

Berechnung und Messung elektromagnetischer Felder

Autor(en): **Michaud, Serge**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **83 (1992)**

Heft 11

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902837>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Berechnung und Messung elektromagnetischer Felder

Serge Michaud

In diesem Artikel werden einige vom Starkstrominspektorat durchgeführte Berechnungen elektromagnetischer Felder von Starkstromleitungen beschrieben; im Zentrum steht dabei der Vergleich der Rechenresultate für zwei spezifische Masttypen mit verschiedenen Phasenlagen. Danach stellt der Autor Messungen an einer 380-kV- und einer 220-kV-Leitung vor und vergleicht sie mit den Berechnungen. Schliesslich werden die von der IRPA empfohlenen Grenzwerte für elektromagnetische Felder in Erinnerung gerufen.

Dans cet article, on présente quelques exemples de calculs de champs électromagnétiques effectués par l'Inspection des installations à courant fort. On compare les valeurs obtenues pour deux types de pylônes avec diverses dispositions des phases. On présente ensuite le résultat de deux campagnes de mesures effectuées sur une ligne 380 kV et une ligne à 220 kV et compare ces résultats aux valeurs calculées. Le dernier chapitre rappelle les valeurs limites recommandées par l'IRPA.

Adresse des Auteurs

Serge Michaud, Inspection des installations à courant fort, Inspection Suisse Romande, Ch. de Mornex 3, 1003 Lausanne.

Bei der Produktion, Übertragung, Transformation und Verteilung elektrischer Energie sowie bei deren Anwendung entstehen elektromagnetische Felder. Dieses physikalische Phänomen ist seit langem bekannt. Mit zunehmendem Stromverbrauch in den letzten Jahren, der die Anwendung immer höherer Spannungen und Ströme erfordert, wächst im breiten Publikum eine gewisse Besorgnis über das Vorhandensein dieser Felder, insbesondere in der Nähe von Starkstromanlagen. Das Starkstrominspektorat sieht sich mehr und mehr mit diesem Problem konfrontiert, besonders im Rahmen von Genehmigungsverfahren von Höchstspannungsleitungen.

Auf diesem Gebiet sind drei Gesichtspunkte zu unterscheiden:

- Mögliche Auswirkungen der elektromagnetischen Felder auf Menschen, Tiere und Pflanzen.
- Festsetzung von zulässigen Grenzwerten für das elektrische und für das magnetische Feld unter gegebenen Bedingungen.
- Ermittlung der Feldstärken.

Dieser Artikel will die vom Starkstrominspektorat durchgeführten Studien hinsichtlich dieses dritten Aspekts darlegen.

Rechenprogramm

Das verwendete Rechenprogramm für IBM-kompatible PCs ist speziell für die Berechnung elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Hochspannungsleitungen und von damit verbundenen Grössen des Koronaeffekts bei Wechselspannung geschaffen worden. Zu den Berechnungsmöglichkeiten gehören:

- magnetisches Feld H und B im Raum
- elektrisches Feld E im Raum

- Gradient des E -Feldes an der Leiteroberfläche
- Koronaverluste
- radioelektrisches Störfeld oder elektrisches Rauschen
- Geräusche.

Das Programm ist konzipiert für 50 induzierte Stränge und/oder gerade Leiter und zur Berechnung der Felder an 200 Feldpunkten. Die Methoden zur Berechnung der Felder, der Oberflächengradienten und der Parameter des Koronaeffektes sind im wesentlichen der Arbeit «L'effet de couronne en tension alternative» aus der Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France entnommen [1]. Der Berechnung liegen folgende Annahmen (Vereinfachungen) zugrunde:

- Die Positionen der Leiter und der Feldpunkte werden durch das räumliche Koordinatensystem x , y , z definiert. Die Felder werden in bezug auf die Bodenoberfläche berechnet, die bezüglich der Achsen x und z des Koordinatensystems geneigt sein kann.
- Die Felder werden in einer rechtwinklig zu den Leitern und zum Boden stehenden Ebene berechnet.
- Die Felder werden durch fremde Elemente wie Masten, metallische Gegenstände, Isolatorketten, Gebäude usw. nicht beeinflusst.
- Man nimmt an, das Dielektrikum sei homogen ($\epsilon_r = \text{konstant}$).
- Bei der Berechnung der elektrischen Felder nimmt man an, der spezifische Bodenwiderstand sei praktisch unendlich. Damit ist die Eindringtiefe des Rückstromes sehr viel grösser als die Höhe der Leiter über Grund. Dies trifft für technischen Wechselstrom zu. Der Verlauf des magnetischen Feldes wird vom Rückstrom im Boden (gedach-

ter Leiter) bei diesen Voraussetzungen kaum gestört.

- Die einander entsprechenden Spannungs- und Stromspitzenwerte in einem System mehrerer Stromkreise gleicher Frequenz, sowie in einem Mehrfrequenzsystem in der ersten Periode des betrachteten Zeitabschnittes, seien in Phase. Man berechnet auf diese Weise, bei einer Überlagerung der Spitzenwerte, die Felder für den strengsten Fall.

Durchgeführte Berechnungen

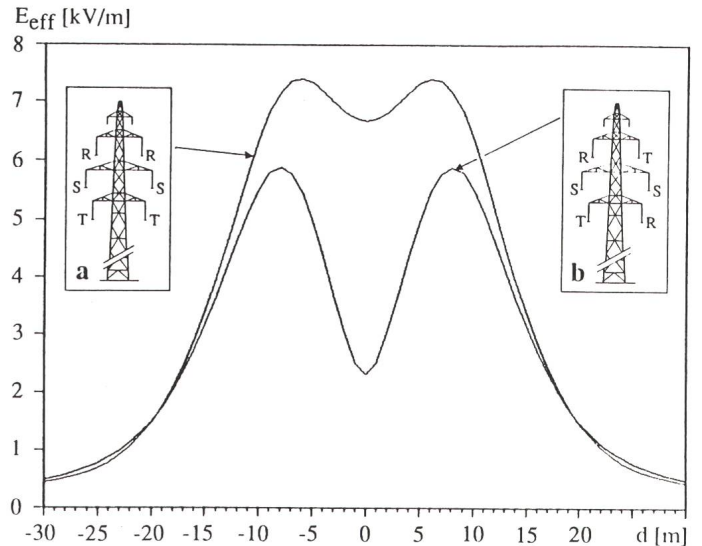
Es wurden Berechnungen ausgeführt für Freileitungen verschiedener Spannungsniveaus im Bereich zwischen 16 und 380 kV. Wir zeigen vorerst zwei Rechenbeispiele für 380-kV-Leitungen. Die Berechnungen erfolgten unter den folgenden Bedingungen:

- $U = 400 \text{ kV}$
- $I = 2900 \text{ A}$
- Bodenabstand der untersten Leiter: 10 m
- Berechnung für Punkte im halben Mastabstand (Eliminierung der Einflüsse durch die Masten)
- Berechnung für Punkte im Abstand von einem Meter über dem Erdboden und mit einem Projektionsabstand zwischen -30 und +30 m vom Leiter.

Die folgenden Grafiken zeigen die Effektivwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärken in Funktion des Projektionsabstandes von der Leitung.

Bild 1 Elektrische Felder einer 380-kV-Leitung

Berechnungen für Leitungen mit Tannenform-Gittermasten
 a Stränge mit orthogonalsymm. Phasenlage
 b Stränge mit zirkularer Phasenlage
 E_{eff} elektrisches Feld (Eff.-werte)
 d Abstand von der Leitungsachse



Gittermast in Tannenform 2x380 kV + 1x132 kV (SBB)

Die Bilder 1 und 2 zeigen Rechenresultate für eine Hochspannungsleitung 2x380 kV + 1x132 kV (SBB) mit Gittermasten in Tannenform.

Die Berechnungen wurden auch für die vier andern möglichen Phasenlagen ausgeführt. Dies machte deutlich, dass im Falle eines Gittermasts in Tannenform die zirkulare Phasenlage hinsichtlich der Erzeugung eines möglichst geringen elektrischen Feldes am günstigsten ist (Feldstärkehöchstwert von $\leq 6 \text{ kV/m}$ und mit zunehmender Distanz von der Leiterachse rasch abnehmende Feldstärke). Die zirkulare Phasenlage ist auch hinsichtlich des magnetischen Feldes am günstigsten,

wenn auch der Unterschied zu anderen Phasenlagen weniger deutlich ist.

Bei Bewilligungsverfahren für neue Hochspannungsleitungen oder Ände-

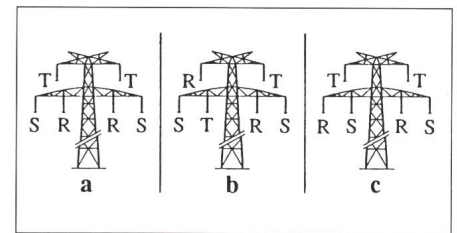


Bild 3 Mögliche Phasenlagen bei Donau-Gittermasten

- a Stränge mit orthogonalsymmetrischer Phasenlage
- b Stränge mit zirkularer Phasenlage
- c Phasenordnung TRSRST

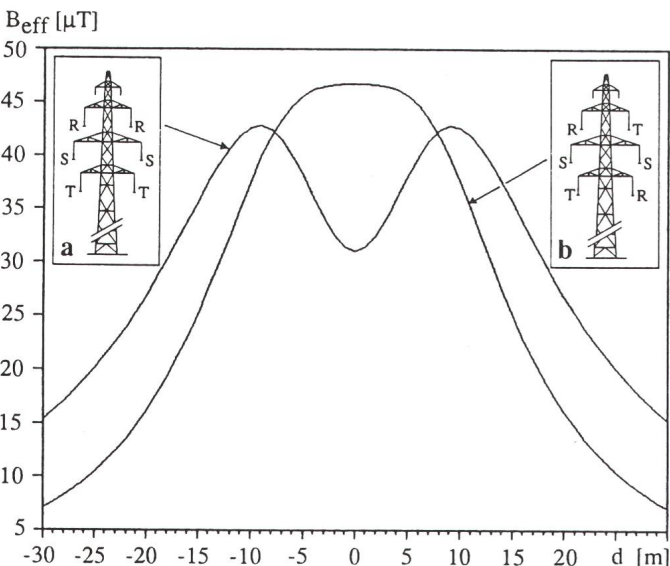


Bild 2 Magnetfelder einer 380-kV-Leitung

Berechnungen für Leitungen mit Tannenform-Gittermasten
 a Stränge mit orthogonalsymm. Phasenlage
 b Stränge mit zirkularer Phasenlage
 B_{eff} magnetische Induktion (Eff.-werte)
 d Abstand von der Leitungsachse

rungen an bestehenden Leitungen kann das Starkstrominspektorat verlangen, dass die in bezug auf die elektromagnetischen Felder günstigste Phasenfolge gewählt wird. Allerdings müssen dabei meistens auch noch andere Kriterien wie geometrische Randbedingungen und visuelle Aspekte berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere der Fall bei Abzweigungen und Einführungen von Leitungen.

Gittermast Typ Donau 2x380 kV

In den Bildern 4 und 5 sind Resultate für eine Hochspannungsleitung 2x380 kV mit Gittermasten des Typs Donau (siehe Bild 3) dargestellt.

Die drei andern Phasenlagen sind ebenfalls untersucht worden. Wenn auch hier die zirkulare Phasenlage hinsichtlich des elektrischen und des

magnetischen Feldes günstig ist, so zeigt doch die Phasenfolge TRSRST (siehe Bild 3) andere Vorteile; insbesondere sind in diesem Fall die Felder direkt unter der Leitung (in der Mitte) sehr schwach.

Messgeräte

Wie oben erwähnt, wurden die Berechnungen unter Annahme einer homogenen Umgebung, also unter Vernachlässigung der Einflüsse durch Masten, andere Konstruktionen, Bäume und die Bodenbeschaffenheit ausgeführt. In Wirklichkeit werden aber die elektromagnetischen Felder durch solche Elemente verändert. Dies ist speziell für das elektrische Feld der Fall.

Es ist deshalb interessant, die berechneten Werte mit den vor Ort gemessenen Werten zu vergleichen. Für solche Messungen wurden verschiedene Messgeräte eingesetzt. Zwei von ihnen werden im folgenden vorgestellt:

Holiday Industries, Modell HI-3600-02: Es ist geeignet zur Messung elektrischer und magnetischer Felder; Messbereiche: für das elektrische Feld 1 V/m–199 kV/m, für das magnetische Feld 12 nT–2,5 mT; Frequenzbereich: 50 Hz–1 kHz; Ablesung: digital; Versorgung: durch Akkus.

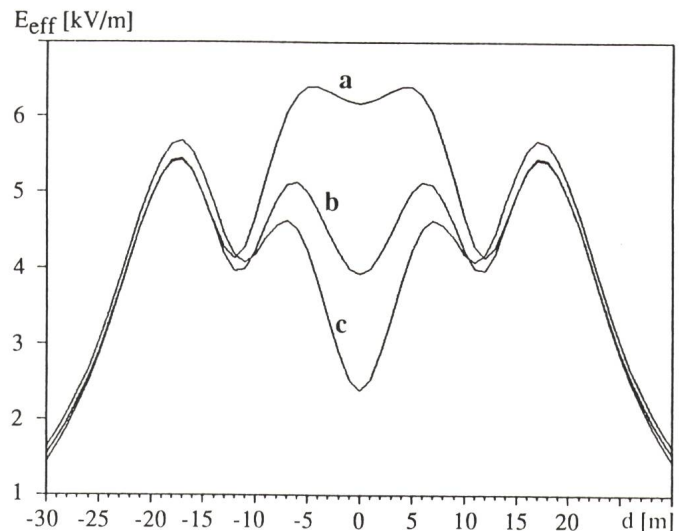
Emdex II: Es ist nur zur Messung magnetischer Felder geeignet; Messbereich: 10 nT–0,3 mT; Frequenzbereich: 40 Hz–800 Hz; Ablesung: digital; Versorgung: Akkus. Das Gerät erlaubt, die Resultate von 20 Messprofilen zu speichern. Es enthält eine Logik, welche die Ablesung, Auswertung sowie grafische Darstellung der Resultate auf einem PC ermöglicht (MS-DOS).

Messungen

Verschiedene, in der Nähe von 380-kV- und 220-kV-Leitungen ausgeführte Messungen zeigen, dass die Übereinstimmung mit den berechneten Werten zufriedenstellend ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn das Messgelände eben und frei von Hindernissen ist. Dagegen weichen die gemessenen Werte von den berechneten mitunter stark ab (50–100%), insbesondere bei unebenen Böden, in bebauten Zonen oder wenn natürliche Hindernisse vorhanden sind. In den meisten untersuchten Fällen liegen die berechneten Werte

Bild 4
Elektrische Felder einer 380-kV-Leitung

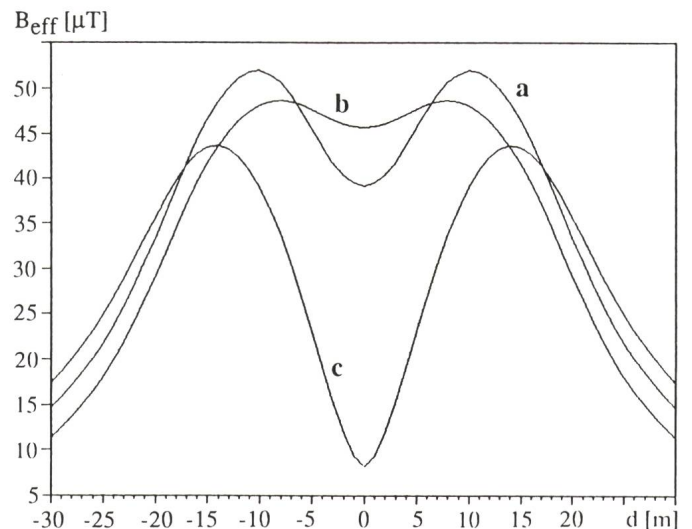
- a Stränge mit orthogonalymm. Phasenlage
 - b Stränge mit zirkularer Phasenlage
 - c Phasen-anordnung TRSRST
- E_{eff} elektrisches Feld (Eff.-werte)
- d Abstand von der Leitungsachse



Berechnungen für Leitungen mit Gittermasten vom Typ Donau

Bild 5
Magnetfelder einer 380-kV-Leitung

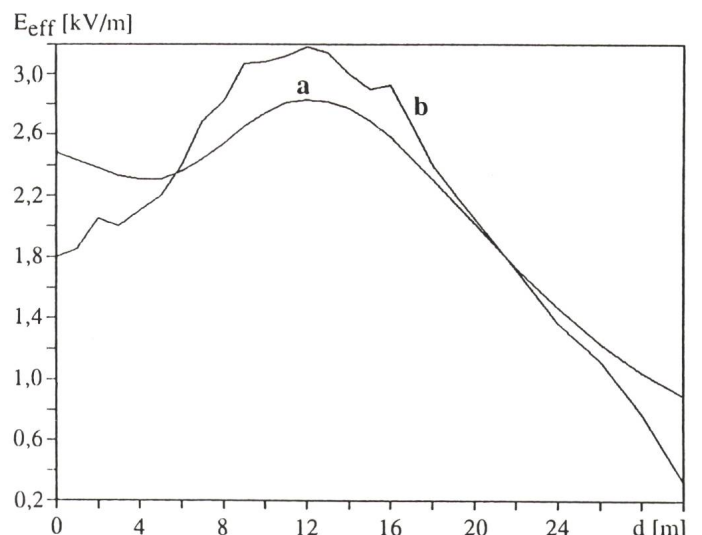
- a Stränge mit orthogonalymm. Phasenlage
 - b Stränge mit zirkularer Phasenlage
 - c Phasen-anordnung TRSRST
- B_{eff} magnetische Induktion (Eff.-werte)
- d Abstand von der Leitungsachse



Berechnungen für Leitungen mit Gittermasten vom Typ Donau

Bild 6
Elektrische Felder der 380-kV-Leitung Lavorgo

- TW-Mast (Leiter in einer horizontalen Ebene angeordnet)
- a berechnete Werte
 - b gemessene Werte (Holiday)
- E_{eff} elektrisches Feld (Eff.-werte)
- d Abstand von der Leitungsachse



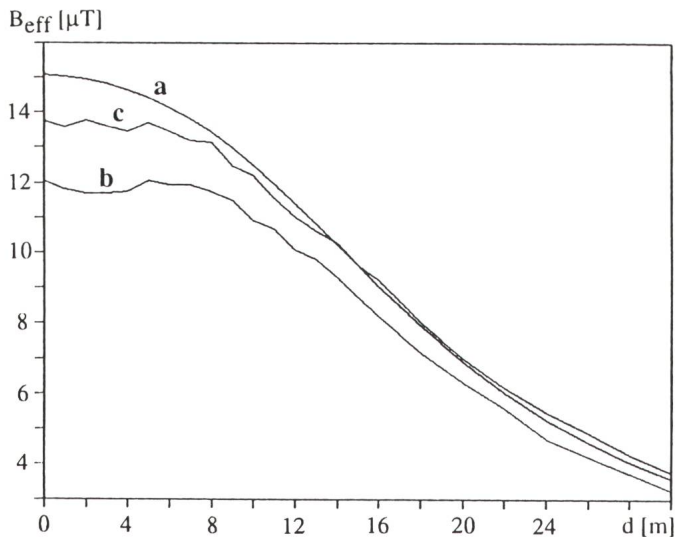


Bild 7
Magnetfelder der 380-kV-Leitung Lavorgo
 TW-Mast (Leiter in einer horizontalen Ebene angeordnet)
 a berechnete Werte
 b gemessene Werte
 c gemessene Werte (Emdex)
 B_{eff} magnetische Induktion (Eff.-werte)
 d Abstand von der Leitungsachse

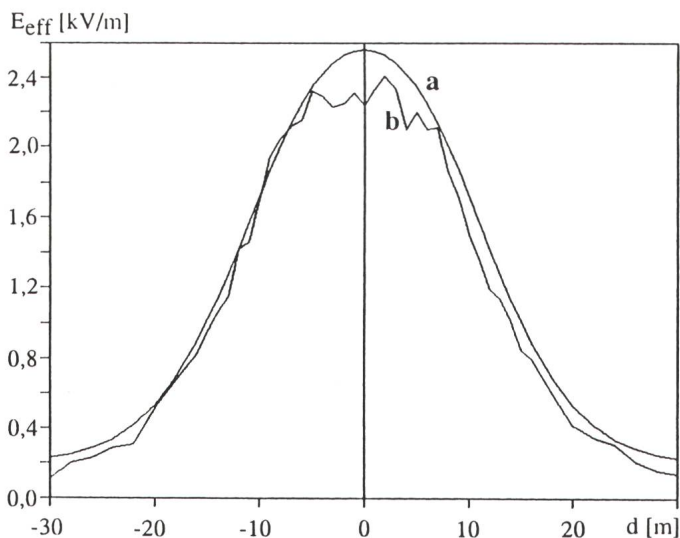


Bild 9
Elektrische Felder der 220-kV-Leitung Romanel-foretaille (EOS)
 Tragmast SAE (Bild 8); unterste Leiter ungefähr 10 m über Boden
 a berechnete Werte
 b gemessene Werte (Holaday)
 E_{eff} elektrisches Feld (Eff.-werte)
 d Abstand von der Leitungsachse

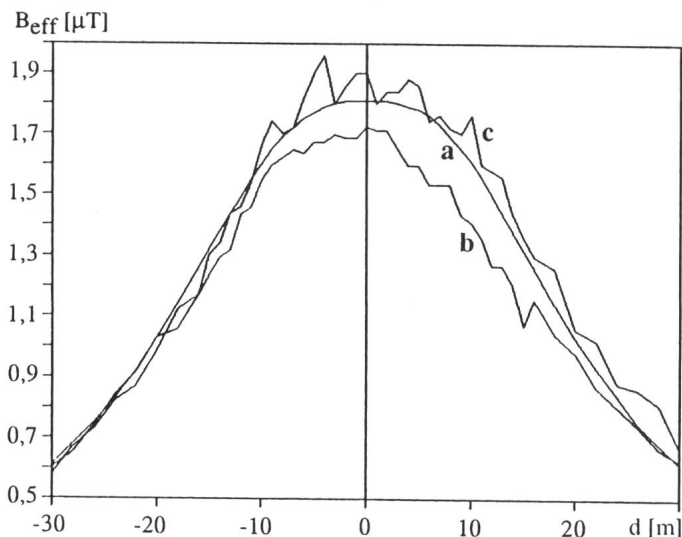


Bild 10
Magnetfelder der 220-kV-Leitung Romanel-foretaille (EOS)
 a berechnete Werte
 b gemessene Werte (Holaday)
 c gemessene Werte (Emdex)
 B_{eff} magnetische Induktion (Eff.-werte)
 d Abstand von der Leitungsachse

Tragmast SAE (Bild 8); unterste Leiter ungefähr 10 m über Boden

über den gemessenen. Nachfolgend zwei Beispiele von Untersuchungen, welche unter günstigen Bedingungen durchgeführt werden konnten:

Leitung 1×380 kV Mettlen-Lavorgo (CKW)

Die wichtigsten Spezifikationen dieser Leitung sind:

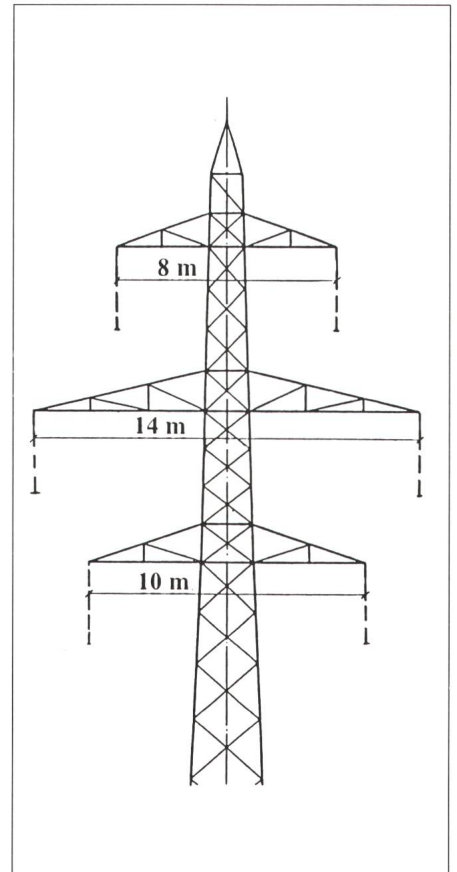


Bild 8 Tragmast SAE
 Mast der 220-kV-Leitung Romanel-foretaille (EOS)

- TW-Mast (Leiter in einer horizontalen Ebene angeordnet).
- Untere Leiter ungefähr 14 m über dem Boden.
- Betriebsdaten: $U_r = 402 \text{ kV}$; $I_r = 1055 \text{ A}$; $U_s = 399 \text{ kV}$; $I_s = 1085 \text{ A}$; $U_t = 390 \text{ kV}$; $I_t = 1070 \text{ A}$.
- Leiterbeschaffenheit: Leiterdurchmesser 38 mm, Bündeldurchmesser 400 mm (Bündel bestehend aus zwei Einzelleitern).
- Bodenbeschaffenheit: flaches Gelände im Bereich 0 bis +30 m von der Leitungsaxe entfernt. Auf der andern Seite der Leitung, ab etwa -10 m von der Axe entfernt, steigt das Gelände jäh an, was die Durchführung von Messungen verhinderte.

In den Bildern 6 und 7 werden die Messresultate mit den Resultaten aus den Berechnungen verglichen.

Leitung 220 kV Romanel–Foretaille (EOS)

Die wichtigsten Spezifikationen dieser Leitung sind:

- Tragmast SAE (Bild 8).
- Untere Leiter ungefähr 10 m über dem Boden.
- Betriebsdaten: System Seeseite (rechts): $U = 230 \text{ kV}$, $I = 200 \text{ A}$; System Juraseite (links): $U = 230 \text{ kV}$, $I = 197 \text{ A}$.
- Leiterbeschaffenheit: Durchmesser eines jeden Leiters 29,4 mm, Bündeldurchmesser 400 mm (Bündel bestehend aus zwei Einzelleitern).
- Bodenbeschaffenheit: beidseitig der Leitungsaxe flach.

In den Bildern 9 und 10 werden die Messresultate mit den Resultaten aus den Berechnungen verglichen.

Grenzwerte

Die anzuwendende gesetzliche Grundlage auf dem Gebiet der elektromagnetischen Felder ist das Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (Umweltschutzgesetz USG, SR 814.01). Bisher wurden in der Schweiz keine Grenzwerte festgelegt. In zuständigen Kreisen der EG, des Cenelec und der Schweiz gedenkt man, einstweilen die provisorischen Grenzwerte der IRPA (International Radiation Protection Association) für die elektromagnetischen Felder bei 50 Hz zu empfehlen (Bild 11). Verschiedene Arbeitsgruppen in der Schweiz und in Europa studieren dieses Problem.

Zusammenfassung

Aufgrund der beschriebenen Untersuchungen stellt man fest, dass eine rechnerische Bestimmung der von

Art der Exposition	Elektrisches Feld		Magnetisches Feld	
	E_{eff} [kV/m]	SF	B_{eff} [mT]	FS
<i>Beruflich exponierte Personen</i> während eines Arbeitstages kurzzeitig einzelne Körperglieder	10	3	0,5	10
	30 ^a	1	5 ^b	1
	–	–	25	0,2
<i>Allgemeinbevölkerung</i> dauernd ^c einige Stunden im Tag ^d	5	6	0,1	50
	10	3	1	5

Bild 11 Grenzwerte für elektromagnetische Felder

Von der IRPA empfohlene provisorische Grenzwerte bei Einwirkung von elektromagnetischen Feldern von 50/60 Hz auf den Menschen

- a* Die zulässige Einwirkdauer für Felder zwischen 10 und 30 kV/m kann aus der Formel $t \leq 80/E$, mit t in Stunden pro Tag und E in kV/m, berechnet werden.
- b* Einwirkdauer höchstens 2 Stunden pro Tag
- c* Diese Einschränkung gilt für die Allgemeinbevölkerung, die sich während längerer Zeit am Tag im Freien aufhalten kann, zum Beispiel in Ruhe- und Erholungszonen, Versammlungsplätzen usw.
- d* Die Werte können für einige Minuten pro Tag überschritten werden, vorausgesetzt, dass Vorkehrungen zur Vermeidung zusätzlicher indirekter Beeinflussungen getroffen worden sind.
- SF Sicherheitsfaktor

Hochspannungsleitungen ausgehenden elektromagnetischen Felder möglich ist. Die durch Berechnung erhaltenen Resultate sind aber aufgrund der Einflussgrößen, welche bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden, immer mit Vorsicht zu interpretieren.

Die Durchführung der Messungen ist eine heikle Aufgabe, die eine gute Vorbereitung und eine gewisse Erfahrung verlangt. Die Messausrüstung muss regelmässig kontrolliert und geeicht werden.

Das Starkstrominspektorat hat ein Verzeichnis über die Berechnungen elektromagnetischer Felder in der Nähe von Hochspannungsleitungen angelegt, und zwar für verschiedene Leiteranordnungen und Spannungen, wie zum Beispiel:

- Gittermast, Tannenform, 2×380 kV + 1×132 kV (CFF)
- Gittermast, Typ Donau, 2×380 kV
- Gittermast, Typ Donau, 2×380 kV + 2×125 kV

- Gittermast, Tannenform, 2×380 kV + 2×220 kV
- Gittermast, Tannenform, 2×220 kV usw.

In jedem einzelnen Fall war der Einfluss der Phasenlage ermittelt worden, damit die optimale Lage hinsichtlich der elektromagnetischen Felder festgelegt werden konnte. Für weitere Auskünfte über dieses Verzeichnis, über die Berechnungsmethoden und messtechnischen Möglichkeiten des Starkstrominspektorates kann man sich an den Autor dieses Artikels wenden.

Literatur

- [1] G. Gary et M. Moreau: L'effet de couronne en tension alternative. Edition Eyrolles, 1976.
- [2] P.-A. Chamorel: Programme CHAMP pour le calcul des champs électromagnétiques aux environs des lignes HT, avril 1991.
- [3] E. Joye: Champs électromagnétiques produits par les installations à courant fort. Journée d'information de l'ASE du 25 juin 1991 à Lausanne.
- [4] Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. Health Physics 58(1990)1, p. 113–122.

EX-SICHERER MULTIMETER EMX 51

mit zusätzlicher
Bargraph-Anzeige



- Zündschutzart EEx ib IIC T6
- Genauigkeit bis 0,1%
- Min.- / Max.- Speicher
- LOBAT-Anzeige

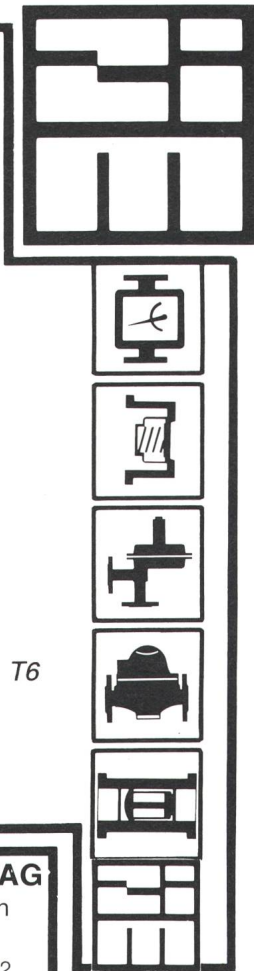
Fordern Sie Unterlagen an bei :

ZIMMERLI MESSTECHNIK AG

Schlossgasse 10 4125 Riehen

☎ 061 - 67 54 54

Telefax 061 / 67 35 62



A star is born. Zodiac Super 308.



**Superpreis Fr. 649.-
pro Apparat!**

**Die Geschäfts- und
Haustelefonanlage ohne Zentrale. Ausbau-
bar bis 3 Amtsleitungen und 8 Teilnehmer-
stationen. Auch für privat. PTT geprüft.**

■ Zodiac Super 308 interessiert
mich. Bitte Doku senden an:

Name:

Strasse:

Ort

SEV

ZODIAC®

Zodiac Communications AG

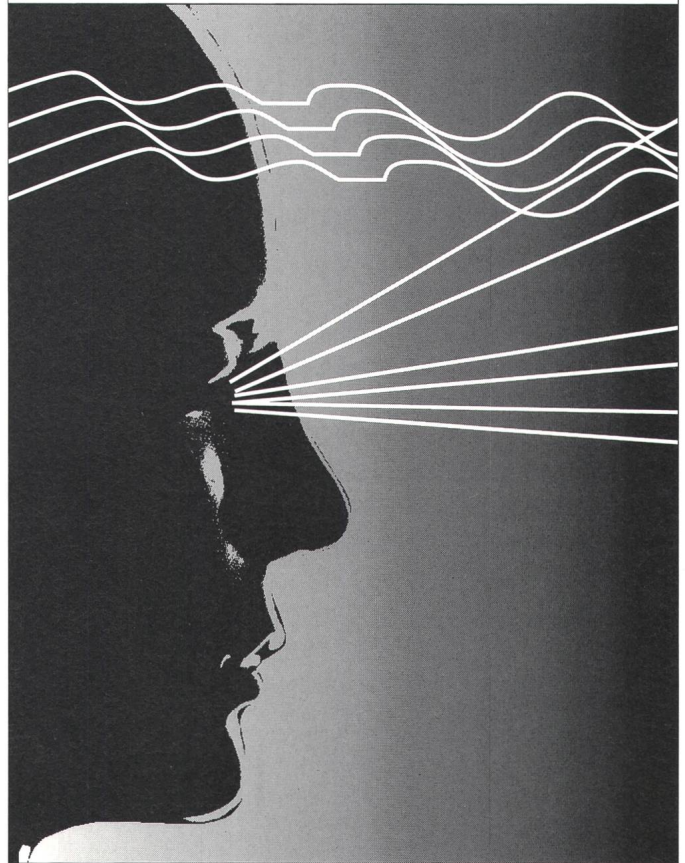
Stanserstrasse 109

CH-6064 Kerns

Telefon 041 66 01 01

Telefax 041 66 56 61

K wie Kommunikation



Wir stehen an der Schwelle zum totalen
Kommunikations-Zeitalter:
Der Informationsfluss vom Sender zum
Empfänger wird Tag für Tag grösser

Unsere
DATAWIL®/OPTOWIL®-Kabel
garantieren eine störungsfreie Übertragung

→ Besuchen Sie unsere Einführungskurse
«Lokale Netzwirkabel/Komponenten»

Verlangen Sie unsere Dokumentation und Kursunterlagen



Kupferdraht-Isolierwerk AG
CH-5103 Wildeggen

Telefon 064 57 01 11