**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse
**Herausgeber:** Electrosuisse
**Band:** 97 (2006)
**Heft:** 3

**Artikel:** Netzverträglichkeit rückspeisefähiger Antriebe
**Autor:** Beck, Fabian / Klampfer, Wolfgang L. / Melly, Stefan
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-857649

**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:** 16.07.2025

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

# Netzverträglichkeit rückspeisefähiger Antriebe

## Netzfilter für Frequenzumrichter

Energieeffizienz und Dynamiksteigerung – dies sind zwei zentrale Themen in Industrie und Maschinenbau. Um beides zu erreichen, werden heute häufig rückspeisefähige Motorantriebe verwendet. Verglichen mit herkömmlichen Antriebskonzepten stellt sich die Integration von Rückspeisesystemen oft ungleich komplexer dar. Nebst der Begrenzung von Netzrückwirkungen sorgt vor allem die Herausforderung zur sauberen Netzentkopplung für heisse Köpfe. Dieser Artikel zeigt auf, dass zum Erarbeiten einer sinnvollen und wirtschaftlichen Lösung sämtliche Problemaspekte im Zusammenhang betrachtet und systematisch angegangen werden müssen.



Frequenzumrichter werden in der Automation bereits seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Wirtschaftlichkeit, Präzision und Flexibilität sind nur einige der

*Fabian Beck, Wolfgang L. Klampfer, Stefan Melly*

Eigenschaften, die den modernen Antrieb charakterisieren. Trotzdem stellt die Forderung nach höchster Regeldynamik, Energieeffizienz und Miniaturisierung den herkömmlichen Motorantrieb in manchen Anwendungen in Frage.

Bei konventionellen Umrichtern wird die während dem Bremsvorgang erzeugte Energie über Bremswiderstände in Wärme umgewandelt. Sind die Bremswiderstände innerhalb des Schaltschranks angebracht, so gilt es mit kostspieligen Massnahmen den Temperaturanstieg im Rahmen zu halten. Zudem nehmen die Bremselemente eine beträchtliche Fläche in Anspruch – ein knappes Gut im Schaltschrank. Eine andere Problematik ergibt sich zu Beispiel im Werkzeugmaschinenbau oder in der Robotik, wo die Bewegungsdynamik massgebend von der Fähigkeit eines Antriebs abhängt, die Bremsenergie unmittelbar zu «entsorgen».

Um diesen Anforderungen besser gerecht zu werden, bietet sich heute der Einsatz rückspeisefähiger Vierquadrantenantriebe an. Diese Antriebe machen sich auf der Netzseite dieselbe Technik zu Nutze, die sich seit Jahren für die Motorregelung bewährt hat. Im Motorbetrieb übernimmt statt einer B6U-Diodenbrücke mit kapazitiver Glättung ein IGBT-Modul die Gleichrichtung der Netzspannung. Dasselbe Modul kommt auch beim Bremsvorgang zum Einsatz – nur in umgekehrter Richtung. Die Logik überwacht permanent Spannung und Strom im Zwischenkreis, schaltet präzise zwischen den beiden Betriebsmodi um und führt die gewonnene Energie zurück ins Netz (Bild 1).

Somit entfallen Bremswiderstände und alle damit verbundenen Nachteile. Vor allem aber gewinnt das System an Dynamik, da die Energierückführung wesentlich schneller vonstatten geht als die entsprechende Wärmeumwandlung. Der Energieverbrauch wird gesenkt und die Effizienz erhöht.

Trotz aller Vorzüge darf ein Rückspeiseantrieb nicht ohne weiteres direkt ans Netz angeschlossen werden. Die Energierückführung erfolgt meist mittels modulierter Taktfrequenz. Bei geringer Netzimpedanz führt ein nicht angepasster Taktvorgang in Netzrichtung zu Kurzschlüssen und zum unmittelbaren Abschalten der Anlage. Ferner erzeugen die schnellen Schaltvorgänge ein Störspektrum, das den Einsatz spezieller Lösungen zur Reduktion von Netzrückwirkungen notwendig macht. Sobald aber Filter mit Kondensatoren am Netzeingang zum Einsatz kommen, entstehen Resonanzen, die unabsehbare Einflüsse auf benachbarte Anlagen und somit auf die Betriebssicherheit des Gesamtsystems haben.

Um eine zuverlässige und trotzdem wirtschaftliche Lösung zu erarbeiten, müssen sämtliche Aspekte wie Netzentkopplung, Resonanzen, EMV, Oberwellen, Kommutierung, cos phi etc. als Zu-

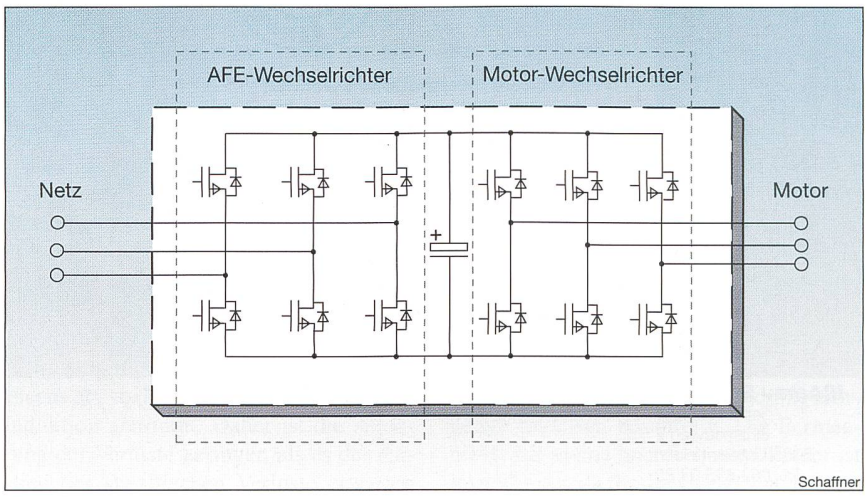


**Bild 1** Prinzipschaltbild eines Rückspeiseantriebs

sammenspiel betrachtet und entsprechend behandelt werden.

## Was gilt es speziell zu beachten?

Jede Last, die ans Netz angeschlossen wird, verursacht bei Leistungsbezug oder -rückgabe eine Spannungsänderung an der Netzimpedanz. Bei einem sinusförmigen, ohmschen Verbraucher (Heizwiderstand) ist sichergestellt, dass mögliche parallele Verbraucher eine sinusförmige Spannung sehen. Dies hat aber nur solange Gültigkeit, bis der ohmsche Verbraucher getaktet wird und Spannungsschwankungen am Lastanschlusspunkt entstehen (sog. Flicker). Neben Spannungsschwankungen resultieren auch Oberwellen (Vielfache der Netzfrequenz) und Zwischenharmonische aus nichtlinearen Lasten (Bild 2).

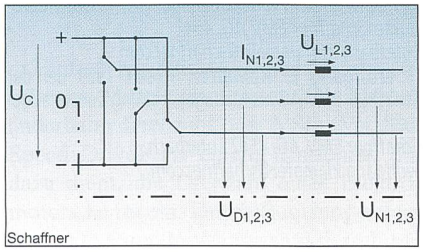


**Bild 2 Wechselrichter als Rückspeiseeinrichtung**

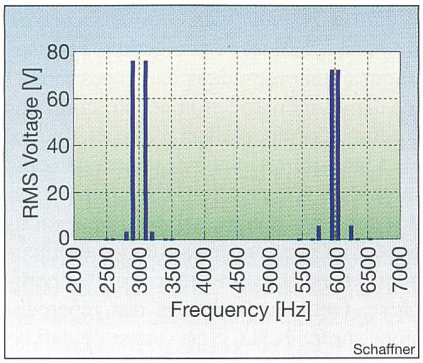


**Bild 3 Spannungsspektrum**

Wenn wir nun die ersten beiden Oberschwingungen eines Rückspeiseantriebes mit ihren Nebenwellen darstellen, so erkennt man, dass die Wechselrichterschaltung bei einer Taktfrequenz von 3 kHz keine Oberschwingungsanteile im Bereich von 100 Hz bis 2,5 kHz erzeugt (Bild 3).

Das Problem der Oberschwingungen hat sich verlagert in den schlecht normierten Frequenzbereich von 2,5 kHz bis 9 bzw. 150 kHz. Bestimmt man den zu erwartenden Stromrippel, so stellt man fest, dass dieser abhängig ist von der Grösse der Entkoppelinduktivität L. Die gewählten Halbleiter begrenzen den Stromrippel meist auf 10% des Nennstromes. Je nachdem, welche Lasten angetrieben werden und wie die Netzentkopplung und -entstörung aussehen, können sich verschiedene kritische Resonanzkreise bilden (Bild 4).

Als Faustformel sollte jede Resonanzfrequenz ($f_{RM}$, $f_{RN}$ und evtl. $f_{RDC}$) um den Faktor 5 kleiner als die internen Systemfrequenzen ($f_{TM}$ und $f_{TN}$) gewählt und wenn nötig mittels Widerständen bedämpft werden (unerwünschte Verlustwärme).

Der Netzeingang wird bezüglich EMV gleich doppelt belastet ($f_{TM}$ und $f_{TN}$). Bei einer Messung mit einer geeigneten Power-Quality-Netznachbildung (resonanzfrei und pulsfest von 2 kHz bis 30 MHz) werden die Störspannungen beider Wechselrichter gleichzeitig gemessen. Äusserste Vorsicht ist bei gängigen CISPR16-Netznachbildungen geboten. Diese können leicht zerstört werden, da die Entkopplungskapazitäten nicht pulsfest sind und die Entkopplungswiderstände meist nicht genügend Leistung tragen können.

## Lösungsansätze

Die kostengünstigste Art der Netzentkopplung von rückspeisefähigen Antrieben ist die Verwendung einer so genannten Netzpulsdrossel oder Entkoppelinduktivität. Mit der Grösse der Induktivität und der PWM-Frequenz kann der Stromrippel eingestellt und an das Leistungsvermögen der Halbleiter angepasst werden. Mit einer einfachen induktiven Netzentkopplung findet aber eine Spannungsteilung zwischen der Netzimpedanz und der Entkoppelinduktivität statt. Bei kleineren Leistungen (<10 kW) beträgt der Wert der Entkoppelinduktivität einige mH, um den Rippelstrom auf ca. 10% des Nennstromes zu begrenzen. Damit fällt der grösste Teil der PWM-Spannung an der Entkoppelinduktivität ab.

Begibt man sich jedoch in den Leistungsbereich >50 kW, so ist die Grösse der Entkoppelinduktivität bei 10% Stromrippel nur noch wenige 100 µH und somit gleich gross oder kleiner als die Netzanschlussimpedanz. Mit einer Netzpulsdrossel mit $u_k \cong 4...8\%$ ist man somit einfach in der Lage, einen rückspeisefähigen Antrieb vom Netz zu entkoppeln. Mit der Wahl dieser einfachen Netzentkopplung können jedoch vorhandene Blindleistungskompensationsanlagen, Werkzeugmaschinen oder Computer schleichend zerstört werden. Der Restspannungsrippel forciert die vorzeitige Alterung von elektronischen und elektrischen Apparaten, die am gleichen Speisetransformator wie der rückspeisefähige Antrieb angeschlossen sind.

Der symmetrische Spannungsrippel kann mit einer zusätzlichen Kapazität reduziert werden. Dies ist dann die der Netzpulsdrossel nachgeschaltete symmetrische Kapazität, die die Entstörung bis ca. 20 kHz unterstützt. Oberhalb von 20 kHz sind die Geometrie (E-Kern oder U bzw. Topfkern) wie auch die magnetische Materialwahl und eine wirksame asymmetrische EMV-Filterung mitentscheidend.

Als sicherste Variante der Netzentkopplung hat sich ein T-Filter erwiesen mit integrierter oder vorgeschalteter EMV-Entstörung. Die Investitionskosten für ein T-Filter sind zwar höher als bei einer einfachen Netzpulsdrossel, werden jedoch durch ein störfreies Verhalten des rückspeisefähigen Antriebs in Haushalt-, Gewerbe- und Industrienetzen kompensiert (Bild 6).

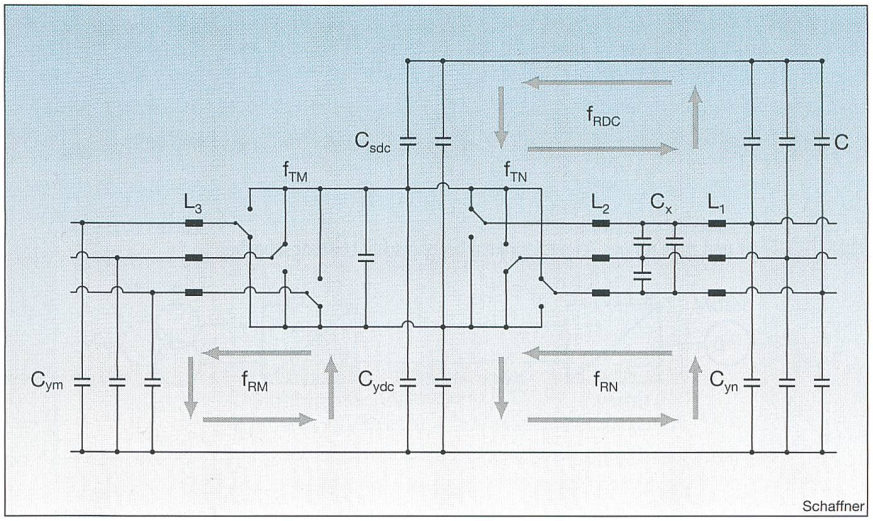


**Bild 4 Auftreten von Resonanzen**

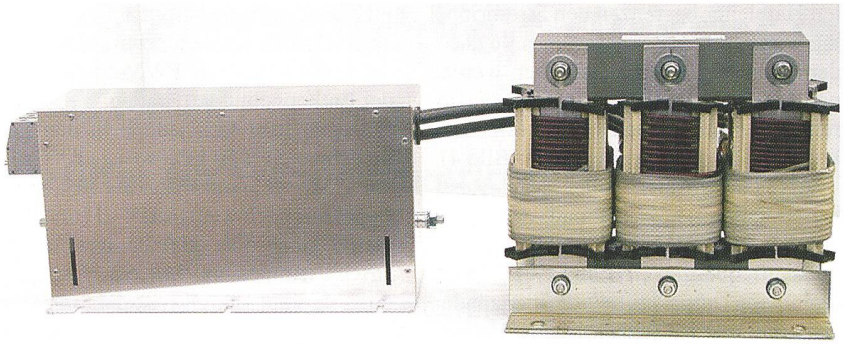


Bild 5 Netzpulsdrossel (rechts) mit EMV-Filter

Die zusätzliche Induktivität $L_1$ verhindert, dass das Netz einen kapazitiven Eingang des rückspeisefähigen Antriebes sieht. Bei Annahme einer niederimpedanten Netz- und Antriebs-Impedanz hat das T-Filter einen Dämpfungsanstieg von 60 dB pro Dekade und unterdrückt den Spannungsrippel des rückspeisefähigen Antriebs bei guter Auslegung auf weniger als 1% der Netzeffektivspannung. Die Thematik mit parallelen Verbrauchern und Netzkommandos ist mit der zusätzlichen Induktivität $L_1$ entschärft: mit einer 0,5 bis 2% Drossel $L_1$ wird die Filterkapazität C vom Netz wirksam entkoppelt.

## Schlussfolgerungen

Der Einzug der modernen Rückspeisetechnik in der Automation geht unaufhaltsam voran. Dabei muss der Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit des rückspeisefähigen Antriebs höchste Priorität eingeräumt werden, um der latenten Gefahr der schleichenden Zerstörung benachbarter Verbraucher zu begegnen. Dies ist Sache der Hersteller, die die Verträglichkeit gegenüber dem Kunden und dem Gesetzgeber zu gewährleisten haben. Eine anspruchsvolle Aufgabe, wenn man bedenkt, dass viele herkömmliche Messeinrichtungen – wie z.B. eine Netznachbildung nach CISPR16 – die veränderten Anforderungen nicht erfüllen können. Dasselbe gilt für zahlreiche Entstörkomponenten, die im rückspeisefähigen Antrieb schnell an ihre technischen Grenzen stossen. Allgemein gültige Berechnungsgrundlagen und Simulationstools können zwar herangezogen werden, ersetzen aber die praktische Analyse am Rückspeisesystem meist nicht.

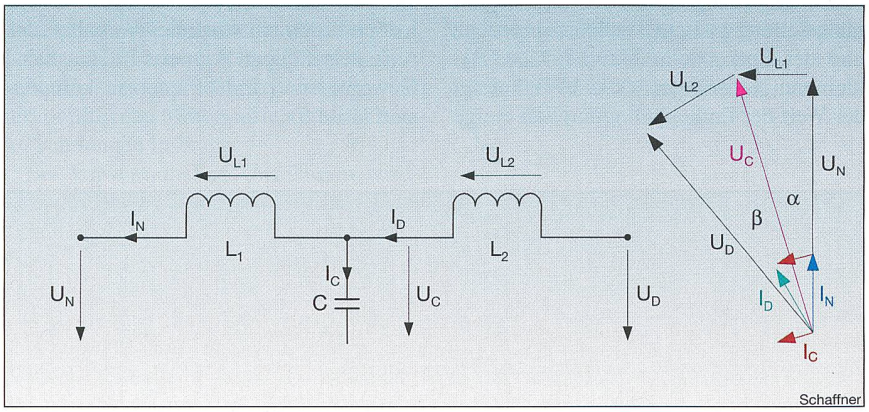


Bild 6 LCL-Filter und zugehöriges Zeigerdiagramm bei ohmscher Leistungsabgabe

Wenn es gilt, kostenoptimierte Lösungen zu erarbeiten, die draussen im Feld ihre Tauglichkeit unter Beweis stellen müssen, führt in der Regel kaum ein Weg an der individuellen Beurteilung durch Spezialisten vorbei. Durch geeignete Dimensionierung der Netzentkopplungsschaltung in Kombination mit einem EMV-Filter lassen sich aber Gesamtlösungen entwickeln, die hinsichtlich Volumen, Funktionalität und Kosten individuellen Teillösungen überlegen sind.

## Angaben zu den Autoren

**Fabian Beck** ist seit 1995 bei der Schaffner EMV AG in Luterbach im Bereich «Research and Technology» angestellt. Seit 2005 bekleidet er die Position des «Global Manager Research and Development».
*Schaffner EMV AG, 4542 Luterbach, fabian.beck@schaffner.com*

**Stefan Melly** ist seit 1995 bei der Schaffner EMV AG in Luterbach tätig. Nach mehrjähriger Erfahrung in den Bereichen Produktion und Entwicklung ist er in die Abteilung «International Marketing and Sales» gewechselt als Produktmanager für Industrieprodukte. *Schaffner EMV AG, 4542 Luterbach, stefan.melly@schaffner.com*

**Wolfgang L. Klampfer** ist seit 1999 bei der Schaffner EMV AG als Manager Training Center angestellt.
*Schaffner EMV AG, 4542 Luterbach, wolfgang.klampfer@schaffner.com*

*Résumé*

**La compatibilité réseau des entraînements à récupération**

*Filtres réseau pour convertisseurs de fréquence.* Efficacité énergétique et dynamique améliorée – deux exigences centrales dans l'industrie et la construction des machines. Pour réaliser l'une et l'autre, on a souvent recours à des entraînements moteurs à récupération. En comparaison des concepts d'entraînement conventionnels, l'intégration des systèmes de récupération est souvent beaucoup plus complexe. Outre la limitation des répercussions sur le réseau, c'est surtout le défi de réaliser un découplage correct par rapport au réseau qui pose de gros problèmes. L'article montre que l'élaboration d'une solution judicieuse et économique exige que l'on examine dans leur ensemble tous les aspects et que l'on aborde les problèmes de manière systématique.