

# Korrelation von Feld- und Geräuschemissionen einer Freileitung bezogen auf die Verordnung des Umweltschutzgesetzes

Autor(en): **Kübler, André**

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): **92 (2001)**

Heft 20

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-855765>

## **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.

# Korrelation von Feld- und Geräuschemissionen einer Freileitung bezogen auf die Verordnungen des Umweltschutzgesetzes

Beim Betrieb einer Freileitung entstehen elektrische und magnetische Feld- sowie Geräuschemissionen. Die Lärmschutzverordnung<sup>1</sup> (LSV) legt die Geräuschemissionen und die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung<sup>2</sup> (NISV) die Feldemissionen fest. Da jedoch die bestimmenden Ausgangsgrößen bei einer Freileitung unterschiedlich sind, resultiert eine Korrelation respektive Wechselbeziehung (Bild 1). Dass dies nicht immer im Einklang mit den vorgeschriebenen Zielgrößen der geltenden Verordnungen ist, wird im nachfolgenden Bericht aufgezeigt.

■ André Kübler

## Einführung

Der Bericht basiert auf den jüngsten Berechnungen von bestehenden Höchstspannungsfreileitungen. Die Berechnungen wurden durchgeführt, weil die NISV-Verordnung bei bestehenden Freileitungen vorschreibt, dass wenn im massgebenden Betriebszustand an Orten mit empfindlicher Nutzung der Anlagegrenzwert überschritten wird, die Phasenbelegung so zu optimieren ist, dass die magnetische Flussdichte an diesen Orten minimiert wird (NISV Ziffer 16, Abs. 1). Wobei der Bericht nicht im Detail auf die Möglichkeiten einer Optimierung (Leitertypen, Anzahl Bündelleiter, Mastgeometrien usw.) – insbesondere bei neuen Leitungen von Interesse – und die

Interpretation der Optimierung als solches (örtlich und bezogen auf Leitungstrassen) eingeht. Der Bericht beinhaltet auch keine Ausführungen zur wirtschaftlichen Tragbarkeit und Verhältnismässigkeit. Diese zum Teil noch nicht schlüssig definierten Begriffe werden voraussichtlich erst mit den ersten diesbezüglichen Verfügungen und Rechtsprechungen genauer eingegrenzt.

## Mathematische Beziehungen

Die bestimmenden Ausgangsgrößen für die elektrischen und magnetischen Feld- sowie Geräuschemissionen können anhand der Maxwell'schen Gleichungen zusammen mit den Materialgleichungen, die den mit Materie erfüllten Feldraum sowie dessen Randbedingungen an den Grenzflächen beschreiben, wie nachfolgend [1] eruiert werden.

### Elektrisches Feld

Sind mehrere diskrete Leiter im Feldraum vorhanden, so lassen sich deren Potenziale aufgrund des linearen Zusammenhanges zwischen Potenzial und Ladung im betrachteten Punkt additiv überlagern (Superpositionsprinzip). Aufgrund der Annahme der unendlich ausgedehnten, gut leitenden Erdoberfläche kann das Randwertproblem mit Hilfe der Spiegelungsmethode in ein adäquates, mathematisch leichter zu lösendes Problem überführt werden, indem jedem Leiter ein fiktiver Spiegelleiter auf entgegengesetztem Potenzial unter der Erdoberfläche zugeordnet wird (s. Kasten).

### Magnetisches Feld

Analog den gemachten Ausführungen beim elektrischen Feld kann auch beim magnetischen Feld die Spiegelungsmethode angewendet werden. Um auch hier den Erdeinfluss zu berücksichtigen, wird nach Carson [2] der Leiter nicht wie beim elektrischen Feld am Erdboden, sondern an einer tiefer gelegenen Symmetrieachse gespiegelt. Das Mass der Tiefe ist abhängig vom spezifischen Bodenwiderstand und der Frequenz. Somit entstehen die folgenden Berechnungsformeln (s. Kasten).

### Korona

Wesentlich schwieriger ist die theoretische Abschätzung von Korona-Geräuschemissionen. Hierbei erschweren mehrere physikalische Prozesse, welche vom lokalen Leiterzustand und von der Umwelt abhängig sind, die exakte Berechnung mit physikalischen Grundgesetzen. Die mathematischen Abschätzun-

<sup>1</sup> Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 (Stand am 6. Juni 2000), SR 814.41.

<sup>2</sup> Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung vom 23. Dezember 1999 (Stand am 1. Februar 2000), SR 814.710.

#### Adresse des Autoren

André Kübler  
Leitender Ingenieur Elektrische Netze  
Colenco Power Engineering AG  
Mellingerstrasse 207  
5405 Baden  
andre.kuebler@colenco.ch

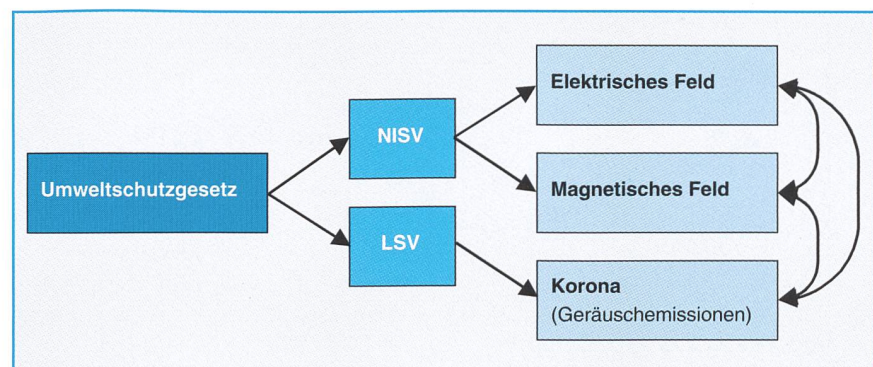
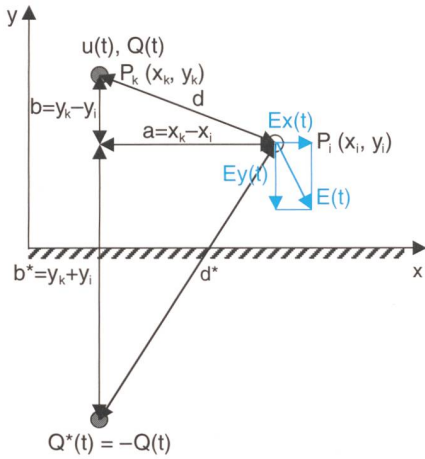


Bild 1 Schema zur Korrelation.



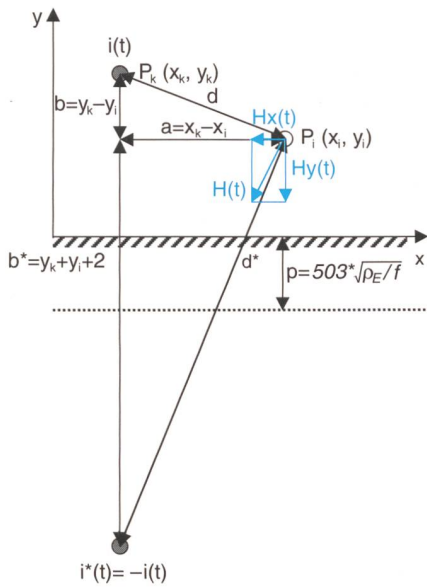
Elektrisches Feld

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (|E_x(t)|^2 + |E_y(t)|^2) * dt}$$

$$E_x(t) = \sum_k \frac{-Q'(t)}{2\pi\epsilon_0} * \left( \frac{a}{d^2} - \frac{a}{d^{*2}} \right)$$

$$E_y(t) = \sum_k \frac{-Q'(t)}{2\pi\epsilon_0} * \left( \frac{b}{d^2} + \frac{b^*}{d^{*2}} \right)$$

wobei:  $[Q'(t)] = [CN'] * [u(t)]$   
mit  $Q'(t) = n * q'(t)$



Magnetisches Feld

$$B_{eff} = \mu_0 * H_{eff}$$

$$H_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (|H_x(t)|^2 + |H_y(t)|^2) * dt}$$

$$H_x(t) = \sum_k \frac{-i(t)}{2\pi} * \left( \frac{b}{d^2} + \frac{b^*}{d^{*2}} \right)$$

$$H_y(t) = \sum_k \frac{+i(t)}{2\pi} * \left( \frac{a}{d^2} - \frac{a}{d^{*2}} \right)$$

Korona

$$L_r = 10 * \log \sum_i 10^{L_{r,i} / 10}$$

$$L_{r,i} = L_{eq,i} + K1 + K2 + 10 * \log \left( \frac{t_i}{t_0} \right)$$

$$L_{eq, Regen} = 10 * \log \sum_k 10^{(c * G_{max} + 8r + 15 \log n - 10 \log d + h / 300) / 10}$$

$$L_{eq, Nebel} = L_{eq, Regen} - 7$$

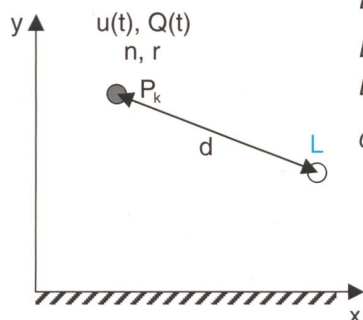
$$L_{eq, Schön} = L_{eq, Regen} - 25$$

$$G_{max} = \frac{Q'_{eff}}{2\pi\epsilon_0 n r} * \left( 1 + \frac{(n-1) * r}{R} \right)$$

wobei:  $Q'_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |Q'(t)|^2 * dt}$

und  $[Q'(t)] = [CN'] * [u(t)]$

mit  $Q'(t) = n * q'(t)$



gen stammen von C. Gary [3, 4] und V. L. Chartier [5, 6] und beruhen allesamt auf empirischen Formeln, die aus diversen Untersuchungen abgeleitet wurden (s. Kasten).

**Aus den aufgezeigten mathematischen Beziehungen lassen sich die folgenden Abhängigkeiten ableiten:**

Bestimmende Ausgangsgrößen	
Elektrisches Feld	$u(t), Q(t)$
Magnetisches Feld	$i(t)$
Korona	$u(t), Q(t)$ <b>Leiteseilanordnung</b>

Zusätzlich ist bei den erwähnten Emissionen das Mastbild mit der Leitergeometrie (x/y-Werte) ebenfalls eine bestimmende Ausgangsgröße.

Verwendete Symbole

B	Magnetische Flussdichte/Induktion [Vs/m <sup>2</sup> ; T]
c	Korrekturfaktor (2.5 wenn $G_{max} \leq 20$ kV/cm; 1.5 wenn $G_{max} > 20$ kV/cm)
CN'	Kapazitätsbelag [As/V]
E	Elektrische Feldstärke [V/m]
f	Frequenz [Hz]
$G_{max}$	Max. Oberflächengradient [kV/cm]
H	Magnetische Feldstärke [A/m]
h	Höhe über dem Meer [m]
i	Reeller Strom [A]
K1	Pegelkorrektur für Anlagen der Industrie (= 5 dB(A))
K2	Pegelkorrektur bei schwach hörbarem Tongehalt (= 2 dB(A))
$L_r$	Beurteilungspegel [dB(A)]
$L_{r,i}$	Teilbeurteilungspegel (i = Regen, Nebel, Schön)
$L_{eq,i}$	Mittelungspegel bei einer Wetterphase
n	Leiteseilanzahl des Bündelleiters
Q	Elektrische Ladung [As]
Q'	Elektrische Ladung pro Längeneinheit [As/m]
R	Radius des Leiterbündels
r	Leiteseilradius
q'	Q', jedoch für Einzelleiter
T	Periodendauer
$t_i/t_0$	Zeitanteil bei einer Wetterphase
u	Reelles Potenzial [V]
$\epsilon_0$	Absolute Dielektrizitätskonstante, 8.85E-12 [As/Vm]
$\mu_0$	Absolute Permeabilität, 4 $\pi$ E-7 [Vs/Am]
$\rho_E$	Spezifischer Bodenwiderstand [ $\Omega$ m]

### Gesetzliche Vorgaben

Das Bundesgesetz über den Umweltschutz<sup>3</sup> (USG) schreibt unter Zweck (Art. 1) vor, dass Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen zu schützen und die Fruchtbarkeit des Bodens zu erhalten sowie im Sinne der Vorsorge Einwirkungen, welche schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen sind. Das Umweltschutzgesetz nennt explizit die folgenden vier Emissionsarten (Art. 7 und 11):

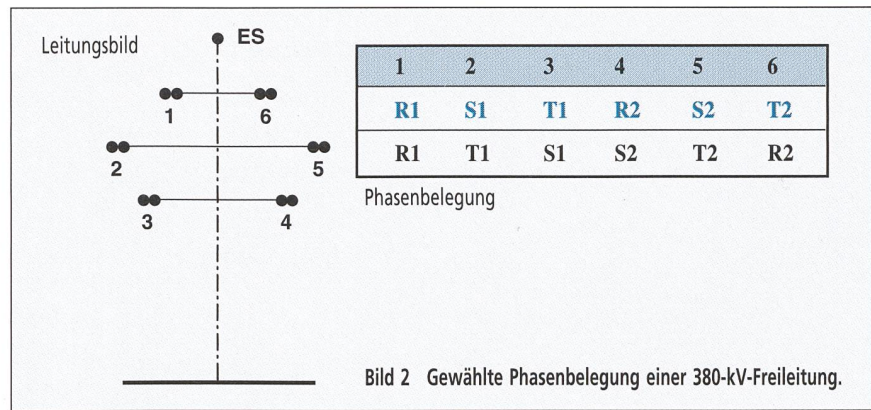
- Luftverunreinigungen
- Lärm
- Erschütterungen
- Strahlen

Laut dem Grundsatz (Art. 11) sind Luftverunreinigungen, Lärm, Erschütterungen und Strahlen durch Massnahmen an der Quelle zu begrenzen. Wobei diese Emissionen im Rahmen der Vorsorge so weit zu begrenzen sind, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Emissions- wie auch Immissionsgrenzwerte (am Ort des Einwirkens) werden in Verordnungen festgelegt (USG Art. 12 und 13).

Die für den Lärm und die Strahlen geltenden Verordnungen sind in der Einleitung bereits erwähnt (siehe auch Bild 1) und heissen in der Kurzbezeichnung LSV und NISV. Beide Verordnungen schreiben im Zusammenhang mit den vorsorglichen Emissionsbegrenzungen die entsprechenden Werte vor (LSV Art. 7 und 13, NISV Art. 4).

Als Emissionsbegrenzungen für neue Anlagen schreibt die LSV Planungswerte und die NISV Anlagegrenzwerte vor. Bei

<sup>3</sup> Umweltschutzgesetz vom 7. Oktober 1983 (Stand am 21. Dezember 1999), SR 814.01.



bestehenden Anlagen sieht die LSV eine Sanierung vor, wenn die Immissionsgrenzwerte wesentlich überschritten werden. Anders ist es bei der NISV, wonach auch alte Anlagen den Emissionsbegrenzungen unterliegen. So wird – wie bereits eingangs erwähnt – bei Frei- und Kabelleitungen zur Übertragung von elektrischer Energie ( $\geq 1$  kV) vorgeschrieben, dass bei einer Überschreitung des Anlagegrenzwertes im massgebenden Betriebszustand an Orten mit empfindlicher Nutzung zumindest die Phasenbelegung zur Minimierung der magnetischen Flussdichte zu optimieren ist.

### Umsetzung

Dass eine Veränderung der Phasenbelegung zur Minimierung des magnetischen Feldes auch das elektrische Feld und die Korona beeinflusst, ist aus den mathematischen Beziehungen ersichtlich. Aus deren Abhängigkeiten ist weiters ersichtlich, dass aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsgrössen eine Wechselbeziehung entsteht, was dazu führt, dass eine Veränderung des magnetischen Feldes sich konträr auf die Veränderung des elektrischen Feldes und der

Korona im betrachteten Teil- oder Gesamtbereich auswirken kann.

Diese Wechselbeziehung lässt sich anhand eines einfachen Standardprofils einer 380-kV-Freileitung mit zwei gewählten Phasenbelegungen nachweisen (vgl. Bilder 2 bis 5). Bei Freileitungen mit mehr als zwei Leitungssystemen (Drehstrom und/oder Einphasenstrom) können sich erfahrungsgemäss die Unterschiede noch stärker als dargestellt ausprägen.

### Fazit

Bei den niederfrequenten Feldemissionen spielt, wie aus der allgemeinen Literatur bekannt, das elektrische Feld eine untergeordnete Rolle. Demzufolge schreibt die NISV auch keine vorsorgliche Emissionsbegrenzung für Frei- und Kabelleitungen zur Übertragung von elektrischer Energie vor und die dargestellte Wechselbeziehung kann mit Ausnahme der Einhaltung des Immissionsgrenzwertes vernachlässigt werden. Anders sieht es beim magnetischen Feld für Frei- und Kabelleitungen aus, hier schreibt die NISV das vom USG verlangte Vorsorgeprinzip vor und verlangt die Einhaltung vom Anlagegrenzwert

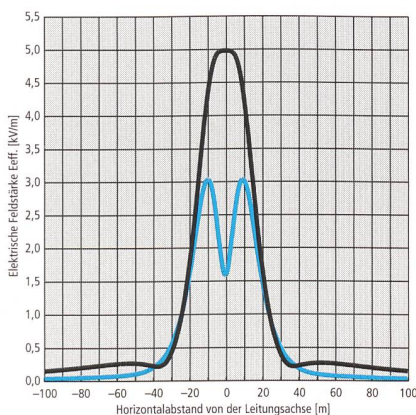


Bild 3 Elektrisches Feld.

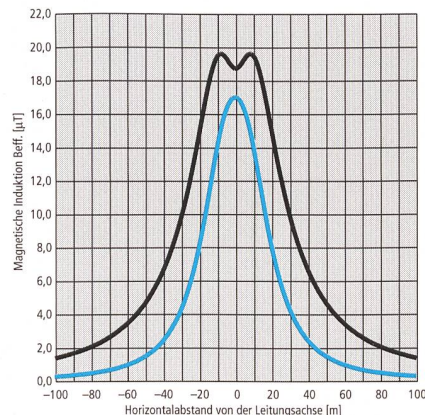


Bild 4 Magnetisches Feld.

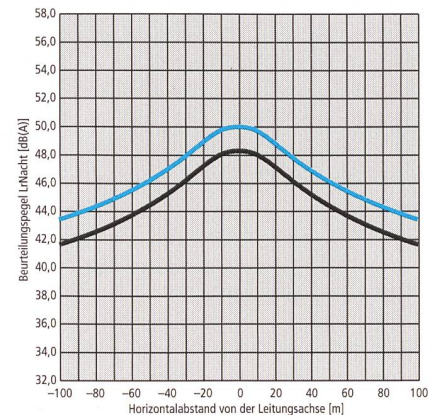


Bild 5 Korona.



Beim Betrieb einer Freileitung entstehen elektrische und magnetische Feld- sowie Geräuschemissionen.

oder zumindest die Optimierung der Phasenbelegung bei bestehenden Anlagen an Orten mit empfindlicher Nutzung.

Die Korona-Geräuschemissionen sind insbesondere bei den Höchstspannungsfreileitungen (Einzelleiter bei 220 kV und Zweier-Bündel bei 380 kV) wahrnehmbar und gelangen zum Teil je nach vorhandener Empfindlichkeitsstufe (LSV Art. 43) an die Planungswerte bei neuen und an die Immissionsgrenzwerte bei bestehenden Anlagen.

Die im vorliegenden Beitrag aufgezeigte Wechselbeziehung von Feld- und Geräuschemissionen erzeugt ein Dilemma. Hierbei stellt sich die Frage, ob das magnetische Feld oder die Korona gemäss dem Vorsorgeprinzip optimiert werden sollte. Beide Emissionen können nicht gleichzeitig optimiert werden, da diese entgegengesetzt respektive konträr sind. Auch darf die LSV nicht ausser Acht gelassen werden, denn es kann durchaus sein, dass durch eine Optimierung des magnetischen Feldes bei einer Höchstspannungsfreileitung die Geräuschemissionen derart zunehmen, dass die vorgeschriebenen Werte überschritten werden könnten.

Dieser Beitrag beinhaltet keinen Lösungsansatz, sondern kann nur mehr die Unstimmigkeiten zwischen den unterschiedlichen Emissionen und den Verordnungen des Umweltschutzgesetzes aufzeigen. Um zu sagen, welche Verordnung ausschlaggebend ist, braucht es

eine entsprechende Verfügung oder gar ein Gerichtsurteil. Zu bedenken ist, dass die Korona u.a. auf der stationären und effektiv angelegten Betriebsspannung basiert und nicht wie das magnetische Feld, welches auf einem theoretischen Grenzstrom basiert, der im tatsächlichen Betrieb eine dynamische Grösse (zum Teil mit Änderung der Lastflussrichtung) darstellt und für einen wirtschaftlichen Normalbetrieb im Betrag wesentlich kleiner ist.

### Literatur

[1] P.-A. Chamorel: Programm champ pour le calcul des champs électromagnétiques aux environs des lignes HT. Manuel, Août 1997.

[2] I. R. Carson: Wave Propagation in Overhead Wires With Ground Return. Bell System Technical Journal (1926), pp. 539-554.

[3] C. Gary, M. Moreau: L'effet de couronne en tension alternative. Ouvrage de la Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Edition Eyrolles (1976), N° 24.

[4] C. Gary: Effets perturbateurs des lignes électriques. EPF, Compatibilité électromagnétique (1985), Presses Polytechniques Romandes, pp. 345-393.

[5] V. L. Chartier: Empirical Expressions for Calculating High Voltage Transmission Corona Phenomena. BPA, Portland, Oregon (April 7th. 1983).

[6] V. L. Chartier, R. D. Stearns: Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines. IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, Nr. 1 (January 1981), pp. 121-130.

### Corrélation entre les champs électromagnétiques et acoustiques d'une ligne électrique aérienne

Le présent rapport montre l'existence d'une corrélation entre les champs électromagnétiques et acoustiques d'une ligne électrique aérienne, basée sur leur relation mathématique.

La loi sur la protection de l'environnement (LPE) exige des mesures de prévention, pour lesquelles les ordonnances légales (OPB pour les émissions acoustiques et ORNI pour les champs électromagnétiques) prescrivent des valeurs limites d'émission. Les calculs de l'optimisation exigée du phasage des lignes existantes selon la récente ORNI ont montré cette influence réciproque contraire.

Ainsi, la question se pose (en particulier pour des lignes aériennes THT) si le phasage doit être optimisé à l'avantage de l'OPB, basée sur la tension d'exploitation effective, ou de l'ORNI, selon le courant limite théorique.

Ce rapport ne comprend pas d'indice de solution, mais ne montre que les incohérences entre les différentes émissions et les ordonnances de la loi sur la protection de l'environnement.