der Positionierung ----- | 53 |
| 4.4.7.1 | Positionierung und die Form der Flußdichteverteilung der NVT ----- | 53 |
| 4.4.8 | Schlußfolgerung und Maßnahmen zur Minimierung der magnetischen Flußdichte----- | 55 |
| 5 | UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG VON OPTIMIERUNGS- MAßNAHMEN AN DER NIEDERSPANNUNGSVERTEILUNG ----- | 56 |
| 5.1 | Vorbetrachtung ----- | 56 |
| 5.2 | Heransgehensweise an die Untersuchung ----- | 58 |
| 5.2.1 | Festlegung der Bewertungskriterien----- | 61 |
| 5.3 | Berechnungsergebnisse für 100 μ T des orthogonalen Berechnungsschnittes für die Höhe von 0.5 m ----- | 64 |
| 5.4 | Auswertung der Optimierungsmaßnahmen an der NVT für 100 μ T in der Höhe von 0.5 m ----- | 68 |
| 5.4.1 | Prozentuale Minderung der flächenhaften Ausdehnung von 100 μ T ----- | 68 |
| 5.4.2 | Maximale Abstände am Beispiel der Niederspannungsverteilung mit 12 Abgängen----- | 71 |
| 5.5 | Schlußfolgerung ----- | 76 |
| 5.5.1 | Betrachtung der Positionierung sowie der Vor- und Nachteile der Einspeisungsvarianten an der Niederspannungsverteilung----- | 76 |
| 5.5.2 | Optimierungsmaßnahmen----- | 78 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK----- | 79 |
| 7 | ANHANG----- | 81 |
| 7.1 | Die magnetischen Flußdichteverteilung an Netzstationen ----- | 81 |
| 7.2 | Dreidimensionale Darstellung der Beispielstation ----- | 93 |
| 7.3 | Berechnungsergebnisse für 100 μ T des orthogonalen Berechnungsschnittes für die Höhe von 0 m----- | 94 |
| 7.4 | Berechnungsergebnisse für 100 μ T des orthogonalen Berechnungsschnittes für die Höhe von 1 m----- | 97 |
| 7.5 | Mittelwerte der Optimierungsmaßnahmen an der NVT für 100 μ T in der Höhe von 0.5 m ----- | 100 |
| 7.6 | Maximalabstände der 100 μ T- Isolinie an der NVT ----- | 102 |
| 8 | ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN----- | 108 |
| 9 | LITERATURVERZEICHNIS ----- | 109 |

1 Einleitung und Zielstellung

Die Dynamik einer Industriegesellschaft ist durch die ständige Erhöhung des Lebensstandards und der Lebensqualität gekennzeichnet. Zur Befriedigung der daraus resultierenden Bedürfnisse wird die künstliche Umwelt fortschreitend ausgebaut und perfektioniert.

Sämtliche Bereiche des öffentlichen sowie des privaten Lebens sind mit leistungselektrischen und informationstechnischen Geräten, Anlagen und Installationen ausgerüstet. Die Bedarfsbefriedigung forciert den Wettbewerb der Unternehmen und führt zur materiell-technischen Hochrüstung in der Gesellschaft.

Mit der Nutzung von elektrotechnischen und elektronischen Einrichtungen kommt es zur Emission elektromagnetischer Felder, die den Feldern der natürlichen Umwelt in der Intensität bei weitem übertreffen.

Unumstritten ist mit heutigem Wissensstand die Frage der biologischen Wirkung auf lebende Organismen derartiger Felder sowie die Wechselwirkung zwischen Komponenten einer Anlage und Geräten. Die physikalische Wechselwirkung zeitlich veränderlicher Magnetfelder mit dem menschlichen Organismus führt zur Induktion von elektrischen Feldern und damit zur Ausbildung von Wirbelströmen.

Zum allgemeinen Umweltschutz, Arbeits- und Gesundheitsschutz von Personen sind Expositionsgrenzwerte einzuhalten und die Produkteigenschaft EMV von Geräten ist durch vorgeschriebene, technisch begründete Normen sichergestellt.

Die Feststellung und Dokumentation der Expositionsgrenzwerte bedarf vorgeschriebener Berechnungs- und/ oder Meßverfahren. Bei Nichteinhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte exponierter Personen sind Maßnahmen zu deren Änderung durchzuführen.

Zeitlich veränderliche Magnetfelder sind das Ergebnis der physikalischen Bewegung elektrischer Ladungsträger und somit auch in den Bereichen der energietechnischen Netzfrequenz vorzufinden.

Im städtischen und ländlichen Bereich wird die elektrische Energieversorgung von den sogenannten Netzstationen übernommen. Zur Erfüllung der energietechnischen Versorgungsaufgabe entscheidet die elektrotechnische Anbindung im Netz sowie die Betriebsweise über die gerätetechnische Ausstattung einer Netzstation.

Nach der Darstellung über Aufgaben und Betriebsweisen von Netzstationen und den dafür notwendigen Anlagenkomponenten wird die gesetzliche Handlungsgrundlage hinsichtlich des Personenschutzes ausgeführt.

Zur Unterschreitung der Expositionsgrenzwerte ist die Kenntnis der maßgeblichen Quellen als Verursacher der magnetischen Flußdichteverteilungen innerhalb von Netzstationen erforderlich. Die systematische Analysierung ermittelt die Niederspannungsverteilung von 32 in der Praxis existierender Netzstationen als Hauptverursacher auftretender Maxima der magnetischen Flußdichteverteilung.

Die für die Einhaltung des Personenschutzes in der 26. BImSchV vorgeschriebenen Expositionsgrenzwerte bilden die Grundlage und sind zugleich Motivation Optimierungsmaßnahmen an der Niederspannungsverteilung aus den theoretischen Grundlagen vorzustellen und zu bewerten.

Zur Durchführung dieser Untersuchungen wird mit der Berechnungssoftware **WinField** aus dem Hause der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH gearbeitet.

Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Auswertung der erzielten Ergebnisse, wobei die Praxisrelevanz diskutiert wird.

2 Systematisierung von Netzstationen gemäß der unterschiedlichen Bauausführungen

Zur Beurteilung der magnetischen Flußdichte quasistationärer Felder an Netzstationen sind Kenntnisse der Anlage und ihrer Komponenten über Funktion und Wirkungsweise Voraussetzung.

Mit den Erläuterungen der Aufgaben und Betriebsweise von Netzstationen soll die Einbindung in die Netzstruktur dargestellt werden.

In Abhängigkeit von der Versorgungsaufgabe und der elektrotechnischen Anbindung werden unterschiedliche Anforderungen und Beanspruchungen an den Netzstationen und deren Anlagenkomponenten gestellt. Aufgrund der Vielfalt der Einsatzgebiete gibt es unterschiedliche Bauformen der einzelnen Anlagenkomponenten einer Netzstation.

Mit Kenntnis über die Bauformen der einzelnen Anlagenkomponenten lassen sich die unterschiedlichen Bauausführungen von Netzstationen nachvollziehen.

Die Einteilung nach den unterschiedlichen Bauausführungen von Netzstationen, die von einer Vielzahl von Einflußfaktoren abhängen, werden abschließend in diesem Teil der Arbeit vorgenommen.

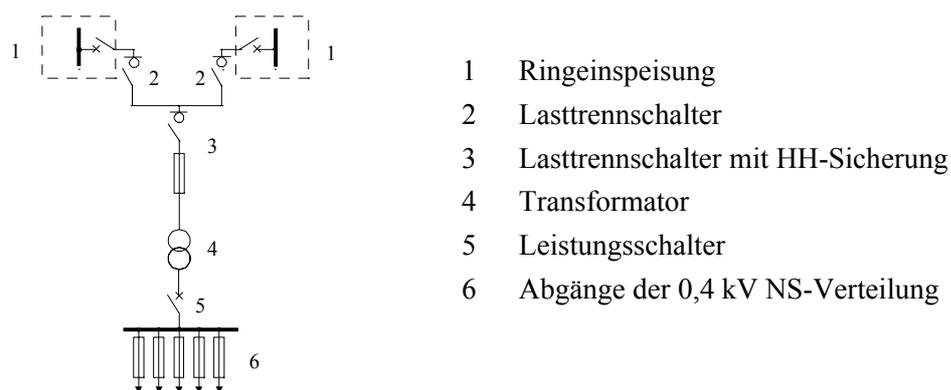


Abb. 2-1 Übersichtsschaltplan einer einzelnen Netzstation [20 S. 209]

2.1 Aufgaben und Betriebsweise einer Netzstation

Netzstationen sind das Bindeglied zwischen der Mittelspannungs- und der Niederspannungsebene. Sie übernehmen die Energieverteilung in der 0,4-kV-Netzebene. Die Einspeiseleistungen bewegen sich von etwa 100 kVA in öffentlich-ländlichen Netzen bis zu 2000 kVA in Industrie- und Großstadtnetzen.

Der Aufstellungsort und die Betriebsweise beeinflussen die Entscheidung für die zu wählende Bauweise. In der Netzebene, größer als 1 kV bis maximal 36 kV, werden Netzstationen in der Bundesrepublik Deutschland hauptsächlich als **Innenraumschaltanlagen** errichtet. Die Bauart einer Schaltanlage innerhalb der Netzstation, ein weiteres Unterscheidungskriterium, kann gekapselt, geschützt und offen gestaltet werden. Die erwähnten Bauarten der Schaltanlagen, die den Grad der Berührungsschutzmaßnahme klassifizieren, werden noch im Abschnitt 2.3 detailliert beschrieben.

Bezüglich der mittelspannungsseitigen Einspeisung einer Netzstation unterscheidet man zwischen Kopfstation und Durchgangsstation [12 S.163]. Kopfstationen sind am Ende einer Mittelspannungsleitung angeschlossene Netzstationen, d.h. sie sind einseitig mit dem Netz verbunden. Durchgangsstationen hingegen sind die am verbreitetsten Anlagen. Hinsichtlich der Aufgabenstellung ist die Versorgungssicherheit bzw. das (n-1) – Ausfallkriterium dieser beiden Betriebsweisen nicht relevant. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen drei Grundformen der Verteilungsnetze, dem geschlossen betriebenen Netz, dem offen betriebenen Netz und dem Anschlußnetz [13 S. 343].

Netzstationen im **geschlossen betriebenen Netz** werden aus Einspeisungen verschiedener Orte versorgt. Die Sonderform des geschlossen betriebenen Netzes ist das Maschennetz.

Offen betriebene Netze haben die Möglichkeit der zweiseitigen Einspeisung. Leitungen mit offener Trennstelle, die zur selben Einspeisung zurückführen, nennt man offene Ringe. Im Gegensatz dazu bezeichnet man Leitungen mit offener Trennstelle als offenen Strang, wenn die Leitungen zu einem anderen Einspeisepunkt führen. Bei Verzicht auf die beidseitige Einspeisemöglichkeit wird das offen betriebene Netz zum **Anschlußnetz**.

Am häufigsten sind Netzstationen zweiseitig angeschlossen, wobei aber nur einseitig eingespeist wird. Das ist die Betriebsweise einer mittelspannungsseitig gespeisten Ringleitung mit offener Trennstelle.

2.2 Allgemeines zu den Komponenten einer Netzstation

Eine einzelne Netzstation umfasst eine Mittelspannungsschaltanlage mit meistens 6, 10 oder 20 kV, eine Niederspannungsschaltanlage sowie die elektrischen Verbindungen zwischen den Schaltanlagen und dem Transformator.

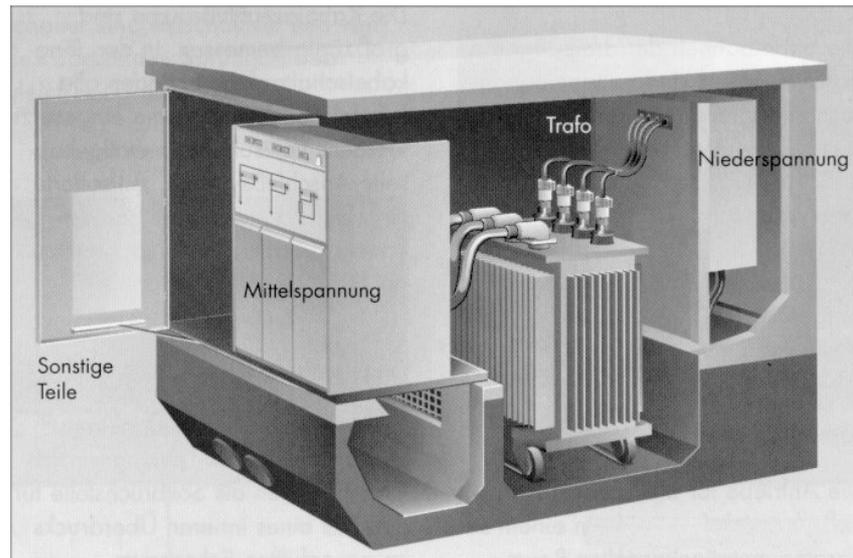


Abb. 2-2 Kompaktstation (gasisolierte Ringkabelschaltanlage) [17 S.5]

Es gibt **Mittelspannungsschaltanlagen** der öffentlichen elektrischen Energieverteilung, der industriellen Energieanwendung und für den Eigenbedarf in den Kraftwerken. Trotz unterschiedlicher Einsatzgebiete sind Mittelspannungsschaltanlagen nach den gleichen Gesichtspunkten aufgebaut. Der prinzipiell gleichartige Aufbau wird den speziellen Anforderungen durch Modifizierung der Grundtypen gerecht. Differenzierungsmerkmale und Unterscheidungskriterien von Mittelspannungsschaltanlagen werden nach konstruktiven Maßnahmen vorgenommen, diese werden näher im Abschnitt 2.3. beschrieben.

Umspanner, die aus dem Mittelspannungsnetz in ein Niederspannungsnetz einspeisen, nennt man gemäß des Verwendungszweckes **Verteiltransformatoren**. Für Bemessungsleistungen ab 200 kVA kommen in der Regel Verteiltransformatoren für Orts- und Industrienetze mit der Schaltgruppe Dyn 5 zum Einsatz. Die häufigste Ausführungsform ist der Dreischenkeltransformator [5 S. 98].

Die Wahl dieser Schaltungsarten ist in der Notwendigkeit des niederspannungsseitig benötigten Sternpunktleiters begründet. Im Niederspannungsnetz erfolgt die Endverteilung der elektrischen Energie. Zur Gewährleistung der Versorgung von einphasigen Verbrauchern ist, im Gegensatz zu den vorgelagerten Netzebenen, das Niederspannungsnetz als Vierleitersystem aufgebaut. Hinsichtlich des Dielektrikums unterteilt man die Umspanner in Trockentransformatoren, die heute fast ausschließlich mit eingegossenen Wicklungen ausgeführt sind, und in Öltransformatoren. Zur Bestückung von Netzstationen werden beide Bauarten eingesetzt. Sind jedoch Brand- und Umweltschutzgründe von besonderer Bedeutung kommt der Trockentransformator zum Einsatz.

Der Aufbau der **Niederspannungsschaltanlagen** wird maßgeblich durch die Anforderungen im Betrieb und dem Aufstellungsort bestimmt. Die technischen sowie die wirtschaftlichen Anforderungen führen letztendlich zu einigen Standardbauformen [5 S. 52, 10 S. 260, 13 S. 468].

In den Netzstationen werden die elektrischen Verbindungen zwischen den Schaltanlagen und dem Transformator in verschiedener Leiter-/ Isolationstechnik ausgeführt [4 S. 510].

Die unterschiedlichen Verbindungstechniken hängen von folgenden Kriterien ab:

- Transformatorleistung und Spannungsebenen,
- bauliche Situation, Gesamtlageplan,
- Schaltanlagenkonzeption, Ausführung, Bauweise und
- Umweltbedingungen.

2.3 Allgemeine Anforderungen an Schaltanlagen

Eine Schaltanlage (Def. Schaltanlagen nach DIN VDE 0670 Teil 6) ist die Kombination von Schaltgeräten mit zugehörigen Steuer-, Meß-, Schutz- und Regeleinrichtungen sowie Baugruppen aus derartigen Geräten und Einrichtungen mit den dazugehörigen Verbindungen, Zubehörteilen, Kapselungen und tragenden Gerüsten. Schaltanlagen dienen dem Verbinden und Trennen von Freileitungen und Kabeln und damit der Verteilung und Regelung des Energieflusses.

Ein hohes Maß an Personen- und Betriebssicherheit, das heißt ein ausreichender Schutz gegen Berührung sowie die Sicherheit gegen und bei Fehlbedienung gewährleistet den Betrieb und die Bedienung von Schaltanlagen. Die Möglichkeit eines unterbrechungs- und störungsfreien Dauerbetriebes setzt eine große Zuverlässigkeit und einen hohen technischen Stand der eingebauten Betriebsmittel voraus.

Wartungsarmut sowie eine übersichtliche und einfache Bedienung sind wesentliche Voraussetzungen einer modernen und wirtschaftlichen Schaltanlagentechnik.

2.3.1 Mittelspannungsschaltanlagen

Grundsätzlich unterscheidet man Mittelspannungsschaltanlagen nach den Isolationsabständen der spannungsführenden Teile, in Anlagen mit festgelegten Mindestabständen und in Anlagen, die nach Prüfspannung dielektrisch dimensioniert werden.

Für Mittelspannungsschaltanlagen, die **nach Mindestabständen** klassifiziert werden, gelten die DIN VDE-Bestimmungen 0101, worin alle erforderlichen Mindestmaße für die Abstände spannungsführender Teile ausgeführt sind.

Anlagen, deren dielektrische Dimensionierung **nach der Prüfspannung** erfolgt, werden als „typgeprüfte Anlagen bezeichnet“. Typgeprüft bedeutet, die Anlage hält außer den vorgeschriebenen Isolationswerten noch weitere Prüfwerte, wie z.B. für die thermische und dynamische Beanspruchung oder den Schutz gegen äußere Einflüsse ein.

Für „Metallgekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Spannungen bis 72,5 kV, fabrikfertig, typgeprüft“ gilt die DIN VDE-Bestimmung 0670 Teil 6.

In der DIN VDE-Bestimmung 0670 Teil 7 sind die technischen Parameter und Anforderungen für „Isolierstoffgekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Spannungen bis 36 kV, fabrikfertig, typgeprüft“ festgelegt.

Im folgenden Abschnitt werden die unterschiedlichen Bauformen einer Mittelspannungsschaltanlage näher beschrieben.

Unabhängig von der Dimensionierung nach Mindestabständen oder nach Prüfspannungen werden Mittelspannungsschaltanlagen im **konstruktiven Aufbau** nach Art der Abdeckung in offene, geschützte und gekapselte Anlagen unterteilt.

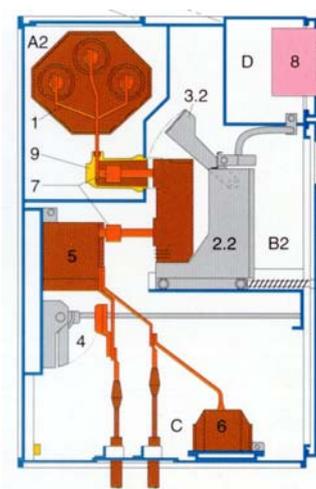
Zum ersten Merkmal, die **Art der Abdeckung**, kommt als weiteres Kriterium, die **Art der Einbautechnik**, in Form von Festeinbautechnik und ausfahrbarer Schaltwagentechnik hinzu [13 S.462].

Bei der offenen Bauform ist die Schaltanlage zur Gewährleistung eines allseitigen Berührungsschutzes für das bedienende Personal, nach DIN VDE 0101 [4 S.197] bis zu einer Höhe von 1,80 m an der Vorderseite mit Blech abgedeckt. Die Seitenwände werden ebenfalls mit Blechen oder mit Hartgipsplatten verschlossen.

Bei der offenen und der geschützten Bauweise ist zur Gewährleistung des Schutzes gegen direktes Berühren zusätzlich der Aufstellungsort innerhalb einer abgeschlossenen Betriebsstätte der elektrischen Anlage erforderlich.

Die metallgekapselten Schaltanlagen (Abb. 2-3) zeichnen sich durch erhöhten Berührungsschutz aus und werden in 3 Hauptgruppen:

- geschottete
- teilgeschottete und
- metallgeschottete Schaltanlagen, unterteilt.



| | |
|-----|----------------------------------|
| A2 | Sammelschienenraum |
| B2 | Leistungsschalterbereich |
| C | Kabelanschlußbereich |
| D | Niederspannungsraum |
| 1 | Sammelschienen |
| 2.2 | Leistungsschalter (auf Einschub) |
| 3.2 | Automatische Abdeckblende |
| 4 | Erdungsschalter |
| 5 | Stromwandler |
| 6 | Spannungswandler |
| 7 | Einfahrkontakte |
| 8 | Feldleit- und Schutzgerät |
| 9 | Einfahrtulpe/Abzweigschottung |

Abb. 2-3 luftisolierte teilgeschottete Schaltanlage in Zellenbauweise [19]

Geschottete Schaltanlagen haben nichtmetallische Zwischenwände. Werden nicht alle Funktionszellen eines kompakten Schaltfeldes voneinander getrennt, nennt man die Anlage teilgeschottet (Abb. 2-3). Sind die Schotträume von metallisch geerdeten Zwischenwänden abgegrenzt, spricht man von metallgekapselt- metallgeschotteten Schaltanlagen.

Die **Festeinbau-Technik** wird offen oder metallgekapselt (geschottet und teilgeschottet) ausgeführt. Diese Schaltfelder werden nach Mindestabständen gemäß DIN VDE 0101 oder als typgeprüfte Anlagen nach DIN VDE 0670 Teil 6 gebaut.

Anlagen mit **Schaltwagentechnik** werden nur als fabrikfertige, typgeprüfte Schaltanlagen nach DIN VDE 0670 Teil 6 bzw. Teil 7 errichtet.

Durch die immer kompaktere und sicherere Gestaltung der Mittelspannungsschaltfelder ist ein Trend zur Zellenbauweise zu verzeichnen. Die Bestückung der Anlage mit der entsprechenden Gerätetechnik ist von der Aufgabenstellung und dem Einsatzgebiet innerhalb der Netzkonfiguration abhängig [5 S. 233].

Speziell zum Aufbau und der Wirkungsweise der unterschiedlichen Schaltgerätetypen und Sicherungselemente erfolgt im Rahmen dieser Diplomarbeit keine weitere detaillierte Beschreibung.

2.3.2 Niederspannungsschaltanlagen

Niederspannungsschaltanlagen und Verteiler werden nach der DIN VDE 0100 in fabrikfertige und nicht fabrikfertige Anlagen und Verteiler unterteilt. Fabrikfertige Anlagen unterscheidet man wiederum in Installationsverteiler und Zählerplätze, Baustromverteiler und Niederspannungs- Schaltgerätekombinationen. Nicht fabrikfertige Anlagen werden aus den Einzelteilen vor Ort zusammengesetzt.

Die DIN VDE 0660 Teil 500 unterscheidet die Art der Herstellung von fabrikgefertigten Anlagen in „Typgeprüfte Schaltgerätekombinationen“ und in „Partiell typgeprüfte Schaltgerätekombinationen“. Die typ- sowie die partiell typgeprüften Schaltgerätekombinationen werden grundsätzlich in drei verschiedene Bauformen hergestellt.

Eindeutige Vorteile der fabrikfertigen Anlagen sind die kostengünstige Serienfertigung, die leichte Montage durch die kompakte raumsparende Bauweise und die Modulbildung der mechanischen und elektrischen Grundeinheiten sowie die leicht durchzuführende Prüfung vor Inbetriebnahme der Anlage. Fabrikgefertigte Anlagen werden vorrangig verwendet.

Bezüglich des Berührungsschutzes unterscheidet man zwischen

- a) der offenen Bauform,
- b) der Tafelbauform und
- c) der geschlossenen Bauform.

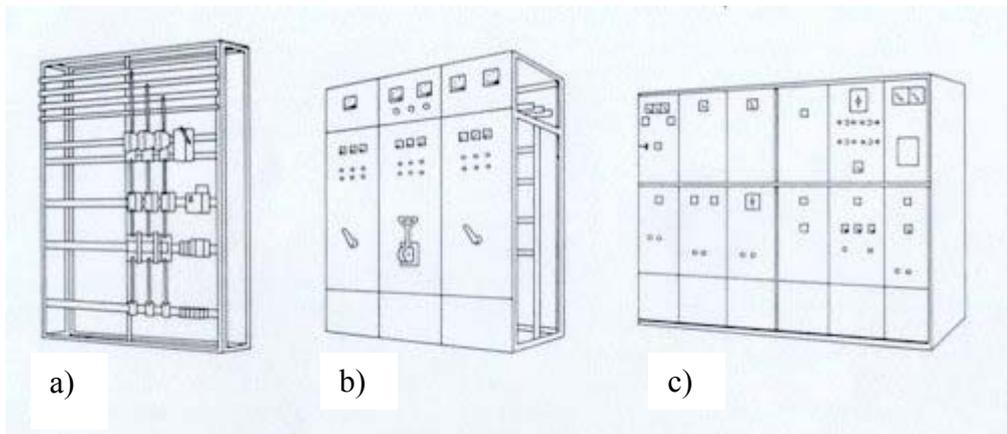


Abb. 2-4 a-c fabrikgefertigtes Niederspannungsgerüst [13 S.470]

Zu der **offenen Bauform** (Abb. 2-4 a) gehört die Gerüstbauform. Sie kommt häufig in den Verteilernetzen der Energieversorger zum Einsatz. Die Sicherstellung des Schutzes gegen direktes Berühren bei der offenen Bauweise erfordert die Aufstellung der elektrischen Anlage innerhalb einer abgeschlossenen Betriebsstätte [4 S. 197].

Werden auf dem Skelett der Gerüstbauform noch Türen und feste Verblendungen montiert, entsteht die **Tafelbauform** (Abb. 2-4 b). Wie auch bei der Gerüstbauform werden die elektrischen Anlagen dieser Bauform innerhalb abgeschlossener Betriebsstätten, z.B. Kompaktstationen, aufgestellt und betrieben.

Bei der **geschlossenen Bauform** (Abb. 2-4 c) gibt es unterschiedliche Ausführungsformen. Die **Schaltschrankbauform** ist eine Bauform mit allseitiger Verblendung durch Festblenden und Türen, basierend auf dem Grundelement der Gerüstbauform. Diese Systeme werden in allgemein zugänglichen Betriebsstätten aufgestellt.

Die **Kastenbauform** wird mit gußgekapselten oder isolierstoffgekapselten Gehäusewerkstoffen hergestellt. Sie besitzt besonders hohe mechanische Widerstandsfähigkeit und wird in Räumen mit chemisch aggressiver Atmosphäre, Feuchtigkeit, Staub sowie mechanischer Beanspruchung aufgestellt. Die Haupteinsatzgebiete dieser Schaltanlagenbauform sind in den Bereichen der Industrienetze zu finden.

2.4 Unterscheidung der Netzstationen nach den Bauausführungen

Es gibt viele Gesichtspunkte und Kriterien zur Einteilung und Systematisierung von Netzstationen. Unterscheidungskriterien und Bezeichnungsvarianten von Netzstationen entstehen infolge ihres Einsatzgebietes, bezogen auf die Verbraucher oder die Art der Einspeisung, in Abhängigkeit des Einsatzortes innerhalb der Netzstruktur.

Zur Beurteilung der magnetischen Flußdichte sind unter anderem die räumlichen Abstände von stromtragenden Komponenten relevant. Die systematische Aufarbeitung dieser Problematik erfordert eine Einteilung der Netzstationen nach ihren unterschiedlichen Bauausführungen. Man unterscheidet Netzstationen, hinsichtlich des umschließenden Baukörpers, in vier große Gruppen.

- **Freileitungsstationen** oder **Turmstationen**,
- **begehbare Gebäudestationen**,
- in Büro- und Wohnhäuser oder Betriebsstätten installierte **Einbaustationen**,
- **Stationen in Fertigteilbauweise**
 - begehbare Stationen
 - nicht begehbare Stationen (die sogenannten Kompaktstationen)

Die **Kompaktstationen** (Abb. 2-2) werden in unterschiedlichen Baukörpern aus Beton, Leichtmetall, Stahlblech und Kunststoff ausgeführt.

3 Erörterung der Rechtsgrundlagen

Jeder lebende Organismus und jedes technische Gerät ist vielfältigen Umweltbeanspruchungen ausgesetzt. Jeder Belastung steht im gewissen Maße eine Festigkeit gegenüber. Im übertragenden Sinne kann man auch sagen, daß zur Gewährleistung der Lebensfunktionen lebender Organismen bzw. der technischen Funktionstüchtigkeit von Geräten, Apparaten und Systemen die Belastung durch die Umwelt der Verträglichkeit nicht überwiegen darf.

Die Umweltbeanspruchung durch elektromagnetische Felder hinsichtlich der biologischen Verträglichkeit wird in dieser Diplomarbeit Betrachtungsgegenstand sein.

Natürliche und künstliche elektromagnetische Felder sind überall gegenwärtig und haben Einfluß auf Lebewesen und technische Geräte. Damit kommt es zu einer Unterteilung der Rechtsgrundlagen in den **Regelungen für Arbeit und Umwelt** und der **Elektromagnetischen Verträglichkeit von Geräten**.

Aus der Aufgabenstellung geht hervor, daß im Zusammenhang mit den durchzuführenden Untersuchungen der Personenschutz hinsichtlich der magnetischen Flußdichte einzuhalten und zu verbessern ist. Die Erörterung der Rechtsgrundlagen soll einen Überblick über die geltenden Gesetze, beziehungsweise Entwurfsvorlagen hinsichtlich des Personenschutzes geben. In den folgenden Ausführungen ist der für die Aufgabenstellung relevante Teil in den dargestellten Tabellen und Diagrammen besonders gekennzeichnet.

Die Gesetze für die EMV von Geräten, speziell das **EMVG** (Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten), werden zur Vollständigkeit der in der Bundesrepublik Deutschland geltenden Rechtsgrundlagen mit aufgeführt.

3.1 Regelung für Arbeit und Umwelt

Der Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen elektromagnetischer Strahlung wird in Deutschland in der **26. BImSchV** umgesetzt. Die Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit **BGV B11** schreibt Grenzwerte für den Arbeitsschutz in der Bundesrepublik Deutschland vor. Sie existiert derzeit als Entwurf.

Personen sind den natürlichen Feldern und den durch den Menschen geschaffenen künstlichen Feldern ausgesetzt [15 S. 16]. Ein in der Natur vorkommendes Feld ist das statische Magnetfeld der Erde. Mit seinen geringen zeitlichen Schwankungen ist es permanent mit ca. 40 μT in unseren Breiten vorhanden.

Das statische elektrische Feld der Erde ist ebenfalls permanent vorhanden, aber von einigen Parametern, unter der Annahme, daß die Erde mit der sich umgebenden Ionosphäre einen Kugelkondensator bildet, abhängig. Es werden Werte von bis zu 0,5 kV/m bei Schönwetter und bis 30 kV/m bei Gewitter erreicht.

Der menschliche Organismus hat keine ausgeprägten Sinnesorgane zur direkten Wahrnehmung elektromagnetischer Felder. Das liegt an der Anpassung des Menschen an die Umweltbeanspruchungen über lange Zeiträume. Beispielsweise ermöglichte die Evolution auch das Leben unter atmosphärischem Luftdruck.

Zur natürlichen elektromagnetischen Umgebung gehören aber auch die elektromagnetischen Wellen, wie z. B. die Wärmestrahlung, das sichtbare Licht oder die Gammastrahlung aus irdischen und kosmischen Quellen (Abb. 3-1).

Auch hier hat der Mensch keine Sinnesorgane zur Verfügung, jedoch mit Ausnahme für die Wärmestrahlung und des sichtbaren Lichtes. Unerwünschte Sekundäreffekte, wie z. B. Sonnenbrand zeigen eine übermäßige Belastung durch UV- Bestrahlung erst an.

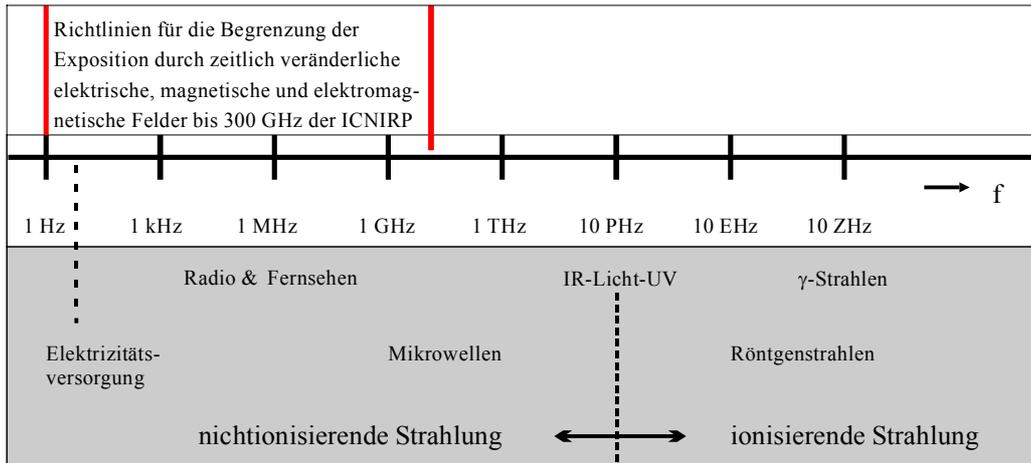


Abb. 3-1 elektromagnetisches Spektrum in logarithmischer Darstellung mit dem Frequenzbereich zur Begrenzung der Exposition durch EMF der ICNIRP [15 S.18]

Mit der fortschreitenden Technisierung unserer Gesellschaft ist auch ein stetiges Vordringen der Elektrotechnik mit all seinen Teildisziplinen in sämtlichen Lebens- und Arbeitsbereichen des Menschen zu verzeichnen. Zu den natürlichen elektromagnetischen Beeinflussungen kommt ein **Teil künstlicher Einflüsse unterschiedlichster Frequenzen und Amplituden** hinzu.

Zur Darstellung, für welchen Bereich des elektromagnetischen Spektrums die folgenden Rechtsgrundlagen erschaffen worden sind, wird eine Einteilung in ionisierende und nichtionisierende Strahlung, hinsichtlich der biologischen Wirkung, vorgenommen.

Eine sehr wesentliche Wirkung auf biologische Systeme ist die Ionisierung von Atomen oder Molekülen. Dann nämlich ist die Energie der Quanten so groß, daß es zur Abspaltung von Elektronen und damit zur unmittelbaren Veränderung der Materie kommt. Um direkte Störungen des molekularen Aufbaus auszulösen, sind Quantenenergien von 5 bis 100 eV notwendig. Bei Frequenzen von mehr als 1000 THz kommt es zu Ionisierungsvorgängen in der Materie. Die Energie von elektromagnetischen Wellen E_{elm} ist proportional zur Frequenz. Die Plancksche Strahlungskonstante $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js tritt als Proportionalitätskonstante auf. Mit der Beziehung

$$E_{elm} = h \cdot f \quad (3-1) \quad [15]$$

wurde eine Unterteilung in **ionisierende** und **nichtionisierende Strahlung** durchgeführt (Abb. 3-1).

Im Mai 1992 wurde die Internationale Kommission für den **Schutz vor nichtionisierender Strahlung** (ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) geschaffen [16].

Hauptaufgaben des Gremiums ist die Untersuchung der Gefährdung durch nichtionisierende Strahlung, die Entwicklung internationaler Richtlinien für Expositionsgrenzen und die Behandlung aller Aspekte des Schutzes vor nichtionisierender Strahlung.

Diese Kommission erarbeitete die Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder, für den Frequenzbereich bis 300 GHz, die im April 1998 veröffentlicht wurden. Abbildung 3-1 zeigt das elektromagnetische Spektrum mit der zuvor erwähnten Unterteilung in ionisierende und nichtionisierende Strahlung. Diese Unterteilung ist zur Betrachtung des erfaßten Bereiches vom elektromagnetischen Spektrum durch die Richtlinien der ICNIRP von Vorteil.

Zum Schutz nachteiliger Auswirkungen auf die Gesundheit wurden sogenannte **Basisgrenzwerte** festgelegt. Je nach Frequenz sind die zur Spezifizierung der Basisgrenzwerte der Exposition mit **EMF** (Elektromagnetische Felder) herangezogenen physikalischen Größen die Stromdichte, die SAR und die Leistungsdichte. Diese Basisgrenzwerte begründen sich einzig auf wissenschaftliche Daten.

Die Tabelle 3-1 zeigt die durch die ICNIRP festgelegten **Basisgrenzwerte**.

| Art der Exposition | Frequenzbereich | Stromdichte für Kopf u. Rumpf (mA m^{-2}) | Durchschnittl. Ganzkörper-SAR (W kg^{-1}) | Lokale SAR (Kopf u. Rumpf) (W kg^{-1}) | Lokale SAR (Gliedmaßen) (W kg^{-1}) | Leistungsdichte (W m^{-2}) |
|-----------------------|-------------------|--|--|---|--|---------------------------------------|
| Berufliche Exposition | bis 1 Hz | 40 | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 1-4 Hz | 40/f | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 4 -1000 Hz | 10 | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 1-1 00 kHz | f/100 | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 0,1-10 MHz | f/100 | 0.4 | 10 | 20 | (-) |
| | 0,01-10 GHz | (-) | 0.4 | 10 | 20 | (-) |
| | 10-300 GHz | (-) | (-) | (-) | (-) | 50 |
| Exp. der Bevölkerung | bis 1 Hz | 8 | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 1-4 Hz | 8/f | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 4 -1000 Hz | 2 | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 1-1 00 kHz | f/500 | (-) | (-) | (-) | (-) |
| | 0,1-10 MHz | f/500 | 0.8 | 2 | 4 | (-) |
| | 0,01-10 GHz | (-) | 0.8 | 2 | 4 | (-) |
| | 10-300 GHz | (-) | (-) | (-) | (-) | 10 |

Tabelle 3-1 Basisgrenzwerte der ICNIRP (1998 veröffentlicht) für die berufliche Exposition und für die Exposition der Bevölkerung. Die grau hinterlegten Basisgrenzwerte sind für den Bereich der Netzfrequenz.

Im Frequenzbereich von einigen Hz bis 1 kHz werden die Schwellen (bei Werten von über 100 mA m^{-2} [16 S. 36]) für akute Veränderungen in der Erregbarkeit des Zentralnervensystems überschritten. In Anbetracht der Sicherheitserwägungen wurde beschlossen, daß die berufsbedingte Exposition im Frequenzbereich von 4 Hz bis 1 kHz auf Felder beschränkt sein sollte, die Stromdichten von weniger als 10 mA m^{-2} induzieren.

Ein Sicherheitsfaktor von 10 wurde für die berufliche Exposition angesetzt. Für die allgemeine Bevölkerung wurde ein zusätzlicher Faktor 5 angesetzt, der zur Begrenzung der Exposition auf 2 mA m^{-2} führt.

Der soeben beschriebene Bereich, relevant durch die Aufgabenstellung, ist in der Tabelle 3-1 grau hinterlegt. Zur näheren Erläuterung der nicht beschriebenen Basisgrenzwerte in der Tabelle 3-1 wird auf die Richtlinien der ICNIRP verwiesen.

Zur praktischen Expositionsbeurteilung wurden die **Referenzwerte** (Abb. 3-2) unter Nutzung von Meß- und/ oder Berechnungsverfahren aus den entsprechenden **Basisgrenzwerten** abgeleitet.

Die folgende Grafik zeigt nur die Referenzwerte für die Exposition durch zeitlich veränderliche Magnetfelder.

Die in dem Diagramm vertikal eingezeichneten Geraden markieren die Grenzwerte der 26. BImSchV und zeigen die Referenzwerte der ICNIRP.

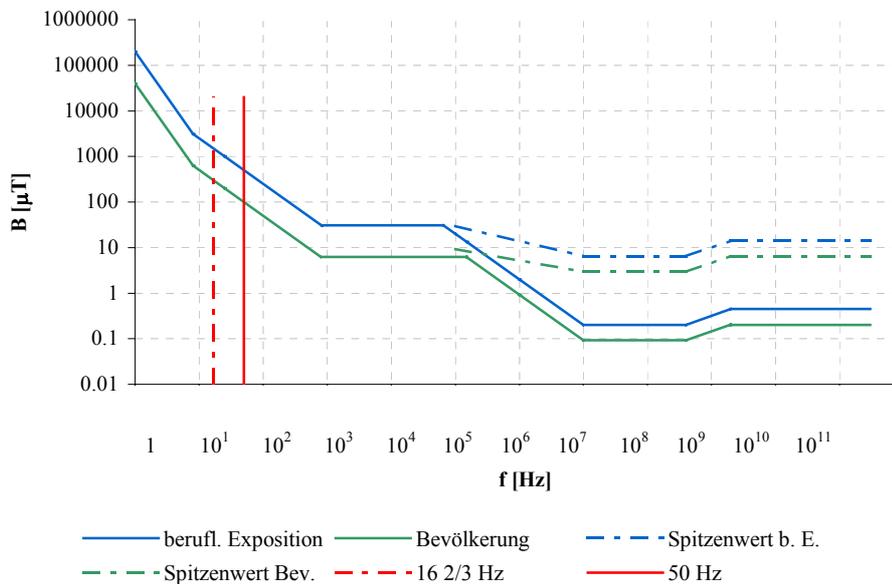


Abb. 3-2 Referenzwerte für Exposition durch zeitlich veränderliche Magnetfelder der ICNIRP [16]

Zur Gewährleistung des maximalen Schutzes ist die Bedingung der maximalen Kopplung des Feldes zur exponierten Person angesetzt.

In der Anwendung sind numerische Berechnungsverfahren, die den menschlichen Körper in unterschiedlichen Gewebearten klassifizieren und den jeweiligen Klassen homogene und isotrope Leitfähigkeiten zuordnen. Damit kann eine Annäherung an den menschlichen Körper simuliert werden. Ausführliche Beschreibungen zu den einzelnen numerischen Berechnungsverfahren sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3.1.1 26. Bundes- Immissionsschutzverordnung

Die Verordnung trat am 01.01. 1997 in Kraft und löste die bis dahin in den Teilen 2 bis 4 der DIN-VDE 0848 geltenden Grenzwerte ab [23]. Die Immissionsgrenzwerte basieren auf den Empfehlungen der IRPA/INIRC. Sie dient als immissionsschutzrechtliche Regelung dem Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft. Sie gilt nicht für Beschäftigte, die bestimmungsgemäß Arbeiten an den erfaßten Anlagen durchführen. Für diese Beschäftigten gelten die Regeln des Arbeitsschutzes, die im nächsten Abschnitt aufgeführt werden.

Die immissionsschutzrechtliche Regelung wird mit der Festlegung von Grenzwerten innerhalb definierter Einwirkungsbereiche emittierender Anlagen umgesetzt [14]. Die dargestellten Grenzwerte in der Tabelle 3-2 für Hochfrequenzanlagen und in der Tabelle 3-3 für Niederfrequenzanlagen entsprechen den Empfehlungen der IRPA/INIRC. Die grau hinterlegten Werte sind die Expositionsgrenzwerte der magnetischen Flußdichte für Niederfrequenzanlagen, die gemäß der Aufgabenstellung von Interesse sind.

| Frequenz (MHz) | Effektivwert der Feldstärke (quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle) | |
|----------------|--|---------------------------------|
| | elektrische Feldstärke (V/m) | magnetische Feldstärke (A/m) |
| 10 - 400 | 27.5 | 0.073 |
| 400 - 2000 | $1,375 f^{1/2}$ | $0,0037 f^{1/2}$ |
| 2000 - 300000 | 61 | 0.16 |

Tabelle 3-2 Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen [14]

| Frequenz (Hz) | Effektivwert der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flußdichte | |
|---------------|---|--------------------------------------|
| | elektrische Feldstärke (kV/m) | magnetische Flußdichte (μ T) |
| 50 | 5 | 100 |
| $16^{2/3}$ | 10 | 300 |

Tabelle 3-3 Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen [14]

Die Verordnung berücksichtigt nicht die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate. Hierfür ist die **VDE 0848 Teil 3-1**, Entwurf Juni 1999 zuständig.

Zur Ermittlung der Feldstärke- und Flußdichtewerte sind die Meß- und Berechnungsverfahren des Normentwurfs **VDE 0848 Teil 1** vom Juli 1999 anzuwenden.

Bei der Berücksichtigung weiterer Niederfrequenzanlagen ist eine Summenbetrachtung durchzuführen. Für eine Gesamtbeurteilung ist zunächst die Feldstärke und Flußdichte für die jeweilige Frequenz zu bestimmen und wie folgt in Bezug zu dem entsprechenden Grenzwert [14] zu setzen.

$$\frac{E_{\text{ges (} 16^{2/3} \text{ Hz)}}}{10\text{kV / m}} + \frac{E_{\text{ges (} 50\text{Hz)}}}{5\text{kV / m}} \leq 1 \quad (3-2)$$

$$\frac{B_{\text{ges (} 16^{2/3} \text{ Hz)}}}{300 \mu\text{T}} + \frac{B_{\text{ges (} 50 \text{ Hz)}}}{100 \mu\text{T}} \leq 1 \quad (3-3)$$

3.1.2 Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit BGV B11

Berufsgenossenschaftliche Vorschriften für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit sind Unfallverhütungsvorschriften im Sinne des § 15 Siebtes Buch Sozialgesetzbuch (SGB VII). Hier sind die Basisgrenzwerte der ICNIRP Grundlage für die unmittelbaren Wirkungen.

Diese BG-Vorschrift gilt, soweit Versicherte elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz unmittelbar oder mittelbaren Wirkungen ausgesetzt sind.

Der Arbeitsschutz berücksichtigt die Exposition einer ausgewählten Personengruppe unter kontrollierten Bedingungen für die begrenzte Dauer einer Arbeitsschicht und legt Werte für die Bereiche fest, in denen die 26. BImSchV nicht gilt.

Die BGV B11 liegt derzeit als Fachausschußentwurf vom Dezember 1998 vor, der zum 31. Mai 1999 redaktionell überarbeitet wurde. Die Ratifizierung ist für die Mitte des Jahres 2000 vorgesehen.

3.2 Elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten

Das **Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG)** ist die deutsche Rechtsvorschrift zur Umsetzung der EMV-Richtlinie 89/336/EWG vom 13. November 1992. Mit der Neufassung des Gesetzes vom 18. September 1998, die am 24. September im Bundesgesetzblatt veröffentlicht wurde, trat die Novellierung des EMVG am 25. September 1998 in Kraft. Dieses Gesetz beinhaltet die Normen, die zur Konformitätsbewertung, hinsichtlich elektromagnetischer Störung und elektromagnetischer Verträglichkeit, notwendig sind.

Elektromagnetische Störung:

Eine elektromagnetische Störung ist jede elektromagnetische Erscheinung, welche die Funktion eines Gerätes beeinträchtigen könnte. Eine elektromagnetische Störung kann elektromagnetisches Rauschen, ein unerwünschtes Signal oder eine Veränderung des Ausbreitungsmediums selbst sein [24].

Elektromagnetische Verträglichkeit:

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist die Fähigkeit eines Gerätes in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umwelt vorhandene Geräte unannehmbar wären [24].

Die Konformität wird erreicht, wenn die geltenden Schutzanforderungen eingehalten werden. Die Schutzanforderungen legen fest, welche Anforderungen an Geräte zu stellen sind, damit diese zum einen keine elektromagnetischen Störungen bei anderen Geräten verursachen, das heißt deren bestimmungsgemäßen Betrieb nicht beeinträchtigen (Emissionsbegrenzung) und zum anderen selbst eine angemessene Festigkeit gegenüber elektromagnetischen Einwirkungen anderer Geräte aufweisen (Immunitätsanforderung). Weitergehende Anforderungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit und des Telekommunikationsrechts werden durch folgende Gesetze geregelt:

- das Medizinproduktegesetz (MPG),
- das Telekommunikationsgesetz (TKG) und
- das Amateurfunkgesetz.

4 Analyse der Verursacher des magnetischen Feldes von Netzstationen

4.1 Theoretische Grundlagen

In den rechnergestützten numerischen Berechnungen elektrischer und magnetischer Felder in der Energietechnik, in der Antennentheorie sowie in der Elektromagnetischen Verträglichkeit unserer Umwelt treten die Maxwellchen Gleichungen (Tabelle 4-1) implizit in Erscheinung. Sie bilden das theoretische Fundament der gesamten Elektrotechnik.

Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder werden mittels betrags- und richtungsabhängige Größen (Vektoren) beschrieben.

Mit Hilfe räumlicher Differentiationen (Rotation und Divergenz), d.h. die betrachteten Flächen bzw. Volumina streben gegen Null, lassen sich lokale Aussagen über einzelne Feldpunkte machen. Die Begriffe Divergenz (Abk. div) und Rotation (Abk. rot) werden im Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 näher erläutert.

| Die Maxwellchen Gleichungen in Differentialform | | |
|---|--|-------|
| $\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ | \vec{E} umwirbelt $(-\frac{d\vec{B}}{dt})$ | (4-1) |
| $\text{div } \vec{D} = \frac{dQ}{dV} = \rho$ | Quellen der elektrischen Flußdichte \vec{D} sind die elektrischen Ladungen | (4-2) |
| $\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_k + \frac{d\vec{D}}{dt}$ | \vec{H} umwirbelt \vec{J}_{Ges} | (4-3) |
| $\text{div } \vec{B} = 0$ | Es gibt keine Ladungen als Quellen der magnetischen Flußdichte \vec{B} . | (4-4) |

Tabelle 4-1 Die Maxwellchen Gleichungen in Differentialform [22]

Die räumliche Änderung eines Vektorfeldes läßt sich durch zwei charakteristische Größen beschreiben. Die Divergenz eines Vektorfeldes, eine skalare Größe, beschreibt die Quellenstärke. Die Rotation ist ein Vektor und gibt die Wirbelstärke des untersuchten Vektorfeldes an.

4.1.1 Die Divergenz eines Vektorfeldes

Zur Beschreibung der Feldeigenschaft bezüglich der Quellenstärke (Ergiebigkeit eines Vektorfeldes) bedient man sich der Divergenz eines Vektorfeldes.

Die Divergenz ist ein Skalar und untersucht das Hüllenintegral über der geschlossenen Oberfläche eines Raumteils (Volumen) wobei man das betrachtete Volumen gegen Null streben läßt (Gl. 4-5).

$$\operatorname{div}F = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\oint F dA}{\Delta V} \quad (4-5)$$

F- Vektorfeld

ΔV - Volumenelement

dA- infinitesimales Flächenelement

Es kann somit eine Aussage über den spezifischen Hüllenfluß des eingeschlossenen Vektorfeldes gemacht werden. Bei positiver Divergenz handelt es sich um ein positives Quellenfeld, bei negativer Divergenz um ein negatives Quellenfeld (Senke). Ist die Divergenz eines Vektorfeldes 0, dann ist das Vektorfeld quellenfrei.

4.1.2 Die Rotation eines Vektorfeldes

Die Feldeigenschaft Wirbelstärke wird mit der Rotation eines Vektorfeldes beschrieben. Die Rotation ist selbst auch ein Vektor, sie untersucht das Linienintegral einer geschlossenen Kurve eines Vektorfeldes.

Das gebildete Verhältnis der Schleifenzirkulation zur umschlossenen Schleifenfläche, wobei die umrandete Fläche gegen Null strebt, beschreibt die Wirbelstärke (Gl. 4-6).

$$\operatorname{rot}F = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\oint F ds}{\Delta A} \quad (4-6)$$

F-Vektorfeld

ds- infinitesimales Wegelement

ΔA - Flächenelement

Ist der Vektor $\text{rot } F = 0$, dann ist das untersuchte Vektorfeld wirbelfrei.

Zur Bestimmung der Feldgrößen sind die Maxwell'schen Gleichungen, die Kontinuitätsgesetze und die Materialgleichungen notwendig [22, S. 25]. Sie beschreiben die elektromagnetischen Felder und ihre Wechselwirkungen mit der Materie. Zur genauen Bestimmung der zeitvarianten Feldgrößen ist eine Einteilung in zeitlich konstante und zeitlich veränderliche Felder notwendig.

Die zeitlich veränderlichen Felder werden hinsichtlich der Änderungsgeschwindigkeit ihrer Feldgrößen in langsam bzw. schnell veränderliche Felder unterschieden. Zur genaueren Beschreibung zeitlich veränderlichen Felder wählt man die Begriffe quasistationäre und nichtstationäre Felder.

Nichtstationäre Felder lösen sich von den Leitern der Anordnung ab und breiten sich in Form von elektromagnetischen Wellen im Raum aus. Ist bei sinusförmigen Vorgängen die Wellenlänge in der Größenordnung der linearen Abmessung der Leiteranordnung, kommt es zur Ablösung der Felder und damit verlieren die zeitlich veränderlichen Felder ihren ortsfesten quasistationären Charakter.

In Abhängigkeit der Frequenz der treibenden Spannung werden die quasistationären Strömungsfelder in Felder mit bzw. ohne Stromverdrängung differenziert. Die Stromverdrängung (Skinneffekt) bei sich zeitlich langsam ändernden Feldern kann vernachlässigt werden, da das vom Magnetfeld des Leitungs- oder Konvektionsstromes induzierte elektrische Wirbelfeld (Gl. 4-1) bei niedrigen Frequenzen gegen das den Leitungsstrom erzeugende äußere Quellenfeld vernachlässigbar klein ist [22 S. 131].

Der Anteil der Verschiebungsstromdichte (zeitliche Änderung des elektrischen Feldes) ist gegenüber der Leitungsstromdichte innerhalb von Leitern im Frequenzbereich der Energietechnik vernachlässigbar. Aus der Maxwell- Gl. (4-3) wird der Ausdruck,

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_k \quad (4-7)$$

und beschreibt damit die Wirbelstärke des Magnetfeldes für quasistationäre Felder. Im Frequenzbereich der Energieversorgung haben wir es mit quasistationären Feldern ohne Stromverdrängung zu tun. Das von einem Leiter umgebende Magnetfeld wird in diesem Frequenzbereich ausschließlich vom Leitungs- oder Konvektionsstrom gebildet (Gl. 4-7). Reduziert man diesen stromdurchflossenen Leiter geometrisch gesehen auf einen „Stromfaden“, dann kann man die magnetische Feldstärke H bzw. die magnetische Flußdichte $B = \mu \cdot H$ nach dem Gesetz von Biot-Savart (Gl. 4-8) berechnen.

4.2 Berechnungsverfahren nach Biot-Savart

Im technischen Frequenzbereich der Energieversorgung kann das quasistationäre magnetische Feld einer oder mehrerer stromdurchflossener Anordnungen mit dem Gesetz von Biot-Savart [28], unter Beachtung der Gültigkeitsbedingungen genau bestimmt werden.

$$dB = \mu_0 \cdot \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{ds \times r}{r^3} \quad (4-8)$$

Interpretation der Gleichung:

Die magnetische Flußdichte eines linear stromdurchflossenen Leiters (Stromfaden) ist die Summe (Superposition) der von den einzelnen Längenelementen ds herrührenden Anteile dB . Dabei steht jeder Teilvektor dB senkrecht auf der durch ds und r aufgespannten Fläche (Normal eines Kreuzproduktes). Die Gleichung 4-8 zeigt, daß die magnetische Flußdichte nur von der Stromstärke und der geometrischen Anordnung bestimmt wird.

Ferromagnetische Materialien werden in der Nähe der Leiteranordnungen mit diesem Lösungsansatz nicht berücksichtigt. Das betrachtete Medium für die Ausbreitung der magnetischen Feldlinien ist annähernd para- oder diamagnetisch. ($\mu \approx 1$, Vakuum).

WinField [25], das Feldberechnungsprogramm aus dem Hause der FGEU mbH berechnet die magnetische Flußdichte nach dem Gesetz von Biot-Savart, das folgendermaßen implementiert ist.

Zur vereinfachten Berechnung werden die zeitabhängigen Größen dB und I in komplexe Größen transformiert. Legt man den (i)-ten Teilleiter der Länge l_i (Abb.4-1) in den Ursprung des Koordinatensystems parallel zur x-Achse, dann berechnet sich sein Feldbeitrag im Aufpunkt $P(x, y, z)$ zu:

$$\left| \vec{B}_i \right| = \frac{\mu_0}{4\pi r} I_i \left[\frac{l_i - x_p}{\sqrt{(l_i - x_p)^2 + r^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + r^2}} \right] \quad (4-9)$$

mit den Vektorkomponenten:

$$\vec{B}_{xi} = 0 \quad (4-10)$$

$$\vec{B}_{yi} = -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} |\vec{B}_i| \quad (4-11)$$

$$\vec{B}_{zi} = \frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} |\vec{B}_i| \quad (4-12)$$

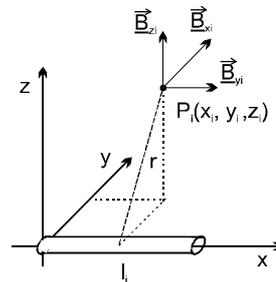


Abb. 4-1 Teilleiter I_i im Koordinatenursprung

Da wir es jedoch mit Teilleitern allgemeiner Lage zu tun haben, wird für die Berechnung der Flußdichte der betrachtete Aufpunkt in das lokale Koordinatensystem des jeweiligen Segmentes transformiert. Dies geschieht durch eine Verschiebung und anschließende Rotation. Damit erhält man den Anteil des Segmentes zum gesamten Feldvektor, der allerdings noch in das Weltkoordinaten-System zurück transformiert werden muß. Für ein n -Leitersystem ergibt sich die magnetische Flußdichte im Aufpunkt P durch Superposition [27].

$$\vec{B}(P) = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i(P) \quad (4-13)$$

Im Falle eines sinusförmigen Stromes mit fester Frequenz

$$I(t) = \hat{I} \sin(\omega t) \quad (4-14)$$

wird für den Effektivwert (RMS) die Beziehung

$$I = \hat{I} / \sqrt{2} \quad (4-15)$$

zugrunde gelegt.

Je nach geometrischer Anordnung der Leiter und des Aufpunktes P beschreibt der umlaufende Vektor der magnetischen Flußdichte im allgemeinen eine Ellipse. Sonderfälle dieser Bahnbeschreibung sind die Gerade und der Kreis. Entsprechend unterteilt man die Schwingungsvorgänge in elliptisch polarisiert, zirkular sowie linear polarisiert. Für elliptisch polarisierte Felder, häufigster Fall bei Drehstromsystemen [27], liegt eine Kombination von zirkular und linear polarisierten Vorgängen vor.

In der Abb. 4-2 ist die Rotationsellipse des B- Vektors dargestellt. Die große Halbachse der Ellipse beschreibt den Spitzenwert des Vektors. Der Spitzenwert (maximale Betrag der Flußdichte) an diesem Ort wird mit Kenntnis der Amplituden und der Phasenlagen der Vektorkomponenten berechnet.

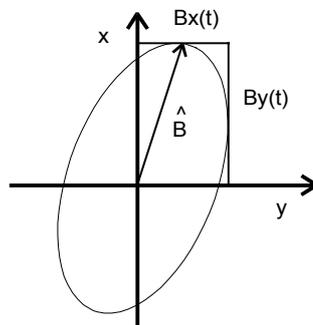


Abb. 4-2 Rotationsellipse des B-Vektors

Wenn ein Gemisch verschiedener Frequenzen vorliegt, werden die Feldbeiträge der einzelnen Segmente zeitlich entwickelt, aufaddiert und anschließend über die Zeit integriert.

WinField berechnet den Betrag, die Einzelkomponenten und den Spitzenwert.

4.3 Die Verteilung der Magnetflußdichte unendlich langer geradliniger Grundanordnungen und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen

Zur Einhaltung von Grenzwerten in vorgeschriebenen Einwirkungsbereichen sowie zur Einhaltung der Störfestigkeitspegel von Geräten und Systemen erhält die Kenntnis der exponentiellen Abnahme der magnetischen Flußdichte vom Ort ihrer Entstehung besondere Bedeutung.

Die Gesetzmäßigkeit, mit der die Amplitude der Feldgröße abnimmt, wird Entfernungsgesetz [21] genannt. Bei unendlich langen geradlinigen Leitern zeigt sich, daß der Exponent x der Abnahmefunktion $1/r^x$ ganzzahlig auftritt. Für diese durch Gültigkeitsbedingungen beauftragten Anordnungen gibt es allgemeingültige analytische Berechnungsvorschriften. Sie beschränken sich auf Berechnungspunkte im „genügend großen Abstand“ bei unendlich langen Anordnungen. Dieser Bereich der Feldgrößenbestimmung mit ganzzahligen Exponenten der Abnahmefunktion wird als geometrischer Fernbereich bezeichnet.

Mit der Berücksichtigung der geometrischen Einzelheiten komplexer Leiteranordnungen sowie deren räumliche Positionierung ist die Bestimmung der magnetischen Flußdichteverteilung in der unmittelbaren Umgebung, im sogenannten geometrischen Nahbereich, mit den einfachen Gesetzmäßigkeiten nicht mehr möglich. Die Potenz der Abnahmefunktion $1/r^x$ ist in diesem Bereich nicht ganzzahlig und u. a. von der Geometrie der Leiterkonfiguration abhängig.

4.3.1 Vergleich der analytischen Lösungen mit der Berechnung nach Biot-Savart von idealen Grundanordnungen

Der Einfluß der konkreten Anordnung auf die magnetische Flußdichteverteilung nimmt mit zunehmender Entfernung von der Leiteranordnung ab. Die Grenze, abhängig von den geometrischen Merkmalen sowie den technischen Einstellparametern, zwischen dem genannten Nahbereich und Fernbereich ist fließend. Das Verfahren nach Biot-Savart ermöglicht eine exaktere Bestimmung der magnetischen Flußdichteverteilung in der unmittelbaren Nähe komplexer Leiterkonfigurationen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse von fünf Anordnungen mit den Berechnungsabständen von 2 m, 5 m, 10 m und 100 m der Lösungsvarianten analytisch und nach Biot-Savart miteinander verglichen. Die analytischen Lösungsansätze [21] sind durch die Überlagerung der Reihenentwicklung des Feldes eines Einzeleleiters entstanden.

Die Berechnung erfolgt wegen der vorliegenden Zylindergeometrie in einem Zylinderkoordinatensystem. In Zylinderkoordinaten bezeichnet r den Abstand zwischen der z - Achse und dem Berechnungsaufpunkt P in einer Ebene orthogonal zur z - Achse. Die z - Achse liegt im geometrischen Schwerpunkt der Anordnungen 1 bis 5 (Abb. 4-3 bis 4-12). Randeffekte werden durch die analytischen Lösungsansätze, unendlich langer geradliniger Leiter, nicht erfaßt, sie erfordern zur Vergleichbarkeit mit den Lösungen nach Biot-Savart entsprechende Berücksichtigung.

Im Berechnungsprogramm WinField [25] wurden die Längen der 5 Anordnungen auf 20 km eingestellt. Die Berechnungen wurden auf halber Länge in der orthogonalen Schnittebene zu den Anordnungen mit einem Strom von 1 kA durchgeführt. Im geometrischen Nahbereich liefern die Lösungen nach Biot-Savart gegenüber den analytischen Ansätzen exaktere Angaben. Der angegebene, mit WinField [25] berechnete Wert, ist ein arithmetischer Mittelwert, der die Grundlage der prozentualen Abweichung darstellt. Der minimale und der maximale Flußdichtewert vom geometrischen Schwerpunkt ausgehend berücksichtigt, unter Beibehaltung der konkreten Abstände (2 m, 5 m, 10 m und 100 m), die variante, transversale Ausbreitung der Magnetflußdichte. Diese sind in den Abbildungen der Anordnung 3 und 5 gut zu erkennen.

Anordnung 1: Einzelleiter

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (4-16)$$

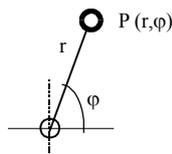


Abb. 4-3 [21]

Die analytischen Lösungen des Einzelleiters sind mit WinField äquivalent, die prozentuale Abweichung ist bei allen Abständen 0 %.

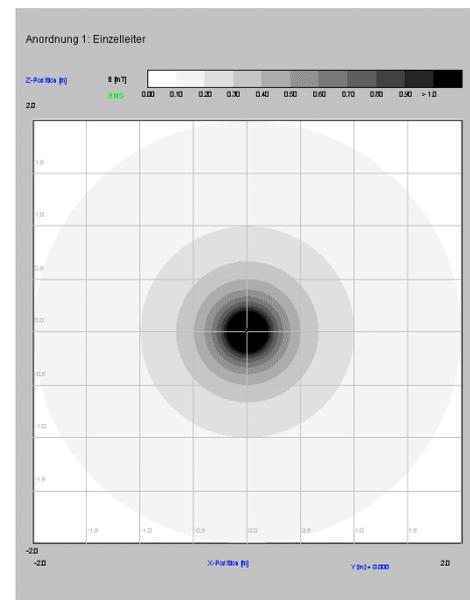


Abb. 4-4 Feldbild der Anordnung 1

| Abstand | | 2 m | 5 m | 10 m | 100 m |
|---------|----------------|--------|-------|-------|-------|
| Lösung | analytisch | 100 µT | 40 µT | 20 µT | 2 µT |
| | Winfield | 100 µT | 40 µT | 20 µT | 2 µT |
| | Abweichung [%] | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 4-2 Vergleich der analytischen Lsg. mit der Lsg. nach Biot- Savart der Anordnung 1

Anordnung 2: Hin- und Rückleiter

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{2a}{r^2} \tag{4-17}$$

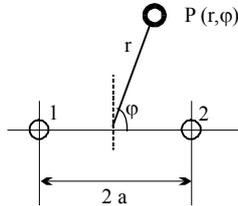


Abb. 4-5 [21]

Abstand der Leiter 2a: 1 m

Abstand a (geometrischen Schwerpunkt): 0,5 m

Wird der Leiterabstand 2a auf die Hälfte reduziert, halbiert sich der Betrag von B.

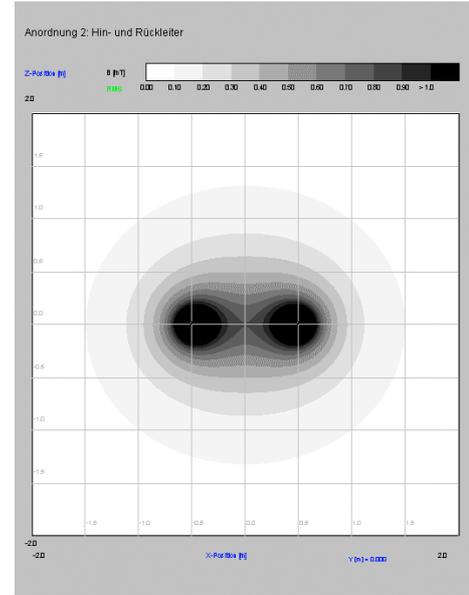


Abb. 4-6 Feldbild der Anordnung 2

| Abstand | | 2 m | 5 m | 10 m | 100 m |
|---------|----------------|-----------|----------|------|-----------|
| Lösung | analytisch | 50 µT | 8 µT | 2 µT | 20 nT |
| | Winfield | 50,196 µT | 8,001 µT | 2 µT | 20,001 nT |
| | Abweichung [%] | 0.392 | 0.013 | 0 | 0.005 |

Tabelle 4-3 Vergleich der analytischen Lsg. mit der Lsg. nach Biot- Savart der Anordnung 2

Anordnung 3: Drehstromsystem (eben verlegt)

$$B = \mu_0 \frac{\sqrt{3} \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a}{r^2} \tag{4-18}$$

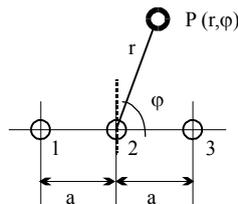


Abb. 4-7 [21]

Abstand der Leiter: 1 m

Abstand a: 1 m

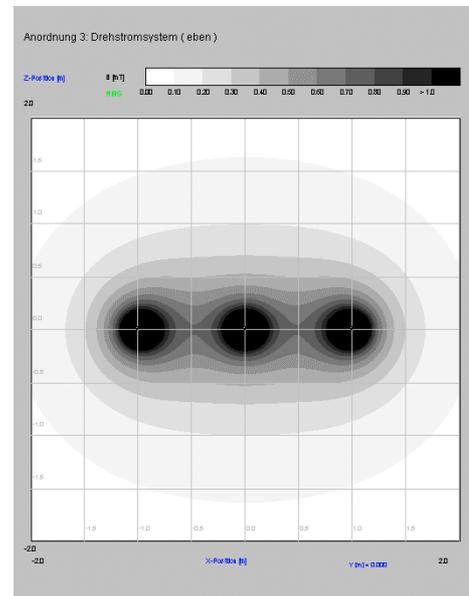


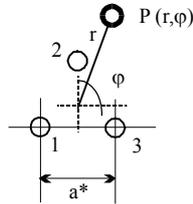
Abb. 4-8 Feldbild der Anordnung 3

| Abstand | | 2 m | 5 m | 10 m | 100 m |
|---------|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Lösung | analytisch | 86,603 µT | 13,856 µT | 3,464 µT | 34,641 nT |
| | Winfield | 96.148 | 13.971 | 3.471 | 34.642 |
| | Abweichung [%] | 11.022 | 0.83 | 0.202 | 0.003 |

Tabelle 4-4 Vergleich der analytischen Lsg. mit der Lsg. nach Biot- Savart der Anordnung 3

Anordnung 4: Drehstromsysteme (im Dreieck verlegt)

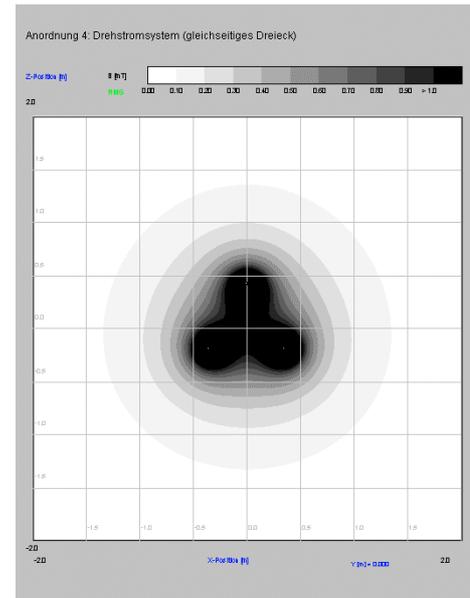
$$B = \mu_0 \frac{\sqrt{3} \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a^*}{r^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4-19)$$

**Abb. 4-9**

Abstand a^* : $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot a$

(mit a : Abstand der eben verlegten Anordnung)

Abstand der Leiter: 0,71 m

**Abb. 4-10** Feldbild der Anordnung 4

| Abstand | | 2 m | 5 m | 10 m | 100 m |
|---------|----------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| Lösung | analytisch | 43,301 μT | 6,928 μT | 1,732 μT | 17,321 nT |
| | Winfield | 44,192 μT | 6,95 μT | 1,733 μT | 17.318 |
| | Abweichung [%] | 2.058 | 0.318 | 0.058 | 0.017 |

Tabelle 4-5 Vergleich der analytischen Lsg. mit der Lsg. nach Biot- Savart der Anordnung 4

Die Feldamplitude der gleichseitigen Dreiecksanordnung reduziert sich gegenüber der ebenen Anordnung um die Hälfte, wenn der Abstand der Leiter $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot a$ beträgt, wobei a der Abstand des ebenen Drehstromsystems ist.

Mit zunehmender Komplexheit der Anordnungen erhöht sich die prozentuale Abweichung. Betrachtet man die isotrope Abnahme der Magnetflußdichte vom geometrischen Schwerpunkt ausgehend, ist der Einzelleiter der Idealfall.

Bei einem Abstand von 100 m des Meßpunktes vom geometrischen Schwerpunkt der angenommenen Konfigurationen ausgehend, umschließt das Linienintegral des magnetischen Potentials eine konzentrische Kreisfläche. Diese Bedingung erfüllt in unmittelbarer Nähe nur der Einzelleiter (Abb. 4-3 u. 4-4). Im Fernbereich dieser Anordnungen und für den Einzelleiter auch im Nahbereich, ergibt der Exponent gleicher Flußdichteänderung, unabhängig von der gewählten Vorzugsrichtung, konstante ganzzahlige Werte.

Anordnung 5: zwei Drehstromsysteme (eben verlegt)

$$B = \mu_0 \frac{\sqrt{7} \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a^2}{r^3} \cdot 2 \quad \text{mit } a=b \quad (4-20)$$

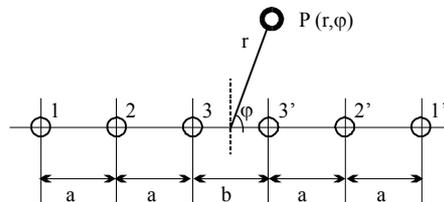


Abb. 4-11 [21]

Abstand der Leiter: 1 m

Abstand a und b: 1 m

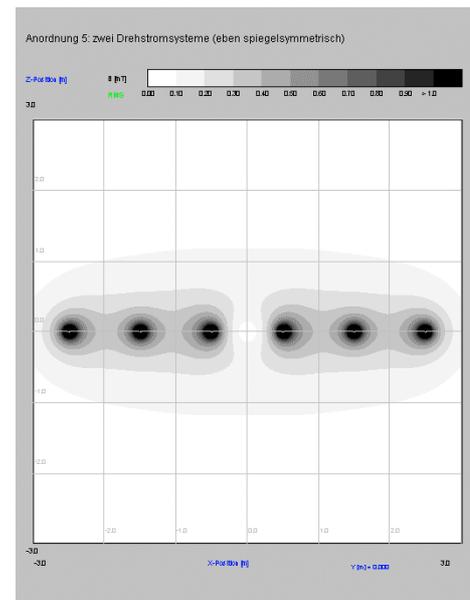


Abb. 4-12 Feldbild der Anordnung 5

| Abstand | | 2 m | 5 m | 10 m | 100 m |
|---------|----------------|-----------------------|---------------------|-------------|-------------|
| Lösung | Analytisch | 132,288 μT | 8,466 μT | 1058,301 nT | 1058,301 pT |
| | Winfield | 204,476 μT | 9,108 μT | 1063,007 nT | 1058,381 pT |
| | Abweichung [%] | 54.569 | 7.58 | 0.445 | 0.008 |

Tabelle 4-6 Vergleich der analytischen Lsg. mit der Lsg. nach Biot- Savart der Anordnung 5

Der analytische Lösungsansatz von der Anordnung 5 besitzt die Gültigkeit bei gleichen Beträgen der Abstände a und b. Für $a \neq b$ erfolgt die Flußdichteabnahme auch mit der dritten Potenz, der Term der Gleichung (4-20) ist aber wesentlich umfangreicher [21].

Die gravierendste Abweichung (%) zum Ergebnis mit dem Programm WinField, das Berechnungen in ortsinvarianten, isotropen und linearen Medien zuläßt, ist bei der Anordnung 5 mit über 50 % im Abstand von 2 m des Berechnungspunktes zu verzeichnen. Dieses Berechnungsbeispiel verdeutlicht besonders die Ergebnisdifferenz, wenn man die Gültigkeitsbedingungen der analytischen Lösungsansätze nicht beachtet.

Den Gültigkeitsbedingungen der Lösungen nach den analytischen Ansätzen [21] betreffend, wurde eingangs des Abschnittes vom „genügend großen Abstand gesprochen“. Eine weitere unkonkrete Aussage ist, daß der Grenzbereich zwischen dem geometrischen Nah- und Fernbereich der magnetischen Flußdichteverteilung einer stromführenden Anordnung fließend sei. Das Berechnungsverfahren nach Biot- Savart berücksichtigt nach dem Superpositionsprinzip für jeden Berechnungspunkt P die magnetischen Flußdichteverteilung. Mit der Festlegung einer Ergebnistoleranz von 0.5 % zum Ergebnis nach Biot- Savart sind

die ermittelten Werte ab 10 m Berechnungsabstand der hier betrachteten Anordnungen 1 bis 5 gleichzusetzen. Damit erhält man einen konkreten Abstand von 10 m sowie die Grenze zum geometrischen Fernbereich, in dem der analytische Berechnungsansatz unter der Bedingung, Berechnungsabstand = $10 \cdot a$ (a - Abstand der Leiter), angewendet werden kann. Diese Feststellung trifft ausschließlich auf die hier betrachteten Anordnungen 1 bis 5 zu.

Die anzeigepflichtigen Berechnungsabstände an Netzstationen befinden sich im unmittelbaren Nahbereich komplexer und endlicher Leiteranordnungen. Die Abnahme der magnetischen Flußdichte mit ganzzahligem Exponenten ist in diesem Bereich nicht mehr zutreffend und damit nur mit dem Verfahren nach Biot- Savart bestimmbar.

4.3.2 Betrachtung von Optimierungsmaßnahmen

Mit zunehmender Entfernung vom Verursacher nimmt die magnetische Flußdichteverteilung allgemein mit $1/r^x$ ab. Der Exponent der Abnahmefunktion ist im geometrischen Fernbereich bei idealen Grundanordnungen ganzzahlig.

Eine **Abstandsvergrößerung** als 1. Maßnahme führt mit der Kenntnis der spezifischen Abnahmefunktion einer komplexen Leitergeometrie, z.B. die Konstruktion einer Niederspannungsverteilung, zur Einhaltung von Grenzwerten oder Störfestigkeitspegeln. Am analytischen Lösungsansatz der Anordnung 2 (Abb. 4-5 u. 4-6, Hin- und Rückleiter) wird die 2. Maßnahme, die **interne Abstandsverminderung** (Bündelung), gut veranschaulicht. Die Halbierung vom Abstand des Hin- und Rückleiters führt zur Reduzierung der magnetischen Flußdichte in dem konstant zu betrachtenden Berechnungspunkt P auf die Hälfte.

Konstruktive Modifizierungen von Anlagenkomponenten sind als weitere Maßnahme heranzuziehen. Die **Symmetrierung der Leiteranordnung** eines ebenen Drehstromsystems (Anordnung 3, Abb. 4-7 u. 4-8) in eine gleichseitige Dreiecksanordnung (Anordnung 4, Abb. 4-9 u. 4-10), führt mit der Abnahmefunktion $1/r^2$ und der Bedingung, daß der Leiterabstand der im Dreieck verlegten Anordnung, um den Faktor $1/\sqrt{2}$ geringer ist, zur Halbierung des Betrages von B. Unter Beibehaltung der Isolationsabstände führt diese 3. Maßnahme zur Flußdichtereduzierung um den Faktor $1/\sqrt{2}$.

In dem **Aufspalten der Phasen** (phase- splitting [21]) zeigt die Anordnung 5 (Abb. 4-11 u. 4-12) eine 4. Optimierungsmaßnahme. Die Flußdichtereduzierung erfolgt mit der 3. Potenz des Abstandes zur Quelle.

Diese vier Optimierungsmaßnahmen werden konkret am Ort der Entstehung künstlicher Magnetfelder vorgenommen. Bei additiver Anwendung wird der Grad der Optimierung erhöht. Die Qualität bei Anwendung an Netzstationen dieser einzelnen Maßnahmen ist nicht bestimmbar.

Die Optimierungsmaßnahmen sind den analytischen Lösungsansätzen entnommen und besitzen somit äquivalente Gültigkeitsbedingungen.

Die Randeffekte endlicher Leiter, z.B. Sammelschienen einer Niederspannungsverteilung, sowie die Berechnung in der unmittelbaren Umgebung komplexer Leiteranordnungen einer Netzstation werden nicht berücksichtigt. Der Grad der Wirkung dieser Maßnahmen muß an konkreten Leiteranordnungen, beispielsweise an einer Niederspannungsverteilung untersucht werden.

Erzielen die erwähnten Maßnahmen am Ort der Entstehung der magnetischen Flußdichteverteilung nicht die vorgeschriebenen Werte, muß zusätzlich die Maßnahme der Schirmung eingesetzt werden.

Die Ruheinduktion nach Maxwell (Gl. 4-1) durch die zeitabhängige magnetische Flußdichteänderung hervorgerufen, induziert eine Spannung, die den sogenannten Wirbelstrom in elektrisch leitfähigen Materialien antreibt. Durch die Reibungsverluste der Elektronen auf den geschlossenen Strombahnen wird die in die Abschirmung eindringende Energie des Feldes aufgezehrt und in Form von Wärmeleistung, den sogenannten Wirbelstromverlusten, an die Umgebung abgegeben. Je höher die Frequenz f des elektromagnetischen Feldes, umso geringer ist die Wellenlänge des eindringenden Feldes sowie die Eindringtiefe δ (Gl. 4-21) und damit die zur Abschirmung erforderlichen Mindestblechstärken.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \kappa \mu}} \quad (4-21) \quad [2]$$

Sowohl eine hohe elektrische Leitfähigkeit κ als auch eine hohe Permeabilität μ des Materials ergeben eine gute Abschirmung. Die Wirbelstromverluste sind bei einer hohen Permeabilität μ größer gegenüber einer hohen Leitfähigkeit κ [2].

$$P_{\text{Verlust}} \sim \sqrt{\frac{\mu}{\kappa}} \quad (4-22) \quad [2]$$

Eine weitergehende Betrachtung des Materialeinsatzes hinsichtlich konstruktiver Gegebenheiten und der Wahl des magnetischen Werkstoffes einer Abschirmung zur Erzielung geforderter Schirmfaktoren ist nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird nicht weiter ausgeführt.

4.4 Analyse der magnetischen Flußdichteverteilung an Netzstationen

Grundlage dieser Analyse sind die bearbeiteten Kundenaufträge der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH, die den Durchführungshinweisen der 26. BImSchV entsprechen. Zur Beurteilung der Quellen der magnetischen Flußdichte (Diagramm 4-1) wurden 32 Netzstationen ausgewertet. Die Einspeiseleistungen differieren von 250 kVA bis zu 2 x 630 kVA.

Mit 630 kVA Bemessungsleistung übernehmen 21 Stationen den größten Anteil der berechneten Stationen. Im Ringnetz sind 19 der genannten Stationen im Betrieb. Mittelspannungsseitig werden vier der untersuchten Stationen mit 10 kV, die übrigen mit 20 kV betrieben. Die genaue Zuordnung technischer Parameter der jeweiligen Station ist im Anhang 7.1 ersichtlich.

4.4.1 Herangehensweise an die Analyse

Die Auswertung der in der Praxis existierenden Netzstationen ist aufgrund der Vielfalt in den Bauweisen, beispielsweise unterschiedlicher Abmessungen des Grundrisses schwierig. Variabel, je nach Stationstyp, ist die Geometrie der Leiteranordnung der jeweiligen Anlagenkomponenten. Die Positionierung der Anlagenkomponenten zueinander, deren unterschiedliche Abstände sowie die Auslastung der Mittelspannungsschaltanlage beim Betrieb im Ringnetz ist zu beachten. Zur Vergleichbarkeit der unterschiedlich parametrisierten Stationen müssen Bewertungskriterien geschaffen werden.

Als erstes erfolgt die Einschätzung der auftretenden Maxima in Abhängigkeit der Einspeiseleistung. Ebenso wird die Analysierung der Verursacher für das auftretende Maximum jeder Station nach der Einteilung der Grundrißflächen in vier Klassen, die sich von 3,06 m² bis 224 m² in den jeweiligen Grundrissen voneinander unterscheiden, durchgeführt. Die Positionierung der Anlagenkomponenten, innerhalb von begehbaren und nicht begehbaren Stationen sowie die Betriebsweise dieser Stationen, sind weitere Bewertungskriterien der Auswertung.

4.4.2 Darstellung der berechneten Ergebnisse

Das Wirbelfeld der magnetischen Flußdichte breitet sich im orthonormierten Koordinatensystem in allen drei Ebenen aus. Zur genauen Erfassung und Beurteilung der räumlichen Flußdichteverteilung wurden die Berechnungen (nach den Durchführungshinweisen der 26. BImSchV) in den orthogonal zueinander stehenden Ebenen durchgeführt.

Folgende Schnitte wurden berechnet:

- Berechnungen 0 m, 1 m und 2 m über dem Erdboden,
- Berechnungsschnitt unmittelbar an jeder Außenwand (auch auf dem Dach),
- Berechnung im 20 cm Abstand vor jeder Außenwand

Die Berechnungsergebnisse werden wie folgt angegeben:

- Der Maximalwert (größter Wert aller betrachteten Außenwände) von B_{eff} unmittelbar an der Außenwand,
- Maximalwert (größter Wert aller betrachteten Außenwände) von B_{eff} im 20 cm Abstand vor jeder Außenwand,
- bei Nichteinhaltung des Grenzwertes $100 \mu\text{T}$ in 20 cm Abstand von der Außenwand ist der Abstand angegeben, in dem $100 \mu\text{T}$ eingehalten werden.

Im Anhang 7.1 sind die 32 Stationen zusammengefaßt dargestellt. Der zu sehende Berechnungsschnitt ist planparallel 1m über dem Erdboden und zeigt den Stationsgrundriß sowie die farblich skalierte Flußdichteverteilung. Die Skalierung wurde zur besseren Visualisierung auf 1 mT gewählt. Berechnungsergebnisse und weitere technische Parameter sind jeweils rechts neben dem 1 m- Höhenschnitt aufgeführt.

4.4.2.1 Darstellung einer Beispielstation

Zur Berechnung der magnetischen Flußdichteverteilung von Netzstationen muß die Station mit den strombelegten Elementen der einzelnen Anlagenkomponenten nachgebildet werden.

Die linienförmige Konstruktion einer Netzstation und die Art der Darstellung von Berechnungen werden in den Abb. 4-13 bis 4-17 an einer konstruierten Beispielstation veranschaulicht.

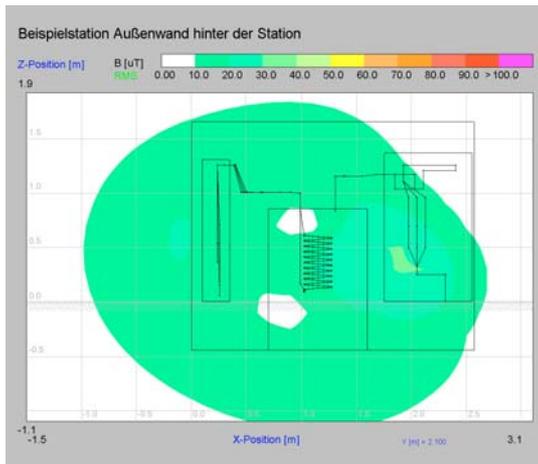


Abb. 4-13 hinter der Station

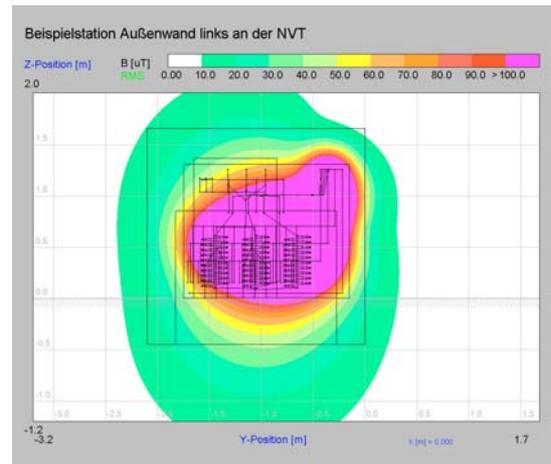


Abb. 4-14 linke Seite der Station

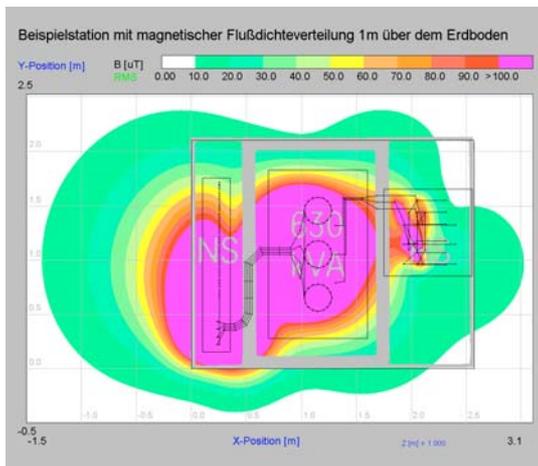


Abb. 4-15 1 m Höhenschnitt (Draufsicht)

Die dargestellten Schnitte zeigen die Verteilung der magnetischen Flußdichte unmittelbar an jeder Außenwand. Die magnetischen Äquipotentiallinien werden mit Isolinien zweidimensional in einer farblichen Abstufung skaliert bis 100 μT dargestellt. Zur räumlichen Vorstellung ist diese Beispielstation im Anhang 7.2 dreidimensional dargestellt.

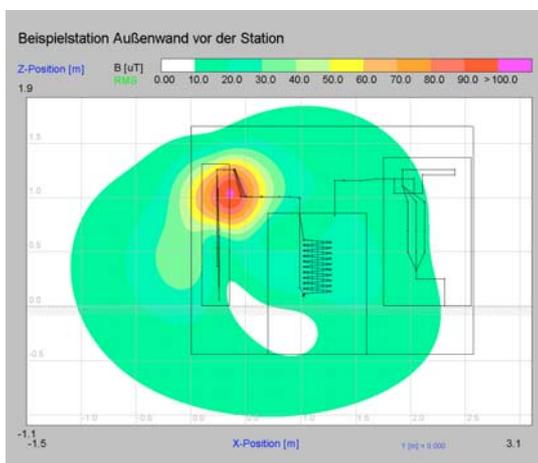


Abb. 4-16 vor der Station

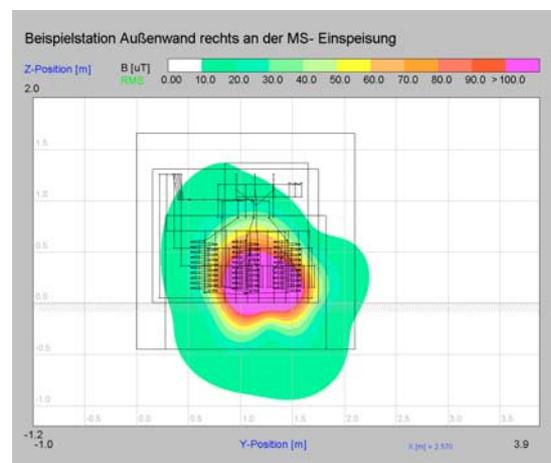


Abb. 4-17 rechte Seite der Station

4.4.3 Bewertungskriterien der Analyse

Die Verursacher wurden mit dem auftretenden Maxima an der entsprechenden Außenwand quantitativ lokalisiert. In der Tabelle 7-1 im Anhang 7.1 sind die technischen Parameter sowie die Berechnungsergebnisse der Netzstationen zusammengefaßt dargestellt. Von der Flußdichteverteilung sind 18 mal die Niederspannungsverteilungen, 12 mal die MS-Schaltanlagen und 2 mal die Verbindung zur NVT mit dem niederspannungsseitigen Transformatoranschluß die Verursacher des auftretenden Maximums.

Im Diagramm 4-1 sind die prozentualen Anteile der Anlagenkomponenten als Quelle des auftretenden Maximums der betrachteten Stationen dargestellt.

Anteile der Verursacher [%] des auftretenden Maximums der magnetischen Flußdichte unmittelbar auf der Oberfläche der äußeren Stationsbegrenzung

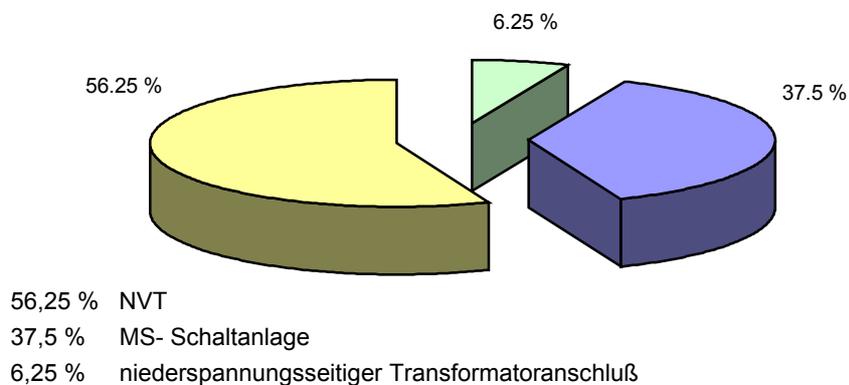


Diagramm 4-1 Verursacher der Maxima (unmittelbar an der Außenwand der Stationen ermittelt) der 32 berechneten Netzstationen

Eine detaillierte Untersuchung dieser allgemeinen als Grundlage dienenden Auswertung wird nach den folgend aufgeführten Bewertungskriterien vorgenommen.

Ausschlaggebend für die Verteilung der magnetischen Flußdichte ist die Stromstärke. Damit ist bei konstanter Spannungsebene die speisende Leistung die signifikante Ursache für die Wirbelstärke des Magnetfeldes. Eine Beurteilung der auftretenden Maxima wird nach dem 1. Bewertungskriterium der **Nennleistung der Stationen** vorgenommen.

Vom Standort des Verursachers, innerhalb der zur Verfügung stehenden Fläche, ist die Lokalität der auftretenden Maxima abhängig. Die Positionierung der Anlagenkomponenten in der Station geschieht nach den Gesichtspunkten der Zugänglichkeit und der Bedienbarkeit. Diese Eigenschaften jeder technischen Einrichtung müssen innerhalb bestimmter räumlicher Gegebenheiten realisiert werden. Die Grundrißflächen, die von 3,06 m² bis 224 m² die jeweiligen Grundrisse der Stationen voneinander unterscheiden, stellen für jede Netzstation eine individuelle Lösung dar. Eine Differenzierung der **Grundrißflächen** als 2. Bewertungskriterium erscheint daher als sinnvoll. Es wird eine Einteilung in vier Klassen vorgenommen, die sich in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Grundstücksfläche die Stationen voneinander unterscheiden.

| | <i>Klasse</i> | | | |
|---|---------------|----------|----------|----------|
| | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| Fläche vom Grundriß der Station [m ²] | 0 ≤ 5 | 5 ≤ 10 | 10 ≤ 20 | 20 < 224 |

Tabelle 4-7 Abhängigkeit der Stationsgröße als 1. Bewertungskriterium in vier Klassen

Im Ringnetz sind 19 der genannten Stationen im Betrieb. Der Einfluß des Ringstromes darf nicht vernachlässigt werden, damit ist die **Betriebsweise** das 3. Bewertungskriterium dieser Analyse.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Grundrißflächen besonders bei Kompaktstationen, gibt es kaum Varianten bei der Aufstellung und Installation der Anlagenkomponenten, womit die **Positionierung**, beispielsweise der Niederspannungsverteilung, innerhalb der Station als 4. Bewertungskriterium festgelegt wird.

4.4.4 Bewertung der Maxima nach der Nennleistung der Station

In der folgenden Tabelle sind die allgemein ermittelten Verursacher, in nach der Einspeiseleistung gebildeten Klassen, aufgeführt. Bei der MS- Schaltanlage ist zusätzlich die Betriebsweise der Netzstation berücksichtigt.

Im zweiten Teil der Tabelle ist der minimal und der maximal berechnete Wert, beispielsweise aller Niederspannungsverteilungen der 630 kVA gespeisten Stationen, ausgewertet. Existiert nur ein Vertreter der verursachenden Anlagenkomponente innerhalb der Leistungsklasse, z.B. die ringgespeiste MS- Schaltanlage (250 kVA), so wird nur ein Berechnungswert angegeben werden (grau gekennzeichnet).

| | | <i>Leistung [kVA]</i> | | | | | |
|--|----------------------------------|-----------------------|---|---|--|---|--------------------|
| | | <i>250</i> | <i>400</i> | <i>630</i> | <i>800</i> | <i>1000</i> | <i>1260</i> |
| Anzahl der Stationen | | 2 | 3 | 21 | 2 | 2 | 1 |
| Verursacher der auftretenden Maxima an der Außenwand der Station | MS-Anlage | 1 | 1 | 6 | 2 | - | 1 |
| | (im Ringbetrieb) | (1) | (1) | (6) | (2) | - | (1) |
| | NVT | - | 2 | 14 | - | 2 | - |
| | Trafo- NS mit Verbindung zur NVT | 1 | - | 1 | - | - | - |
| Min.- und Max.-werte der magnetischen Flußdichte an der Außenwand der Station | MS-Anlage | - | - | - | - | - | - |
| | (davon im Ringbetrieb) | 72,6 μT | 92 μT | 74 μT 253 μT | 150,8 μT 159 μT | - | 71,9 μT |
| | NVT | - | 23,8 μT 195 μT | 31 μT 698,9 μT | - | 133 μT 1328 μT | - |
| | Trafo- NS mit Verbindung zur NVT | 117 μT | - | 987 μT | - | - | - |

Tabelle 4-8 Anzahl der Verursacher des lokalen Maximums der nach der Leistung eingeteilten Stationen mit der Angabe der Min.- und Max.- werte unmittelbar an der Außenwand der Station. Bei den grau markierten Werten existiert nur eine Anlagenkomponente, die eine Angabe des Min.- und Max.- wertes nicht ermöglicht.

Mit Ausnahme der 1000 kVA ist die MS- Schaltanlage in allen Leistungsklassen vertreten. Die NVT hingegen ist in nur 3 Klassen, mit dem Hauptanteil von 14 Verursachern der 630 kVA- Klasse, vorhanden. Die niederspannungsseitige Verbindung zur NVT ist in den unteren Leistungsklassen (250 kVA und 630 kVA) je einmal ermittelt worden.

Betrachtet man die Vertreter innerhalb der Leistungsklasse 630 kVA so sind die Maximalwerte bei den niederspannungsseitigen Anlagenkomponenten berechnet worden. Denkbare Ursache dafür ist die Stromstärke. Innerhalb der 630 kVA (909 A) beweisen die Maximalwerte diese Tatsache (Ringstrom der Ms- Schaltanlage beträgt 268 A).

Die Stromstärke I ist proportional zum Maximalwert der berechneten Magnetflußdichte. Dies trifft unter konstanten Verhältnissen (gleicher Berechnungsabstand) zu. Aber eine genauere Betrachtung in der 250 kVA- Klasse ergab bei der ringbetriebenen MS- Schaltanlage mit $72,6 \mu\text{T}$ einen Ringstrom von 600 A. Die niederspannungsseitige Stromstärke von 361 A brachte aber einen Maximalwert von $117 \mu\text{T}$ an der Außenwand bei der niederspannungsseitigen Verbindung zur NVT hervor. Offensichtlich ist nicht die Stromstärke der jeweiligen Anlagenkomponente die Ursache für das auftretende Maximum an der Außenwand der Station. Der Abstand zur Stationsbegrenzung in der zur Verfügung stehenden Stationsfläche ist die Ursache für die auftretenden Maximalwerte.

Auch in der 400 kVA- Klasse ist mit 600 A Ringstrom der MS- Schaltanlage der Wert von $92 \mu\text{T}$ um über die Hälfte geringer als der Maximalwert von $195 \mu\text{T}$ der NVT mit 577 A.

Diese Feststellung, daß die Stromstärke nicht die Ursache der ermittelten Maximalwerte ist, schwächt die speisende Nennleistung als 1. Bewertungskriterium ab. Als Hauptbewertungskriterium wird zur Beurteilung der Ursache auftretender Maxima der magnetischen Flußdichteverteilung die zur Verfügung stehende Grundrißfläche der Station festgelegt.

Zur Erfüllung der energietechnischen Versorgungsaufgabe entsprechen 630 kVA der meist auftretenden Bedarfsleistung. Der Hauptanteil der Verursacher ist mit der Anzahl von 21 in dieser Klasse vorhanden. In der Analysierung maßgeblicher Verursacher liegt im nachfolgendem Abschnitt der Schwerpunkt in der zur Verfügung stehenden Stationsfläche, unter der Berücksichtigung des in der Praxis verbreitetsten Leistungsbedarfs.

4.4.5 Bewertung der Maxima nach den Abmessungen der Station

Der Hauptanteil (65,6 %) der untersuchten Netzstationen wird mit 630 kVA gespeist. Nur bei äquivalenten Parametern der zu untersuchenden Gegebenheiten führt deren Vergleich zu sinnvollen Aussagen. Die Einbeziehung der übrigen 11 Stationen in die Auswertung erfordert eine Normierung der Stationsfläche der Einspeiseleistung X (alle von 630 kVA abweichenden Leistungen) auf die fiktive Einspeiseleistung 630 kVA des jeweiligen Grundrisses. Die B- Verteilung sowie der dazugehörige Grundriß wird in der flächenmäßigen Betrachtung mit einem leistungs- bzw. stromabhängigen Faktor y auf 630 kVA „gezoomt“. Beispielsweise reduziert sich die Grundrißfläche einer mit 1000 kVA gespeisten Station um einen Faktor y auf die Grundrißfläche einer mit 630 kVA gespeisten Station, bei der die B- Verteilung an den Außenwänden der 1000 kVA Station der ursprünglichen Grundrißfläche mit der B- Verteilung der um den Faktor y reduzierten Fläche der fiktiven Einspeiseleistung von 630 kVA äquivalent ist. Der folgende Abschnitt zeigt den theoretischen Ansatz der Normierung der Grundrißfläche und der Bestimmung des Faktor y .

4.4.5.1 Normierung der Grundrißfläche als Funktion der speisenden Leistung

Nach der Gl. 4-7 ist die Stromdichte die Ursache für die Wirbelstärke des magnetischen Feldes, die Geometrie sowie die Anzahl der Leiter bestimmen die Abnahme des magnetischen Potentials mit zunehmender Entfernung (Abschnitt 4.3).

Daraus folgt, daß die Verteilung der magnetischen Flußdichte einer Anordnung im wesentlichen von der Stromstärke und der Abnahmefunktion $1/r^x$ abhängig ist. Bei grundlegenden idealen Anordnungen ist der Exponent x im sogenannten geometrischen Fernbereich ganzzahlig (Abschnitt 4.3).

In der orthogonalen Ebene einer unendlich langen geraden Anordnung beschreibt die umlaufende Äquipotentiallinie im geometrischen Fernbereich eine Kreisfläche.

Nach Gleichung 4-16 des Einzelleiters ist, bei $B = \text{konstant}$, der Abstand r von der Anordnung dem Strom I direkt proportional.

Dieser Zusammenhang, die Ausbildung unterschiedlich großer Kreisflächen des dabei konstant zu betrachtenden magnetischen Äquipotentials in Abhängigkeit verschiedener Stromstärken einer Anordnung ist der Grundgedanke der Leistungsnormierung.

Bei konstanter Spannung ist die Leistung dem Strom proportional. Bildet man das Verhältnis unterschiedlich speisender Leistungen eines Einzelleiters und reduziert den Term auf die Variablen ist bei gleicher Spannung das Verhältnis der Radien r_1 und r_2 vom Verhältnis der speisenden Leistungen abhängig. In der Gleichung 4-23 wurde der Strom I durch den Term der magnetischen Flußdichte des Einzelleiters dargestellt.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_1 \cdot \frac{2\pi \cdot r_1^x \cdot B_1}{\mu_0}}{U_2 \cdot \frac{2\pi \cdot r_2^x \cdot B_2}{\mu_0}} \quad (4-23)$$

Setzt man die magnetischen Flußdichten $B_1 = B_2$ gleich ergibt sich die Darstellung des Abstandsverhältnisses unterschiedlicher Leistungen ($U = \text{konst.}$) in Abhängigkeit vom Exponenten der Abnahmefunktion.

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^x \quad (4-24)$$

Mit Kenntnis der speisenden Leistungen S_1 und S_2 sowie die Berücksichtigung der allgemeinen Abnahmefunktionen $1/r^x$ bilden bei äquivalenter Umformung der Gleichung 4-24 die Abstände r_1 und r_2 folgendes Verhältnis.

$$\sqrt[x]{\frac{S_1}{S_2}} = \frac{r_1}{r_2} \quad (4-25)$$

Die umlaufende Äquipotentiallinie in der orthogonalen Ebene einer unendlich langen geraden Anordnung beschreibt eine Kreisfläche (Abschnitt 4.3). Mit dieser Annahme und der Kenntnis der speisenden Leistungen bildet das Quadrat des Leistungsverhältnisses mit Berücksichtigung der Abnahmefunktion das Verhältnis der zugehörigen Flächen.

$$\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{\frac{2}{x}} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (4-26)$$

Die Abnahmefunktionen mit ganzzahligen Exponenten besitzen ihre Gültigkeit im geometrischen Fernbereich. In der unmittelbaren Umgebung wird die Flußdichteverteilung von den geometrischen Einzelheiten der Leiteranordnung bestimmt [21]. Die Beurteilung der magnetischen Flußdichteverteilung einer Netzstation im geringen Abstand zu den Außenwänden, sowie der Einfluß der komplexen räumlichen Anordnung der Stromleiter einer Netzstation ist mit den Abnahmefunktionen ganzzahliger Exponenten nicht mehr möglich. Der Faktor $1/x$ im Exponenten des Leistungsverhältnisses der Gleichung 4-26, wobei x der Exponent der Abnahmefunktion ist, muß ermittelt werden.

Zur Bestimmung des Exponenten nach der Gleichung 4-27 wurde die magnetische Flußdichteverteilung der Beispielstation in der Höhe von 1 m in 0.1 m Intervalle bis zu einem Abstand von 100 m von jeder Außenwand berechnet.

$$x = \frac{\log B_1 / B_2}{\log r_2 / r_1} \quad (4-27)$$

Die Graphen im Diagramm 4-2 zeigen die Werte der Exponenten an den vier Außenwänden der Station. Die Varianz der ermittelten Exponenten, abhängig vom Abstand, erfordert die Bildung eines arithmetischen Mittelwertes. Die Mittelwertbildung der Exponenten der vier Außenwände ergab 2,4 für einen Bereich von 3,4 m bis 9,2 m um das lokale Maximum der Station.

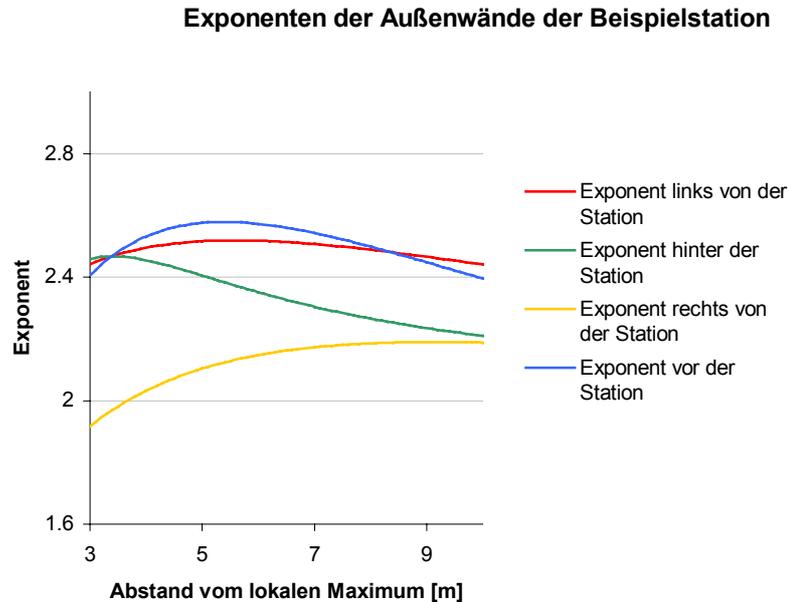


Diagramm 4-2 zeigt die Varianz vom Verlauf der Exponenten der Abnahmefunktion mit zunehmender Entfernung von der jeweiligen Außenwand der Beispielstation.

Für den empirisch bestimmten Wert von 2,4 des Exponenten x der vier Vorzugsrichtungen wurden nach Gleichung 4-26 die Faktoren zur Normierung der Grundrißflächen auf 630 kVA ermittelt. Mit diesen Faktoren der folgenden Tabelle werden die Flächen der Stationen multipliziert und entsprechen unter den getroffenen Annahmen Grundrißflächen 630 kVA gespeister Stationen.

| Leistung [kVA] | Faktor der Grundrißfläche (Gl. 4-26) |
|----------------|--------------------------------------|
| 250 | 2,1 |
| 400 | 1,46 |
| 630 | 1 |
| 800 | 0,82 |
| 1000 | 0,68 |
| 1260 | 0,56 |

Tabelle 4-9

Faktoren zur Normierung der Grundrißflächen theoretisch 630 kVA gespeister Stationen, unter Berücksichtigung des empirisch ermittelten Exponenten 2,4. Der in der Tabelle aufgeführte Wert ist das Reziproke der Gl. 4-26.

Mit dieser Normierung haben 6 Stationen, die bewerteten Klassen der Grundrißflächen, gewechselt. In der Tabelle 7-1 des Anhangs 7.1 sind alle Stationen mit den Grundrissen dargestellt. Die Tabelle 4-10 zeigt die Einteilung der Grundrißflächen in die Klassen 1 bis 4. Die Anzahl der Stationen nach dieser Einteilung sowie die Maxima verursachenden Anlagenkomponenten dieser Stationen sind dort aufgeführt.

| | | <i>Klasse</i> | | | |
|--|--|------------------|------------------|---------------------|----------|
| | | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
| Fläche vom Grundriß der Station [m ²] | | 0 ≤ 5 | 5 ≤ 10 | 10 ≤ 20 | 20 < 224 |
| Anzahl der Stationen | | 4 | 14 | 9 | 5 |
| Verursacher der auftretenden Maxima an der Außenwand der Station | MS-Anlage | 0 | 4 | 3 | 5 |
| | (davon im Ringbetrieb) | (0) | (4) | (3) | (4) |
| | NVT | 3 | 9 | 6 | 0 |
| | Trafo- anschluß mit der Verbindung zur NVT | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Min.- und Max.-werte der magnetischen Flußdichte an der Außenwand der Station | MS-Anlage | - | - | - | 65 µT |
| | (davon im Ringbetrieb) | - | 72,6 µT | 149,3 µT | 74 µT |
| | | - | 253 µT | 247,5 µT | 150,8 µT |
| | NVT | 118 µT 299 µT | 31 µT 1328 µT | 23,8 µT 698,5 µT | - - |
| | Trafo- anschluß mit der Verbindung zur NVT | 897 µT | 117 µT | - | - |

Tabelle 4-10 Anzahl der Verursacher des lokalen Maximums der nach Grundrißfläche klassifizierten Stationen mit der Angabe der Min.- und Max.- werte unmittelbar an der Außenwand der Station. Bei den grau markierten Werten existiert nur eine Anlagenkomponente, die eine Angabe des Min.- und Max.- wertes nicht ermöglicht.

In der Klasse 1 sind 4 Stationen, in der die magnetische Flußdichteverteilung der Niederspannungsverteilung mit 75 % den Hauptanteil bildet. Die Verbindung zwischen NVT und niederspannungsseitigen Transformatoranschluß tritt bei einer Station dieser Klasse (bis 5 m²) als Verursacher auf.

Fast die Hälfte aller Stationen bilden die Klasse 2 mit der Grundrißfläche von 5 m² bis 10 m². Wiederum ist die NVT mit 64,3 % Anteil der Hauptverursacher dieser Stationsgröße. Die übrigen 5 Verursacher der Klasse 2 werden bei 4 Stationen der MS- Schaltanlage sowie bei einer Station der vom Transformator abgehenden niederspannungsseitigen Verbindung zur NVT zugeschrieben.

Hauptverursacher der auftretenden Maxima der Stationsgrößen von 10 m² bis 20 m² ist auch in dieser Klasse die NVT (66,7 %). Die MS – Schaltanlage von 3 Stationen übernimmt den übrigen Anteil als verursachende Anlagenkomponente der Maxima in dieser Klasse.

Die unmittelbar an den Außenwänden auftretenden Maxima der Stationen, deren Grundrißfläche größer als 20 m² ist, wird ausschließlich von den MS – Schaltanlagen hervorgerufen.

Auffällig bei der Bewertung der Maxima nach den Abmessungen der Stationen sind zwei Tendenzen. Mit zunehmender Größe der Grundrißflächen wächst der prozentuale Anteil der MS – Schaltanlagen als Quelle der Maxima. In dem Diagramm 4-3 sind die prozentualen Anteile der MS – Schaltanlage in den Klassen 1 bis 4 dargestellt. Die Betriebsweise dieser Netzstationen wird im Abschnitt 4.4.6 näher betrachtet.

zunehmender Anteil [%] der MS-Schaltanlagen in den Klassen 1 bis 4

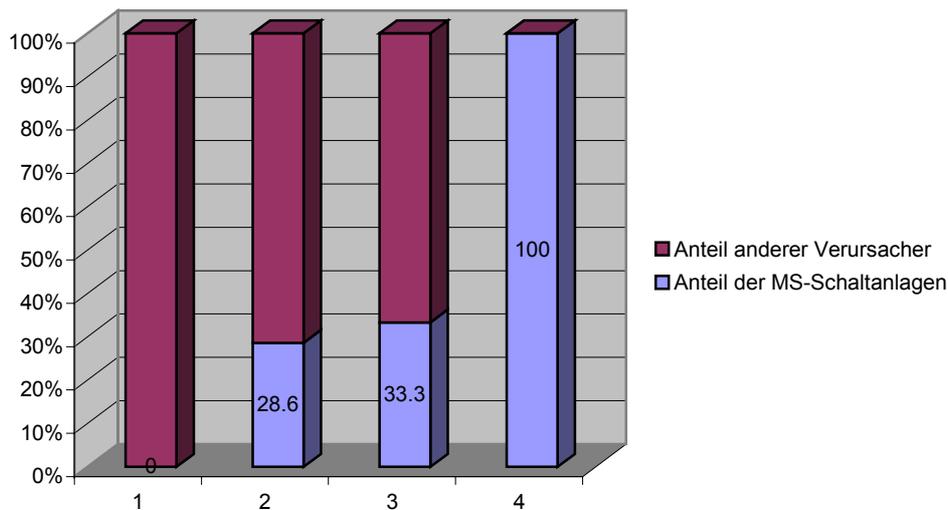


Diagramm 4-3 Zunahme des prozentualen Anteils der MS – Schalanlage als Maxima verursachende Anlagenkomponente mit zunehmender Stationsgröße

Prozentual beurteilt wird in den Klassen 1, 2 und 3 der Hauptanteil durch die Niederspannungsverteilungen als Maxima verursachende Anlagenkomponente gebildet. Diese Feststellung ist Gegenstand der fortführenden Bewertung im Abschnitt 4.4.7.

4.4.6 Bewertung der Maxima nach der Betriebsweise der Station

Bei 19 der 32 Stationen ist die magnetische Flußdichteverteilung mit der Simulation einer Ringeinspeisung (Ringstrom) berechnet worden. Station 11 (Abb. 4-18) zeigt eine typische Flußdichteverteilung einer Netzstation im Ringnetz.

Das an den Außenwänden dieser Station berechnete Maximum wird an der linken Seite des Grundrisses durch die ringgespeiste MS –Schaltanlage hervorgerufen. Gut nachvollziehbar ist die Ein- und Auspeisung der im Ringnetz betriebenen Station. Besonders deutlich wird die Durchschleifung des Ringstromes anhand der 6 auftretenden Maxima in dem 1 m Höhenschnitt.

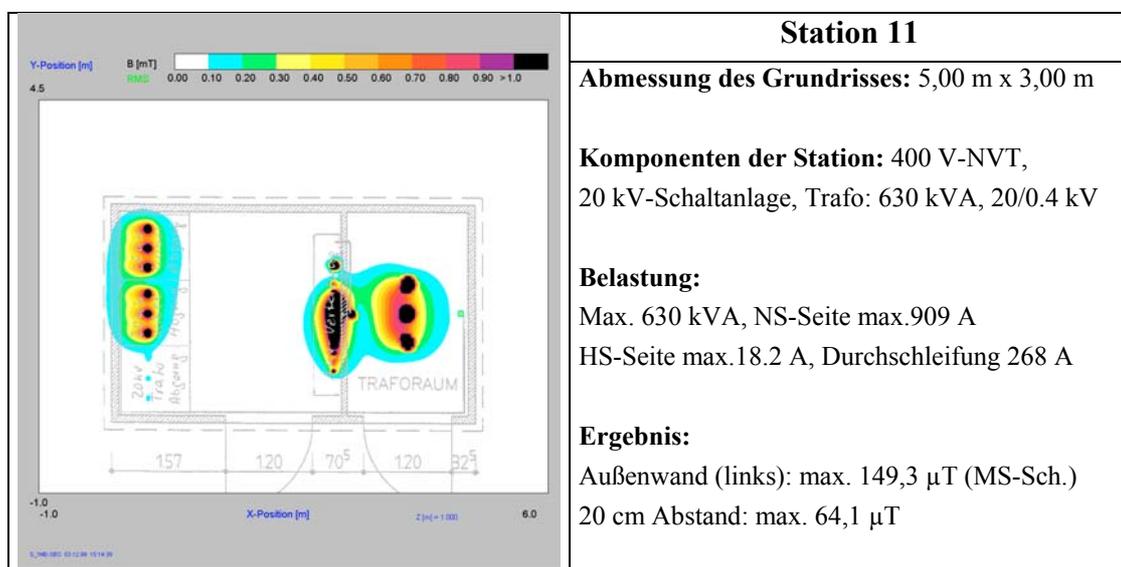


Abb. 4-18 Station im Ringbetrieb mit 268 A Ringstrom

Die Stationen 1 und 5 (Abb. 4-19) sind nach ihren technischen und konstruktiven Parametern identisch, jedoch mit der Ausnahme, daß die Station 1 mit Ringeinspeisung berechnet wurde.

Der direkte Vergleich der Station 1 mit der Station 5 zeigt den beachtenswerten Einfluß des Ringstromes. Bei der Station 1 ist mit 153 μ T die MS-Schaltanlage der Verursacher des Maximums der auftretenden magnetischen Flußdichteverteilung. Die Station 5 hingegen wurde mit 88 μ T an der Außenwand der Niederspannungsverteilung berechnet.

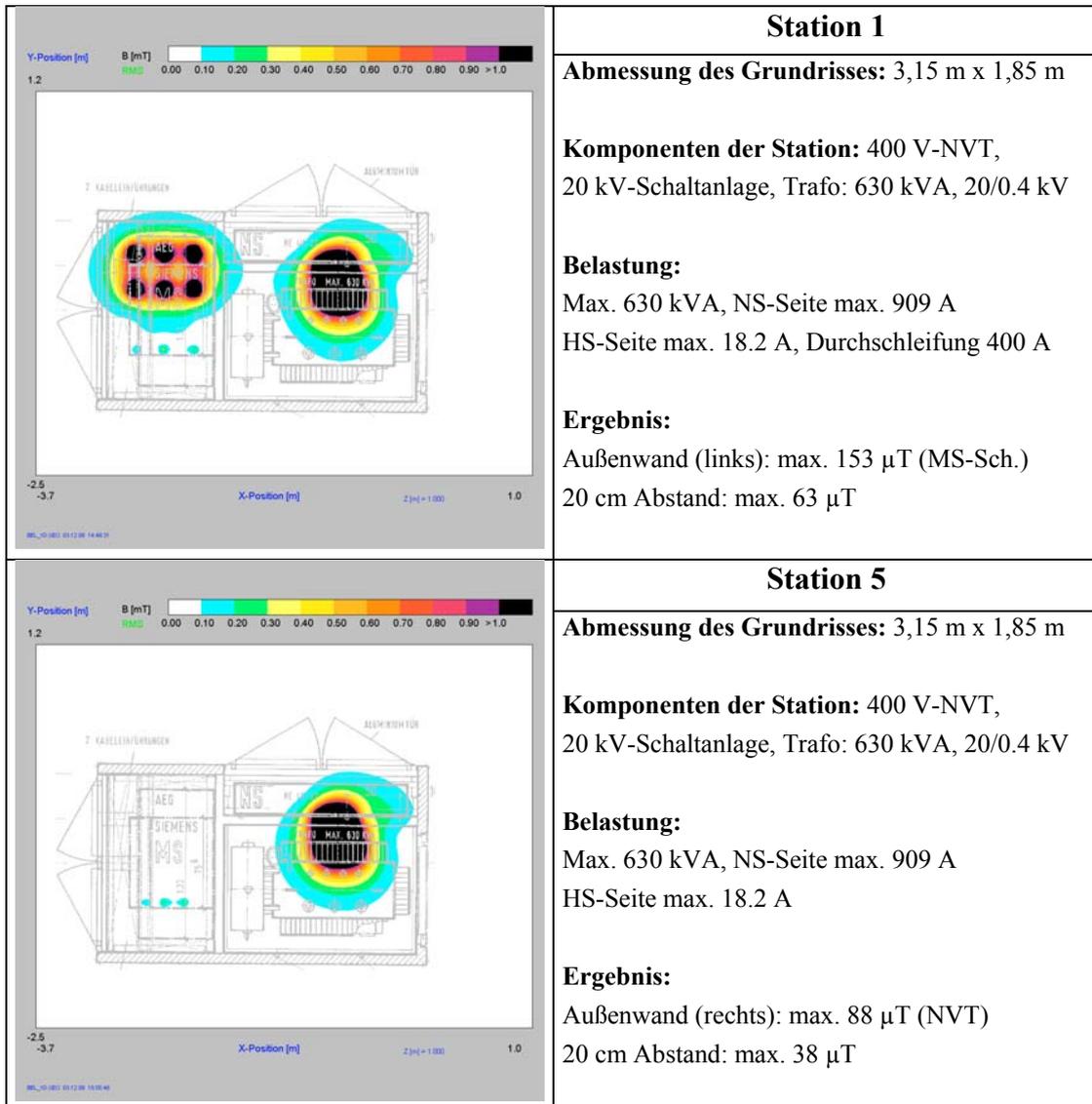


Abb. 4-19 zeigt die Station 1 und 5 in der Draufsicht (1 m- Höhenschnitt). In der oberen Abbildung der Station 1 ist auf der linken Seite die magnetische Flußdichteverteilung der ringgespeiste MS- Schaltanlage deutlich erkennbar. In der Abbildung der Station 5 ist die Verteilung der magnetischen Flußdichte der NVT an der rechten Außenwand der Verursacher des auftretenden Maximums an dieser Station.

In dem Diagramm 4-1 (Kreisdiagramm ohne Bewertungskriterien) beträgt der allgemeine Anteil der MS – Schaltanlage 37,5 % der auftretenden Maxima. Unter Hinzuziehung des Kriteriums der Betriebsweise sind 11/12 der 37,5 % ringgespeiste MS –Schaltanlagen.

Damit sind 34,4 % der Verursacher aller betrachteten Stationen die MS-Schaltanlagen bei Betrieb der Netzstation im Ringnetz.

4.4.7 Bewertung der Anlagenkomponenten nach der Positionierung

Als Verursacher wurde zweimal die Verbindung vom niederspannungsseitigen Transformatoranschluß zur Niederspannungsverteilung ermittelt. Die genauere Betrachtung der zugehörigen Stationen 10 und 18 (Anhang 7.1) zeigt die genannten Quellen in unmittelbarer Nähe der Wand. Ein äquivalentes Ergebnis liefert die Betrachtung der MS-Schaltanlagen. Unabhängig von der Betriebsweise der Netzstationen sind die MS-Schaltanlagen unmittelbar an der Außenwand positioniert. Im Gegensatz zu den Niederspannungsverteilungen beeinflusst auch die zur Verfügung stehende Grundrißfläche den Ort der Aufstellung von MS-Schaltanlagen nicht.

Aufgrund unterschiedlicher Positionierungen sowie differenter Formen der Flußdichteverteilungen wird die Niederspannungsverteilung im Punkt 4.4.7.1 dieses Abschnittes näher betrachtet.

4.4.7.1 Positionierung und die Form der Flußdichteverteilung der NVT

Mit 56,25 % (Diagramm 4-1) sind die Niederspannungsverteilungen die Hauptverursacher der an den Außenwänden auftretenden Maxima.

Bei den Stationsgrößen der Klasse eins bis drei sind die Niederspannungsverteilungen mit 75 %, 64,3 % und 66,7 % die Quellen der Maxima. Das Diagramm 4-4 zeigt die Zusammensetzung des ca. 56 % -igen Anteils der Niederspannungsverteilungen aller Stationen nach der Einteilung in Klassen.

Anteil [%] der NVT als Verursacher der Maxima in den Klassen 1 bis 4

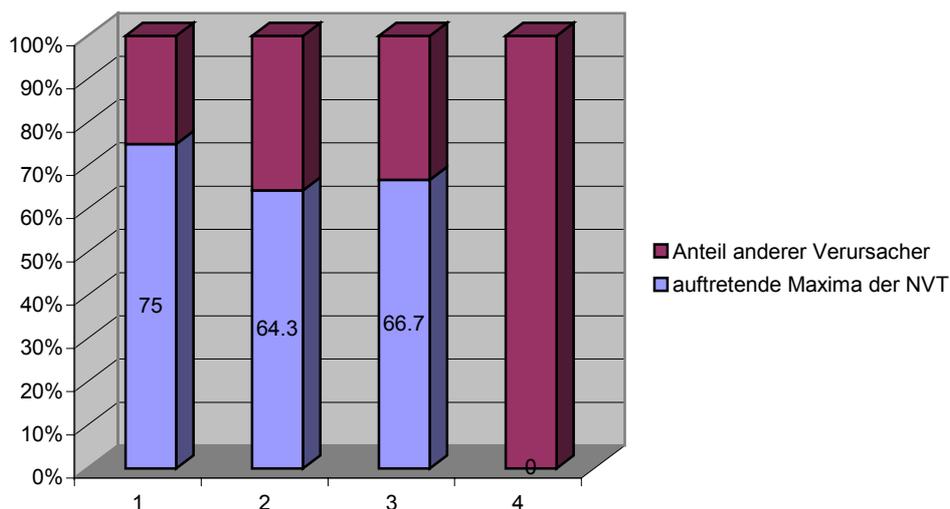


Diagramm 4-4 prozentualer Anteil der NVT als Maxima verursachende Anlagenkomponente in den nach der Stationsgröße eingeteilten Klassen 1 bis 4

Auffällig bei den Stationen der Klasse 1 und 2, das heißt bei 12 von 18 Stationen (66,7 %), ist die Positionierung der NVT. Bei 9 der 12 Stationen ist die Längsseite der NVT unmittelbar an der Außenwand. Grund dafür ist der mangelnde Platz innerhalb der Stationsabmessungen. Diesen Aspekt untermauert die Auswertung der Stationen der Klasse 4. Bei Stationen größer als 20 m² (Klasse 4) sind mit 100 % der Hauptverursacher die MS-Schaltanlagen. Die Begründung liegt in der Positionierung der NVT innerhalb der Räumlichkeiten dieser Stationen. Die Feldform sowie die Häufigkeit der auftretenden Maxima an den Niederspannungsverteilungen sind abhängig von der Anzahl und vom Ort der Einspeisung an der NVT. Die „Tränenform“ der Feldverteilung, gut zu sehen bei der Station 6 (Abb. 4-20) am unteren Bildrand der Darstellung, steht der „Mandelform“ unter anderem bei der Niederspannungsverteilung der Station 16 (Abb. 4-21) gegenüber. Bei Station 16 (Abb. 4-21) und Station 17 (Abb. 4-22) ist ein weiteres Phänomen zu beobachten. Der direkte Vergleich dieser beiden Stationen sei an dieser Stelle erlaubt, da die Station 17 sich lediglich um eine konstruktive Änderung an der Niederspannungsverteilung zur Station 16 unterscheidet. Insgesamt ist die Umrandung der Feldverteilung von der Station 17 kürzer und es treten zwei Maxima gegenüber dem einzelnen, mandelförmigen Maximum der Feldverteilung an der Niederspannungsverteilung der Station 16 auf. Die Ursache dieser Verläufe sowie deren Vor- und Nachteile sind Untersuchungsgegenstand im Kapitel 5.

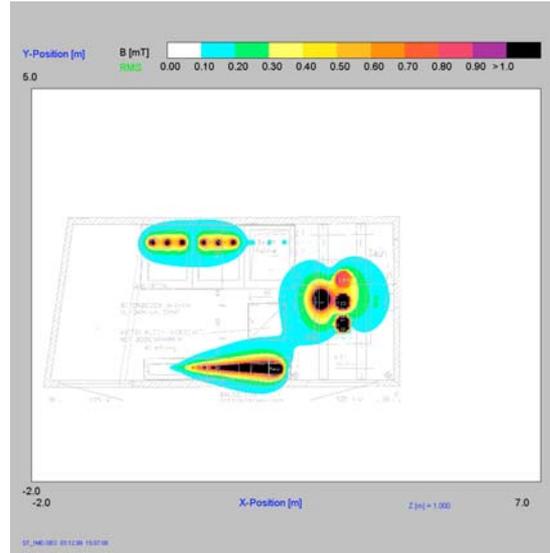


Abb. 4-20 Feldbild der Station 6

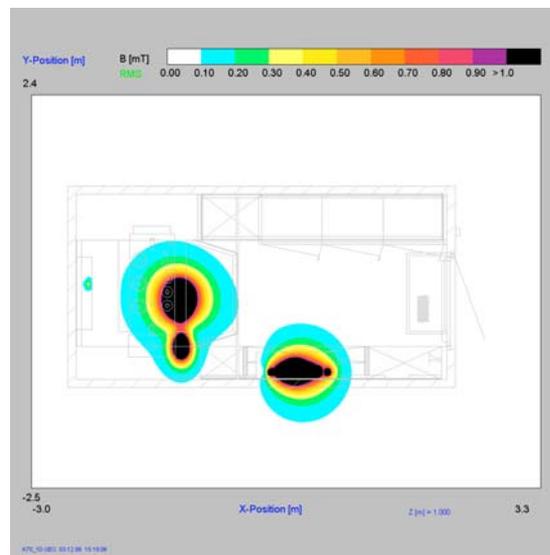


Abb. 4-21 Feldbild der Station 16

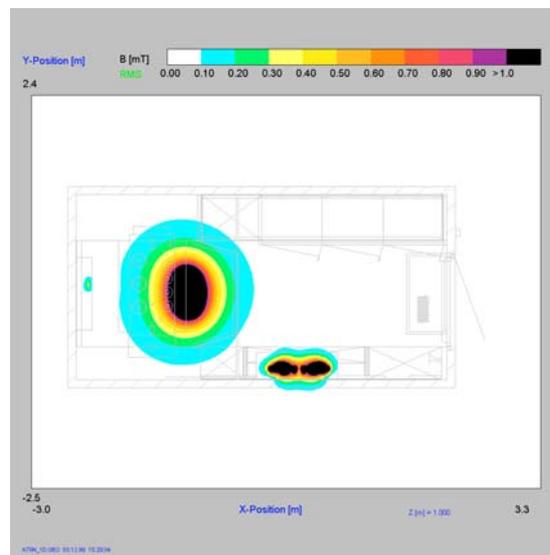


Abb. 4-22 Feldbild der Station 17

4.4.8 **Schlußfolgerung und Maßnahmen zur Minimierung der magnetischen Flußdichte**

Zur Einhaltung der Vorsorgegrenzwerte nach 26. BImSchV erfordert die Durchführung von Optimierungsmaßnahmen an Netzstationen die Kenntnis der maßgeblichen Quellen der magnetischen Flußdichte.

Als Ursache der resultierenden Wirbelstärke des magnetischen Feldes ist nicht nur der Strombetrag, sondern auch die räumliche Positionierung der verursachenden Anlagenkomponenten zu betrachten.

Mit 56,25 % Anteil dieser Analyse ist die Niederspannungsverteilung als Hauptverursacher der auftretenden Maxima zu nennen. Innerhalb der Einteilung der Klassen 1 bis 3 wird das Ergebnis in Abhängigkeit der Stationsgröße für die NVT als maßgebliche Quelle noch deutlicher.

Klasse 1: 75 %

Klasse 2: 64,3 %

Klasse 2: 66,7 %

Ohne Beachtung der Betriebsweise unterstreicht die Tendenz der Zunahme der MS-Schaltanlagen mit zunehmender Größe (Diagramm 4-3) der Stationsgrundrisse diese Feststellung.

Die Einbindung der Stationen in das Versorgungsnetz bedingt die Betriebsweise. Ringgespeiste Netzstationen bilden mit 34,4 % der bewerteten Stationen einen wesentlichen Anteil, der eine genauere Betrachtung verlangt.

Der begrenzt zur Verfügung stehende Raum einer Netzstation erfordert in den meisten Fällen bei 75 % der Stationsgrößen bis 10 m² eine längsseitige Installation der NVT zur Außenwand. Durch die räumlichen Gegebenheiten dieser Stationsgrößen ist die Niederspannungsverteilung die maßgebliche Quelle des auftretenden Maximums einer Station.

Konstruktive Optimierungsmaßnahmen, basierend auf den analytischen Lösungsansätzen (Abschnitt 4.3.2) an der Niederspannungsverteilung, führen zur Minimierung der Feldstärken. Eine weitergehende Untersuchung und Bewertung der Hauptquelle wird hinsichtlich konstruktiver Modifizierungen an der Niederspannungsverteilung im Kapitel 5 vorgenommen. Diese Untersuchung zeigt die Ursache der im Punkt 4.4.7.1 erwähnten Feldformen und den damit im Zusammenhang stehenden Vor- und Nachteilen.

5 Untersuchung und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen an der Niederspannungsverteilung

5.1 Vorbetrachtung

Im Abschnitt 4.3 wurde die Verteilung der magnetischen Flußdichte unendlich langer geradliniger Leiter untersucht. Die Betrachtung von Optimierungsmaßnahmen an einfachen Grundanordnungen beruht auf den analytischen Lösungsansätzen. So reduziert sich nach Gleichung 4-18 für in einer Ebene verlegtes Drehstromsystem die Magnetflußdichte auf die Hälfte bei konstantem Strombelag und gleichbleibendem Berechnungsabstand, wenn man den Abstand der Leiter halbiert. Die exponentielle Abnahme erfolgt mit der 2. Potenz des Abstandes r . Durch Überlagerung der Reihenentwicklung des Feldes eines Einzeleleiters werden die im Abschnitt 4.3.1 aufgeführten Lösungsansätze [21] hergeleitet. Eine Abnahme der Magnetflußdichte mit der dritten Potenz wird beim Aufspalten der Phasen mit halbierten Strombelag erzielt. Vergleicht man die Werte im Abschnitt 4.3.1 der Anordnung 3 (ebenes Drehstromsystem) im Berechnungsabstand von 10 m erzielte die Aufspaltung der Phasen bei der Anordnung 5 eine Reduzierung der magnetischen Flußdichte um 50 % durch die Abnahmefunktion $1/r^3$ gegenüber der Anordnung 3 mit $1/r^2$. Diese Ergebnisse besitzen ihre Gültigkeit im geometrischen Fernbereich isoliert voneinander zu betrachtender idealer Grundanordnungen. Die Wirksamkeit der Maßnahmen im geometrischen Nahbereich komplexer Leiteranordnungen ist der Untersuchungsgegenstand in diesem Kapitel. Es werden sogenannte primäre Maßnahmen am Ort der Entstehung der magnetischen Flußdichte vorgenommen. Die Wirkung der Abschirmung als Sekundärmaßnahme bezeichnet, wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Folgende Optimierungsmaßnahmen werden Gegenstand der Untersuchung sein:

- **Maßnahme 1:** *Symmetrierung der Einspeisung,*
- **Maßnahme 2:** *Phase-Splitting an der Einspeisung,*
- **Maßnahme 3:** *interne Abstandsverminderung an den Sammelschienen*

Das Ergebnis der Analyse der Netzstationen im Kapitel 4 stellte die Niederspannungsverteilung als Hauptquelle, besonders in begrenzt zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten, heraus. Eine Standardniederspannungsverteilung mit Sicherungslastschaltleiste in offener Bauform ist Gegenstand der Untersuchung (Abb. 5-1). Vom Ort der Einspeisung an der NVT betrachtet ist die am äußeren rechtsseitigen Abschnitt der Sammelschienen Ausgangspunkt der Berechnungen.

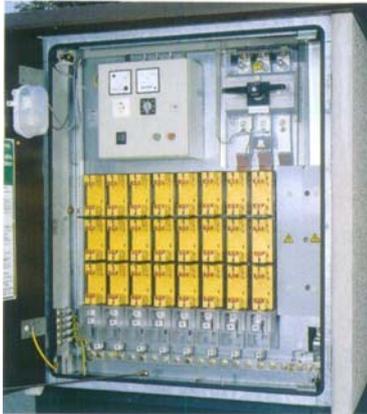


Abb. 5-1 Die Niederspannungsschaltanlage ist speziell für den Einsatz in Kompaktstationen konstruiert. Sie ist eine typgeprüfte offene Verteilung und wird auf der Sektionswand des NS- Raumes montiert. Als Schaltgeräte werden Lasttrenn- oder Kompaktleistungsschalter sowie Sicherungslastschaltleisten eingesetzt [29]. Dieses Beispiel ist nicht Grundlage des Modells der Untersuchung, es dient nur der Veranschaulichung.

5.2 Heransgehensweise an die Untersuchung

Vom rechtsseitigen Abschnitt der NVT wird die Einspeisung mit dem Polmittenabstand von 70 mm zum zentrierten Abschnitt (mittig) der Sammelschienenanordnung verlagert. Durch diese 1. Maßnahme wird die Strombelegung auf den Sammelschienen symmetriert. Aus den theoretischen Betrachtungen von Optimierungsmaßnahmen im Abschnitt 4.3.2 wird die Aufspaltung an der mittigen Einspeisung als fortführende 2. Maßnahme vorgenommen. Damit entsteht eine doppelte Einspeisung mit spiegelsymmetrischer Phasenbelegung der um die Hälfte reduzierten Strombeträge. Diese zwei Maßnahmen sind Bestandteil der Untersuchung 1 an der NVT mit dem Sammelschienenabstand von 200 mm. Der Abstand der Sicherungslastschaltleiste beträgt 100 mm mit dem internen Phasenabstand von 20 mm. Die drei konstruktiven Einspeisungsvarianten mit dem rot gekennzeichneten Berechnungsschnitten von 0 m, 0.5 m und 1 m zeigt die Abbildung 5-2. Als additive 3. Maßnahme wird die interne Abstandsverminderung an den Sammelschienen der NVT in der Untersuchung 2 vorgenommen. Bei den drei konstruktiven Einspeisungsvarianten wird der Abstand um 50 % auf 100 mm reduziert. Zur Vergleichbarkeit dieser zusätzlichen Maßnahmen mit den Ergebnissen der Untersuchung 1 ist die z- Position der mittleren Sammelschiene und die Höhe der Berechnungsschnitte konstant.

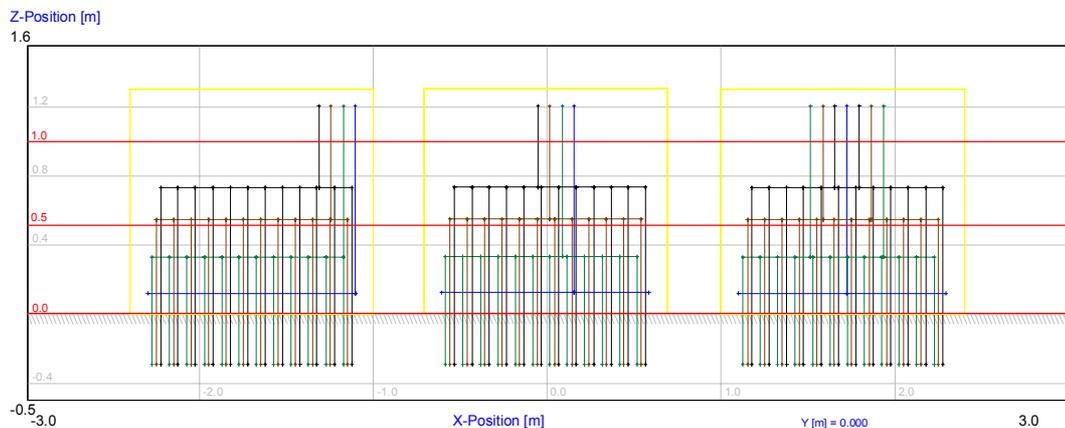


Abb. 5-2 Die rot gekennzeichnete z- Position zeigt die Höhenlinien der durchgeführten Berechnungsschnitte 0 m, 0.5 m und 1 m.

Die Berechnungsschnitte 0 m und 1 m befinden sich außerhalb der Sammelschienen. Ein angenommenes Gehäuse, gelb dargestellt, hat für die Modifizierungen der NVT gleicher Abgänge konstante Abmessungen.

Zur Vermeidung von Randeffekten ist die jeweilige Anordnung einer NVT auf 200 m dimensioniert. Die Einspeisung von oben ist auf 100 m gestreckt und die Abgänge der NVT sind bis -100 m ausgedehnt (in der Abb. 5-2 nicht dargestellt).

Je nach Versorgungsaufgabe im Energieverteilungsnetz ist mit der Anzahl der niederspannungsseitigen Abgänge sowie differenter Einspeiseleistungen die Bereitstellung elektrischer Energie gewährleistet. Die Untersuchungen 1 und 2 werden für zwei Einspeiseleistungen 315 kVA (Teil a) und 630 kVA (Teil b) an den konstruktiv modifizierten Niederspannungsverteilungen mit der Anzahl von 6 bis 12 Abgängen durchgeführt. Es gibt damit vier Teiluntersuchungen, die in der folgenden Tabelle 5-1 nach den technischen Parametern unterschieden werden. Die gewählte Kurzbezeichnung ist in den Ergebnistabellen und Diagrammen wiederzufinden.

| Kurzbezeichnung | Leistung an der Einspeisung | Abstand der Sammel- schienen |
|------------------------|--|---|
| Unt. 1b | 630 kVA | 200 mm |
| Unt. 1a | 315 kVA | 200 mm |
| Unt. 2b | 630 kVA | 100 mm |
| Unt. 2a | 315 kVA | 100 mm |

Tabelle 7-1 Die hier festgelegten Kurzbezeichnungen sind in den folgenden Diagrammen und Tabellen enthalten.

Motivation dieser Aufgabenstellung sind Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des Personenschutzes nach der 26. BImSchV. Zur Bewertung der Maßnahmen werden die Isolinien von $100\mu\text{T}$ (Grenzwert nach 26. BImSchV) für die Netzfrequenz betrachtet. Dabei wird zur maximalen Erfassung der zur NVT orthogonalen Verteilung der magnetischen Flußdichte jede Richtung, parallel zu den Koordinatenachsen, für $100\mu\text{T}$ ausgemessen. Die Vorgehensweise ist in der Abbildung 5-3 veranschaulicht.

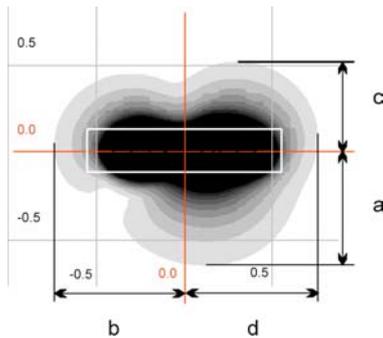


Abb. 5-3 Dieser Berechnungsschnitt ist in der Höhe von 0.5 m orthogonal zur NVT. Die Abstände a, b, c und d kennzeichnen die maximale Ausdehnung in jede Richtung parallel zu den Koordinatenachsen (rot dargestellt). Diese vier Abstände bilden die Grundlage der Auswertung jeder berechneten NVT. Der weiß gekennzeichnete Rahmen ist das virtuelle Gehäuse der NVT in der Draufsicht.

In den Ergebnistabellen 5-2 und 5-3 entsprechen die vier parallel der Koordinatenachsen mit a bis d bezeichneten Abstände für $100\mu\text{T}$ den angegebenen Werten. Für die jeweilige Anzahl der Abgänge ist ein einheitlich dimensioniertes Gehäuse konstruiert. Dieses angenommene Gehäuse stellt keine Kapselung oder Verblendung dar (offene Bauform), sondern gibt die räumlichen Gegebenheiten in der Sektion einer Kompaktstation wieder. Die Breite und die Höhe dieses virtuellen Gehäuses sind bei sämtlichen Anordnungen mit 250 mm und 1300 mm konstant, die Länge variiert durch die Anzahl der Abgänge von 800 mm (6 Abgänge) bis 1400 mm (12 Abgänge).

Die Leiteranordnungen liegen in den einzelnen Untersuchungen 1 a bis 2 b zentriert in der Umrandung der Breiten- und Längenangabe. Der Schnittpunkt der Diagonalen des Gehäuses in der Draufsicht liegt im Koordinatenursprung der orthogonalen Berechnungsebene (Abb. 5-3) und ermöglicht somit den direkten Vergleich der Abstände a bis d.

5.2.1 Festlegung der Bewertungskriterien

Die Vielzahl der ermittelten Meßdaten verlangt eine übersichtliche Bewertung. Kriterien der Bewertung sind zur Erledigung einer Aufgabenstellung bedingt. Durch den Grenzwert nach 26. BImSchV sowie die Bewertung der konstruktiven Optimierungsmaßnahmen wird eine Auswertung an der Peripherie der $100 \mu\text{T}$ und der maximalen Abstände a bis d von der zugehörigen Koordinatenachse im 0.5 m Berechnungsschnitt durchgeführt.

Begründung:

Zur Erfassung der Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen der Untersuchung 1 und 2 wurden drei Berechnungshöhen gewählt. Die Abbildung 5-4 zeigt stellvertretend für die jeweilige Höhe 0 m , 0.5 m und 1 m typische Flußdichteverteilungen für die doppelt gespeiste NVT mit 12 Abgängen (Unt. 1 b).

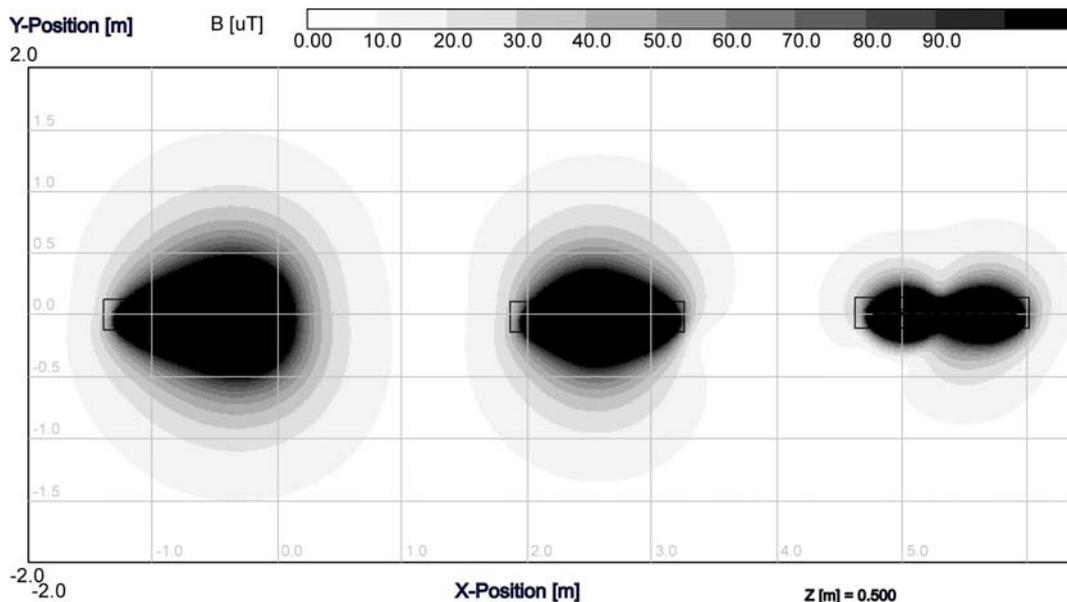


Abb. 5-4 In der Darstellung von links nach rechts sind die Berechnungsschnitte 0 m , 0.5 m und 1 m der doppelt gespeisten NVT mit 12 Abgängen (Unt. 1 b).

Die umlaufende Äquipotentiallinie des Magnetfeldes für $100 \mu\text{T}$ umschließt die in der Abbildung 5-4 schwarz gekennzeichneten Flächen. Gegenüber dem 0 m Berechnungsschnitt ist die flächenhafte Ausdehnung der $100 \mu\text{T}$ in der Höhe von 0.5 m und 1 m um ein Vielfaches größer. Zur Einhaltung des Grenzwertes und die Bedingung der Vergleichbarkeit erfordert die Auswertung der Berechnungen in der Höhe von 0.5 m , die gegenüber der 1 m Ebene alle stromtragenden Komponenten der komplexen Leiteranordnung erfaßt.

Hinzu kommen praxisrelevante Erwägungen. Bei der Berechnung liegen die Einspeisung und die Abgänge der NVT mit den Sammelschienen in einer Ebene (theoretischer Fall). Je nach den räumlichen Gegebenheiten einer Station und den dadurch bedingten konstruktiven Anschluß der Einspeisung sowie der Abgänge ist die spezifische Geometrie der Leiterführung außerhalb der Ebene der Berechnungsmodelle.

Innerhalb der Sammelschienenanordnung verändert sich die Geometrie nicht. Diese Bedingung, als konstant zu betrachten, läßt allgemeingültige Aussagen zu.

In Abhängigkeit vom Ort und Art der Einspeisung an den Sammelschienen der NVT entstehen typische Verteilungen der Magnetflußdichte (Abb. 5-5). Durch die konstruktive Verlagerung der Einspeisung zur Mitte kann im Idealfall der Effektivwert des Stromes einer um den Faktor m (nach Gl. 5-1) reduziert werden, wobei n die geradzahlige Anzahl der Abgänge einbringt.

$$m = \left(2 - \frac{2}{n} \right) \quad n = 2k \quad (k \in \mathbb{N}; k \neq 0) \quad (5-1)$$

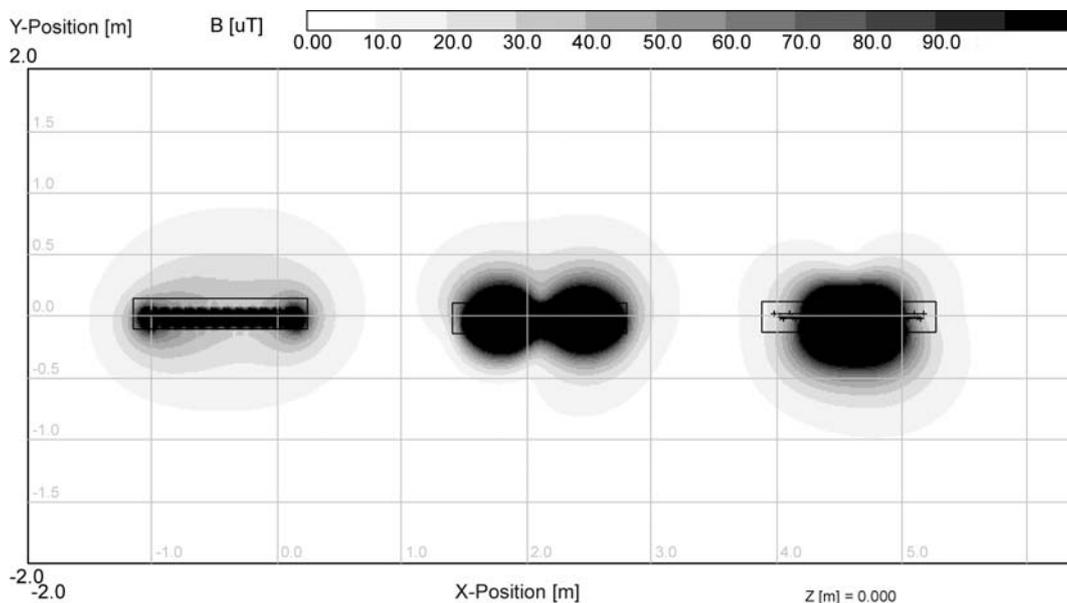


Abb. 5-5 zeigt die magnetische Flußdichteverteilung der rechts, mittig und doppelt gespeisten NVT mit 12 Abgängen (Unt. 2 b) im 0.5 m Schnitt.

Die Aufteilung (phase- splitting) der mittig einspeisenden Leiter vermindert zusätzlich den Strombetrag am Knotenpunkt auf der Sammelschiene.

Nach dem 1. Kirchhoffschen Satz ist die Summe der vorzeichenbehafteten Ströme, die eine geschlossene Hüllfläche durchsetzen, Null [28].

Unabhängig vom Ort der Einspeisung auf der Sammelschiene ist der Betrag des Stromes in jedem Abgang konstant. Bei konstanter Phasenfolge in den Abgängen der drei Variationen an der Einspeisung ist die Verteilung der magnetischen Flußdichte ausschließlich von der Stromverteilung auf der Sammelschiene abhängig. Die Vor- und Nachteile der Einspeisungsvarianten werden in der Auswertung (Abschnitt 5.4) behandelt.

Nach folgenden Kriterien werden die Ergebnisse der Untersuchung 1 und 2 bewertet. Zur Einschätzung der Minderung der magnetischen Flußdichteverteilung in der flächenhaften Ausdehnung werden die **Flächeninhalte** sowie die **Summenabstände a+c** und **b+d** der durch die 100 μT - Isolinie aufgespannten Fläche verglichen. Im zweiten Teil der Auswertung wird der maximale Abstand der 100 μT frontal und seitlich der NVT nach der Anzahl der Abgänge untersucht.

5.3 Berechnungsergebnisse für 100 μT des orthogonalen Berechnungsschnittes für die Höhe von 0.5 m

In der Tabelle 5-2 und 5-3 sind die Abstände a, b, c und d der Isolinie (100 μT) des 0.5 m Berechnungsschnittes aufgeführt. Die Werte für die 0 m und 1 m Berechnungsebene sind im Anhang 7.3 und 7.4 ersichtlich.

| | Unt. 1a 315 kVA u. 200 mm SS- Abstand | | | | Unt. 1b 630 kVA u. 200 mm SS- Abstand | | | |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
| Einspeisung | doppelt | | | | doppelt | | | |
| Anzahl der Abgänge | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] |
| 6 | 19.5 | 33.0 | 15.0 | 37.5 | 30.0 | 39.0 | 15.5 | 43.0 |
| 7 | 16.5 | 36.0 | 18.5 | 40.0 | 26.5 | 40.5 | 24.5 | 44.5 |
| 8 | 14.0 | 40.5 | 18.0 | 44.5 | 23.0 | 44.5 | 24.0 | 49.5 |
| 9 | 14.5 | 45.0 | 19.0 | 49.5 | 20.0 | 49.0 | 24.5 | 54.0 |
| 10 | 16.0 | 50.0 | 20.0 | 54.5 | 22.0 | 54.0 | 27.0 | 59.0 |
| 11 | 17.5 | 55.0 | 21.5 | 59.5 | 24.0 | 58.5 | 29.0 | 64.0 |
| 12 | 19.0 | 59.5 | 22.5 | 64.5 | 25.5 | 63.5 | 30.5 | 69.0 |
| Einspeisung | mittig | | | | mittig | | | |
| 6 | 25.5 | 34.5 | 31.0 | 39.5 | 38.0 | 41.5 | 43.5 | 41.5 |
| 7 | 23.5 | 39.0 | 29.5 | 41.0 | 34.0 | 44.5 | 41.5 | 46.0 |
| 8 | 26.5 | 43.0 | 33.0 | 45.0 | 38.5 | 49.0 | 44.0 | 49.5 |
| 9 | 27.0 | 47.5 | 31.0 | 49.5 | 36.0 | 53.0 | 41.0 | 55.0 |
| 10 | 27.5 | 52.0 | 33.0 | 54.5 | 39.5 | 57.0 | 45.5 | 59.0 |
| 11 | 26.5 | 56.0 | 31.5 | 59.5 | 37.5 | 61.0 | 44.5 | 64.0 |
| 12 | 28.5 | 60.5 | 33.5 | 64.5 | 40.5 | 65.0 | 46.5 | 68.5 |
| Einspeisung | rechts | | | | rechts | | | |
| 6 | 34.5 | 34.5 | 37.0 | 45.0 | 49.0 | 42.5 | 51.5 | 55.0 |
| 7 | 37.0 | 39.0 | 39.5 | 50.5 | 51.5 | 45.5 | 54.0 | 61.5 |
| 8 | 38.5 | 43.5 | 41.0 | 56.5 | 54.0 | 49.5 | 56.5 | 67.5 |
| 9 | 39.5 | 47.5 | 42.5 | 62.5 | 55.5 | 53.5 | 58.0 | 73.5 |
| 10 | 41.0 | 52.0 | 43.5 | 67.5 | 57.5 | 57.5 | 59.5 | 79.0 |
| 11 | 42.0 | 56.5 | 44.0 | 73.0 | 58.5 | 61.5 | 61.0 | 84.5 |
| 12 | 42.5 | 60.5 | 45.0 | 78.0 | 60.0 | 66.0 | 62.5 | 90.0 |

Tabelle 7-2 zeigt die maximalen Abstände von der Koordinatenachse der flächenhaften Ausdehnung in der Höhe von 0.5 m. Diese Werte sind für den Sammelschienenabstand von **200 mm** für 315 kVA (1a) und 630 kVA (1b).

| | Unt. 2a 315 kVA u. 100 mm SS- Abstand | | | | Unt. 2b 630 kVA u. 100 mm SS- Abstand | | | |
|--------------------|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
| Einspeisung | doppelt | | | | doppelt | | | |
| Anzahl der Abgänge | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] |
| 6 | 18.5 | 34 | 19 | 36.5 | 29.5 | 41 | 25.5 | 41.5 |
| 7 | 16.5 | 36.5 | 18.5 | 40 | 27.5 | 42 | 24.5 | 44.5 |
| 8 | 14.5 | 40 | 17.5 | 44.5 | 24.5 | 44.5 | 24 | 49 |
| 9 | 13.5 | 45 | 17 | 49.5 | 22.5 | 48.5 | 23.5 | 53.5 |
| 10 | 14 | 49.5 | 17.5 | 54 | 21 | 53 | 23.5 | 58 |
| 11 | 14.5 | 54.5 | 18.5 | 59 | 21 | 57.5 | 24.5 | 62.5 |
| 12 | 15.5 | 59 | 18.5 | 64 | 22 | 62 | 25 | 67.5 |
| Einspeisung | mittig | | | | mittig | | | |
| 6 | 25.5 | 33 | 29 | 35 | 38.5 | 38.5 | 41.5 | 40.5 |
| 7 | 24 | 37 | 28 | 40 | 36.5 | 42 | 40 | 44.5 |
| 8 | 25 | 41 | 29.5 | 45 | 38 | 45 | 42 | 49 |
| 9 | 24 | 45 | 28.5 | 49.5 | 36.5 | 49.5 | 41 | 53.5 |
| 10 | 25.5 | 49.5 | 29.5 | 54 | 38 | 54 | 42.5 | 58 |
| 11 | 25 | 54.5 | 29 | 59 | 37 | 59 | 41 | 63 |
| 12 | 26 | 59.5 | 30 | 63.5 | 38.5 | 63 | 42.5 | 66.5 |
| Einspeisung | rechts | | | | rechts | | | |
| 6 | 30 | 33 | 33 | 42 | 44 | 37.5 | 46.5 | 51 |
| 7 | 31.5 | 36.5 | 34.5 | 47.5 | 45 | 41 | 47.5 | 56.5 |
| 8 | 32.5 | 41 | 35 | 52.5 | 46.5 | 45 | 48.5 | 62.5 |
| 9 | 33 | 45 | 35.5 | 57.5 | 47 | 49.5 | 50 | 68 |
| 10 | 34 | 50 | 36.5 | 63 | 48.5 | 53 | 50.5 | 73 |
| 11 | 34 | 54.5 | 37 | 68.5 | 49 | 58 | 51.5 | 79 |
| 12 | 34 | 59.5 | 37.5 | 74 | 49 | 63 | 52.5 | 84 |

Tabelle 7-3 zeigt die maximalen Abstände von der Koordinatenachse der flächenhaften Ausdehnung in der Höhe von 0.5 m. Diese Werte sind für den Sammelschienenabstand von **100 mm** für 315 kVA (1a) und 630 kVA (1b).

Zur Erfassung der maximalen Ausdehnung der magnetischen Flußdichteverteilung im 0.5 m Berechnungsschnitt wurden die parallel zu den Koordinatenachsen liegenden Abstände a und c sowie b und d additiv in der Tabelle 5-4 zusammengefaßt. Die Werte für die 0 m und 1 m Höhe sind im Anhang 7.3 und 7.4 angegeben. Die Ergebnisse sind in cm dargestellt. Die grau hinterlegten Angaben der rechtsseitigen Einspeisung repräsentieren das Ergebnis für den ungünstigsten Fall der NVT ohne konstruktive Optimierung (unter Beachtung der Anzahl der Abgänge sowie der speisenden Leistung).

| Einspeisung | | doppelt | | mittig | | rechts | |
|---|--------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Anzahl der Abgänge | a + c [cm] | b + d [cm] | a + c [cm] | b + d [cm] | a + c [cm] | b + d [cm] |
| | | Unt. 1b 630 kVA u. 200 mm SS- Ab- stand | 6 | 45.5 | 82 | 81.5 | 83 |
| | 7 | 51 | 85 | 75.5 | 90.5 | 105.5 | 107 |
| | 8 | 47 | 94 | 82.5 | 98.5 | 110.5 | 117 |
| | 9 | 44.5 | 103 | 77 | 108 | 113.5 | 127 |
| | 10 | 49 | 113 | 85 | 116 | 117 | 136.5 |
| | 11 | 53 | 122.5 | 82 | 125 | 119.5 | 146 |
| | 12 | 56 | 132.5 | 87 | 133.5 | 122.5 | 156 |
| Unt. 1a 315 kVA u. 200 mm SS- Ab- stand | 6 | 34.5 | 70.5 | 56.5 | 74 | 71.5 | 79.5 |
| | 7 | 35 | 76 | 53 | 80 | 76.5 | 89.5 |
| | 8 | 32 | 85 | 59.5 | 88 | 79.5 | 100 |
| | 9 | 33.5 | 94.5 | 58 | 97 | 82 | 110 |
| | 10 | 36 | 104.5 | 60.5 | 106.5 | 84.5 | 119.5 |
| | 11 | 39 | 114.5 | 58 | 115.5 | 86 | 129.5 |
| | 12 | 41.5 | 124 | 62 | 125 | 87.5 | 138.5 |
| Unt. 2b 630 kVA u. 100 mm SS- Ab- stand | 6 | 55 | 82.5 | 80 | 79 | 90.5 | 88.5 |
| | 7 | 52 | 89.5 | 76.5 | 86.5 | 92.5 | 93.5 |
| | 8 | 48.5 | 93.5 | 80 | 94 | 95 | 107.5 |
| | 9 | 46 | 102 | 77.5 | 103 | 97 | 117.5 |
| | 10 | 44.5 | 111 | 80.5 | 112 | 99 | 126 |
| | 11 | 45.5 | 120 | 78 | 122 | 100.5 | 137 |
| | 12 | 47 | 129.5 | 81 | 129.5 | 101.5 | 147 |
| Unt. 2a 315 kVA u. 100 mm SS- Ab- stand | 6 | 37.5 | 70.5 | 54.5 | 68 | 63 | 75 |
| | 7 | 35 | 76.5 | 52 | 77 | 66 | 84 |
| | 8 | 32 | 84.5 | 54.5 | 86 | 67.5 | 93.5 |
| | 9 | 30.5 | 94.5 | 52.5 | 94.5 | 68.5 | 102.5 |
| | 10 | 31.5 | 103.5 | 55 | 103.5 | 70.5 | 113 |
| | 11 | 33 | 113.5 | 54 | 113.5 | 71 | 123 |
| | 12 | 34 | 123 | 56 | 123 | 71.5 | 133.5 |

Tabelle 7-4 zeigt die maximalen Abstände parallel zu den Koordinatenachsen der flächenhaften Ausdehnung der durch die Isolinie für 100 μ T begrenzten Fläche. Die Angaben der rechtsseitigen Einspeisung (grau hinterlegt) kennzeichnen den schlechtesten Fall.

Die Isolinie für 100 μT umschließt die beschriebenen Flächen. Mit der Software AUTO-CAD © LT wurde der Flächeninhalt bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-5 zusammengefaßt dargestellt.

| Einspeisung | | doppelt | mittig | rechts |
|---|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Anzahl der Abgänge | Fläche [m^2] | Fläche [m^2] | Fläche [m^2] |
| | Unt. 1b 630 kVA u. 200 mm SS- Ab- stand | 6 | 0.36 | 0.52 |
| 7 | | 0.33 | 0.54 | 0.89 |
| 8 | | 0.35 | 0.63 | 1.01 |
| 9 | | 0.39 | 0.67 | 1.12 |
| 10 | | 0.45 | 0.75 | 1.23 |
| 11 | | 0.51 | 0.81 | 1.35 |
| Unt. 1a 315 kVA u. 200 mm SS- Ab- stand | 6 | 0.21 | 0.3 | 0.44 |
| | 7 | 0.21 | 0.33 | 0.52 |
| | 8 | 0.23 | 0.38 | 0.6 |
| | 9 | 0.25 | 0.42 | 0.67 |
| | 10 | 0.29 | 0.47 | 0.75 |
| | 11 | 0.32 | 0.51 | 0.82 |
| Unt. 2b 630 kVA u. 100 mm SS- Ab- stand | 6 | 0.35 | 0.48 | 0.62 |
| | 7 | 0.33 | 0.5 | 0.7 |
| | 8 | 0.34 | 0.56 | 0.78 |
| | 9 | 0.36 | 0.59 | 0.86 |
| | 10 | 0.4 | 0.65 | 0.93 |
| | 11 | 0.44 | 0.69 | 1.01 |
| Unt. 2a 315 kVA u. 100 mm SS- Ab- stand | 6 | 0.2 | 0.27 | 0.35 |
| | 7 | 0.2 | 0.3 | 0.41 |
| | 8 | 0.21 | 0.34 | 0.46 |
| | 9 | 0.23 | 0.37 | 0.51 |
| | 10 | 0.26 | 0.41 | 0.57 |
| | 11 | 0.29 | 0.44 | 0.62 |
| | 12 | 0.32 | 0.47 | 0.68 |

Tabelle 7-5 zeigt die Flächeninhalte der Ausdehnung der durch die Isolinie für 100 μT begrenzten Fläche. Die Angaben der rechtsseitigen Einspeisung (grau hinterlegt) kennzeichnen den schlechtesten Fall.

5.4 Auswertung der Optimierungsmaßnahmen an der NVT für 100 μT in der Höhe von 0.5 m

Die Auswertung wird in zwei Teilen vorgenommen. Im ersten Abschnitt erfolgt eine Betrachtung in der prozentualen Minderung des Flächeninhalts (100 μT) und der Summenabstände **a+c** sowie **b+d**. Am konkreten Beispiel der Niederspannungsverteilung mit 12 Abgängen wird die Bewertung der praxisrelevanten maximalen Abstände seitlich und frontal zur NVT durchgeführt.

5.4.1 Prozentuale Minderung der flächenhaften Ausdehnung von 100 μT

Ohne die Durchführung von konstruktiven Optimierungsmaßnahmen repräsentieren die Ergebnisse der rechtsseitig gespeisten NVT in der Untersuchung 1 (Teil a: 315 kVA und Teil b: 630 kVA) die Maximalwerte (schlechtester Fall) der jeweiligen Abgänge. In den zuvor aufgeführten Ergebnistabellen sind diese Werte grau hinterlegt dargestellt und bilden als ungünstigster Fall den Referenzwert zur prozentualen Bewertung der Optimierungsmaßnahmen. Die folgenden Tabellen zeigen die prozentualen Anteile der Summenabstände zum entsprechenden Referenzwert der rechtsseitig gespeisten NVT. Die prozentualen Anteile des Flächeninhalts sind im Anhang 7.5 ersichtlich.

| Einspeisung | | doppelt | | mittig | | rechts | |
|--|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Anzahl der Abgänge | Anteil des Summenabstandes [%] vom Referenzabstand | | | | | |
| | | a + c | b + d | a + c | b + d | a + c | b + d |
| Unt. 1a 315 kVA u. 200 mm SS- Abstand | 6 | 48.3 % | 88.7 % | 79.0 % | 93.1 % | 100 % | 100 % |
| | 7 | 45.8 % | 84.9 % | 69.3 % | 89.4 % | 100 % | 100 % |
| | 8 | 40.3 % | 85.0 % | 74.8 % | 88.0 % | 100 % | 100 % |
| | 9 | 40.9 % | 85.9 % | 70.7 % | 88.2 % | 100 % | 100 % |
| | 10 | 42.6 % | 87.4 % | 71.6 % | 89.1 % | 100 % | 100 % |
| | 11 | 45.3 % | 88.4 % | 67.4 % | 89.2 % | 100 % | 100 % |
| | 12 | 47.4 % | 89.5 % | 70.9 % | 90.3 % | 100 % | 100 % |
| Unt. 2a 315 kVA u. 100 mm SS- Abstand | 6 | 52.4 % | 88.7 % | 76.2 % | 85.5 % | 88.1 % | 94.3 % |
| | 7 | 45.8 % | 85.5 % | 68.0 % | 86.0 % | 86.3 % | 93.9 % |
| | 8 | 40.3 % | 84.5 % | 68.6 % | 86.0 % | 84.9 % | 93.5 % |
| | 9 | 37.2 % | 85.9 % | 64.0 % | 85.9 % | 83.5 % | 93.2 % |
| | 10 | 37.3 % | 86.6 % | 65.1 % | 86.6 % | 83.4 % | 94.6 % |
| | 11 | 38.4 % | 87.6 % | 62.8 % | 87.6 % | 82.6 % | 95.0 % |
| | 12 | 38.9 % | 88.8 % | 64.0 % | 88.8 % | 81.7 % | 96.4 % |

Tabelle 7-6 zeigt die Minimierung der Ausdehnung parallel zu den Koordinatenachsen. in Prozent für 315 kVA.

| Einspeisung | | Doppelt | | mittig | | rechts | |
|--|--------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Anzahl der Abgänge | Anteil des Summenabstandes [%] vom Referenzabstand | | | | | |
| | | a + c | b + d | a + c | b + d | a + c | b + d |
| Unt. 1b 630 kVA u. 200 mm SS- Abstand | 6 | 45.3 % | 84.1 % | 81.1 % | 85.1 % | 100 % | 100 % |
| | 7 | 48.3 % | 79.4 % | 71.6 % | 84.6 % | 100 % | 100 % |
| | 8 | 42.5 % | 80.3 % | 74.7 % | 84.2 % | 100 % | 100 % |
| | 9 | 39.2 % | 81.1 % | 67.8 % | 85.0 % | 100 % | 100 % |
| | 10 | 41.9 % | 82.8 % | 72.6 % | 85.0 % | 100 % | 100 % |
| | 11 | 44.4 % | 83.9 % | 68.6 % | 85.6 % | 100 % | 100 % |
| Unt. 2b 630 kVA u. 100 mm SS- Abstand | 6 | 54.7 % | 84.6 % | 79.6 % | 81.0 % | 90.0 % | 90.8 % |
| | 7 | 49.3 % | 83.6 % | 72.5 % | 80.8 % | 87.7 % | 87.4 % |
| | 8 | 43.9 % | 79.9 % | 72.4 % | 80.3 % | 86.0 % | 91.9 % |
| | 9 | 40.5 % | 80.3 % | 68.3 % | 81.1 % | 85.5 % | 92.5 % |
| | 10 | 38.0 % | 81.3 % | 68.8 % | 82.1 % | 84.6 % | 92.3 % |
| | 11 | 38.1 % | 82.2 % | 65.3 % | 83.6 % | 84.1 % | 93.8 % |
| | 12 | 38.4 % | 83.0 % | 66.1 % | 83.0 % | 82.9 % | 94.2 % |

Tabelle 7-7 zeigt die Minimierung der Ausdehnung parallel zu den Koordinatenachsen in Prozent für 630 kVA.

Betrachtung des Summenabstandes a+c:

Diese Maximalausdehnung quer zur NVT erzielte nach der Verlagerung sowie der Aufspaltung der Einspeisung und der Abstandshalbung der Sammelschienen eine Minderung auf 37.2 % zum Referenzabstand. Dieser Wert ist in der zuvor aufgeführten Tabelle für 315 kVA grau hinterlegt und zeigt das beste Ergebnis. Zur allgemeinen Aussage der jeweiligen Maßnahme wird ein Mittelwert gebildet, der tabellarisch im Anhang 7.5 aufgeführt ist.

Folgende Übersicht zeigt die Reduzierung [auf x %] des Summenabstandes **a+c** nach der Durchführung der Optimierungsmaßnahmen, die im Abschnitt der Vorbetrachtung beschrieben wurden.

| | | |
|--|--------------------------|-------------------------|
| 1. Symmetrierung der Einspeisung: | 72 % (315 kVA); | 72,5 % (630 kVA) |
| 2. Phase- Splitting an der Einspeisung: | 44,4 % (315 kVA); | 43,9 % (630 kVA) |
| 3. Minderung des SS- Abstandes: | 41,5 % (315 kVA); | 43,3 % (630 kVA) |

Nach der Durchführung der 1. und 2. Optimierungsmaßnahme ist die Reduzierung auf unter 50 % der Ausgangssituation für die Niederspannungsverteilungen aller Abgänge zu verzeichnen.

Die Ergebnisse der Abstandsminimierung (3. Maßnahme) an den Sammelschienen müssen für jede NVT separat betrachtet werden. Der Mittelwert der 3. Maßnahme zeigt gegenüber dem Mittelwert der 2. Maßnahme (Aufspaltung der mittigen Einspeisung) keine deutliche Verbesserung. Eine Verbesserung ist erst ab der Anzahl von 10 Abgängen an der NVT eingetreten. Im Einzelfall erzielte die dritte Maßnahme sogar Verschlechterungen gegenüber der 2. Maßnahme.

Betrachtung des **Summenabstandes b+d**:

Folgende Übersicht zeigt die Reduzierung [%] des Summenabstandes **b+d** nach der Durchführung der Optimierungsmaßnahmen.

| | | |
|--|--------------------------|-------------------------|
| 1. Symmetrierung der Einspeisung: | 89,6 % (315 kVA); | 85 % (630 kVA) |
| 2. Phase- Splitting an der Einspeisung: | 87,1 % (315 kVA); | 82,4 % (630 kVA) |
| 3. Minderung des SS- Abstandes: | 86,8 % (315 kVA); | 82,1 % (630 kVA) |

Durch die 1. Maßnahme (Symmetrierung der Einspeisung) reduziert sich der Summenabstandes **b+d** um ca. 10 % bei 315 kVA gegenüber der Ausgangssituation . Eine deutliche Verbesserung mit der Durchführung der 2. und 3. Maßnahme ist an den gebildeten Mittelwerten nicht zu verzeichnen.

Betrachtung des **Flächeneinhalts**:

Die folgende Übersicht zeigt die Reduzierung [%] des Flächeneinhalts nach der Durchführung der Optimierungsmaßnahmen.

| | | |
|--|--------------------------|-------------------------|
| 1. Symmetrierung der Einspeisung: | 63,6 % (315 kVA); | 61,8 % (630 kVA) |
| 2. Phase- Splitting an der Einspeisung: | 40,4 % (315 kVA); | 38,2 % (630 kVA) |
| 3. Minderung des SS- Abstandes: | 37,0 % (315 kVA); | 35,2 % (630 kVA) |

Die Mittelwerte zeigen durch die Additivität der Maßnahmen eine Minimierung des Flächeninhalts (Fläche der durch die 100 μ T einschließenden Isolinie). Auch hier zeigt sich eine unwesentliche Verbesserung nach der Durchführung der Abstandshalbung an den Sammelschienen (3. Maßnahme).

5.4.2 Maximale Abstände am Beispiel der Niederspannungsverteilung mit 12 Abgängen

Im Anhang 7.6 sind die Diagramme der Maximalabstände für die Niederspannungsverteilungen mit 6 bis 11 Abgängen dargestellt.

Betrachtung der *Maximalabstände seitlich* der NVT:

Die Lokalität der rechtsseitigen Einspeisung bestimmt die Maximalwerte seitlich der NVT. Damit sind die ermittelten Werte der Abstandsmessung **d** Grundlage dieser Bewertung. Im Diagramm 5-1 sind die jeweiligen Abstände in Abhängigkeit der Einspeisung sowie der Teiluntersuchungen dargestellt.

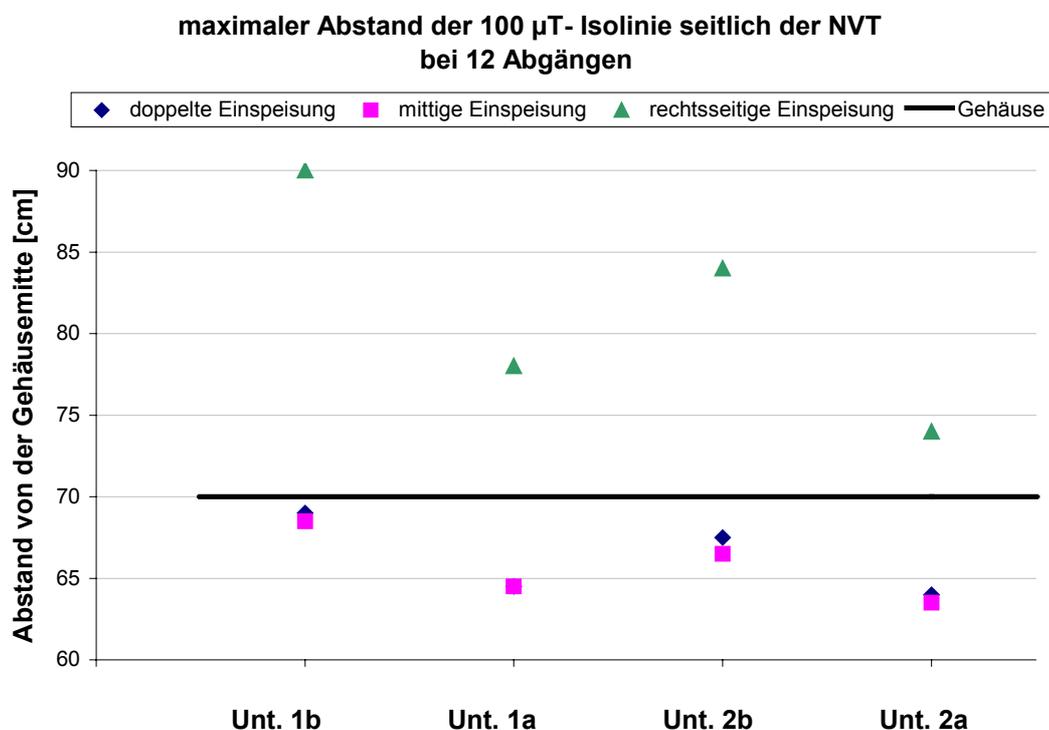
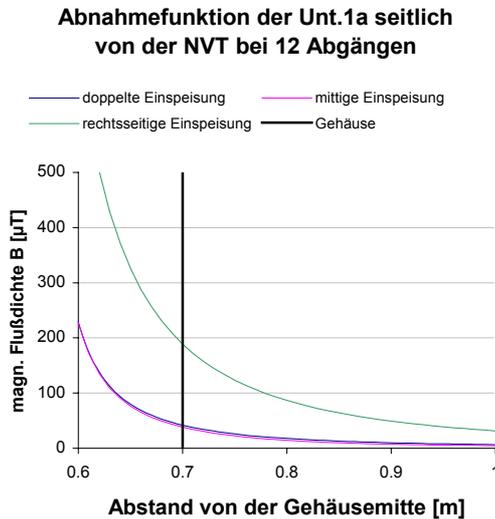


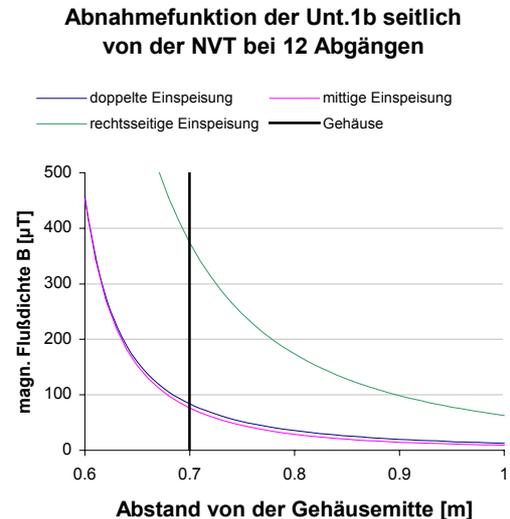
Diagramm 5-1 zeigt die ermittelten Maximalabstände seitlich der NVT (Seite d). Die drei Einspeisungsvarianten werden in den jeweiligen Teiluntersuchungen gegenübergestellt.

Die „Gehäusemitte“ ist der Koordinatenursprung der deckungsgleich mit dem Schnittpunkt der Diagonalen des Gehäuses in der Draufsicht ist. Die Gehäusebegrenzung ist schwarz im Diagramm eingezeichnet. Die Maximalabstände der rechtsseitig gespeisten NVT befinden sich alle, gegenüber den Werten der mittigen und doppelten Einspeisung, außerhalb der Gehäusebegrenzung.

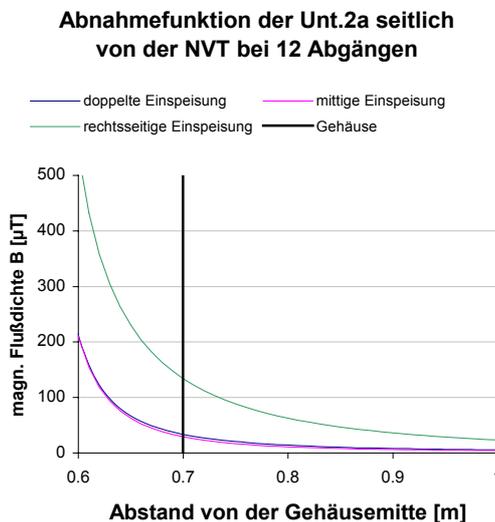
Vergleicht man die Abstände der Unt. 1b mit den Werten der Unt. 2b so ist auch hier eine unwesentliche Verbesserung der dritten Maßnahme gegenüber den Maßnahmen 1 und 2 zu erkennen.

**Diagramm 5-2**

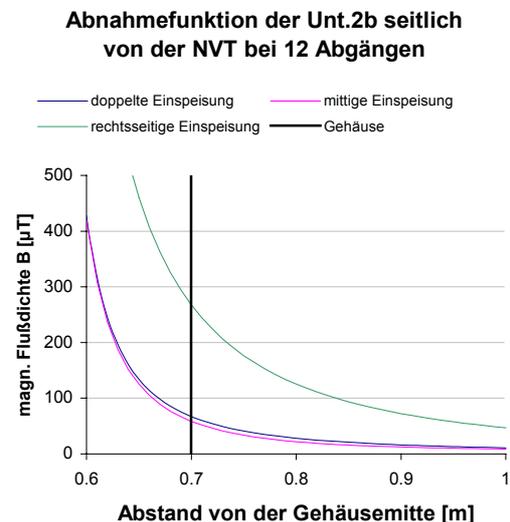
exponentielle Abnahme für 315 kVA
mit 200 mm SS- Abstand

**Diagramm 5-3**

exponentielle Abnahme für 630 kVA
mit 200 mm SS- Abstand

**Diagramm 5-4**

exponentielle Abnahme für 315 kVA
mit 100 mm SS- Abstand

**Diagramm 5-5**

exponentielle Abnahme für 630 kVA
mit 100 mm SS- Abstand

Die Diagramme 5-2 bis 5-5 zeigen den Verlauf der Abnahme der magnetischen Flußdichte in der Umgebung der seitlichen Gehäusebegrenzung. Dabei ist zu bemerken, daß die Abnahmefunktion in der Vorzugsrichtung durch den Maximalabstand berechnet wurde. Diese Kongruenz zeigt der Schnittpunkt der exponentiellen Abnahme mit dem Grenzwert von $100 \mu\text{T}$. Die abzulesenden Werte sind deckungsgleich mit dem im Diagramm 5-1 dargestellten Maximalabständen. Mittig und doppelt gespeiste Niederspannungsverteilungen können nach diesem Modell unbedenklich mit der Seite unmittelbar an der Stationswand positioniert werden. Je nach Stärke der Stationsbegrenzung ist eine entsprechende Abstandsregulierung bei der rechtsseitig gespeisten NVT vorzunehmen. Nach Möglichkeit sollte die einspeisende Seite der NVT in die Raummitte verlagert werden.

Betrachtung der *Maximalabstände frontal* zur NVT:

Die Grundlage der frontseitigen Auswertung sind die Werte der Abstandsermittlung der Seite c. Nach den Teiluntersuchungen Unt. 1a bis Unt. 2b sind die Maximalabstände der drei Einspeisungsvarianten sowie die Gehäusebegrenzung frontal zur NVT im Diagramm 5-6 abgebildet.

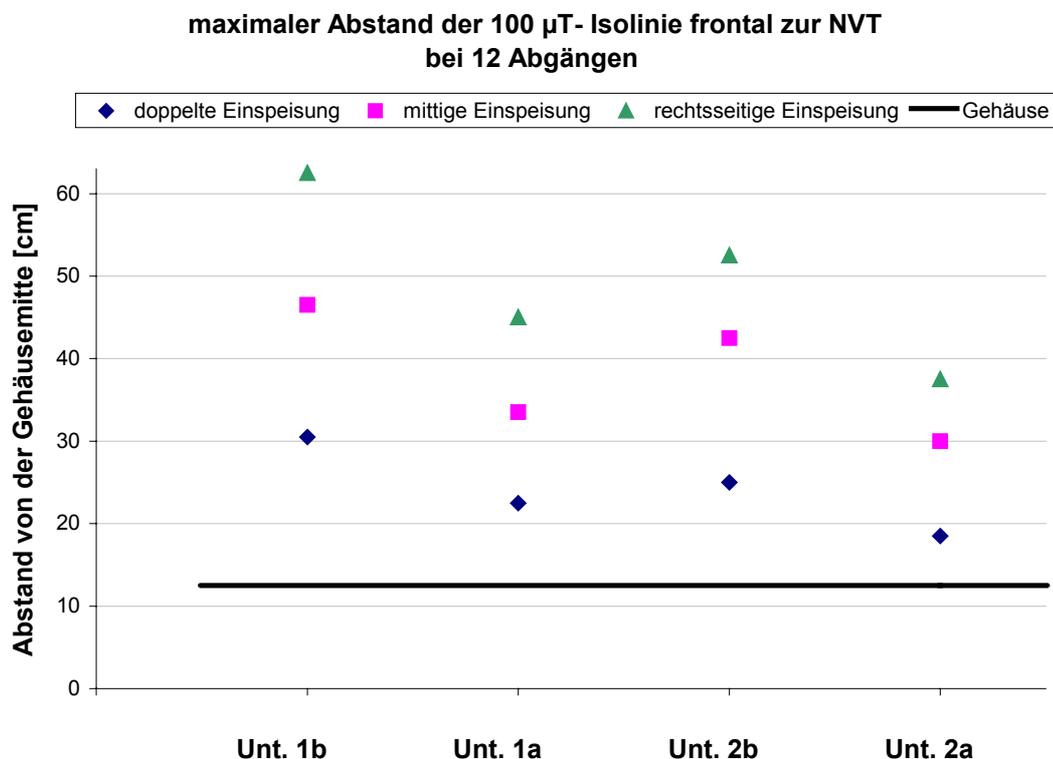


Diagramm 5-6 zeigt die ermittelten Maximalabstände frontal zur NVT (Seite c). Die drei Einspeisungsvarianten werden in den jeweiligen Teiluntersuchungen gegenübergestellt.

Die Variante der doppelten Einspeisung liefert hier die besten Werte hinsichtlich der Betrachtung der 100 μT Isolinie. Wird eine NVT frontal an der Stationswand errichtet, ist durch eine entsprechende Abstandsregulierung die Einhaltung des Grenzwertes gewährleistet.

Die Optimierung der Flußdichteverteilung ist von mehreren Faktoren abhängig.

Im Diagramm 5-6 ist der maximale Abstand einer mit 315 kVA mittig gespeisten NVT dem Abstand der doppelt mit 630 kVA gespeisten ungefähr gleich. Zur Erzielung der geforderten Werte ist die Durchführung der konstruktiven Optimierungsmaßnahmen unter dem Aspekt der speisenden Leistung vorzunehmen.

Bei kleinen Stationsgrößen ist die Maßnahme der Abstandsregulierung mit der rechtsseitig gespeisten NVT nicht realisierbar. Beachtet werden, wie auch bei seitlicher Positionierung, muß auch der Betrag der speisenden Leistung. Der Einfluß der speisenden Leistung gleicher NVT ist auch in den Diagrammen 5-7 bis 5-10 mit der frontalen Abnahme der magnetischen Flußdichteverteilung zu erkennen. Die Abnahmefunktionen in Abhängigkeit der Optimierungsmaßnahmen und der speisenden Leistung wurden auch in den Vorzugsrichtungen der maximalen Position des Abstandes für die Berechnungshöhe 0,5 m ermittelt.

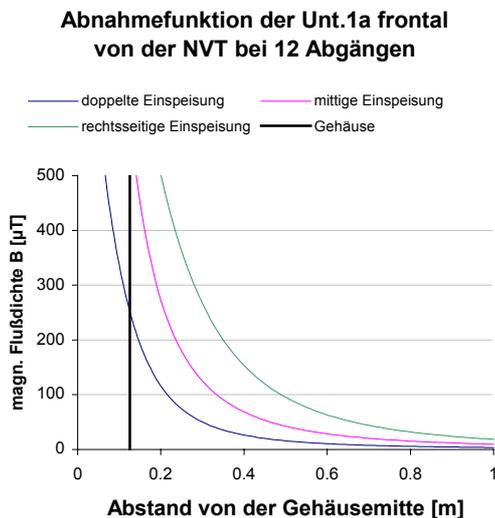


Diagramm 5-7

exponentielle Abnahme für 315 kVA
mit 200 mm SS- Abstand

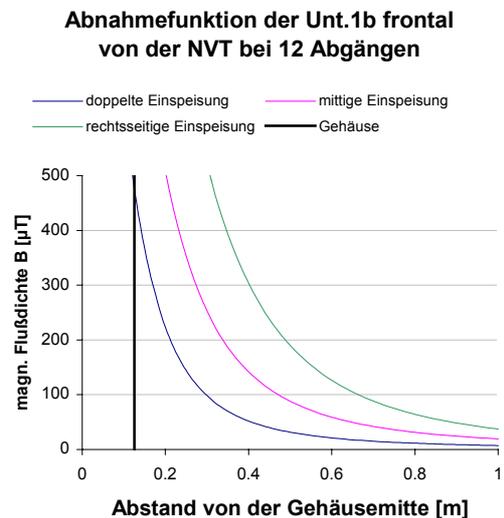


Diagramm 5-8

exponentielle Abnahme für 630 kVA
mit 200 mm SS- Abstand

**Abnahmefunktion der Unt.2a frontal
von der NVT bei 12 Abgängen**

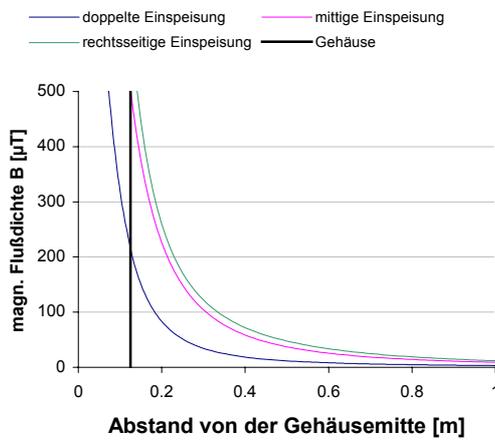


Diagramm 5-9

exponentielle Abnahme für 315 kVA
mit 100 mm SS- Abstand

**Abnahmefunktion der Unt.2b frontal
von der NVT bei 12 Abgängen**

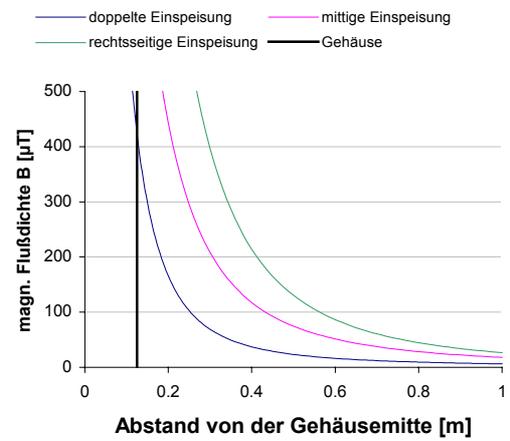


Diagramm 5-10

exponentielle Abnahme für 630 kVA
mit 100 mm SS- Abstand

5.5 Schlußfolgerung

5.5.1 Betrachtung der Positionierung sowie der Vor- und Nachteile der Einspeisungsvarianten an der Niederspannungsverteilung

Die seitliche sowie die frontale Abnahme ist mit zunehmender Anzahl der Maßnahmen hinsichtlich des Grenzwertes von $100 \mu\text{T}$ optimiert worden. Die Positionierung der NVT frontal und seitlich zur Stationsbegrenzung verlangt bei der Auswertung der 3 Maßnahmen eine differenzierte Betrachtung.

Festlegung:

Durch die begrenzt zur Verfügung stehende Fläche einer Netzstation gilt die folgende Ausgangssituation der Betrachtung. Es ist die ausschließlich die seitliche Positionierung im ersten Fall sowie die frontale Positionierung im zweiten Fall möglich.

1. Fall, seitliche Positionierung:

Die rechtsseitige Einspeisung hat im Diagramm 5-3 an der Gehäusewand den über vierfachen Flußdichtewert gegenüber den Einspeisungsvarianten mittig und doppelt. Die Graphen des seitlichen Abfalls in den Diagrammen 5-2 bis 5-5 der mittigen und doppelten Einspeisung sind annähernd deckungsgleich. Gelingt die Flußdichtereduzierung durch die Abstandsvergrößerung zur Außenwand der Station bei der rechtsseitig gespeisten NVT nicht, muß die Einspeisung mittig verlagert werden. Die Aufspaltung an der Einspeisung, als fortführende Maßnahme, entspricht im Fall der seitlichen Positionierung einer Überdimensionierung. In der prozentualen Auswertung der Summenabstände $b+d$ erbrachte die Maßnahme der Aufspaltung an der Einspeisung keine nennenswerte Verbesserung gegenüber der mittigen Einspeisung und ist mit Blick auf den Montageaufwand und des Materialeinsatzes als nachteilig zu bewerten.

2. Fall, frontale Positionierung:

Eine Abstandsregulierung ist auch bei dieser Positionierung, eingangs festgelegt, nicht möglich.

Bei gleichem Montageaufwand und Materialeinsatz reduzierte die mittige Einspeisung die Ausdehnung der Summenabstände $a+c$ der Flußdichteverteilung um ca. 30 %.

Dieser beachtenswerte Vorteil hat seine Gültigkeit im Planungsstadium einer Station. Mit erhöhtem Montageaufwand und Materialeinsatz der doppelt gespeisten NVT wird eine weitere Minimierung mit äquivalenter Optimierung gegenüber der mittigen Einspeisung erreicht. Diese Verbesserung bestätigen die Diagramme 5-6 bis 5-10. Bei der frontalen Positionierung ist die Variante der doppelten Einspeisung in Erwägung zu ziehen. In Abhängigkeit der energietechnischen Anbindung einer Netzstation im Maschennetz ist der nachteilig kostenintensive Einsatz der Schaltgerätetechnik der Sekundärmaßnahme Schirmung gegenüberzustellen. Niederspannungsseitig ist im Maschennetz, anstelle des Lasttrennschalters, häufig ein Leistungsschalter vorgesehen. Dieser sogenannte Maschennetzschalter spricht im Fehlerfall auch bei der Umkehr des Leistungsflusses an und gewährleistet die gleichzeitige Abschaltung der doppelten Einspeisung.

Unabhängig von der Positionierung der NVT zur Begrenzung der Station ist die Maßnahme der Abstandsminderung an den Sammelschienen (3. Maßnahme) zu bewerten. Die in der Auswertung 5.4 präsentierten Diagramme zeigen eine Verbesserung der Teiluntersuchungen 1b und 2b gegenüber 1a und 2a für die NVT mit 12 Abgängen. Diese Feststellung trifft aber erst ab der Anzahl von 9 Abgängen bei 315 kVA sowie ab der Anzahl von 10 Abgängen bei 630 kVA zu. Zur Unterschreitung des vorgeschriebenen Grenzwertes ($100 \mu\text{T}$) mittels dieser Maßnahme ist die quantitative Auswertung in Abhängigkeit der Anzahl der Abgänge notwendig. Im Anhang 7.6 sind die Diagramme für die Maximalabstände der seitlichen und frontalen Positionierung nach der jeweiligen Anzahl der niederspannungsseitigen Abgänge aufgeführt.

Die betrachteten Maßnahmen haben im Vorfeld der Konstruktion von Niederspannungsverteilungen in der Planungsphase bestand. Bei bereits bestehenden Stationen, die einer Anzeigepflicht nach der 26. BImSchV nachkommen müssen, ist eine individuelle Abwägung der Maßnahmen aus ökonomischer Sicht vorzunehmen. Eine allgemeingültige Aussage aufgrund der Vielzahl von Einflußfaktoren, z. B. Stationsgröße sowie den technischen Parametern der energietechnischen Versorgungsaufgabe, kann nicht getroffen werden.

5.5.2 Optimierungsmaßnahmen

Zur Reduzierung der magnetischen Flußdichteverteilung in der unmittelbaren Umgebung von Netzstationen ist als erste Maßnahme die relevanten Baugruppen, wie Niederspannungsverteilungen, MS- Schaltschränke und Transformatoren mit größtmöglichen Abstand zur Außenwand zu installieren. Aufgrund der heute für den Stationsbau nur noch in geringem Maße verfügbaren Fläche entstehen immer kompaktere Stationstypen. Die einfachste Maßnahme, die Abstandsvergrößerung der Komponenten zu den Außenwänden, ist deshalb häufig nicht realisierbar. Die folgende Übersicht zeigt mögliche Alternativen primärer Maßnahmen.

1. Abstandsvergrößerung zu den stromführenden Komponenten

- Transformator und Niederspannungsverteilung möglichst in Raummitte aufstellen,
- Kabel und Stromschienen nicht direkt an den Außenwänden (bei Einbaustationen mit darüber liegenden genutzten Räumen, auch nicht an der Decke) anbringen, dies gilt speziell für alle Niederspannungs- Komponenten

2. interne Bündelung stromführender Leiter/ Kabel

- Anschlußkabel statt Stromschienen verwenden,
- Nach Möglichkeit Mehrleiterkabel einsetzen,
- Kabel erst direkt am Trafo splitten (hochflexible Kabel haben geringere Biegeradien),
- Verlegegeometrie: Anordnung im Dreieck gegenüber flacher Anordnung ist nach Möglichkeit zu bevorzugen (Entfernungsgesetze)

3. Symmetrierung des Strombelags auf der Sammelschiene an der NVT

- NVT mittig einspeisen,
- NVT doppelt einspeisen

4. Ausnutzung der Kompensation bei Phasenoptimierung

- Bündelung verschiedener und nicht gleicher Phasen

Sind die primären Maßnahmen am Ort der Entstehung der magnetischen Flußdichteverteilung ausgeschöpft, ist die geforderte Minimierung durch die Sekundärmaßnahme Abschirmung realisierbar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Systematisierung von Netzstationen wurde eine Einteilung der Stationen hinsichtlich der unterschiedlichen Bauausführungen vorgenommen. Sie stellen das Bindeglied zwischen der Mittelspannungs- und Niederspannungsebene dar. Damit sind im wesentlichen die zur Energieverteilung notwendigen Anlagenkomponenten bestimmt.

Der konstruktive Aufbau sowie die Positionierung der Anlagenkomponenten ist innerhalb der technischen Grenzen von der Stationsgröße zur Lösung der Versorgungsaufgabe bedingt. Die Lösung der energietechnischen Versorgungsaufgabe durch den zivilisatorischen und technologischen Bedarf angetrieben, bringt zusätzliche künstliche Feldquellen im Bereich der Netzfrequenz hervor.

Zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft in der Bundesrepublik Deutschland trat am 01.01.1997 die immissionsschutzrechtliche Regelung 26. BImSchV in Kraft.

Netzstationen stellen eine hohe Anzahl der anzeigepflichtigen Anlagen dar, die eine Unterschreitung des Grenzwertes $100 \mu\text{T}$ (50 Hz) mittels Messung oder anerkannter Berechnungsverfahren nachweisen müssen.

Das Berechnungsverfahren nach Biot- Savart ist eine worst- case Betrachtung. Der Materialeinfluß von Gehäuseabdeckungen oder der Stationsbegrenzungen werden nach diesem Verfahren nicht berücksichtigt.

Unsymmetrische Belastungen, der häufigste Fall in Netzstationen, finden durch die Forderungen in den Durchführungshinweisen zur 26. BImSchV nach höchster Anlagenauslastung in der Berechnung Berücksichtigung.

Zur Erzielung von Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich des Personenschutzes ist die Kenntnis der maßgeblichen Quellen erforderlich. Zu diesem Zweck wurden 32 in der Praxis existierender Netzstationen ausgewertet. Unterschiedliche Betriebsparameter bedingten zur Schaffung der Vergleichbarkeit Bewertungskriterien. Mit der Kenntnis des varianten Abnahmeverhaltens der magnetischen Flußdichte im geometrischen Nahbereich komplexer Leiteranordnungen wurde eine Normierung der Stationsgrundrißflächen auf eine konstante Einspeiseleistung (630 kVA) vorgenommen.

Hauptverursacher der auftretenden Maxima ist die Niederspannungsverteilung. Eine genauere Betrachtung ergab, daß mit immer kleineren Stationsabmessungen die NVT unmittelbar an der Stationswand aufgestellt ist. Diese meist längsseitige Positionierung zur Außenwand erforderte Überlegungen nach praktikablen Optimierungsmaßnahmen sowie deren Auswertung.

Zwei grundsätzlich verschiedene Maßnahmen werden dabei unterschieden, die primären Maßnahmen und die Maßnahmen der Abschirmung (sekundär). Primäre Maßnahmen sind Maßnahmen am Ort der Entstehung der magnetischen Flußdichte, die im Vorfeld der Planung aus Kostengründen der Maßnahme Abschirmung zu bevorzugen sind.

Für Grundrisse kleiner Abmessungen (z.B. Kompaktstationen) ist der Aufwand mit der Kenntnis der konstruktiven Optimierungsmaßnahmen im Planungsstadium wesentlich geringer als ein nachträglicher Umbau, Abschirmungsmaßnahmen oder sogar Umzäunung der Netzstation.

Die Maßnahmen der internen Bündelung, der Symmetrierung des Strombelags auf der Sammelschiene und der Aufspaltung der einspeisenden Leiterkonfiguration (Phase-Splitting) sind die Grundlage der konstruktiven Optimierung hinsichtlich der magnetischen Flußdichteverteilung an der Niederspannungsverteilung.

Die Einbindung ins Energieversorgungsnetz bestimmt die Betriebsweise der Netzstation. Am häufigsten ist die Betriebsweise einer mittelspannungsseitig gespeisten Ringleitung mit offener Trennstelle, damit ist die Mittelspannungsschaltanlage mit dem sogenannten Ringstrom belastet. Mit 34,4 % sind ringgespeiste MS-Schaltanlagen die Verursacher der auftretenden Maxima der in dieser Arbeit untersuchten Stationen.

Eine fortführende Untersuchung der MS-Schaltanlagen mittels konstruktiver Optimierungsmaßnahmen ist daher zu empfehlen. Die Spannungsebenen mit Berücksichtigung des isolierenden Mediums bestimmt die Grenzen der Abstände, aber die Wahl des Dielektrikums sowie die Anordnung der Verlegegeometrie sollte ausgewertet werden.

Mit den dann gewonnen Erkenntnissen an den einzelnen Anlagenkomponenten, unter dem Gesichtspunkt der Verteilung der magnetischen Flußdichte, sollte die Wirksamkeit auf das Gesamtfeld einer Netzstation mit den optimierten Anlagenkomponenten vorgenommen werden.

7 Anhang

7.1 Die magnetischen Flußdichteverteilung an Netzstationen

Zur Beurteilung der Quellen der magnetischen Flußdichte wurden 32 Netzstationen ausgewertet. Die genaue Zuordnung der technischen Parameter der jeweiligen Station ist in den folgenden Abbildungen ersichtlich:

| | |
|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Station 1</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,15 m x 1,85 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (links): max. 153 μT 20 cm Abstand: max. 63 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 2</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,05 m x 2,4 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinten): max. 122,5 μT 20 cm Abstand: max. 47,1 μT</p> |

| | |
|--|---|
| | <p style="text-align: center;">Station 3</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,20 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 698,9 μT 20 cm Abstand: max. 188,4 μT 33 cm Abstand: max. 100 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 4</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,20 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV Variante 1 (Verschiebung der NVT um 0.15 m)</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 249,9 μT 20 cm Abstand: max. 91,1 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 5</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,15 m x 1,85 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (rechts): max. 88 μT 20 cm Abstand: max. 38 μT</p> |

| | |
|--|---|
| | <p style="text-align: center;">Station 6</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 6,30 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 193.4 μT 20 cm Abstand: max. 80,1 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 7</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 12,70 m x 5,60 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Transformatoren: 2x400 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 2x400 kVA, NS-Seite max. 2x577A HS-Seite max. 2x11.5A, Durchschleifung 2x400A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinter): max. 150,8 μT 20 cm Abstand: max. 92,7 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 8</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 11,85 m x 5,95 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Transformatoren: 2x630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 2x630 kVA, NS-Seite max. 2x909A HS-Seite max. 2x18.2A, Durchschleifung 2x400A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinter): max. 71,9 μT 20 cm Abstand: max. 24,6 μT</p> |

| | |
|--|---|
| | <p style="text-align: center;">Station 9</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 5,50 m x 4,50 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 12 kV-Schaltanlage, Trafo: 400 kVA, 10/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 400 kVA, NS-Seite max. 577 A MS-Seite max. 11.5 A, Durchschleifung 600 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (links): max. 92 μT 20 cm Abstand: max. 44,1 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 10</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 2,55 m x 1,2 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, Trafo: 630 kVA, 10/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 897 μT 20 cm Abstand: max. 302 μT 55 cm Abstand: max. 100 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 11</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 5,00 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 268 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (links): max. 149,3 μT 20 cm Abstand: max. 64,1 μT</p> |

| | |
|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Station 12</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,50 m x 2,40 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 268 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinter): max. 253 μT 20 cm Abstand: max. 93 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 13</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 6,70 m x 4,70 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinter): max. 74 μT 20 cm Abstand: max. 41 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 14</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 5,90 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A, Durchschleifung 400 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 315 μT 20 cm Abstand: max. 81 μT</p> |

| | |
|--|---|
| | <p style="text-align: center;">Station 15</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 6,45 m x 2,50 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 800 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 800 kVA, NS-Seite max. 1154 A HS-Seite max. 23 A, Durchschleifung 268 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinter): max. 159 μT 20 cm Abstand: max. 71 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 16</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,80 m x 2,50 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 1000 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 1000 kVA, NS-Seite max. 1443 A HS-Seite max. 28,9 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 1328 μT 20 cm Abstand: max. 230 μT 44 cm Abstand: max. 100 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 17</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,80 m x 2,50 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 1000 kVA, 20/0.4 kV Nach Konstruktionsänderungen</p> <p>Belastung: max. 1000 kVA, NS-Seite max. 1443 A HS-Seite max. 28,9 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 133 μT 20 cm Abstand: max. 25 μT</p> |

| | |
|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Station 18</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 2,50 m x 1,50 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 250 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 250 kVA, NS-Seite max. 361 A HS-Seite max. 7,2 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (rechts): max. 117 μT 20 cm Abstand: max. 50 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 19</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 14,00 m x 16,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Erdschlußschanlage</p> <p>Belastung: 20 kV-Schaltanlage max. 630 A, Erdschlußschanlage max. 200 A, 0.4 kV-Anlage max. 50 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinten): max. 65 μT 20 cm Abstand: max. 34 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 20</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 2,35 m x 1,35 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanl., Trafo: 630 kVA, 10/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 36,4 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (links): max. 190 μT 20 cm Abstand: max. 84 μT</p> |

| | |
|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Station 21</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,00 m x 1,40 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanl., Trafo: 630 kVA, 10/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 36,4 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (links): max. 118 μT 20 cm Abstand: max. 52 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 22</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,00 m x 2,60 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 32 μT 20 cm Abstand: max. 16 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 23</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,00 m x 2,50 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 31 μT 20 cm Abstand: max. 16 μT</p> |

| | |
|--|---|
| | <p style="text-align: center;">Station 24</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 1,95 m x 2,55 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 400 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 400 kVA, NS-Seite max. 577 A HS-Seite max. 11,5 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 195 μT 20 cm Abstand: max. 86 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 25</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 2,15 m x 2,55 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18.2 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 305 μT 20 cm Abstand: max. 134 μT 30 cm Abstand: max. 100 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 26</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,10 m x 2,60 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 400 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 400 kVA, NS-Seite max. 577 A HS-Seite max. 11,5 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (vor): max. 23,8 μT 20 cm Abstand: max. 11,6 μT</p> |

| | |
|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Station 27</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 2,40 m x 1,60 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Gerüst, Trafo: 250 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 250 kVA, NS-Seite max. 361 A HS-Seite max. 7.2 A, Durchschleifung 600 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinten): max. 72,6 μT 20 cm Abstand: max. 22,6 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 28</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,00 m x 2,40 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18,2 A, Durchschleifung 630 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (rechts): max. 217 μT 20 cm Abstand: max. 95,9 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 29</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 2,85 m x 1,75 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18,2 A, Durchschleifung 630 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (hinten): max. 299 μT 20 cm Abstand: max. 90,7 μT</p> |

| | |
|--|--|
| | <p style="text-align: center;">Station 30</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 3,25 m x 1,65 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18,2 A, Durchschleifung 200 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (rechts): max. 196,7 μT (Dach 232,2 μT) 20 cm Abstand: max. 89,6 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 31</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,20 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18,2 A, Durchschleifung 630 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (links): max. 247,5 μT 20 cm Abstand: max. 72,5 μT</p> |
| | <p style="text-align: center;">Station 32</p> <p>Abmessung des Grundrisses: 4,04 m x 3,00 m</p> <p>Komponenten der Station: 400 V-NVT, 20 kV-Schaltanlage, Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV</p> <p>Belastung: max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18,2 A, Durchschleifung 58 A</p> <p>Ergebnis: Außenwand (rechts): max. 423,4 μT 20 cm Abstand: max. 196 μT 42 cm Abstand: max. 100 μT</p> |

In den folgenden Tabellen sind die technischen Parameter der Netzstationen zusammengefaßt dargestellt. Die grau hinterlegten Stationsnummern kennzeichnen die Stationen, die aufgrund der Normierung die nach Grundrißfläche bewerteten Klasse gewechselt haben.

| Station | Leistung [kVA] | Ringstrom [A] | magnetische Flußdichte [μT] | | Abstand [m] bei 100 μT | Fläche der Station [m^2] | Verursacher des Maximums |
|---------|-------------------|------------------|--|---------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| | | | an Außenwand | 0,2 m Abstand | | | |
| 1 | 630 | 400 | 153 | 63 | | 5.83 | MS-Anlage |
| 2 | 630 | 400 | 122.5 | 47.1 | | 7.32 | MS-Anlage |
| 3 | 630 | 400 | 698.9 | 188.4 | 0.33 | 12.6 | NVT |
| 4 | 630 | 400 | 249.9 | 91.1 | | 12.6 | NVT |
| 5 | 630 | | 88 | 38 | | 5.83 | NVT |
| 6 | 630 | 400 | 193.4 | 80.1 | | 18.9 | NVT |
| 7 | 2x400 | 2x400 | 150.8 | 92.7 | | 71.12 | MS-Anlage |
| 8 | 2x630 | 2x400 | 71.9 | 24.6 | | 70.51 | MS-Anlage |
| 9 | 400 | 600 | 92 | 44.1 | | 24.75 | MS-Anlage |
| 10 | 630 | | 897 | 331 | 0.55 | 3.06 | Trafo (NS-Verb.) |
| 11 | 630 | 268 | 149.3 | 64.1 | | 15 | MS-Anlage |
| 12 | 630 | 268 | 253 | 93 | | 8.4 | MS-Anlage |
| 13 | 630 | 400 | 74 | 41 | | 31.49 | MS-Anlage |
| 14 | 630 | 400 | 315 | 81 | | 17.7 | NVT |
| 15 | 800 | 268 | 159 | 71 | | 16.13 | MS-Anlage |
| 16 | 1000 | | 1328 | 230 | 0.44 | 12 | NVT |
| 17 | 1000 | | 133 | 25 | | 12 | NVT |
| 18 | 250 | | 117 | 50 | | 3.75 | Trafo (NS-Verb.) |
| 19 | | | 65 | 34 | | 224 | MS-Anlage |
| 20 | 630 | | 190 | 84 | | 3.17 | NVT |
| 21 | 630 | | 118 | 52 | | 4.2 | NVT |
| 22 | 630 | | 32 | 16 | | 7.8 | NVT |
| 23 | 630 | | 31 | 16 | | 10 | NVT |
| 24 | 400 | | 195 | 86 | | 4.97 | NVT |
| 25 | 630 | | 305 | 134 | 0.3 | 5.48 | NVT |
| 26 | 400 | | 23.8 | 11.6 | | 8.06 | NVT |
| 27 | 250 | 600 | 72.6 | 22.6 | | 3.84 | MS-Anlage |
| 28 | 630 | 630 | 217 | 95.9 | | 7.2 | NVT |
| 29 | 630 | 630 | 299 | 90.7 | | 4.99 | NVT |
| 30 | 630 | 200 | 196.7 | 89.6 | | 5.36 | NVT |
| 31 | 630 | 630 | 247.5 | 72.5 | | 12.6 | MS-Anlage |
| 32 | 630 | 58 | 423.4 | 196 | 0.42 | 12.12 | NVT |

Tabelle 7-1 Zusammenfassung der Stationsdaten sowie der Verursacher der auftretenden Maxima

7.2 Dreidimensionale Darstellung der Beispielstation

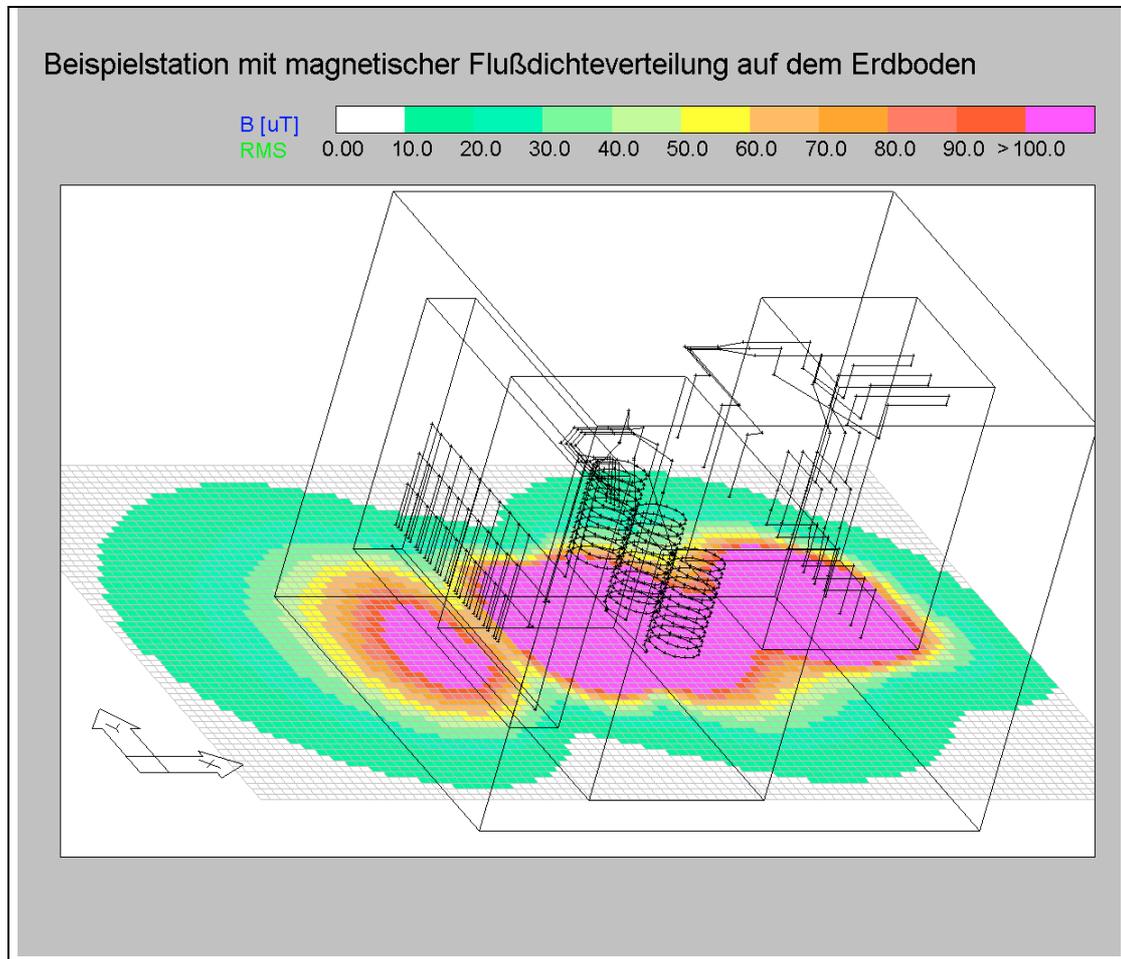


Abb. 7-1 dreidimensionale Darstellung der Beispielstation mit der magnetischen Flußdichtevertellung für die Berechnungshöhe von 0 m

| | |
|-----------------------------------|--|
| Abmessung des Grundrisses: | 2,60 m x 2,10 m |
| Komponenten der Station: | 400 V-NVT mit 11 Abgängen rechtsseitig eingespeist 20 kV- SF 6 Ringkabelschaltanlage (8DJ10) Trafo: 630 kVA, 20/0.4 kV (Dielektrikum: Öl) |
| Belastung: | max. 630 kVA, NS-Seite max. 909 A HS-Seite max. 18 A, Durchschleifung 630 A |
| Ergebnis: | Außenwand links (an der NVT): max. 690 μT 20 cm Abstand: max. 235 μT 42 cm Abstand: max. 100 μT (0,53 m Höhe) |

7.3 Berechnungsergebnisse für 100 μT des orthogonalen Berechnungsschnittes für die Höhe von 0 m

In der Tabelle 7-3 und 7-4 sind die Abstände a, b, c und d der Isolinie (100 μT) des 0 m Berechnungsschnittes aufgeführt.

| | Unt. 1a | | | | Unt. 1b | | | |
|--------------------|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| Einspeisung | doppelt | | | | doppelt | | | |
| Anzahl der Abgänge | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] |
| 6 | 10 | 36.5 | 10 | 36.5 | 18.5 | 43 | 19.5 | 42.5 |
| 7 | 9.5 | 41 | 9.5 | 40.5 | 16 | 46.5 | 16.5 | 46.5 |
| 8 | 9 | 45 | 8 | 44.5 | 14.5 | 50 | 14.5 | 50 |
| 9 | 8.5 | 49.5 | 8.5 | 49.5 | 13.5 | 54 | 13 | 54.5 |
| 10 | 8 | 54.5 | 8 | 54.5 | 12 | 58.5 | 11.5 | 59 |
| 11 | 7.5 | 59 | 7.5 | 59 | 11 | 62.5 | 10 | 63 |
| 12 | 7.5 | 63.5 | 7 | 64 | 10 | 66.5 | 9.5 | 68 |
| Einspeisung | mittig | | | | mittig | | | |
| 6 | 11 | 36 | 11 | 36.5 | 22.5 | 41.5 | 23 | 42 |
| 7 | 10 | 40 | 9.5 | 40.5 | 18.5 | 45 | 17.5 | 46 |
| 8 | 9.5 | 44.5 | 9 | 45 | 17.5 | 49 | 15.5 | 50 |
| 9 | 9 | 49.5 | 8.5 | 49.5 | 15 | 53.5 | 13 | 54.5 |
| 10 | 8.5 | 54 | 8 | 54 | 14 | 57.5 | 12.5 | 58.5 |
| 11 | 8 | 58.5 | 7.5 | 59 | 13 | 62 | 54.5 | 63 |
| 12 | 7.5 | 63.5 | 7 | 61.5 | 12 | 66 | 9.5 | 67.5 |
| Einspeisung | rechts | | | | rechts | | | |
| 6 | 11.5 | 36 | 13 | 36 | 27 | 41 | 29 | 41 |
| 7 | 10 | 40 | 11.5 | 40 | 26 | 44.5 | 29 | 45 |
| 8 | 9.5 | 44.5 | 10.5 | 44.5 | 26 | 48.5 | 29.5 | 49 |
| 9 | 9.5 | 49.5 | 10 | 49.5 | 26.5 | 53 | 30.5 | 53.5 |
| 10 | 9 | 54 | 9.5 | 54 | 27.5 | 57 | 31.5 | 57.5 |
| 11 | 8.5 | 58.5 | 9.5 | 58.5 | 28.5 | 61.5 | 33 | 62 |
| 12 | 8 | 63.5 | 9.5 | 63.5 | 30 | 65.5 | 34 | 66.5 |

Tabelle 7-2 maximale Abstände von der Koordinatenachse der flächenhaften Ausdehnung in der Höhe von 0 m. Diese Werte sind für den Sammelschienenabstand von **200 mm** für 315 kVA (1a) und 630 kVA (1b).

| | Unt. 2a | | | | Unt. 2b | | | |
|--------------------|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| Einspeisung | doppelt | | | | doppelt | | | |
| Anzahl der Abgänge | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] |
| 6 | 10 | 37 | 10 | 37 | 18 | 43 | 19 | 43 |
| 7 | 9.5 | 41 | 9.5 | 41 | 15.5 | 47 | 16 | 46.5 |
| 8 | 9 | 45 | 9 | 45 | 14 | 50 | 14 | 50 |
| 9 | 8.5 | 49.5 | 8.5 | 49.5 | 13 | 54.5 | 13 | 54.5 |
| 10 | 8 | 54.5 | 8 | 54.5 | 11.5 | 58.5 | 11.5 | 58.5 |
| 11 | 7.5 | 59 | 7.5 | 59 | 10.5 | 63 | 10 | 63 |
| 12 | 7 | 64 | 7 | 63.5 | 10 | 67.5 | 9.5 | 67.5 |
| Einspeisung | mittig | | | | mittig | | | |
| 6 | 10.5 | 36.5 | 10 | 36.5 | 21.5 | 41.5 | 21 | 42.5 |
| 7 | 10 | 40.5 | 9 | 40.5 | 18 | 45.5 | 17 | 46 |
| 8 | 9.5 | 44.5 | 9 | 45 | 16 | 49 | 15.5 | 49.5 |
| 9 | 9 | 49.5 | 8.5 | 50 | 14.5 | 53.5 | 13.5 | 54 |
| 10 | 8.5 | 54 | 8 | 54.5 | 13 | 58 | 12.5 | 58.5 |
| 11 | 8 | 58.5 | 7.5 | 59 | 12 | 62.5 | 10.5 | 63 |
| 12 | 7.5 | 63.5 | 7 | 63.5 | 11 | 66.5 | 9.5 | 67 |
| Einspeisung | rechts | | | | rechts | | | |
| 6 | 11 | 36.5 | 11 | 36.5 | 22.5 | 41.5 | 24 | 41.5 |
| 7 | 9.5 | 40 | 9.5 | 40 | 19.5 | 45 | 21.5 | 45 |
| 8 | 9 | 44.5 | 9.5 | 44.5 | 17 | 49 | 19.5 | 49 |
| 9 | 9 | 49.5 | 9 | 49.5 | 14.5 | 53.5 | 18 | 53.5 |
| 10 | 8.5 | 54 | 8.5 | 54 | 13.5 | 57 | 16.5 | 57.5 |
| 11 | 8 | 59 | 8.5 | 58.5 | 12.5 | 62 | 15 | 61.5 |
| 12 | 8 | 63 | 8 | 63 | 11.5 | 66.5 | 14.5 | 65 |

Tabelle 7-3 maximale Abstände von der Koordinatenachse der flächenhaften Ausdehnung in der Höhe von 0 m. Diese Werte sind für den Sammelschienenabstand von **100 mm** für 315 kVA (1a) und 630 kVA (1b).

Zur Erfassung der maximalen Ausdehnung der magnetischen Flußdichteverteilung im 0 m Berechnungsschnitt wurden die parallel zu den Koordinatenachsen liegenden Abstände a und c, sowie b und d additiv in der Tabelle 7-5 zusammengefaßt. Die Ergebnisse sind in cm dargestellt.

| Einspeisung | | doppelt | | mittig | | rechts | |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Anzahl der Abgänge | a + c [cm] | b + d [cm] | a + c [cm] | b + d [cm] | a + c [cm] | b + d [cm] |
| | | Unt. 1b 630 kVA | 6 | 38 | 85.5 | 45.5 | 83.5 |
| 7 | 32.5 | | 93 | 36 | 91 | 55 | 89.5 |
| 8 | 29 | | 100 | 33 | 99 | 55.5 | 97.5 |
| 9 | 26.5 | | 108.5 | 28 | 108 | 57 | 106.5 |
| 10 | 23.5 | | 117.5 | 26.5 | 116 | 59 | 114.5 |
| 11 | 21 | | 125.5 | 67.5 | 125 | 61.5 | 123.5 |
| 12 | 19.5 | | 134.5 | 21.5 | 133.5 | 64 | 132 |
| Unt. 1a 315 kVA | 6 | 20 | 73 | 22 | 72.5 | 24.5 | 72 |
| | 7 | 19 | 81.5 | 19.5 | 80.5 | 21.5 | 80 |
| | 8 | 17 | 89.5 | 18.5 | 89.5 | 20 | 89 |
| | 9 | 17 | 99 | 17.5 | 99 | 19.5 | 99 |
| | 10 | 16 | 109 | 16.5 | 108 | 18.5 | 108 |
| | 11 | 15 | 118 | 15.5 | 117.5 | 18 | 117 |
| | 12 | 14.5 | 127.5 | 14.5 | 125 | 17.5 | 127 |
| Unt. 2b 630 kVA | 6 | 37 | 86 | 42.5 | 84 | 46.5 | 83 |
| | 7 | 31.5 | 93.5 | 35 | 91.5 | 41 | 90 |
| | 8 | 28 | 100 | 31.5 | 98.5 | 36.5 | 98 |
| | 9 | 26 | 109 | 28 | 107.5 | 32.5 | 107 |
| | 10 | 23 | 117 | 25.5 | 116.5 | 30 | 114.5 |
| | 11 | 20.5 | 126 | 22.5 | 125.5 | 27.5 | 123.5 |
| | 12 | 19.5 | 135 | 20.5 | 133.5 | 26 | 131.5 |
| Unt. 2a 315 kVA | 6 | 20 | 74 | 20.5 | 73 | 22 | 73 |
| | 7 | 19 | 82 | 19 | 81 | 19 | 80 |
| | 8 | 18 | 90 | 18.5 | 89.5 | 18.5 | 89 |
| | 9 | 17 | 99 | 17.5 | 99.5 | 18 | 99 |
| | 10 | 16 | 109 | 16.5 | 108.5 | 17 | 108 |
| | 11 | 15 | 118 | 15.5 | 117.5 | 16.5 | 117.5 |
| | 12 | 14 | 127.5 | 14.5 | 127 | 16 | 126 |

Tabelle 7-4 zeigt die maximalen Abstände parallel zu den Koordinatenachsen der flächenhaften Ausdehnung der durch Isolinie für 100 μ T begrenzten Fläche. Die Angaben der rechtsseitigen Einspeisung (grau hinterlegt) kennzeichnen den schlechtesten Fall.

7.4 Berechnungsergebnisse für 100 μT des orthogonalen Berechnungsschnittes für die Höhe von 1 m

In der Tabelle 7-6 und 7-7 sind die Abstände a, b, c und d der Isolinie (100 μT) des 1 m Berechnungsschnittes aufgeführt.

| | Unt. 1a | | | | Unt. 1b | | | |
|--------------------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Einspeisung | doppelt | | | | doppelt | | | |
| Anzahl der Abgänge | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] |
| 6 | 28.5 | 34.5 | 23.5 | 39.5 | 39 | 42.5 | 30.5 | 47 |
| 7 | 28.5 | 34.5 | 23.5 | 39.5 | 39 | 42.5 | 30.5 | 47 |
| 8 | 28 | 34.5 | 23 | 39.5 | 38.5 | 42 | 30 | 46.5 |
| 9 | 28 | 34.5 | 23 | 39.5 | 38 | 41.5 | 30 | 46.5 |
| 10 | 28 | 34.5 | 23 | 39 | 38 | 41.5 | 30 | 46 |
| 11 | 28 | 34.5 | 23 | 39 | 37.5 | 41 | 29.5 | 46 |
| 12 | 27.5 | 34 | 23 | 39 | 37.5 | 41 | 29.5 | 46 |
| Einspeisung | mittig | | | | mittig | | | |
| 6 | 34.5 | 31 | 34.5 | 35 | 48 | 42.5 | 48.5 | 46 |
| 7 | 34.5 | 35 | 34 | 29 | 48 | 47 | 48.5 | 39.5 |
| 8 | 34.5 | 31 | 34.5 | 34.5 | 48.5 | 44 | 49 | 45 |
| 9 | 34.5 | 36 | 34.5 | 29 | 48 | 47.5 | 49 | 39 |
| 10 | 34.5 | 32 | 34.5 | 34 | 48 | 45.5 | 49 | 44.5 |
| 11 | 34.5 | 36.5 | 34.5 | 28.5 | 48.5 | 49.5 | 49 | 39 |
| 12 | 34 | 32.5 | 34.5 | 33.5 | 48 | 47 | 49 | 44.5 |
| Einspeisung | rechts | | | | rechts | | | |
| 6 | 34 | 20 | 34.5 | 49.5 | 49 | 34 | 50 | 62 |
| 7 | 34 | 17 | 34.5 | 55 | 49.5 | 32.5 | 51 | 67.5 |
| 8 | 34 | 14 | 34.5 | 60 | 50 | 31 | 51.5 | 73 |
| 9 | 34 | 11 | 35 | 65 | 50 | 30.5 | 52 | 78.5 |
| 10 | 33.5 | 8 | 35 | 70.5 | 50 | 31 | 52.5 | 84 |
| 11 | 33.5 | 5 | 35 | 75.5 | 50 | 31 | 53 | 89.5 |
| 12 | 33.5 | 3 | 35.5 | 81 | 50.5 | 31.5 | 53.5 | 94.5 |

Tabelle 7-5 maximale Abstände von der Koordinatenachse der flächenhaften Ausdehnung in der Höhe von 1 m. Diese Werte sind für den Sammelschienenabstand von **200 mm** für 315 kVA (1a) und 630 kVA (1b).

| | Unt. 2a | | | | Unt. 2b | | | |
|--------------------|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| Einspeisung | doppelt | | | | doppelt | | | |
| Anzahl der Abgänge | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] | a [cm] | b [cm] | c [cm] | d [cm] |
| 6 | 29 | 35 | 23.5 | 39.5 | 39.5 | 43 | 31 | 47 |
| 7 | 28.5 | 35 | 23.5 | 39.5 | 39.5 | 42.5 | 30.5 | 47 |
| 8 | 28.5 | 34.5 | 23.5 | 39.5 | 39.5 | 42.5 | 30.5 | 47 |
| 9 | 28.5 | 34.5 | 23.5 | 39.5 | 39 | 42.5 | 30.5 | 47 |
| 10 | 28.5 | 34.5 | 23.5 | 39.5 | 39 | 42 | 30.5 | 46.5 |
| 11 | 28.5 | 34.5 | 23.5 | 39.5 | 39 | 42.5 | 30.5 | 46.5 |
| 12 | 28.5 | 34.5 | 23 | 39.5 | 38.5 | 42 | 30.5 | 46.5 |
| Einspeisung | mittig | | | | mittig | | | |
| 6 | 34.5 | 30.5 | 34 | 35 | 49 | 42.5 | 49 | 47 |
| 7 | 34.5 | 35 | 34.5 | 30 | 49 | 47 | 48.5 | 40.5 |
| 8 | 34.5 | 30.5 | 34.5 | 35 | 49 | 42.5 | 49 | 46 |
| 9 | 34.5 | 35.5 | 34 | 29.5 | 49 | 47.5 | 49 | 40 |
| 10 | 34.5 | 31 | 34.5 | 35 | 48.5 | 43.5 | 49 | 46 |
| 11 | 34.5 | 36 | 34.5 | 29.5 | 48.5 | 48 | 49 | 40 |
| 12 | 34.5 | 31.5 | 34.5 | 34.5 | 49 | 44 | 49 | 45 |
| Einspeisung | rechts | | | | rechts | | | |
| 6 | 34 | 18.5 | 34.5 | 49 | 49 | 31 | 49.5 | 61.5 |
| 7 | 34 | 14 | 34.5 | 54 | 49 | 27.5 | 50 | 66 |
| 8 | 34 | 9.5 | 34.5 | 59 | 49 | 24 | 50 | 71.5 |
| 9 | 34 | 5.5 | 34.5 | 64.5 | 49 | 21 | 50.5 | 76.5 |
| 10 | 33.5 | 1 | 34.5 | 69.5 | 49 | 17.5 | 50.5 | 82 |
| 11 | 33.5 | -3.5 | 34.5 | 75 | 48.5 | 15 | 50 | 87.5 |
| 12 | 33.5 | -8 | 34.5 | 79.5 | 49 | 12 | 51 | 92 |

Tabelle 7-6 maximale Abstände von der Koordinatenachse der flächenhaften Ausdehnung in der Höhe von 1 m. Diese Werte sind für den Sammelschienenabstand von **100 mm** für 315 kVA (1a) und 630 kVA (1b).

Zur Erfassung der maximalen Ausdehnung der magnetischen Flußdichteverteilung im 1 m Berechnungsschnitt wurden die parallel zu den Koordinatenachsen liegenden Abstände a und c, sowie b und d additiv in der Tabelle 7-8 zusammengefaßt. Die Ergebnisse sind in cm dargestellt.

| Einspeisung | | doppelt | | mittig | | rechts | |
|--------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Anzahl der Abgänge | | | | | | |
| | | a + c [cm] | b + d [cm] | a + c [cm] | b + d [cm] | a + c [cm] | b + d [cm] |
| Unt. 1b 630 kVA | 6 | 69.5 | 89.5 | 96.5 | 88.5 | 99 | 96 |
| | 7 | 69.5 | 89.5 | 96.5 | 86.5 | 100.5 | 100 |
| | 8 | 68.5 | 88.5 | 97.5 | 89 | 101.5 | 104 |
| | 9 | 68 | 88 | 97 | 86.5 | 102 | 109 |
| | 10 | 68 | 87.5 | 97 | 90 | 102.5 | 115 |
| | 11 | 67 | 87 | 97.5 | 88.5 | 103 | 120.5 |
| | 12 | 67 | 87 | 97 | 91.5 | 104 | 126 |
| Unt. 1a 315 kVA | 6 | 52 | 74 | 69 | 66 | 68.5 | 69.5 |
| | 7 | 52 | 74 | 68.5 | 64 | 68.5 | 72 |
| | 8 | 51 | 74 | 69 | 65.5 | 68.5 | 74 |
| | 9 | 51 | 74 | 69 | 65 | 69 | 76 |
| | 10 | 51 | 73.5 | 69 | 66 | 68.5 | 78.5 |
| | 11 | 51 | 73.5 | 69 | 65 | 68.5 | 80.5 |
| | 12 | 50.5 | 73 | 68.5 | 66 | 69 | 84 |
| Unt. 2b 630 kVA | 6 | 70.5 | 90 | 98 | 89.5 | 98.5 | 92.5 |
| | 7 | 70 | 89.5 | 97.5 | 87.5 | 99 | 93.5 |
| | 8 | 70 | 89.5 | 98 | 88.5 | 99 | 95.5 |
| | 9 | 69.5 | 89.5 | 98 | 87.5 | 99.5 | 97.5 |
| | 10 | 69.5 | 88.5 | 97.5 | 89.5 | 99.5 | 99.5 |
| | 11 | 69.5 | 89 | 97.5 | 88 | 98.5 | 102.5 |
| | 12 | 69 | 88.5 | 98 | 89 | 100 | 104 |
| Unt. 2a 315 kVA | 6 | 52.5 | 74.5 | 68.5 | 65.5 | 68.5 | 67.5 |
| | 7 | 52 | 74.5 | 69 | 65 | 68.5 | 68 |
| | 8 | 52 | 74 | 69 | 65.5 | 68.5 | 68.5 |
| | 9 | 52 | 74 | 68.5 | 65 | 68.5 | 70 |
| | 10 | 52 | 74 | 69 | 66 | 68 | 70.5 |
| | 11 | 52 | 74 | 69 | 65.5 | 68 | 71.5 |
| | 12 | 51.5 | 74 | 69 | 66 | 68 | 71.5 |

Tabelle 7-7 zeigt die maximalen Abstände parallel zu den Koordinatenachsen der flächenhaften Ausdehnung der durch Isolinie für 100 μ T begrenzten Fläche. Die Angaben der rechtsseitigen Einspeisung (grau hinterlegt) kennzeichnen den schlechtesten Fall.

7.5 Mittelwerte der Optimierungsmaßnahmen an der NVT für 100 μT in der Höhe von 0.5 m

Die arithmetischen Mittelwerte wurden für die Anzahl der Abgänge 6 bis 12 zur vereinfachten Bewertung der einzelnen Optimierungsmaßnahmen gebildet.

| Einspeisung | | doppelt | mittig | rechts | |
|--------------------|------------|--|--------|--------|--|
| | | | | | |
| | | Anteil des Flächeninhalts [%] der Referenzfläche | | | |
| Unt. 1a 315 kVA | Mittelwert | 40.4 | 63.6 | 100.0 | |
| Unt. 2a 315 kVA | Mittelwert | 37.0 | 56.0 | 77.0 | |
| Unt. 1b 630 kVA | Mittelwert | 38.2 | 61.8 | 100.0 | |
| Unt. 2b 630 kVA | Mittelwert | 35.2 | 54.6 | 76.9 | |

Tabelle 7-8 Mittelwerte nach den Optimierungsmaßnahmen der Summenabstände in Prozent.

| Einspeisung | | doppelt | | mittig | | rechts | |
|--------------------|------------|--|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | | | | | |
| | | Anteil des Summenabstandes [%] vom Referenzabstand | | | | | |
| | | a + c | b + d | a + c | b + d | a + c | b + d |
| Unt. 1a 315 kVA | Mittelwert | 44.4 | 87.1 | 72.0 | 89.6 | 100.0 | 100.0 |
| Unt. 2a 315 kVA | Mittelwert | 41.5 | 86.8 | 67.0 | 86.6 | 84.4 | 94.4 |
| Unt. 1b 630 kVA | Mittelwert | 43.9 | 82.4 | 72.5 | 85.0 | 100.0 | 100.0 |
| Unt. 2b 630 kVA | Mittelwert | 43.3 | 82.1 | 70.4 | 81.7 | 85.8 | 91.8 |

Tabelle 7-9 Mittelwerte nach den Optimierungsmaßnahmen der Summenabstände in Prozent.

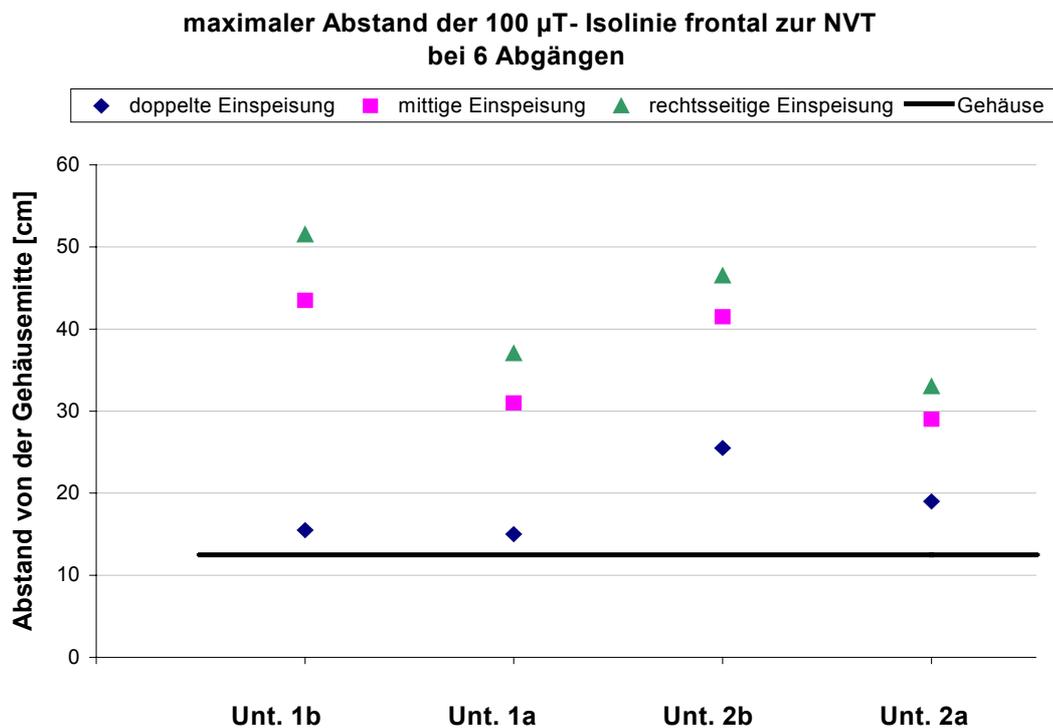
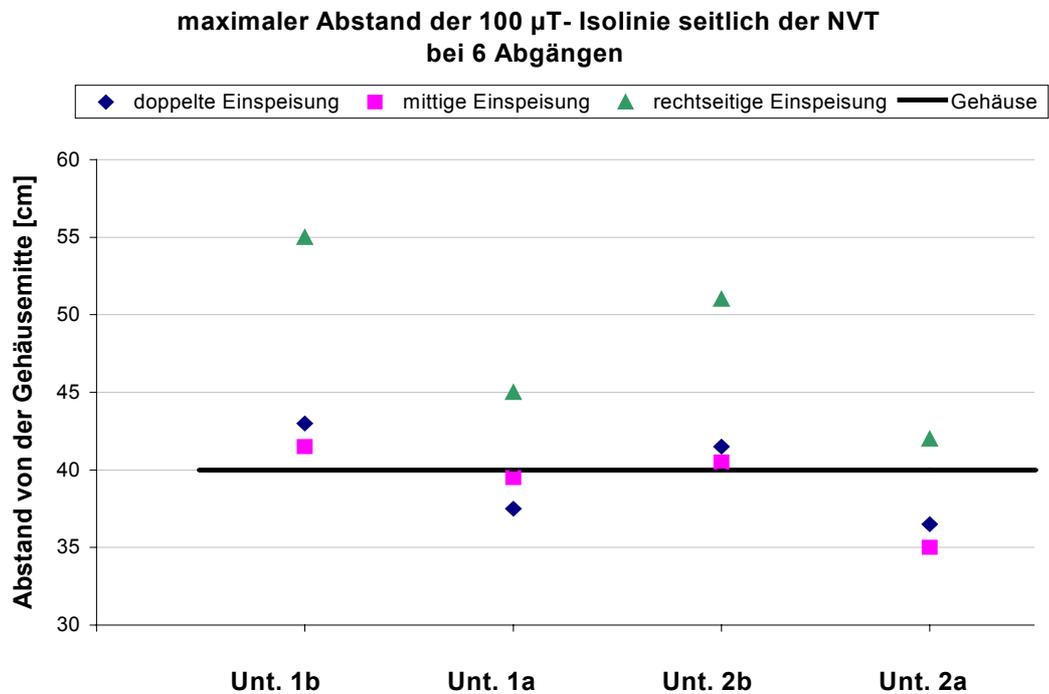
| Einspeisung | | doppelt | mittig | rechts |
|--|--------------------|--|--------|--------|
| | Anzahl der Abgänge | Anteil des Flächeninhalts [%] der Referenzfläche | | |
| Unt. 1a 315 kVA u. 200 mm SS- Abstand | 6 | 47.7 % | 68.2 % | 100 % |
| | 7 | 40.4 % | 63.5 % | 100 % |
| | 8 | 38.3 % | 63.3 % | 100 % |
| | 9 | 37.3 % | 62.7 % | 100 % |
| | 10 | 38.7 % | 62.7 % | 100 % |
| | 11 | 39.0 % | 62.2 % | 100 % |
| Unt. 2a 315 kVA u. 100 mm SS- Abstand | 6 | 45.5 % | 61.4 % | 79.5 % |
| | 7 | 38.5 % | 57.7 % | 78.8 % |
| | 8 | 35.0 % | 56.7 % | 76.7 % |
| | 9 | 34.3 % | 55.2 % | 76.1 % |
| | 10 | 34.7 % | 54.7 % | 76.0 % |
| | 11 | 35.4 % | 53.7 % | 75.6 % |
| | 12 | 36.0 % | 52.8 % | 76.4 % |

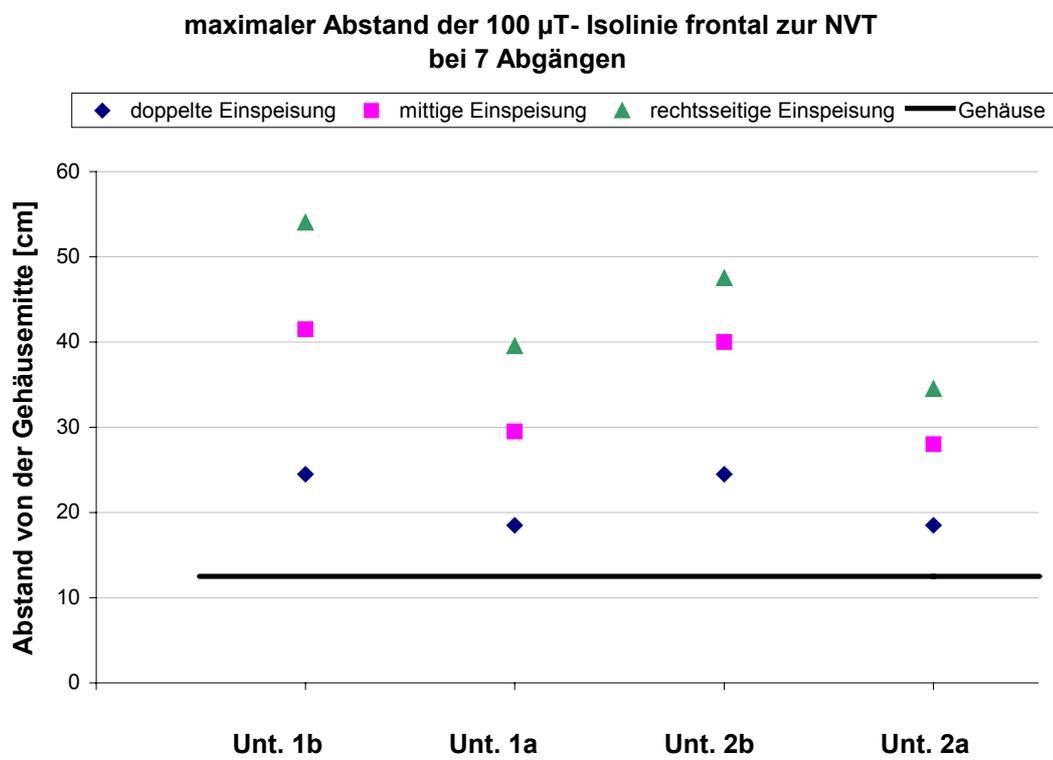
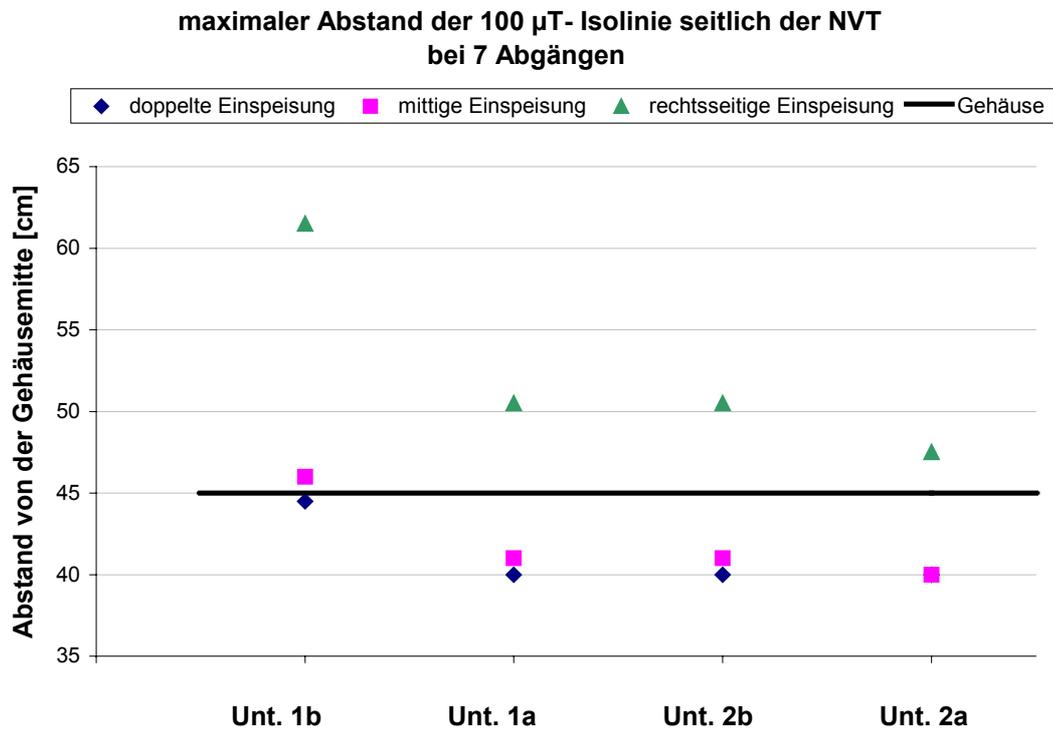
Tabelle 7-10 zeigt die Minimierung der Ausdehnung der Flächeninhalte in Prozent für 315 kVA.

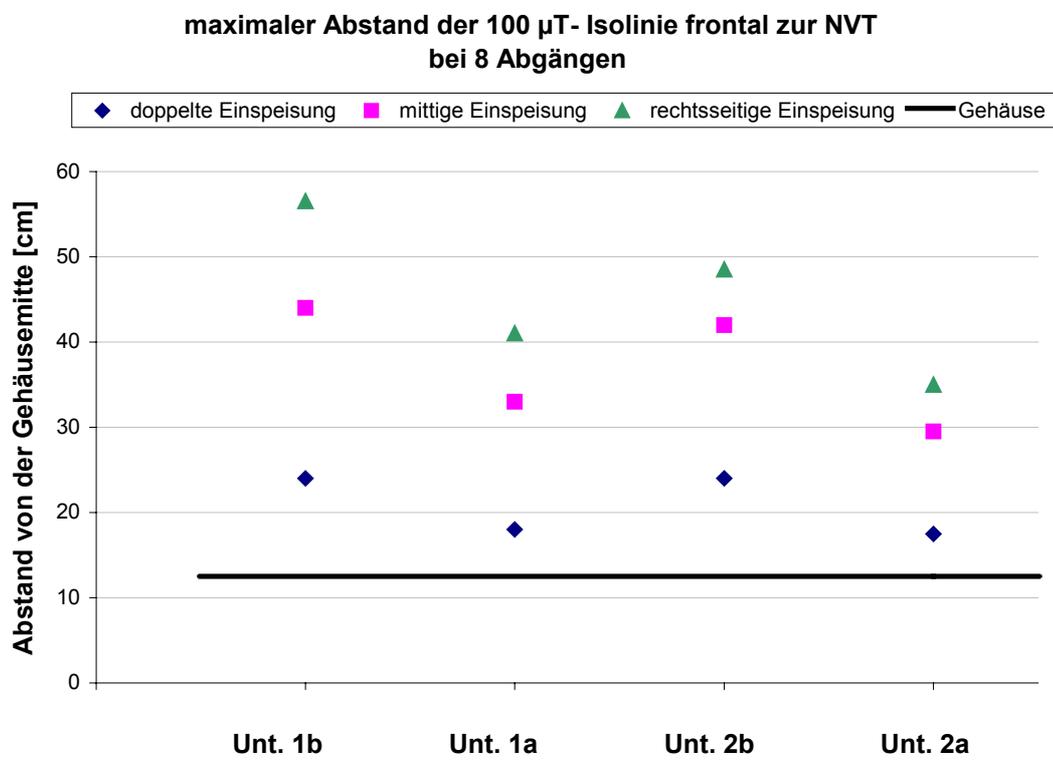
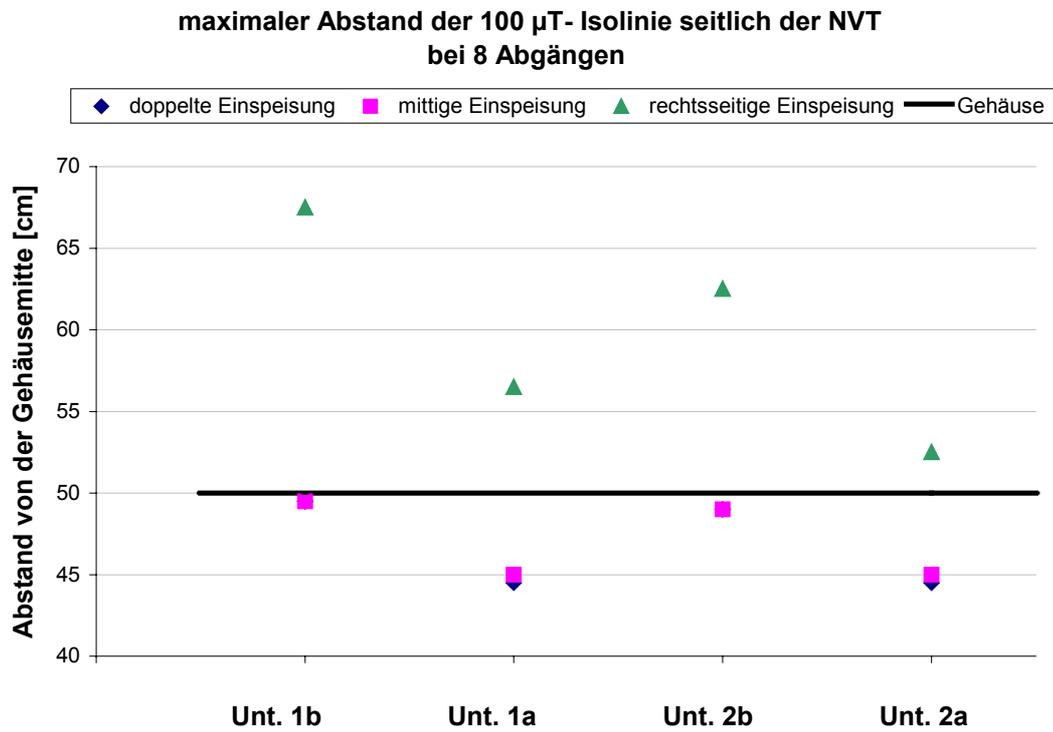
| Einspeisung | | doppelt | mittig | rechts |
|--|--------------------|--|--------|--------|
| | Anzahl der Abgänge | Anteil des Flächeninhalts [%] der Referenzfläche | | |
| Unt. 1b 630 kVA u. 200 mm SS- Abstand | 6 | 46.8 % | 67.5 % | 100 % |
| | 7 | 37.1 % | 60.7 % | 100 % |
| | 8 | 34.7 % | 62.4 % | 100 % |
| | 9 | 34.8 % | 59.8 % | 100 % |
| | 10 | 36.6 % | 61.0 % | 100 % |
| | 11 | 37.8 % | 60.0 % | 100 % |
| Unt. 2b 630 kVA u. 100 mm SS- Abstand | 6 | 45.5 % | 62.3 % | 80.5 |
| | 7 | 37.1 % | 56.2 % | 78.7 |
| | 8 | 33.7 % | 55.4 % | 77.2 |
| | 9 | 32.1 % | 52.7 % | 76.8 |
| | 10 | 32.5 % | 52.8 % | 75.6 |
| | 11 | 32.6 % | 51.1 % | 74.8 |
| | 12 | 32.9 % | 51.4 % | 74.7 |

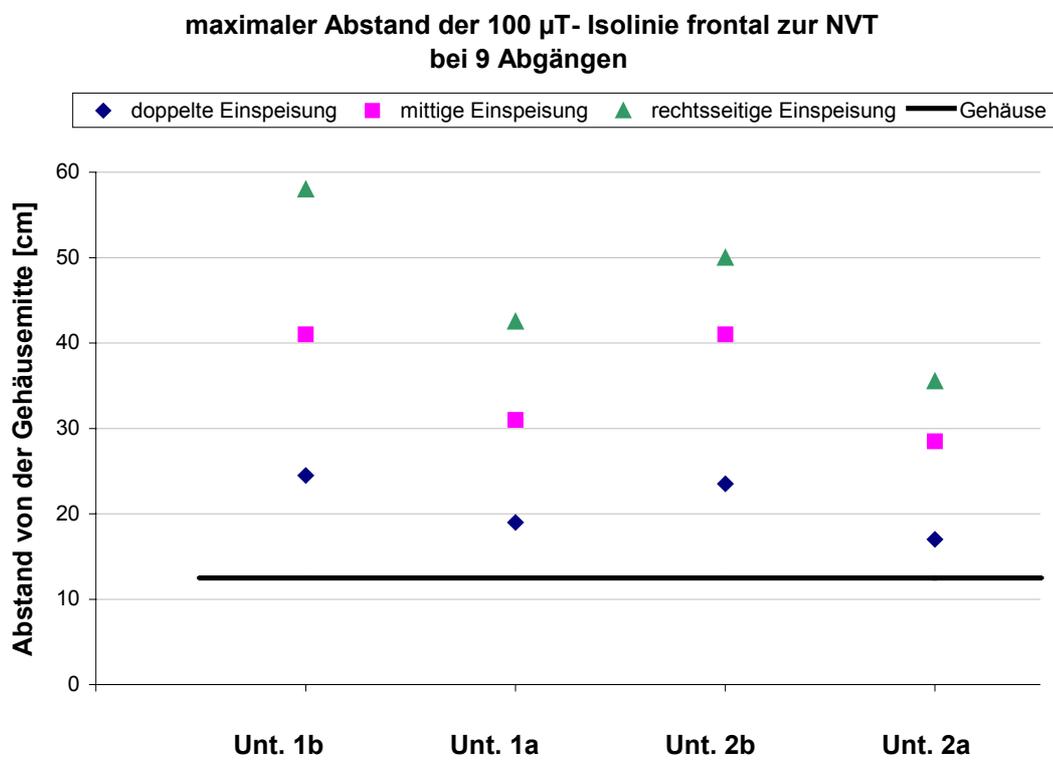
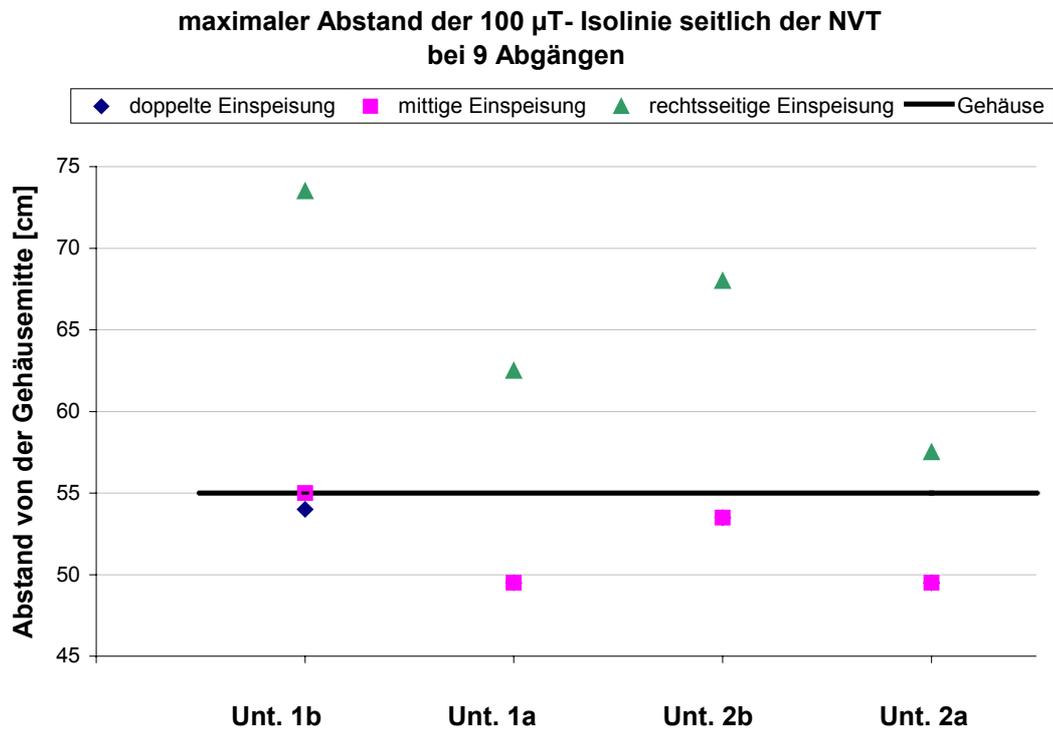
Tabelle 7-11 zeigt die Minimierung der Ausdehnung der Flächeninhalte in Prozent für 630 kVA.

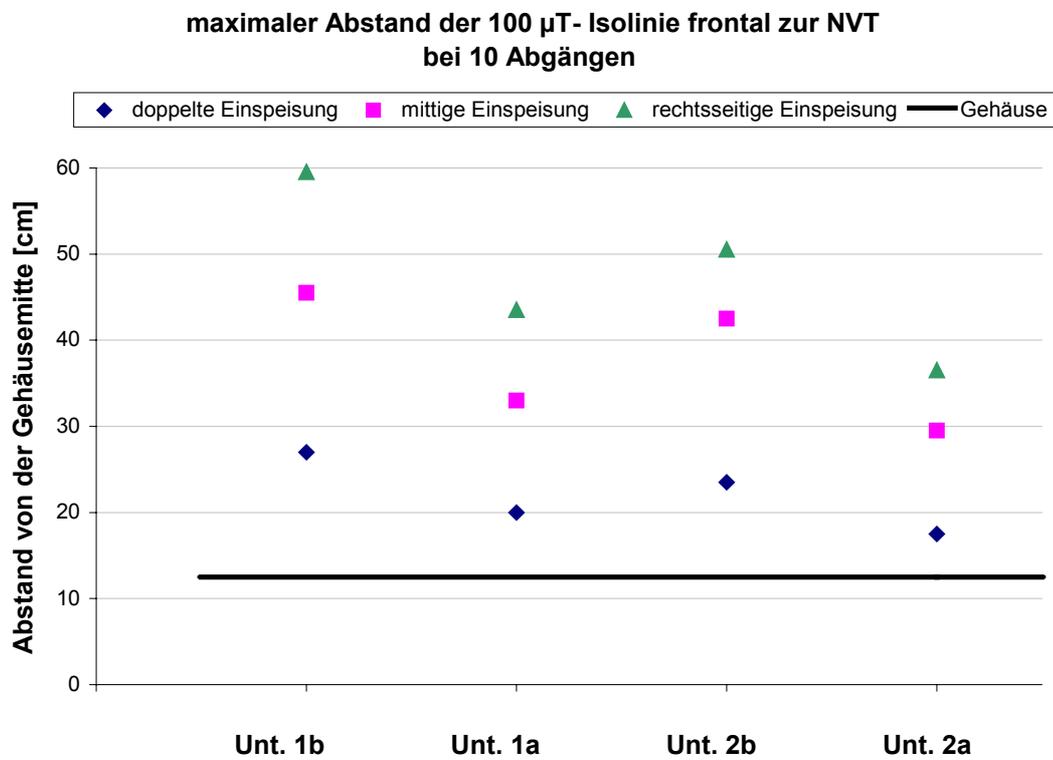
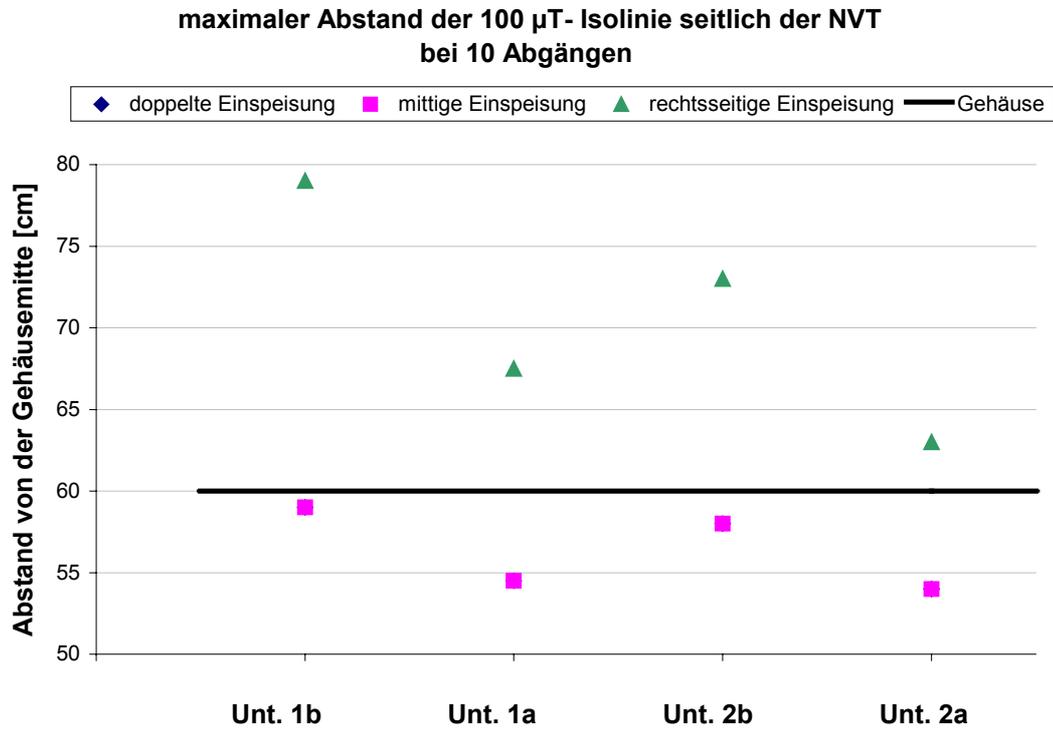
7.6 Maximalabstände der 100 μ T- Isolinie an der NVT

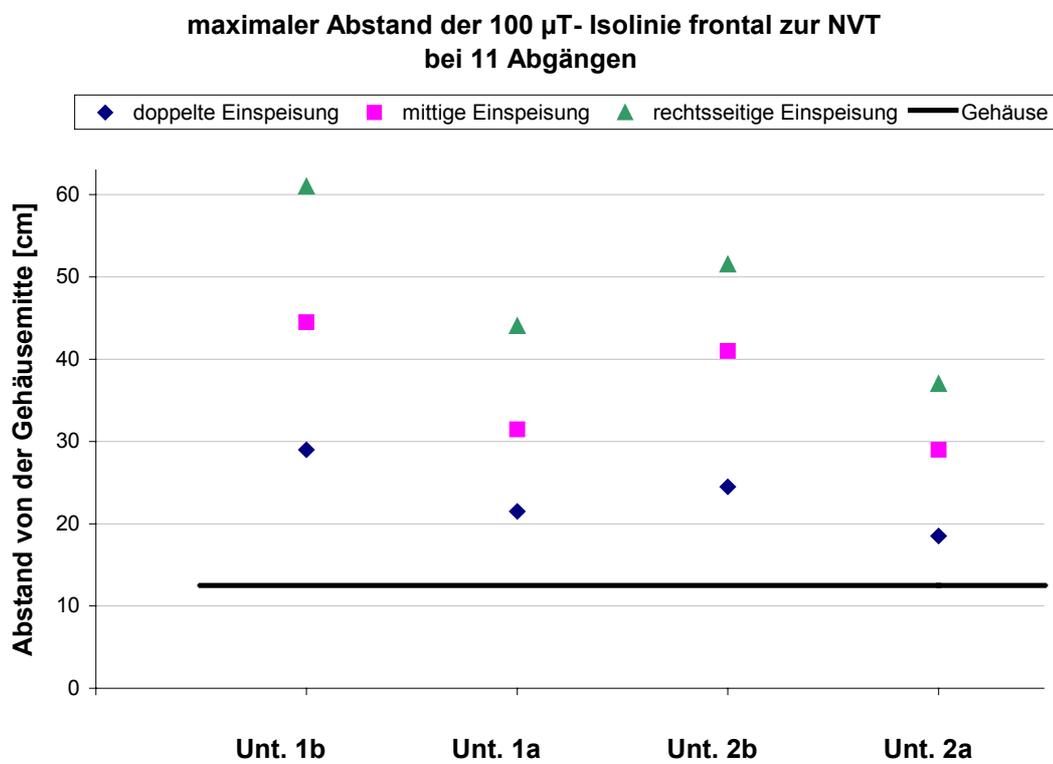
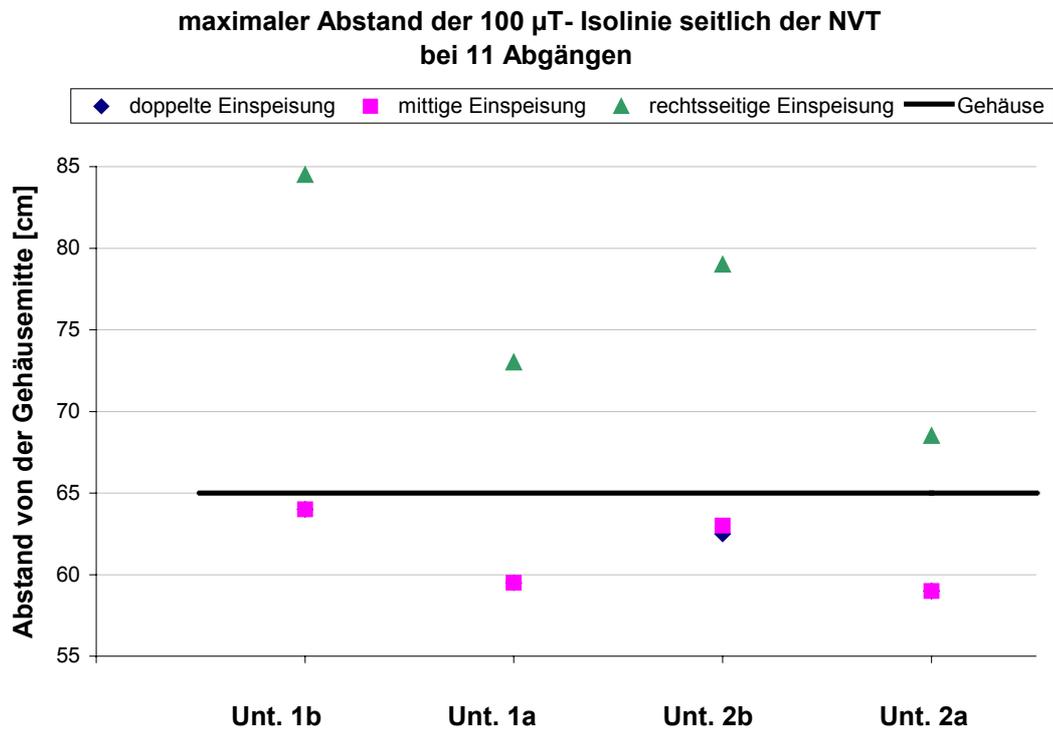












8 Abkürzungen und Formelzeichen

| Abk. o. Formelzeichen | Bezeichnung | Einheit |
|-----------------------|---|----------------------------|
| S | Leistung | VA |
| U | Spannung | V |
| I | Stromstärke | A |
| B | magnetische Flußdichte | Vs/m ² |
| μ_0 | magnetische Feldkonstante | $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am |
| μ_r | relative Permeabilitätszahl | |
| H | magnetische Feldstärke | A/m |
| h | Plancksche Strahlungskonstante | $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js |
| f | Frequenz | s ⁻¹ |
| F | Vektorfeld | |
| ΔV | Volumenelement | m ³ |
| ΔA | Flächenelement | m ² |
| dA | infinitesimales Flächenelement | |
| ds | infinitesimales Wegelement | |
| δ | Eindringtiefe | m |
| κ | spez. elektr. Leitfähigkeit | Sm/mm ² |
| P _{Verlust} | Wirbelstromverluste | W |
| EMF | Elektromagnetische Felder | |
| ICNIRP | International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection | |
| BImSchV | Bundes- Immissionschutzverordnung | |
| E _{elm} | Energie elektromagnetischer Wellen | |
| SAR | spezifische Absorptionsrate | |
| IRPA | International Radiation Protection Association | |
| INIRC | International Non-Ionizing Radiation Committee | |
| BGV | Berufsgenossenschaftliche Vorschrift | |
| NVT | Niederspannungsverteilung | |

9 Literaturverzeichnis

- [1] *Purcell, Edward M.*; Elektrizität und Magnetismus
(Berkeley Physik Kurs 2, 4. Auflage, Vieweg Verlag)
- [2] *von Weiss, Alexander*; Die elektromagnetischen Felder
(Einführung in die Feldtheorie, Vieweg-Verlag)
- [3] *Edminister, E. Joseph*; Elektromagnetismus
(Theorie und Anwendung, McGRAW-HILL Book Company)
- [4] *Asea Brown Boveri Taschenbuch*; Schaltanlagen (9. Auflage)
- [5] *Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus Dieter*; Elektrische Energieversorgung
(Vieweg Verlag, 4. Auflage)
- [6] *Habiger, Ernst*; Elektromagnetische Verträglichkeit (Hüthig-Verlag)
- [7] *Lautz, G.*; Elektromagnetische Felder (B. G. Teubner, Stuttgart 1985)
- [8] *Hilgarth, Günther*; Hochspannungstechnik
(B. G. Teubner, Stuttgart 1997, 3. Auflage)
- [9] *Kohlig, Anton*; EMV von Gebäuden, Anlagen und Geräten (VDE-Verlag)
- [10] *Knies, Wilfried / Schierack, Klaus*; Elektrische Anlagentechnik
- [11] *Pundt, H.*; Elektroenergiesysteme, Wissenspeicherheft (TU Dresden)
- [12] *Gester / Schmidt*; Starkstromanlagen (Verlag Technik Berlin)
- [13] *HÜTTE e.V.*; Elektrische Energietechnik (Springer-Verlag)
- [14] Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder
(26. Bundes- Immissionsschutzverordnung)

-
- [15] *Brinkmann, Karl / Kärner, Hermann C. / Schaefer Hans*; Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme Bd. 4 (Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme in schwachen 50-Hz-Feldern), (VDE-Verlag)
- [16] *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*; Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (bis 300 GHz)
- [17] Projektierungshinweise, Gasisolierte Ringkabelschaltanlage FB bis 36 kV, Fa. ALSTOM
- [18] Kundenkatalog HA 45.31 (1999) 8DJ20 Lasttrennschalteranlagen bis 24kV, SF₆-isoliert, Fa. SIEMENS AG
- [19] Kundenkatalog ZS8 Luftisolierte Mittelspannungsschaltanlagen, Fa. ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH
- [20] *Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus Dieter*; Elektrische Energieversorgung (Vieweg Verlag, 3. Auflage)
- [21] *Hadrian, W.*; Elektrotechnik und Informationstechnik, 115. Jg. (1998), H. 9 „Entfernungsgesetze in der Energietechnik“
- [22] *Schwab, Adolf J.*; Begriffswelt der Feldtheorie (Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 5. Auflage)
- [23] *31. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG –mit ihr leben in Arbeit und Umwelt-* (Band 1 und 2) (TÜV - Verlag GmbH Köln)
- [24] Jeromin, Gerd; Kommentar zur 2. Neufassung des deutschen EMV- Gesetzes (EMC Journal Bibliothek)
- [25] **WienField® - Magnetic and Electric Field Calculation**
(R)WinField is a registered trademark of FGEU mbH

- [26] *Bauhofer, Peter*; Handbuch für Hochspannungsleitungen
(niederfrequente Elektromagnetische Felder und deren wirksame Reduktion),
Verband der Elektrizitätswerke Österreichs 1994

- [27] *Henschel, M./ Veuhoff, F. W.*; ELKTRIE, Berlin 51 (1997) 11/12
„Die Berücksichtigung der elliptischen Felder in der DIN 0848 und
der 26. BImSch-Verordnung“

- [28] *Philippow*; Grundlagen der Elektrotechnik
(VEB VERLAG TECHNIK, 8. bearbeitete Auflage)

- [29] Kundenkatalog Netzstationen Peters & Thieding Hochspannungstechnik GmbH

Erklärung zur Diplomarbeit:

Ich versichere, daß ich

meine Diplomarbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Stephan Kupke

Berlin, den 18. 02. 2000