Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 93 (2002)

Heft: 11

Artikel: Überprüfung dreidimensionaler elektrischer und magnetischer Felder

Autor: Berger, Willi / Kegel, Reinhard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855423

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Überprüfung dreidimensionaler elektrischer und magnetischer Felder

Einsatz moderner Software zur Überprüfung elektrischer und magnetischer Felder im Nahbereich eines Umspannwerkes nach der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)

Am 1. Februar 2000 ist die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV, [1]) in Kraft getreten. Ziel der Verordnung ist der Schutz der Bevölkerung vor schädlicher oder lästiger nichtionisierender Strahlung. Zu diesem Zweck werden für den niederfrequenten Bereich zwei Grenzwerte festgelegt: Der Immissionsgrenzwert[1] (IGW, [2]) und der Vorsorgewert, der auch als Anlagengrenzwert[2] (AGW, [3]) bezeichnet wird. Am Beispiel eines Freiluft-Unterwerkes der Azienda Elettrica Ticinese AET sollen die einfachen Überprüfungs- und Rechenmöglichkeiten mit modernen EDV-Werkzeugen aufgezeigt werden.

Willi Berger, Reinhard Kegel

Die Grenzwertdefinitionen

Der Immissionsgrenzwert

Der Immissionsgrenzwert der NISV beschreibt die frequenzabhängige Minimalanforderung für alle elektrischen Systeme im Nieder- und Hochfrequenzbereich gemäss dem internationalen Standard der ICNIRP[3]. Diese Werte müssen überall ohne Ausnahme an allen zugänglichen Bereichen eingehalten werden, wo sich Menschen aufhalten können. Bei 50 Hz beispielsweise gelten für das elektrische Feld $E \leq 5$ kV/m und für die magnetische Flussdichte $B \leq 100$ µT. Die immissionen der Anlage werden für denjenigen Betriebszustand ermittelt, bei welchem sie am höchsten sind (NISV Art. 14 Abs. 4).

Der Anlagengrenzwert

Die Anlagengrenzwerte sind Vorsorgewerte. Sie werden anlagenspezifisch festgelegt und gelten bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung, die durch die Nennscheinleistung des Transformators oder durch den thermischen Grenzstrom bei Leitern definiert ist. Niederfrequente 50-Hz-Feldquellen dürfen beispielsweise im Bereich der empfindlichen Nutzung den Wert 1 µT nicht überschreiten. Oberhalb des Anlagengrenzwertes liegt der so genannte Freihaltebereich, innerhalb dessen keine neue Bauzonen ausgeschieden werden dürfen. Dies gilt sowohl für elektrische Hochspannungsanlagen als auch für Sendeantennen oder andere Feldquellen.

Der arbeitshygienische Grenzwert (Suva-Grenzwert)

Die NISV regelt nicht die Begrenzung der Emission von Strahlung, die in Betrieben erzeugt und auf das Betriebspersonal einwirkt. Dort gelten die arbeitshygienischen Grenzwerte gemäss dem Suva-Dokument «Grenzwerte am Arbeitsplatz 2001» (1903 d).

	Elektrisches Feld *E*	Magnetische Flussdichte *B*
IGW	5 kV/m	100 µT
AGW	–	1 µT
Suva	10 kV/m	500 µT

Tabelle I Zusammenstellung der Grenzwerte für 50 Hz

Eine umfassende Zusammenstellung der Grenzwerte für die Frequenzen 0 Hz bis 300 GHz befindet sich im Anhang 2 des NISV.

Überprüfung von Immissions- und Anlagengrenzwert

Bei der Überprüfung wird ein linearer und zeitinvarianter Feldraum mit der Permeabilität $\mu_r = 1$ vorausgesetzt: Es sind also keine massiven ferromagnetischen, metallischen Gegenstände vorhanden, die das Feld verzerren könnten und die induzierten Wirbelströme können somit vernachlässigt werden. Die verwendeten Mess- und Berechnungsmethoden[4] müssen genau beschrieben werden.

Die elektrischen Phasenwinkel der Betriebsströme und Betriebsspannungen bzw. der entsprechenden Feldgrössen unterliegen keiner besonderen Bedingung. Weichen sie von 120° ab, müssen die Nullströme in den PEN-Leitern mit berücksichtigt werden.

Ein Beispiel

Am Beispiel eines Freiluft-Unterwerkes der Azienda Elettrica Ticinese AET sollen die einfachen Überprüfungs- und Rechenmöglichkeiten mit modernen EDV-Werkzeugen aufgezeigt werden.

Im nachfolgenden Rechenbeispiel werden symmetrische Ströme vorausgesetzt (Phasenwinkel 120°), da – wie Messungen gezeigt haben – Amplituden und Phasenverzerrungen im Hochspannungsnetz vernachlässigbar gering sind. Die folgende Darstellung erfolgt nicht im Zeit-, sondern im Frequenzbereich, weil mit dieser Darstellung die Berechnung der Grenzwertdefinitionen am leichtesten zu erklären sind. Den Berechnungen wird eine einfrequente Erregung zugrunde gelegt.

Jedem der µ Leiter wird die entsprechende Kreisfrequenz ν[5] sowie ein Strom $\underline{I}_{\mu,\nu}$ mit Amplitude und Phase zugeordnet. Werden alle n Leiter – die räumlich beliebig angeordnet sein können – durchflossen, so wird im einem beliebigen Punkt P(x,y,z) komponentenweise die magnetische Flussdichte gemäss Formel 1 induziert.

$$\underline{I}_{\mu,\nu} \rightarrow \begin{pmatrix} B_{x,\mu,\nu} \\ B_{y,\mu,\nu} \\ B_{z,\mu,\nu} \end{pmatrix} \qquad \forall\, \mu,\nu \qquad (1)$$

Bezeichnung	Anzahl
Schalt- und Kommando-Haus	1×
Überspannungsableiter, 150 kV	3×
Überspannungsableiter, 220 kV	4×
Trenner, 150 kV	3×
Trenner, 220 kV	4×
Kombiwandler, 150 kV und 220 kV	7×
Leistungsschalter	7×
Scherentrenner, 150 kV	15×
Scherentrenner, 220 kV	30×
Umzäunung mit zwei Eingängen	1×
Seil-Sammelschienen-Stützer	14×
Rohr-Sammelschienen-System-Portale	24×
Leistungsschalter 220 kV	2×
150-kV-Rohrsammelschienensystem	3×
2×220-kV-Seilsammelschienensystem	6×
250-MW-Transformator (Tesla-Transformator)	1×
Freileitungs-Trasse Nr 1 (Abspanner, Trager und Endmast)	3×
Freileitungs-Trasse Nr. 2 (Abspanner, Trager und Endmast)	3×
Freileitungs-Trasse Nr. 3 (Abspanner, Trager und Endmast)	3×
Freileitungs-Trasse Nr. 4 (Abspanner, Trager und Endmast)	3×
Cube-Objekte für Gebäude und Bauten	3×
Strassen, Umzäunung usw.	2×

Tabelle II Auflistung der nachgebauten Objekte im CAD-System des Programmes Copperfield

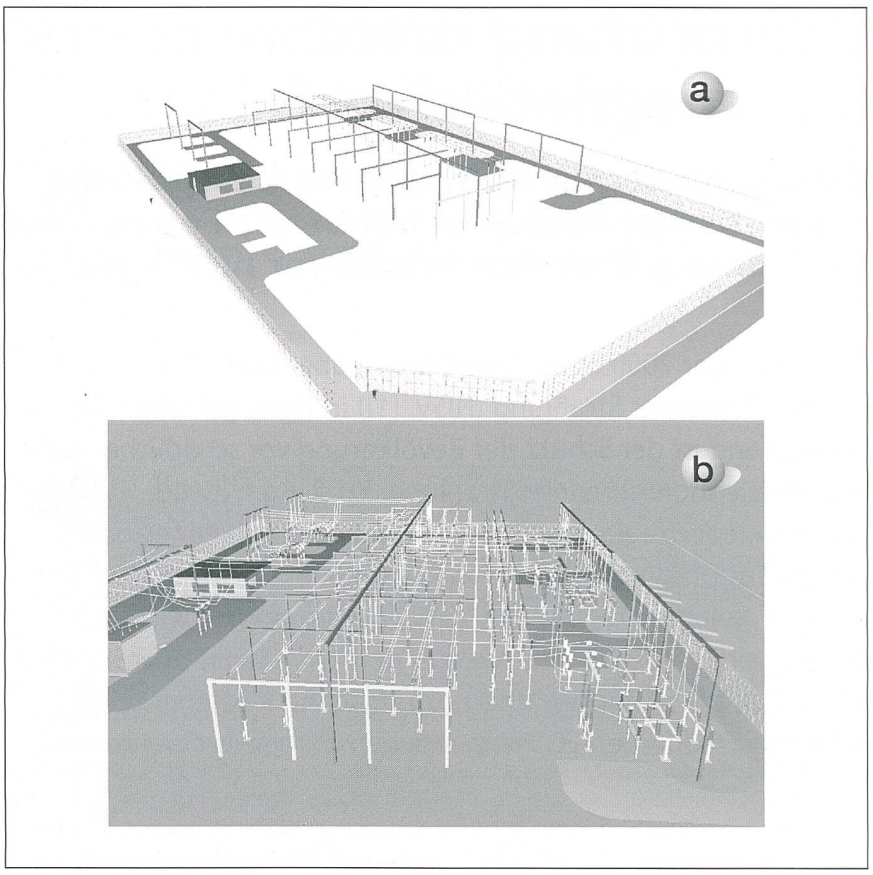

Bild 1 Digitaler Aufbau der Freiluftschaltanlage

a: Nachbildung anhand des Fundamentplanes; b: Dreidimensionale Darstellung der Freiluftschaltanlage ohne Freileitungsanbindung. Der Blick erfolgt durch die 3D-Video-Kamera des Systems in «virtual reality».

Bildet man aus den Summen der Stromkomponenten ein resultierendes Feld für die Frequenz ν, so erhält man komponentenweise das frequenzabhängige Gesamtfeld der magnetischen Flussdichte (Formeln 2a bis 2c). B^G bedeutet dabei den Grenzwert für die magnetische Flussdichte.

$$B^G_{x,\nu} = \sum_{\mu} B_{x,\mu,\nu} \qquad \forall \nu \qquad (2a)$$

$$B^G_{y,\nu} = \sum_{\mu} B_{y,\mu,\nu} \qquad \forall \nu \qquad (2b)$$

$$B^G_{z,\nu} = \sum_{\mu} B_{z,\mu,\nu} \qquad \forall \nu \qquad (2c)$$

Das aus den aufgeführten Komponenten errechnete Gesamtfeld (für die Frequenz ν) wird mit den Immissions- und Anlagengrenzwerten verglichen.

Die Mess- und Berechnungsmethoden

Freileitungen weisen unter anderem einen extrem nichtlinearen Durchhang auf. Da die meisten Leitungen bei Schwachlast betrieben werden, ist eine Hochrechnung auf Volllast mit seinem entsprechenden Durchhang nur sehr schwer möglich[6]. Insgesamt bestimmen über 40 Parameter diese Grösse. Aufgrund allfälliger Störfelder andere Quellen lässt sich das magnetische Feld einer bei Schwachlast betriebenen Freileitung messtechnisch kaum bestimmen.

Auch innerhalb eines Umspannwerkes können das magnetische und das elektrische Feld nur sehr schwer bestimmt werden, da die Volllast in der Regel nur an wenigen Tagen im Jahr vorliegt und viele Quellen einen Beitrag an das Feld in einem Punkt P leisten (siehe auch die integrale Grösse $B_{E,\nu}$ in Formel 3). Eine einfache Rückrechnung auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung aller Quellen ist aufgrund der nichtlinearen Beziehungen nach Formel 1 nicht möglich.

Durchführung der IGW-Überprüfung

Wird die euklidische Norm auf die Komponenten ohne Berücksichtigung der Phasenlage der einzelnen Komponenten gebildet, so erhält man nach DIN VDE 0848 T.1 den so genannten Ersatzwert der magnetischen Flussdichte als Effektivwert mit der ν-ten Einzelfrequenz gemäss Formel 3 [4].

$$B_{E,\nu} = \sqrt{\left|B^G_{x,\nu}\right|^2 + \left|B^G_{y,\nu}\right|^2 + \left|B^G_{z,\nu}\right|^2} \qquad \forall \nu \qquad (3)$$

Man erhält also für jede Frequenz ν eines Betriebsmittels im Punkt P(x,y,z) einen Ersatzwert $B_{E,\nu}$. Diese Grösse wird auch als Effektivwert der magnetischen Ersatzflussdichte der Frequenz ν bezeichnet. Für den zugänglichen Bereich des Unterwerkes (Niederfrequenzanlagen: 1 Hz bis 10 MHz) gilt nach NISV, Anhang 2, Abschnitt 22:

- $B_{E,\,50\,Hz} \leq 100\ \mu T$
- $E_{E,\,50\,Hz} \leq 5\ kV/m$

Durchführung der AGW-Überprüfung

Im Gegensatz zur IGW-Überprüfung werden bei der AGW-Überprüfung die Feldwerte phasentreu berücksichtigt. Dies ist gleichbedeutend mit dem Begriff *echter Effektivwert* oder *True RMS*. Die *einzelnen Frequenzen* werden im berechneten bzw. gemessenen Gesamtwert mit berücksichtigt. Eine Rechenhilfe liefert

dazu die so genannte Parseval-Formel, die in Formel 4 beispielhaft für die Komponente x angegeben ist.

$$B_{x,eff} = \sqrt{\sum_{v=1}^{v=m} \left| B_{x,v}^{G} \right|^2} \qquad (4)$$

Damit ergibt sich für alle Komponenten

$$B_{eff} = \sqrt{B_{x,eff}^2 + B_{y,eff}^2 + B_{z,eff}^2} \qquad (5)$$

Die magnetische Flussdichte B_{eff} stellt den True-RMS-Wert im Punkt P(x,y,z) dar. Er wird dem Anlagengrenzwert AGW = 1 µT für Niederfrequenz-Energieanlagen gegenübergestellt. Induzieren im Punkt P(x,y,z) mehrere Feldquellen (z.B. SBB-Leitung und Leitungen der Energieversorgung), so werden diese nach Formel 6 berechnet.

$$B_{eff} = \sqrt{B_{eff,Q_1}^2 + B_{eff,Q_2}^2 + B_{eff,Q_3}^2 + \ldots} \qquad (6)$$

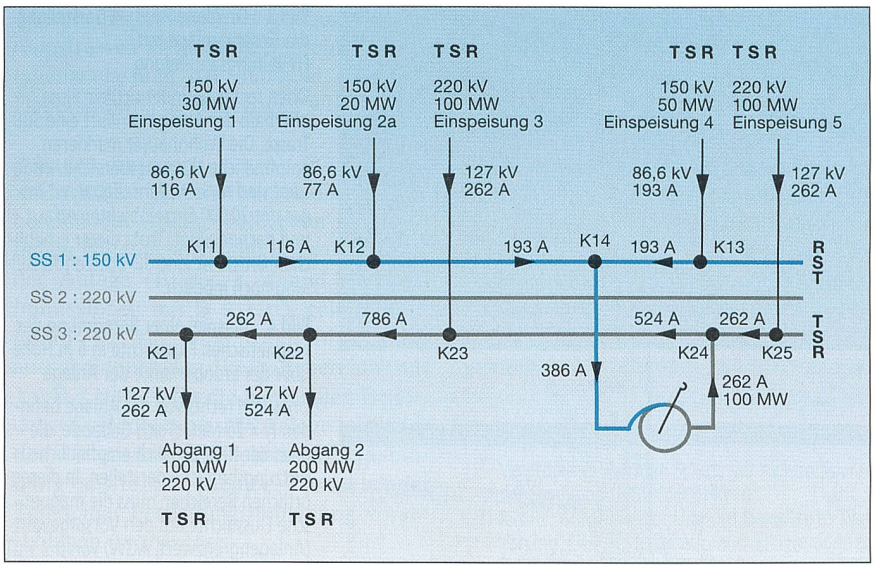

Bild 2 Lastflussplan der Freiluftschaltanlage

Angegeben sind die Lastströme in A unter Beachtung der Stromflussrichtung, die Spannung gegen Erde (Sternspannung) und der Wirkleistungsfluss. Die Sammelschiene SS2 ist abgeschaltet. Auf der 150-kV-Rohrsammelschiene werden 100 MW eingespeist, auf der 220-kV-Sammelschiene 300 MW, wobei der 250-MVA-Tesla-Transformator mit 100 MW zum Lastfluss beiträgt. Die summarische Abgangslast über die Portale Abgang 1 und Abgang 2 beträgt 300 MW. Die Phasenfolge ist von links nach rechts gelesen stets T-S-R. Dargestellt wird der typische maximale Lastfluss zu der Mittagszeit innerhalb eines Jahres.

Anforderungsprofil an Simulationsprogramme

Soll der Aufwand für den Nachbau einer grösseren Freiluftschaltanlage klein bleiben, so kommt nur ein 3D-CAD-System in Frage, welches zudem noch die elektrischen Eigenschaften der Objekte berücksichtigt. Die folgenden Mindesteigenschaften sollten implementiert sein:

- Lauffähigkeit auf allen 32-Bit-Windows-Plattformen
- Volle Netzwerkfähigkeit (Einzelplatz oder Client/Server)
- Vorhandensein eines Szenerie-Fensters (3D-Ansicht)
- Integrierte Lastfluss- und Kurzschlussstromberechnung
- Eigene Objekt-Beschreibungs-Sprache
- Vorhandensein eines Klassen-Compilers
- Konsequente Anwendung objektorientierter Techniken
- Umfangreiche Im- und Exportfunktionalitäten
- In Echtzeit generierte texturierte 3D-Grafiken
- Vorhandensein von umfangreichen dynamischen Klassenbibliotheken mit hierarchischer Struktur
- Berücksichtigung der elektrischen Materialeigenschaften
- Datenbibliothek in Form von Klassenobjekten
- Darstellung von Isolinien, Feldlinien, Vektorfelder und 3D-Isoflächen

Speziell für Umspannwerke, Unterwerke und Freiluftschaltanlagen sollten zusätzlich die folgenden speziellen CAD-Eigenschaften für das schnelle Konstruieren verfügbar sein:

- Möglichkeiten der Skalierbarkeit, weil die Objektgrösse (Komponenten wie Freileitungen oder Sammelschienen) meist auch spannungsabhängig sind
- Möglichkeit des «Gruppierens» bei Betriebsmitteln wie Portale, Scherentrenner usw.
- Möglichkeiten des einfachen Scannens von Fundamentplänen für die zentimetergenaue Nachbildung
- Möglichkeiten des Ausrichtens und des Verschiebens der Objekte in allen Raumrichtungen
- Festlegung des Strombelages und Berechnung des Lastflusses durch automatisch-generierte Logikverbindungen
- Video-Kamera-Fenster für die genaue dreidimensionale grafische Kontrolle
- Berücksichtigung des Schirmeffektes bei metallisch-gekapselten Betriebsmitteln
- Leichte Anbindung der Freileitungstrassen an die Portale der Freiluftschaltanlage
- Einfaches automatisches Erstellen beliebiger Freileitungstrassen auch bei Topologien
- Möglichkeiten einer grafischen Kontrolle mittels einer Video-Fahrt durch das Umspannwerk.

Vorgehen beim konkreten Einsatz an einer Freiluftschaltanlage

Das nachfolgende Beispiel bezieht sich auf Arbeiten an der von der Azienda Elettrica Ticinese betriebenen und noch

Nr.	Bezeichnung	Beseilung	Phasenfolge	Laststr.	Bündel
1	Einspeisung 1	AD 300	TSR /150 kV	–30 MW / 116 A	1er
2	Einspeisung 2b	AD 300	TSR / 150 kV	–20 MW / 77 A	1er
3	Einspeisung 3	AD 550	TSR / 220 kV	–100 MW / 262 A	1er
4	Einspeisung 4	2×AD 300	TSR / 150 kV	–50 MW / 193 A	2er
5	Einspeisung 5	2×AD 300	TSR / 220 kV	–100 MW / 262 A	2er
6	Abgang 1	AD 600	TSR / 220 kV	+100 MW / 262 A	1er
7	Abgang 2	AD 600	TSR / 220 kV	+200 MW / 524 A	1er
8	Durchgangsleitung 2a	AD 550	TSR / 380 kV	2×915 A	2er

Tabelle III Lastfluss für das betrachtete Beispiel

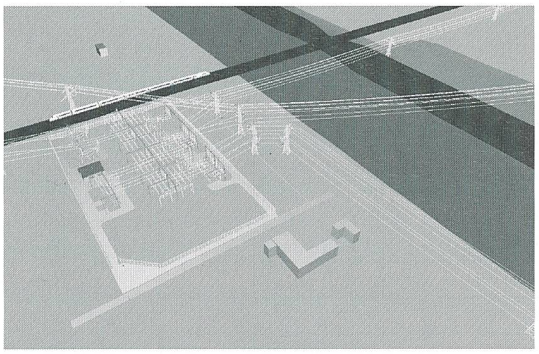

Bild 3 Dreidimensionale Darstellung der Gesamtanlage mit Freileitungsanbindung

Oben rechts befindet sich ein Fluss, oberhalb der Anlage verläuft eine SBB-Trasse. Die Wohnhäuser markieren empfindliche Nutzungsbereiche. Insgesamt sind rund 3,2 km² digital mit insgesamt 20 000 Einzelobjekten erfasst und nachgebildet. Trotz dieser erheblichen Grösse ist eine 3D-Echtzeitdarstellung noch möglich.

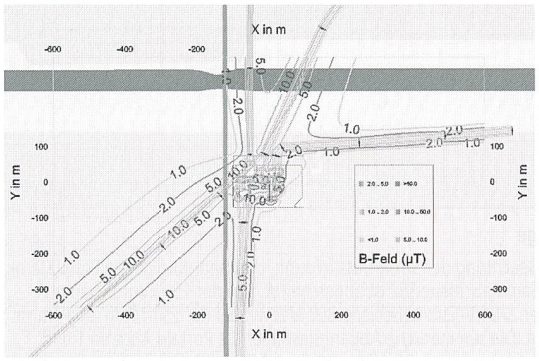

Bild 4 Beispiel einer Berechnung der magnetischen Flussdichte in 6 m Höhe über der Erdoberkante der Anlage

Links und rechts von der Anlage befinden (y = 25 Meter) sich Gebäude, die nach der NISV zugleich empfindliche Nutzungsbereiche darstellen. In diesen örtlichen Bereichen muss die magnetische Flussdichte auf den Vorsorgewert (Anlagengrenzwert, AGW) von B ≤ 1 µT abgeklungen sein. Als «Anlage» wird hier das Umspannwerk mit dem massgebenden Teil der Freileitungsanbindung vorgeschlagen. Gewerblich-betriebliche Anlagen sind nicht vorhanden. Die Verkehrsdichte der örtlich benachbarten SBB-Trasse ist derart gering, dass sie in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt wird.

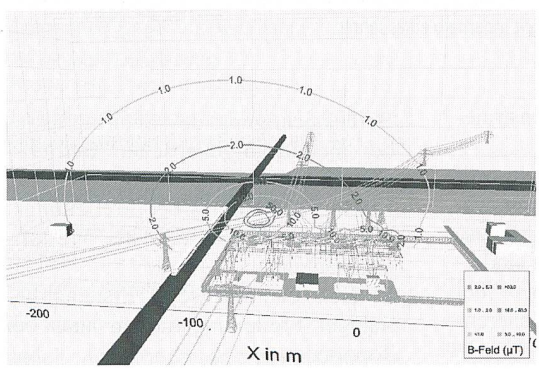

Bild 5 Dreidimensionale Darstellung der Anlage mit seinen verschiedenen Feldquellen

Die Berechnungsfläche verläuft als XZ-Querschnittsfläche räumlich durch die links und rechts befindlichen Gebäude; AGW-Überprüfung auf Einhaltung der Immissionen im Bereich der empfindlichen Nutzungsbereiche mit B ≤ 1 µT. Die 1-µT-Isolinie verläuft deutlich ausserhalb der Gebäude, so dass hier die NISV eingehalten wird.

umzubauenden Freiluftschaltanlage «Sottostazione Piano di Magadino».

Bei diesem vorgestellten Fall handelt es sich um eine wesentliche Änderung einer Anlage, die gemäss der NISV wie eine Neuerrichtung zu behandeln ist. Da die neue Anlage noch nicht erstellt wurde und zugleich eine Optimierung noch vor der Baumassnahme die kleinsten Kosten verursacht, wurde aus den bereits weiter oben aufgezeigten Gründen den Berechnungsmethoden gegenüber den Messmethoden den Vorzug gegeben, zumal mit ihnen die Optimierung und Variationsberechnungen in kürzester Zeit durchgeführt werden können. Die einschlägigen Mess- und Berechnungsmethoden finden sich in der zurzeit auch in Deutschland gültigen Vorschrift [4].

Wahl des Simulationsprogramms

Ein Softwaresystem, das alle weiter oben beschriebenen Profil-Eigenschaften aufweist, ist beispielsweise das in diesem Beispiel verwendete Programm Copperfield [5]. Seine Vorzüge sind

- schnelle 3D-CAD-Konstruktion beliebig neuer Module
- Visualisierung in Echtzeit
- gleichzeitige dreidimensionale Darstellung von Quelle und Senke mit Isolinien usw.

Für die Beschreibung der Freiluftschaltanlage wurden über 140 zum Teil neue Objekte wie etwa Überspannungsableiter, Trenner, Kombiwandler für die Spannungsebenen 150 kV und 220 kV nach Vorlagen des Betreibers dreidimensional generiert. Die nachstehend aufgeführte Tabelle II zeigt die einzelnen Betriebsmittel.

Digitaler Aufbau der Freiluftschaltanlage

Der Aufbau der Freiluftschaltanlage erfolgt wie in der Realität: Zunächst werden anhand des Fundamentplanes im digitalen System die Fundamente, Gitterbegrenzungen, Strassen, Grünbereiche, Portale und Sammelschienen nachgebildet (Bild 1a). Hilfreich ist dabei die Möglichkeit, die Fundament-Zeichnungen des Betreibers zu scannen, im Format «.dxf» oder «.bmp» abzuspeichern und als Schablone skaliert mit realen Abmessungen in Copperfield zu hinterlegen.

Danach erfolgt der weitere Aufbau mit Überspannungsableiter, Scherentrenner und Kombiwandler bis zu den Abspann-Portalen mittels der vorbereiteten dynamischen Klassenbibliothek (Bild 1b). Für eine schnelle Positionierung hat sich als besonders hilfreich erwiesen, in beliebigen Ebenen Masspfeile zu positionieren. Mit Hilfe eines digitalen «Rollbandes[7]» kann jederzeit der Aufbau kontrolliert werden. Die Möglichkeit, alle Objekte zu kopieren, einzufügen bzw. zu skalieren, beschleunigt den digitalen Aufbau ebenfalls erheblich.

Die Freiluftschaltanlage weist sowohl ein Rohr- als auch ein Seilsammelschienensystem auf. Da beide Systeme mehrfach Stromknoten aufweisen (Bild 2), werden sie direkt durch räumlich aufgespannte Drähte mit Durchhang nachgebildet. Sie gestatten eine beliebige Verschaltung mit beliebigen Stromknoten. Der Lastfluss ist vom Anlagenbetreiber vorgegeben (Bild 2) und lässt sich direkt als komplexer Stromwert grafisch halbautomatisch eintragen und kontrollieren. Verwendet werden dabei die vom Betreiber zur Mittagszeit sich betrieblich als höchste Auslastung ergebenden Stromwerte (Tabelle III). Nachdem die Traversenbilder der zum Unterwerk führenden Trassen im CAD-System einschliesslich der Aldrey-Seile dreidimensional als Objekte der Klassenbibliothek (mit Unterscheidung als Trager, Abspanner und Portalmast) erstellt sind, können in kurzer Zeit sämtliche Trassen digital realisiert werden (Bild 3).

Für die Freiluftschaltanlage «Sottostazione Piano di Magadino» betrug die Gesamtzeit für den kompletten digitalen Aufbau einige Personentage.

Festlegen des Grenzwertes

Auf Grund der einfrequenten Erregung mit nur einer Anlage gilt für den Bereich der empfindlichen Nutzung für die magnetische Flussdichte entsprechend Formel 6: $B_{eff} \leq 1$ µT.

Ergebnis der Anlagen-Überprüfung

Arbeitshygienische Grenzwerte

Die Überprüfung der arbeitshygienischen Grenzwerte erfolgt in zwei Schritten: der Prüfung ohne und mit Freileitungsanbindung.

Auf Grund des grossen räumlichen Aufbaues des Unterwerkes werden im ersten Fall an allen für das Betriebspersonal zugänglichen Stellen innerhalb des eingezäunten Unterwerkes die Immis-

sionswerte in verschiedenen Höhen überprüft. Innerhalb der Einzäunung weist das Unterwerk in 1 m Höhe eine maximale elektrische Feldstärke von etwa 6 kV/m auf, die magnetische Flussdichte beträgt nur maximal rund 10 µT. Die Suva schreibt Genzwerte für die magnetische Flussdichte von 500 µT und für das elektrische Feld von 10 kV/m vor [6]. Verglichen mit den ermittelten maximalen Werten innerhalb der Anlage erfüllt die Freiluftschaltanlage vollumfänglich die arbeitshygienischen Grenzwerte.

Immissionsgrenzwert

Der Immissionsgrenzwert für das elektrische Feld und für die magnetische Flussdichte wird an allen zugänglichen Stellen des Unterwerkes und in unmittelbarer Umgebung eingehalten. Als besonders günstig für eine geringe Feldbelastung hat sich dabei die grosse Höhe der Masten herausgestellt. Weiterhin liegt der typische maximale betriebliche Lastfluss der Leitungen unterhalb des maximalen Dauerstromes der Aldrey-Seile [7, 8, 9]. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass bei Freileitungstrassen als höchste betriebliche Anlagenauslastung der maximal zulässige Dauerstrom I_d herangezogen wird.

Anlagengrenzwert

Zu prüfen ist weiterhin, ob die im Nahbereich der Anlage gelegenen empfindlichen Nutzungsbereiche links und rechts der Anlage (Bilder 3, 4 und 5) Feldimmissionen mit $B \leq 1$ µT gelten. Weiterhin ist für eine zukünftige Bauausscheidung der Freihaltebereich mit $1 \leq B \leq 100$ µT für die kantonalen Behörden von Bedeutung. Als Anlage wird hier das Unterwerk mit seiner Portalanbindung sowie ein kleiner massgebender Teil seiner Freileitungsanbindung vorgeschlagen (worse case).

Zusammenfassung

Das vorliegende Beispiel zeigt, dass gerade moderne Rechenprogramme mit CAD-Eigenschaften und dreidimensionaler grafischer Kontrolle (virtual reality) für die Ermittlung der Emissionen einschliesslich möglicher Optimierung den Vorzug zu geben ist. Weithin zeigt sich, dass Nichtlinearitäten (z. B. bei Freileitungen, Mehrfachquellen mit unterschiedlichen Abständen zum Messpunkt) zwar rechnerisch, aber kaum messtechnisch beherrschbar sind. Ist eine Anlage digital nachgebaut, sind Modifikationen und Änderungen schnell nachzuvollziehen und zu prüfen. Mit steigender Klassenbibliothek der Betriebsmittel geht der digitale Aufbau zunehmend schneller vonstatten.

Referenzen

[1] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV). SR 814.710.

[2] ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics, April 1998, Volume 74, Nr. 4, p. 494–522.

[3] Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG), SR 814.01.

[4] Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsverfahren. DIN VDE 0848 Teil 1, Ausgabe Mai 1995; Beuth-Verlag.

[5] *A. Killaitis:* Berechnung elektromagnetischer Felder mit Copperfield. Weka-Verlag; Februar 2002, Teil 15.7, Praxis-Handbuch «Elektromagnetische Verträglichkeit».

[6] SUVA: Grenzwerte am Arbeitsplatz 2001. Suva-Publikation 1093.d.

[7] Verordnung über elektrische Leitungen (LeV). 20. Januar 1998, SR 734.31.

[8] Leitsätze für die zulässige Dauerstrombelastung von Leitungsseilen. SEV-Publikation Nr. 198.d, SEV-Bulletin 1951, Nr. 15, S. 562–564.

[9] *E. Maurer:* Die Berechnung der Freileitungen mit Rücksicht auf die mechanischen Verhältnisse der Leiter. SEV-Bulletin, Jahrgang 1936, Nr. 2 und 3 (Sonderdruck).

[10] Raumplanungsgesetz (RPG). SR 700.

Adressen der Autoren

Dipl. El.-Ing. HTL *Willi Berger*, Schweizerischer Elektrotechnischer Verein (SEV), CH-8320 Fehraltorf, willi.berger@sev.ch

Prof. Dr.-Ing. *Reinhard Kegel*, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit (IEV), D-23560 Lübeck, iev@iev.de

[1] Nach ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection).

[2] Umweltschutzgesetz (USG), Art. 1, Abs. 2.

[3] ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Vereinigung unabhängiger Wissenschaftsexperten. ICNIRP besteht aus einer *Kommission* von 14 Mitgliedern, 4 wissenschaftlichen *Standing Committees*, welche sich mit den Themenkreisen Epidemilogie, Biologie, Dosimetrie und optische Strahlung beschäftigen, sowie aus einer Reihe von Beratern (www.icnirp.de).

[4] Zurzeit liegen noch keine durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal) festgelegten Mess- und Berechnungsmethoden vor. Aus diesem Grunde wird die Norm VDE 0848 [4] verwendet.

[5] 50 Hz im Falle der anlageeigenen Einrichtungen (Sammelschienen, Leitungen usw.) sowie $16^2/_3$ Hz für die in unmittelbarer Nähe der Anlage vorbeiführenden Bahneinrichtungen.

[6] Der Durchhang der Freileitungen ist abhängig von der Belastung (Wärmeentwicklung).

[7] Hilfsmittel zum direkten Eintragen einer nicht in Achsenrichtung verlaufenden Linie.

Contrôle des champs électriques et magnétiques tridimensionnels

Utilisation de logiciel moderne pour le contrôle des champs électriques et magnétiques à proximité d'une station de transformation selon l'ORNI

L'Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non-ionisant (ORNI, [1]) est entrée en vigueur le 1er février 2000. Cette ordonnance a pour objectif la protection de la population contre le rayonnement non ionisant nuisible ou incommodant. A cette fin, deux valeurs limites sont fixées pour la gamme à basse fréquence: la valeur limite d'immissions [2] et la valeur limite de l'installation [3].

Le présent exemple d'une sous-station de plein air de l'Azienda Elettrica Ticinese AET montre que l'on doit donner la préférence à des programmes de calcul modernes à fonctionnalités CAO et contrôle graphique tridimensionnel (virtual reality) pour la détermination des émissions avec optimisation éventuelle. En outre, on constate que les non-linéarités (par ex. avec les lignes aériennes, sources multiples à différentes distances du point de mesure) ne peuvent pas être maîtrisées par la mesure, mais peuvent l'être par le calcul. Lorsqu'une installation est reproduite sous forme numérique, les changements et modifications peuvent rapidement être reproduits et vérifiés. A mesure que la bibliothèque des moyens d'exploitation augmentera, la construction numérique pourra s'accélérer.