Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 108 (2017)
Heft: 9

Artikel: Générateurs d'énergie... et de perturbation
Autor: Cardou, Olivier / Perrenoud, Christophe
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-791351

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: 11.07.2025

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

Générateurs d'énergie… et de perturbations

La compatibilité électromagnétique des convertisseurs | Les convertisseurs de fréquence ont un certain don d'ubiquité: on les retrouve dans quasi tous les systèmes électriques modernes. Ils constituent cependant une source majeure d'interférences électromagnétiques. Cherchons à en comprendre les mécanismes avec l'exemple des onduleurs solaires.

TEXTE OLIVIER CARDOU, CHRISTOPHE PERRENOUD

Des petits régulateurs SMD de quelques milliwatts aux puissants systèmes de conversion d'énergie équipés de modernes IGBT, les convertisseurs de fréquence se sont répandus dans tous les domaines. Ceci grâce à leur rendement élevé (jusqu'à 99 %), leur compacité et leur souplesse d'utilisation. Par convertisseur, on comprend des onduleurs solaires, des entraînements électriques de moteurs (de la machine à laver à la locomotive), des chargeurs divers (du téléphone portable à la voiture électrique), des éclairages LED, des systèmes précédés d'un variateur de tension, toutes les alimentations auxiliaires, etc.

Mais ces convertisseurs génèrent des perturbations électromagnétiques sur un spectre fréquentiel très large. De récentes études [1,2] montrent ainsi leur influence sur des systèmes électriques et de télécommunication très divers. Par exemple, certains compteurs d'énergie dits « intelligents » sont sensibles aux variateurs et chargeurs domestiques et accusent des déviations de mesure importantes. [3] Les systèmes de communication utilisant le réseau de distribution électrique (pour du diagnostic ou de la télécommande) sont régulièrement perturbés, voire inopérants, ce qui ralentit le développement d'un réseau smart grid. Sur le long terme, des composants électroniques vieillissent prématurément. D'ailleurs,

Figure: Romaset/Shutterstock.com

il n'y a pas que l'électronique dite « sensible » qui est affectée : certains moteurs subissent des dysfonctionnements, des échauffements dans les bobinages et de l'usure accélérée dans les parties mobiles.

Pour l'instant, des solutions sont appliquées au cas par cas, mais elles ne peuvent pas être généralisées, car elles ne sont pas toujours compatibles entre elles.

Origine des interférences

Les convertisseurs de fréquence découpent la tension d'entrée (AC ou DC) en tranches à une fréquence précise (entre 1 kHz et 1 MHz). Chaque tranche est ensuite modulée entre 0 et 100 % pour réguler la tension de sortie avant mise en forme (AC ou DC).

On distingue plusieurs zones à l'origine de perturbations électromagnétiques (**figure 1**). Ces zones ne se retrouvent pas forcément dans tous les convertisseurs.

Zone A: La commutation des diodes de redressement de la tension du réseau génère des harmoniques de tension indésirables à des fréquences multiples de 50 Hz jusqu'à environ 2 kHz.

Zone B: Cette zone regroupe plusieurs sources d'interférences. D'abord la commutation des interrupteurs de puissance crée des tensions parasites dont les harmoniques (multiples de la fréquence de base) peuvent s'étaler jusqu'à une centaine de MHz. Ensuite, les diodes internes ou externes aux interrupteurs génèrent des oscillations parasites lors de l'extinction du courant. De plus, les boucles parcourues par les fortes variations de courant des interrupteurs, les éléments inductifs (transformateurs et selfs) et même les refroidisseurs sont la source d'ondes rayonnées.

Zone C: La commutation des diodes de sortie provoque le même effet que dans la zone A, mais sur la base de la fréquence de la zone B.

Zone D: L'électronique auxiliaire de commande et de communication induit en général des perturbations hautes fréquences causées par les flancs de commutation des horloges et de l'électronique numérique. Bien qu'elle fonctionne à faible tension, elle est très rapide. Ces émissions peuvent se coupler sur les entrées et sorties de puissance et être très perturbatrices.

Détaillons les harmoniques de commutation des interrupteurs de puissance (zone B) ; ils ont une dynamique très particulière (**figure 2**). Ils diminuent après deux fréquences de coupure (f_{c1} et f_{c2}), mais surtout après f_{c2}. Or cette fréquence est liée aux flancs de commutation. Ainsi, plus le temps de commutation T_r est rapide (de quelques µs à une dizaine de ns) et plus les tensions parasites se propagent dans les hautes fréquences. Par exemple, la **figure 3** montre les émissions conduites à l'entrée DC d'un onduleur dont la fréquence de hachage est à 200 kHz. On voit que les harmoniques s'étendent jusqu'à 10 MHz ! La **figure 4** montre des harmoniques jusqu'à 150 kHz, alors que la fréquence de commutation est de 8 kHz.

Les zones A, B et C sont aussi le siège d'effets de résonance entre capacités et inductances parasites (contenues dans tous les éléments actifs et passifs ainsi que dans les câbles et les pistes). On assiste alors, dans le domaine temporel, à des oscillations rapides à chaque commutation et, dans le domaine fréquentiel, à des émissions à « large bande ». La **figure 4** présente plusieurs de ces émissions à 2 et 5 MHz. Une impédance élevée dans les câbles, les connexions ou les plans de masse augmente par ailleurs les tensions perturbatrices lors du passage de courants parasites. Par impédance, on pense à une résistance, mais il ne faut surtout pas négliger l'inductance dont l'influence est prépondérante à haute fréquence.

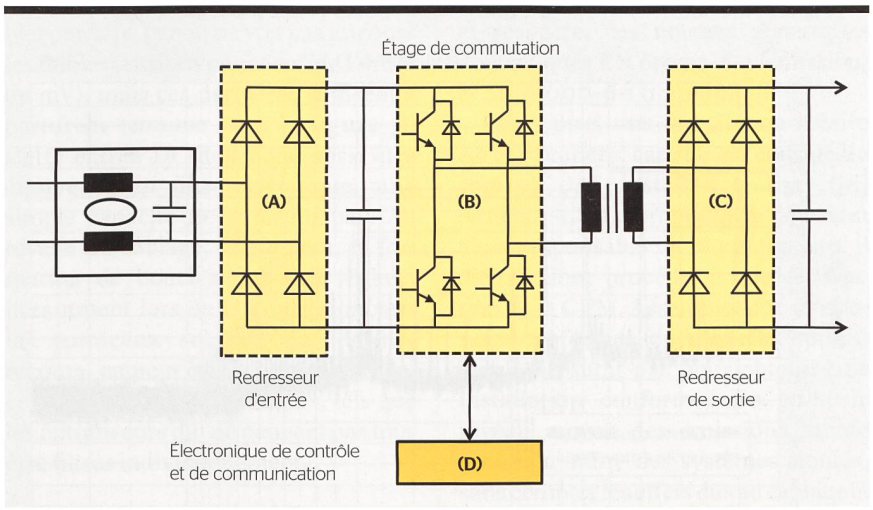


Figure 1 Localisation des perturbations dans un convertisseur AC/DC.

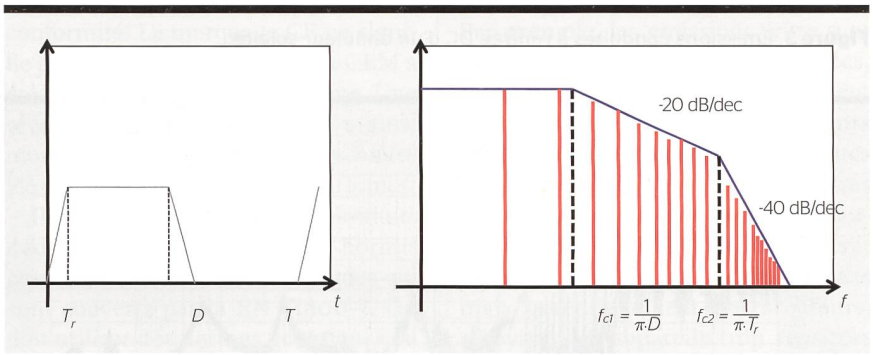


Figure 2 Propagation fréquentielle des harmoniques de commutation.

Propagation

Concernant la propagation, il importe peu que le convertisseur consomme ou réinjecte de l'énergie dans le réseau. Les tensions parasites sortent d'abord par les câbles, à cause d'un manque de filtrage ou de découplage sur les éléments de commutation, ou par couplage capacitif entre des câbles proches. La présence de capacités parasites contre terre crée aussi un chemin de fuite favorable pour les perturbations conduites.

En dessous de quelques MHz, les perturbations restent confinées dans les câbles. Mais ces derniers finissent par rayonner à plus haute fréquence. En

Figures : EuroMis Electrosuisse Product Testing

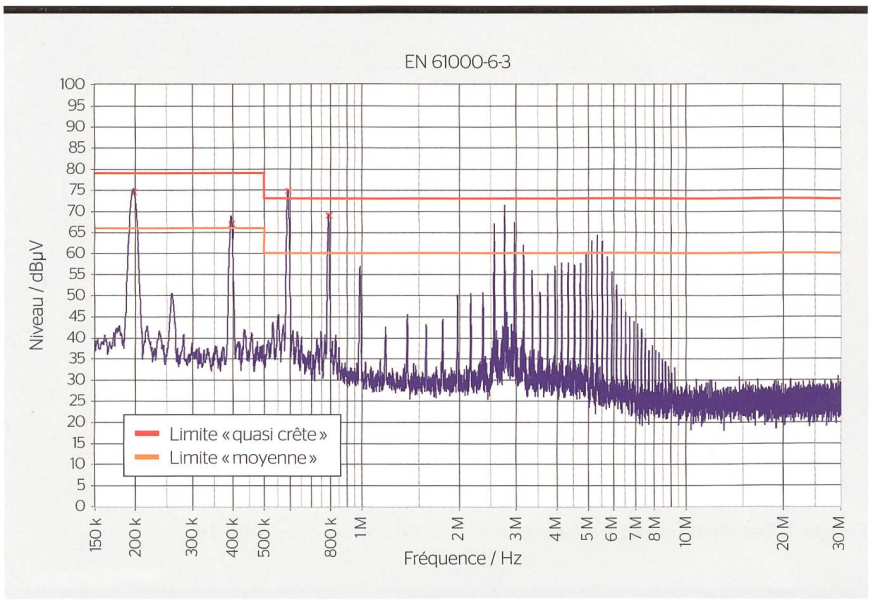


Figure 3 Émissions conduites à l'entrée DC d'un onduleur solaire.

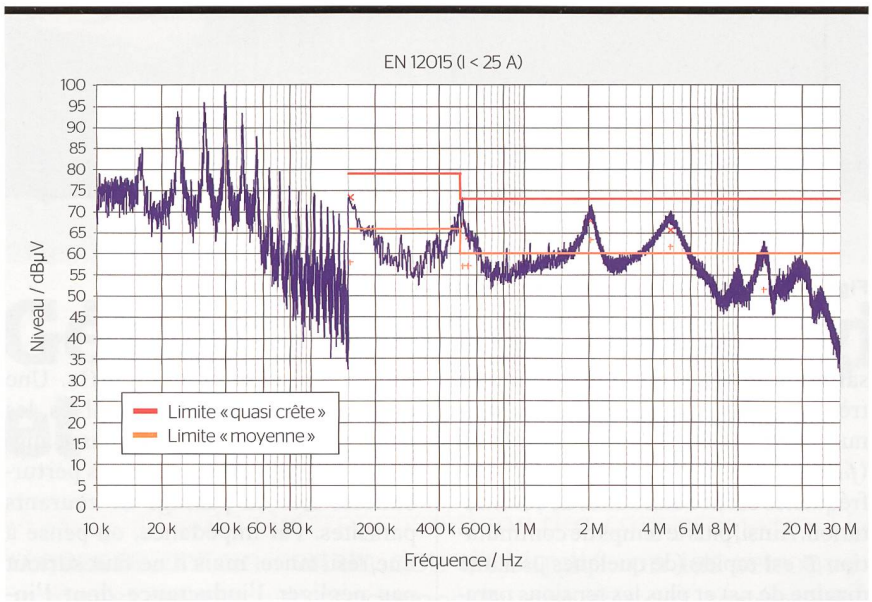


Figure 4 Harmoniques de commutation et perturbations à large bande.

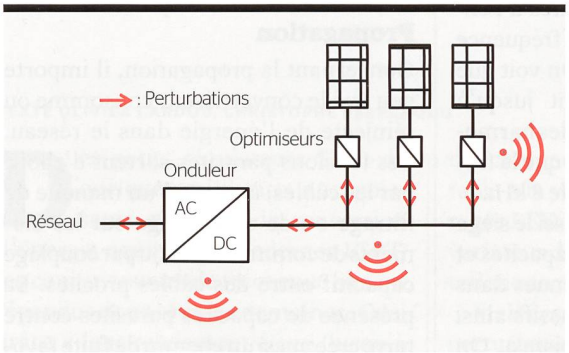


Figure 5 Installation solaire.

effet, tout câble se comporte comme une antenne à partir d'une longueur égale à 5 à 10% de la longueur d'onde (λ=300/f, la fréquence étant donnée en MHz).

Par ailleurs, les convertisseurs sont souvent plus perturbateurs à faible qu'à pleine puissance. En effet, à 100% ils délivrent un maximum d'énergie, mais ne commutent pas forcément sur le courant le plus élevé.

Pistes d'amélioration

Il est préférable d'agir à la source des interférences, donc dans le convertisseur. Comme l'étendue des harmoniques est liée aux flancs de commutation, il est inutile de modifier la fréquence de base. Il faut diminuer la raideur des flancs de commutation des interrupteurs de puissance, utiliser des circuits «snubbers», voire passer à une commutation à résonance ou à une technique d'étalement de la fréquence de base. Contre les effets négatifs des diodes, on peut opter pour des diodes de type «soft recovery».

Dans les circuits électroniques, l'impédance des masses, connexions et pistes doit être minimale. Cela atténue les oscillations hautes fréquences parasites et les couplages galvaniques intempestifs. Toutes les boucles de courant, qui sont potentiellement des surfaces rayonnantes, doivent être réduites au maximum. Le câblage général interne suit les mêmes règles.

On agit ensuite autour du convertisseur. Pour diminuer les perturbations conduites, il faut d'abord utiliser des filtres adaptés sur les entrées et sorties de puissance. Les autres câbles doivent aussi être traités, soit à l'aide d'autres filtres (filtres sinus ou du/dt pour des câbles moteurs), voire avec des ferrites. Mais la présence de nombreux filtres CEM en entrée des convertisseurs a un effet pernicieux: les capacités contre terre de ces filtres sont de grandes valeurs et provoquent une diminution de l'impédance du réseau, ce qui peut augmenter les perturbations en courant et les courants de fuite, sans compter le risque catastrophique de résonance entre filtres proches. [4]

Pour réduire le rayonnement, le tressage des câbles et leur plaquage contre les parois métalliques est déjà efficace. Mais c'est principalement le blindage du système électrique et des câbles avec des connexions soignées aux entrées/

Figures: Eurofins Electrosuisse Product Testing

sorties qui évitera les couplages avec l'extérieur. La taille des ouvertures devra être inférieure au vingtième de la longueur d'onde du signal à atténuer.

Application aux onduleurs solaires

Les installations solaires (**figure 5**) perturbent par rayonnement vers l'extérieur du bâtiment (les radios amateurs par exemple) et par conduction dans les câbles du bâtiment et vers le réseau général. Tous les appareils domestiques et industriels sont alors concernés. On rejette souvent, à tort, la faute sur des fuites du courant DC.

Les éléments perturbateurs sont l'onduleur et tout le câblage (entrée, sortie et auxiliaires). Notons que des petits convertisseurs DC/DC, appelés optimiseurs, sont apparus récemment. Fixés derrière chaque panneau solaire, ils permettent d'améliorer le rendement d'une installation solaire en évitant qu'un seul panneau dégrade le fonctionnement global. Mais ces éléments peuvent être à l'origine de perturbations et ne doivent pas être sous-estimés.

Pour améliorer la compatibilité électromagnétique (CEM), on peut d'abord équiper la sortie alternative d'un filtre réseau ou de ferrites. La partie DC est reliée aux panneaux solaires par de longs câbles qui deviennent des antennes, même à basse fréquence. À l'oscilloscope, la tension DC peut sembler parfaite, car on ne voit pas toujours les faibles tensions parasites (de l'ordre du mV), mais ces dernières suffisent à perturber (comme vu à la **figure 3**). Cette entrée DC doit donc aussi être équipée d'un filtre spécifique, une simple capacité ne suffisant pas. Au niveau du câblage, finalement, la formation de boucles doit être évitée, notamment lors de la connexion vers les panneaux solaires. En dernier recours, on peut être amené à remplacer les composants polluants, tels que les optimiseurs qui ne peuvent pas tous être filtrés individuellement.

Le marquage CE ne suffit pas

Il n'est pas suffisant de choisir du matériel conforme, il faut vérifier cette conformité. Le marquage CE ne signifie pas automatiquement que la CEM a été correctement prise en compte. Une récente étude européenne [5] a ainsi montré que seulement 5% des onduleurs solaires testés étaient conformes!

Il y a peu de normes de produits dédiées aux convertisseurs, hormis pour les entraînements électriques qui sont couverts par la EN 61800-3. On doit utiliser des normes génériques ou dédiées à des environnements spécifiques (médical, ascenseurs, ferroviaire, etc.). Ainsi, les onduleurs et optimiseurs solaires ne doivent pas générer trop d'harmoniques (EN 61000-3-2/12) et respecter les normes génériques domestiques EN 61000-6-3 (émission) et EN 61000-6-1 (immunité).

Par contre, une installation solaire est particulière, car elle est considérée comme une installation fixe ([6] Article 3-1.3) Le propriétaire devenant alors responsable de la conformité, il devrait donc procéder à une vérification de la CEM. Assembler des composants conformes (onduleurs et optimiseurs) ne suffit pas pour obtenir une installation conforme! En effet, le niveau moyen des émissions monte avec le nombre des systèmes ajoutés, sans compter les effets dus au câblage et aux résonances entre éléments.

De plus, les normes harmonisées ne couvrent pas tous les risques en CEM. Par exemple, les émissions entre 9 et 150 kHz ne sont quasiment pas traitées, alors que, comme vu précédemment dans la **figure 4**, les convertisseurs génèrent des harmoniques importantes dans cette zone. De plus, il existe très peu d'exigences en immunité au-dessous de 150 kHz. On a donc en pratique des appareils, certes conformes mais potentiellement perturbateurs, côtoyant des appareils trop sensibles dans cette bande de fréquence. Une mesure simple serait d'installer des filtres basse fréquence. Cependant, leur grande taille et leur prix ne favo-

IN KÜRZE

Energieerzeuger und... Störungsverursacher

Die elektromagnetische Verträglichkeit von Umrichtern

Frequenzumrichter sind praktisch allgegenwärtig, denn man findet sie in fast allen modernen elektrischen Systemen. Allerdings sind sie auch eine wichtige Ursache für elektromagnetische Störungen. Zum Beispiel reagieren einige elektronische Elektrizitätszähler empfindlich auf haushaltsübliche Umrichter und Ladegeräte und verzeichnen beträchtliche Messabweichungen. Auch Kommunikationssysteme, die das elektrische Verteilnetz nutzen (für Diagnosezwecke oder zur Fernsteuerung), werden oft gestört oder funktionieren nicht, was den Ausbau von intelligenten Stromnetzen bremst.

Der Artikel erläutert die Ursache der von den Umrichtern erzeugten Störungen sowie die Art und Weise, wie sich diese ausbreiten und schlägt Lösungsstrategien zur Verbesserung vor. Dabei werden die durch Solar-Wechselrichter erzeugten Störungen detailliert behandelt. Zudem wird auf Folgendes aufmerksam gemacht: Um sich gegen elektromagnetische Störungen zu schützen, reicht die CE-Kennzeichnung alleine nicht aus, denn die Kombination konformer Komponenten (Umrichter und Optimierer) garantiert nicht, dass auch die Gesamtanlage konform ist. Der durchschnittliche Emissionspegel steigt nämlich proportional zur Anzahl zugehöriger Systemkomponenten, ganz abgesehen von den Störeffekten, die durch die Verkabelung und die Resonanzen zwischen den Bauteilen entstehen.

In Zukunft dürfte sich die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei Betriebsmitteln dank der Verpflichtung zu einer Risikoanalyse und neuen Grenzwerten verbessern, so dass eine «Grundsatz-Konformität» vermieden wird. Allerdings müssen sowohl Nutzer als auch Käufer weiterhin im Bereich EMV wachsam bleiben, und zwar indem sie zunächst die Konformität der einzelnen erworbenen Komponenten und des Gesamtsystems überprüfen, und anschliessend zusätzlich die im Markt eingeführten Systeme bezüglich Störaussendung und Störfestigkeit testen. CHE

risent pas leur intégration et font perdre l'avantage de la compacité des convertisseurs modernes.

Il faudrait donc que les appareils électriques soient améliorés dès la conception et qu'ils soient mieux testés. Or, depuis 2016, la directive 2014/30/EU impose une analyse de risques spécifique à la CEM ([6], annexe II), ce qui permet d'identifier des lacunes dans les normes harmonisées par rapport à l'utilisation finale du produit. Cela inciterait, par exemple, à étendre les tests au-dessous de 150 kHz. D'ailleurs, de nouvelles normes pour les émissions à basse fréquence des convertisseurs de puissance sont en cours d'élaboration.

Tester le matériel assemblé

Les perturbations générées par les convertisseurs de fréquence, qui vont de quelques kHz jusqu'à plusieurs MHz, ne sont pas un problème nouveau. Mais la situation est aggravée par la prolifération de systèmes électriques modernes dans des environnements restreints et par le manque d'exigences légales entre 9 et 150 kHz. On se retrouve alors sur le terrain avec de nombreux appareils polluants ou sensibles, tous difficiles à filtrer.

À l'avenir, la compatibilité électromagnétique devrait s'améliorer pour le matériel grâce à l'obligation d'une analyse de risques et de nouvelles limites, évitant ainsi une « conformité de principe ». Cependant, les utilisateurs et acheteurs doivent rester attentifs à la CEM, en commençant par vérifier la conformité du matériel acheté, mais aussi en effectuant des tests supplémentaires en émission et en immunité du matériel assemblé, puis mis sur le marché. Ces tests peuvent être réalisés par les laboratoires de CEM d'Eurofins Electrosuisse.

Références

[1] Cenelec, CLC/TR 50627, Study report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz. November 2015.

[2] P. Kotsampopoulos et al., EMC issues in the interaction between smart meters and power electronic interfaces. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume PP, Issue 99, May 2016.

[3] F. Leferink, C. Keyer, A. Mlentjev, Static energy meters errors caused by conducted electromagnetic interference. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 5, Issue 4, pp. 49-55, 2016.

[4] D. Roggo, CEM et réseaux intelligents. Bulletin SEV/AES 6/2015, pp. 33-37, 2015.

[5] EMC Adco, Report on the 6th Joint cross-border EMC market surveillance campaign. 2014.

[6] Directive EMC 2014/30/EU. eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0030

Auteurs

Olivier Cardou est ingénieur EPFL de test en CEM.
→ Eurofins Electrosuisse Product Testing AG, 1728 Rossens
→ OlivierCardou@eurofins.ch

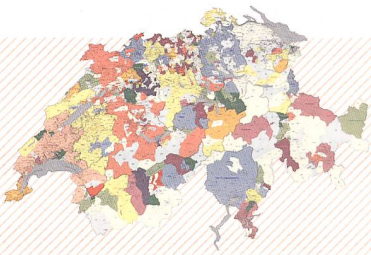
Christophe Perrenoud est ingénieur HES, responsable des laboratoires de Rossens et Berne.
→ Eurofins Electrosuisse Product Testing AG, 1728 Rossens
→ ChristophePerrenoud@eurofins.ch

Schweizer Strom-Verteilerkarte

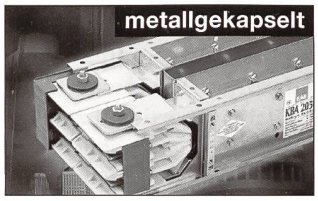
Jetzt bestellen!

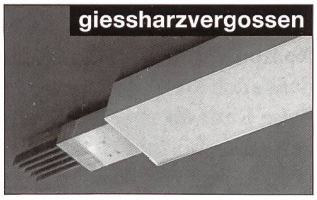
Übersichtskarte als Poster für Büro, Sitzungszimmer, Empfangsbereich oder als handlich gefaltete Karte für unterwegs.
Zeigt, welcher Stromversorger in welcher Gemeinde Endkunden mit Strom versorgt. Neu elektronisch auch als JPG-Bilddatei erhältlich.

www.strom.ch



VSE AES





LANZ Stromschienen 25 A – 6000 A
unsere Kernkompetenz

lanz ist der marktführende Schweizer Stromschienenhersteller mit langjähriger Erfahrung und komplettem Lieferprogramm:

Verlangen Sie Beratung und Offerte:
lanz oensingen ag 4702 Oensingen Tel. 062 388 21 21

STS8_1

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen
Südringstrasse 2
www.lanz-oens.com
info@lanz-oens.com
Tel. ++41/062 388 21 21
Fax ++41/062 388 24 24

SORGFALT, SERVICE UND HOCHWERTIGER OFFSETDRUCK.

www.somedia-production.ch

somedia PRODUCTION
PRINT VIDEO WEB