



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Jahresbericht** 30. November 2009

---

# **Novel Low Harmonics 3-Phase Rectifiers for Efficient Motor Systems**

## **Konzeptstudie**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

-

**Auftragnehmer:**

Schaffner EMV AG  
Nordstrasse 11  
CH-4542 Luterbach  
[www.schaffner.com](http://www.schaffner.com)  
HES-SO Wallis  
Route du Rawyl 47  
CH-1950 Sion 2  
<http://www.hevs.ch>

**Autor:**

Norbert Häberle, Schaffner EMV AG, [norbert.haeberle@schaffner.com](mailto:norbert.haeberle@schaffner.com)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154445 / 103369

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Zusammenfassung

Die moderne Leistungselektronik, gepaart mit technologischen Fortschritten im Motorenbau und mit intelligenten Steuerungskonzepten, ermöglicht heute massive Einsparungen im Verbrauch elektrischer Energie. Zahlreiche Energie-Effizienzprogramme tun das ihre, um diese höchst erfreuliche technische Entwicklung zu forcieren und weiter zu optimieren.

Der Anwender moderner Motorensysteme wird mit unangenehmen Nebenerscheinungen konfrontiert: Nichtlineare Ströme und höherfrequente Störungen werden typischerweise nachträglich durch Netz- und lastseitige Entstörfilter bekämpft. Im Bereich **Netzurückwirkungen** in Dreiphasen-Hochstromapplikationen besteht ein erheblicher Handlungsbedarf für grundlegende Arbeiten: Die Problematik der zunehmenden nichtlinearen Strombelastung der Niederspannungsnetze durch moderne energieeffiziente Verbraucher ist in diesem Segment heute nur unbefriedigend lösbar. Neue Konzepte in vorwiegend passiver Schaltungstechnik versprechen eine hervorragende Oberwellendämpfung ohne die Nachteile von Switch-Mode Schaltungen bezüglich Zuverlässigkeit, Effizienz und Kosten.

Einige Probleme, welche durch unerwünschte Stromkomponenten verursacht werden:

- Die geforderte Qualität der von den Anbietern zur Verfügung zu stellenden Netzspannung wird beeinträchtigt.
- Die Niederspannungsinfrastrukturen vom Umspann-Transformator bis zum Verbraucher (Motorensystem) müssen überdimensioniert werden.
- Frequenzabhängige Netzfunktionen (zB. Rundsteuerung) und Sicherheitseinrichtungen (zB. FI-Schutzschalter) reagieren sehr empfindlich auf spektrale Verunreinigungen.

Eine optimale Kompensation der Nichtlinearitäten würde eine um bis zu **100% höhere Auslastung** der Infrastruktur zulassen. Eine Neuauslegung würde eine entsprechend kompaktere (günstigere) Dimensionierung erlauben. Im Zusammenhang mit den erwähnten Fortschritten der elektrischen Effizienz von Motorensystemen muss angenommen werden, dass die Problematik der nichtlinearen Netzurückwirkungen mittelfristig **drastisch verschärft** wird. Es ist deshalb nachvollziehbar, dass die Netzbetreiber - wie zB. an der VSE-Jahrestagung 2007 empfohlen - in Zukunft viel stärker auf die Durchsetzung der einschlägigen Standards [1] pochen wollen, mit Strafkatalogen, die bis hin zur Abschaltung des uneinsichtigen Netzverschmutzers reichen.

## Projektziele

### Kompensationsmethoden für unerwünschte Stromkomponenten

Die Hauptproblematik auf der Netzseite liegt bei harmonischen Frequenzen der Grundschwingung, welche durch die Leistungsgleichrichter der elektronischen Lasten erzeugt werden. Die gebräuchlichsten Mittel zur Reduktion dieser Strom-Oberwellen sind Längsdrosseln sowie aktive und passive Harmonische Filter (HF). Andere Lösungen arbeiten mit leistungselektronischer Schaltungstechnik (active front-ends) im Drive-Gleichrichter, wobei die Oberwellen an der Quelle minimiert werden (zB. Arbeiten von Kolar, ETHZ; [2]).

Gegenüberstellung der Methoden für Lasten über 10kW (Umrichter-externe Lösungen):

- Längsdrossel: THDI 35-40%, kostengünstig, kompakt, oft ungenügende THDI-Dämpfung (THDI = Total Harmonic Current Distortion).
- Passives HF: THDI <5%, sehr gute Filtereigenschaften, voluminös und teuer im Vergleich zum Umrichter, hoher kapazitiver Strom bei tiefer Last.

- Aktives HF: THDI <5%, sehr gute Filtereigenschaften, sehr geeignet auch für nicht-harmonische und asymmetrische Ströme, voluminös und sehr teuer im Vergleich zur Motorsteuerung.

Diese stark vereinfachte Charakterisierung soll aufzeigen, dass dem Einsatz moderner, energieeffizienter Motorsysteme eine bezüglich Kosten und Volumen unbefriedigende Kompensationstechnologie gegenübersteht. Der hohe Investitionsaufwand für die ausreichende Korrektur der eingehandelten nichtlinearen Verzerrungen (im Vergleich zum eigentlichen Kernobjekt der Effizienzmassnahme, der Motorsteuerung) ist einer zügigen Einführung solcher Systeme nicht förderlich.

Die beste Lösung für die Eindämmung harmonischer Netzbelastungen heisst, das Übel an der Wurzel zu packen. Dieses Thema wird, wie erwähnt, für kleinere Lasten (bis ca. 10kW) intensiv bearbeitet. Solche Lösungsansätze zeigen allerdings Schwächen bezüglich Zuverlässigkeit und Wirkungsgrad in höheren Lastbereichen.

Die Entwicklung von kostengünstigen und kompakten Kompensationsmassnahmen für den Leistungsbereich bis 500kW ist eine Grundlagenarbeit, welche nötig ist, um den Hauptharst der Industrie- und Gebäude-Infrastrukturen zu erfassen, welche für die nichtlineare Strombelastung verantwortlich sind. Vorgehen:

- Analyse wissenschaftlicher Arbeiten zu Gleichrichtern mit magnetischen Komponenten zur effizienten Oberwellendämpfung; Extrapolation der Lösungsansätze für den Leistungsbereich 3-500kW.
- Studium der Anforderungen an smarte magnetische und andere Komponenten für die evaluierten Konzepte; Bewertung bezüglich Kosten und Reproduzierbarkeit.
- Definition von Lösungskonzepten für dreiphasige Gleichrichterstufen, welche die Nachteile heutiger Kompensationstechnologien beseitigen.
- Bewertung dreiphasiger Hochstrom-Anlagentypen: Identifizierung der grössten Verursachergruppen nichtlinearer Stromverzerrungen.

## **Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse**

Die Projekteingabe vom Oktober 2009 basiert auf grosser Markterfahrung und intensiver Trendbeobachtung. Organisatorische Vorarbeiten sind geleistet (Projektablauf, Definition von Work-Packages, Teambildung, administrativer Set-up) und die Vorgehensweise bei der Erarbeitung des Lösungskonzepts definiert.

Quellenmaterial ist intensiv in Sichtung und wird zur vertieften Bearbeitung strukturiert. Das Work-Package ‚Lösungskonzept‘ (November 2009 bis Januar 2010) wird aus diesem und weiterem Material neue Ansätze entwickeln, welche nach Technologie- und Marktkriterien systematisch zu bewerten sein werden.

Um eine systematische Konzeptevaluation für dreiphasige low Harmonics Gleichrichter durchführen zu können, werden die technologischen Lösungsansätze gemäss Bild 1 strukturiert. Das geschätzte Anwendungsvolumen ist in der unteren Bildhälfte qualitativ erfasst, wobei die grosse Gruppe der seriellen harmonischen Dämpfungselemente (AC Line Chokes) in aller Regel ungenügende Unterdrückungseigenschaften für Oberwellen aufweisen und somit als zukünftige Lösungsvariante ungeeignet sind.

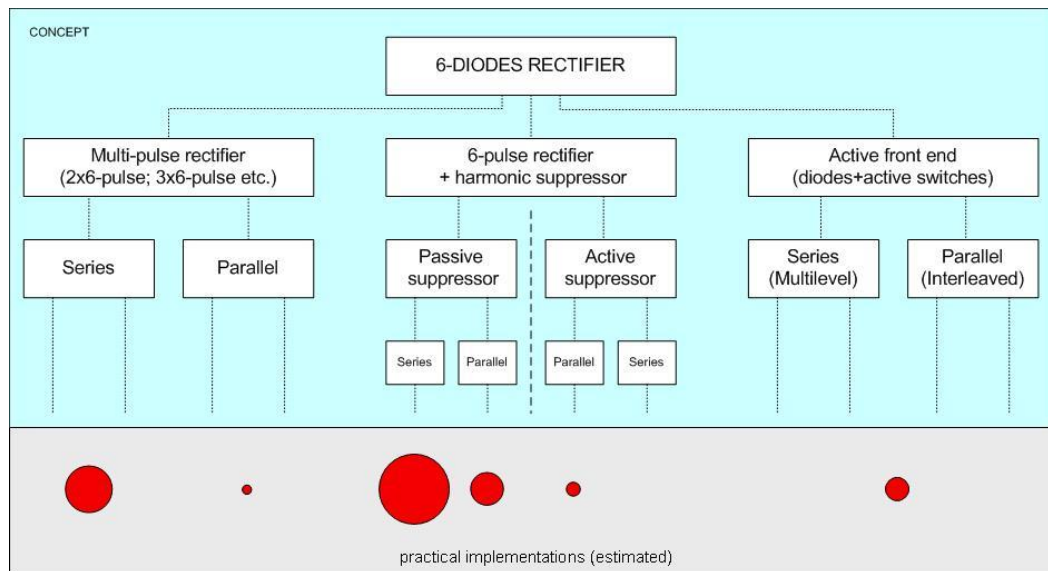


Bild 1: Lösungsansätze für 6-Dioden-Gleichrichter mit tiefem Strom-Klirrfaktor. Deren aktuelle Bedeutung am Markt ist mit den roten Kreisflächen qualitativ dargestellt.

Zur Bedämpfung von Oberwellen im Hochstrombereich kommen zumeist serielle Multipuls-Gleichrichter zur Anwendung (Bild 2). Die ebenfalls seit langer Zeit bekannten parallelen Multipuls-Strukturen spielen dagegen eine untergeordnete Rolle, obwohl sie grundsätzlich ausgezeichnete Eigenschaften aufweisen.

Wichtiger Vorteil dieser Gruppe: Fünfte und siebte Oberwelle (und mehrfache davon), die energiereichsten Störkomponenten des 6-Puls-Gleichrichters, sind am AC-Eingang nicht mehr vorhanden (Bild 3).

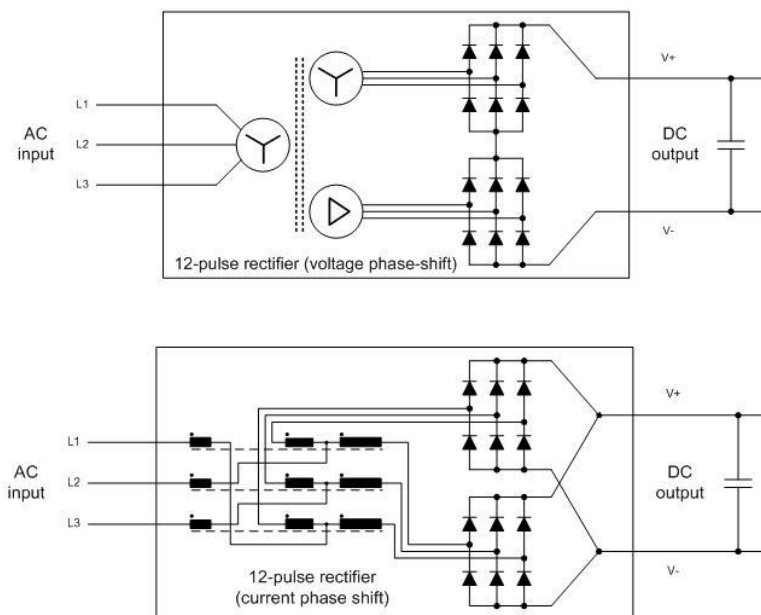


Bild 2: serielle (oben) und parallele Multipuls-Gleichrichterstruktur

Die Gruppe der Oberwellen-Dämpfungsfilter (mittlere Gruppe in Bild 1) verfolgt den Ansatz, Oberwellen nicht zu *vermeiden*, sondern *nur* zu *reduzieren*. Das bedeutet die Bereitstellung grosser Kompensationsenergien zur Erfüllung der Aufgabe, was sich bei den passiven

Lösungen in grossen Drosseln und Kondensatoren manifestiert. Aktive Filter sind mit entsprechend kostspieliger und verlustbehafteter Leistungselektronik ausgestattet.

Active Front-Ends (Bild 1 rechts) sind intensiv bearbeitete Technologien, welche äusserst kompakte Lösungen hervorbringen. Sie weisen zudem die bestechende Eigenschaft auf, dass Harmonische der Netzgrundwelle gar nicht erst erzeugt werden (Bild 3). Dafür erscheinen Taktfrequenzen im Störspektrum, was zu weiteren Filtermassnahmen führt. Active Front-Ends sind in Applikationen bis 10kW heute verbreitet im Einsatz. Gewichtige Nachteile in höheren Strombereichen sind deren Kosten, die Zuverlässigkeit sowie die deutlich niedrigere Effizienz verglichen mit passiven Technologien.

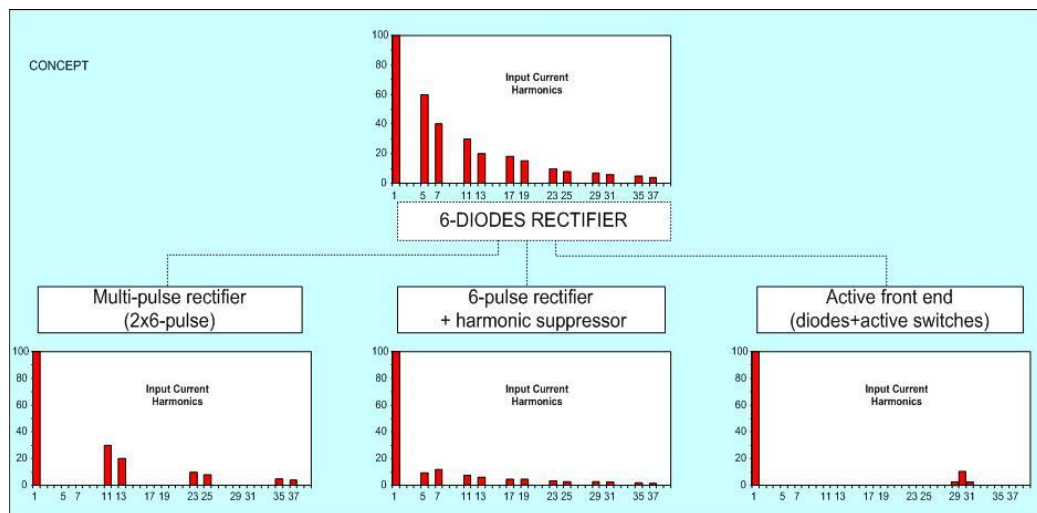


Bild 3: unterschiedliche (typische) Störspektren der gewählten Technologiestrukturierung

Weil die technologischen Grenzen von Oberwellen-Dämpfungselementen bekannt sind und zum Einsatz von Active Front-End Lösungen im Hochstrombereich gewichtige Hürden zu überwinden sind, wird eine vertiefte Betrachtung von Multipuls-Topologien im Hinblick auf die Projektziele sehr hohe Priorität erhalten.

## Nationale Zusammenarbeit

Das Institut Systèmes Industriels der HES-SO Valais, vertreten durch Prof. Hans-Peter Biner, hat grosse Erfahrung im Bereich der Active Front-Ends (leistungselektronische Schaltungstechniken im Umrichter-Eingangskreis). Die bewährten Produkte von Schaffner EMV sind im wesentlichen auf passive Technologien ausgelegt. Von der gemeinsamen Projektbearbeitung kann eine vor allem für das Hochstromsegment optimierte Technologie-selektion erwartet werden.

## Internationale Zusammenarbeit

Es besteht im Moment keine internationale Zusammenarbeit.

## Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Stossrichtung des Vorhabens stösst allgemein auf sehr grosses Interesse. Wichtige Quellen zum Themenbereich (IEEE Proceedings) sind identifiziert, ebenso werden die notwendigen Ressourcen der Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Erfolgversprechende Konzepte für das Hochstromsegment sind bis Ende Mai 2010 erarbeitet. Sie stellen, zusammen mit Marktanalysedaten, die deklarierten Projektergebnisse dar. Es ist geplant, danach umgehend in eine Prototyp- und Feldtestphase mit ausgewählten Partnern einzusteigen.

## Referenzen

- [1] D-A-CH-CZ: *Technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen*, 2007.
- [2] Johann W. Kolar et al.: *Comparative Evaluation of Three Phase High-Power-Factor AC-DC Converter Concepts ...*, aus IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 3, June 2005

## Anhang

-