

# Magnetische Flussdichte an Stationen aktueller Bauart

im Studiengang: Elektrotechnik

an der

Hochschule für Technik  
und Wirtschaft Berlin

vorgelegt von

Bernt Zimmer

Berlin, 24.07.2009

# Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Fachbereich 1-Ingenieurwissenschaften I

---

## Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit Sommersemester 2009

im Studiengang Elektrotechnik

Name des Studenten: Bernt Zimmer

Matrikel-Nr.: 518469

DA-Nr.: B SS09 ET 21

Thema der Bachelorarbeit:

**Magnetische Flussdichte an Stationen aktueller Bauart**

Betreuer:	Prof. Dr. Langner
Ausgehändigt am:	29.05.09
Einzureichen am:	29.05.09

A. Rappachien  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Langner  
Betreuer

Die Prüfungskommission besteht aus:	
1. Gutachter:	Prof. Dr. Langner
2. Gutachter:	Prof. Dr. Röllig
Vorsitzende/r:	Prof. Dr. Langner

*Anmerkung:*

*Unmittelbar zu Beginn der Bearbeitung ist unbedingt mit dem Erstgutachter Kontakt aufzunehmen!*

Thema erhalten: Bernt Zimmer

Berlin 2009, © Copyright FGEU mbH

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

**Inhalt:**

1	Einleitung -----	1
2	Grundlagen -----	2
2.1	Rechtliche Grundlagen -----	2
2.1.1	26. BImSchV -----	2
2.1.2	BGV B11 -----	4
2.2	Berechnungsgrundlagen -----	6
2.2.1	Maxwell'sche Gleichungen -----	6
2.2.2	Biot-Savart -----	9
2.3	Mittelspannungsschaltanlagen nach DIN VDE -----	11
2.3.1	Schaltfelder nach DIN VDE 0101 -----	11
2.3.2	Metallgekapselte Schaltfelder nach DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200) -----	12
3	Netzstationen -----	14
3.1	Aufgaben und Einsatzgebiete vom Netzstationen -----	15
3.2	Komponenten einer Netzstation -----	15
3.2.1	Transformatoren -----	15
3.2.2	Mittelspannungsschaltanlagen -----	16
3.2.3	Niederspannungsverteilungen -----	19
4	Maßnahmen zur magnetischen Feldreduzierung -----	19
4.1	Primäre Maßnahmen -----	20
4.1.1	Abstandsreduzierung stromführender Leitungen verschiedener Phasenlage -----	20
4.1.2	Symmetrierung der Leiteranordnung -----	21
4.1.3	Phase Splitting -----	22
4.1.4	Symmetrierung der Einspeisung -----	22
4.2	Sekundäre Maßnahmen -----	22
4.2.1	Schirmung mittels leitfähiger Platten -----	22
4.2.2	Schirmung mittels hochpermeabler Platten -----	23
4.3	bauliche und planungstechnische Maßnahmen -----	23
4.3.1	Vergrößerung des Abstandes zum Immissionsort -----	23
4.3.2	Einsatz von Sicherungen zur Strombegrenzung -----	24
4.3.3	Einsatz von Transformatoren kleinerer Leistung zur Strombegrenzung -----	24

### III

5	Magnetische Flussdichte an Stationen aktueller Bauart-----	24
5.1	Vorbetrachtung-----	24
5.2	WinField® Programmbeschreibung-----	25
5.3	Beschreibung der Herangehensweise-----	27
5.4	Aufnahme der Magnetischen Flussdichten-----	30
5.4.1	Station 01-----	30
5.4.2	Station 02-----	32
5.4.3	Station 03-----	34
5.4.4	Station 04-----	36
5.4.5	Station 05-----	38
5.4.6	Station 06-----	40
5.4.7	Station 07-----	42
5.4.8	Station 08-----	44
5.4.9	Station 09-----	46
5.4.10	Station 10-----	48
5.4.11	Station 11-----	50
5.4.12	Station 12-----	52
5.4.13	Station 13-----	54
5.4.14	Station 14-----	56
5.4.15	Station 15-----	58
5.4.16	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse-----	60
6	Zusammenfassung-----	61
6.1	Auswertung-----	61
6.2	Ausblick-----	63
7	Abkürzungen-----	63
8	Formelzeichen-----	64
9	Tabellen- und Bilderverzeichnis-----	65
10	Anhang-----	70
11	Literaturverzeichnis-----	92

## 1 Einleitung

Durch die fortschreitende Entwicklung und Verbreitung elektrischer Systeme werden die elektrischen Übertragungs- und Verteilersysteme immer weiter ausgebaut. In dieser Entwicklung werden auch immer mehr Netzstationen zur Verteilung der Energie zum Endverbraucher errichtet. Auch werden in Großstädten immer mehr Hochhäuser gebaut, die eine eigene Netzstation benötigen, da ihre Abnahmeleistung die vorhandenen örtlichen Netzstationen überlasten würde. Dies führt dazu, dass die Bevölkerung immer häufiger magnetischen Feldern, die von diesen Netzstationen ausgehen, ausgesetzt sind. Da eine schädliche Wirkung dieser Felder auf Organismen und elektrische Geräte nicht ausgeschlossen werden kann, ist es sinnvoll, die Netzstationen so zu planen und zu errichten, dass die Ausbreitung und Stärke der elektromagnetischen Felder minimiert wird. In vielen Ländern ist dies durch Gesetze und Verordnungen mit bestimmten, einzuhaltenden Grenzwerten geregelt.

In dieser Arbeit werden Netzstationen, die in den letzten drei Jahren (2007 - 2009) geplant wurden, auf ihre magnetische Exposition untersucht. Dies hat den Zweck der Beurteilung, inwieweit aktuelle Netzstationen nach EMVU-Gesichtspunkten geplant und errichtet werden, und ob die Optimierungspotenziale hinsichtlich der Ausbreitung der magnetischen Felder bei der Planung und Errichtung von Netzstationen ausgereizt sind.

Die vorliegende Arbeit wurde bei der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH (FGEU mbH) angefertigt. Die primären Aufgaben der FGEU mbH sind die Forschung, Analyse und Informationsvermittlung auf dem Umweltsektor, sowie die Entwicklung und Vertrieb der innovativen Berechnungssoftware WinField® -Electric and Magnetic Field Calculation (im folgendem nur noch als WinField® bezeichnet). Mittels dieser Software ist eine bedienerfreundliche geometrische Nachbildung und Berechnung von nahezu allen elektrischen Hochfrequenz- und Niederfrequenzanlagen, von einfachen Schaltanlagen bis hin zu komplexen Freileitungsgebilden im Bereich der EMVU möglich. Mit der Software WinField® gibt die FGEU mbH den Planern bzw. Prüfern von elektrischen Anlagen ein gutes Werkzeug zur Überprüfung der elektrischen und magnetischen Felder in die Hand.

Die in dieser Arbeit verwendete Bezeichnung Mittelspannung ist kein genormter Begriff. Da sie aber allgemein für den Spannungsbereich von 1 kV bis 52 kV verstanden wird, wird diese Bezeichnung genutzt und im Folgendem mit MS abgekürzt. Niederspannung bezeichnet alle Spannungen unter 1000 V. In dieser Arbeit wird diese Bezeichnung für die Spannungsebene 0,4 kV bei einer Frequenz von 50 Hz verwendet und mit NS abgekürzt.

## **2 Grundlagen**

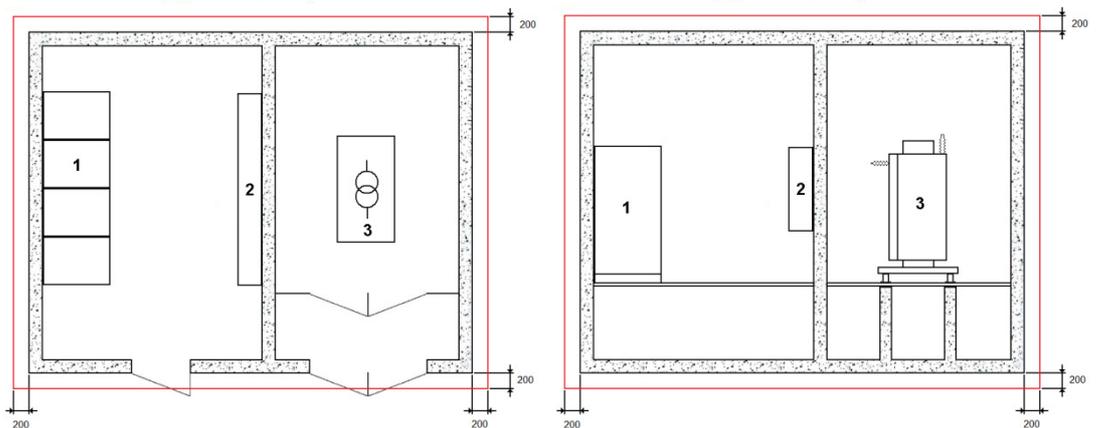
### **2.1 Rechtliche Grundlagen**

Da eine schädliche Wirkung magnetischer und elektrischer Felder auf den menschlichen Körper nicht ausgeschlossen werden kann, sind in Deutschland und vielen anderen Ländern der Welt Verordnungen erlassen worden. Diese Verordnungen beinhalten Richtlinien und Richtwerte, die überwiegend konservativ gewählt sind, um die Bevölkerung vor zu starker Belastung und möglichen Langzeitschäden zu schützen. Die für Deutschland relevanten Verordnungen für den Schutz von Personen vor elektromagnetischen Feldern sind die 26. BImSchV und die BGV B11, wobei die 26. BImSchV die Rechtsgrundlage für Schutz der Allgemeinheit und die BGV B11 für Arbeitnehmer darstellt.

#### **2.1.1 26. BImSchV**

Die sechszwanzigste Bundes-Immissionsschutzverordnung (26. BImSchV) wurde am 16. Dezember 1996 vom Bundesrat verabschiedet und trat am 1. Januar 1997 in Kraft. Sie dient dazu, die umliegende Bevölkerung vor erhöhten Expositionen von elektrischen und magnetischen Feldern von elektrischen Anlagen zu schützen. Die 26. BImSchV ist an die internationale Empfehlung der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) angelehnt und übernimmt deren Grenzwerte für die Exposition der Bevölkerung, wobei die Grenzwerte so gewählt wurden, dass eine Gefährdung der Bevölkerung ausgeschlossen werden kann. Diese Verordnung gilt für alle gewerblich genutzten Niederfrequenzanlagen mit einer Spannung von mehr als 1000 V bei 50 Hz und 16,7 Hz (Bahnstrom)

und stationären Hochfrequenzanlagen mit einer Sendeleistung von mehr als 10 W im Frequenzbereich von 10 – 300.000 MHz, die nach Inkrafttreten dieser Verordnung errichtet oder signifikant verändert wurden. Die vorgegebenen Grenzwerte (siehe Tab. 2-1 und Tab. 2-2) sind an allen Orten einzuhalten, die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind (z. B. Wohngebäude, Arbeitsstätten) und an schutzwürdigen Einrichtungen (z. B. Krankenhäuser, Kindergärten, Schulen usw.), und zusätzlich für Elektromsppannanlagen im Abstand von 20 cm von der von außen berührbaren und zugänglichen Oberfläche. Dieses gilt auch für den Bereich über und unter der Station, d. h. dass auch über und unter der Station die Grenzwerte eingehalten werden müssen, wenn diese Orte nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt oder schutzwürdige Einrichtungen sind. Diese Bezugsebenen sind rot in Abbildung 2-1 dargestellt.



**Abb. 2-1:** Bezugsebenen für Rechenwerte einer Elektromsppannanlage Drauf- und Seitenansicht (1: MS-Schaltanlage 2: NS-Verteilung 3: Transformator)

Orte, die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind, sind Orte, an denen eine einzelne Person eine längere Verweildauer (mehrere Stunden) hat. Unter Einwirkungsbereich ist bei Umspannanlagen / Unterwerken ein an die jeweilige Anlage angrenzender Streifen von 5 m Breite zu verstehen. Bei Ortsnetzstationen / Netzstationen ist dagegen ein unmittelbar an die Einhausung angrenzender Streifen mit einer Breite von 1 m anzusetzen [20]. Bereiche, bei denen sich der Einwirkungsbereich einer Anlage und ein Ort, der nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt bzw. eine schutzwürdige Einrichtung ist, überschneiden, werden als maßgebliche Immissionsorte bezeichnet.

Die 26. BImSchV fordert die Berechnung bzw. Messung der Bezugsebenen bei höchster Anlagenauslastung und ungünstigster Stromverteilung. Eine Berücksichtigung von Oberwellen und unsymmetrischer Last ist nicht gefordert, da dieses durch die Forderung nach höchster Anlagenauslastung mit abgedeckt ist. Eine Überschreitung der Grenzwerte im Fehlerfall (Kurzschluss, Erdschluss) ist nicht untersagt, d. h. die Grenzwerte gelten für die maximal mögliche Auslastung im normalen Anlagenbetrieb.

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	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$
2000-30000	61	0,16

**Tab. 2-1:** Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen nach Anhang 1 der 26. BImSchV [18]

Frequenz (Hz)	Effektivwert der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte	
	Elektrische Feldstärke (kV/m)	Magnetische Flussdichte ( $\mu$ T)
50	5	100
$16^{2/3}$	10	300

**Tab. 2-2:** Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen nach Anhang 2 der 26. BImSchV [18]

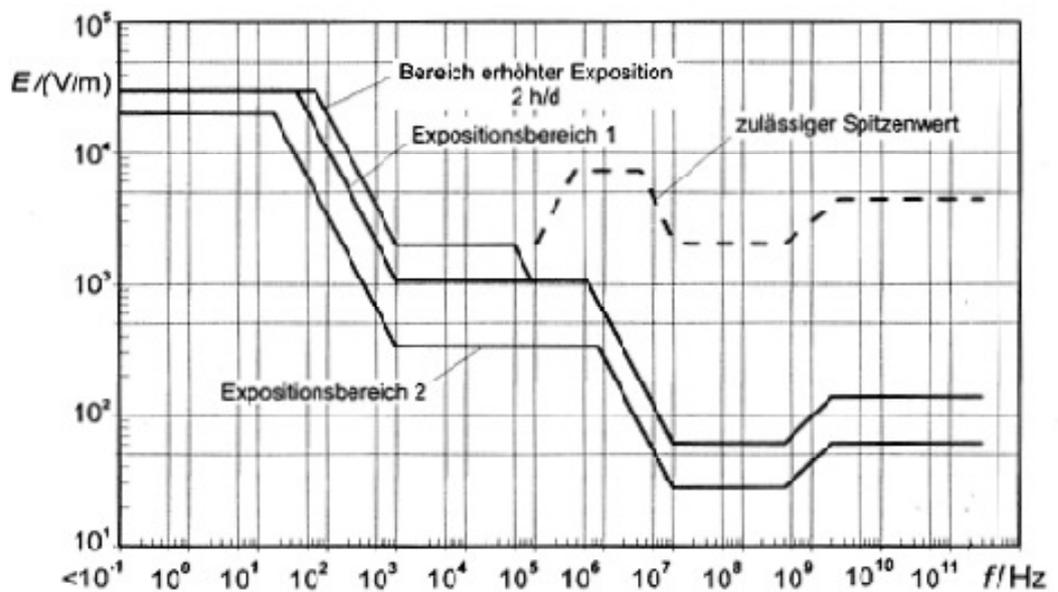
In dieser Arbeit werden Netzstationen ( $f = 50$  Hz) auf ihre magnetischen Flussdichten untersucht, daher ist der für diese Arbeit relevante Grenzwert  $100 \mu$ T (in Tabelle 2-2 grau markiert).

### 2.1.2 BGV B11

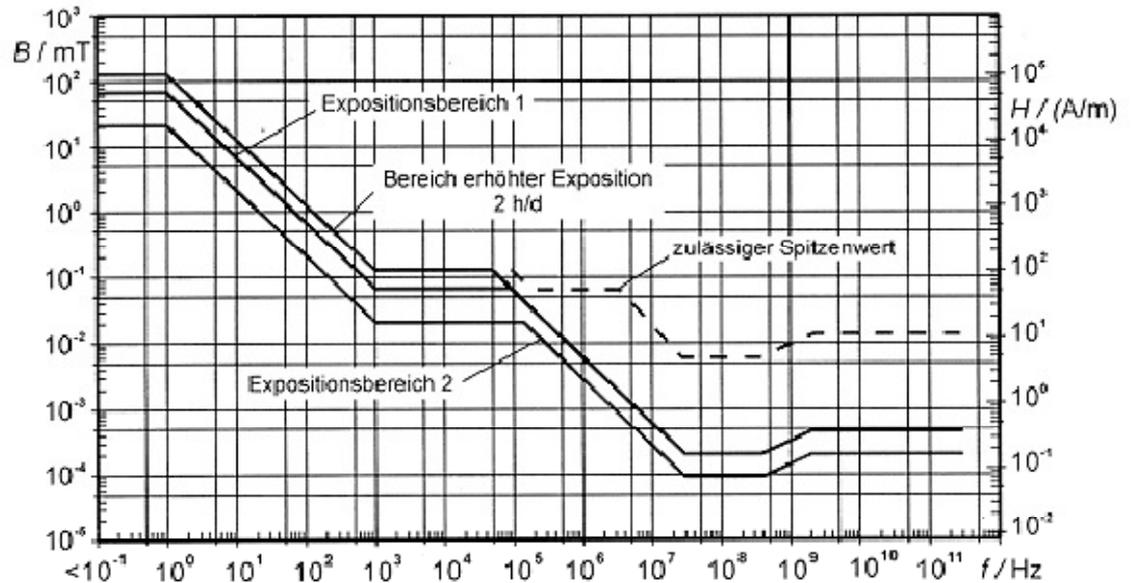
Die Berufsgenossenschaftliche Verordnung B11 (BGV B11) trat am ersten Juni 2001 in Kraft und bildet die Rechtsgrundlage für den Arbeitsschutz und die Arbeitssicherheit im Bezug auf elektromagnetische Expositionen. In ihr sind die Grenzwerte (siehe Abb. 2-3 und Abb. 2-4) für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz für drei, in dieser Verordnung definierte, Expositionsbereiche festgelegt. Sie gilt in den Bereichen, die von der 26. BImSchV ausgeschlossen sind (z. B. innerhalb von abgeschlossenen Betriebsräumen). Die Expositionsbereiche sind wie folgt definiert:

- Expositionsbereich 1: Umfasst die Bereiche, in denen aufgrund der Betriebsweise oder der Aufenthaltsdauer sichergestellt ist, dass eine Exposition oberhalb der zulässigen Grenzwerte vom Expositionsbereich 2 nur vorübergehend ist.
- Expositionsbereich 2: Umfasst alle Bereiche, sofern sie nicht den anderen Expositionsbereichen oder dem Gefahrenbereich zuzuordnen sind.
- Bereich erhöhter Exposition: Ist ein kontrollierter Bereich, in dem die Grenzwerte des Expositionsbereich 1 überschritten werden.

Die nachfolgenden Abbildungen stellen den Zusammenhang zwischen der Frequenz und den dazugehörigen Grenzwerten dar, wobei Abbildung 2-2 für elektrische und Abbildung 2-3 für magnetische Felder gültig ist.



**Abb. 2-2:** Zulässige Werte der elektrischen Feldstärke in den Expositionsbereichen 1 und 2 sowie im Bereich erhöhter Exposition nach BGV B11 [21]



**Abb. 2-3:** Zulässige Werte der magnetischen Flussdichte in den Expositionsbereichen 1 und 2 sowie im Bereich erhöhter Exposition nach BGV B11 [21]

## 2.2 Berechnungsgrundlagen

### 2.2.1 Maxwell'sche Gleichungen

Das von dem britischen Physiker James C. Maxwell in den Jahren 1861 bis 1864 entwickelte Gleichungssystem verbindet die Theorien des Gauß'schen Gesetzes der Elektrostatik, des Faraday'schen Induktionsgesetzes und des Ampere'sche Durchflutungsgesetz miteinander. Diese Theorien wurden weiterhin um den Maxwell'schen Verschiebungsstrom ergänzt und stellen somit die Wechselwirkungen zwischen elektrischen und magnetischen Phänomenen mathematisch dar. Dieses Gleichungssystem bildet daher die Grundlage der modernen Elektrodynamik und wird im Allgemeinen als Maxwell'sche Gleichungen bezeichnet.

Die Maxwell'schen Gleichungen sind in zwei Varianten formuliert, zum einen in integraler Form und zum anderen in differentieller Form.

Maxwell'sche Gleichungen in Integraler Form:

Die integrale Form der Maxwell'schen Gleichungen ermöglicht eine globale Aussage der Eigenschaften eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes, wie die Wirbel- und Quellstärke innerhalb des Integrationsweges.

Feldgleichungen:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{r} = I \quad (2-2)$$

Diffusionsgleichungen:

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \quad (2-3)$$

$$\oint_A \vec{J}_L \cdot d\vec{A} = -\frac{dQ}{dt} \quad (2-4)$$

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2-5)$$

Maxwell'sche Gleichungen in differentieller Form:

Die differentielle Form (auch als Punktform bezeichnet) ermöglicht eine lokale Aussage der Eigenschaften eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes. Sie wird durch eine Sequenz der Operationen **Integration**, **Division** durch eine Fläche (bei den Feldgleichungen) bzw. durch ein Volumen (bei den Diffusionsgleichungen) und **Grenzwertbildung** der Fläche bzw. des Volumens gegen Null aus der Integralen Form erlangt. Mit Hilfe der differentiellen Form kann man an diskreten Feldpunkten die Wirbel- und **Quelldichte** des Feldes ermitteln.

Feldgleichungen:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-6)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_L + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-7)$$

Die Rotation beschreibt die Wirbelstärke des entsprechenden Vektorfeldes. Die sich zeitlich verändernde Raumladungsdichte in der Gleichung 2-7 entspricht der Verschiebungsstromdichte

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_V \quad (2-8)$$

Im Falle eines statischen bzw. stationären Feldes ist die Verschiebestromdichte aufgrund der fehlenden zeitlichen Änderung der elektrischen Raumladungsdichte ( $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ) gleich Null. Bei quasistationären Feldern (z. B. bei Übertragungsnetz üblichen 50Hz) ist die Verschiebestromdichte im Gegensatz zur Leiterstromdichte vernachlässigbar klein ( $\vec{J}_L \gg \vec{J}_V$ ) und wird Null gesetzt. In diesen Fällen vereinfacht sich die Gleichung 2-7 zu:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_L \quad (2-9)$$

Diffusionsgleichungen:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (2-10)$$

$$\text{div } \vec{J}_L = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2-11)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2-12)$$

Die Quellstärke des entsprechenden Vektorfeldes wird durch die Divergenz beschrieben.

Die Divergenz des Magnetischen Feldes ist Null definiert (Gleichung 2-12), da keine magnetischen Monopole (magnetische Ladungen) existieren. Dieser Definition folgend ist das magnetische Feld ein reines Wirbelfeld.

Die Materialgleichungen ermöglichen aus den Ergebnissen der differentiellen Feldgleichungen (Gleichung 2-6 und 2-7) die magnetische, elektrische Flussdichte und die Stromdichte, die in den entsprechenden Materialien auftreten, zu ermitteln.

Materialgleichungen:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (2-13)$$

$$\text{mit } \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (2-14)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2-15)$$

$$\text{mit } \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

### 2.2.2 Biot-Savart

Das Gesetz von Biot-Savart (Gleichung 2-16) dient zur Berechnung der magnetischen Flussdichte, die durch einen Stromfluss um einen fadenförmigen Leiter erzeugt wird.

$$dB(t) = \mu_0 \cdot \frac{i(t)}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{ds \times r}{r^3} \quad (2-16)$$

Das Ergebnis des Gesetzes von Biot-Savart entspricht dem magnetischen Feldanteil den das infinitesimale Teilstück  $ds$  an einem Punkt im Abstand von  $r$  um den fadenförmigen Leiter erzeugt. Die vektorielle Richtung des Ergebnisses wird durch das Kreuzprodukt von dem infinitesimalen Teilstück  $ds$  und dem Abstand  $r$  bestimmt, d. h. sie ist senkrecht zu der von  $ds$  und  $r$  aufgespannten Fläche. Aus Gleichung 2-16 lässt sich entnehmen, dass die magnetische Flussdichte um einen Leiter nur von der Stromstärke und der Entfernung zum Leiter abhängig ist.

Die für diese Arbeit notwendigen Berechnungen sind mit der Feldberechnungssoftware WinField® der FGEU mbH durchgeführt worden. Die Software nutzt zur Berechnung der magnetischen Flussdichte das Gesetz von Biot-Savart, das wie folgt implementiert ist.

Zur Vereinfachung der Berechnung werden die zeitabhängigen Größen  $dB(t)$  und  $i(t)$  in komplexe Größen transformiert. Der zu berechnende  $i$ -te Teilleiter der Länge  $l_i$  wird parallel zur x-Achse in den Koordinatenursprung versetzt, wo sich dann sein Feldbeitrag im Aufpunkt  $P(x,y,z)$  mittels Gleichung 2-17 errechnet.

$$|\vec{B}_i(t)| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi \cdot r} \cdot \underline{i}_i(t) \cdot \left[ \frac{l_i - x_p}{\sqrt{(l_i - x_p)^2 + r^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + r^2}} \right] \quad (2-17)$$

Die einzelnen Vektorkomponenten errechnen sich durch:

$$\vec{B}_{xi}(t) = 0 \quad (2-18)$$

$$\vec{B}_{yi}(t) = -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \cdot |\vec{B}_i(t)| \quad (2-19)$$

$$\vec{B}_{zi}(t) = \frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \cdot |\vec{B}_i(t)| \quad (2-20)$$

Die Vektorielle Addition der Feldbeiträge liefert den Feldvektor am Aufpunkt P(x,y,z):

$$\vec{B}_i(t) = \begin{bmatrix} B_{xi}(t) \\ B_{yi}(t) \\ B_{zi}(t) \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

Anschließend wird dieser  $i$ -te Teilleiter und das Ergebnis des Feldvektors durch Verschiebung und Rotation wieder zurück zum Originalort versetzt.

Das gesamte Feld an einen Aufpunkt P(x,y,z) errechnet sich nun aus der Vektoriellen Addition (Superposition) der Feldbeiträge an diesem Punkt der einzelnen Teilleiter:

$$\vec{B}(P) = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i(P) \quad (2-22)$$

Der Strom wird als sinusförmig mit fester Frequenz angenommen.

$$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2-23)$$

Der Effektivwert (RMS) berechnet sich aufgrund dieser Annahme aus:

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (2-24)$$

## **2.3 Mittelspannungsschaltanlagen nach DIN VDE**

Schaltanlagen mit einer Bemessungsspannung von  $\leq 52$  kV (im allgemeinen als Mittelspannung bezeichnet) werden entsprechend der Bau- und Prüfungsart den folgenden Normen zugeordnet:

DIN VDE 0101

DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200)

### **2.3.1 Schaltfelder nach DIN VDE 0101**

Schaltfelder gemäß DIN VDE 0101 werden nach festgelegten Mindestabständen konstruiert und gebaut. Diese Mindestabstände beziehen sich auf die Abstände von unter Spannung liegenden Teilen zueinander und gegen geerdete Teile, sowie zu Schutzvorrichtungen gegen zufälliges Berühren (z. B. Leisten, Gitter usw.). Sie werden normalerweise am Einsatzort hergestellt bzw. zusammengesetzt. Eine Typprüfung ist nicht gefordert, und die Nachweise der Stromtragfähigkeit für Betriebs- und Kurzschlussströme sind durch Berechnung zu erbringen. Für den Fall, dass die Anlage in einer abgeschlossenen elektrischen Betriebsstätte errichtet wird, genügt ein Schutz gegen zufälliges Berühren, durch z. B. Gittertüren oder Leisten. Alternativ können auch Wände und Türen aus Blech mit einer Mindesthöhe von 1800 mm eingesetzt werden, wobei auch Wände aus Hartgipsplatten verwendet werden dürfen. An öffentlich zugänglichen Orten sind die Felder mit einer geschlossenen Kapselung zum vollständigen Schutz zu versehen. Die DIN VDE 0101 erlaubt eine Unterschreitung der Mindestabstände. Hierzu muss der Teil in den die Mindestabstände unterschritten werden (z. B. der Anschlussbereich von Lasttrennschalter und Leistungsschaltern) mit angeschlossenen Kabeln geprüft werden. Dieser Bereich wird nach DIN VDE 0101 als „geprüfte Anschlusszone“ bezeichnet und muss mit den Einbaumaßnahmen in der Betriebsanweisung angegeben werden. Schaltfelder nach DIN VDE 0101 werden häufig für individuelle Anlagengestaltung vor Ort errichtet und eingesetzt.

### 2.3.2 Metallgekapselte Schaltfelder nach DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200)

Die DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200) ersetzt die bis zum 1. Februar 2007 gültige DIN EN 60298 (VDE 0670 Teil 6) im vollem Umfang. Die ehemalige Einteilung der metallgekapselten Schaltanlagen in „metallgeschottete“ („metal-clad“), „geschottete“ („compartmented“) und „teilgeschottete“ („cubicle“) Schaltfelder wurde durch eine Einteilung nach der Zugänglichkeit der Schotträume ersetzt. Schaltfelder nach DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200) sind typgeprüft. Die Prüfung auf Isoliervermögen, Schutzgrad, Stromtragfähigkeit, Schaltvermögen und mechanische Funktion und der dazugehörige Nachweis auf Einhaltung der Bestimmungen werden an einem Prototyp des entsprechenden Schaltfeldes erbracht. Außerdem wird an jedem einzelnen gefertigten Schaltfeld bzw. jeder einzelnen Transporteinheit eine Stückprüfung durchgeführt [4].

In den Geltungsbereich der DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200) fallen metallgekapselte Schaltanlagen bei denen atmosphärische Luft oder von der Normal-Atmosphäre getrennte gasförmige (z. B. SF<sub>6</sub>) oder flüssige (z. B. Isolierungsöle) Isolierstoffe verwendet werden.

Schaltfelder nach DIN EN 62271-200 (VDE 0671 Teil 200) sind den folgenden drei Schutzarten zugeordnet:

- **IP 2X:** verhindert das Eindringen von Fingern oder ähnlich großen Gegenständen mit einem Durchmesser von mehr als 12,5 mm<sup>Ø</sup>. Dies ist die Mindestanforderung an die Schutzart von metallgekapselten Schaltanlagen
- **IP 3X:** verhindert das Eindringen von starren Drähten mit einem Durchmesser von mehr als 2,5 mm<sup>Ø</sup>.
- **IP 4X:** verhindert das Eindringen von starren Drähten mit einem Durchmesser von mehr als 1,0 mm<sup>Ø</sup>.

Die ehemalige Einteilung der Gehäuse ist durch eine Einteilung mit Blick auf die Zugänglichkeit der Schotträume ersetzt worden. Hier werden vier verschiedene Zugänglichkeiten unterschieden:

- **Verriegelungsgesteuert zugänglicher Schottraum („interlock-controlled accessible compartment“):** Eine integrierte Verriegelung gibt

den Zugang frei zum Öffnen des Schottraumes. Dies kann im normalen Betrieb sowie bei Instandhaltungen erfolgen.

- **Verfahrensbasiert zugänglicher Schottraum („procedur-based accessible compartment“):** Der Zugang ist durch ein Arbeitsverfahren oder Schloss geregelt. Dies kann im normalen Betrieb sowie für Instandhaltungen erfolgen.
- **Werkzeugbasiert zugänglicher Schottraum („tool-based accessible compartment“):** Die Öffnung des Schottraumes ist nur mittels Werkzeug möglich. Ein öffnen im normalen Betrieb ist nicht vorgesehen, aber bei Instandhaltung möglich.
- **Nicht zugänglicher Schottraum („non accessible compartment):** Eine Öffnung ist nicht erlaubt, da dieses den Schottraum zerstört. Dies gilt insbesondere für gasisolierte oder unter Druck stehende Schotträume.

Eine Kategorisierung der Schaltfelder wird hinsichtlich des Verlustes der Betriebsverfügbarkeit vorgegeben. Die LSC-Kategorisierung („Loss of Service Continuity) richtet sich nach den Umfang der Teile einer Schaltanlage, die außer Betrieb genommen werden müssen, wenn das entsprechende Schaltfeld geöffnet wird. Die Kategorisierung wird in den folgenden drei Stufen vorgenommen:

- **LSC 1:** Sie steht für ein Schaltfeld, bei dem die Öffnung eines zugänglichen Schottraumes die Außerbetriebnahme von mindestens einem weiteren Schaltfeldes erfordert. Im Falle einer Öffnung des Sammelschienenraumes, müssen alle Felder des betroffenen Abschnittes freigeschaltet werden. Diese Kategorie beschreibt die niedrigste Stufe der Betriebsverfügbarkeit.
- **LSC 2A:** Sie steht für ein Schaltfeld, das komplett außer Betrieb genommen werden muss, wenn ein Schottraum geöffnet wird. Das Schaltfeld muss über Zwischenwände zu den Nachbarfeldern und mindestens **zwei** Schotträume sowie **eine** Trennstrecke verfügen.
- **LSC 2B:** Sie steht für ein Schaltfeld, bei dem beim Öffnen eines Schottraumes alle anderen Schaltfelder der Anlage und alle Kabelanschlussräume (einschließlich dem des betroffenen Schaltfeldes) in

Betrieb bleiben können. Das Schaltfeld muss über Zwischenwände zu den Nachbarfeldern und mindestens **drei** Schotträume sowie **zwei** Trennstrecke verfügen. Diese Kategorie beschreibt die höchste Stufe der Betriebsverfügbarkeit.

Zusätzlich zu LSC-Kategorisierung wird in den Zwischenwandklassen unterschieden ob die Schotträume komplett aus Metall bestehen oder ob Teile aus isolierendem Material gefertigt sind.

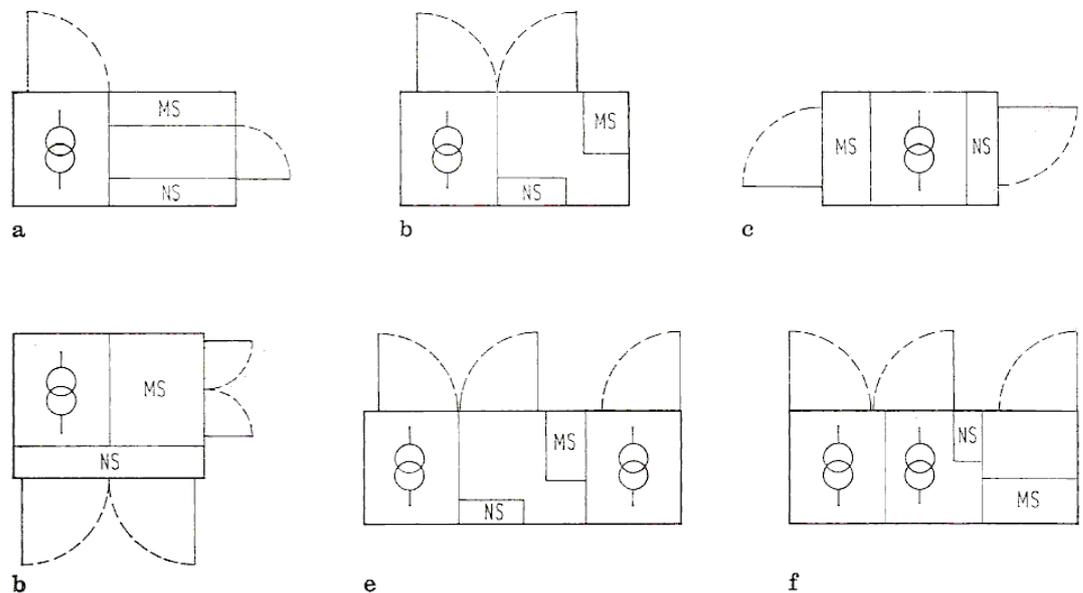
- **Klasse PM („partition of metal“):** Zwischen unter Spannung stehenden Teilen und einem geöffneten Schottraum befinden sich metallische Blenden bzw. Zwischenwände.
- **Klasse PI („partition of insulating material“):** Zwischen unter Spannung stehenden Teilen und einem geöffneten Schottraum befinden sich Blenden bzw. Zwischenwände, die zumindest teilweise aus Isolierungsmaterial bestehen.

In Hinsicht auf den Berührungsschutz bieten beide Zwischenwandklassen einen gleichwertigen Schutz. Die Zwischenwandklasse PM bietet zusätzlich einen Schirmungseffekt gegen elektrische Felder.

### 3 Netzstationen

In Deutschland werden Netzstationen als Gebäudestationen, Kompaktstationen ( $\leq 630$  kV) und in Gebieten mit geringer Bevölkerungsdichte als Maststationen ( $\leq 250$  kV) gebaut und betrieben. Die Stationen werden nach Art des Anschlusses an die MS-Ebene als Kopf- oder Ringstation bezeichnet. Als Kopfstationen werden Netzstationen bezeichnet, die am Ende eines Stranges der MS-Ebene angeschlossen sind. Hingegen werden Netzstationen bei denen die MS-Ebene „durch geschleift“ ist, als Ringstationen bezeichnet. Es gibt eine Vielzahl von Anordnungsmöglichkeiten der Komponenten innerhalb einer Netzstation, wodurch die Netzstation individuell an den Einsatzort bzw. den örtlichen Gegebenheiten

angepasst werden kann. In Abbildung 3-1 sind einige der möglichen Anordnungen dargestellt.



**Abb. 3-1:** Beispiele zur Anordnung der Anlagenteile in Netzstationen [14]

### 3.1 Aufgaben und Einsatzgebiete von Netzstationen

Netzstationen sind das Bindeglied zwischen der MS- und der NS-Ebene (10/0,4 kV bzw. 20/0,4 kV) der öffentlichen Energieversorgung. Sie bilden damit zentrale Knotenpunkte der Energieverteilung. Netzstationen dienen zur Einspeisung und Verteilung in öffentlichen oder industriellen NS-Netze aus einem übergelagerten MS-Netz [14].

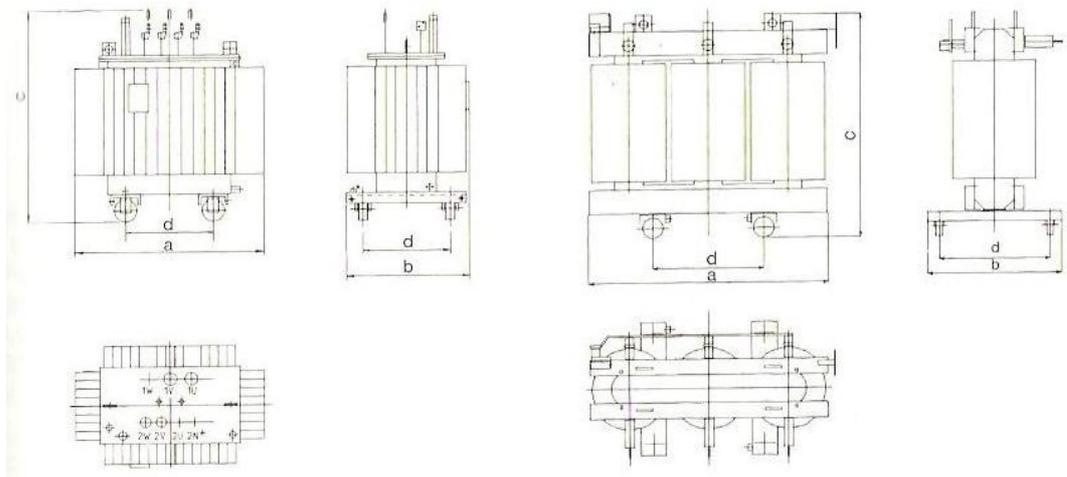
### 3.2 Komponenten einer Netzstation

Im Allgemeinen umfasst eine Netzstation die Kombination aus mindestens einem Transformator, einer MS-Schaltanlage und einer NS-Verteilung. Wobei die NS-Verteilung auch teilweise dezentral ausgelagert ist.

#### 3.2.1 Transformatoren

Die Aufgabe der Transformatoren ist die Transformation der Oberspannung (10/20 kV) zur Unterspannung (0,4 kV). Sie bilden damit den zentralen Kern einer Netzstation. Innerhalb von Netzstationen kommen bevorzugt Leistungstransformatoren mit den Schaltgruppen Dyn 5, Dyn 11 teilweise auch Dyn 1 und bei kleineren Leistungen ( $\leq 250$  kVA) Yzn 5 zum Einsatz. Diese Transformatoren sind als Öl- (Klasse 0) oder Gießharztransformatoren (Trockentransformatoren, Klasse A) ausgeführt. Wobei hier der Trend zu

Gießharztransformatoren geht, aufgrund von umwelt- und wartungstechnischen Gründen. Unter anderem wird bei dem Einsatz von Gießharztransformatoren keine Ölauffangwanne benötigt. Dieser Trend spiegelt sich auch in den für diese Arbeit untersuchten Stationen wieder. Von 15 untersuchten Stationen sind 14 (93,33 %) mit Gießharztransformatoren ausgestattet. Öltransformatoren werden bevorzugt in hermetisch gekapselter Bauweise ohne Ausdehnungsgefäß gefertigt, wogegen Gießharztransformatoren normalerweise ohne Kapselung gefertigt werden. Die Abbildung 3-2 zeigt beispielhaft einen hermetisch gekapselten Öltransformator und einen Gießharztransformator ohne Kapselung.



**Abb. 3-2:** Öltransformator hermetisch Gekapselt (links), Gießharztransformator ohne Kapselung (rechts) [4]

Einige Hersteller bieten inzwischen auch „EMV-Optimierte“ Öltransformatoren an, bei denen die Abgänge seitlich ausgeführt und teilweise zusätzlich nach unten verlegt sind. Durch diese Maßnahmen wird die magnetische Flussdichte nach oben hin reduziert.

### 3.2.2 Mittelspannungsschaltanlagen

MS-Schaltanlagen bis 36kV werden in Deutschland ausschließlich als Innenraumschaltanlage gebaut [11]. Sie dienen zum Verteilen, Steuern und Messen der MS-Ebene. Des Weiteren haben sie die Aufgabe der Trennung des Transformators bei einem Transformatorfehler (z. B. Isolationsdurchschlag) vom übergelagerten MS-Netz. Zusätzlich kann bei Ringstationen eine Trennung bzw. Aufspaltung des Ringnetzes erfolgen. Die in den Schaltfeldern eingesetzten elektrischen Komponenten werden in Primärtechnik und Sekundärtechnik unterschieden. Als Primärtechnik werden

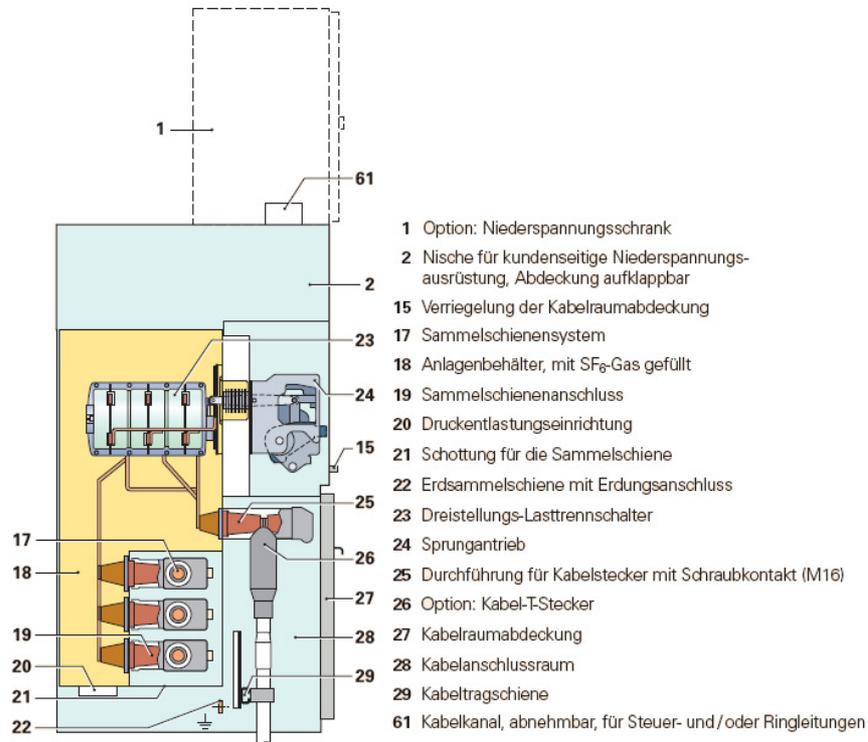
die Teile bezeichnet, die direkt mit der Mittelspannung verbunden sind (z. B. Stromschienen, Schalter und Trenner). Anlagenteile, die zum Steuern, Messen und Anzeigen dienen, werden als Sekundärtechnik bezeichnet (z. B. Strom-/Spannungswandler und Steuerungselektronik). In Netzstationen kommen heutzutage fast ausschließlich gekapselte Schaltfelder mit Luft oder SF<sub>6</sub> als Isoliermedium zum Einsatz. Diese Schaltanlagen sind fabrikgefertigt und typgeprüft. Sie werden als einzelne einander anreihbare Felder (vgl. Abbildung 3-3), die vor Ort zur Schaltanlage verbunden werden und als kompaktere fertige Schaltanlagen (vgl. Abbildung 3-3) in gemeinsamer Kapselung gefertigt. Die Verbindung der Sammelschienen der Einzelfelder erfolgt mittels spezieller feststoffisolierter Verbindungstücke.



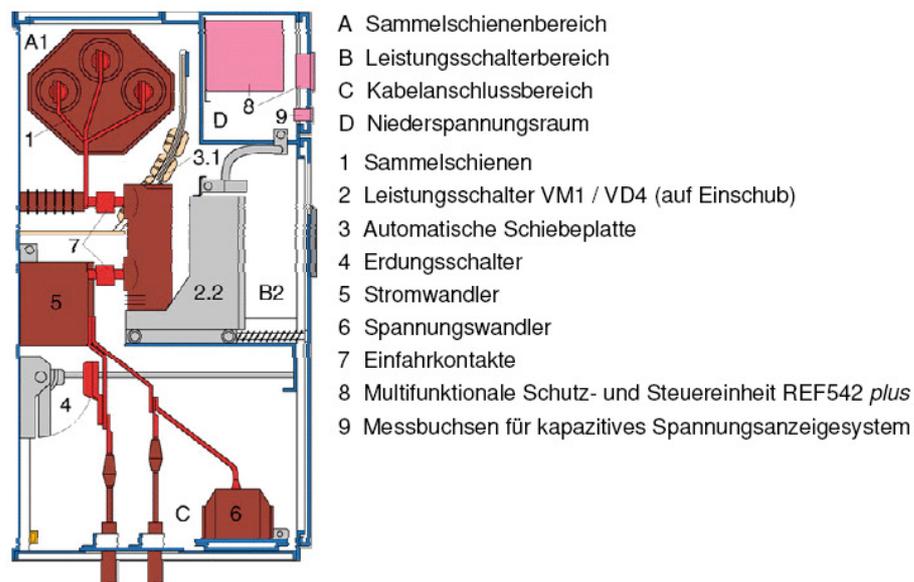
**Abb. 3-3:** MS-Schaltanlage: gemeinsam Gekapselt (links), anreihbares Einzelfeld (rechts) [24]

Bei luftisolierten MS-Schaltanlagen sind häufig die Lastschalter auf ausfahrbaren Wagen (als Schaltwagentechnik bezeichnet) montiert, teilweise werden die Lastschalter fest eingebaut. Als Lastschalter werden hier überwiegend Vakuumschalter genutzt, aber auch SF<sub>6</sub>-Schalter kommen teilweise zum Einsatz. Bei SF<sub>6</sub>-isolierten MS-Schaltanlagen werden vorwiegend Dreistellungs-Trennschalter (Dreistellungsschalter) genutzt, die bei Lasttrennfeldern um einen Vakuum-Lasttrennschalter ergänzt werden. Es existiert eine Vielzahl von verschiedenen Schaltfeldern, die entsprechend ihrer Verwendung bestückt sind. Z. B. beinhalten Transformatoranschlussfelder zusätzlich Hochspannungshochleistungssicherungen zur Absicherung des Transformators. Die Abbildungen 3-4 und 3-5 zeigen den Aufbau von Kabelanschlussfeldern am Beispiel der SF<sub>6</sub>-isolierten

Schaltanlage vom Typ 8DH10 der Firma SIEMENS und der luftisolierten Schaltanlage vom Typ ZS8 der Firma ABB.



**Abb. 3-4:** SF<sub>6</sub>-isoliertes Kabelanschlussfeld Typ 8DH10 der Firma SIEMENS



**Abb. 3-5:** luftisoliertes Kabelanschlussfeld Typ ZS8 der Firma ABB

Zur Vereinfachung der Montage der Kabel werden diese bei modernen Anlagen mit Kabelschraubsteckern versehen und damit mit der MS-Anlage verbunden. Der Kabelanschlussraum bietet je nach Hersteller Platz für ein

mal drei bis vier mal drei Einzeladernkabel, wobei häufig auch an Stelle eines Kabelbündels Überspannungsableiter eingesetzt werden können.

### **3.2.3 Niederspannungsverteilungen**

Die NS-Verteilung in einer Netzstation hat die Aufgabe der Energieverteilung und Absicherung der NS-Seite und Bereitstellung des Eigenbedarfes der Netzstation, wenn diese nicht durch ein separates Versorgungsnetz bereitgestellt wird. Nach DIN-VDE 0660 Teil 500 werden die NS-Verteilungen in typgeprüfte Schaltgerätekombinationen (TSK) und in partiell typgeprüfte Schaltgerätekombinationen (PTSK) unterschieden. Typgeprüfte Schaltgerätekombinationen sind fabrikgefertigte Verteilungen, bei denen an einem Prototyp, entsprechend der geltenden Verordnungen, eine Typprüfung vollzogen und bestanden wurde. Partiiell typgeprüfte Schaltgerätekombinationen sind Verteilungen, die vor Ort aus typgeprüften Teilen zusammengesetzt werden. Bei ihnen muss der Nachweis auf Einhaltung der Vorschriften individuell ermittelt werden. Dies ist unter anderen ein Grund, warum PTSK in Netzstationen nur sehr selten zum Einsatz kommen und im Normalfall TSK genutzt werden. In der Regel sind die NS-Verteilungen in Netzstationen nur mit Niederspannungshochleistungssicherungstrennschaltern zur Leitungssicherung und Trennung der Abgänge ausgestattet und mit einem Haupttrennschalter zum Abschalten der Zuleitung der Verteilung versehen.

## **4 Maßnahmen zur magnetischen Feldreduzierung**

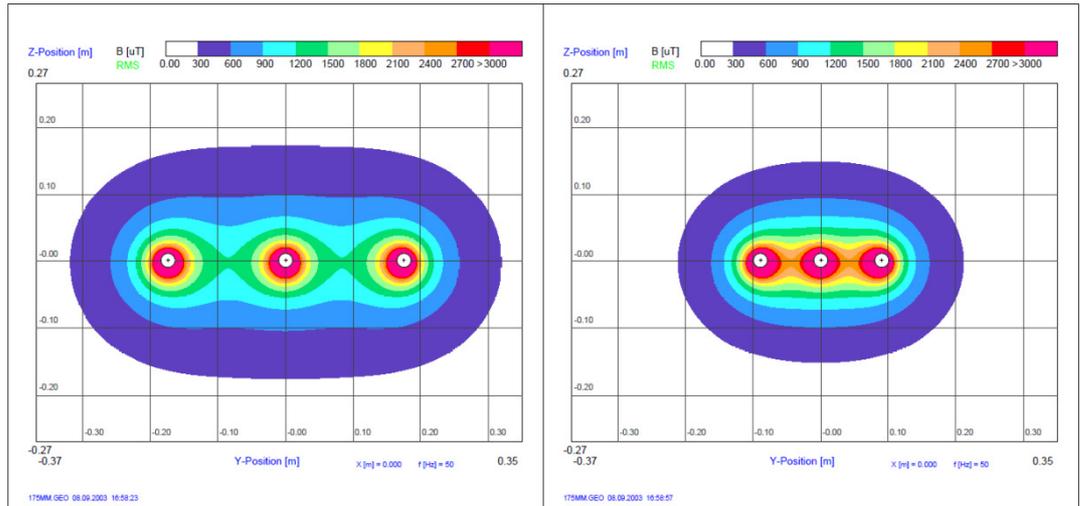
Die Maßnahmen zur magnetischen Feldreduzierung werden in zwei Gruppen unterteilt, in primäre und sekundäre Maßnahmen. Als primäre Maßnahmen werden konstruktionstechnische Maßnahmen bezeichnet, die sich direkt auf die Reduzierung bzw. Kompensation des magnetischen Feldes am Entstehungsort auswirken. Als sekundäre Maßnahme wird die Schirmung mittels leitender oder hochpermeabler Platten bezeichnet. Diese werden in der Praxis häufig nur eingesetzt, um nachträglich bei bestehenden Stationen die Einhaltung der Grenzwerte zu erreichen, da die eingesetzten Materialien relativ teuer sind. Des Weiteren kann durch bauliche bzw. planungstechnische Maßnahmen (z. B. bei der Positionierung der Anlagenteile) die magnetische Flussdichte an maßgeblichen Immissionsorten

reduziert werden. Die primären Maßnahmen beruhen auf zwei Grundeffekten. Zum einen auf der Ausnutzung der Beeinflussung bzw. Kompensation der magnetischen Felder von Leitern unterschiedlicher Phasenlage, zum anderen auf der Aufteilung bzw. Reduzierung der Ströme. Die Ausnutzung der Beeinflussung bzw. Kompensation der magnetischen Felder ist am effektivsten, wenn das Drehstromnetz symmetrisch belastet ist. Bei unsymmetrischer Belastung kann es unter Umständen auch zu einer Erhöhung der Feldstärken bzw. Flussdichten kommen. In der Praxis ist dieser Fall relativ unwahrscheinlich, da bei der Planung der Netzverteilung besonderer Wert auf die symmetrische Belastung des Netzes gelegt wird, und eine stärkere unsymmetrische Belastung nur im Fehlerfall auftritt, die in der Regel schnell durch die Sicherungselemente abgeschaltet wird.

## **4.1 Primäre Maßnahmen**

### **4.1.1 Abstandsreduzierung stromführender Leitungen verschiedener Phasenlage**

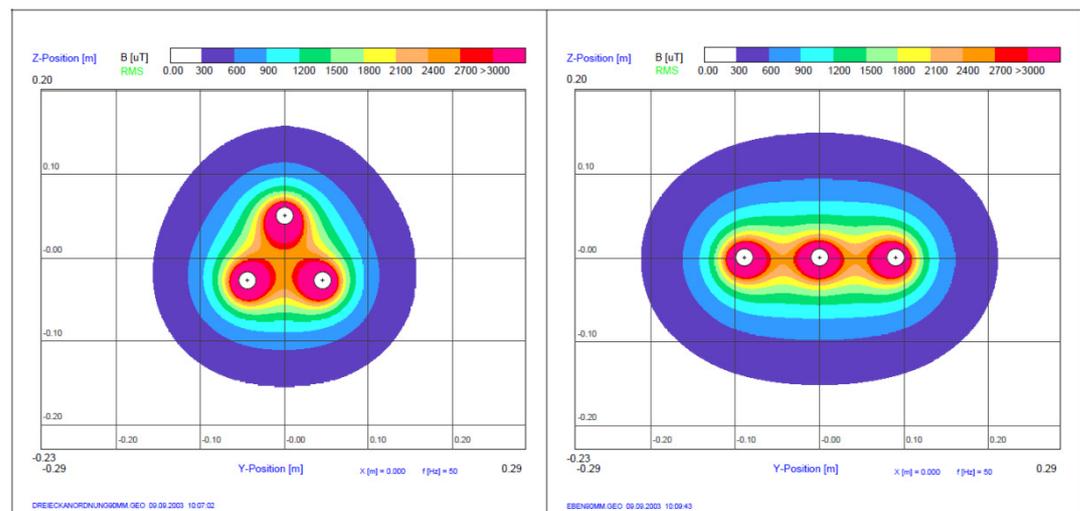
Mittels der Abstandsreduzierung wird die kompensierende Wirkung der drei phasenverschobenen Feldanteile gegeneinander optimiert. Wenn, unter der theoretischen Annahme einer symmetrischen Belastung die drei Phasen so dicht zusammen gebracht werden würden, dass sie ineinander liegen, so würden sich die phasenverschobenen magnetischen Feldanteile genau überlagern und zu einer Gesamtfeldstärke von null addieren. In der Praxis ist die Abstandreduzierung begrenzt durch die Durchschlagsfestigkeit des Isolationsmaterials und bei entsprechenden Anlagenteilen durch die in Normen festgelegten Mindestabstände (z. B. bei MS-Schaltfeldern nach DIN VDE 0101). Zur Veranschaulichung zeigt die Abbildung 4-1 beispielhaft die grafischen Berechnungsergebnisse der Feldreduzierung bei Verringerung des Leiterabstandes von 175 mm zu 90 mm.



**Abb. 4-1:** Feldreduzierung bei Verringerung des Leiterabstandes von 175 mm (links) zu 90 mm (rechts) [16]

#### 4.1.2 Symmetrierung der Leiteranordnung

Unter der Symmetrierung der Leiteranordnung versteht man die Verlegung bzw. den Aufbau der Leiter eines symmetrischen Drehstromnetzes in Form eines gleichseitigen Dreiecks. Durch diesen Aufbau wird eine bessere Kompensation der magnetischen Feldlinien der Leiter gegeneinander erzielt, als mit einer Verlegung bzw. des Aufbaus in ebener Form. Zur Veranschaulichung zeigt die Abbildung 4-2 beispielhaft die graphischen Berechnungsergebnisse der Feldreduzierung bei symmetrischer Leiteranordnung gegenüber einer ebenen Leiteranordnung mit gleichem Leiterabstand.



**Abb. 4-2:** Gegenüberstellung Symmetrische (links) und ebene (rechts) Leiteranordnung [16]

### 4.1.3 Phase Splitting

Eine Reduzierung der magnetischen Flussdichte kann auch durch Aufteilen des Stromes auf mehrere Kabel erreicht werden. Die Wirkung dieser Maßnahme ist besonders effektiv, wenn sie in Verbindung mit der Symmetrierung der Leiteranordnung (siehe oben) realisiert wird. Dies wird in der Praxis häufig bei der Verbindung der NS seitigen Abgänge des Transformators zur Einspeisung der NS-Verteilung realisiert, da in dieser Verbindung die größten Ströme innerhalb der Anlage fließen.

### 4.1.4 Symmetrierung der Einspeisung

Durch die Verlegung der Einspeisung in die Mitte der Lastverteilung kann der Strombelag (insbesondere bei NS-Verteilungen) auf den Sammelschienen zum Teil erheblich reduziert werden (siehe Abbildung 4-3). Dies hat direkte Auswirkung auf die Stärke und Ausdehnung der magnetischen Emission der Sammelschienen.

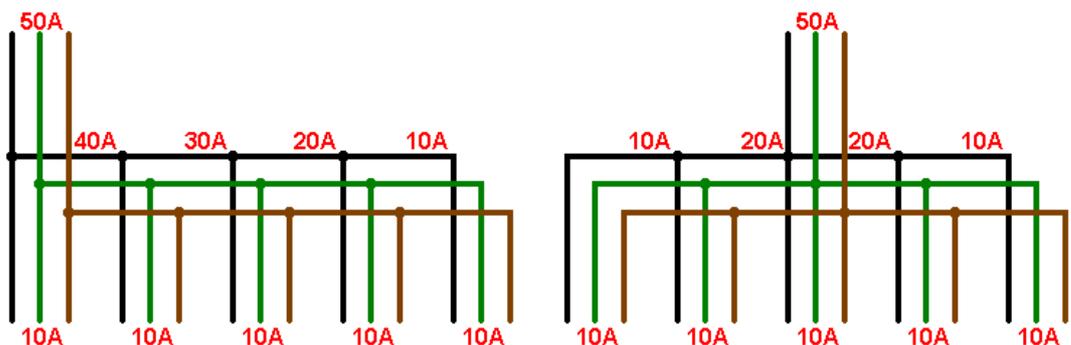


Abb. 4-3: Stromverteilung auf der Sammelschiene bei linker (links) und mittiger (rechts) Einspeisung

## 4.2 Sekundäre Maßnahmen

### 4.2.1 Schirmung mittels leitfähiger Platten

Der Effekt der Schirmung mittels leitfähiger Platten beruht auf dem Induktionseffekt. In der Platte werden durch das sich zeitlich verändernde Magnetfeld Wirbelströme induziert. Durch die Wirbelströme werden magnetische Felder erzeugt, die der Ursache der Induktion (das zu schirmende Magnetfeld) entgegengesetzt sind und dieses damit dämpfen. Dieser Effekt ist umso stärker je leitfähiger die Platte ist, daher werden bei Schirmungen dieser Art Platten aus Aluminium und Kupfer eingesetzt. Ebenfalls wird die Wirkung durch die Stärke des eingesetzten Materials

gesteigert. Eine vollständige Abschirmung des magnetischen Feldes ist, im Gegensatz zum elektrischen Feld, nicht möglich. Es ist nur eine Dämpfung möglich, da sich ein Gleichgewicht zwischen den induzierenden und den entgegenwirkenden magnetischen Feldern einstellt. Eine Schirmung bzw. Dämpfung des magnetischen Feldes, das durch einen Gleichstrom erzeugt wird, ist mit dieser Maßnahme nicht zu erreichen, da aufgrund der fehlenden zeitlichen Änderung keine Wirbelströme in der Platte induziert werden.

#### **4.2.2 Schirmung mittels hochpermeabler Platten**

Bei der Schirmung mittels hochpermeabler (magnetisch gut leitfähiger) Platten wird das magnetische Feld, das in die Platte eindringt, „gebündelt“ und innerhalb der Platte geleitet. Dadurch tritt nur ein geringer Teil der Feldlinien auf der Rückseite (der Quelle abgewandten Seite) der Platte wieder aus. Die Wirkung dieser Maßnahme hängt von der Permeabilität und der Stärke der Platte ab. Mittels dieser Maßnahme kann auch das magnetische Feld, das von einem Gleichstrom erzeugt wird, abgeschirmt werden. Hochpermeable Materialien sind aber relativ teuer, deshalb werden diese nur in besonderen Fällen eingesetzt, und in der Praxis die Schirmung mittels leitfähiger Platten bevorzugt

### **4.3 bauliche und planungstechnische Maßnahmen**

#### **4.3.1 Vergrößerung des Abstandes zum Immissionsort**

Der Aufbau von Netzstationen ist hinsichtlich der Anordnung der Anlagenteile sehr individuell. Durch eine durchdachte Platzierung der einzelnen Anlagenteile ist es möglich, die Anlage so zu planen, dass eine Überschreitung der geforderten Grenzwerte an maßgeblichen Immissionsorten ausgeschlossen werden kann. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine ausreichende Grundfläche oder der Umstand, dass nicht die gesamte Station von maßgeblichen Immissionsorten umschlossen ist. Die Kabel bzw. Stromschienen sollten so verlegt sein, dass sie einen entsprechenden Abstand zu maßgeblichen Immissionsorten haben. Z. B. sollten die Kabel auf bzw. unter den Stationsboden verlegt werden, wenn sich über der Station ein maßgeblicher Immissionsort befindet. Bei der Platzierung der Transformatoren ist es zu empfehlen, die NS seitigen Anschlüsse zur Stationsinnenseite zu legen, um dadurch einen maximalen

Abstand des höheren NS seitigen Stromes zur Außenwand zu erreichen. In manchen Fällen ist es möglich durch Einzäunung der Station den Abstand zu vergrößern, da bei einer Einzäunung der Zaun die von außen berührbare Fläche darstellt.

#### **4.3.2 Einsatz von Sicherungen zur Strombegrenzung**

In besonderen Fällen, bei denen die Abnahmeleistung nicht die volle Auslastung der Anlagenteile erfordert, ist es möglich den für die Berechnung geforderten maximalen Anlagenstrom durch den Einsatz von kleineren Sicherungen zu begrenzen, um damit die Einhaltung der Grenzwerte zu gewährleisten. Diese Maßnahme muss aber gut durchdacht sein, da bei höherer Auslastung, die den Einsatz von größeren Sicherungen erforderlich macht, eine Neuberechnung der Anlage auf Einhaltung der Grenzwerte erfordert.

#### **4.3.3 Einsatz von Transformatoren kleinerer Leistung zur Strombegrenzung**

Wenn die Erweiterung der NS seitigen Abnahmeleistung als unwahrscheinlich zu beurteilen ist, sollte ein Transformator eingesetzt werden, der an die Abnahmeleistung angepasst ist. Hierdurch kann der für die Berechnung geforderte maximale Anlagenstrom gesenkt werden. Dies ist auch aus energie- und wirtschaftstechnischen Gründen von Vorteil, da bei Nennauslastung die Transformatoren die geringsten Verluste haben, und ein kleinerer Transformator im Regelfall günstiger im Anschaffungspreis ist.

## **5 Magnetische Flussdichte an Stationen aktueller Bauart**

### **5.1 Vorbetrachtung**

Elektrische Felder werden bei Netzstationen durch die Gehäuse der Anlagenteile und die Restfeuchtigkeit im Mauerwerk ausreichend abgeschirmt. Grenzwertüberschreitungen der elektrischen Feldstärke sind daher außerhalb eingehauster Netzstationen ausgeschlossen und deshalb nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Die Grundlage der Untersuchung der magnetischen Flussdichte ist die 26. BImSchV, die als Nachweis zur

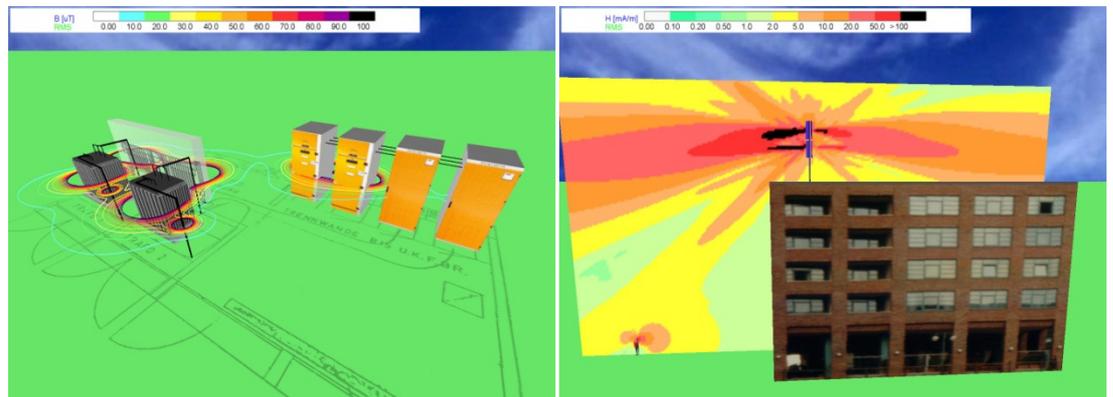
Einhaltung der Grenzwerte Messungen oder Berechnungen vorsieht. Die Ermittlung der magnetischen Flussdichten erfolgt in dieser Arbeit mittels Berechnungen. Eine messtechnische Untersuchung der Netzstationen wird nicht durchgeführt. Die Untersuchung soll zeigen in wieweit bei aktuellen Netzstationen EMVU-gerecht (gemäß der 26. BImSchV) geplant wird, und ob es Verbesserungsmöglichkeiten bei der Konstruktion von Netzstationen gibt. Gegenstand der Untersuchung sind 15 Netzstationen, die in den letzten drei Jahren (2007-2009) geplant wurden. Diese Stationen sind alle entsprechend der Bauart „Gebäudestationen“. Zur Berechnung der magnetischen Flussdichten wird die Feldberechnungssoftware WinField® aus dem Hause der FGEU mbH genutzt. Sie wird im folgenden Teilabschnitt beschrieben.

## **5.2 WinField® Programmbeschreibung**

Die Feldberechnungssoftware WinField® wurde entwickelt, um elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz gemäß der 26. BImSchV und der BGV B11 zu berechnen und grafisch darzustellen.

Leitende Elemente werden für die Berechnung als fadenförmige Leiter konstruiert und mit den entsprechenden elektrischen Parametern versehen. Die Berechnungsergebnisse sind damit für zylinderförmige Leiter exakt und für anders geformte Leiter hinreichend genähert. Die Berechnung der magnetischen Flussdichten erfolgt nach dem Gesetz von Biot-Savart, das wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, in das Programm implementiert ist. Elektrische Feldstärken werden durch das Ersatzladungsverfahren berechnet, wobei die elektrische Feldstärke im Erdreich gemäß Definition auf Null gesetzt wird. Die Berechnungen können sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Schirmwirkung von z. B. Gehäusen durchgeführt werden. Das Programm ermöglicht die Nachbildung und Berechnung von Netzstationen, Freileitungstrassen, Erdkabeln und Bahnstecken im Niederfrequenzmodus. Im Hochfrequenzmodus ist die Nachbildung und Berechnung von Radar-, Mobiltelefon- und Funkanlagen möglich. Desweiteren kann für Freileitungstrassen die Geräuschemission und die Windbelastung der Leiterseile berechnet werden. Die Abbildungen 5-1 und 5-2 zeigen jeweils ein mögliches Berechnungsergebnis einer Netzstation (NF-

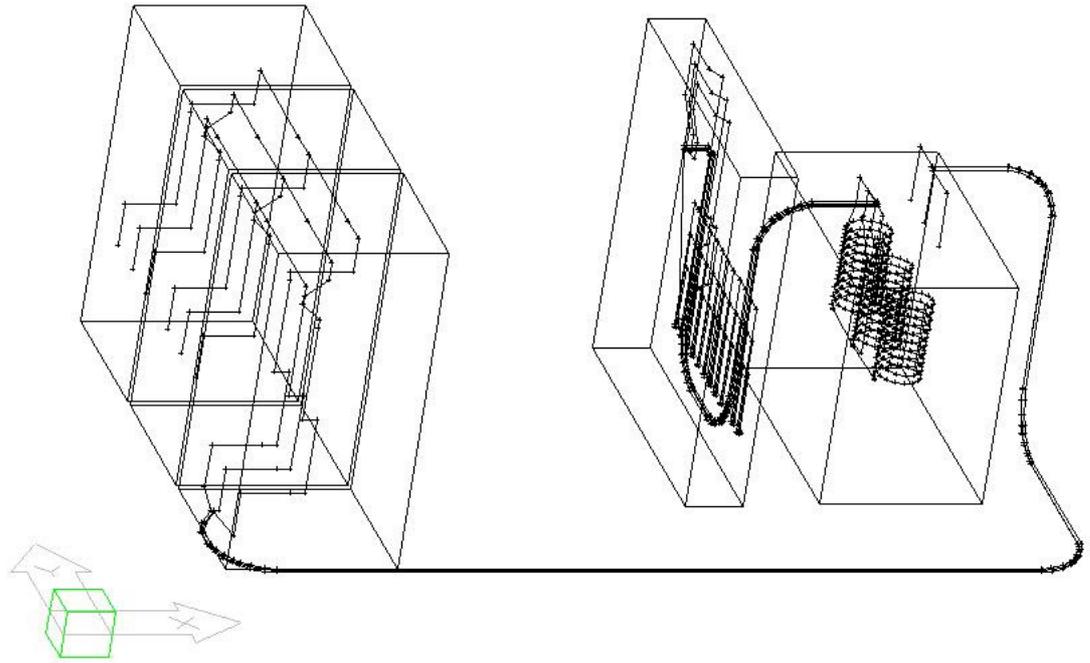
Modus, Darstellung mit ISO-Linien) und einer Mobiltelefonanlage (HF-Modus, Darstellung mit Berechnungsfläche) in der 3D-Ansicht.



**Abb. 5-1:** Netzstation in 3D mit Isolinien

**Abb. 5-2:** Mobiltelefonanlage in 3D mit Berechnungsfläche

Die Nachbildung einzelner Anlagenkomponenten erfolgt im kartesischen Koordinatensystem, die darauf in Bibliotheken übersichtlich als Blöcke abgespeichert und verwaltet werden. Die Steuerung des Programms ist an CAD-Programme angelehnt, um einen einfachen Einstieg in die Bedienung zu ermöglichen. Einfache Einführungsbeispiele, ein Assistent und Beispielvideos unterstützen ebenfalls den schnellen Einstieg in die Programmhandhabung. Durch die reichhaltigen, bereits implementierten Bibliotheken ist es nicht zwingend erforderlich, die Anlagenteile selber zu konstruieren, da mit den vorhandenen Blöcken schnell die komplexe Geometrie einer Anlage nachgebildet werden kann. Die Abbildung 5-3 zeigt beispielhaft eine fertig konstruierte Netzstation in der 3D-Perpektive.



**Abb. 5-3:** 3D Darstellung einer Netzstation in WinField®

Die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse kann über das Berechnungsraster den Bedürfnissen entsprechend angepasst werden. Dabei bedeutet ein feineres Berechnungsraster eine Steigerung der Genauigkeit aber auch eine Erhöhung des Rechenaufwandes und damit der Berechnungsdauer. Des weiteren kann die Genauigkeit über die Segmentierung der Teilleiter, d. h. Aufteilung der Teilleiter in mehrere Segmente beeinflusst werden. Dieses hat jedoch ebenfalls entsprechenden Einfluss auf die Berechnungszeit.

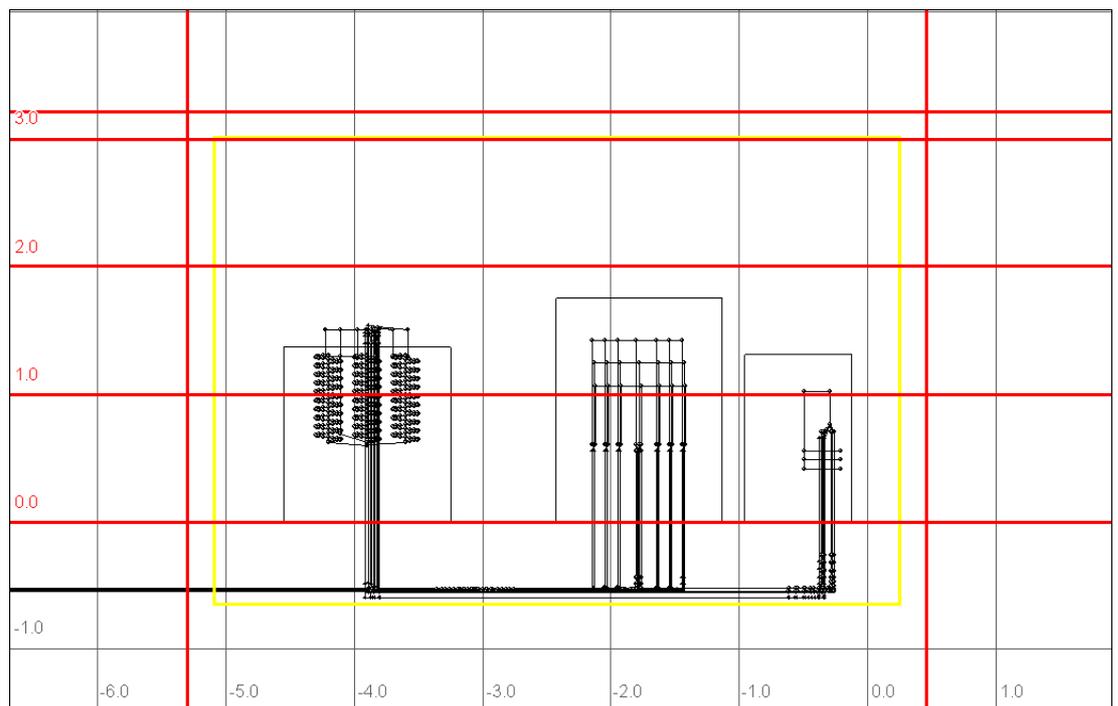
Um die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse auch bei größeren Berechnungsabständen zu verbessern, beinhaltet WinField® die Möglichkeit zur Interpolation, die wahlweise dynamisch sein kann, um die Geschwindigkeit der Berechnung zu optimieren

Dargestellt werden die Berechnungsergebnisse grafisch in Form von farbigen Flächen oder wahlweise durch farbige Isolinien (siehe Abbildungen 5-1 und 5-2).

### **5.3 Beschreibung der Herangehensweise**

Die 15 Geometrien der zu untersuchenden Netzstationen werden zunächst hinsichtlich der Grundeinstellungen, Farbdarstellung und Schrittweite der Isoflächen geprüft und vereinheitlicht. Kabel bzw. Stromschielen, die die

Netzstation verlassen, wurden ab der Stationsaußenwand um 50 m verlängert, um Einfluss der Randeffekte des Kabelendes auf das Berechnungsergebnis zu vermeiden. Für jede Netzstation werden Berechnungen der Flächen vor, hinter, links, rechts und über der Station im Abstand von 0,2 m von der Außenwand gemäß 26. BImSchV und eine Aufnahme der maximalen magnetischen Flussdichte durchgeführt. Maximalwerte die durch Kabel erzeugt werden, die die Berechnungsebene schneiden entstehen, werden hierbei nicht berücksichtigt. Zur Ermittlung des Verursachers des Maximums an der Netzstation werden zusätzlich orthogonal Ebenen in Höhe von 0, 1, 2 und 3 m durch die Netzstation berechnet. Die Abbildungen der Berechnungen 0, 2 und 3 m sind im Anhang aufgeführt. Alle Abbildungen der Berechnungen, sind auf CD der Arbeit beigefügt. In Abbildung 5-4 sind diese Berechnungsflächen am Beispiel einer Station rot eingezeichnet (mit Ausnahme von vor und hinter der Station). Das gelb eingezeichnete Gehäuse stellt die Außenwand der Netzstation dar.



**Abb. 5-4:** Berechnungsflächen

Alle Netzstationen werden unter voller Nennbelastung der Transformatoren berechnet. Bei Stationen im Ringbetrieb wird ein MS seitig zugeleiteter Strom von 630 A zugrunde gelegt, da dies die maximale Strombelastbarkeit der Sammelschienen der in den meisten Netzstationen eingesetzten MS-Schaltanlagen ist. Der aus diesen Netzstationen weitergeleitete Strom ist

folglich die Differenz zwischen dem zugeleiteten MS seitigen Strom (630A) und dem von den Transformatoren abgenommenen Strom. Desweiteren werden die geringfügig abschirmenden Einflüsse von Gehäusen und Mauerwerk vernachlässigt, dadurch können die Ergebnisse als sog. „worsed case“ betrachtet werden. Nach der Angabe der technischen Kenndaten der Station erfolgt eine kurze Betrachtung der einzelnen Netzstationen im Bezug auf die maximale magnetische Flussdichte und des Verursachers des Maximums. An dieser Stelle werden weiterhin Vorschläge zur Verringerung des Maximums gegeben. Die Betrachtung geschieht unter der Annahme, dass der gesamte Bereich um und über der Netzstation nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt ist. Zusätzlich wird eine Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse zum Zwecke einer allgemeinen Aussage aufgeführt.

## 5.4 Aufnahme der Magnetischen Flussdichten

### 5.4.1 Station 01

#### Berechnungsergebnisse:

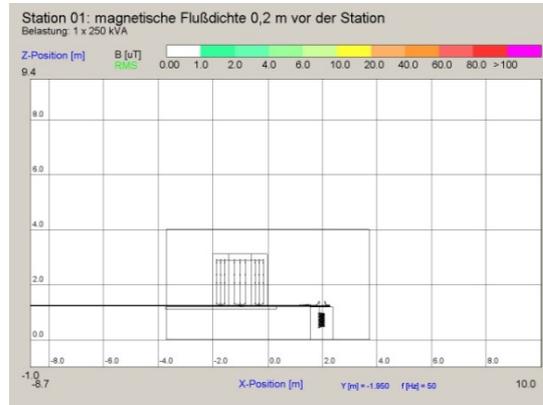


Abb. 5-5: Station 01 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

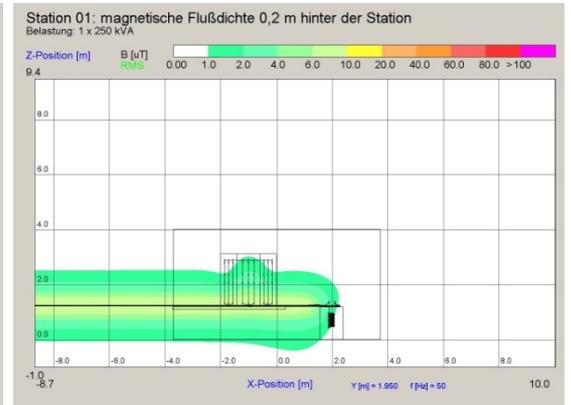


Abb. 5-6: Station 01 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

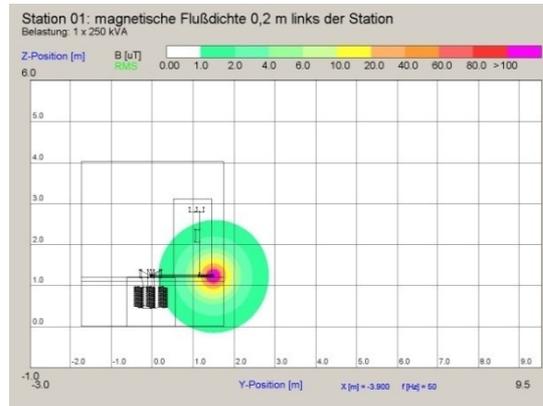


Abb. 5-7: Station 01 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

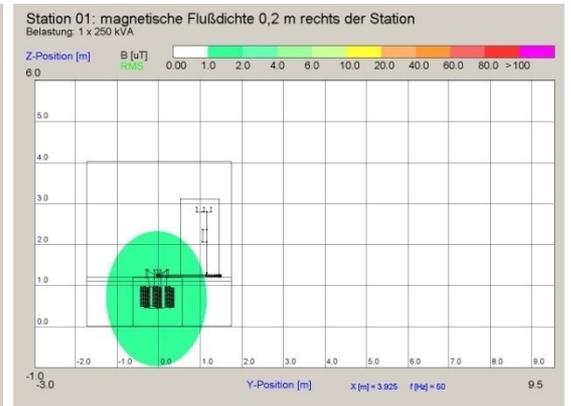


Abb. 5-8: Station 01 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

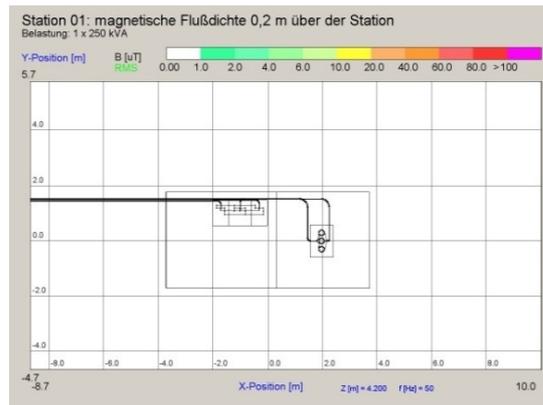


Abb. 5-9: Station 01 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

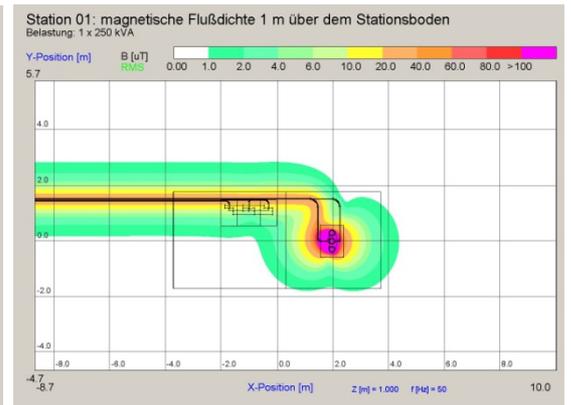


Abb. 5-10: Station 01 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

01	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	0,887
Hinten	8,912
Links	0,002
Rechts	1,763
Über	0,434

**Tab. 5-1:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 01

#### **Stationsdaten:**

1x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 250 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 4\%$

1x MS-Schaltanlage (luftisoliert).

Breite: 7,45 m      Tiefe: 3,50 m      Grundfläche: 26,075 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Kopf

Zuleitung: 2x 7,217 A (10 kV)

Ableitung: 1x 360,844 A (0,4 kV)

#### **Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (8,912  $\mu\text{T}$ ) an der Rückseite der Netzstation wird durch Überlagerung der Felder des abgehenden NS-Kabels und der MS-Schaltanlage verursacht. Zu bemerken ist, dass aufgrund der Betriebsweise der Station (Kopfstation) auf der MS-Seite nur der Laststrom des Transformators fließt. Für den Fall, dass die Station zur Ringstation umfunktioniert wird, ist an der MS-Schaltanlage ein stärkeres Maximum zu erwarten, da sie zusätzlich zum geringen Laststrom (14,434 A) des Transformators den weitergeleiteten hohen Ringstrom (615,566 A) trägt. Dadurch würde sich das magnetische Feld der MS-Schaltanlage erheblich verstärken. Im Falle einer Grenzwertüberschreitung bei der Umstellung auf Ringbetrieb, ist die Verlegung der MS-Schaltanlage in Mitte der Netzstation zu empfehlen. Alternativ kann auch der Ringstrom führende Teil der MS-Schaltanlage zur Außenwand geschirmt werden. Hierbei empfiehlt sich die Verlegung der MS-Schaltanlage nur während der Planungsphase und die Schirmung, wenn die Station bereits in Betrieb ist, da eine nachträgliche Verlegung der MS-Schaltanlage mit größeren Kosten verbunden ist als die Schirmung.

### 5.4.2 Station 02

#### Berechnungsergebnisse:

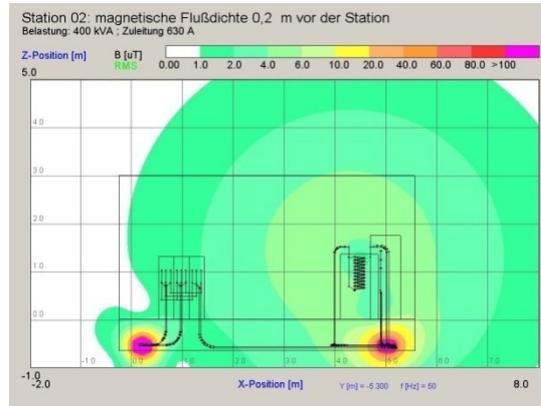


Abb. 5-11: Station 02 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

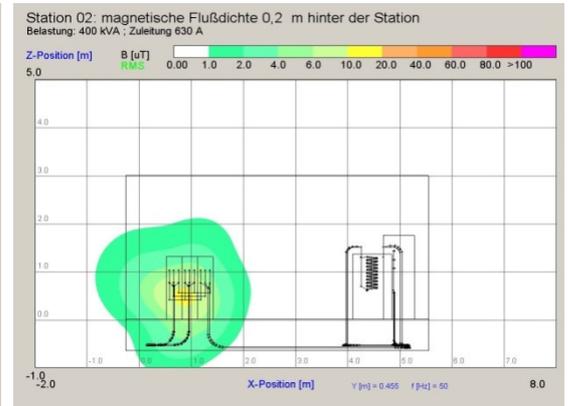


Abb. 5-12: Station 02 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

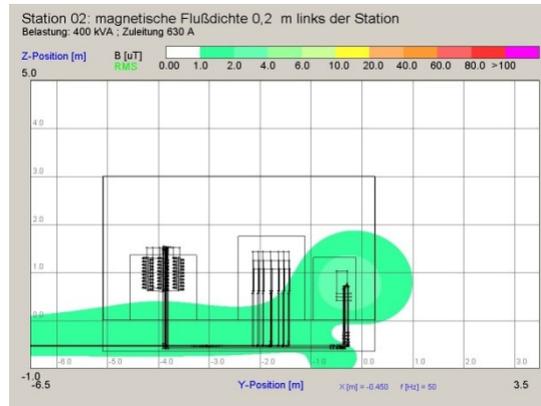


Abb. 5-13: Station 02 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

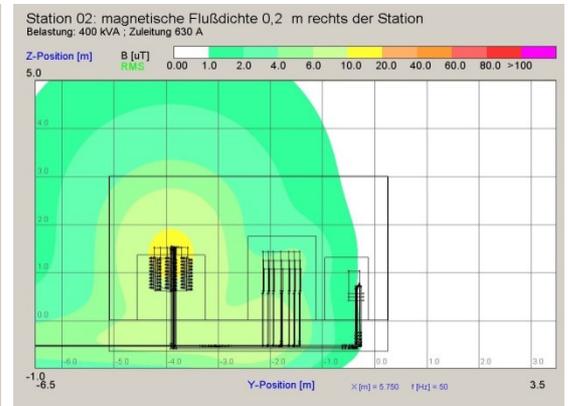


Abb. 5-14: Station 02 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

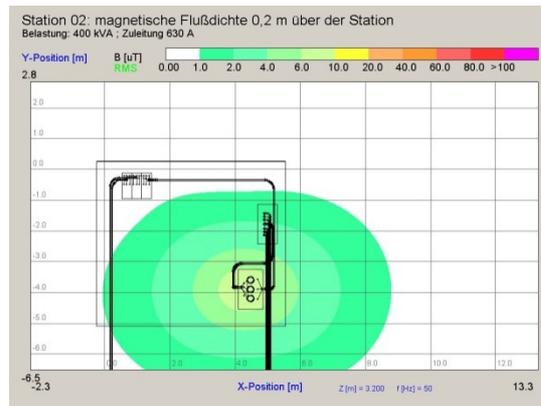


Abb. 5-15: Station 02 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

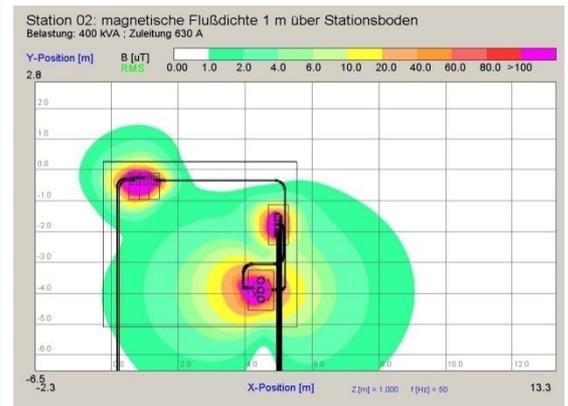


Abb. 5-16: Station 02 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

02	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	5,841
Hinten	11,233
Links	3,740
Rechts	11,370
Über	7,290

**Tab. 5-2:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 02

**Stationsdaten:**

1x Öltransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 400 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 4\%$

1x MS-Schaltanlage (luftisoliert)

1x NS-Verteilung

Breite: 5,80 m      Tiefe: 5,35 m      Grundfläche: 31,030 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 606,906 A (10 kV), 6x 96,225 A (0,4 kV)

**Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (11,370  $\mu\text{T}$ ) an der rechten Seite der Netzstation wird durch den Transformator verursacht.

### 5.4.3 Station 03

#### Berechnungsergebnisse:

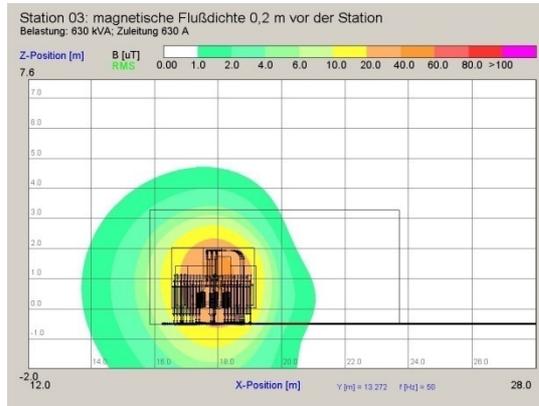


Abb. 5-17: Station 03 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

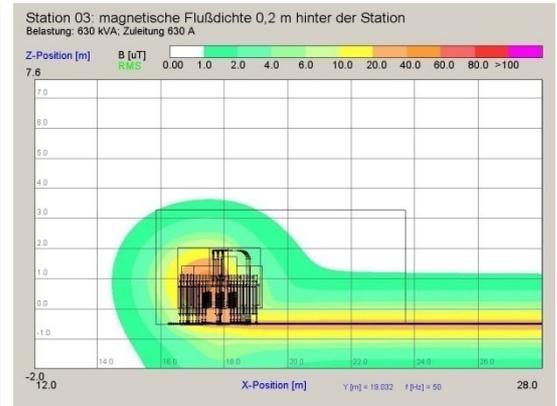


Abb. 5-18: Station 03 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

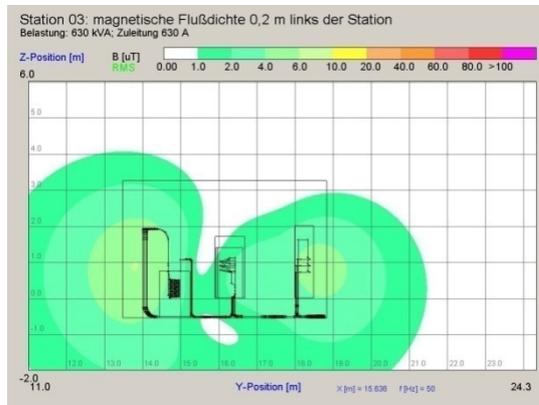


Abb. 5-19: Station 03 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

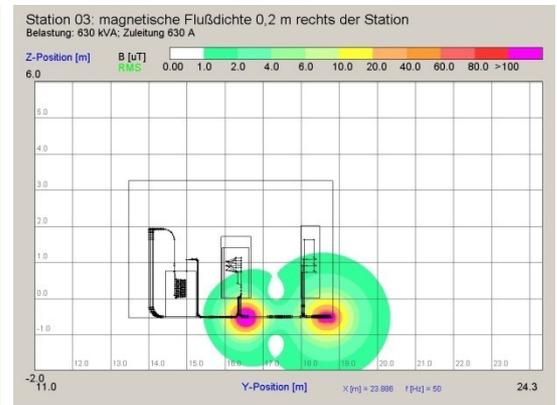


Abb. 5-20: Station 03 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

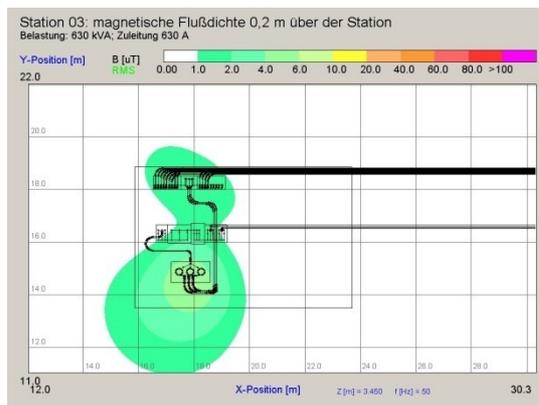


Abb. 5-21: Station 03 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

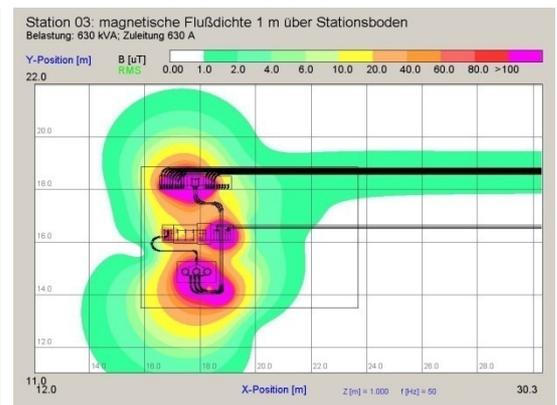


Abb. 5-22: Station 03 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

03	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	46,253
Hinten	52,759
Links	0,006
Rechts	0,284
Über	6,247

**Tab. 5-3:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 03

#### **Stationsdaten:**

1x Gießharztransformator,  $U_N = 20/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 630 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage (SF<sub>6</sub>-isoliert)

1x NS-Verteilung

Breite: 7,85 m      Tiefe: 5,36 m      Grundfläche: 42,080 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (20 kV)

Ableitung: 1x 611,800 A (20 kV), 13x 69,919 A (0,4 kV)

#### **Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum ( $52,759 \mu\text{T}$ ) an der Hinterseite der Netzstation wird durch die NS-Verteilung verursacht. Die Abgänge der NS-Verteilung in dieser Station sind ungleich um die mittige Einspeisung verteilt. Durch eine gleichmäßige Verteilung der Abgänge kann das magnetische Feld der Sammelschienen reduziert werden. Diese Maßnahme wird voraussichtlich das Maximum nur zu einem geringen Teil reduzieren, da es hauptsächlich von den Einspeiseleitungen der NS-Verteilung herrührt. Das Maximum kann effektiver mittels einer Versetzung der NS-Verteilung oder Schirmung der Einspeiseleitungen reduziert werden.

## 5.4.4 Station 04

### Berechnungsergebnisse:

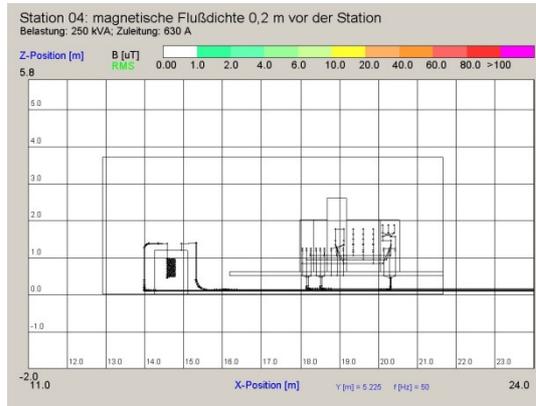


Abb. 5-23: Station 04 magn. Flußdichte 0,2 m vor der Station

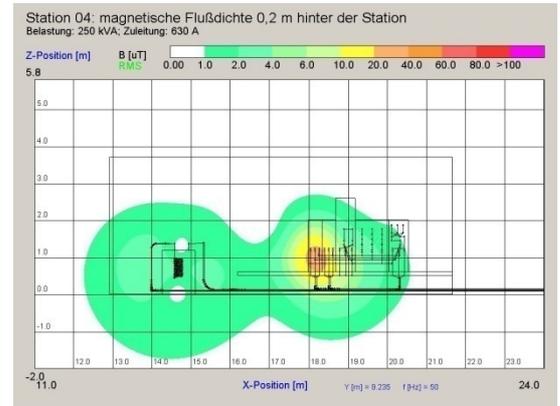


Abb. 5-24: Station 04 magn. Flußdichte 0,2 m hinter der Station

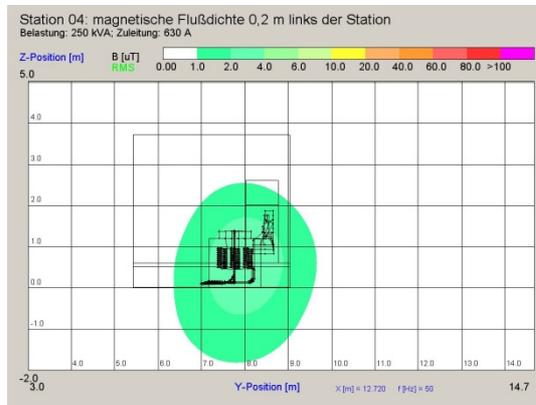


Abb. 5-25: Station 04 magn. Flußdichte 0,2 m links der Station

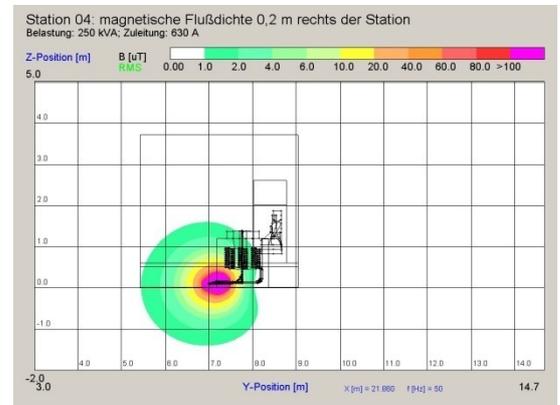


Abb. 5-26: Station 04 magn. Flußdichte 0,2 m rechts der Station

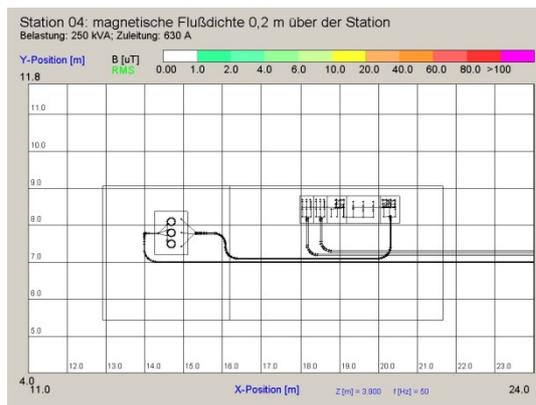


Abb. 5-27: Station 04 magn. Flußdichte 0,2 m über der Station

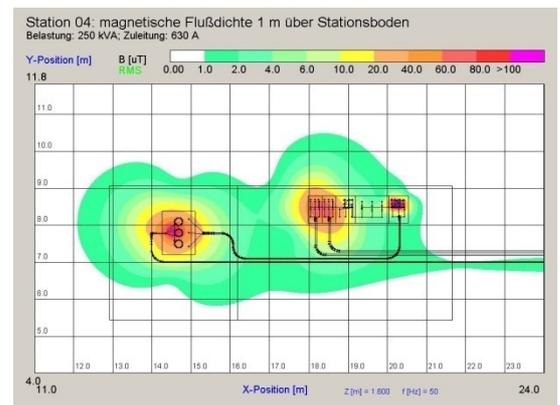


Abb. 5-28: Station 04 magn. Flußdichte 1 m über dem Stationsboden

04	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	0,898
Hinten	27,954
Links	2,938
Rechts	0,359
Über	0,586

**Tab. 5-4:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 04

**Stationsdaten:**

1x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 250 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 4\%$

1x MS-Schaltanlage (SF<sub>6</sub>-isoliert)

Breite: 8,74 m      Tiefe: 3,61 m      Grundfläche: 31,550 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 615,566 A (10 kV), 1x 360,844 (0,4 kV)

**Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (28,777  $\mu\text{T}$ ) an der Hinterseite der Netzstation wird durch das Einspeisefeld der MS-Schaltanlage verursacht. Mittels einer Versetzung der MS-Schaltanlage oder einer Schirmung der Einspeise- und Abgangsfelder zur Außenwand, kann das Maximum reduziert werden.

## 5.4.5 Station 05

### Berechnungsergebnisse:

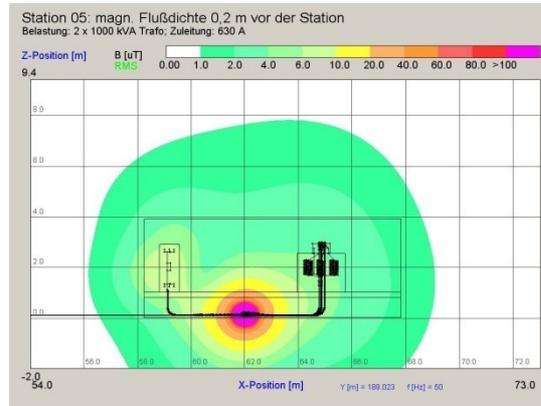


Abb. 5-29: Station 05 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

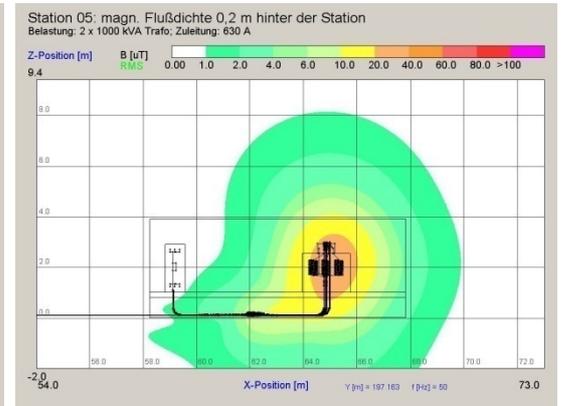


Abb. 5-30: Station 05 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

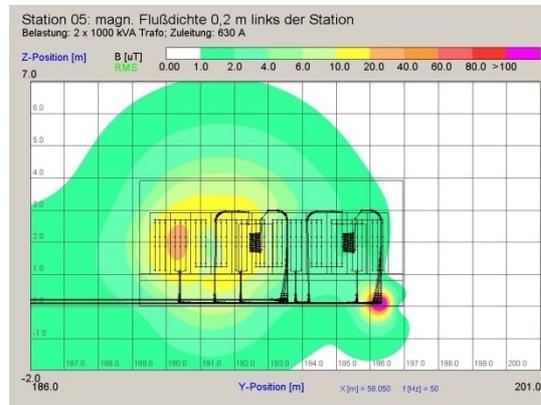


Abb. 5-31: Station 05 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

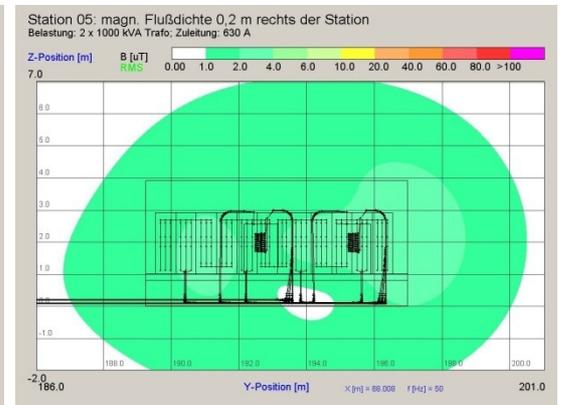


Abb. 5-32: Station 05 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

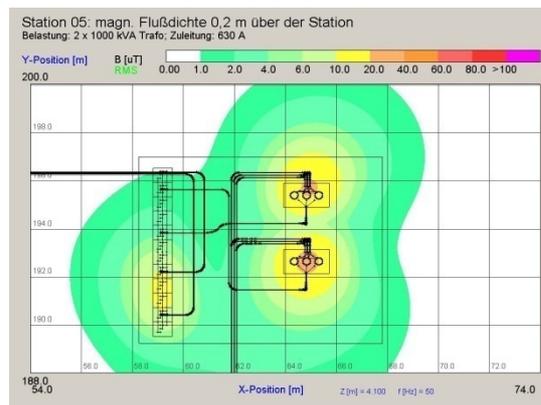


Abb. 5-33: Station 05 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

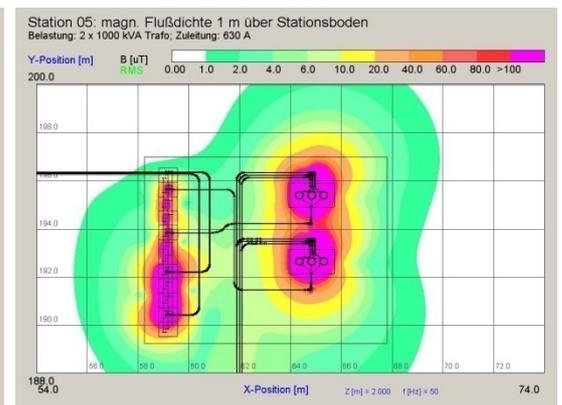


Abb. 5-34: Station 05 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

05	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	8,316
Hinten	33,912
Links	23,765
Rechts	3,256
Über	22,532

**Tab. 5-5:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 05

**Stationsdaten:**

2x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1000 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage (luftisoliert)

Breite: 9,56 m      Tiefe: 7,74 m      Grundfläche: 73,99  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 514,518 A (10 kV), 6x 480,952 A (0,4 kV)

**Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ). Das Maximum ( $33,912 \mu\text{T}$ ) an der Hinterseite der Netzstation wird durch den NS seitigen Abgang des hinteren Transformators verursacht. Durch eine Drehung des Transformator um 180 Grad, so dass die NS-Seite zur Stationsinnenseite zeigt, kann das Maximum reduziert werden, da die MS-Seite einen geringeren Strombelag hat und damit eine geringere Feldausbreitung.

### 5.4.6 Station 06

#### Berechnungsergebnisse:

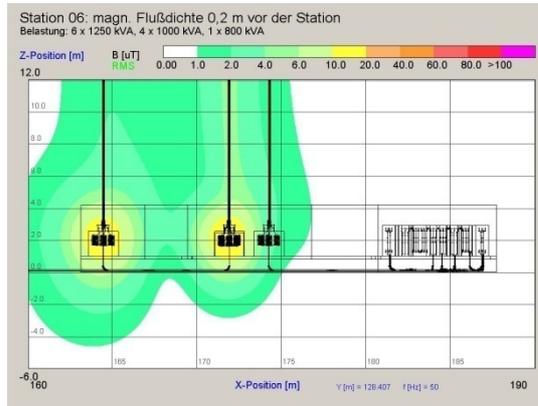


Abb. 5-35: Station 06 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

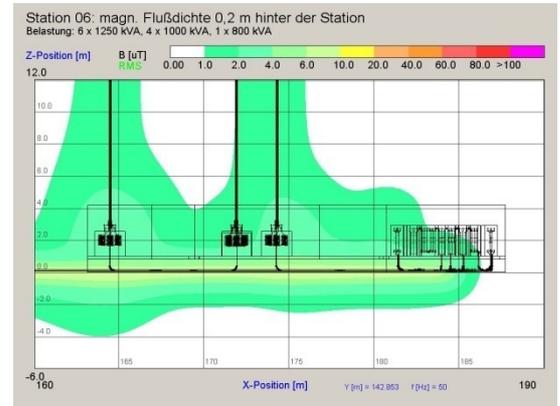


Abb. 5-36: Station 06 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

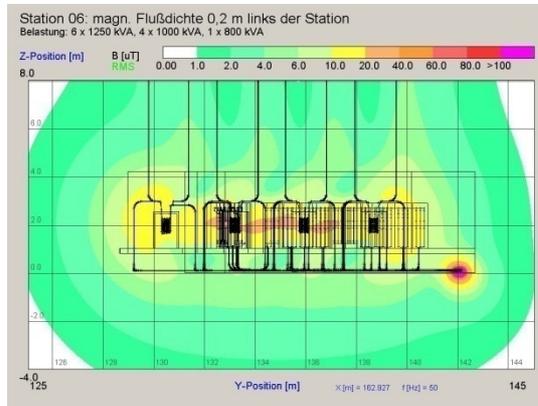


Abb. 5-37: Station 06 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

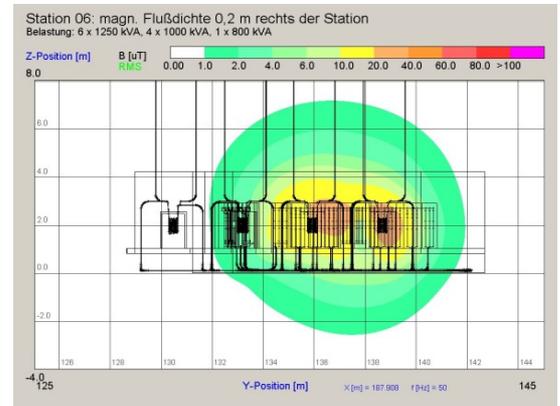


Abb. 5-38: Station 06 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

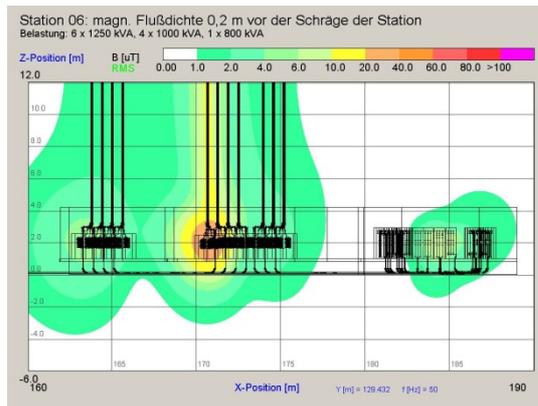


Abb. 5-39: Station 06 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Schräge der Station

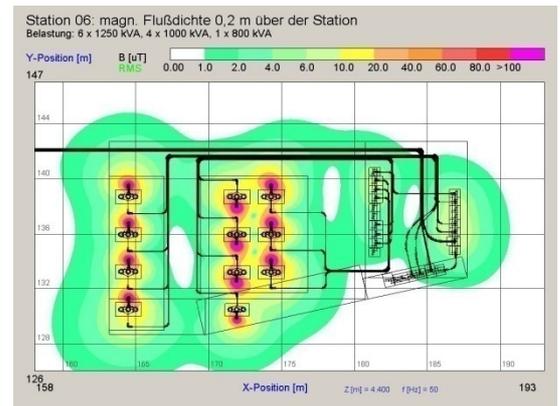
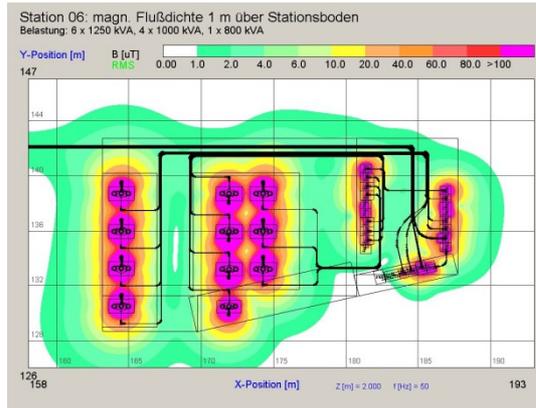


Abb. 5-40: Station 06 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station



**Abb. 5-41:** Station 01 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

06	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	16,229
Hinten	7,679
Links	22,021
Rechts	29,983
Schräge	37,939
Über	12,612

**Tab. 5-6:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 06

### Stationsdaten:

6x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1250 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

4x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1000 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 800 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

3x MS-Schaltanlage (luftisoliert)

Breite: 27,44 m Tiefe: 14,02 m Grundfläche: 311,6  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Kopf

Zuleitung: 4x 177,542 A (10 kV)

Ableitung: 18x 601,192 A , 12x 480,952 A , 3x 384,749 A (0,4 kV)

### Betrachtung:

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum ( $37,939 \mu\text{T}$ ) an der schrägen Seite der Netzstation wird durch den 800 kVA Transformator verursacht. Durch eine Drehung des Transformators um 180 Grad, so dass die NS-Seite zur Stationsinnenseite zeigt, kann das Maximum reduziert werden. Durch die große Abnahmeleistung ist eine Umrüstung zu einer Ringstation als unrealistisch anzusehen.

### 5.4.7 Station 07

#### Berechnungsergebnisse:

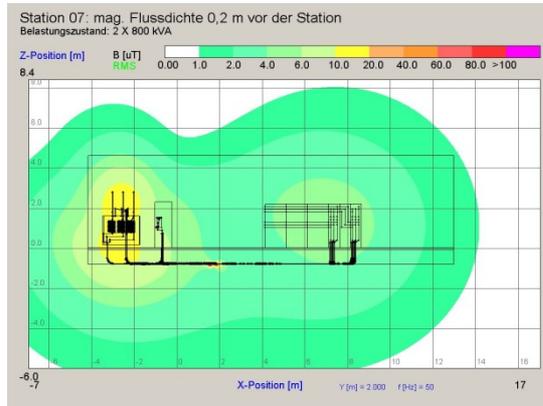


Abb. 5-42: Station 07 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

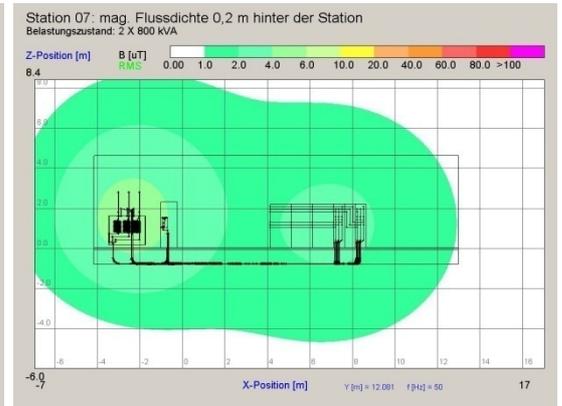


Abb. 5-43: Station 07 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

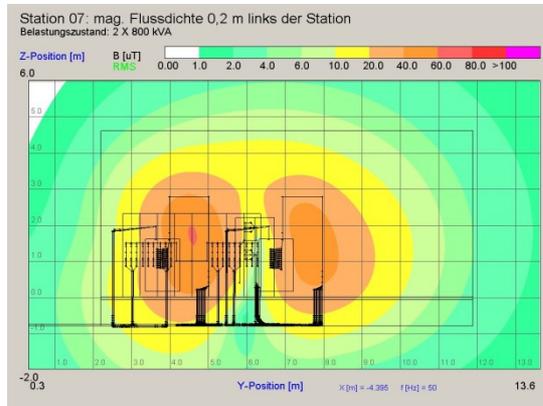


Abb. 5-44: Station 07 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

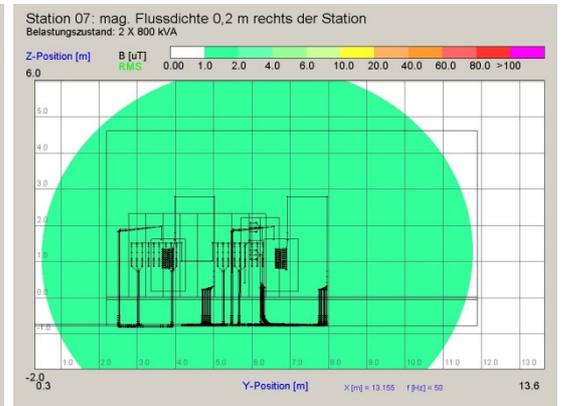


Abb. 5-45: Station 07 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

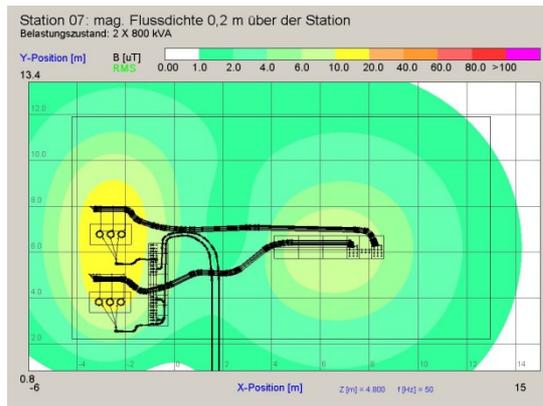


Abb. 5-46: Station 07 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

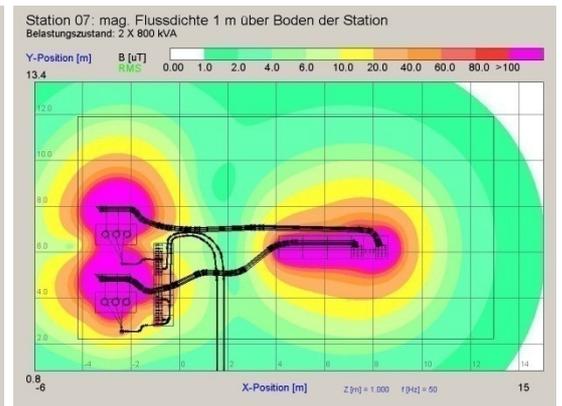


Abb. 5-47: Station 07 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

07	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	14,245
Hinten	5,045
Links	60,528
Rechts	1,912
Über	16,047

**Tab. 5-7:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 07

#### **Stationsdaten:**

2x Gießharztransformator,  $U_N = 20/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 800 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage ( $\text{SF}_6$ -isoliert)

1x NS-Verteilung

Breite: 17,20 m    Tiefe: 9,70 m    Grundfläche: 166,40  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Kopfstation

Zuleitung: 2x 23,11 A (10 kV)

#### **Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum ( $60,528 \mu\text{T}$ ) an der linken Seite der Netzstation wird durch die NS-Stromschienen an den Transformatoren verursacht. Im 1 m Schnitt (Abbildung 5-47) ist die große Feldausbreitung der NS-Stromschienen gut zu erkennen. Dies wird durch den großen Abstand der NS-Stromschienen und den hohen Sekundärstrom des Transformators verursacht. Mittels einer Abstandsreduzierung der NS-Stromschienen oder Ersetzen der NS-Stromschienen durch Kabel kann das Maximum reduziert werden. Bei einer Umstellung der Station auf Ringbetrieb ist keine gravierende Erhöhung der magnetischen Flussdichten an den Außenwänden zu erwarten, da die MS-Schaltanlage nicht an der Außenwand der Station platziert ist.

### 5.4.8 Station 08

#### Berechnungsergebnisse:

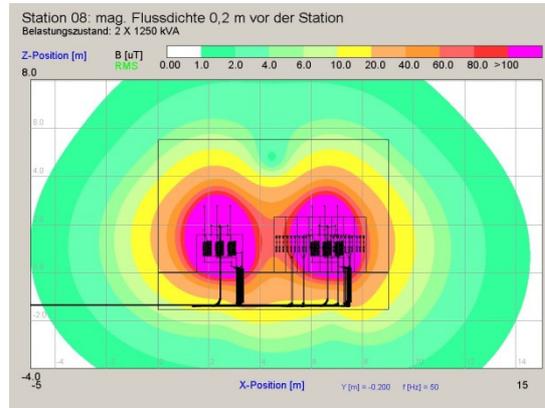


Abb. 5-48: Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

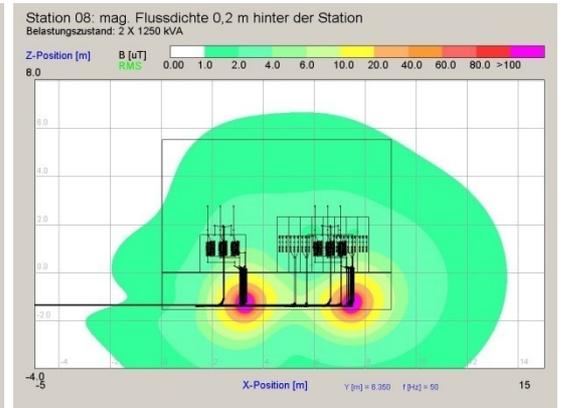


Abb. 5-49: Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

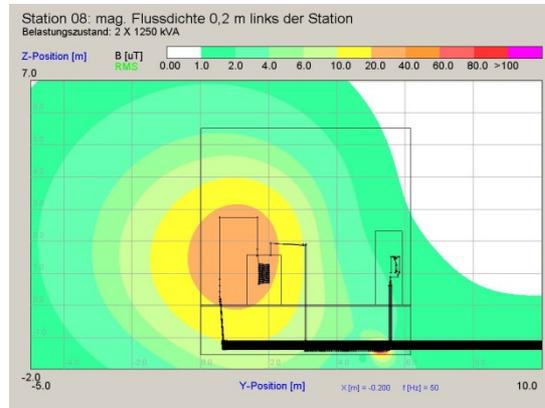


Abb. 5-50: Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

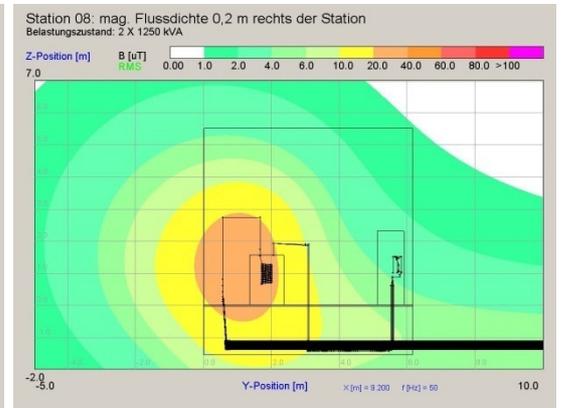


Abb. 5-51: Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

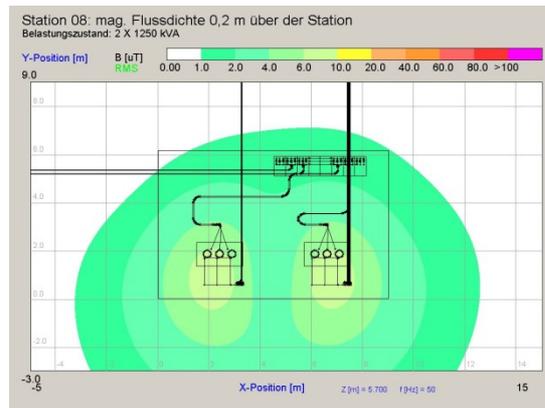


Abb. 5-52: Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

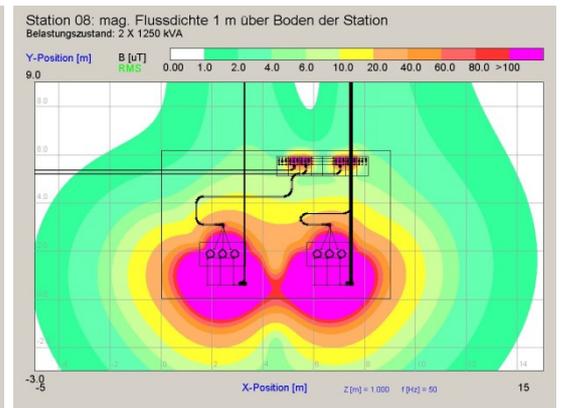


Abb. 5-53: Station 08 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

08	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	369,544
Hinten	5,250
Links	35,911
Rechts	31,371
Über	7,082

**Tab. 5-8:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 08

#### Stationsdaten:

2x Gießharztransformator,  $U_N = 20/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1250 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage (SF<sub>6</sub>-isoliert)

Breite: 9,00 m    Tiefe: 6,15 m    Grundfläche: 55,35 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Kopfstation

Zuleitung: 2x 36,1 A (10 kV)

Ableitung: 10x 360,715 A (0,4 kV)

#### Betrachtung:

Die Netzstation weist **eine** Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (369,544  $\mu\text{T}$ ) an der vorderen Seite der Netzstation wird durch die NS-Stromschienen an den Transformatoren verursacht. Im 1 m Schnitt (Abbildung 5-53) ist die große Feldausbreitung der NS-Stromschienen gut zu erkennen. Dies wird durch den großen Abstand der NS-Stromschienen und dem hohen Sekundärstrom des Transformators verursacht. Mittels einer Abstandsreduzierung der NS-Stromschienen oder Ersetzen der NS-Stromschienen durch Kabel kann das Maximum reduziert werden. Alternativ können die Transformatoren um 180 Grad gedreht werden, so dass die NS-Seiten zu Stationsinnenseite zeigen. Im Falle einer Umrüstung zu einer Ringstation würde sich das Maximum an der hinteren Seite der Station wesentlich erhöhen, da die MS-Schaltanlage an der Außenwand platziert ist und zusätzlich zum geringen Laststrom (72,2 A) auch den wesentlich höheren Ringstrom (557,8 A) trägt.

### 5.4.9 Station 09

#### Berechnungsergebnisse:

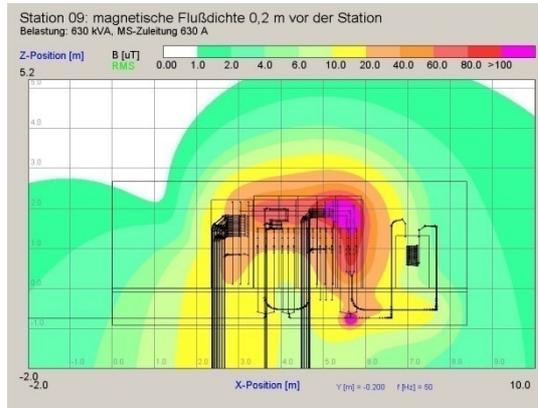


Abb. 5-54: Station 09 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

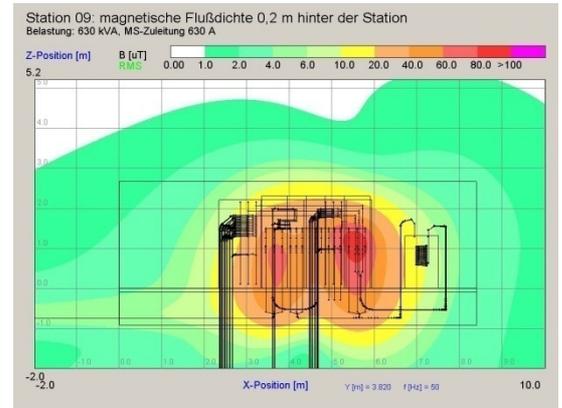


Abb. 5-55: Station 09 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

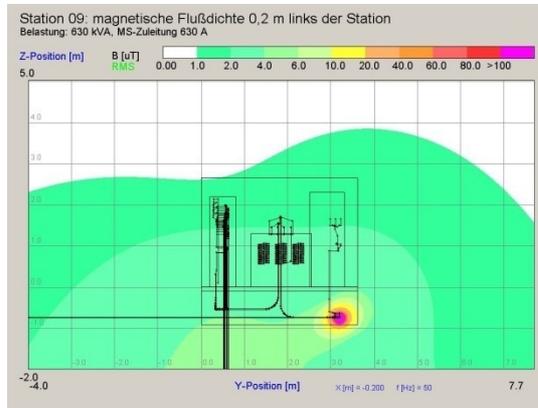


Abb. 5-56: Station 09 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

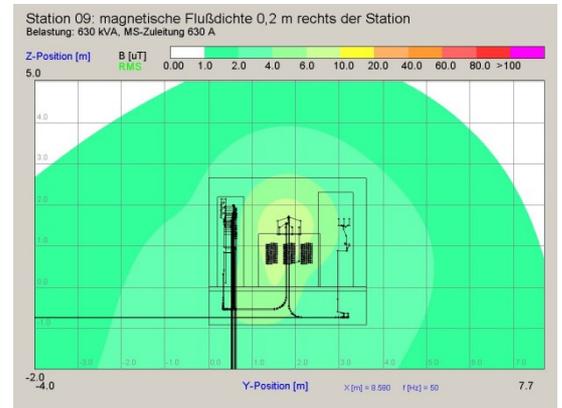


Abb. 5-57: Station 09 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

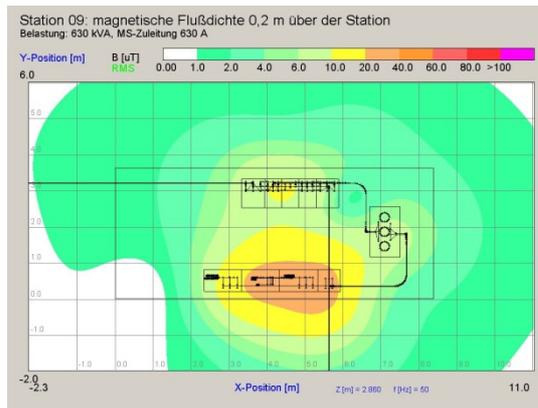


Abb. 5-58: Station 09 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

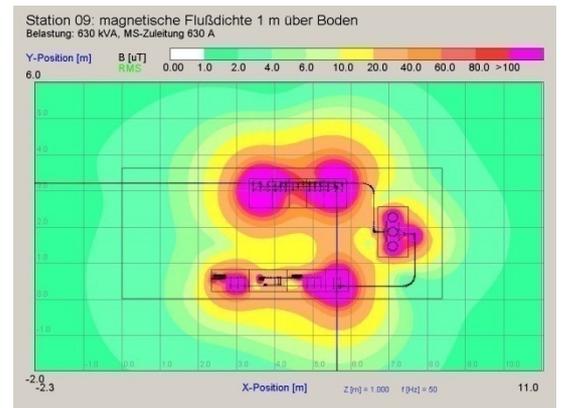


Abb. 5-59: Station 09 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

09	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	143,154
Hinten	93,844
Links	3,236
Rechts	8,001
Über	30,139

**Tab. 5-9:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 09

#### Stationsdaten:

1x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 630 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage ( $\text{SF}_6$ -isoliert)

1x NS-Verteilung

Breite: 8,38 m    Tiefe: 3,62 m    Grundfläche: 30,336  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 593,616 A (10 kV), 20x 45,466 A (0,4 kV)

#### Betrachtung:

Die Netzstation weist **eine** Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (143,154  $\mu\text{T}$ ) an der vorderen Seite der Netzstation wird durch die Einspeisung der NS-Verteilung verursacht. Das Maximum kann mittels einer Versetzung der NS-Verteilung oder Schirmung der Einspeisung unter den Grenzwert reduziert werden. An der hinteren Seite ist die magnetische Flussdichte (93,844  $\mu\text{T}$ ) nahe dem Grenzwert (100  $\mu\text{T}$ ) und wird durch die MS-Schaltanlage verursacht. Diese kann ebenfalls durch Versetzen der MS-Schaltanlage oder Schirmung reduziert werden.

### 5.4.10 Station 10

#### Berechnungsergebnisse:

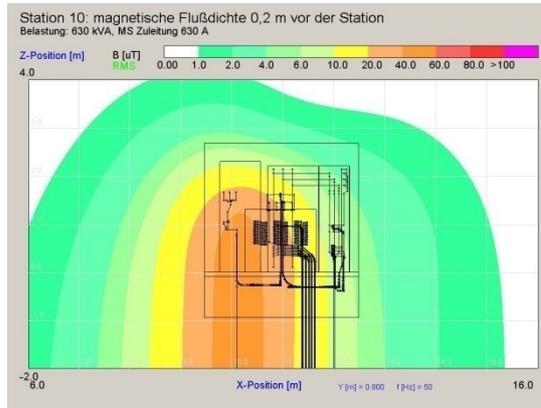


Abb. 5-60: Station 10 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

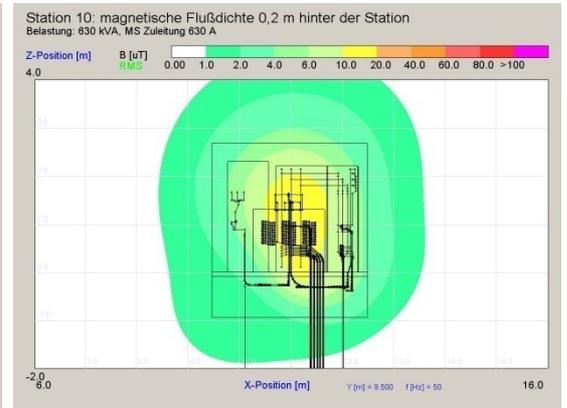


Abb. 5-61: Station 10 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

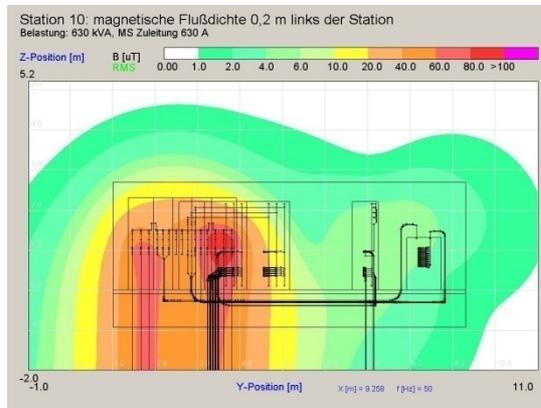


Abb. 5-62: Station 10 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

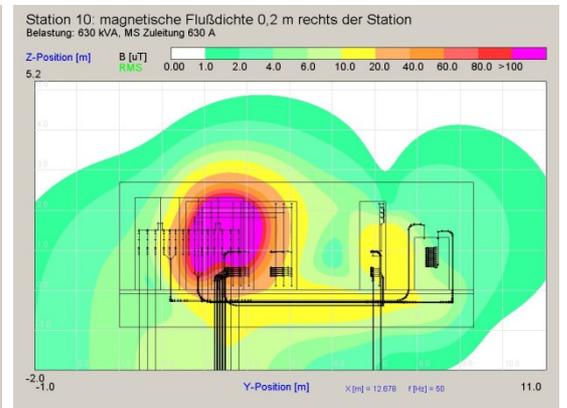


Abb. 5-63: Station 10 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

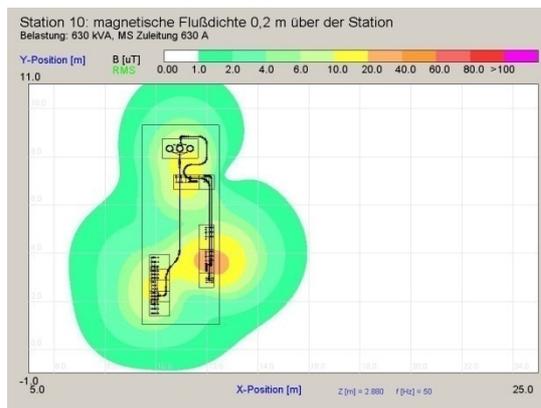


Abb. 5-64: Station 10 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

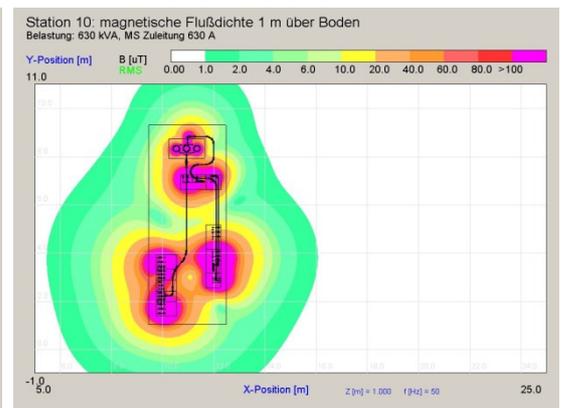


Abb. 5-65: Station 10 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

10	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	55,521
Hinten	16,718
Links	98,005
Rechts	221,233
Über	25,853

**Tab. 5-10:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 10

#### Stationsdaten:

1x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 630 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage ( $\text{SF}_6$ -isoliert)

2x NS-Verteilung

Breite: 3,62 m    Tiefe: 8,30 m    Grundfläche: 25,066  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 593,616 A (10 kV), 11x 82,663 A (0,4 kV)

#### Betrachtung:

Die Netzstation weist **eine** Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (221,233  $\mu\text{T}$ ) an der rechten Seite der Netzstation wird durch die NS-Verteilung verursacht. Durch eine Umverteilung des NS-Stromes, erst in die innere NS-Verteilung und darauf in die an der Außenwand, wird der Strombelag in der NS-Verteilung an der Außenwand reduziert und damit die magnetische Flussdichte. Hierdurch wird auch eine Einsparung von Leitungsmaterial erreicht. Alternativ kann die NS-Verteilung an der Außenwand versetzt oder geschirmt werden.

### 5.4.11 Station 11

#### Berechnungsergebnisse:

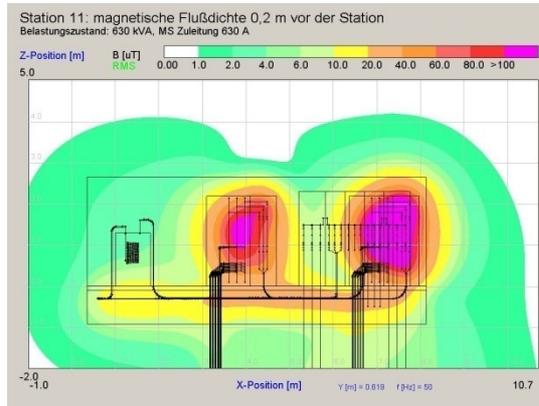


Abb. 5-66: Station 11 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

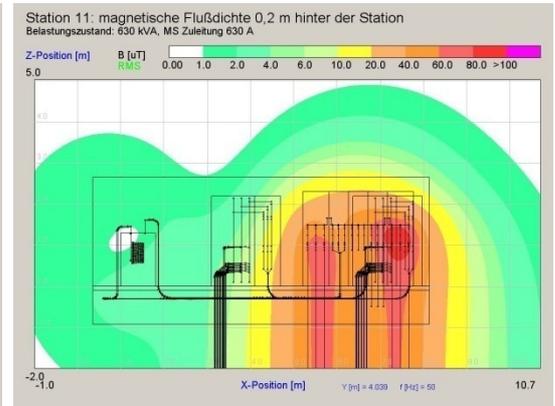


Abb. 5-67: Station 11 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

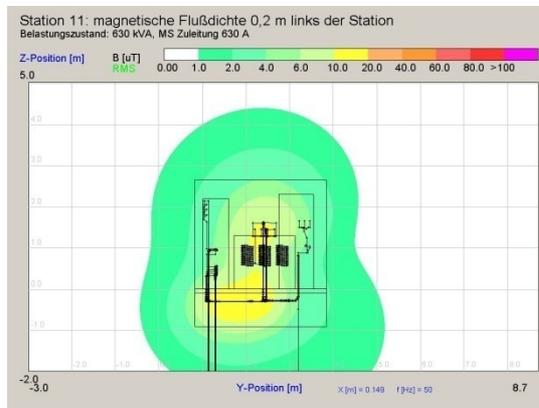


Abb. 5-68: Station 11 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

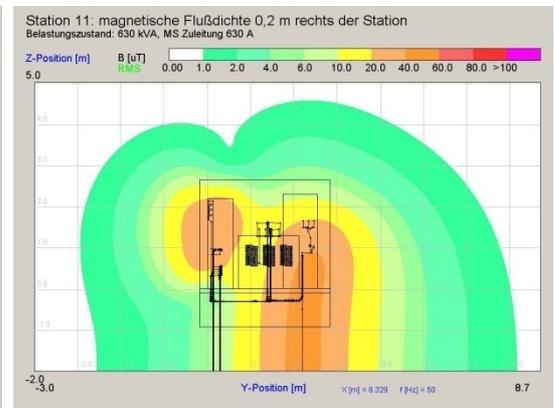


Abb. 5-69: Station 11 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

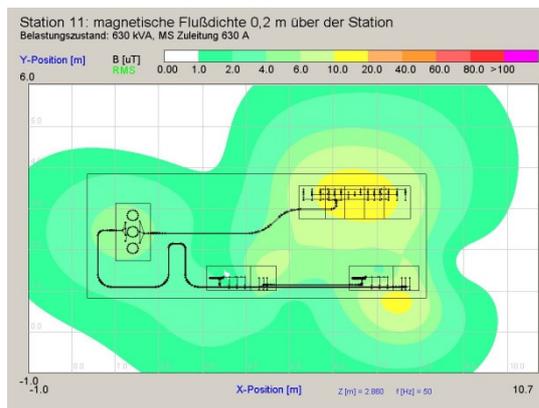


Abb. 5-70: Station 11 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

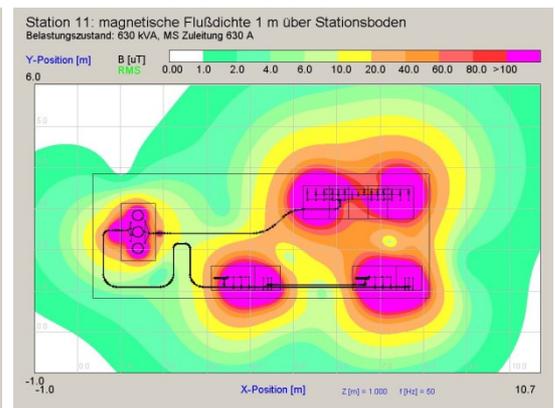


Abb. 5-71: Station 11 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

11	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	203,142
Hinten	96,666
Links	18,978
Rechts	49,808
Über	13,080

**Tab. 5-11:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 11

**Stationsdaten:**

1x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 630 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage ( $\text{SF}_6$ -isoliert)

2x NS-Verteilung

Breite: 7,78 m    Tiefe: 3,02 m    Grundfläche: 23,496  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 593,616 A (10 kV), 11x 82,663 A (0,4 kV)

**Betrachtung:**

Die Netzstation weist **eine** Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (203,142  $\mu\text{T}$ ) an der vorderen Seite der Netzstation wird durch die NS-Verteilung verursacht. Das Maximum kann mittels einer Versetzung der NS-Verteilungen oder Schirmung unter den Grenzwert reduziert werden.

## 5.4.12 Station 12

### Berechnungsergebnisse:

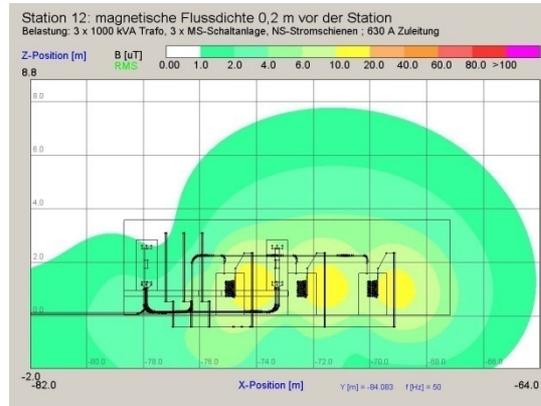


Abb. 5-72: Station 12 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

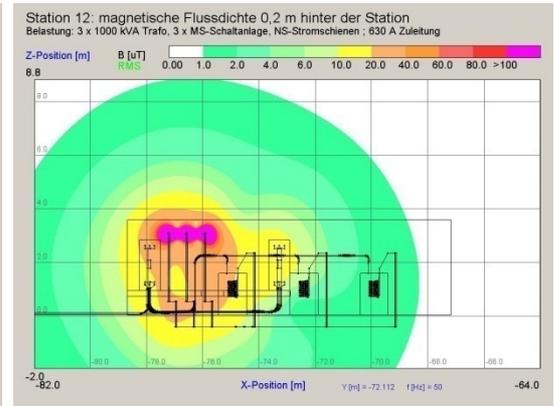


Abb. 5-73: Station 12 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

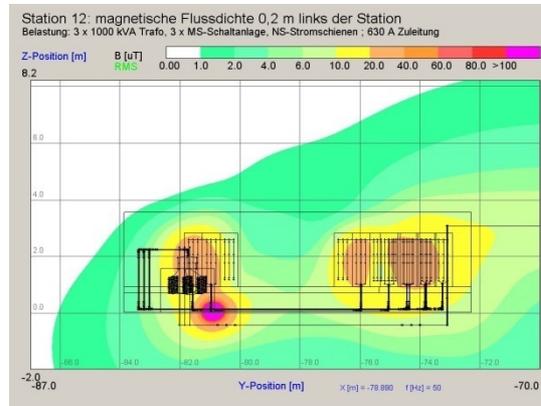


Abb. 5-74: Station 12 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

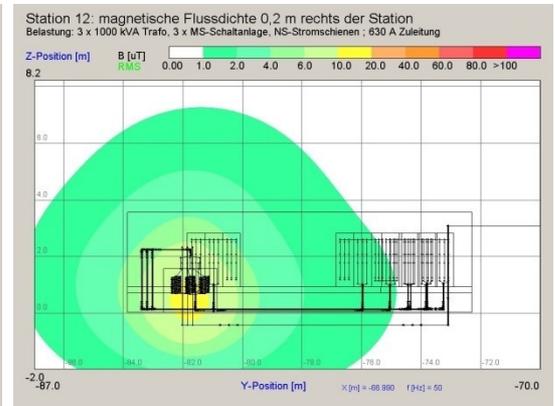


Abb. 5-75: Station 12 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

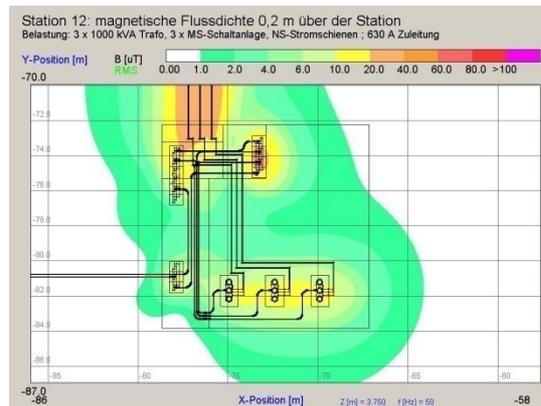


Abb. 5-76: Station 12 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

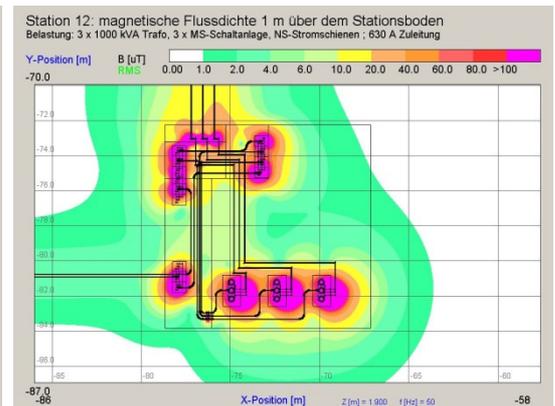


Abb. 5-77: Station 12 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

12	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	13,291
Hinten	14,315
Links	37,436
Rechts	11,326
Über	24,755

**Tab. 5-12:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 12

**Stationsdaten:**

3x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1000 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

3x MS-Schaltanlage (luftisoliert)

Breite: 11,50 m Tiefe: 11,57 m Grundfläche: 133,055 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 456,798 A (10 kV), 3x 1442,856 A (0,4 kV)

**Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (37,436  $\mu\text{T}$ ) an der linken Seite der Netzstation wird durch den linken Transformator verursacht. Durch eine Drehung des Transformators um 180 Grad, so dass die NS-Seite zur Stationsinnenseite zeigt, kann das Maximum reduziert werden.

### 5.4.13 Station 13

#### Berechnungsergebnisse:

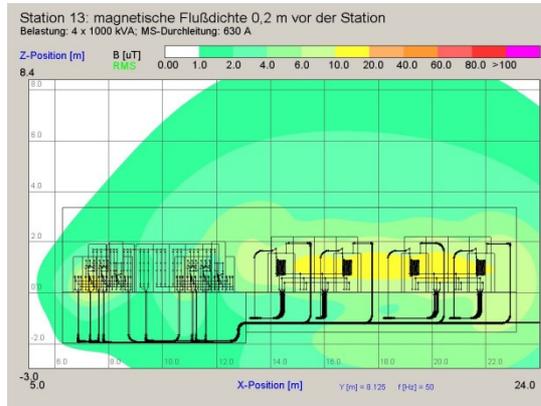


Abb. 5-78: Station 13 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

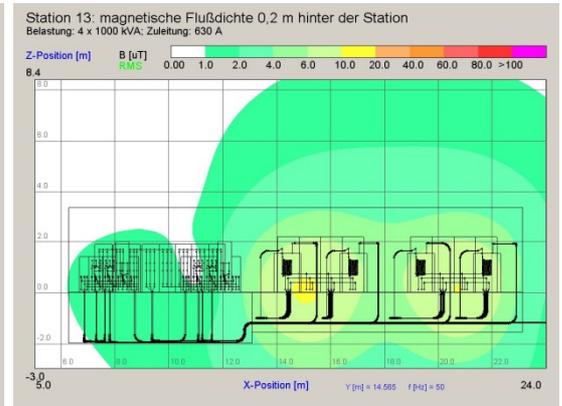


Abb. 5-79: Station 13 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

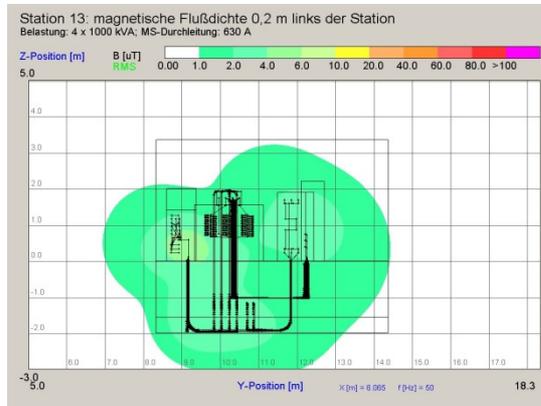


Abb. 5-80: Station 13 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

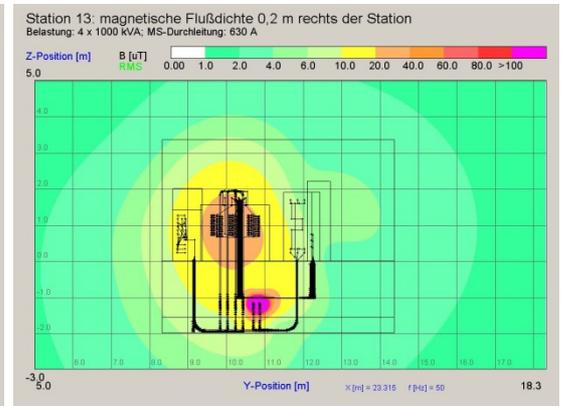


Abb. 5-81: Station 13 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

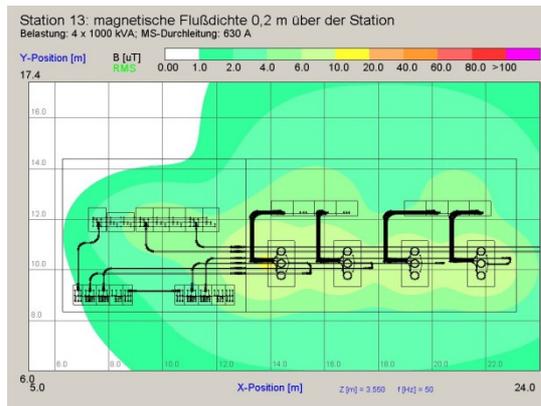


Abb. 5-82: Station 13 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

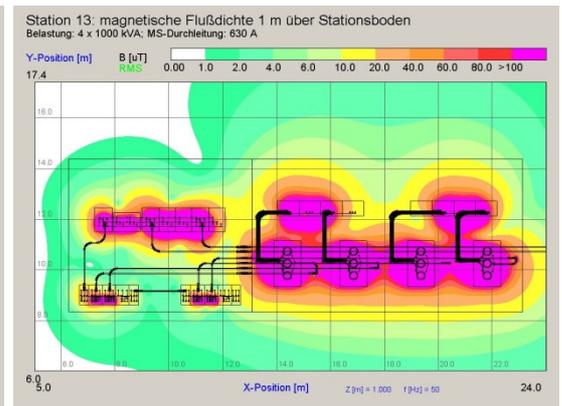


Abb. 5-83: Station 13 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

13	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	13,571
Hinten	10,470
Links	5,898
Rechts	27,911
Über	10,282

**Tab. 5-13:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 13

**Stationsdaten:**

4x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1000 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

2x MS-Schaltanlage ( $\text{SF}_6$ -isoliert)

1x MS-Schaltanlage (luftisoliert)

2x NS-Verteilung

Breite: 16,84 m Tiefe: 6,04 m Grundfläche: 101,714 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 399,041 A (10 kV), 2x 2886,759 A (0,4 kV)

**Betrachtung:**

Die Netzstation weist keine Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum ( $27,911 \mu\text{T}$ ) an der rechten Seite der Netzstation wird durch die MS-Zuleitung am ganz rechts positionierten Transformator verursacht. Durch eine Abstandsvergrößerung der MS-Zuleitung zur Stationsaußenwand kann das Maximum reduziert werden. Hierdurch wird auch eine geringe Einsparung von Leitungsmaterial erreicht. Das Maximum kann auch alternativ mittels Schirmung der rechten Außenwand reduziert werden.

## 5.4.14 Station 14

### Berechnungsergebnisse:

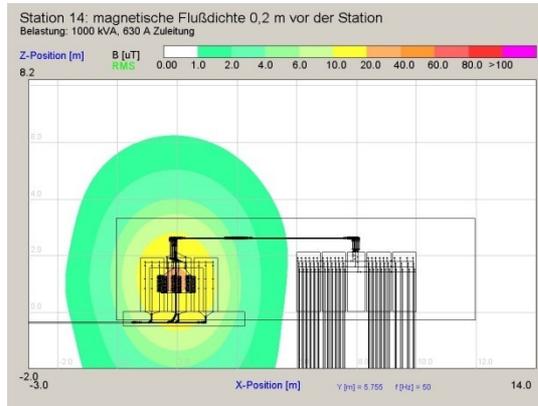


Abb. 5-84: Station 14 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

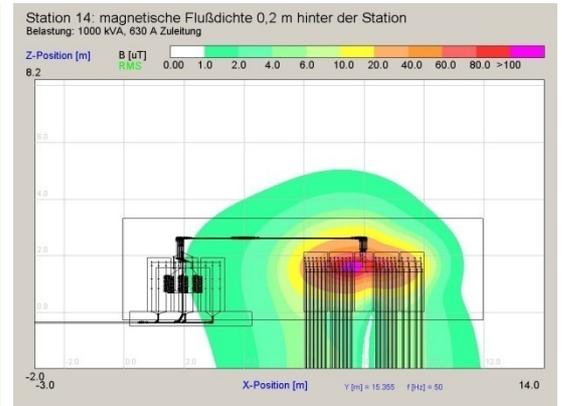


Abb. 5-85: Station 14 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

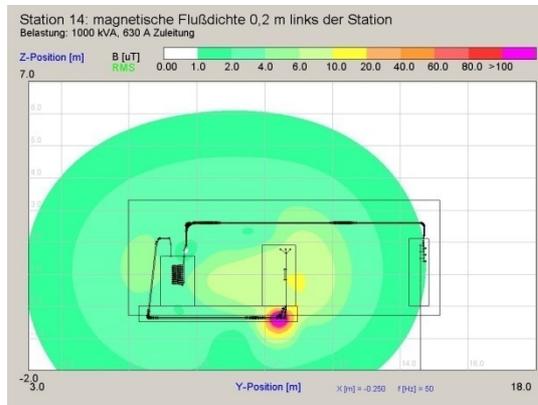


Abb. 5-86: Station 14 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

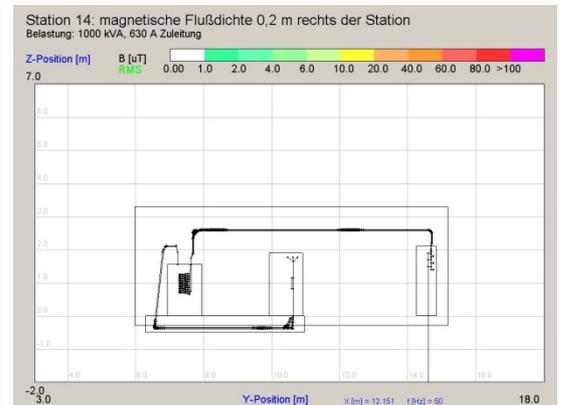


Abb. 5-87: Station 14 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

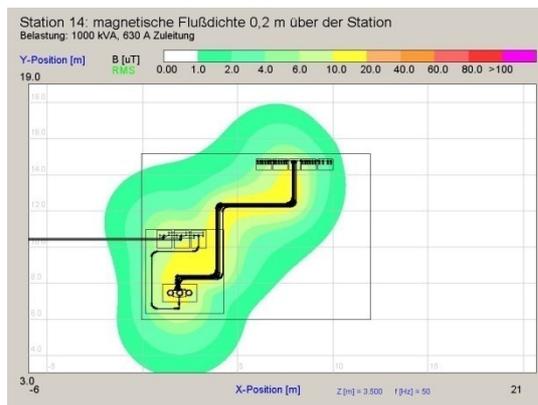


Abb. 5-88: Station 14 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

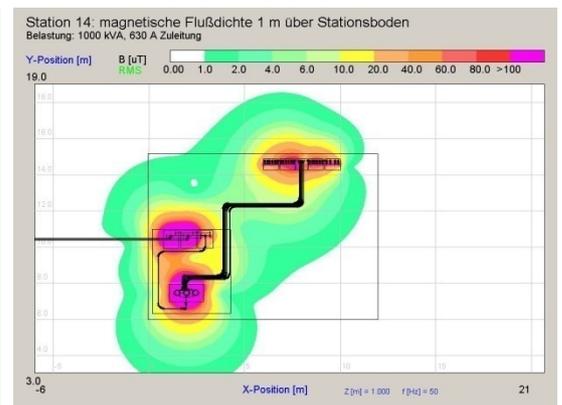


Abb. 5-89: Station 14 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

14	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	21,418
Hinten	112,704
Links	13,376
Rechts	0,516
Über	16,620

**Tab. 5-14:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 14

#### Stationsdaten:

1x Gießharztransformator,  $U_N = 20/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 1000 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage (luftisoliert)

1x NS-Verteilung

Breite: 12,00 m Tiefe: 9,20 m Grundfläche: 110,400 m<sup>2</sup>

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (20 kV)

Ableitung: 1x 601,130 A (20 kV), 22x 65,584 A (0,4 kV)

#### Betrachtung:

Die Netzstation weist **eine** Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (112,704  $\mu\text{T}$ ) an der hinteren Seite der Netzstation wird durch die NS-Verteilung verursacht. Durch eine gleichmäßige Verteilung der Abgänge um die mittige Einspeisung der NS-Verteilung, kann der Strombelag im rechten Teil und damit das von ihm ausgehende magnetische Feld reduziert werden. Das Maximum kann jedoch effektiver mittels einer Versetzung der NS-Verteilungen oder Schirmung unter den Grenzwert reduziert werden.

## 5.4.15 Station 15

### Berechnungsergebnisse:

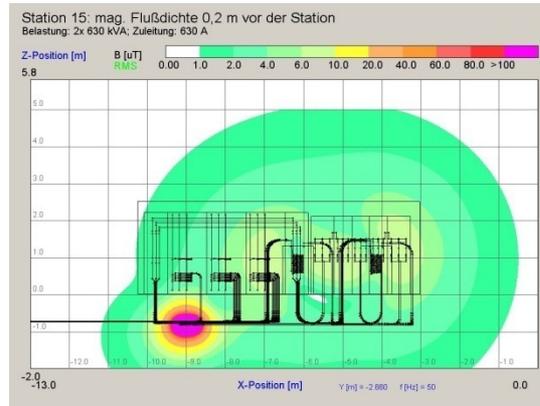


Abb. 5-90: Station 15 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

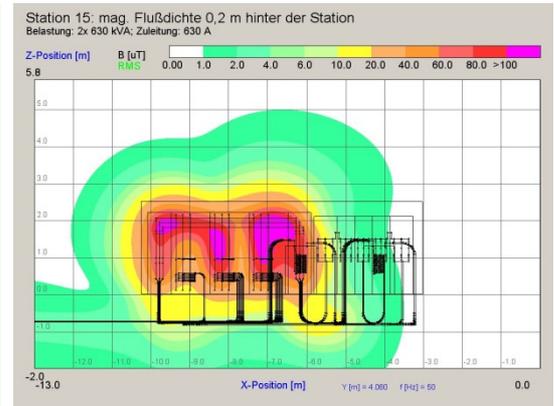


Abb. 5-91: Station 15 magn. Flussdichte 0,2 m hinter der Station

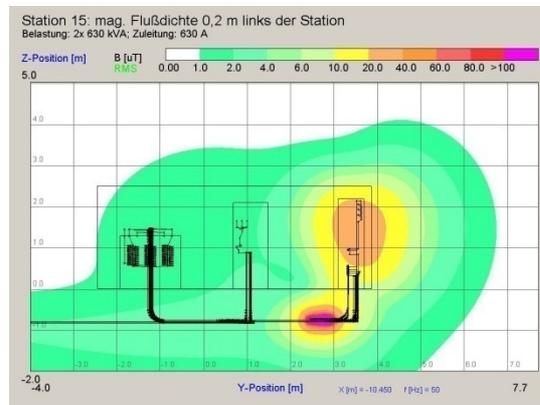


Abb. 5-92: Station 15 magn. Flussdichte 0,2 m links der Station

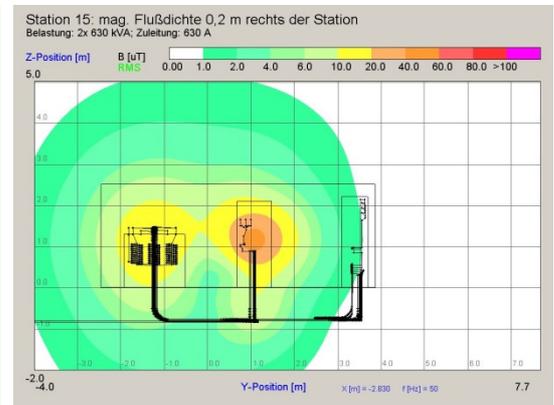


Abb. 5-93: Station 15 magn. Flussdichte 0,2 m rechts der Station

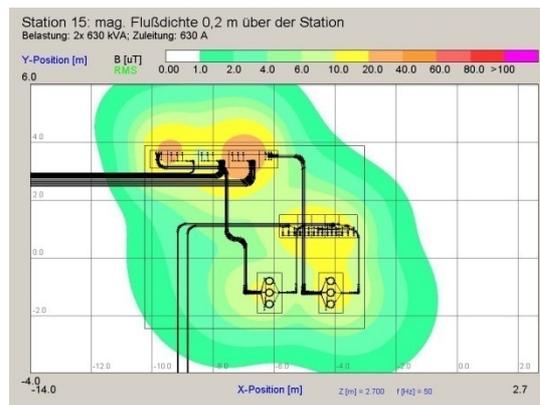


Abb. 5-94: Station 15 magn. Flussdichte 0,2 m über der Station

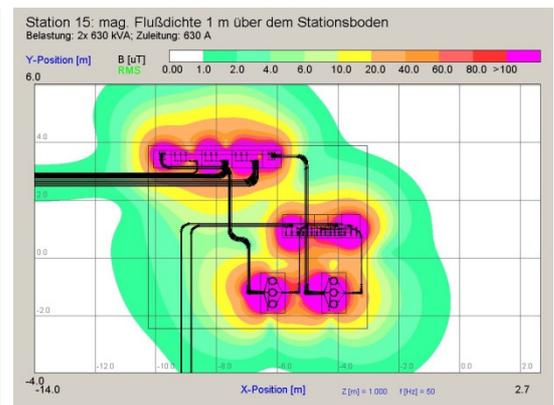


Abb. 5-95: Station 15 magn. Flussdichte 1 m über dem Stationsboden

15	Maximum ( $\mu\text{T}$ )
Vorne	9,290
Hinten	129,395
Links	32,674
Rechts	49,336
Über	33,886

**Tab. 5-15:** Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 15

#### Stationsdaten:

2x Gießharztransformator,  $U_N = 10/0,4 \text{ kV}$ ,  $S_N = 630 \text{ kVA}$ ,  $U_K = 6\%$

1x MS-Schaltanlage ( $\text{SF}_6$ -isoliert)

1x NS-Verteilung

Breite: 7,22 m    Tiefe: 6,32 m    Grundfläche: 45,630  $\text{m}^2$

Betriebsweise: Ring

Zuleitung: 1x 630 A (10 kV)

Ableitung: 1x 557,254 A (10 kV), 11x 165,332 A (0,4 kV)

#### Betrachtung:

Die Netzstation weist **eine** Grenzwertüberschreitung nach der 26. BImSchV ( $> 100 \mu\text{T}$ ) auf. Das Maximum (129,395  $\mu\text{T}$ ) an der hinteren Seite der Netzstation wird durch die NS-Verteilung verursacht. Durch eine Versetzung der NS-Verteilungen oder Schirmung kann die magnetische Flussdichte unter den Grenzwert reduziert werden.

#### 5.4.16 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

	Vor	Hinter	Links	Recht	Über
Station 01	0,887	8,912	0,002	1,763	0,434
Station 02	5,841	11,233	3,740	11,370	7,290
Station 03	46,253	52,759	0,006	0,284	6,247
Station 04	0,898	27,954	2,938	0,359	0,568
Station 05	8,316	33,912	23,765	3,256	22,532
Station 06	16,229/37,939	7,679	22,021	29,983	12,612
Station 07	14,245	5,045	60,528	1,912	16,047
Station 08	369,544	5,250	35,911	31,371	7,082
Station 09	143,154	93,844	3,236	8,001	30,139
Station 10	55,521	16,718	98,005	221,233	25,853
Station 11	203,142	96,666	18,978	49,808	13,080
Station 12	13,291	14,315	37,436	11,326	24,755
Station 13	13,571	10,470	5,898	27,911	10,282
Station 14	21,418	112,704	13,376	0,516	16,620
Station 15	9,290	129,395	32,674	49,336	33,886

**Tab. 5-16:** Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse (Anlagen mit Grenzwertüberschreitungen grau markiert, Grenzwertüberschreitungen (> 100 µT) rot markiert)

In Hinsicht auf den Verursacher des Maximums ist bei 13,333 % (2 von 15) der Stationen ist die MS-Schaltanlage, bei 40 % (6 von 15) der Stationen ist die NS-Verteilung und bei 46,666 % (7 von 15) der Stationen einer der Transformatoren bzw. deren Anbindung der Verursacher des Maximums.

Aus der Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse ist zu erkennen, dass 40 % (6 von 15) der untersuchten Netzstationen eine Grenzwertüberschreitung im Bezug auf die 26. BImSchV (> 100 µT) aufweisen, wenn die entsprechende Seite ein maßgeblicher Immissionsort ist. Davon sind fünf durch die NS-Verteilung und eine durch die NS-Sammelschienen am Transformator verursacht.

In jeden Fall kann das auftretende Maximum durch eine Abstandsvergrößerung des Verursachers zu Außenwand reduziert werden. Dieses sollte aber bereits in der Planungsphase geschehen, da eine nachträgliche Versetzung im Regelfall teurer ist, als eine Schirmung zur Außenwand. Folglich ist eine Schirmung bei bereits im Betrieb befindlichen Netzstationen zu empfehlen, um eine Grenzwerteinhaltung zu erreichen.

## **6 Zusammenfassung**

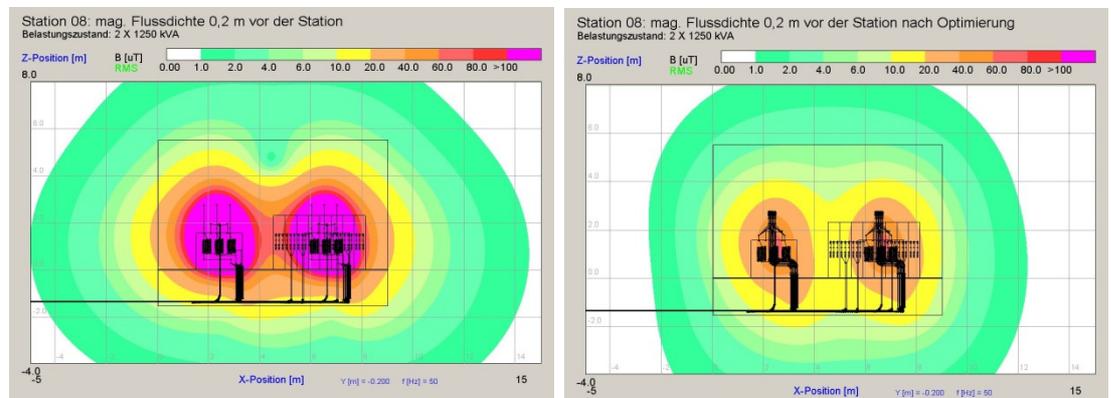
### **6.1 Auswertung**

Bei 60 % (9 von 15) der Netzstationen sind keine Grenzwertüberschreitungen festzustellen. Sie können damit im Sinne der 26. BImSchV ohne Veränderungen eingesetzt werden. Eine Optimierung der Stationen ist in den vorgegebenen Betriebsweisen nicht notwendig. Die restlichen 6 Netzstationen dürfen in Deutschland (Geltungsbereich der 26. BImSchV) nur betrieben werden, wenn die Seite, die die Grenzwertüberschreitung aufweist nicht an einen nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt bestimmten Ort grenzt. Im Falle, dass die fragliche Seite an einen nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt bestimmten Ort grenzt, muss die entsprechende Netzstation hinsichtlich der Grenzwerteinhaltung optimiert werden.

Auffällig ist, dass bei der Mehrzahl der Netzstationen die MS-Schaltanlage und die NS-Verteilung trotz des teilweise großen Platzangebotes an der Außenwand positioniert sind. Dies führt bei fünf Netzstationen zu einer Grenzwertüberschreitung durch die NS-Verteilung. Hier empfiehlt sich eine Optimierung der Planung der Netzstation hinsichtlich der mittigen Aufstellung bzw. Abstandsvergrößerung zur Außenwand der NS-Verteilung. Die an der Außenwand platzierten MS-Schaltanlagen führten in keinem der Fälle zu einer Grenzwertüberschreitung. Daraus lässt sich schließen, dass die Aufstellung der MS-Schaltanlage an der Außenwand in Hinsicht auf die 26. BImSchV unkritisch ist.

In den 1 m Schnitten gut zu erkennen, dass das magnetische Feld der Transformatoren immer in Richtung der NS-Seite ausgedehnter ist. Dies ist darin begründet, dass die NS-Seite einen höheren Strom trägt als die MS-Seite. Trotz dieser Erkenntnis wurde zum Teil nicht darauf geachtet, den NS-Teil des Transformators zur Innenseite zu positionieren. Dieser Umstand hat

aber in nur bei der Station 08 zu einer Grenzwertüberschreitung geführt, wobei hier nicht der Transformator das primäre Problem darstellt, sondern die NS seitig angeschlossenen Sammelschienen, die einen sehr großen Abstand untereinander aufweisen. Durch den Einsatz von Kabeln wird in diesem Fall eine starke Reduzierung der magnetischen Flussdichte erreicht. In den folgenden Abbildungen 5-48 und 6-1 ist diese Reduzierung gegenübergestellt. Hierzu wurden in Abbildung 6-1 bei den Transformatoren der Station 08 die Sammelschienen durch jeweils fünf Kabel ersetzt. Hierdurch wurde die maximale magnetische Flussdichte im Abstand von 0,2 m vor der Station von 369,544  $\mu\text{T}$  auf 65,807  $\mu\text{T}$  reduziert.



**Abb. 5-48:** Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station

**Abb. 6-1:** Station 08 magn. Flussdichte 0,2 m vor der Station nach Optimierung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass nicht alle aktuellen Stationen nach EMV-Gesichtspunkten geplant und gebaut werden. An dieser Stelle gibt es noch weitgehende Verbesserungsmöglichkeiten. Besonders bei der Platzierung der NS-Verteilung ist eine Aufstellung an der Stationsaußenwand als ungünstig anzusehen. Dieses ist bei den MS-Schaltanlagen nicht der Fall, sollte aber in Hinsicht auf die Störbeeinflussung von Geräten bedacht werden. Bei der Platzierung der Transformatoren sollte darauf geachtet werden, diese mit der Unterspannungsseite zur Stationsmitte positioniert werden. Die Verbindung der Anlagenteile sollte bevorzugt mittels Kabel durchgeführt bzw. geplant werden. Des weiteren zeigt die Untersuchung, dass die NS-Seite, aufgrund der höheren Ströme der größere Problemfaktor darstellt und hier besonderes Augenmerk auf die Positionierung und die Art der Verbindungen gelegt werden sollte.

## 6.2 Ausblick

Aus der Untersuchung ging unter anderen hervor, dass die MS-Schaltanlage und die NS-Verteilung bevorzugt an den Außenwänden positioniert werden. Hinsichtlich dieser Erkenntnis ist eine Untersuchung dieser Anlagenteile auf ihre magnetische Exposition zu ihrer Rückseite zweckmäßig. Weiterhin bleibt eine Untersuchung der 1  $\mu$ T Exposition der Anlagen offen, um eine Aussage über die Störbeeinflussung von elektronischen Geräten (z. B. CRT-Monitore und med. Geräte) in der Nähe der Stationen treffen zu können. Die Untersuchung der 1  $\mu$ T Exposition kann auch Bezug nehmen auf die Schweizer NISV, die einen Immissionsgrenzwert (IGW) von 1  $\mu$ T an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) vorgibt.

## 7 Abkürzungen

FGEU mbH	Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH
EMVU	Elektromagnetische Umweltverträglichkeit
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
26. BImSchV	sechszwanzigste Bundes-Immissionsschutzverordnung (Deutschland)
BGV B11	Berufsgenossenschaftliche Verordnung B11 (Deutschland)
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
DIN	Deutsches Institut für Normung
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
EN	Europäische Norm
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
IP	International Protection
LSC	Loss of Service Continuity
PM	partition of metal

PI	partition of insulating material
TSK	typgeprüfte Schaltgerätekombinationen
PTSK	partiell typgeprüfte Schaltgerätekombinationen
NF	Niederfrequenz
HF	Hochfrequenz
CAD	Computer Aided Design
NISV	Verordnung über Schutz vor nichtionisierender Strahlung (Schweiz)
OMEN	Ort mit empfindlicher Nutzung

## 8 Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$H$	Magnetische Feldstärke	A/m
$E$	Elektrische Feldstärke	V/m
$B$	Magnetische Flussdichte	T, Vs/m <sup>2</sup>
$D$	Elektrische Flussdichte	C/m <sup>2</sup>
$J$	Gesamtstromdichte	A/m <sup>2</sup>
$J_L$	Leiterstromdichte	A/m <sup>2</sup>
$J_V$	Verschiebestromdichte	A/m <sup>2</sup>
$I$	Effektivwert eines Wechselstromes	A
$i(t)$	Zeitabhängiger Wert eines Wechselstromes	A
$\hat{i}$	Spitzenwert eines Wechselstromes	A
$A$	Fläche	m <sup>2</sup>
$r$	Radius	m
$s$	Strecke	m
$l$	Länge	m
$t$	Zeit	s

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$f$	Frequenz	Hz
$Q$	Elektrische Ladung	C
$\Phi$	Magnetischer Fluss	Wb
$\rho$	Elektrische Raumladungsdichte	C/m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	Permittivität (Dielektrische Leitfähigkeit)	As/Vm
$\varepsilon_0$	Elektrische Feldkonstante	$8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm
$\varepsilon_r$	Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl)	1
$\kappa$	Konduktivität (Elektrische Leitfähigkeit)	m/Ωmm <sup>2</sup>
$\mu$	Permeabilität (Magnetische Leitfähigkeit)	Vs/Am
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
$\mu_r$	Permeabilitätszahl	1

## 9 Tabellen- und Bilderverzeichnis

Tabellen:

<b>Tab. 2-1</b>	Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen nach Anhang 1 der 26. BImSchV	s. 4
<b>Tab. 2-2</b>	Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen nach Anhang 2 der 26. BImSchV	s. 4
<b>Tab. 5-1</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 01	s. 31
<b>Tab. 5-2</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 02	s. 33
<b>Tab. 5-3</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 03	s. 35
<b>Tab. 5-4</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 04	s. 37
<b>Tab. 5-5</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 05	s. 39
<b>Tab. 5-6</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 06	s. 41
<b>Tab. 5-7</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 07	s. 43
<b>Tab. 5-8</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 08	s. 45
<b>Tab. 5-9</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 09	s. 47
<b>Tab. 5-10</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 10	s. 49
<b>Tab. 5-11</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 11	s. 51

<b>Tab. 5-12</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 12	s. 53
<b>Tab. 5-13</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 13	s. 55
<b>Tab. 5-14</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 14	s. 57
<b>Tab. 5-15</b>	Maximalwerte der magnetischen Flussdichten der Berechnungsflächen von Station 15	s. 59
<b>Tab. 5-16</b>	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	s. 60

## Abbildungen:

<b>Abb. 2-1</b>	Bezugsebenen für Rechenwerte einer Elektromsplananlage Drauf- und Seitenansicht	s. 3
<b>Abb. 2-2</b>	Zulässige Werte der elektrischen Feldstärke in den Expositionsbereichen 1 und 2 sowie im Bereich erhöhter Exposition nach BGV B11	s. 5
<b>Abb. 2-3</b>	Zulässige Werte der magnetischen Flussdichte in den Expositionsbereichen 1 und 2 sowie im Bereich erhöhter Exposition nach BGV B11	s. 6
<b>Abb. 3-1</b>	Beispiele zur Anordnung der Anlagenteile in Netzstationen	s. 15
<b>Abb. 3-2</b>	Öltransformator hermetisch Gekapselt (links), Gießharztransformator ohne Kapselung (rechts)	s. 16
<b>Abb. 3-3</b>	MS-Schaltanlage: gemeinsam Gekapselt (links), anreihbares Einzelfeld (rechts)	s. 17
<b>Abb. 3-4</b>	SF <sub>6</sub> -isoliertes Kabelanschlussfeld Typ 8DH10 der Firma SIEMENS	s. 18
<b>Abb. 3-5</b>	luftisoliertes Kabelanschlussfeld Typ ZS8 der Firma ABB	s. 18
<b>Abb. 4-1</b>	Feldreduzierung bei Verringerung des Leiterabstandes von 175 mm (links) zu 90 mm (rechts)	s. 21
<b>Abb. 4-2</b>	Gegenüberstellung Symmetrische (links) und ebene (rechts) Leiteranordnung	s. 21
<b>Abb. 4-3</b>	Stromverteilung auf der Sammelschiene bei linker (links) und mittiger (rechts) Einspeisung	s. 22
<b>Abb. 5-1</b>	Netzstation in 3D mit Isolinien	s. 26
<b>Abb. 5-2</b>	Mobiltelefonanlage in 3D mit Berechnungsfläche	s. 26
<b>Abb. 5-3</b>	3D Darstellung einer Netzstation in WinField®	s. 27
<b>Abb. 5-4</b>	Berechnungsflächen	s. 28
<b>Abb. 5-5</b>	Station 01 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 30
<b>Abb. 5-6</b>	Station 01 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 30
<b>Abb. 5-7</b>	Station 01 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 30
<b>Abb. 5-8</b>	Station 01 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 30
<b>Abb. 5-9</b>	Station 01 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 30
<b>Abb. 5-10</b>	Station 01 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 30
<b>Abb. 5-11</b>	Station 02 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 32
<b>Abb. 5-12</b>	Station 02 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 32
<b>Abb. 5-13</b>	Station 02 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 32
<b>Abb. 5-14</b>	Station 02 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 32
<b>Abb. 5-15</b>	Station 02 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 32
<b>Abb. 5-16</b>	Station 02 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 32
<b>Abb. 5-17</b>	Station 03 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 34
<b>Abb. 5-18</b>	Station 03 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 34
<b>Abb. 5-19</b>	Station 03 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 34
<b>Abb. 5-20</b>	Station 03 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 34
<b>Abb. 5-21</b>	Station 03 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 34
<b>Abb. 5-22</b>	Station 03 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 34
<b>Abb. 5-23</b>	Station 04 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 36
<b>Abb. 5-24</b>	Station 04 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 36

<b>Abb. 5-25</b>	Station 04 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 36
<b>Abb. 5-26</b>	Station 04 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 36
<b>Abb. 5-27</b>	Station 04 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 36
<b>Abb. 5-28</b>	Station 04 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 36
<b>Abb. 5-29</b>	Station 05 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 38
<b>Abb. 5-30</b>	Station 05 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 38
<b>Abb. 5-31</b>	Station 05 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 38
<b>Abb. 5-32</b>	Station 05 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 38
<b>Abb. 5-33</b>	Station 05 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 38
<b>Abb. 5-34</b>	Station 05 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 38
<b>Abb. 5-35</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 40
<b>Abb. 5-36</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 40
<b>Abb. 5-37</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 40
<b>Abb. 5-38</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 40
<b>Abb. 5-39</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Schräge der Station	s. 40
<b>Abb. 5-40</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 40
<b>Abb. 5-41</b>	Station 06 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 41
<b>Abb. 5-42</b>	Station 07 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 42
<b>Abb. 5-43</b>	Station 07 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 42
<b>Abb. 5-44</b>	Station 07 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 42
<b>Abb. 5-45</b>	Station 07 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 42
<b>Abb. 5-46</b>	Station 07 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 42
<b>Abb. 5-47</b>	Station 07 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 42
<b>Abb. 5-48</b>	Station 08 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 44/62
<b>Abb. 5-49</b>	Station 08 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 44
<b>Abb. 5-50</b>	Station 08 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 44
<b>Abb. 5-51</b>	Station 08 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 44
<b>Abb. 5-52</b>	Station 08 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 44
<b>Abb. 5-53</b>	Station 08 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 44
<b>Abb. 5-54</b>	Station 09 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 46
<b>Abb. 5-55</b>	Station 09 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 46
<b>Abb. 5-56</b>	Station 09 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 46
<b>Abb. 5-57</b>	Station 09 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 46
<b>Abb. 5-58</b>	Station 09 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 46
<b>Abb. 5-59</b>	Station 09 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 46
<b>Abb. 5-60</b>	Station 10 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 48
<b>Abb. 5-61</b>	Station 10 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 48
<b>Abb. 5-62</b>	Station 10 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 48
<b>Abb. 5-63</b>	Station 10 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 48
<b>Abb. 5-64</b>	Station 10 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 48
<b>Abb. 5-65</b>	Station 10 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 48
<b>Abb. 5-66</b>	Station 11 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 50
<b>Abb. 5-67</b>	Station 11 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 50
<b>Abb. 5-68</b>	Station 11 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 50
<b>Abb. 5-69</b>	Station 11 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 50
<b>Abb. 5-70</b>	Station 11 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 50
<b>Abb. 5-71</b>	Station 11 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 50
<b>Abb. 5-72</b>	Station 12 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 52
<b>Abb. 5-73</b>	Station 12 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 52
<b>Abb. 5-74</b>	Station 12 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 52
<b>Abb. 5-75</b>	Station 12 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 52
<b>Abb. 5-76</b>	Station 12 magnetische Flussdichte 0,2 m über der Station	s. 52
<b>Abb. 5-77</b>	Station 12 magnetische Flussdichte 1 m über dem Stationsboden	s. 52
<b>Abb. 5-78</b>	Station 13 magnetische Flussdichte 0,2 m vor der Station	s. 54
<b>Abb. 5-79</b>	Station 13 magnetische Flussdichte 0,2 m hinter der Station	s. 54
<b>Abb. 5-80</b>	Station 13 magnetische Flussdichte 0,2 m links der Station	s. 54
<b>Abb. 5-81</b>	Station 13 magnetische Flussdichte 0,2 m rechts der Station	s. 54



<b>Abb. 10-44</b>	Station 15 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden	s. 91
<b>Abb. 10-45</b>	Station 15 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden	s. 92

## 10 Anhang

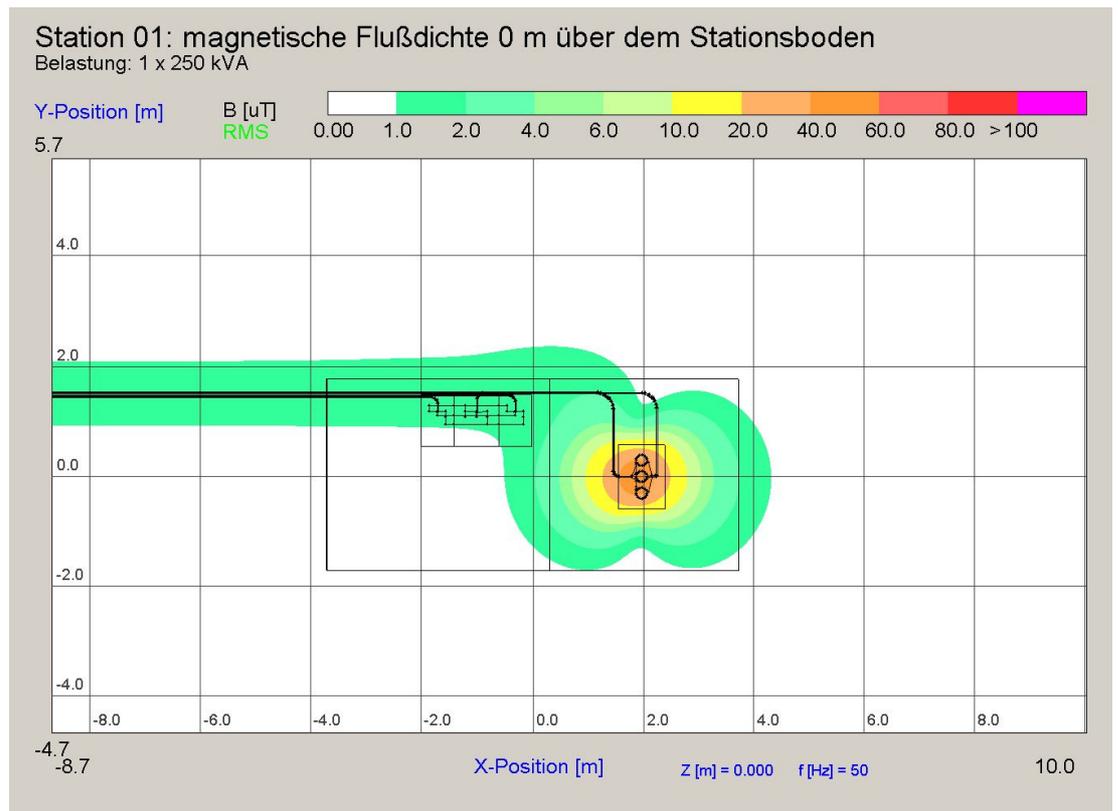


Abb. 10-1: Station 01 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

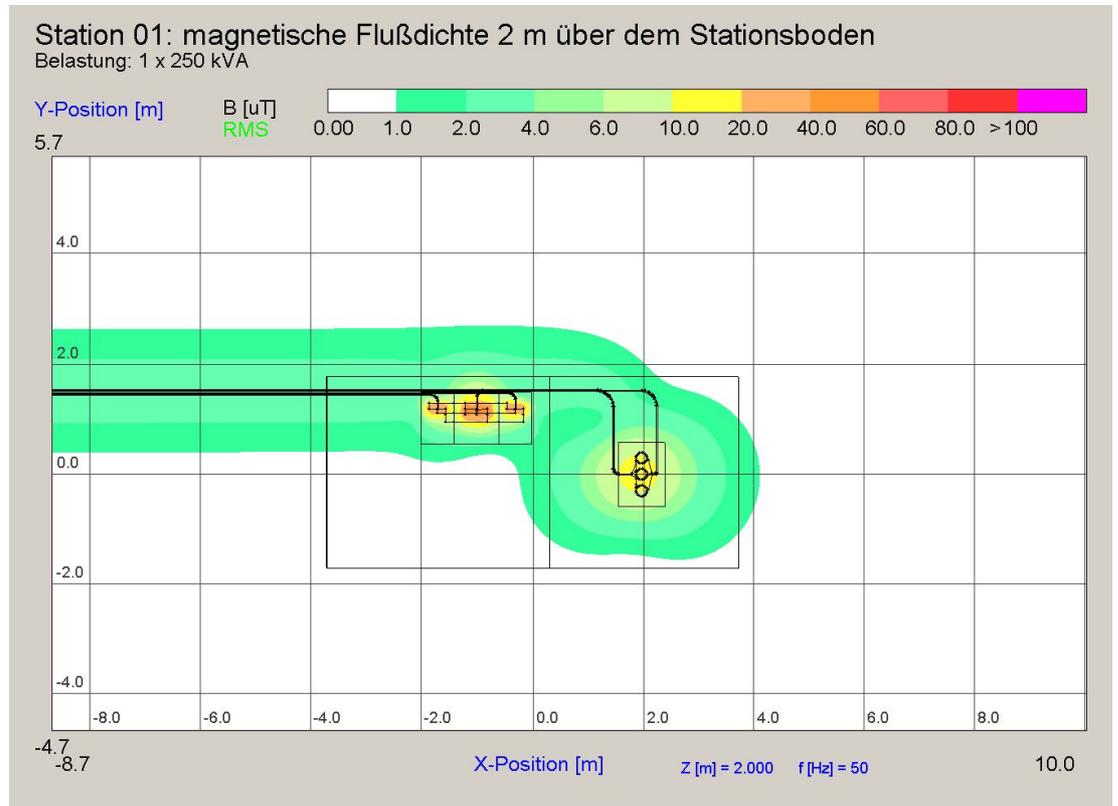


Abb. 10-2: Station 01 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

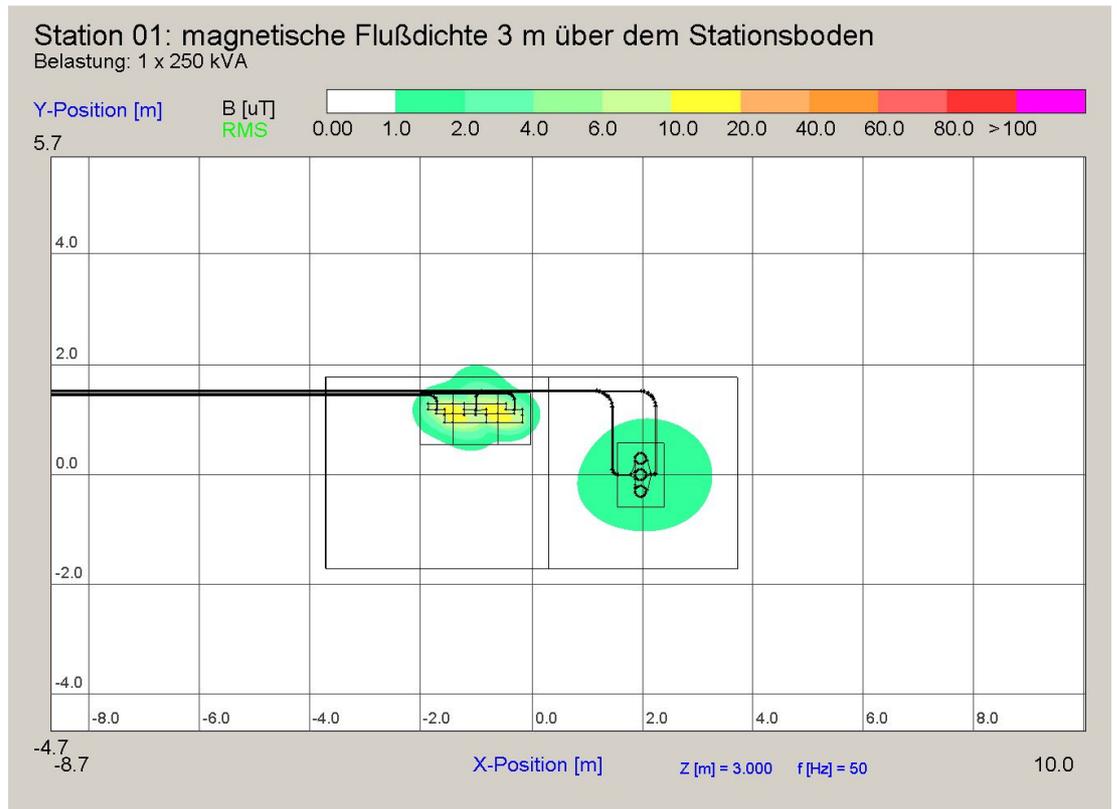


Abb. 10-3: Station 01 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

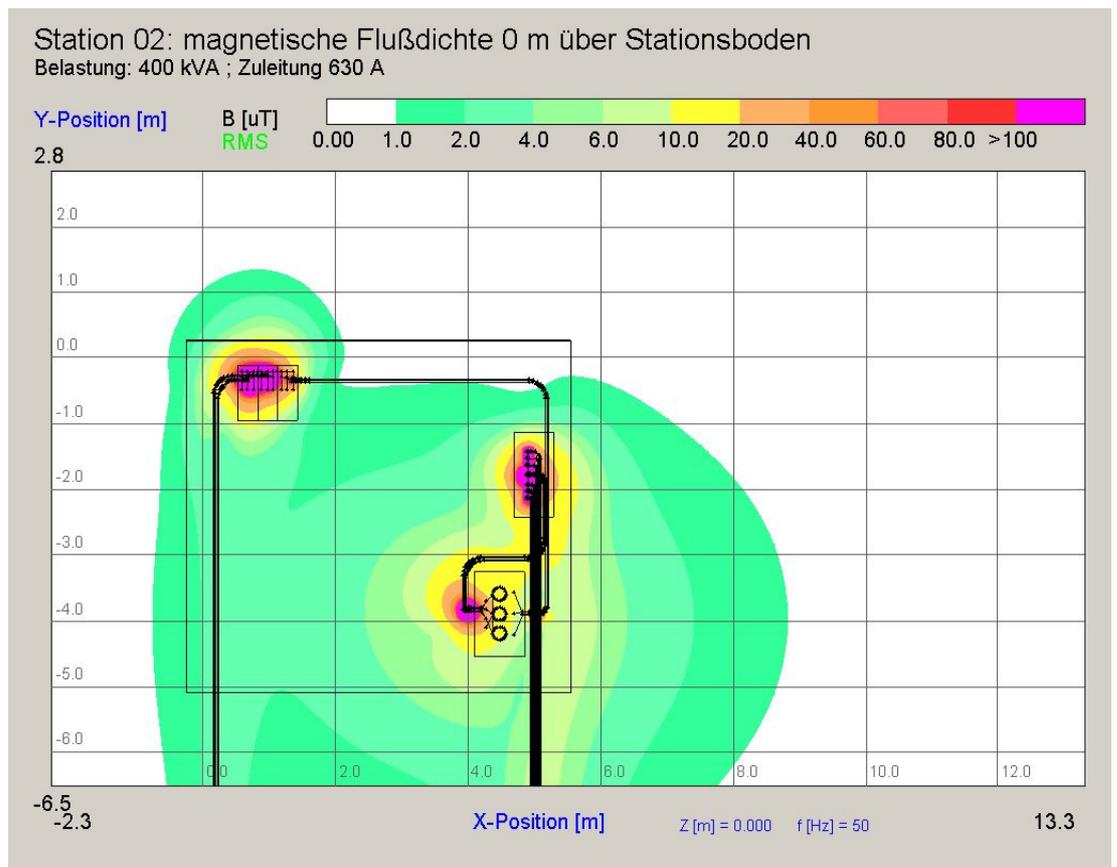


Abb. 10-4: Station 02 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

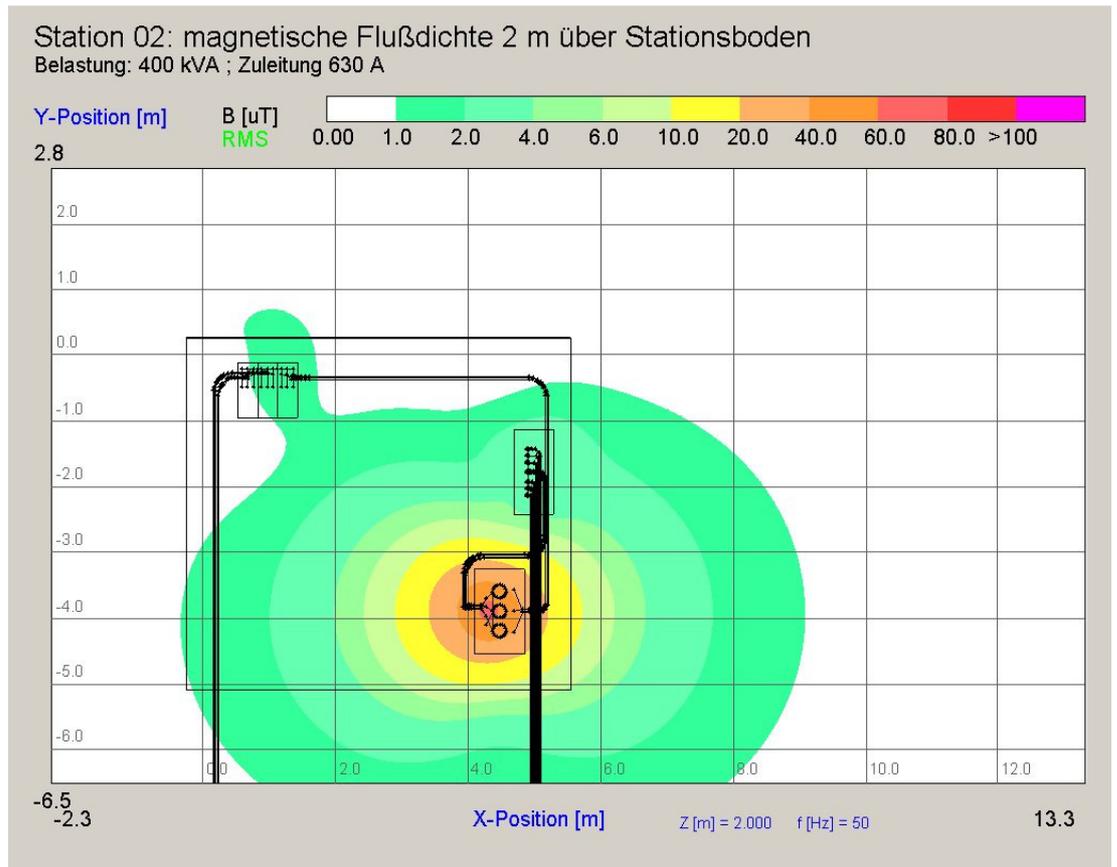


Abb. 10-5: Station 02 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

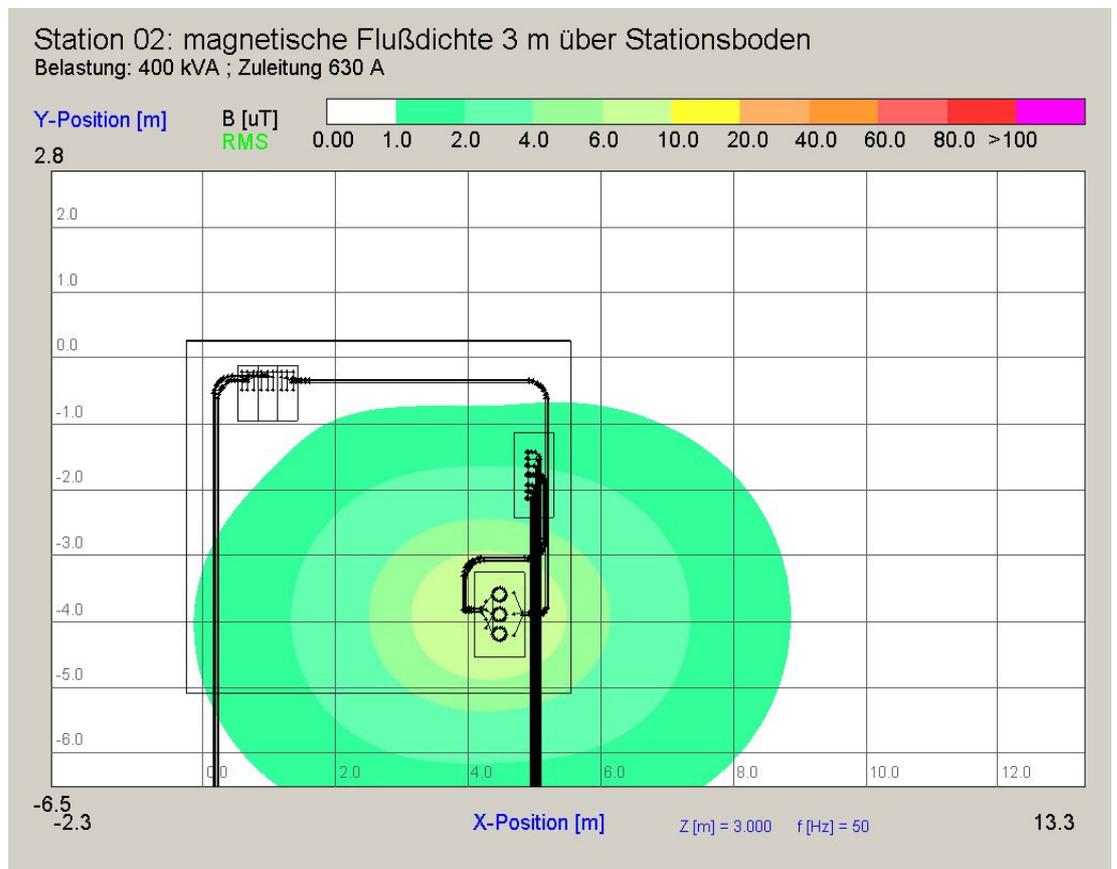


Abb. 10-6: Station 02 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

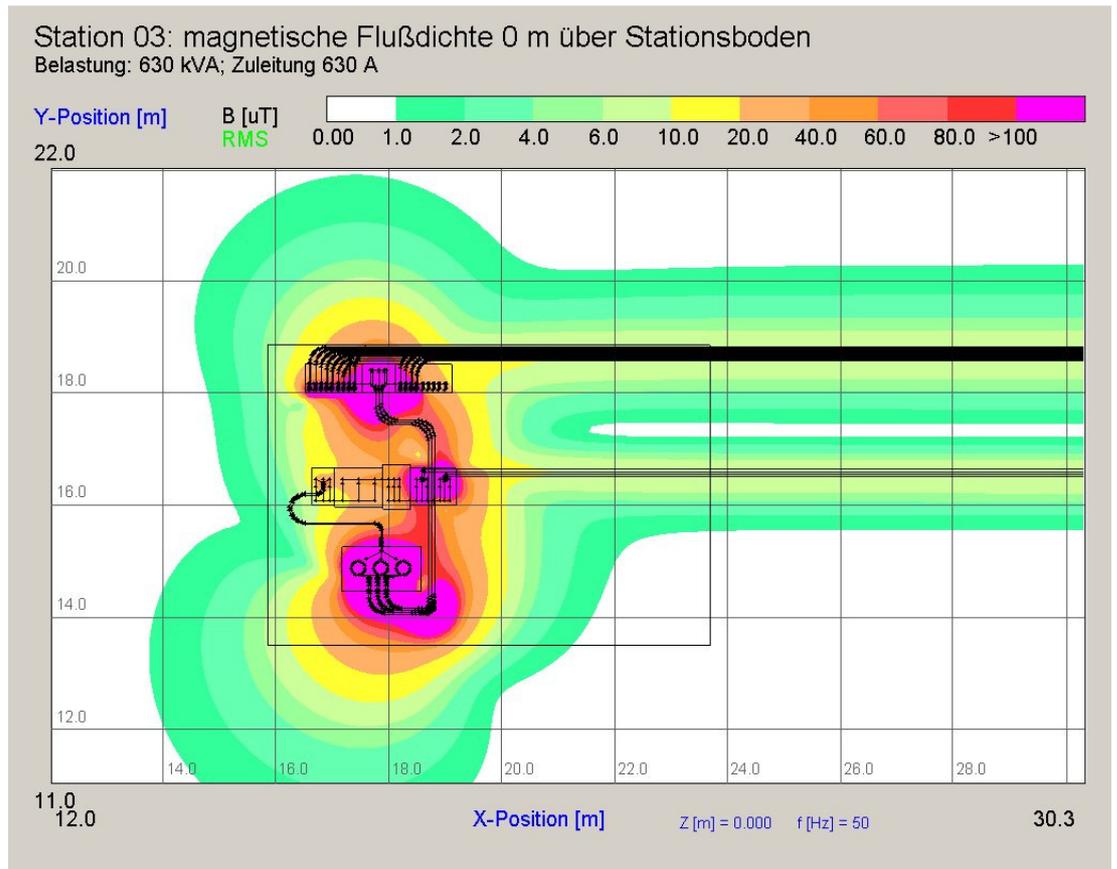


Abb. 10-7: Station 03 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

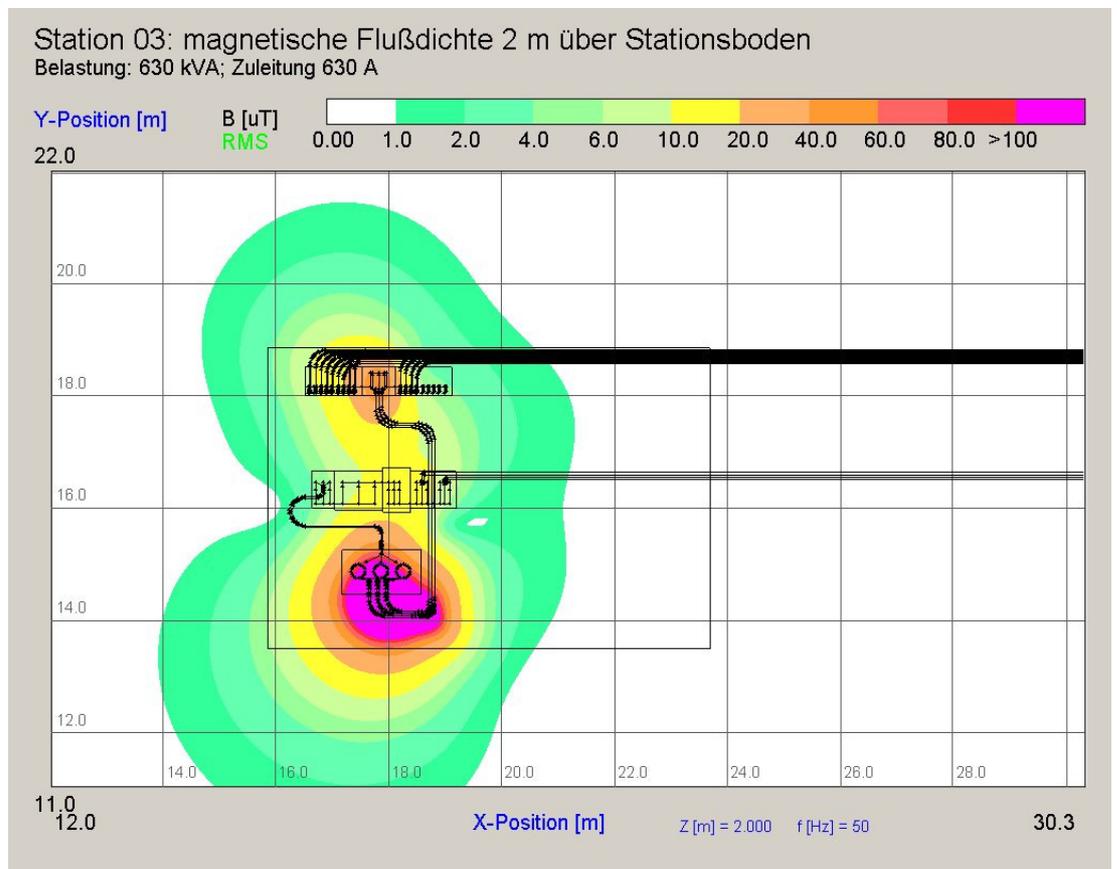


Abb. 10-8: Station 03 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

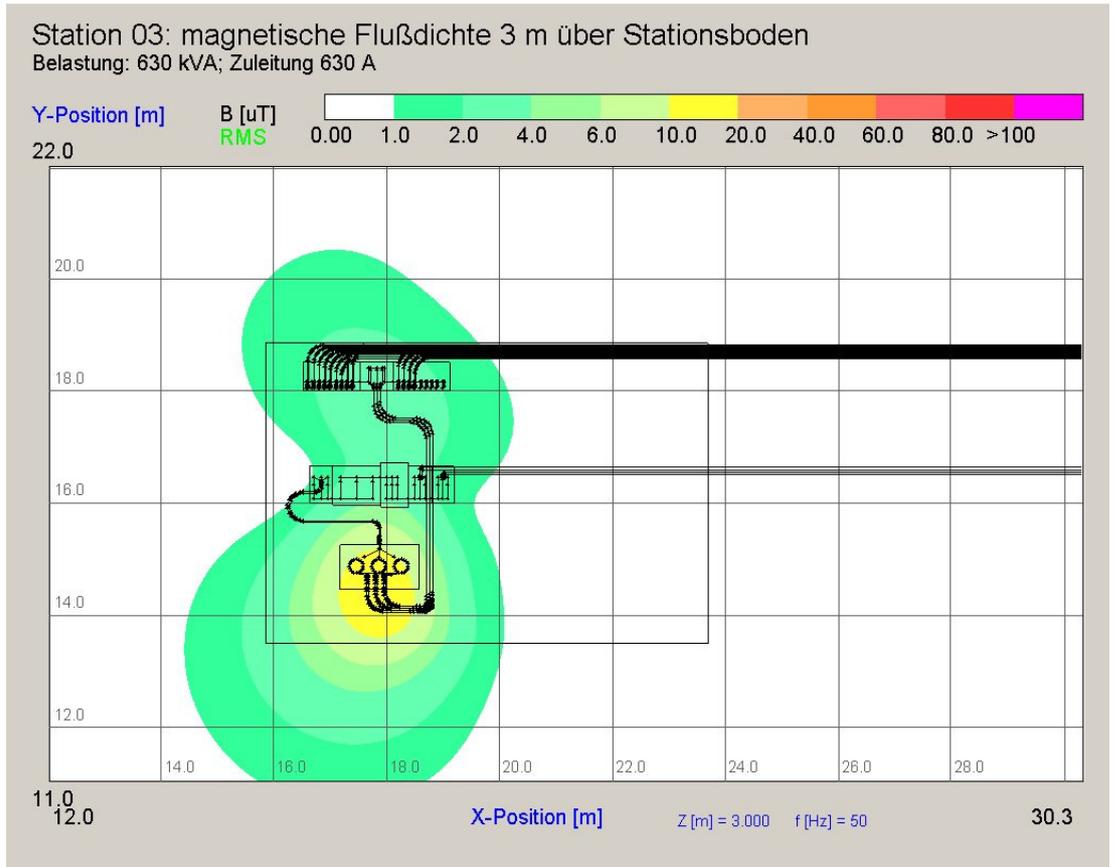


Abb. 10-9: Station 03 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

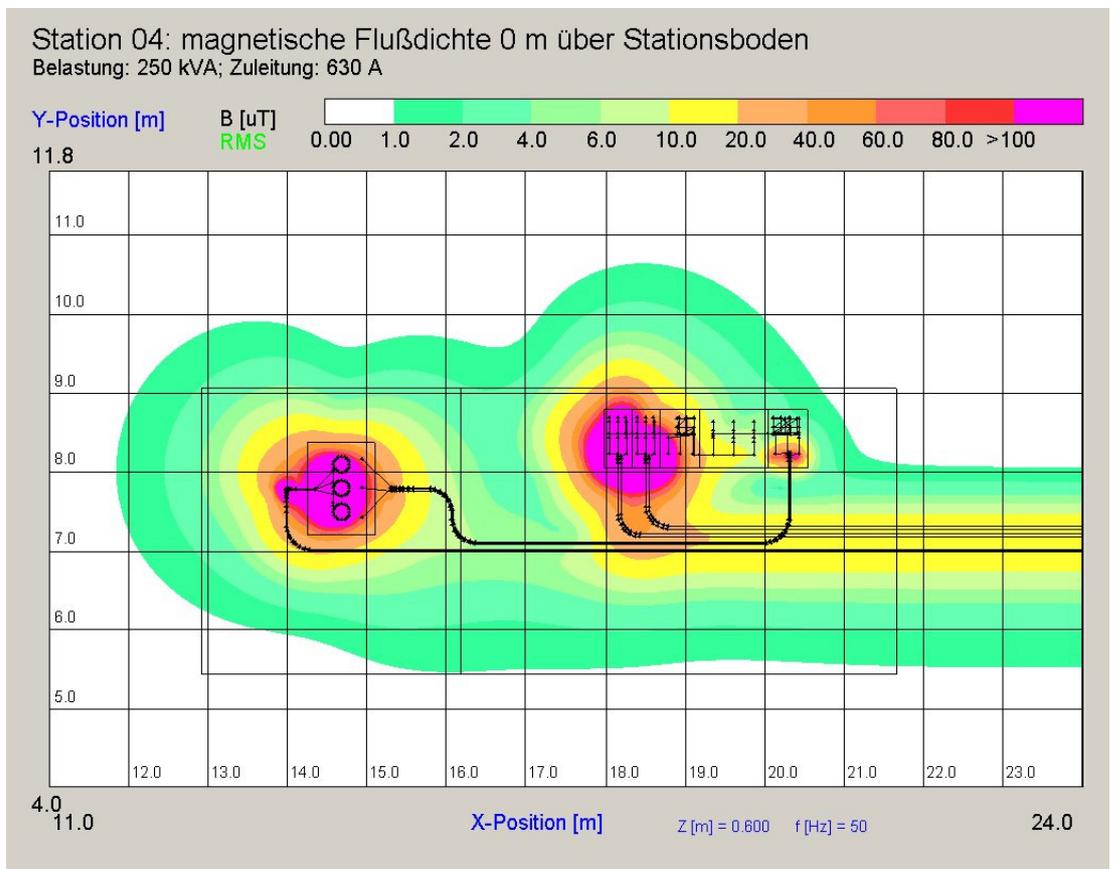


Abb. 10-10: Station 04 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

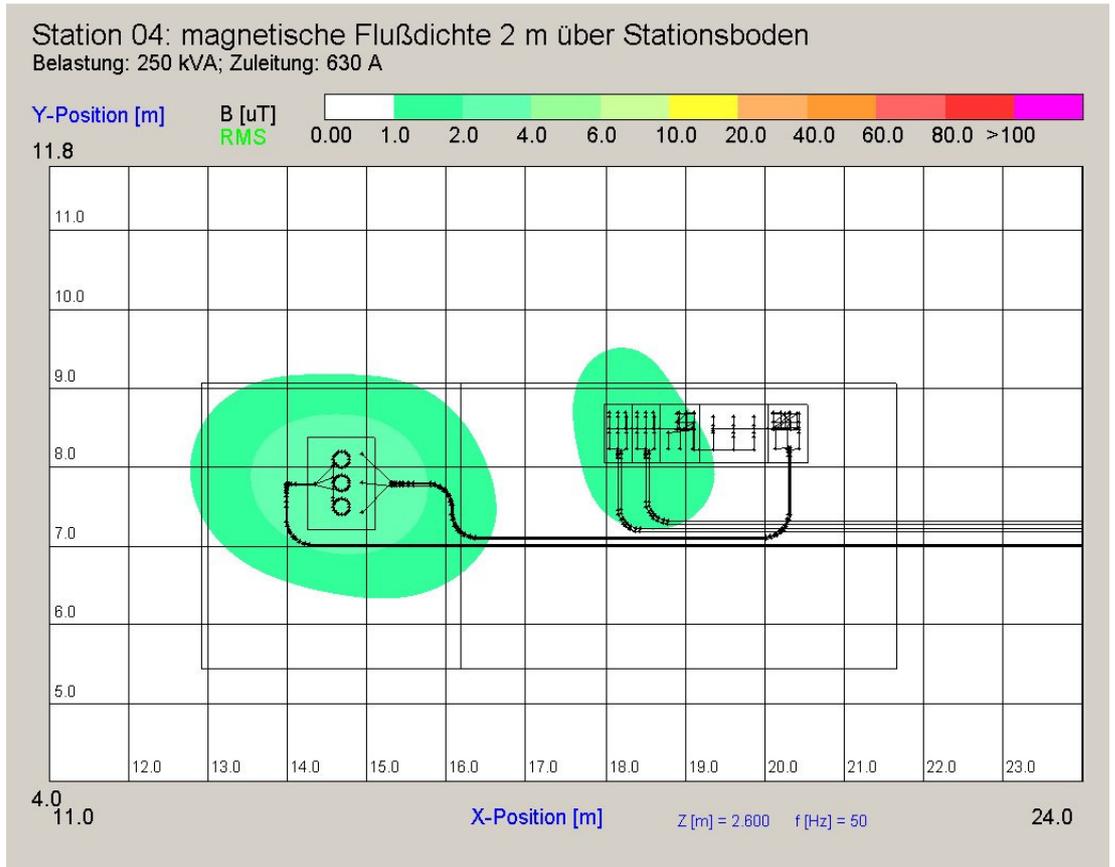


Abb. 10-11: Station 04 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

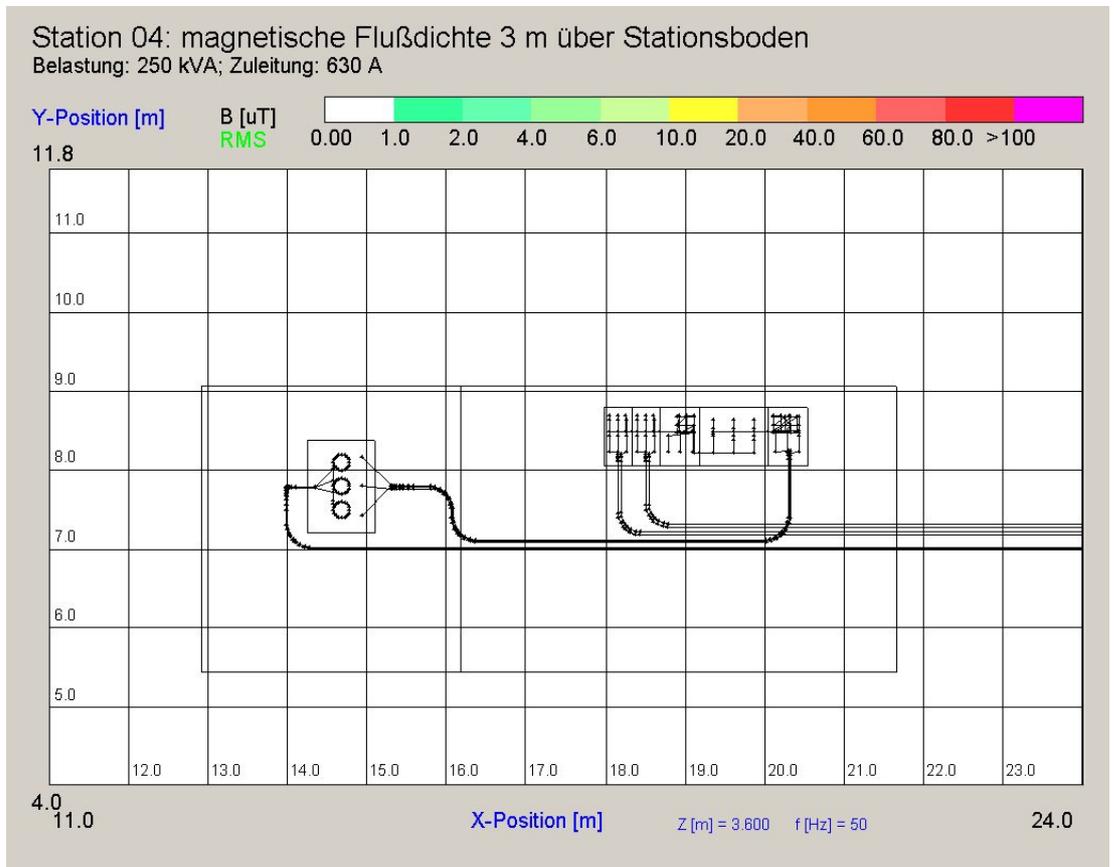


Abb. 10-12: Station 04 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

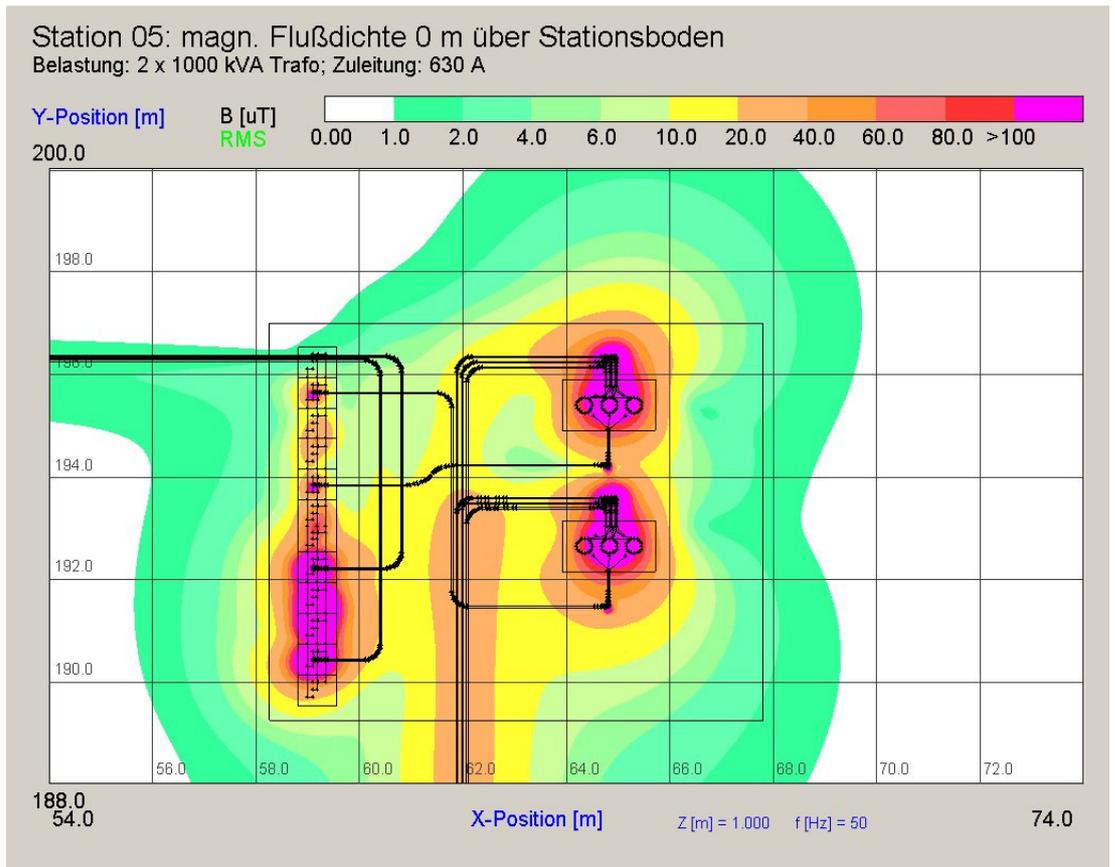


Abb. 10-13: Station 05 magnetische Flußdichte 0 m über dem Stationsboden

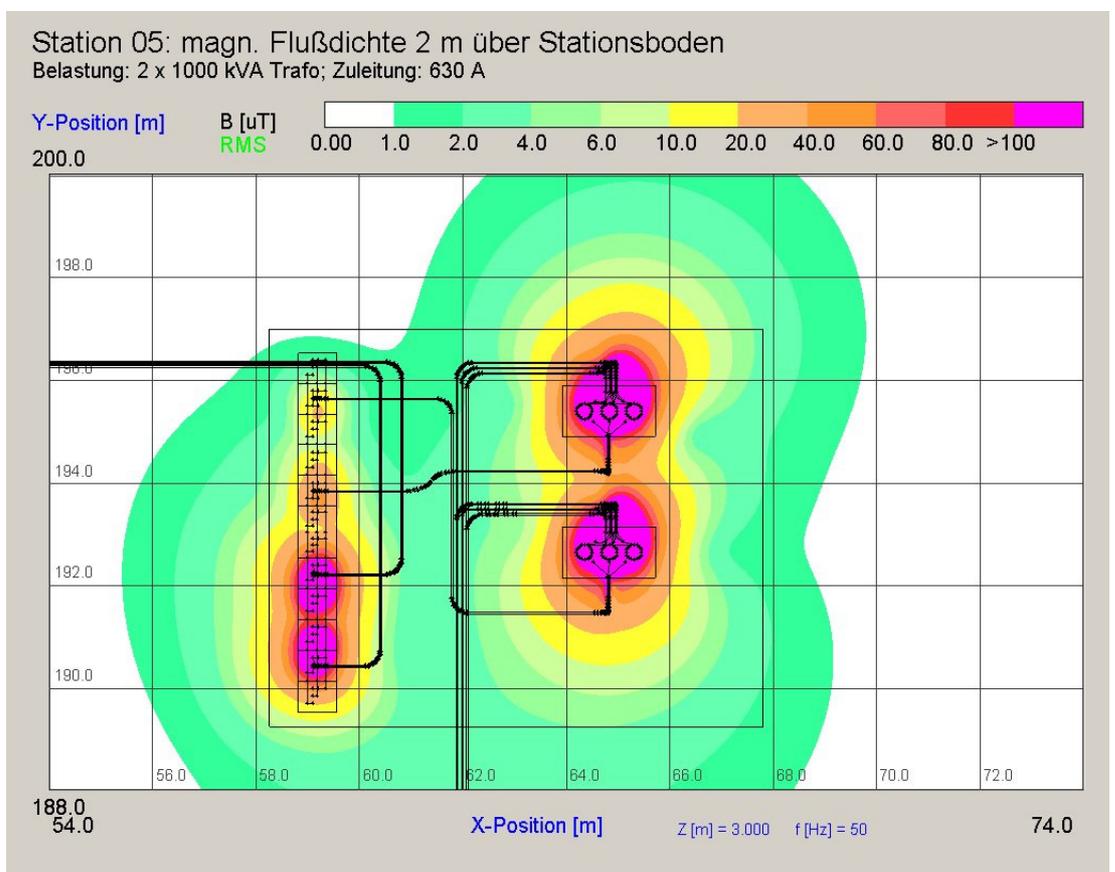


Abb. 10-14: Station 05 magnetische Flußdichte 2 m über dem Stationsboden

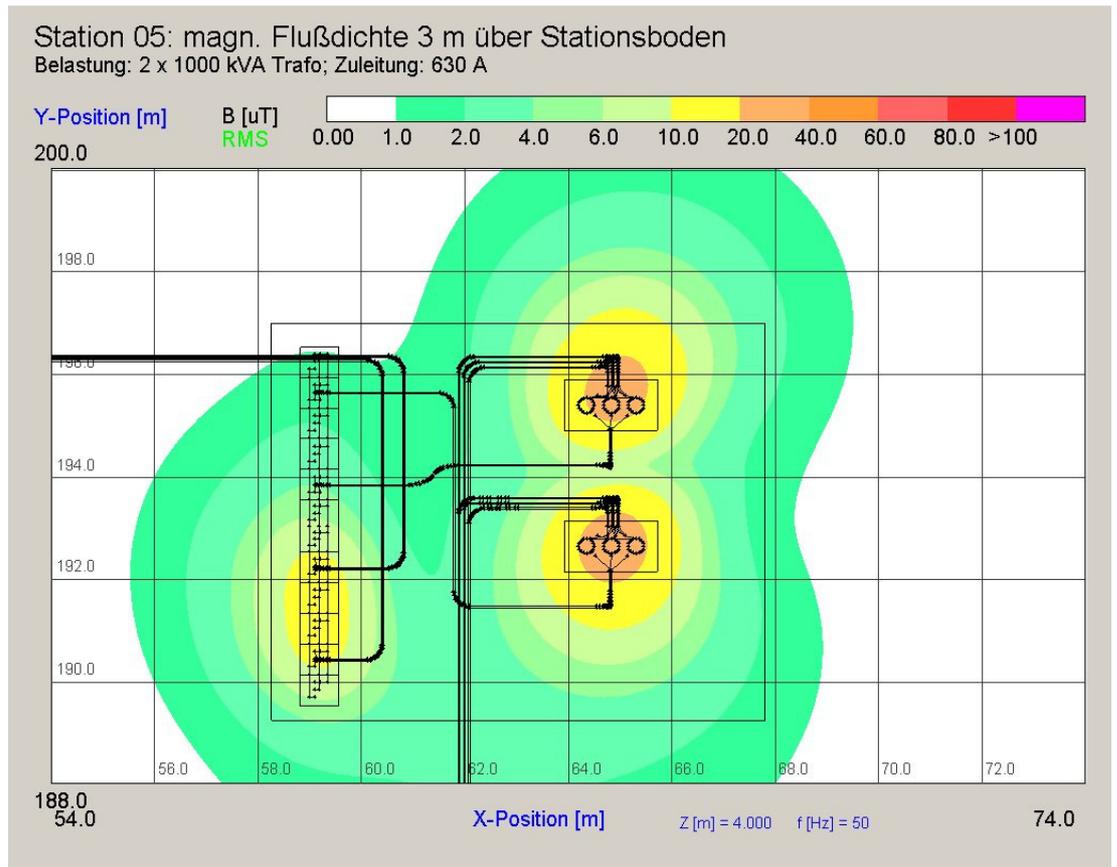


Abb. 10-15: Station 05 magnetische Flußdichte 3 m über dem Stationsboden

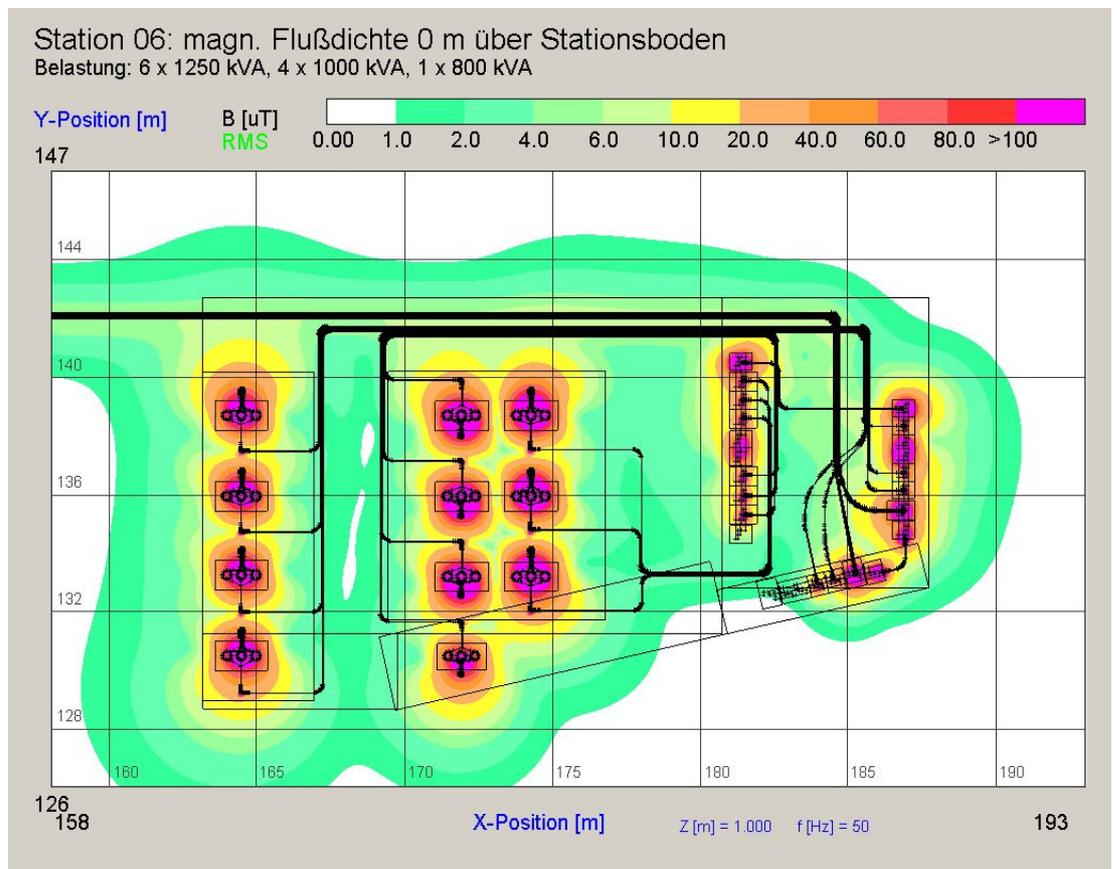


Abb. 10-16: Station 06 magnetische Flußdichte 0 m über dem Stationsboden

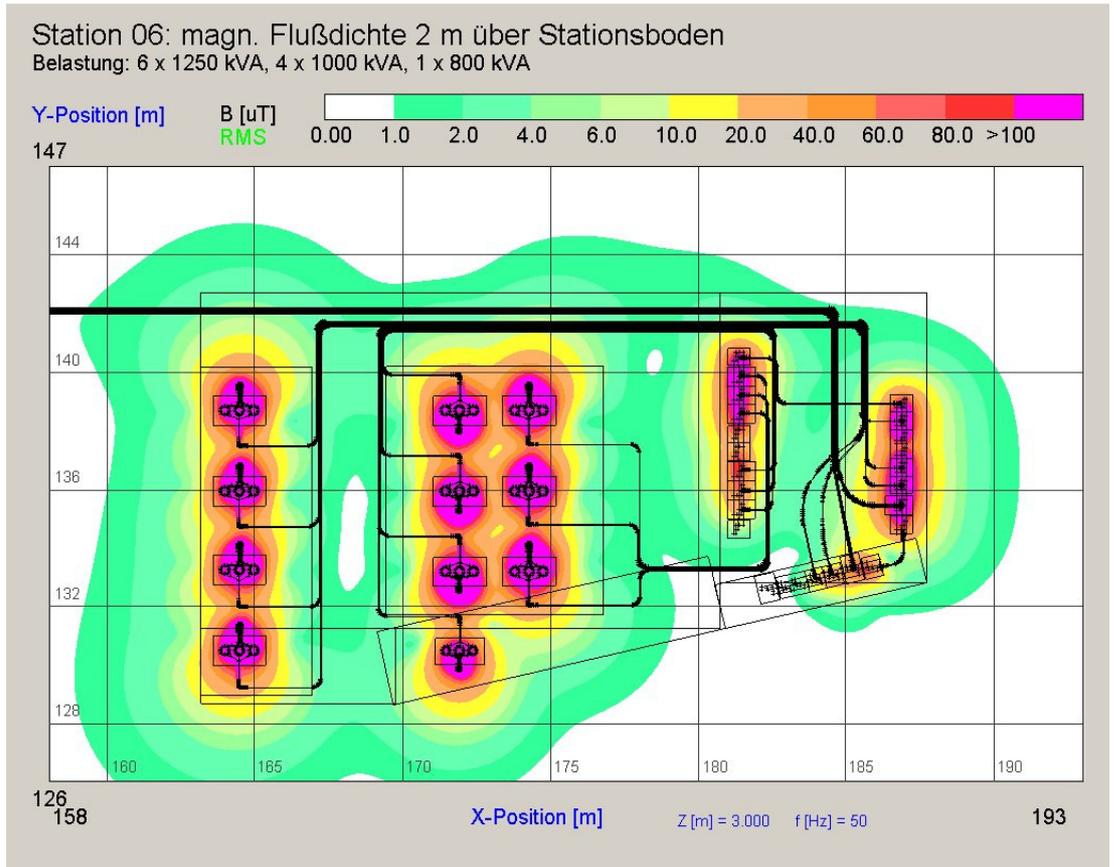


Abb. 10-17: Station 06 magnetische Flußdichte 2 m über dem Stationsboden

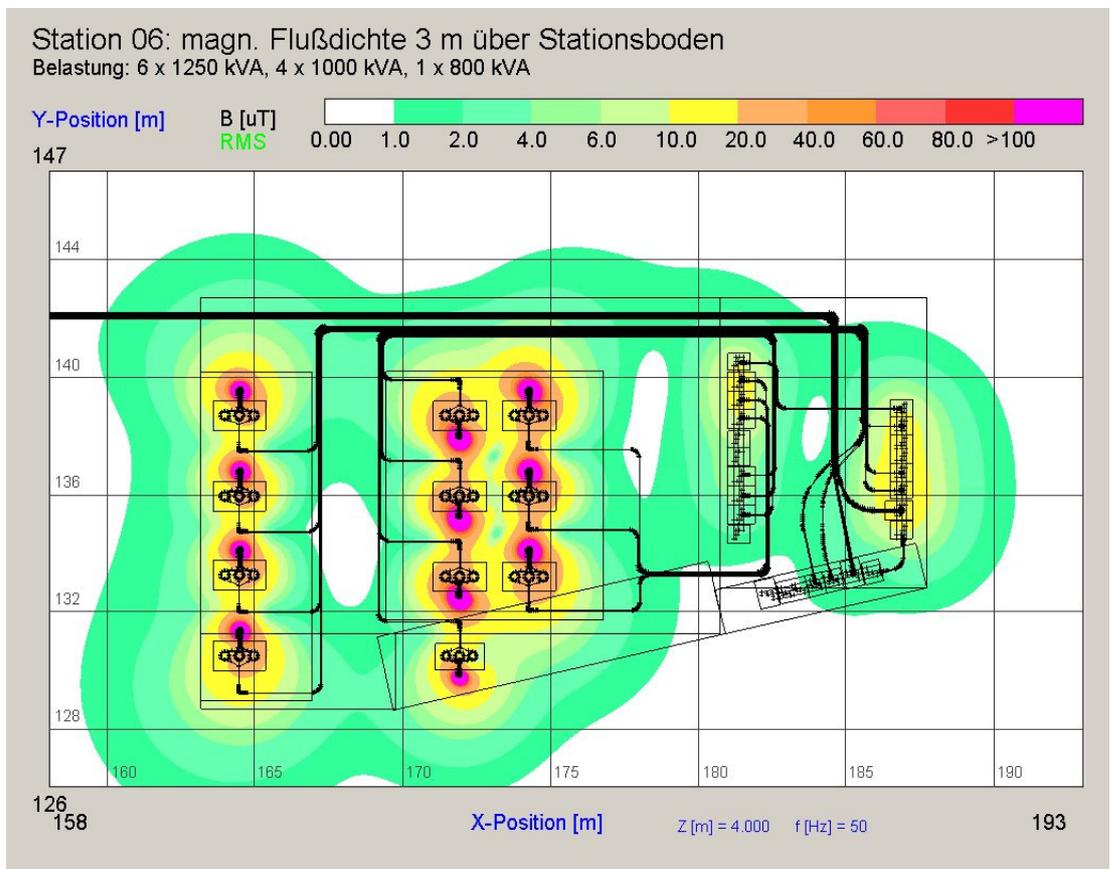


Abb. 10-18: Station 06 magnetische Flußdichte 3 m über dem Stationsboden

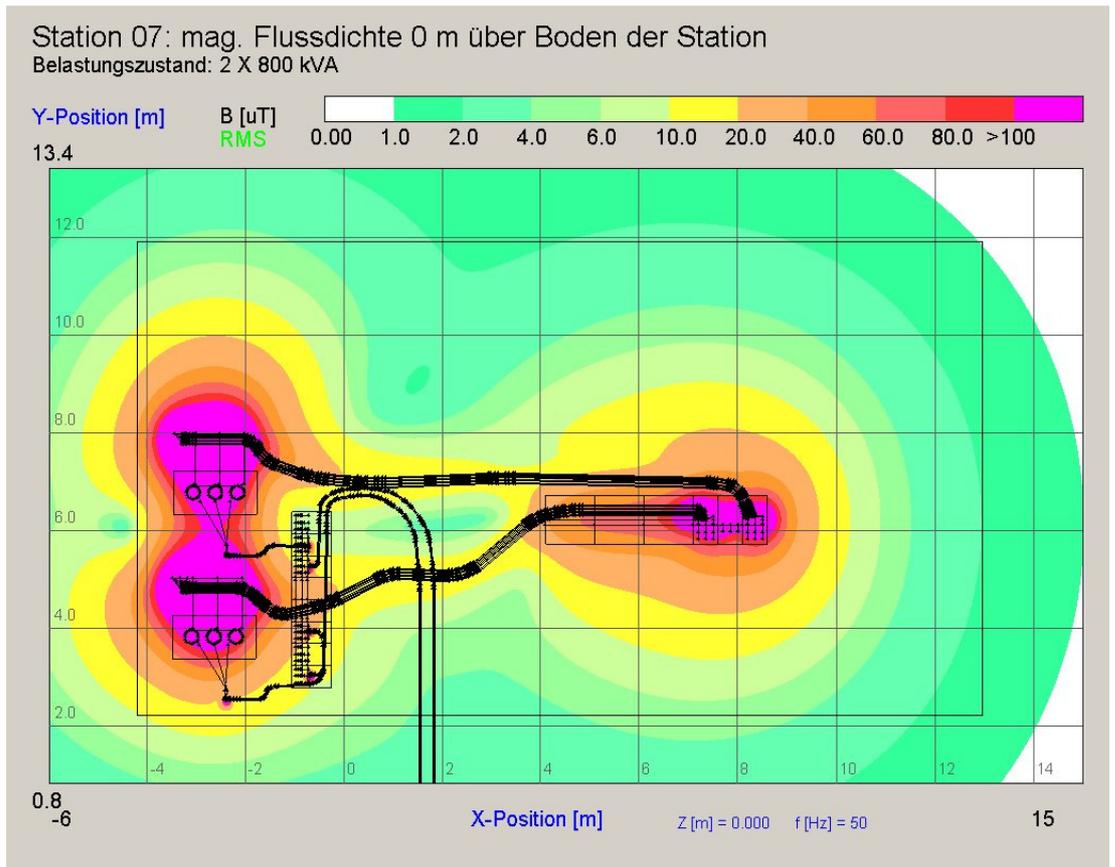


Abb. 10-19: Station 07 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

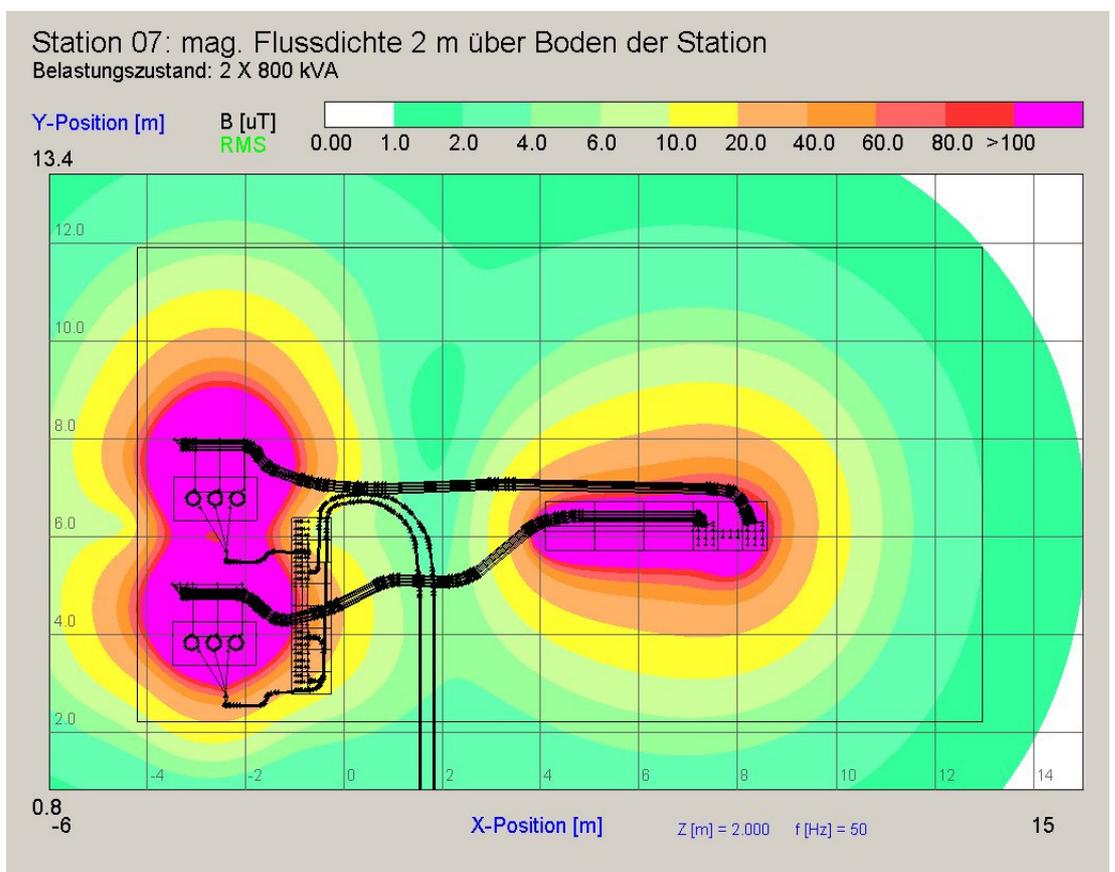


Abb. 10-20: Station 07 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

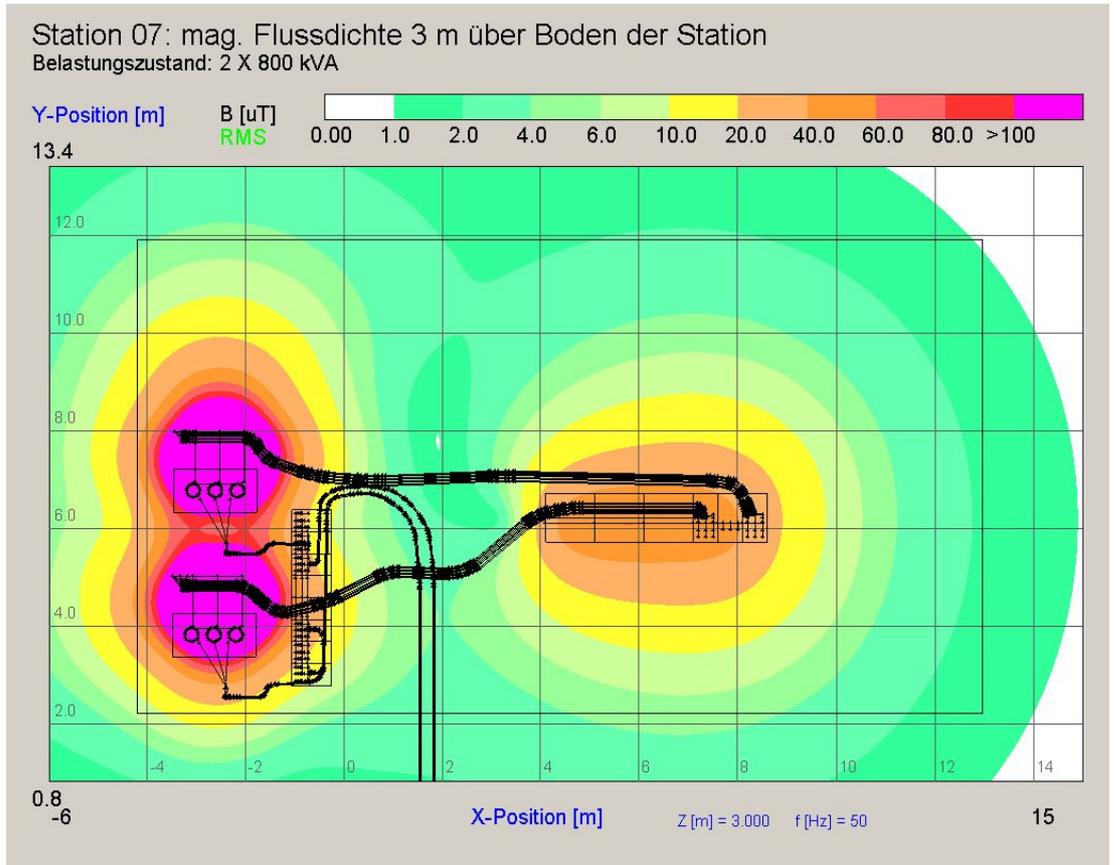


Abb. 10-21: Station 07 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

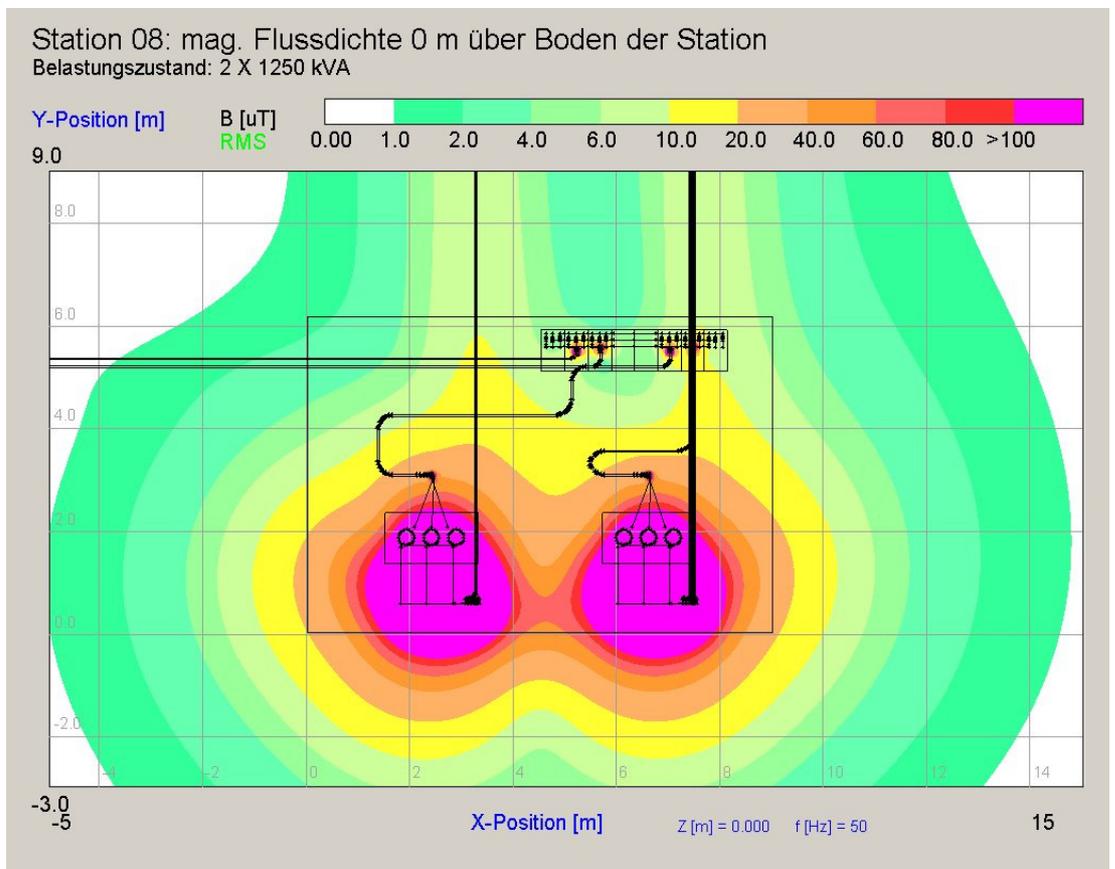


Abb. 10-22: Station 08 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

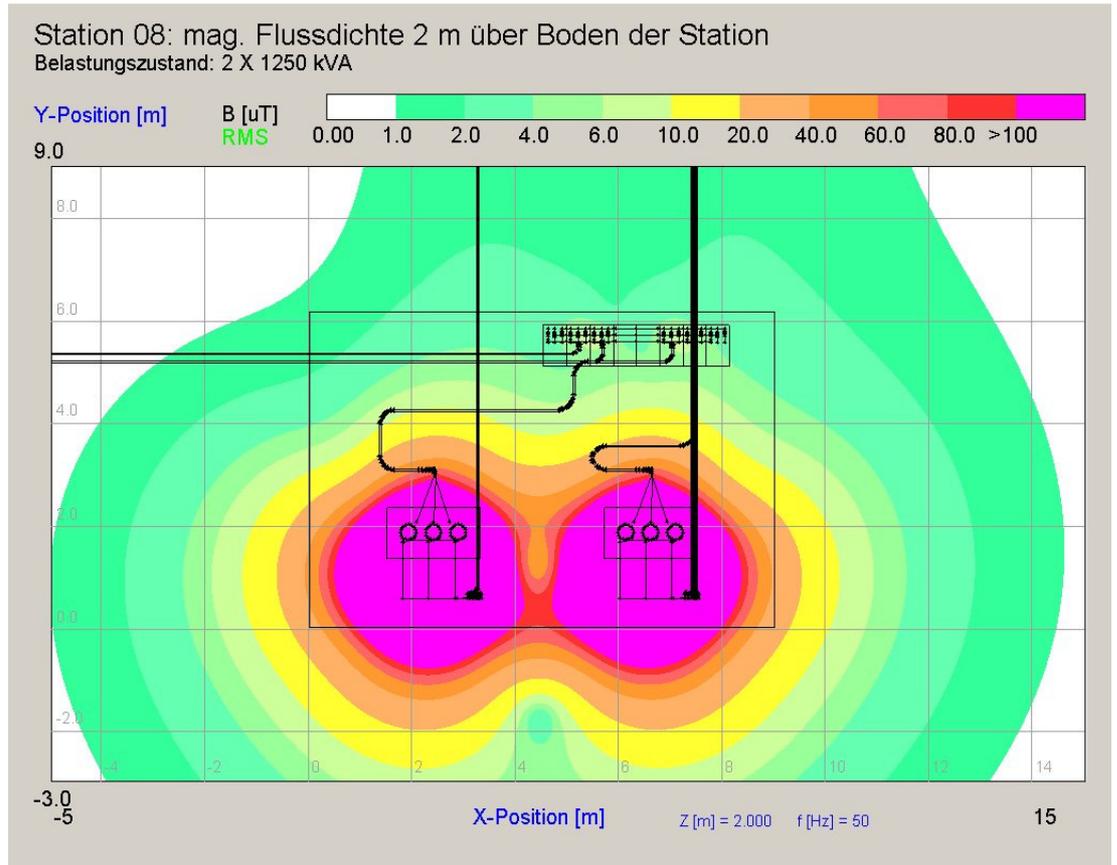


Abb. 10-23: Station 08 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

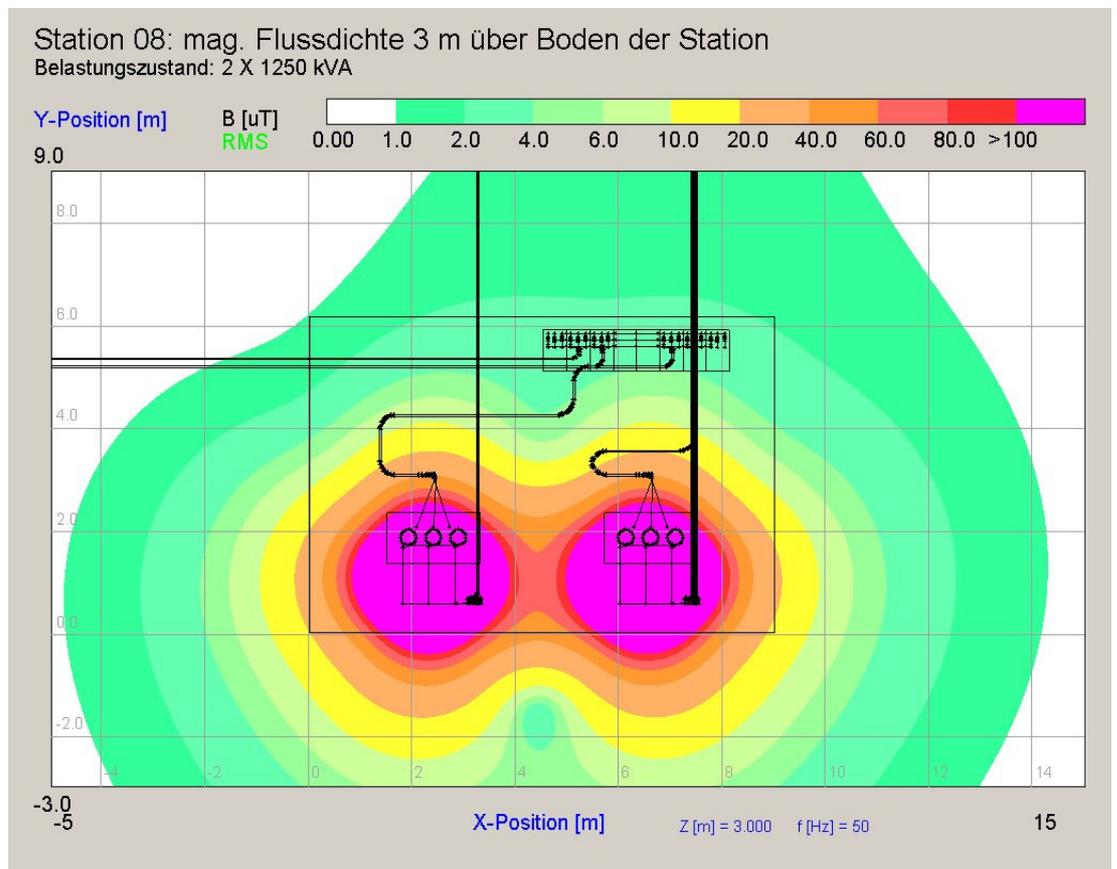


Abb. 10-24: Station 08 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

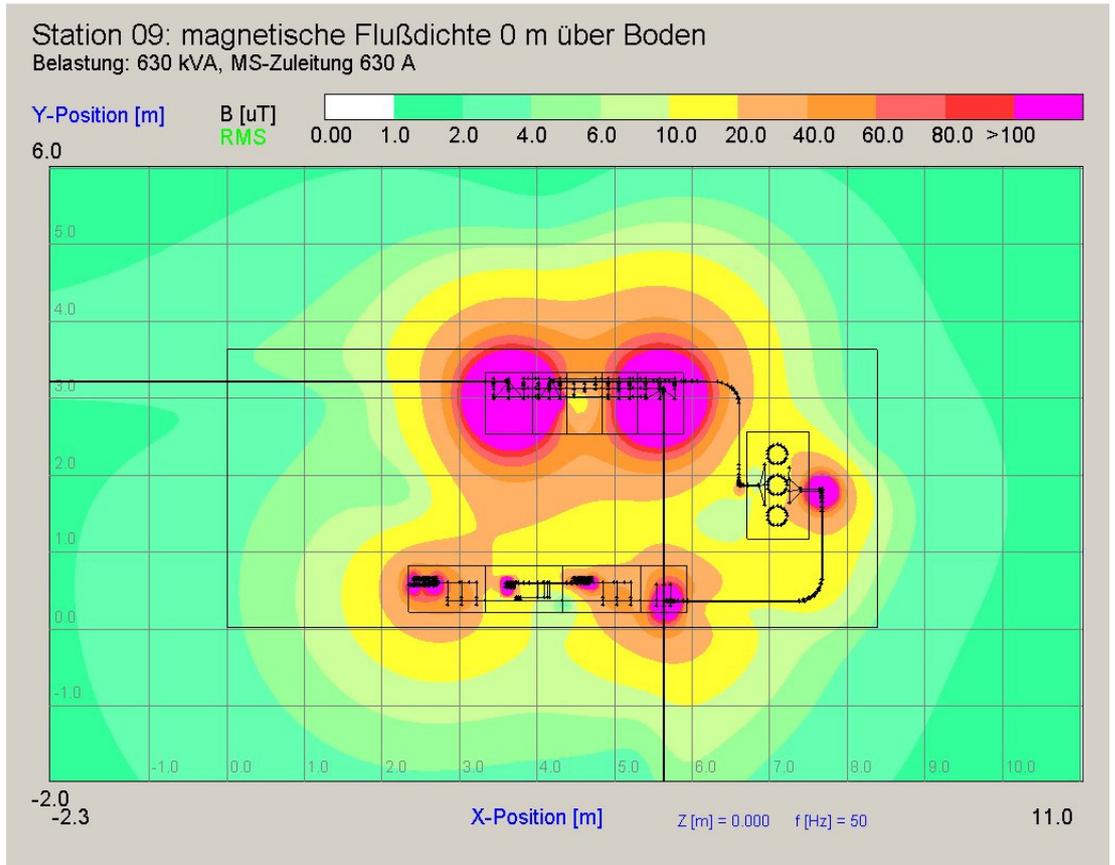


Abb. 10-25: Station 09 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

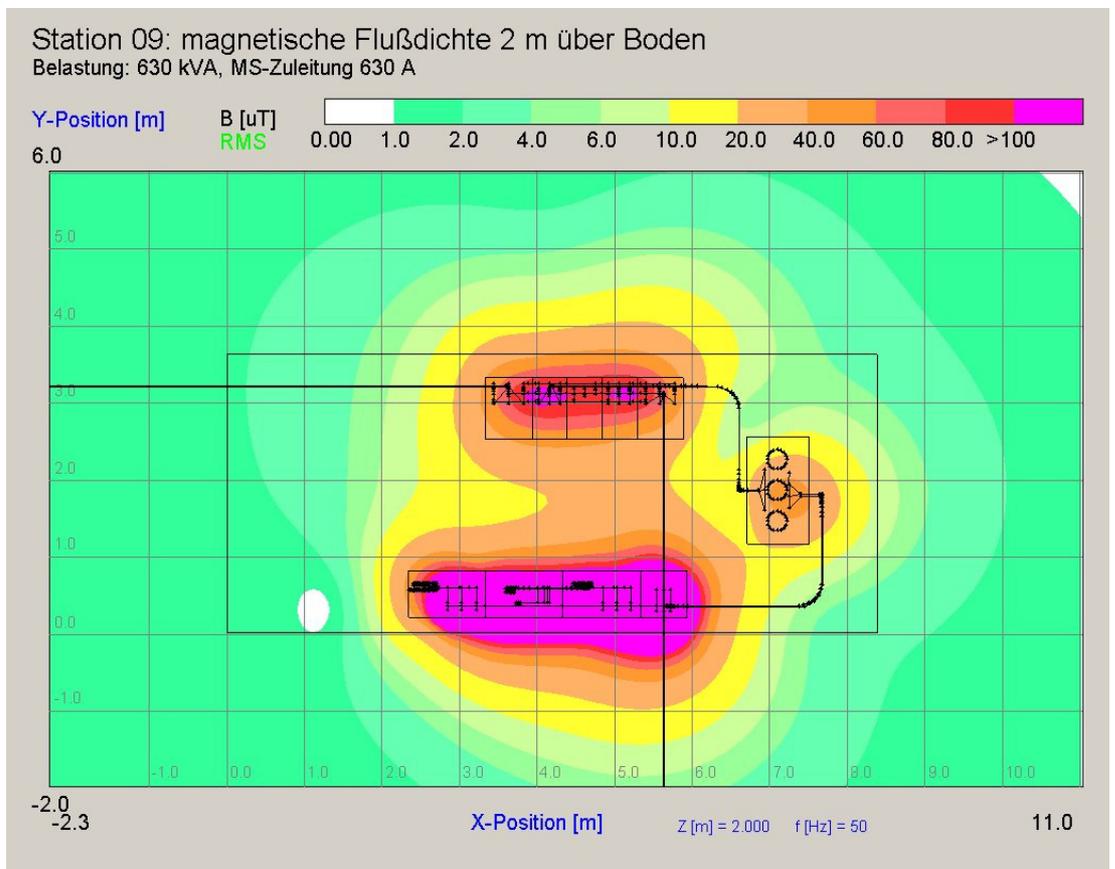


Abb. 10-26: Station 09 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

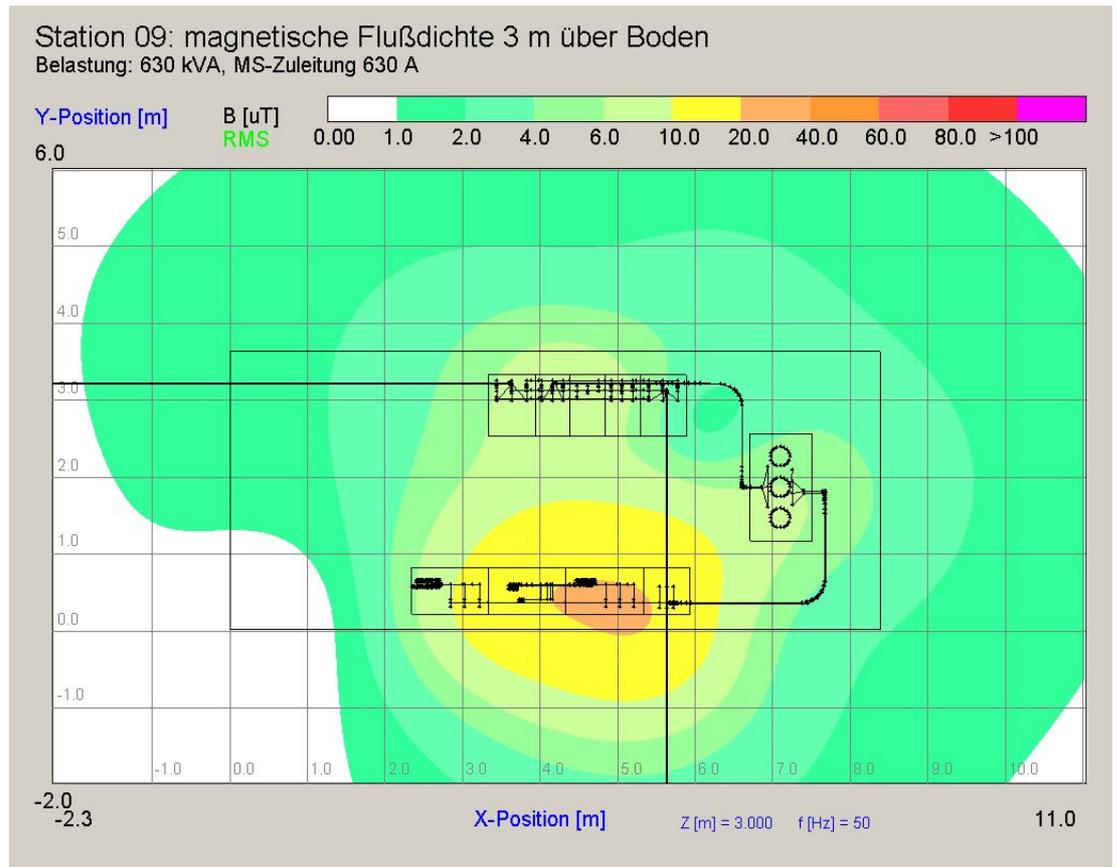


Abb. 10-27: Station 09 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

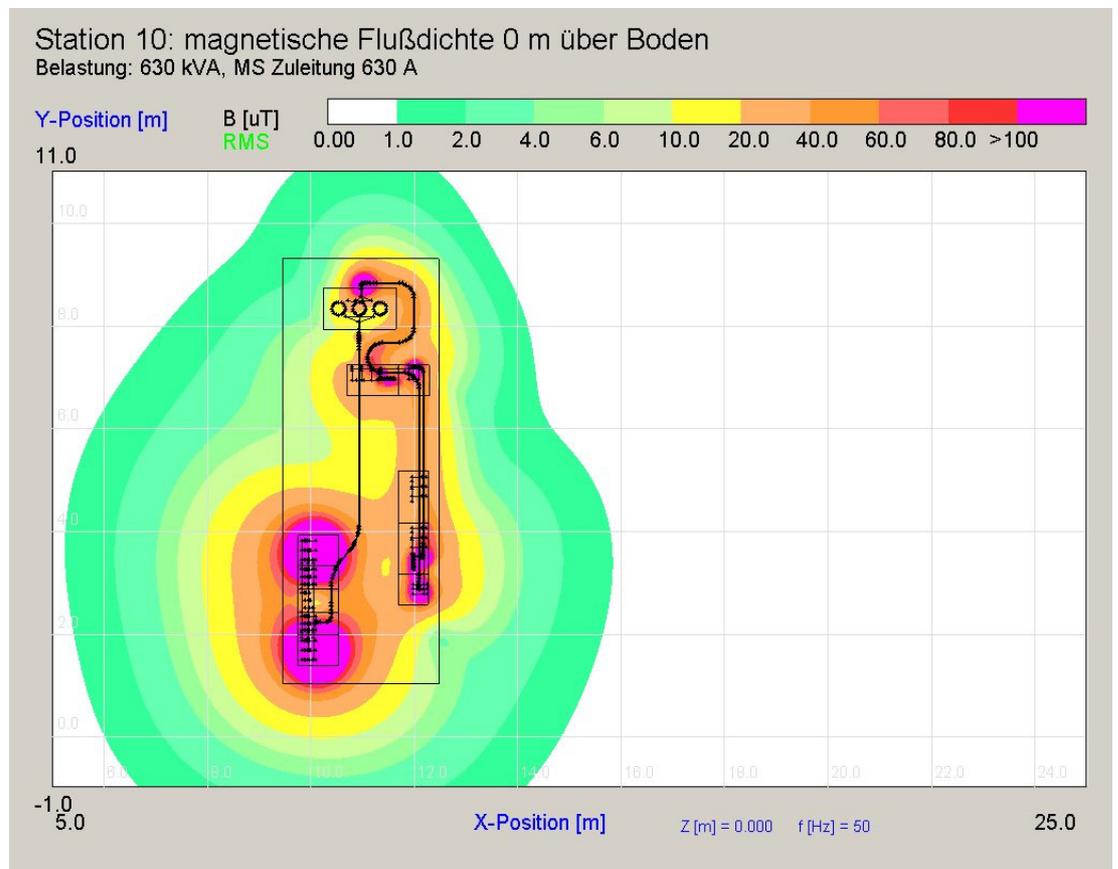


Abb. 10-28: Station 10 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

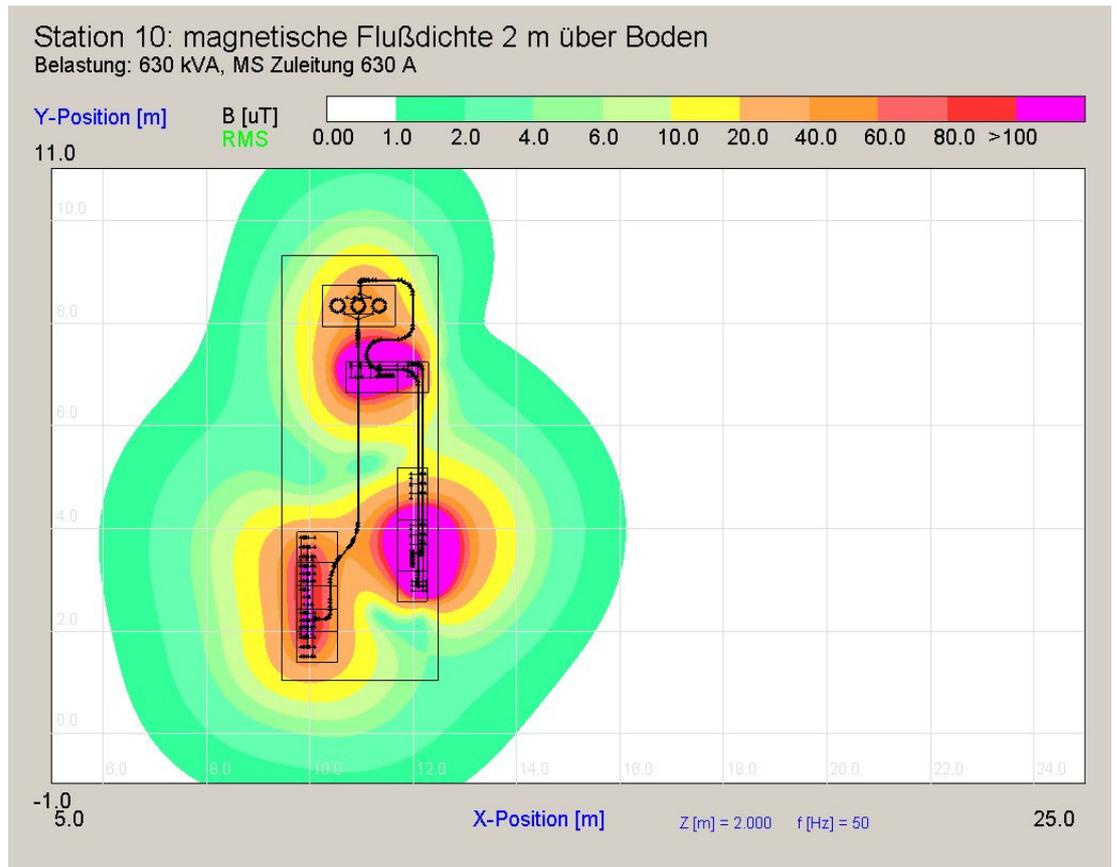


Abb. 10-29: Station 10 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

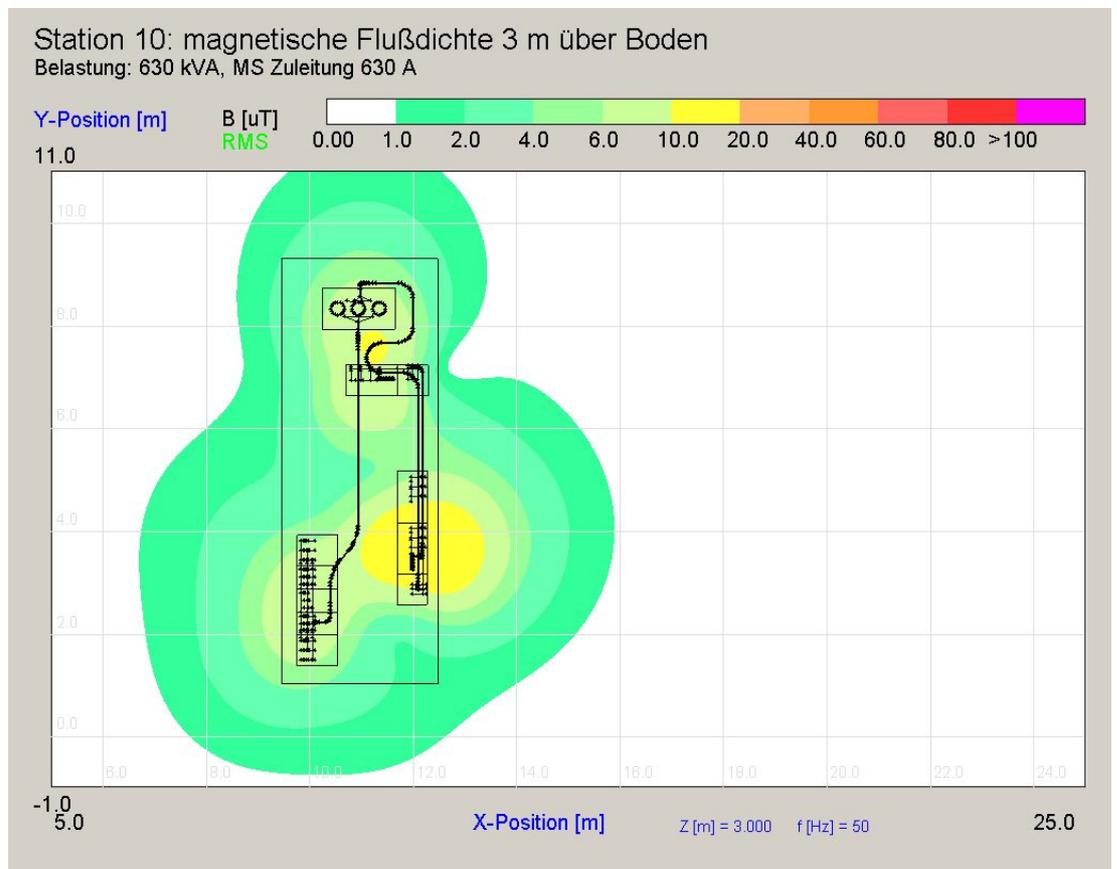


Abb. 10-30: Station 10 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

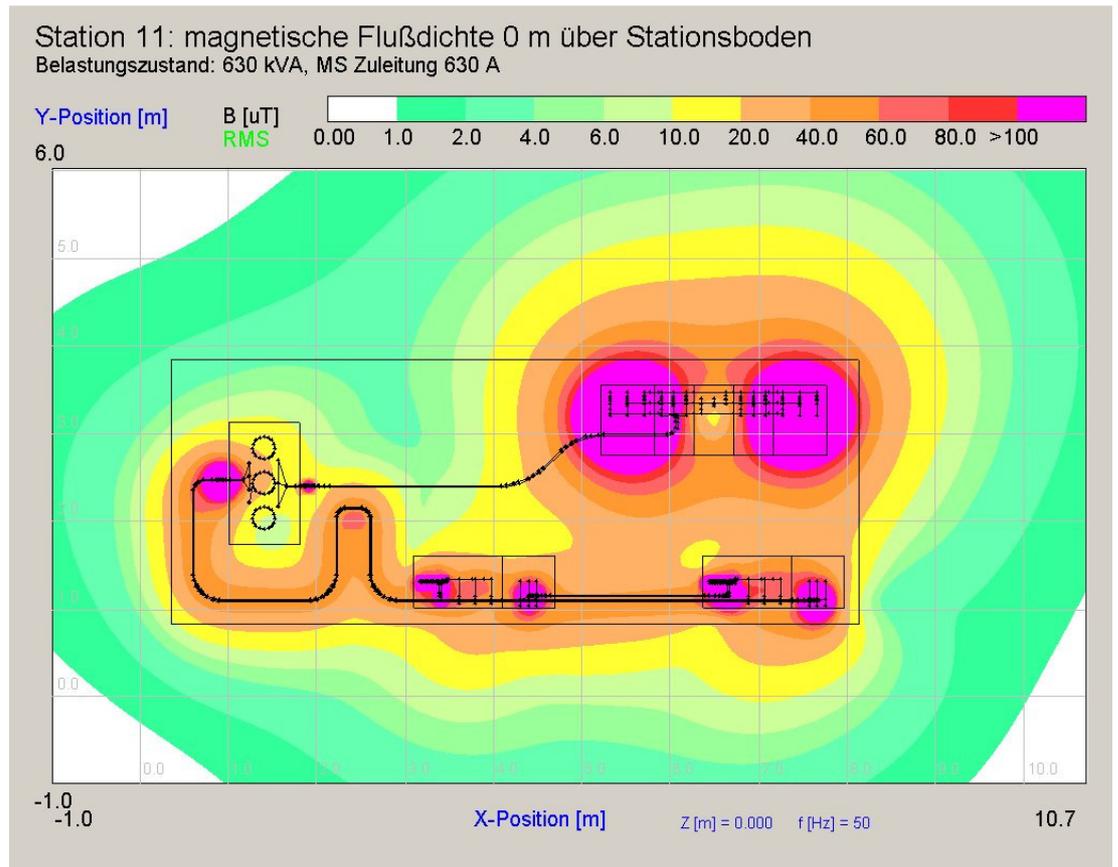


Abb. 10-31: Station 11 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

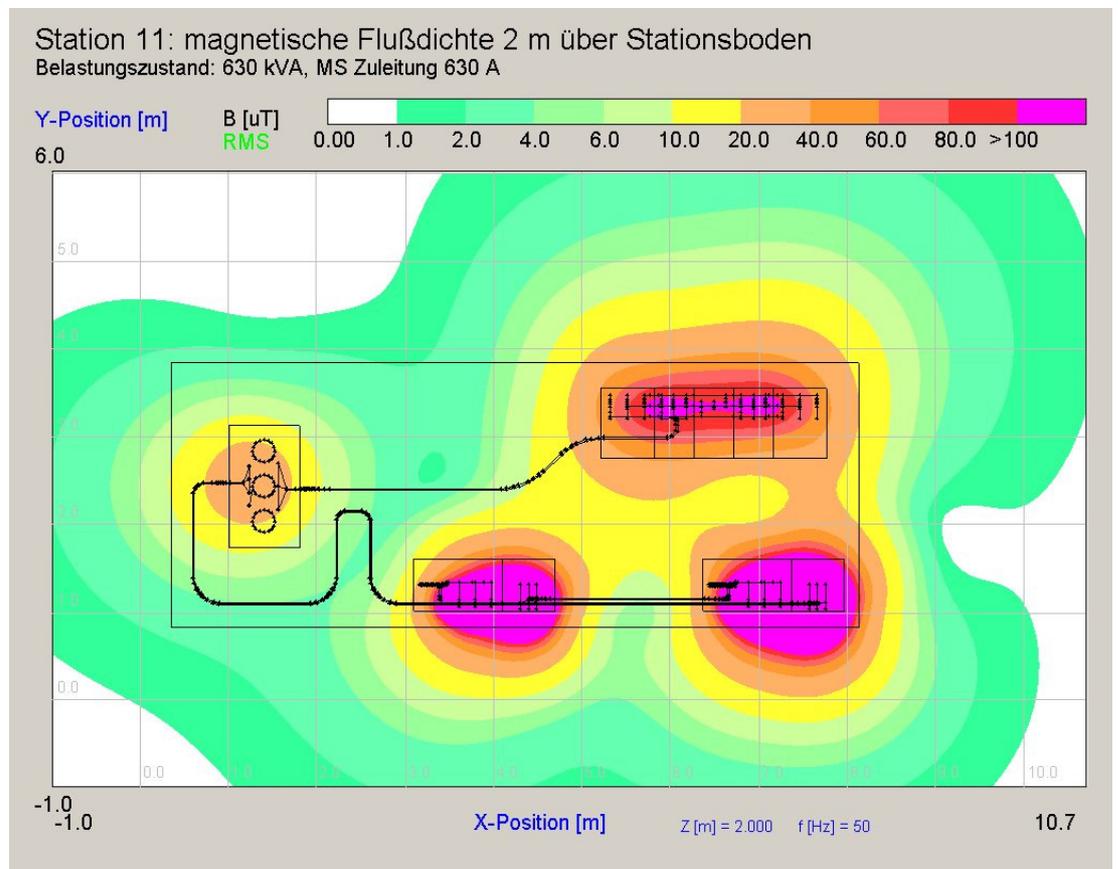


Abb. 10-32: Station 11 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

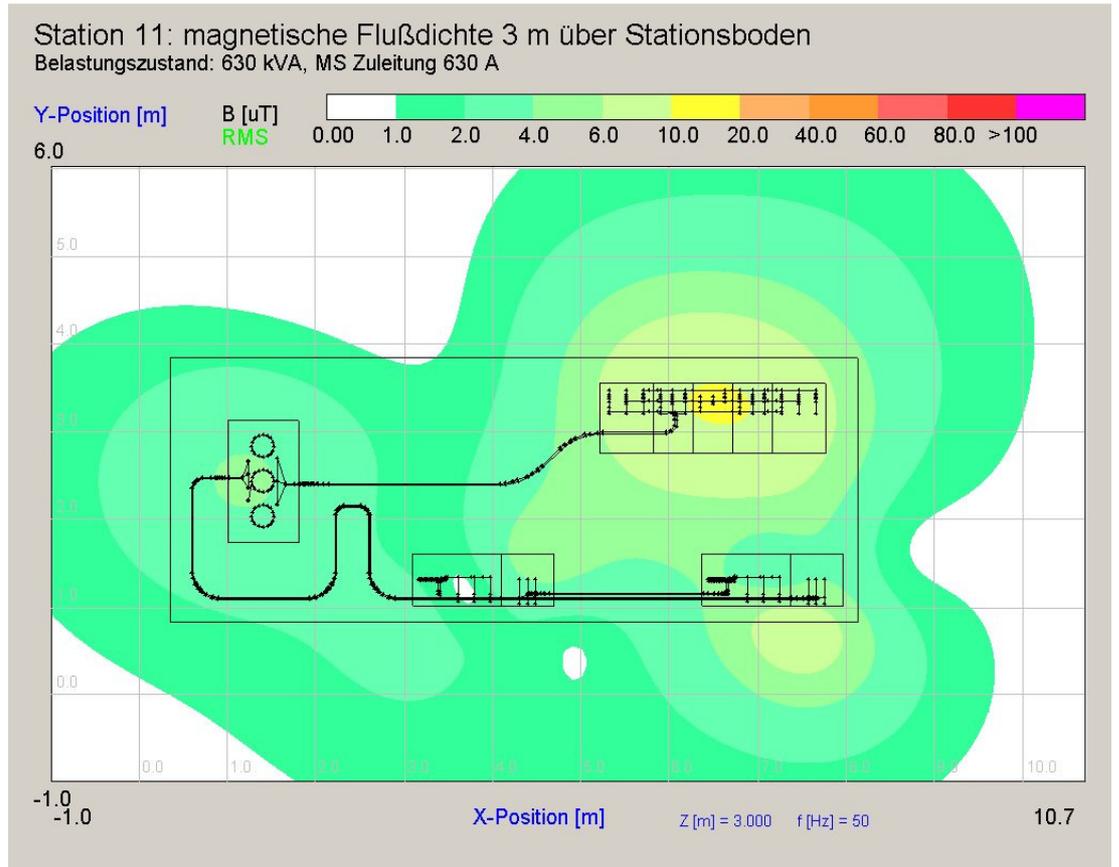


Abb. 10-33: Station 11 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

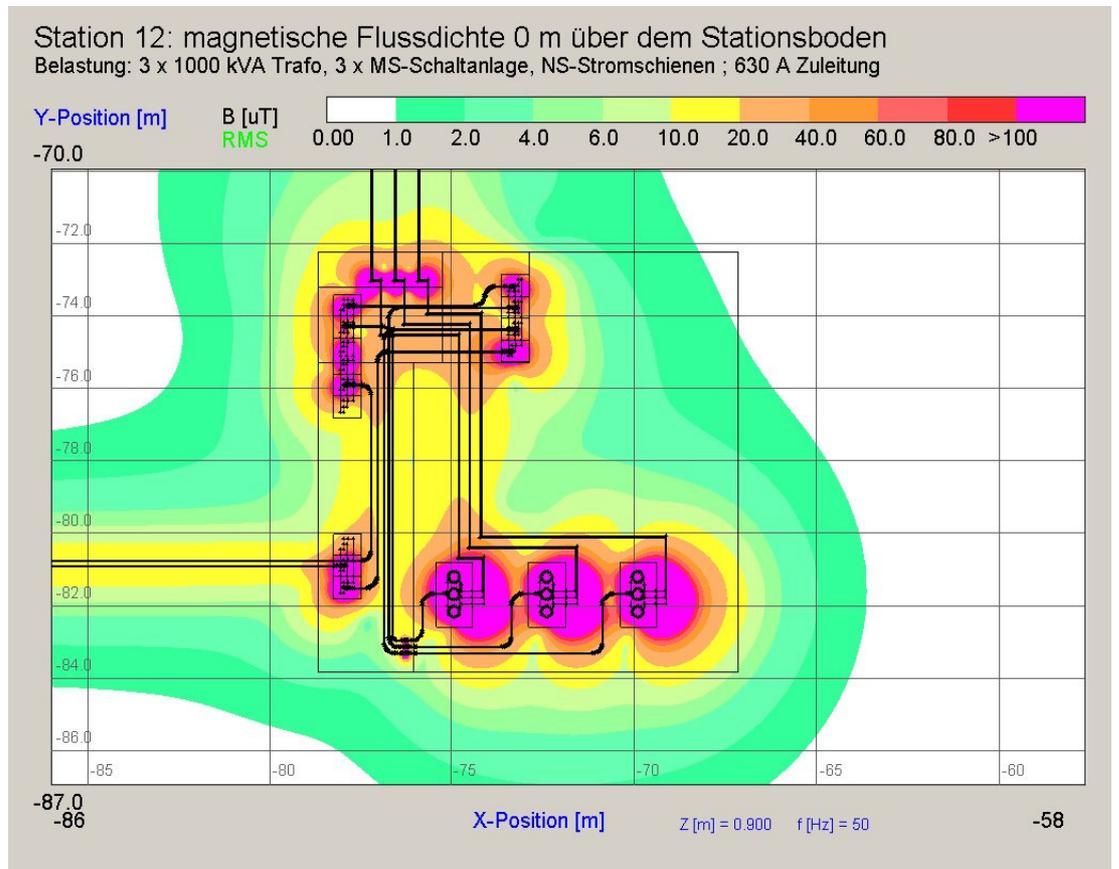


Abb. 10-34: Station 12 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

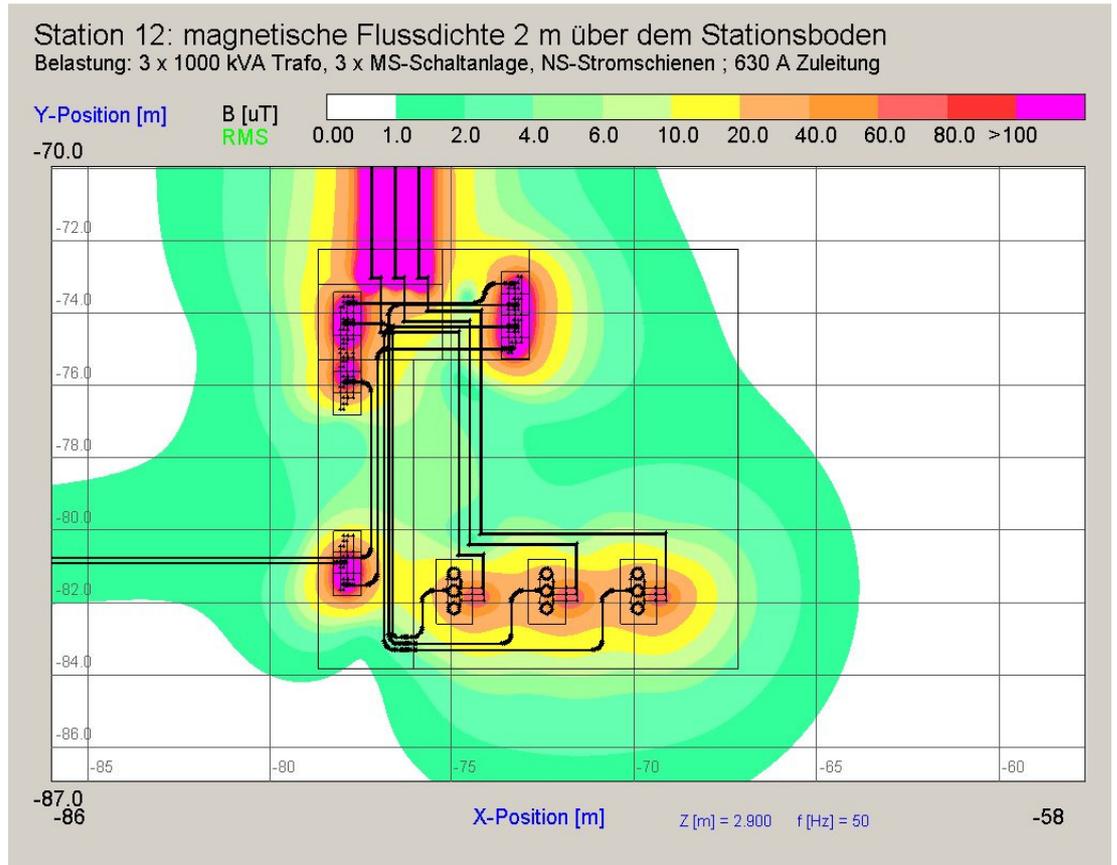


Abb. 10-35: Station 12 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

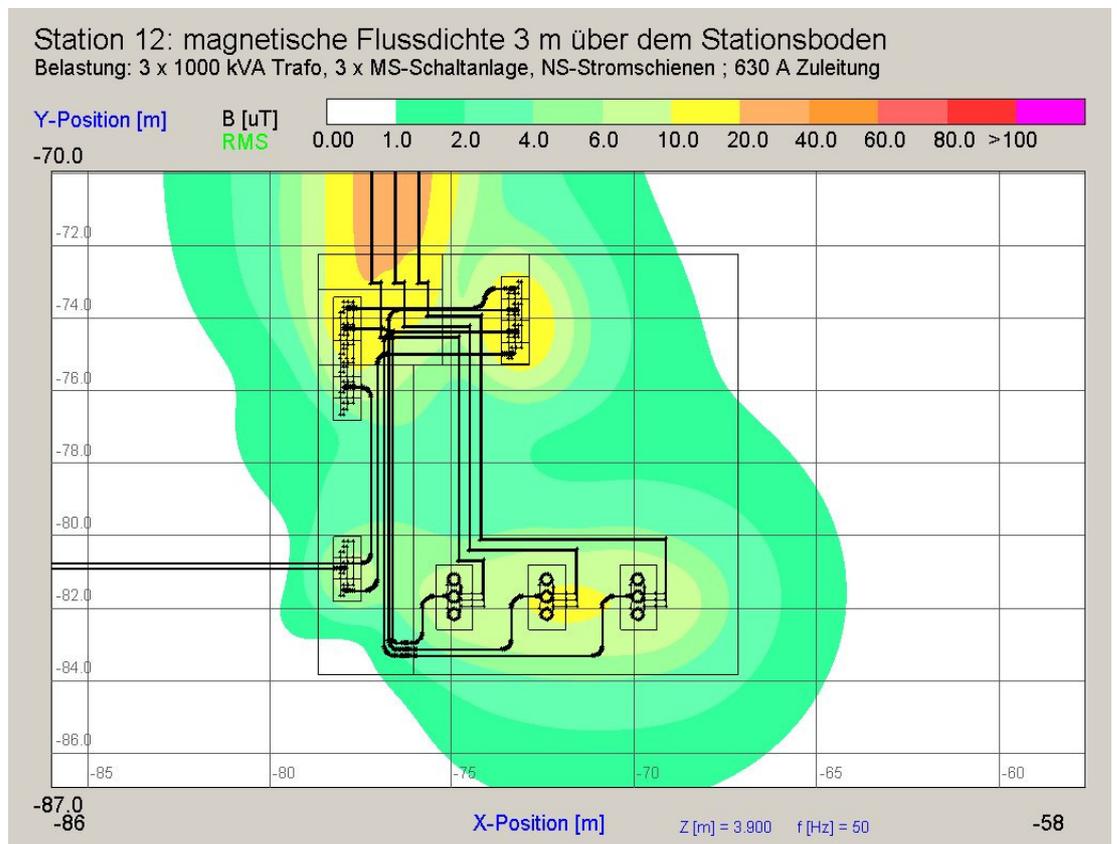


Abb. 10-36: Station 12 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

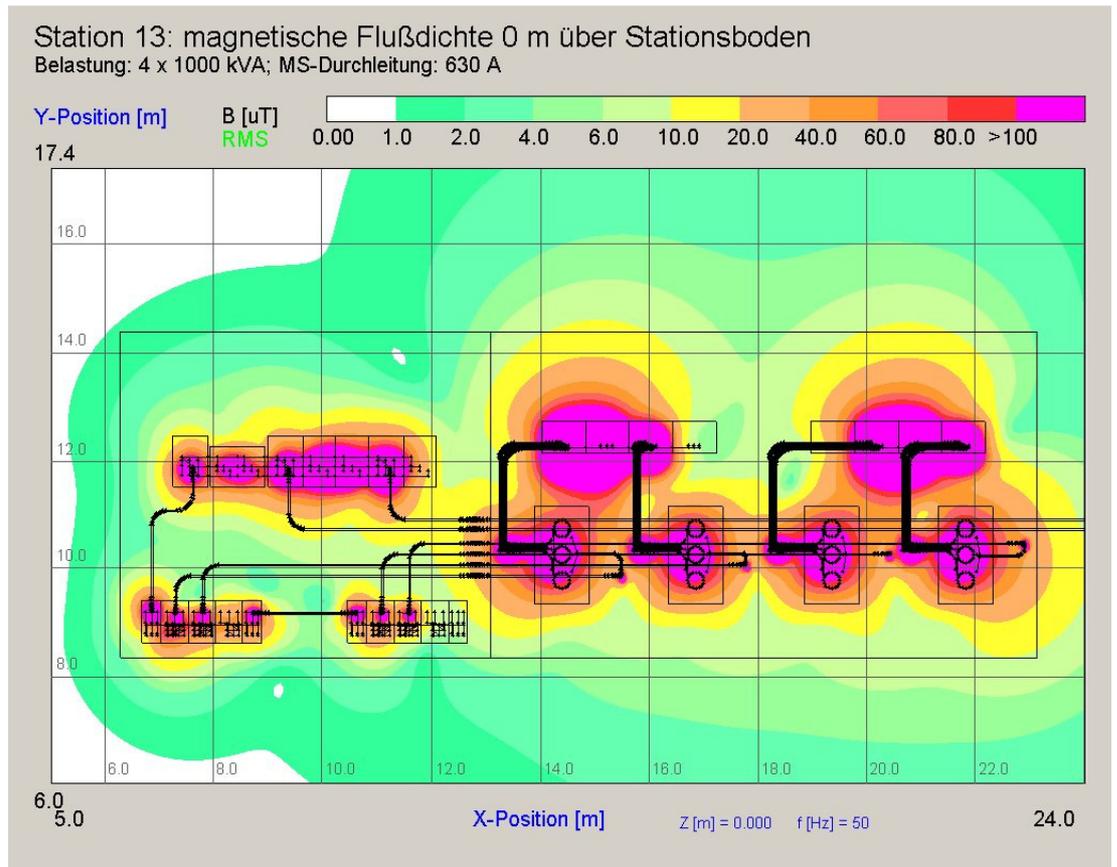


Abb. 10-37: Station 13 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

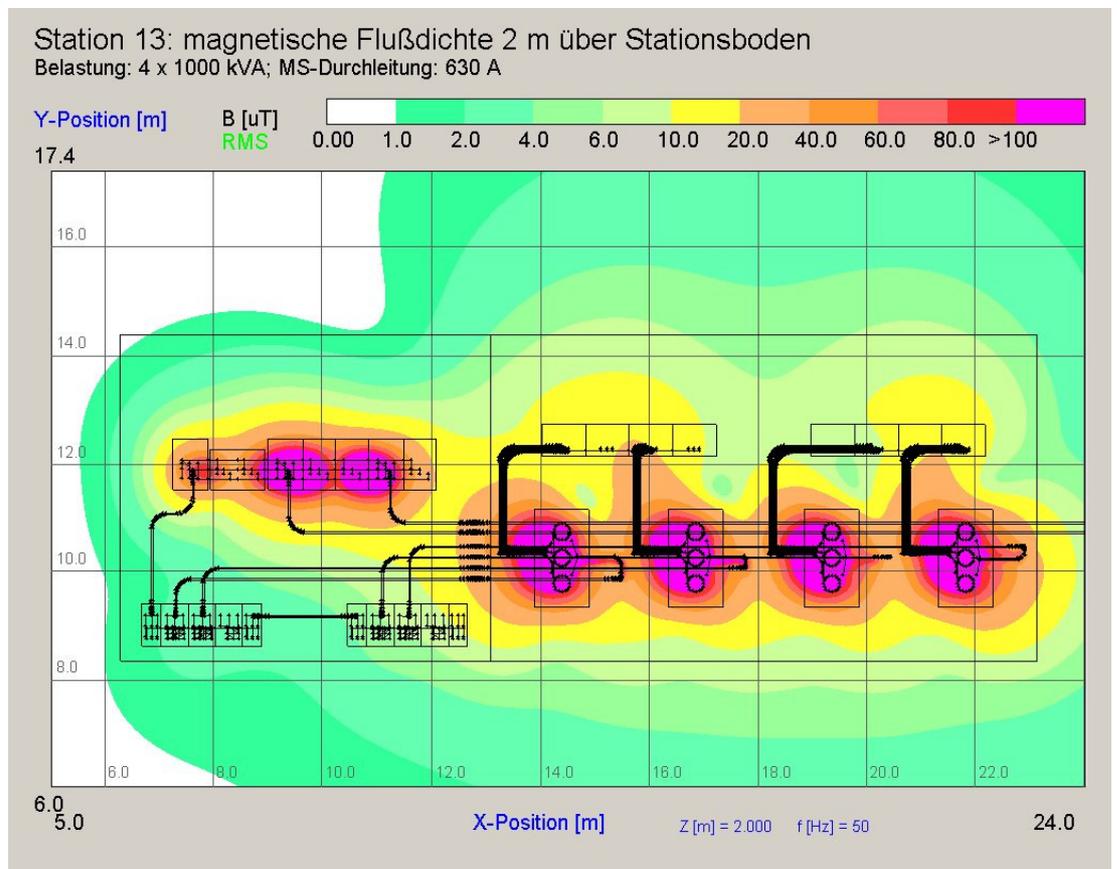


Abb. 10-38: Station 13 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

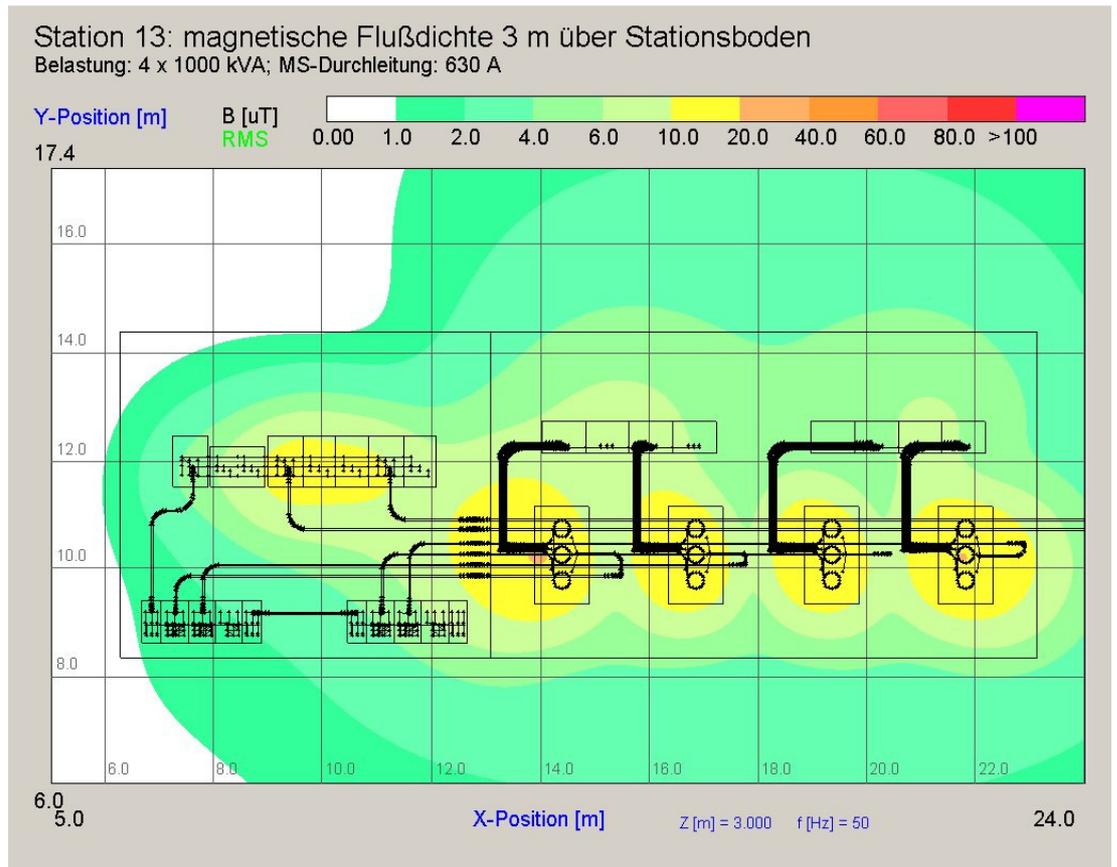


Abb. 10-39: Station 13 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

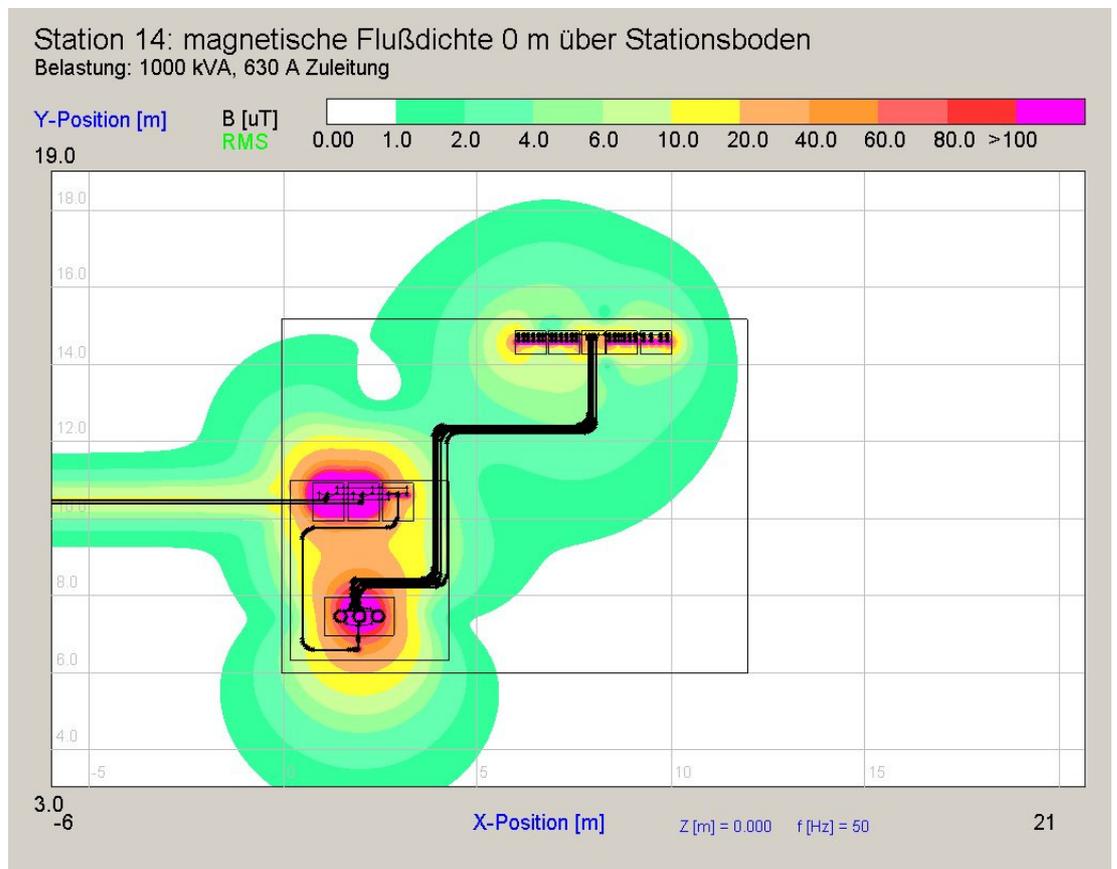


Abb. 10-40: Station 14 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

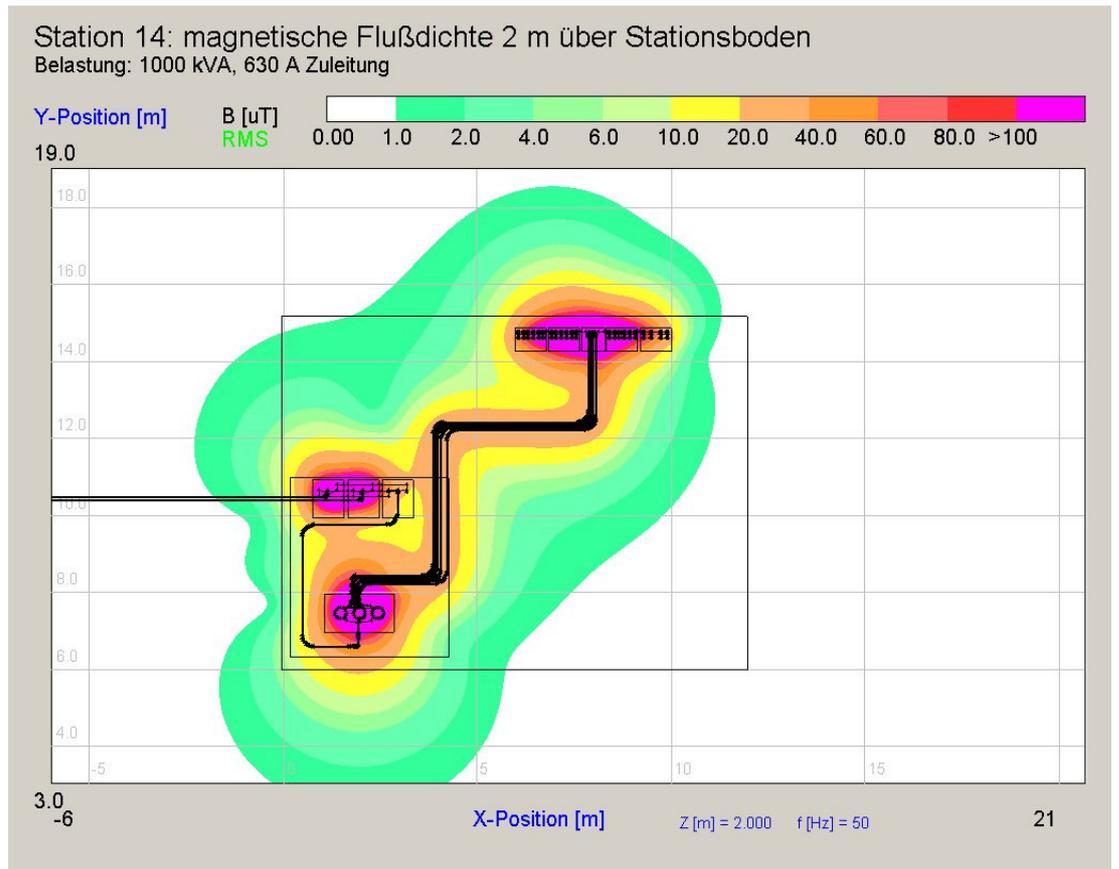


Abb. 10-41: Station 14 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

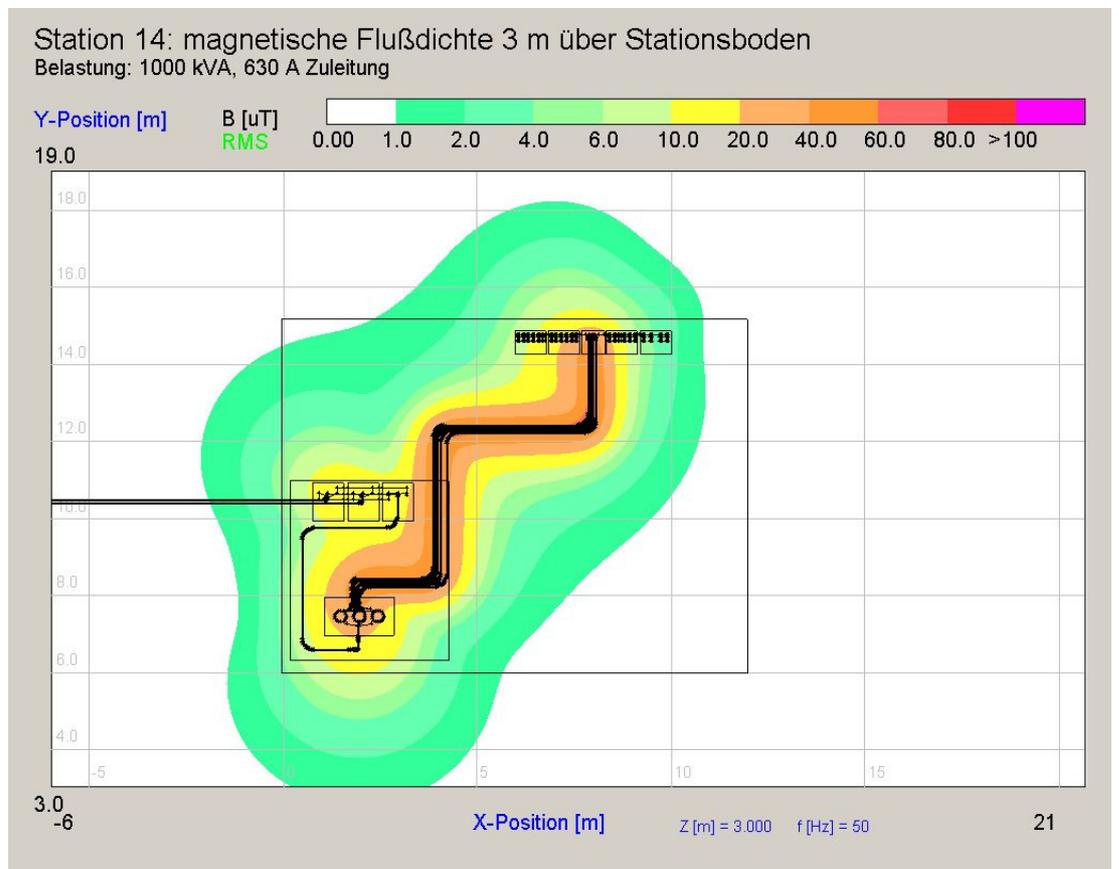


Abb. 10-42: Station 14 magnetische Flussdichte 3 m über dem Stationsboden

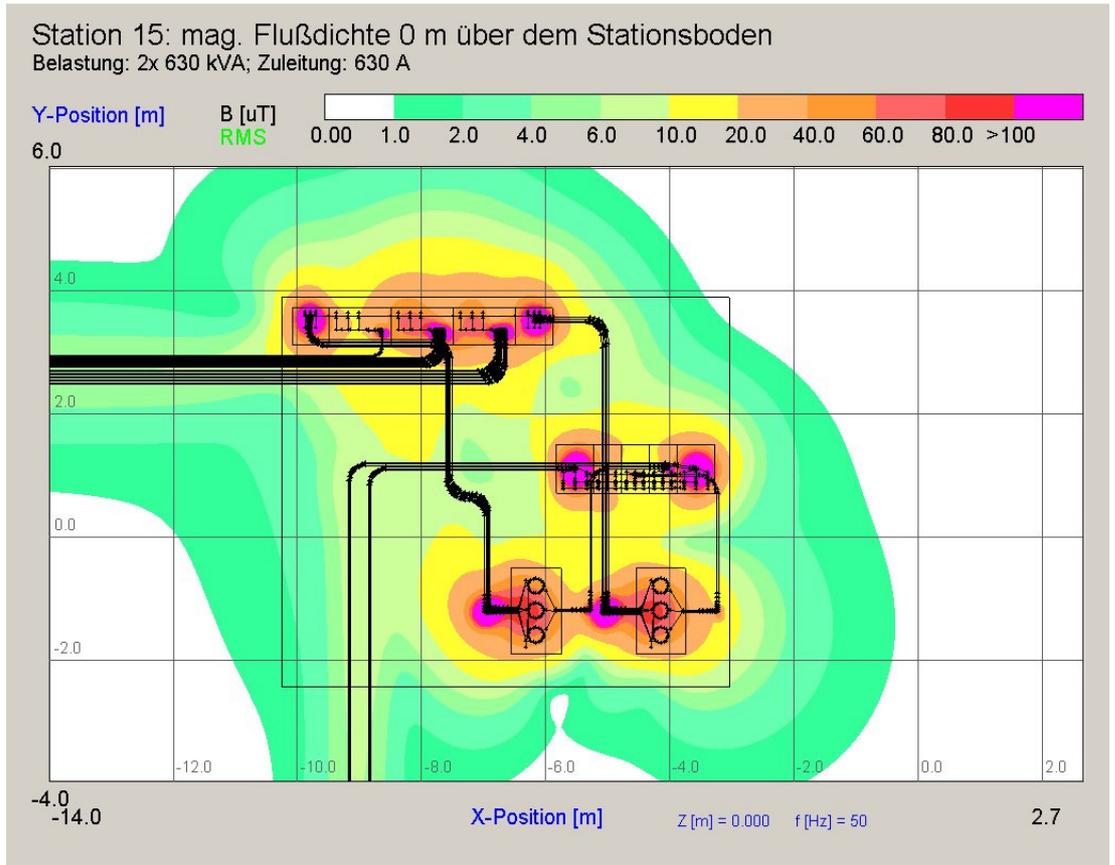


Abb. 10-43: Station 15 magnetische Flussdichte 0 m über dem Stationsboden

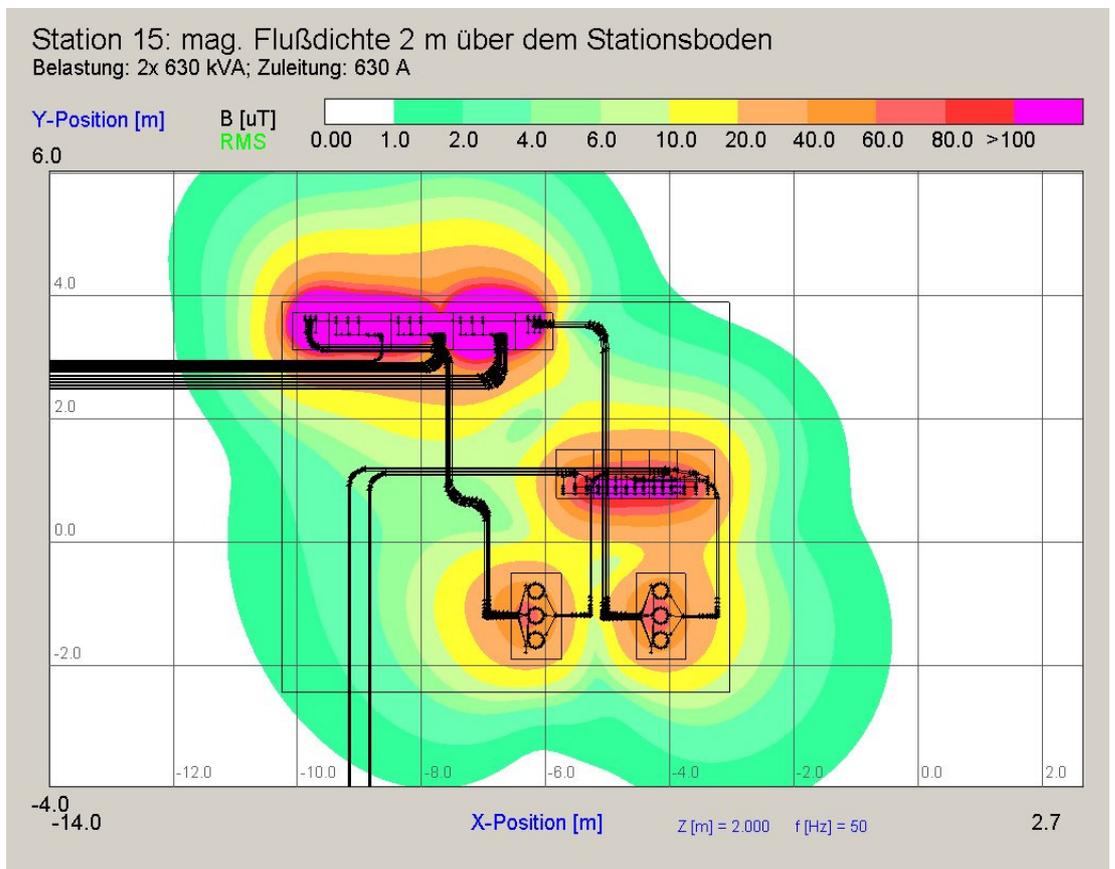


Abb. 10-44: Station 15 magnetische Flussdichte 2 m über dem Stationsboden

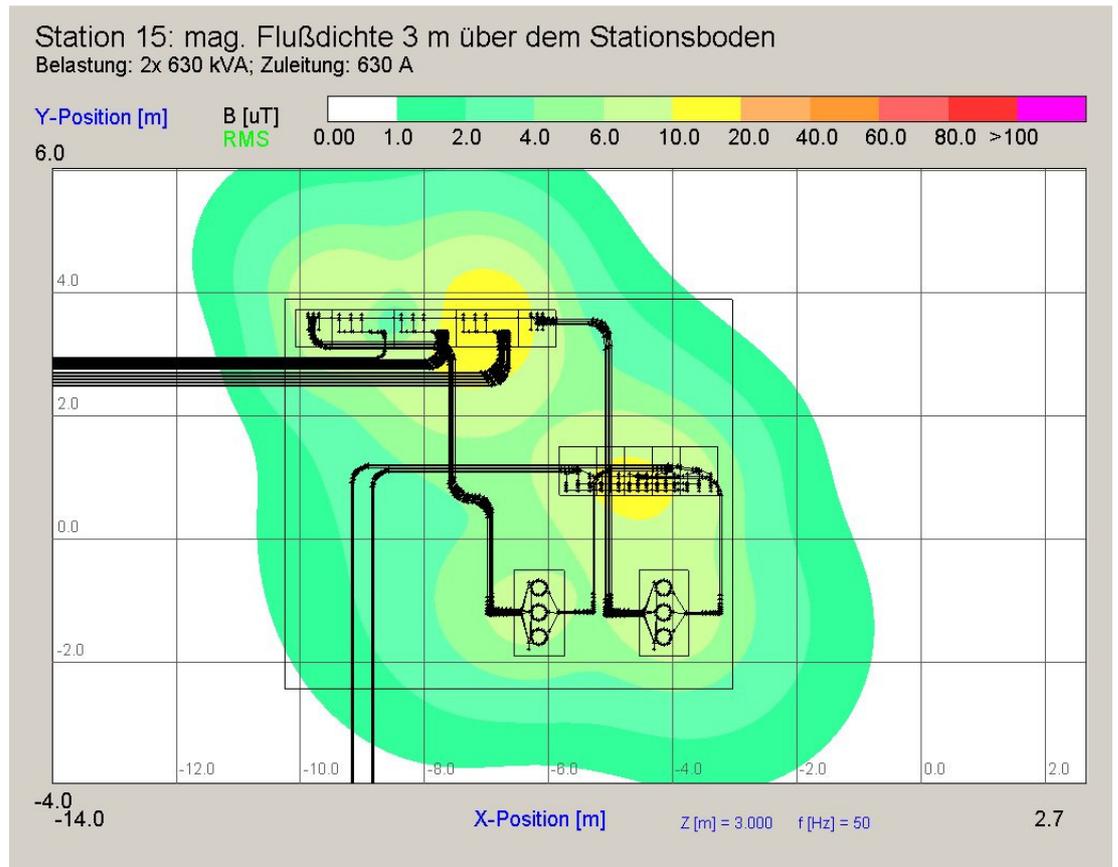


Abb. 10-45: Station 15 magnetische Flußdichte 3 m über dem Stationsboden

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] *Philippow*; Grundlagen der Elektrotechnik  
(Verlag Technik, 10. Auflage)
- [2] *Schwab, Adolf J.*; Begriffswelt der Feldtheorie  
(Springer Verlag, 5. Auflage)
- [3] *Lunze/ Wagner*; Einführung in die Elektrotechnik Teil II  
(VEB Verlag Technik, 2. Auflage)
- [4] *Asea Brown Boveri*; Schaltanlagen Taschenbuch  
(Cornelsen Verlag, 11. Auflage)
- [5] *Weißgerber, Wilfried*; Elektrotechnik für Ingenieure 1  
(Vieweg Verlag, 4. Auflage)

- [6] *Weißgerber, Wilfried*; Elektrotechnik für Ingenieure 2  
(Vieweg Verlag, 2. Auflage)
- [7] *Böttle/ Friedrichs*; Mathematische und elektrotechnische Grundlagen (Vogel Buchverlag, 7. Auflage)
- [8] *Knies/ Schierack*; Elektrische Anlagentechnik  
(Carl Hanser Verlag)
- [9] *Schwab/ Kürner*; Elektromagnetische Verträglichkeit  
(Springer Verlag, 5. Auflage)
- [10] *Heuck/ Dettmann/ Schulz*; Elektrische Energieversorgung  
(Vieweg Verlag, 7. Auflage)
- [11] *Happoldt/ Oeding*; Elektrische Kraftwerke und Netze  
(Springer Verlag, 5. Auflage)
- [12] *Flosdorff/ Hilgarth*; Elektrische Energieverteilung  
(Teubner, 6. Auflage)
- [13] *Habinger*; Elektromagnetische Verträglichkeit  
(Verlag Technik, 2. Auflage)
- [14] *Hosemann*; Elektrische Energietechnik  
(Springer Verlag, 30. Auflage)
- [15] *Kupke, Stephan*; Diplomarbeit: Optimierung der magnetischen Flussdichte an Netzstationen (FGEU mbH, Berlin 2000)
- [16] *Kretschmar, Thomas*; Diplomarbeit: Magnetische Flussdichte an MS-Schaltanlagen (FGEU mbH, Berlin 2003)
- [17] WinField® user manual (FGEU mbH)
- [18] Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-

Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV)

- [19] Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung)
- [20] *VDEW e. V.*; Umsetzung der 26. BImSchV in Mittelspannungsanlagen (VWEW Verlag)
- [21] BGV B11 Elektromagnetische Felder
- [22] Kundenkatalog Luftisolierte Schaltanlage Typ ZS8,  
Fa. ABB Power Technologies
- [23] Kundenkatalog HA 41.11 (2002) Schaltanlagen Typ 8DH10, bis 24 kV, SF<sub>6</sub>-isoliert anreihbar, Fa. SIEMENS AG
- [24] Projektierungshinweise FBX Gasisolierte Mittelspannungs-Schaltanlage bis 24 kV, Fa. AREVA T&D

## **Erklärung zur Bachelorarbeit**

Ich versichere, dass ich meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe

Berlin, den

Bernt Zimmer