

## FORSCHUNG

Alfred Bürgi, Stefan Joss

# IMMISSIONSKATASTER FÜR NIEDERFREQUENTE MAGNETFELDER VON HOCHSPANNUNGSLEITUNGEN

Eine Schweizer Machbarkeits- und Pilotstudie



Hochspannungsleitungen VECTOR25 und Hintergrundkarte © Bundesamt für Landestopografie

Wie und mit welchem Aufwand können die niederfrequenten Magnetfelder von Hochspannungsleitungen für die Erstellung eines Immissionskataster modelliert werden? Mit diesen Fragen befasste sich die Studie, über die hier berichtet wird. In einem ersten Teil wurde untersucht, welche technisch-betrieblichen Daten der Leitungen für die Modellierung notwendig sind, wo diese beschafft werden können, und auf welche Art geeignete Langzeit-Mittelwerte berechnet werden können. In einem zweiten Teil wurde das Modell dann auf ein konkretes Teilstück einer bestehenden 220 kV Leitung angewandt.

## Einleitung

Schwache – das heißt deutlich unter den gültigen Immissionsgrenzwerten liegende – niederfrequente Magnetfelder haben bei lang andauernder Einwirkung möglicherweise negative gesundheitliche Auswirkungen. Solche Magnetfelder werden von strombetriebenen Geräten und Stromversorgungsanlagen erzeugt, namentlich auch von Hochspannungsleitungen. Epidemiologische Studien haben gezeigt, dass niederfrequente Magnetfelder von mehr als  $0.4 \mu\text{T}$  möglicherweise zu einem erhöhten Leukämierisiko von Kindern führen, und die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) der WHO hat niederfrequente Magnetfelder deshalb als *möglicherweise krebserregend für den Menschen* eingestuft.

Um solche möglichen Risiken in epidemiologischen Studien abzuklären, braucht es eine zuverlässige Expositionsabschätzung. Diese soll ortsbezogene Informationen über die tatsächlich vorhandenen Immissionen liefern und im Laufe der Zeit auch Informationen über längerfristige Trends. Dieser Beitrag berichtet über eine Studie [1], welche zur Machbarkeit eines solchen Immissionskatasters durchgeführt wurde.

Im ersten Teil der Studie wurde abgeklärt, welche technischen und betrieblichen Parameter der Leitungen für eine Abschätzung der im Langzeitmittel vorhandenen magnetischen Flussdichte notwendig sind, wo diese Daten verfügbar sind und welcher Aufwand für Ihre Beschaffung notwendig ist. Außerdem wurde eine Methodik entwickelt, um geeignete Langzeitmittelwerte zu bestimmen. Die Machbarkeit der Datenbeschaffung wurde an einem konkreten Teilstück einer Leitung geprüft. In einem zweiten Teil wurde die entwickelte Methodik dann auf das Beispiel angewandt und ein Immissionskataster für dieses Teilstück berechnet. Für die Studie wurde nördlich von Bern ein 31 km langes Teilstück einer Leitung der BKW Energie AG ausgewählt. Die Leitung umfasst die beiden 220 kV-Stränge Mühleberg – Bickigen und Mühleberg – Lindenholtz.

## Methodik, Daten und Berechnungsmodell

Ziel von Feldberechnungen für Hochspannungsleitungen ist üblicherweise die Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte. Dafür berechnet man die Immissionen unter Volllast, d.h. mit dem thermischen Grenzstrom und dem Leiterdurchhang gemäß den bewilligten Plänen. Anders für einen Immissionskataster: Hier ist man an einem Langzeit-Mittelwert, beispielsweise dem Jahresmittelwert interessiert. Dazu benötigt man die technischen Parameter (Strom, Durchhang, etc.) aus dem realen Betrieb.

Magnetfelder werden durch bewegte Ladungen erzeugt. Für die Berechnung von Magnetfeldern benötigt man die Kenntnis der Verteilung der Stromdichte im Raum, bzw. der Ströme auf allen stromführenden Leitern. Sind diese bekannt, so kann man die magnetische Flussdichte aus einem Linienintegral längs dieser Leiter berechnen. Magnetfelder haben drei räumliche Komponenten, jede Komponente hat Betrag und Phase. Zweckmäßigerweise werden sie mathematisch durch dreidimensionale, komplexwertige Vektoren dargestellt.

Als Leitungsdaten benötigt man einerseits Daten über die Anordnung der stromführenden Leiter im Raum, d.h. Position der Masten, das Mastbild (Höhe und seitlicher Abstand der Aufhängung der Leiterseile) und den Durchhang der Leiterseile zwischen den Masten. Für die Berechnung benötigt man außerdem die Topografie in der Umgebung der Leitung. Bei zwei- und mehrsträngigen Leitungen können sich die Beiträge der einzelnen Leitungsstränge je nach Phasenbelegung gegenseitig verstärken oder abschwächen. Für solche Leitungen muss man deshalb auch unbedingt die Phasenbelegung der Leiterseile kennen.

Die Ströme lassen sich aus den Lastflussdaten bestimmen, welche von den Elektrizitätsversorgungsunternehmen aufgezeichnet werden (typischerweise Viertelstunden- oder Stundenmittelwerte von Spannung, Wirkleistung und Blindleistung). Daraus lassen sich dann Wirkstrom und Blindstrom berechnen, wie in Abbildung 1 gezeigt.

Die Abbildung 1 zeigt, dass die Stromstärken stark variieren und auch die Lastflüsse ihre Richtung ändern können. Für die

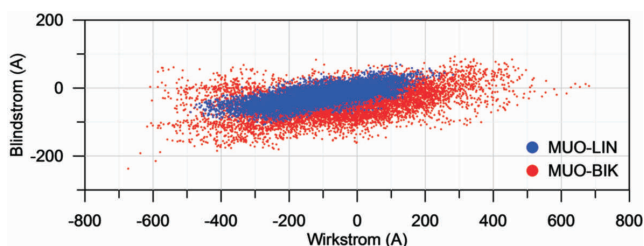


Abbildung 1: Aus den Lastflussdaten bestimmte Stundenmittelwerte für Wirk- und Blindstrom für die beiden Stränge der modellierten Leitung.

Bestimmung des Mittelwerts wurde in der Pilotstudie ein Verfahren entwickelt, in dem die Stromstärken der beiden Leitungsstränge mittels des sogenannten k-Means-Clusterings zu Gruppen zusammengefasst werden. Aus den Mittelwerten für diese Gruppen ist es dann möglich, einen Mittelwert für den Betrag der magnetischen Flussdichte zu bestimmen.

Bedingt durch ihr Gewicht hängen die Leiterseile zwischen den Masten tiefer als an den Masten selbst. Dieser Durchhang hängt u.a. vom Leitermaterial, der Zugspannung und der Seiltemperatur ab. Die Seiltemperatur wird von der Erwärmung durch den Strom und von den meteorologischen Bedingungen (z. B. Lufttemperatur, Wind, Sonneneinstrahlung) beeinflusst. Mit zunehmender Seiltemperatur und/oder Zusatzlast (Eis) wird der Durchhang größer. Im Bericht wird gezeigt, dass im Mittel die Seiltemperatur nur wenig über der Umgebungstemperatur liegt, und dass deshalb der Durchhang bei der mittleren Jahres-Umgebungstemperatur meistens ein guter Näherungswert für die Berechnung des Jahresmittelwerts der magnetischen Flussdichte ist. Allerdings sind Ausnahmen möglich, z. B. bei sehr stark belasteten Leitungen, welche dann gesondert betrachtet werden müssten.

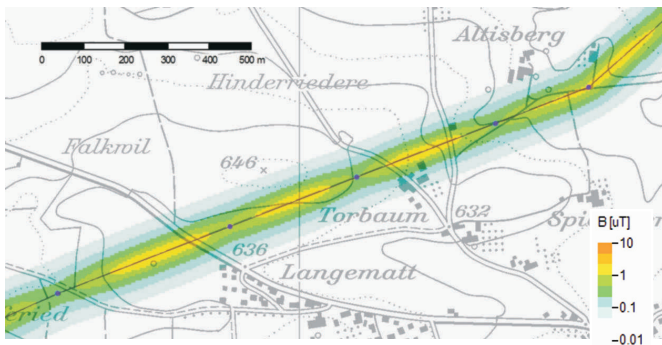
Im Bericht wurde eingehend untersucht, welche Datenquellen für die Leitungsdaten zur Verfügung stehen. Es zeigte sich, dass vollständige und präzise Daten eigentlich nur bei den Leitungsinhabern verfügbar sind. Für die modellierte Leitung wurden diese von der BKW Energie AG zur Verfügung gestellt (Situationspläne, Längenprofile, Mastschemata für 97 Masten, Phasenschema, Durchhang-Grafiken, Konstruktionszeichnungen der Isolatorketten, Liste der Mastkoordinaten und Stundenmittelwerten der Lastflussdaten für ein Jahr).

Als Berechnungsmodell wurde eine ad-hoc modifizierte Version der NISMap-Software von ARIAS verwendet. Diese erfüllt die folgenden Aufgaben: Eingabe und Speicherung der Leitungs- und Betriebsdaten, Berechnung der k-Means-Cluster, Bestimmen der Topografie aus dem numerischen Höhenmodell, Feldberechnung und Darstellung der Resultate auf dem Kartenhintergrund. Die dreidimensionale Berechnung nähert die Seilkurve durch mehrere gerade Segmente pro Spannweite, summiert über alle Segmente aller Leitungsstränge und bildet den Mittelwert über alle Cluster. Die Berechnung erfolgte für 1 m über Grund mit einer Maschenweite von 5 m. Als Ergebnis erhält man für jeden Gitterpunkt den Jahresmittelwert des Betrags der magnetischen Flussdichte.

## Resultate

Für die gesamte Länge des untersuchten Teilstücks wurden farbcodierte Feldstärkekarten erstellt. Ein Ausschnitt aus der

Feldstärkekarte ist in Abbildung 2 gezeigt. Man sieht darin z. B., dass die Leitungskorridore nur für sehr tiefe Feldstärken annähernd konstante Breite haben. Für einen Schwellenwert von  $0,5 \mu\text{T}$  (hellgrün in Abbildung 2) findet man bereits keinen durchgehenden Korridor mehr, sondern eine Reihe von länglichen ellipsenartigen Flächen, welche bei den Masten unterbrochen sein können.



**Abbildung 2:** Ausschnitt aus der berechneten Feldstärkekarte für den Jahresmittelwert der magnetischen Flussdichte. Die Position der Masten ist durch violette Punkte angegeben. Kartenhintergrund PK25 © Bundesamt für Landestopografie.

Als Teil der Machbarkeitsstudie wurde auch eine Fehlerabschätzung für das Modell durchgeführt. Diese ergab, dass der Jahresmittelwert mit Fehlern der Größenordnung 10 % bis 25 % behaftet ist. Größte Fehlerquellen sind Ungenauigkeiten in den Koordinaten (x, y), in der Höhe und im Durchhang. In einer epidemiologischen Studie kommen zusätzlich die grössten Fehler daher, dass die Koordinaten des Wohnorts eines Patienten bzw. Studienteilnehmers mit einer grossen Ungenauigkeit behaftet sind, was zu einem zusätzlichen Fehler in der Expositionsabschätzung führt.

Der Aufwand für die Modellierung wird durch den Aufwand für die Datenerfassung dominiert. Im Vergleich dazu ist der Aufwand für die Feldberechnung bescheiden. Groß ist hingegen der Aufwand für die Erfassung der geometrischen Leitungsdaten. Für den hier betrachteten Leitungsabschnitt (Länge 31 km, Stranglänge 62 km, 97 Masten) benötigt man dafür ca. 5 bis 6 Stunden. Entsprechend größer wäre der notwendige Aufwand für die Modellierung des gesamten Höchstspannungsnetzes (220 kV und 380 kV), welches in der Schweiz eine Stranglänge von 6700 km und ca. 15.000 Masten umfasst.

## Schlussfolgerungen

Die Studie hat an einem konkreten Beispiel gezeigt, dass ein Immissionskataster für den Langzeitmittelwert des niederfrequenten Magnetfeldes von Hochspannungsleitungen erstellt werden kann. Sie hat im Weiteren auch gezeigt, wie geeignete

Mittelwerte über Ströme und Lastflusssituationen gebildet werden können.

Für die Modellierung ist man auf Leitungs- und Betriebsdaten der Netzbetreiber angewiesen.

Die Studie hat ferner gezeigt, dass der Aufwand für die Erfassung der geometrischen Leitungsdaten für einen Kataster des gesamten Höchstspannungsnetzes beträchtlich ist.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Anke Huss und Martin Rösli von der Universität Bern, welche den Anstoß zu der hier rapportierten Studie gegeben haben, und bei den Herren Thomas Gränicher und Mirko Haller von der BKW Energie AG, welche uns mit ihren Daten und technischen Auskünften sehr unterstützt haben.

## Referenz

[1] Bürgi, A: Immissionskataster für niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsleitungen – Machbarkeits- und Pilotstudie. Bericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. 84 pp., 2011 (<http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01079/01080/index.html>)

## Autoren



Dr. Alfred Bürgi ist als Physiker und Umweltberater Inhaber der Firma *ARIAS umwelt.forschung.beratung*. Arbeitsschwerpunkte sind die Modellierung der Immissionen von nichtionisierender Strahlung, Luftreinhaltung, Softwareprogrammierung, Datenbanken und Datenauswertung.

Dr. Stefan Joss arbeitet im Bundesamt für Umwelt BAFU als wissenschaftlicher Mitarbeiter und ist Stellvertreter des Chefs der Sektion Nichtionisierende Strahlung. Er befasst sich hauptsächlich mit technisch/wissenschaftlichen Fragen beim Schutz vor nichtionisierender Strahlung von Stromversorgungsanlagen.

### Kontakt:

Alfred Bürgi  
ARIAS umwelt.forschung.beratung  
Langmauerweg 12, CH-2011 Bern

E-Mail: [alfred.buergi@arias.ch](mailto:alfred.buergi@arias.ch)

Web: <http://www.arias.ch>