



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 15. Juli 2010

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

Kofinanzierung:

-

Auftragnehmer:

Schaffner EMV AG
Nordstrasse 11
CH-4542 Luterbach
www.schaffner.com

HES-SO Wallis
Route du Rawyl 47
CH-1950 Sion 2
<http://www.hevs.ch>

Autoren:

Dr. Andrzej Pietkiewicz, Schaffner EMV AG, [andrzej.pietkiewicz @schaffner.com](mailto:andrzej.pietkiewicz@schaffner.com)
Prof. Hans-Peter Biner, HES-SO VS, hpeter.biner@hevs.ch
Stefan Melly, Schaffner EMV AG, stefan.melly@schaffner.com
Andrew Tucker, Schaffner EMV AG, andrew.tucker@schaffner.com
Norbert Häberle, Schaffner EMV AG, 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.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Resumé	4
Abstract	5
Ausgangslage	6
Umfeld.....	6
Nichtlineare Ströme im Niederspannungsbereich	6
Kompensationsmethoden für unerwünschte Stromkomponenten.....	7
Klassifizierung und Bewertung von Kompensationsmethoden	8
Ziel der Arbeit	10
Methode	10
Ergebnisse	11
State-of-the-Art Multipuls Front-Ends	11
State-of-the-Art Strom-Splitter-Multipuls-Gleichrichter	12
Neue Konzepte für Multipuls- Strom-Frontends	13
Designprozess	18
Prototypenbau und Applikationsmessungen	20
Größen- und Kostenvergleich	26
Diskussion	28
Energiesparpotenzial	28
Marktreiber.....	29
Schlussfolgerungen	31
Szenario zur Marktentwicklung.....	31
Industrialisierung der VCS-/VCM-Technologien.....	32
Referenzen	33

Zusammenfassung

Ein entscheidender Lösungsansatz zur Bekämpfung der drohenden Stromlücke liegt in der effizienteren Nutzung elektrischer Energie. Geräte der Leistungselektronik tragen dazu einen wesentlichen Teil bei. Um leistungselektronische Anlagen in der benötigten Menge zuverlässig am Netz zu betreiben, müssen unzulässige Netzrückwirkungen, wie Netzoberschwingungen, minimiert werden.

DC- und AC-Drosseln, Harmonische Filter und Spezialtransformatoren sind entweder begrenzt wirksam oder haben andere Nachteile. Neue passive Multipuls-Strom-Splitter sind kostengünstige, kompakte und hoch zuverlässige Oberwellen-Kompensationskonzepte für dreiphasige Lasten. Sie erfassen den Hauptharst der für die nichtlineare Strombelastung verantwortlichen Industrie- und Gebäude-Infrastrukturen.

Die geeignete Kopplung von Interphasen-Stromtransformatoren erlaubt eine starke Reduzierung des magnetischen Volumens und den Ersatz komplexer Schaltungen durch eine einzige Komponente. Neue magnetische Strukturen ermöglichen die Realisierung optimaler Lösungen für verschiedenste Anwendungsbereiche. Sie sind für Gleichrichter, bi-direktionale Systeme und Wechselrichter hervorragend geeignet. Die Konzepte wurden von Schaffner EMV AG zum Patent angemeldet.

Funktionsmuster für eine Nominal-Last von 4kW bewiesen im Labortest die herausragenden Eigenschaften von Multipuls-Strom-Splittern in Bezug auf Oberschwingungs-Kompensation und Robustheit gegen Spannungs-Asymmetrien. Im Vergleich zu aktiven Frontend-Lösungen sind die Zuverlässigkeit, die EMV und die tiefen Kosten der neuen Technologie hervorzuheben.

Resumé

L'exploitation plus efficace de l'énergie électrique est la solution déterminante pour prévenir la pénurie d'électricité. Les systèmes d'électronique de puissance y apportent une contribution essentielle. Il est indispensable de réduire les puissances non-linéaires introduites par des courants harmoniques à un minimum, afin de faire tourner les quantités demandées des systèmes d'électronique de puissance sans faute.

Les selfs antiharmoniques, filtres harmoniques et transformateurs spécifiques ont une efficacité limitée ou d'autres désavantages. Des nouveaux distributeurs de courant passifs pour redresseurs multi-impulsion représentent des concepts bon-marchés, compacts et extrêmement fiables pour charges triphasées. Ils couvrent la majorité des installations industrielles ou de bâtiments, responsables pour la charge du réseau électrique par des courants non-linéaires.

Le couplage approprié de transformateurs de courants inter-phases permet de réduire les volumes magnétiques massivement et de remplacer des circuits complexes par un seul composant. Des nouvelles structures magnétiques permettent de réaliser des solutions optimisées pour des applications très différentes. Ils sont parfaitement utilisable pour les redresseurs, dans des systèmes bi-directionnels et pour des convertisseurs DC/AC. Schaffner EMV AG a déposé des brevets pour ces concepts.

Des échantillons pour une charge nominale de 4kW ont démontré les qualités excellentes des distributeurs de courant passifs pour redresseurs multi-impulsion concernant la compensation d'harmoniques de courant et la robustesse vis-à-vis les asymétries de tension. La fiabilité, la CEM et les coûts faibles de cette nouvelle technologie sont à accentuer par rapport aux solutions front-end active.

Abstract

The efficient usage of electrical energy is the determining solution in order to avoid future electricity shortage problems. Power electronic systems deliver a major contribution to efficiency improvements. The required number of power electronic systems can only be installed, if the harmonic distortions, which are produced by these systems, can be minimised.

DC and AC chokes, harmonic filters and special transformers have either limited performance or suffer from other disadvantages. Novel passive multipulse current splitters are cost efficient, compact and highly reliable harmonics mitigation concepts for three-phase loads. They cover the majority of industrial and building installations, which are responsible for the non-sinusoidal current loading of the power grid.

The adequate coupling of interphase current transformers allows for a massive reduction of the magnetic volume as well as for the replacement of complex circuits by one single component. Optimum solutions for very different applications can be realised with novel magnetic structures. They are an excellent choice for rectifiers, bi-directional system front-ends as well as for DC/AC inverters. Schaffner EMV AG has applied patents for these concepts.

Functional prototypes for a nominal load of 4kW proved in laboratory tests the outstanding properties of multipulse current splitters with respect to harmonics cancellation and robustness against voltage asymmetry. Reliability, EMC and low cost have to be emphasized, when evaluating this technology versus active front-ends.

Ausgangslage

Umfeld

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. Gleichzeitig kann ein immer weiter steigender Stromverbrauch registriert werden, was die Wichtigkeit der Effizienzverbesserung der Verbraucher unterstreicht.

Der Einsatz moderner Motorensysteme führt zu unangenehmen Nebenerscheinungen: Nichtlineare Ströme und höherfrequente Störungen müssen durch Netz- und lastseitige Entstörmaßnahmen minimiert werden, um empfindliche Netzteilnehmer, wie Telefonzentralen, Computer, Roboter, Medizintechnik, Audioanlagen etc. vor Fehlfunktion oder gar Totalausfall zu schützen.

Nichtlineare Ströme im Niederspannungsbereich

Die 50Hz-Blindstrombelastung sowie die höherfrequenten nichtlinearen Stromkomponenten, welche durch Lasten mit reaktiven Komponenten, asymmetrische Lasten und durch elektronische Stromwandler verursacht werden, sind ein bekanntes Phänomen. Um der Durchsetzung von Vermeidungsmassnahmen eine Grundlage zu geben, existieren geeignete Standards und Normenwerke^{[7] ... [10]}.

Einige Probleme, welche durch unerwünschte Stromkomponenten verursacht werden:

- Die geforderte Qualität der von den Anbietern zur Verfügung zu stellenden Netzspannung wird beeinträchtigt. Die Versorgungsqualität für elektronische Anlagen ist ev. nicht mehr erfüllt.
- Die Niederspannungsinfrastrukturen (Kabel, Verteiler, Sicherungen, Schalter) 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 vereinfachte Betrachtung für einen Dreiphasen-Gleichrichter (Frontend) ohne sowie mit optimaler Kompensation der Nichtlinearität zeigt einen Infrastrukturbedarf gemäss Tab. 1.

	Leiter-Querschnitt	Stromwert für Sicherungen, Schalter etc.	am Umspanntrafo betreibbare Wirklast
Gleichrichter ohne Filter	100%	100%	100%
Gleichrichter mit Filter	60%	65%	200%

Tabelle 1 Infrastruktur-Bedarf für Frontends ohne und mit Oberwellen-Filter

Diese Zahlen deuten an, dass eine optimale Kompensation der Nichtlinearitäten eine um bis zu 100% höhere Auslastung der Infrastruktur zulassen würde. 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 erwähnten Netzrückwirkungen mittelfristig drastisch verschärft wird. Es ist deshalb nachvollziehbar, dass die Netzbetreiber in Zukunft viel stärker auf die Durchsetzung der einschlägigen Standards

pochen wollen, mit Strafkatalogen, die bis hin zur Abschaltung des uneinsichtigen Netzverschmutzers reichen.

Kompensationsmethoden für unerwünschte Stromkomponenten

Die Phasenverschiebung von Strömen der Grundwelle, verursacht durch reaktive Lastkomponenten, wird seit langem durch passive Phasenschieber kompensiert. Diese Methode ist bewährt und steht hier nicht zur Debatte. Allerdings dürfte der Bedarf an solchen Einrichtungen sinken, wenn vermehrt elektronisch gesteuerte Lasten alte, direkt am Netz betriebene Motoren ersetzen. Ebenso stellen Hochfrequenz-EMV-Filter eine bewährte Technologie dar, welche hier nicht weiter behandelt wird.

Die in diesem Projekt betrachtete Problematik auf der Netzseite liegt bei harmonischen Frequenzen der Grundschwingung, welche durch die Leistungsgleichrichter der elektronischen Lasten erzeugt werden. Die heute gebräuchlichsten Mittel zur Reduktion dieser Strom-Oberwellen sind Längsdrosseln sowie aktive und passive Harmonische Filter (HF). Im Bereich von Lasten bis etwa 30kW gelingt es, dank ausgeklügelter elektronischer Schaltungstechnik des Frequenzumrichters die nichtlineare Netzbelastrung an der Quelle zu minimieren (zB. Arbeiten von Kolar, ETHZ). Hier spricht man von Active Frontends.

Eine Gegenüberstellung der Methoden für Lasten ab ca. 10kW (Drive-externe Lösungen) stellt Tabelle 2 dar.

	Ohne Filter	Längsdrossel	passives HF	aktives HF
Harmonische Strom-Verzerrungen (THDI)	>90%	35-40%	<5%	<5%
Bewertung aus Sicht des Systembauers (betrachtet die Entstörungskomponente als notwendiges Übel)	keine THDI-Dämpfung	kostengünstig, kompakt, ungenügende THDI-Dämpfung	sehr gute Filtereigenschaften, voluminös und teuer im Vergleich zum Drive, hoher kapazitiver Strom bei tiefer Last	sehr gute Filtereigenschaften, sehr geeignet auch für nichtharmonische und asymmetrische Ströme, voluminös und sehr teuer im Vergleich zur Motorsteuerung

Tabelle 2 Oberwellen-Dämpfungsmethoden für höhere Lasten

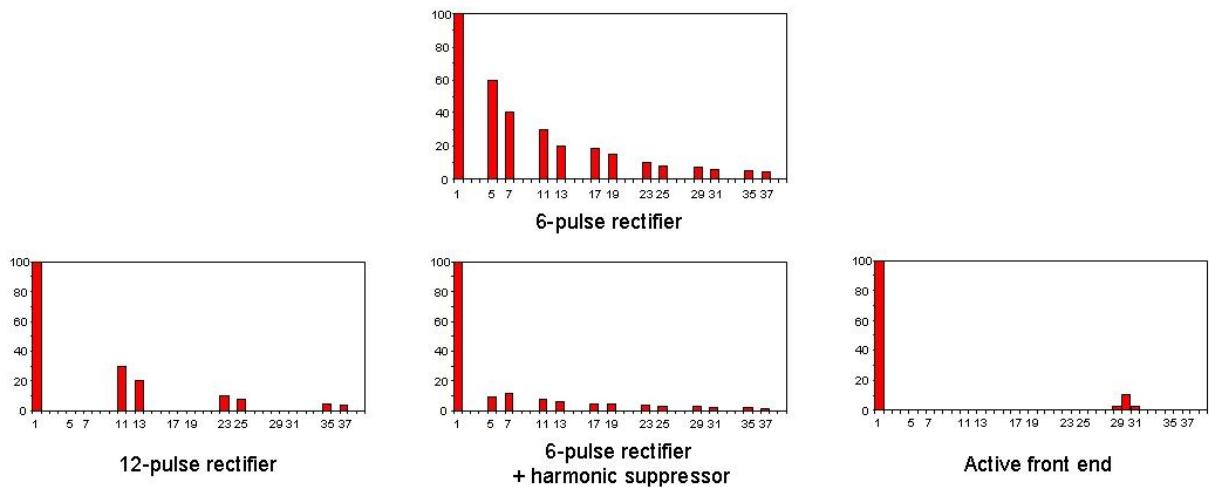
Diese stark vereinfachte Charakterisierung soll aufzeigen, dass dem Einsatz moderner, energieeffizienter Motorensysteme eine bezüglich Kosten und Volumen unbefriedigende Kompensationstechnologie gegenübersteht. Der hohe Investitionsaufwand für die ausreichende Korrektur der eingehandelten nichtlinearen Verzerrungen (im Vergleich zum eigentlichen Kernobjekt der Effizienzmassnahme, der Motorsteuerung) ist einer zügigen Einführung solcher Systeme nicht förderlich: Der Energiekonsument, welcher in diese teuren und voluminösen Komponenten investieren muss, wird dies wenn immer möglich vermeiden, resp. solange hinauszögern, bis ihm der Netzbetreiber keine Wahl mehr lässt oder seine Infrastruktur die Verschlechterung der Netzqualität nicht mehr zulässt.

Eine weitere, gut etablierte Technologie sind Multipuls-Transformatoren, welche bei sehr grossen Lasten (typischerweise über 30kW) zum Einsatz kommen. Diese Komponenten weisen eine sehr hohe Lebensdauer auf, sind allerdings äusserst voluminös und kostspielig.

Klassifizierung und Bewertung von Kompensationsmethoden

Um eine systematische Konzeptevaluation für dreiphasige low Harmonics Gleichrichter durchführen zu können, wurden die technologischen Lösungsansätze gemäss Figur 1 strukturiert. Die Darstellung zeigt oben das ungefilterte Stromspektrum eines 6-Puls-Gleichrichters, darunter die typischen Störspektren des Stromes, wie er vom Versorgungsnetz bezogen wird, je nachdem, welche Technologie zur Reduzierung der Oberwellen verwendet wird:

- Der Multipuls-Gleichrichter **vermeidet** einige Harmonische (Darstellung: 12-Puls-Gleichrichtung eliminiert die 5.+7., 17.+19., 29.+31., etc).
- **Passive** Harmonische Filter **dämpfen** das Spektrum der Harmonischen, **aktive** Harmonische Filter **kompensieren** das Spektrum.
- Das Aktiv-Frontend erzeugt keine Harmonische der Grundschwingung, dafür entsteht ein **Schalttakt**-Störspektrum.

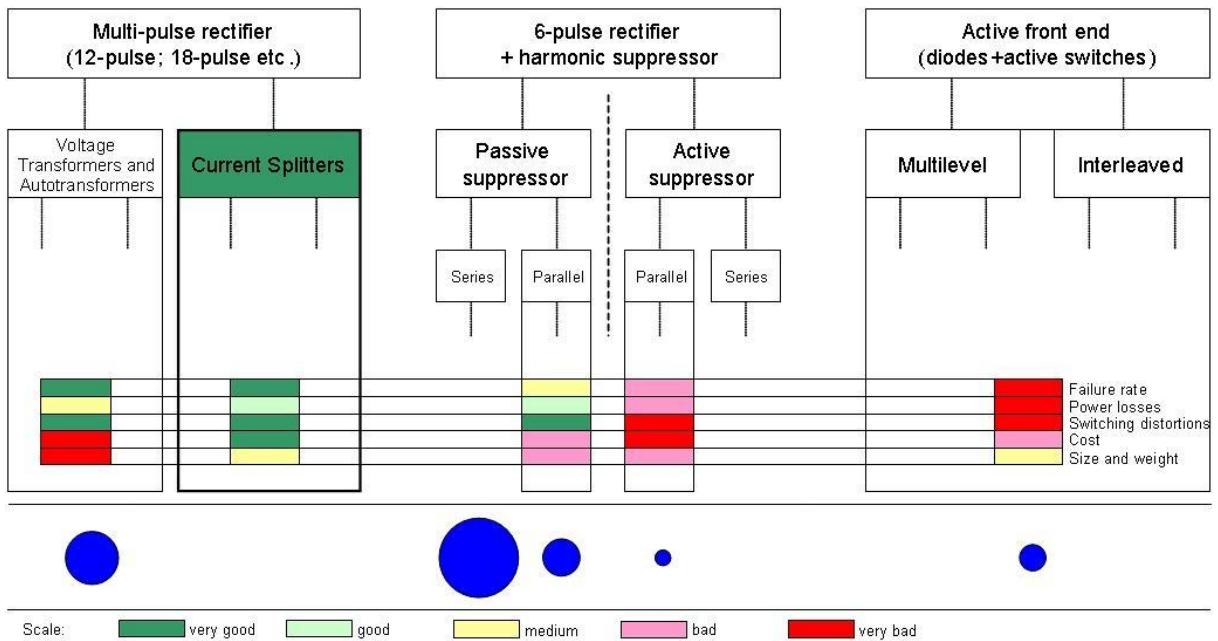


Figur 1: Klassifizierung von Frontend-Topologien mit typischen Störspektren (Strom-Oberwellen)

Zur genaueren Bewertung werden die Multipuls-Gleichrichter in **Spannungstransformatoren** und **Strom-Splitter** sowie die Harmonischen Filter in **Passive** und **Aktive Filter** aufgeteilt. Aktiv-Frontends der Multilevel- und Interleaved-Kategorie werden hier nicht getrennt behandelt, weil die grundsätzlichen Eigenschaften, welche im folgenden bewertet werden, ähnlich sind.

Eine vergleichende Bewertung bezüglich Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Verluste, Schaltstörungen, Kosten, Grösse und Gewicht kann gemäss Figur 2 gemacht werden. Die Skala wird der Einfachheit halber auf fünf Stufen begrenzt (sehr gut, gut, mittel, schlecht, sehr schlecht).

Welche Technologien sind wie stark verbreitet? Diese Information ist zur Beurteilung des Verbesserungspotenzials interessant. Allerdings sind genaue Zahlen kaum erhältlich, weshalb sich eine Schaffner-interne Expertenrunde auf einen qualitativen Vergleich einigte. Die Grösse der Kreisflächen unterhalb der Frontend-Topologien in Figur 2 klassiert deren Einsatzvolumina ganz grob. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die grösste Gruppe, die seriellen passiven Dämpfungselemente (AC Line Chokes), in aller Regel ungenügende Unterdrückungseigenschaften für Oberwellen aufweisen und somit als Norm-erfüllende Lösungsvariante meist nicht in Frage kommen.



Figur 2: Bewertung der Frontend-Topologien bezüglich Zuverlässigkeit, Verlusten, Schaltstörern, Kosten, Grösse und Gewicht; blaue Kreise: geschätztes relatives Anwendungsvolumen

In Figur 2 fällt unmittelbar auf, dass die Klasse der Strom-Splitter die deutlich beste Bewertung bezüglich der ausgewählten Kriterien erhält, aber in der industriellen Anwendung erstaunlicherweise praktisch inexistent ist. Erklärungen für dieses Phänomen:

- Die Entwicklung von Strom-Splitter-Multipuls-Systemen verlangt sehr gutes Wissen über magnetische Technologien.
- Vor über 20 Jahren begann die Leistungselektronik dank technologischer Fortschritte massiv an Bedeutung zu gewinnen. Die akademische und industrielle Forschergemeinde konzentrierte sich grossmehrheitlich auf Aktiv-Frontend-Ansätze.
- Es war und ist ausnehmend schwierig, Studenten für klassische Gebiete der analogen, passiven Schaltungstechnik zu begeistern. Dies gilt in besonderem Masse für elektromagnetische Disziplinen. Entsprechend dünn gesät sind Publikationen zu diesem Thema, geschweige denn Anwendungen in der industriellen Praxis.

Die nüchterne Folgerung: Die Klasse der Strom-Splitter-Multipuls-Gleichrichter ging schlichtweg vergessen, abgesehen von wenigen bearbeiteten Anwendungen. Diese offensichtliche Lösungsnische galt es intensiv zu untersuchen.

Ziel der Arbeit

Das beste Rezept zur Eindämmung harmonischer Netzbelastungen heisst, das Übel an der Wurzel zu packen. Dieses Thema wird für kleinere Lasten mittels Aktiv-Frontend Technologien intensiv bearbeitet. Solche Lösungen zeigen allerdings Schwächen bezüglich Zuverlässigkeit, EMV und Wirkungsgrad.

Die Entwicklung von kostengünstigen und kompakten Kompensationsmassnahmen für den Leistungsbereich bis 1000kW ist eine Grundlagenarbeit, welche nötig ist, um den Hauptharst der Industrie- und Gebäude-Infrastrukturen zu erfassen, welche für die nichtlineare Strombelastung verantwortlich sind.

Ziel dieses Projekts war die Definition neuer Oberwellendämpfungs-Konzepte in vorwiegend passiver Schaltungstechnik ohne die Nachteile von Aktiv-Frontends bezüglich Zuverlässigkeit, Effizienz und Kosten und stark reduzierten Volumina und Kosten bezüglich aktueller passiver Lösungen. Insbesondere bot sich an, das Potenzial der Klasse der Strom-Splitter-Multipuls-Gleichrichter zu untersuchen.

Methode

Vorgehensplan:

- Analyse wissenschaftlicher Arbeiten und Patentschriften zu Gleichrichtern mit magnetischen Komponenten zur Oberwellendämpfung; insbesondere Multipuls-Konzepte.
- Definition von Strom-Splitter-Lösungskonzepten für dreiphasige Frontends, welche die Nachteile heutiger Kompensationstechnologien minimieren.
- Studium der Anforderungen an magnetische Komponenten für neue Strom-Splitter-Konzepte, sowie Bewertung bezüglich Kosten und Reproduzierbarkeit.
- Bau von Prototypen und Validierung in ausgewählten Applikationen.
- Identifikation dreiphasiger Hochstrom-Anlagentypen, welche die grössten Verursachergruppen nichtlinearer Stromverzerrungen darstellen und Beurteilung der industriellen Verwertbarkeit der Erkenntnisse, gegebenenfalls Schutz von Erfindungen.

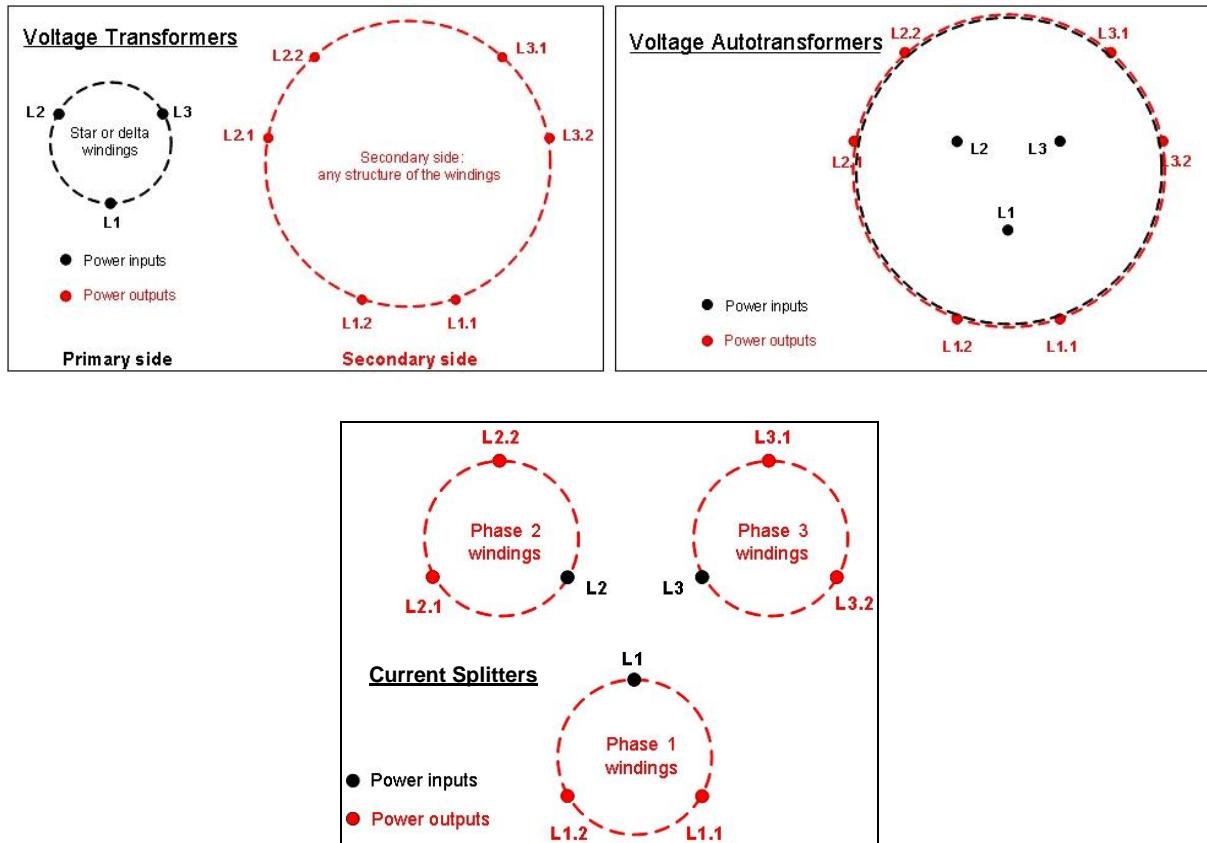
Die Arbeiten wurden im wesentlichen durch Schaffner EMV AG durchgeführt, basierend auf langjähriger Marktkenntnis und Expertenwissen bezüglich Design und Produktion magnetischer Komponenten. Das Wissen um Trends und Technologien im Bereich aktiver Frontends wurde durch Prof. Hans-Peter Biner, Fachhochschule Wallis, exzellent vertreten. Dort wurden zudem die Prototypen diversen Applikationstests unterzogen und kritisch bewertet.

Ergebnisse

State-of-the-Art Multipuls Front-Ends

Um die fundamentalen Unterschiede zwischen den beiden Hauptklassen der Multipuls-Front-Ends, den Spannungs-Transformatoren und den Strom-Splittern zu verdeutlichen, können die galvanischen Kopplungen der Ein- und Ausgangsphasen gegenübergestellt werden (Figure 3, Beispiel 12-Puls-Gleichrichter):

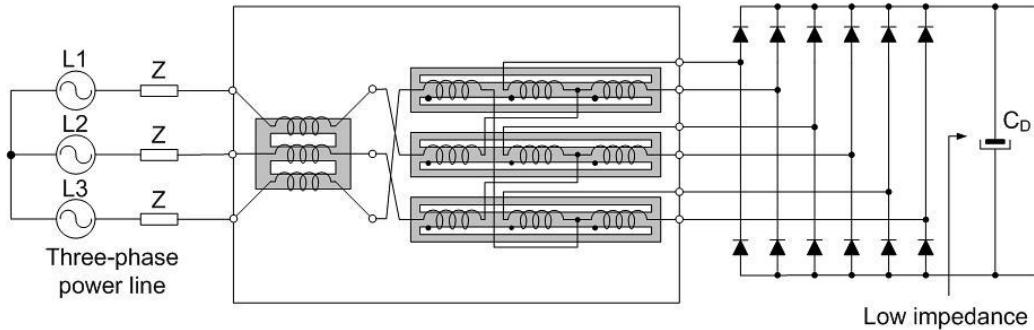
- Spannungs-Transformatoren: galvanisch gekoppelte Eingänge (schwarze Punkte), galvanisch gekoppelte Ausgänge (rote Punkte).
- Spar- oder Autotransformatoren: Ein- und Ausgänge sind galvanisch gekoppelt.
- Strom-Splitter: drei galvanisch gekoppelte Gruppen, die je aus einem Eingang und zwei Ausgängen bestehen. Der Eingangstrom jeder Gruppe entspricht somit der Summe der Ausgangsströme. Zwischen den Gruppen kann Strom nur unter Einbezug der 3-Phasen-Quelle und der 6-Phasen-Last fliessen.



Figur 3 Fundamentale Unterschiede zwischen den galvanischen Kopplungen bei Spannungs-Transformatoren (oben) und Strom-Splittern (unten).

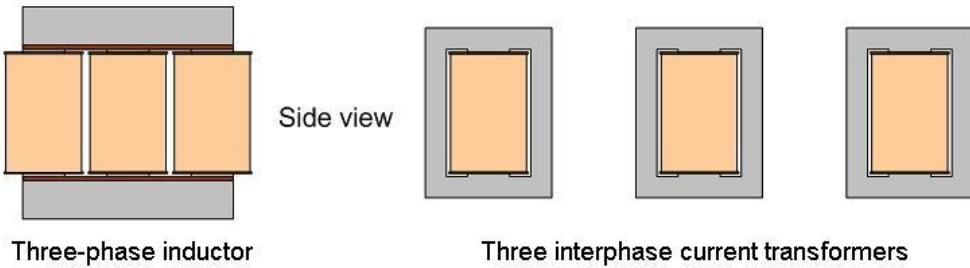
State-of-the-Art Strom-Splitter-Multipuls-Gleichrichter

Die Klasse der **Strom-Splitter-Multipuls-Gleichrichter** findet sich nur ganz vereinzelt in industriellen Dokumenten [28]...[31]. Diese sowie wissenschaftliche Arbeiten [14]...[27] und Patentschriften [3]...[6] stellen typischerweise die in Figur 4 beschriebene Struktur dar.



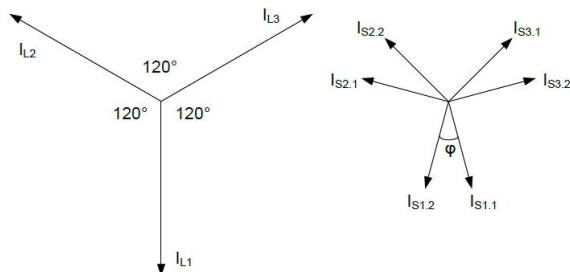
Figur 4 12-Puls-Gleichrichter mit Interphasen-Strom-Transformatoren zur Oberwellen-Auslösung.

Sie verwendet eine dreiphasige Drossel sowie drei Interphasen-Strom-Transformatoren in einer Anordnung als **Induktiver Splitter**. Man findet auch Anwendungen, wo keine dreiphasige netzseitige Drossel eingesetzt wird – diese werden **Nicht-Induktive Splitter** genannt. Figur 5 stellt typische Realisierungen dieser Komponenten dar.



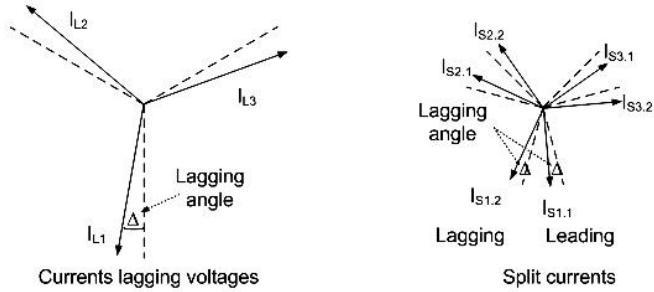
Figur 5 Typische Realisierung der Schaltung aus Figur 4 mit einer Dreiphasen-Drossel und drei einzelnen Interphasen-Strom-Transformatoren.

Die Aufgabe der miteinander verschalteten Interphasen- Strom-Transformatoren ist die Auf trennung der drei um 120° verschobenen Eingangsströme I_{Li} in sechs je paarweise um typischerweise 30° (φ) verschobene Ausgangsströme $I_{Si,1}$ und $I_{Si,2}$, darstellbar als Zeigerdiagramm (Figur 6).



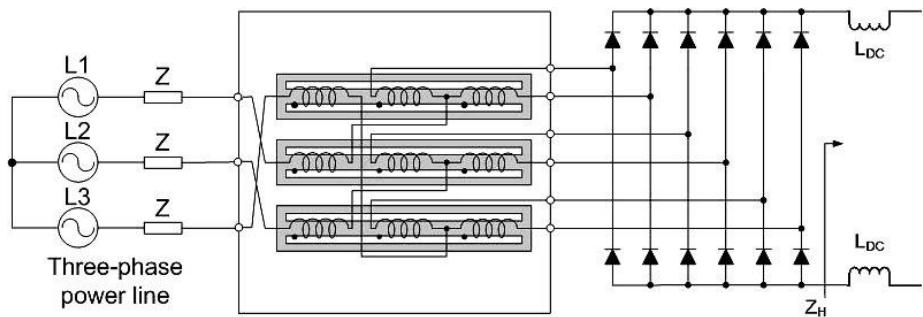
Figur 6 Links Zeigerdiagramm der um 120° verschobenen Eingangsströme, rechts die sechs Ausgangsströme, paarweise um φ (30°) verschoben.

Die Summe der Ausgangsströme entspricht dabei dem Eingangsstrom ($I_{Si,1} + I_{Si,2} = I_{Li}$). Wenn zusätzlich eine AC-Drossel zum Einsatz gelangt, stellen sich die Stromzeiger mit einer entsprechenden Phasenverschiebung zur Spannung dar (Inductive Splitter, Figur 7).



Figur 7 Zeigerdiagramme eines induktiven Strom-Splitters, links Eingang, rechts Ausgang.
 Δ = Phasenverzögerung des Stromes gegenüber der Spannung.

Induktive Splitter arbeiten mit DC-Links, die nieder- oder hochohmig sind. Im Gegensatz dazu benötigen nicht-induktive Splitter einen Konstantstrom-DC-Link, zum Beispiel durch Verwendung einer DC-Link-Drossel (Figur 8, L_{DC}). Beide Anordnungen stellen sicher, dass der Gleichrichterstrom zwischen den Schaltzyklen der Dioden nie Null wird (Continuous Conduction Mode, CCM).



Figur 8 12-Puls-Gleichrichter mit nicht-induktivem Splitter und DC-Link-Drossel.

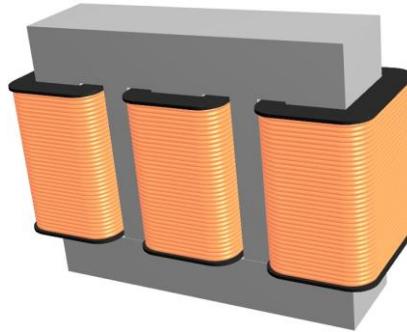
Nachteile der beschriebenen Applikationen:

- Der Continuous Conduction Mode benötigt vier Induktivitäten.
- Die Topologien sind nicht geeignet, um **Windungszahlen** und **Kernvolumen** zu minimieren, was sich in relativ hohen Kosten niederschlägt.

Neue Konzepte für Multipuls- Strom-Frontends

Ein innovativer Ansatz für einen Multipuls-Strom-Splitter musste zum Ziel haben, sowohl Materialkosten wie Komponentenzahl zu reduzieren. Die Integration aller Interphasen-Strom-Transformatoren auf einem einzigen Kern erwies sich als richtungweisender Lösungsansatz. Sämtliche magnetischen Pfade sollten dabei voll ausgebildet sein (keine Luftspalte).

Die geometrisch, resp. herstelltechnisch einfachste Form ist in Figur 9 dargestellt. Sie kann aus E- und I-Blechen zusammengesetzt werden. Die E-Bleche haben dabei fünf Finger, mit Finger 2 und 4 halb so breit wie die drei Finger, welche durch die Spulenkörper führen. Diese maximale Integration reduziert den Bedarf an Kernmaterial deutlich. Gleichzeitig können die Windungszahlen und -anordnungen optimiert, sprich reduziert werden.



Figur 9 Non-Inductive Splitter als Einzelkomponente.

Impliziert werden diese Verbesserungen durch die Auslöschung der Grundwelle des magnetischen Flusses dank der Nutzung eines gemeinsamen Kerns für alle Phasenströme. Der magnetische Fluss in den nicht bewickelten Kern-Fingern enthält nur Harmonische (Triplets) der Grundwelle.

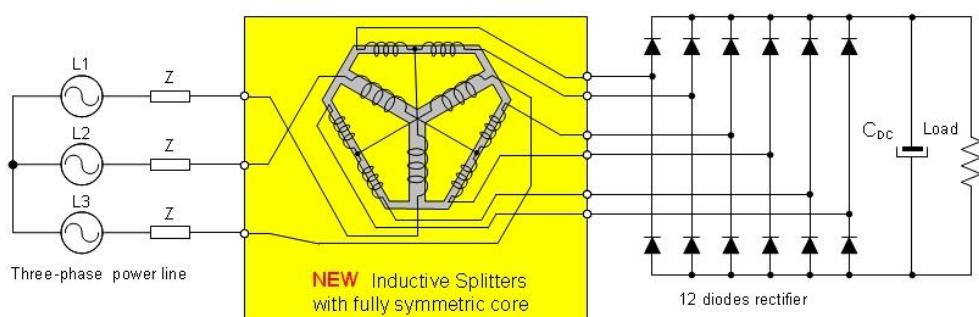
Figur 10 stellt mögliche **vollsymmetrische** Formen des selben Prinzips dar. Sie sind allerdings weniger einfach in der Herstellung.



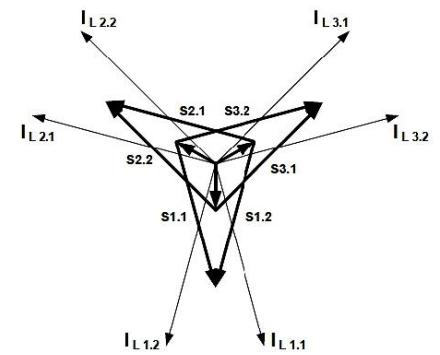
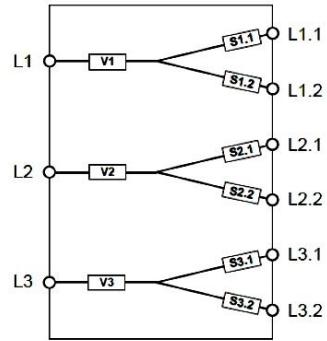
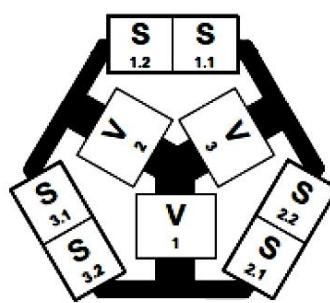
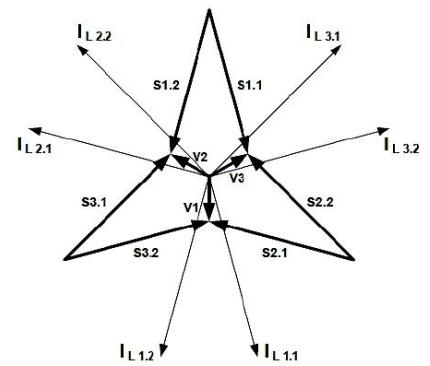
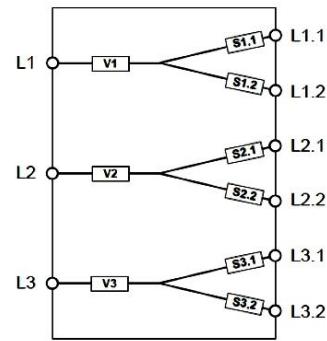
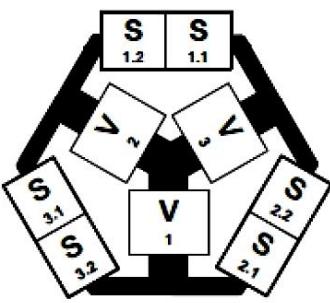
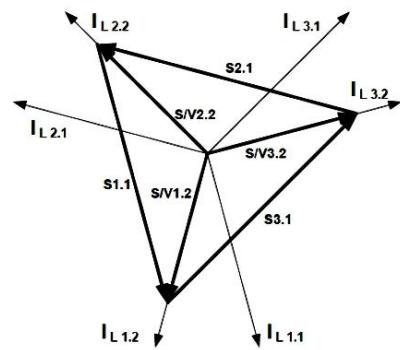
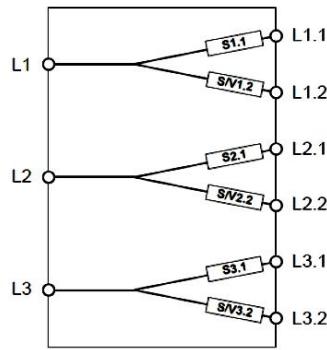
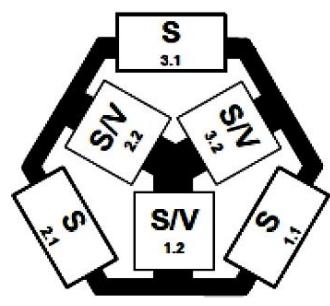
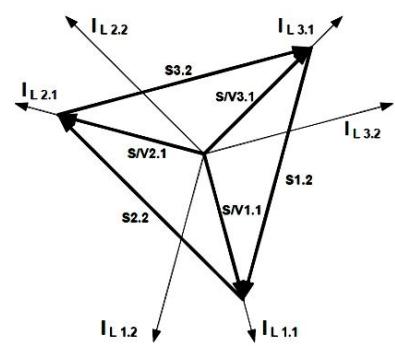
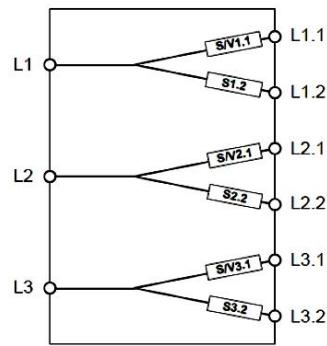
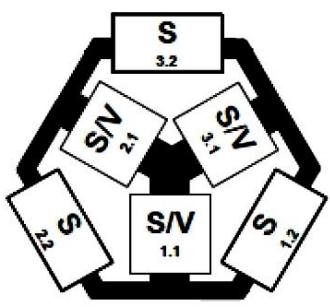
Figur 10 Neue vollsymmetrische Formen für Multipuls-Strom-Splitter.

Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts wurden eine ganze Reihe möglicher Schaltungen und Windungsdimensionierungen dieser neuen magnetischen Formen untersucht und zum Patent angemeldet [1], [2].

Die Schaltung in Figur 11 kann mittels diverser unterschiedlicher Wicklungszahlen und Windungsverhältnisse realisiert werden. Die Vektordarstellung der **magnetischen Spannungen** (magnetische Durchflutung, **magneto-motive force**) in den Komponenten stellt deren Funktionsprinzip dar (Figur 12).

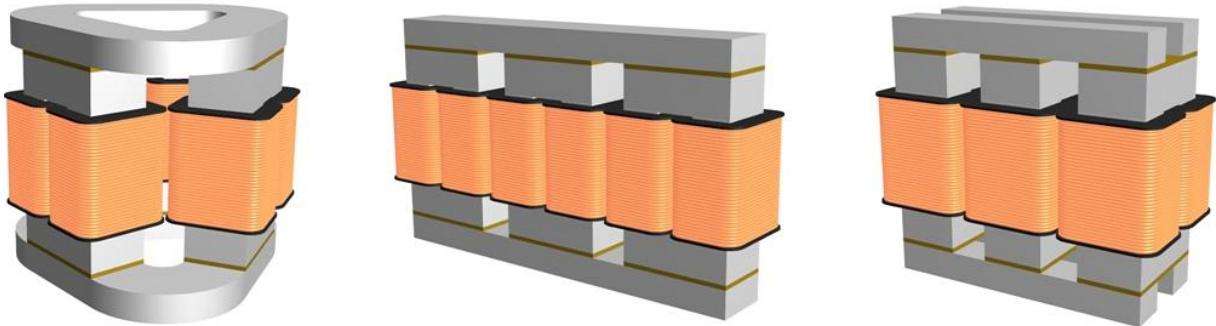


Figur 11 Schaltungsanordnung mit vollsymmetrischem induktivem Strom-Splitter.



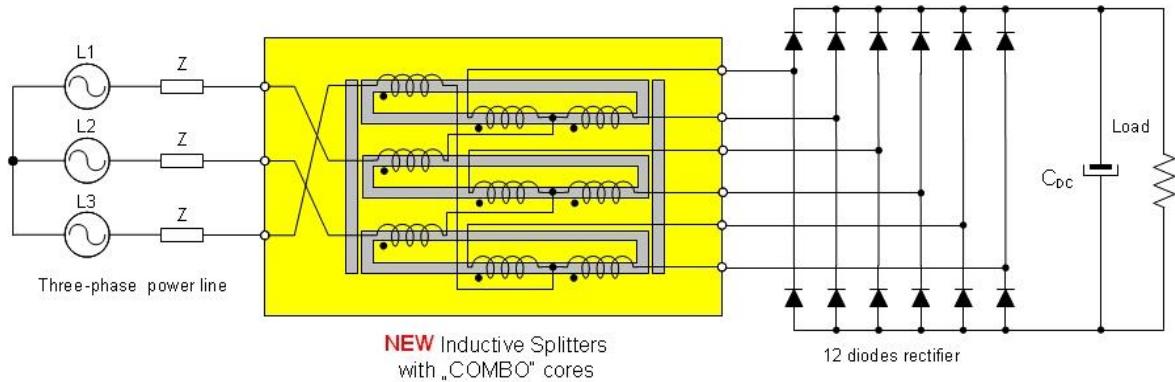
Figur 12 Wicklungsanordnung auf dem Kern (links), Verdrahtungsschema (Mitte), Magnetische Spannungs-Vektoren (rechts) – vier verschiedene Lösungsvarianten.

Induktive Strom-Splitter können auch durch Kopplung von Interphasen-Strom-Transformatoren zur Energiespeicherung via Lufspalt realisiert werden. Figur 13 visualisiert solche Konzepte, sogenannte **Combo Cores**.



Figur 13 Neue integrierte induktive Multipuls-Strom-Splitter (Combo Cores).

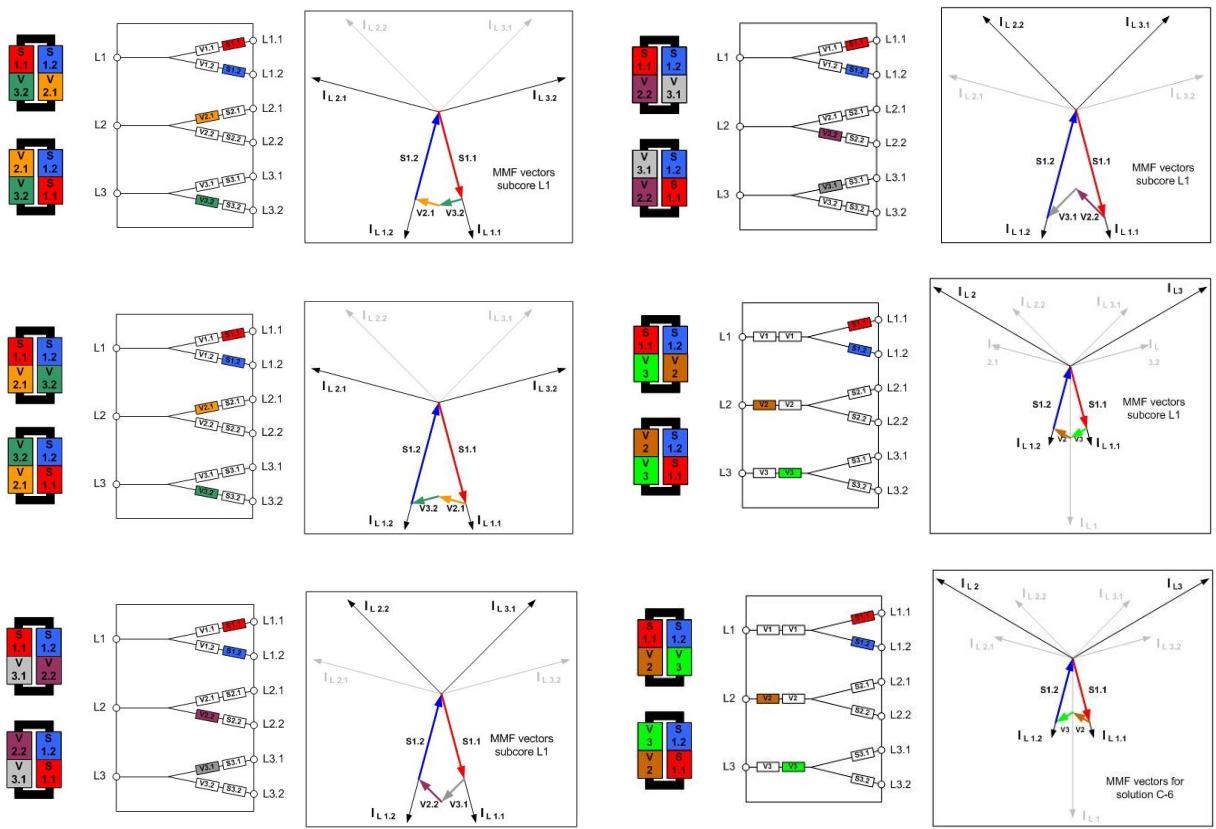
Diese Strukturen nutzen eine Kopplung von Interphasen-Strom-Transformatoren zur Energiespeicherung via Lufspalt und erzielen die gleiche Wirkung wie eine zusätzliche Dreiphasen-Drossel.



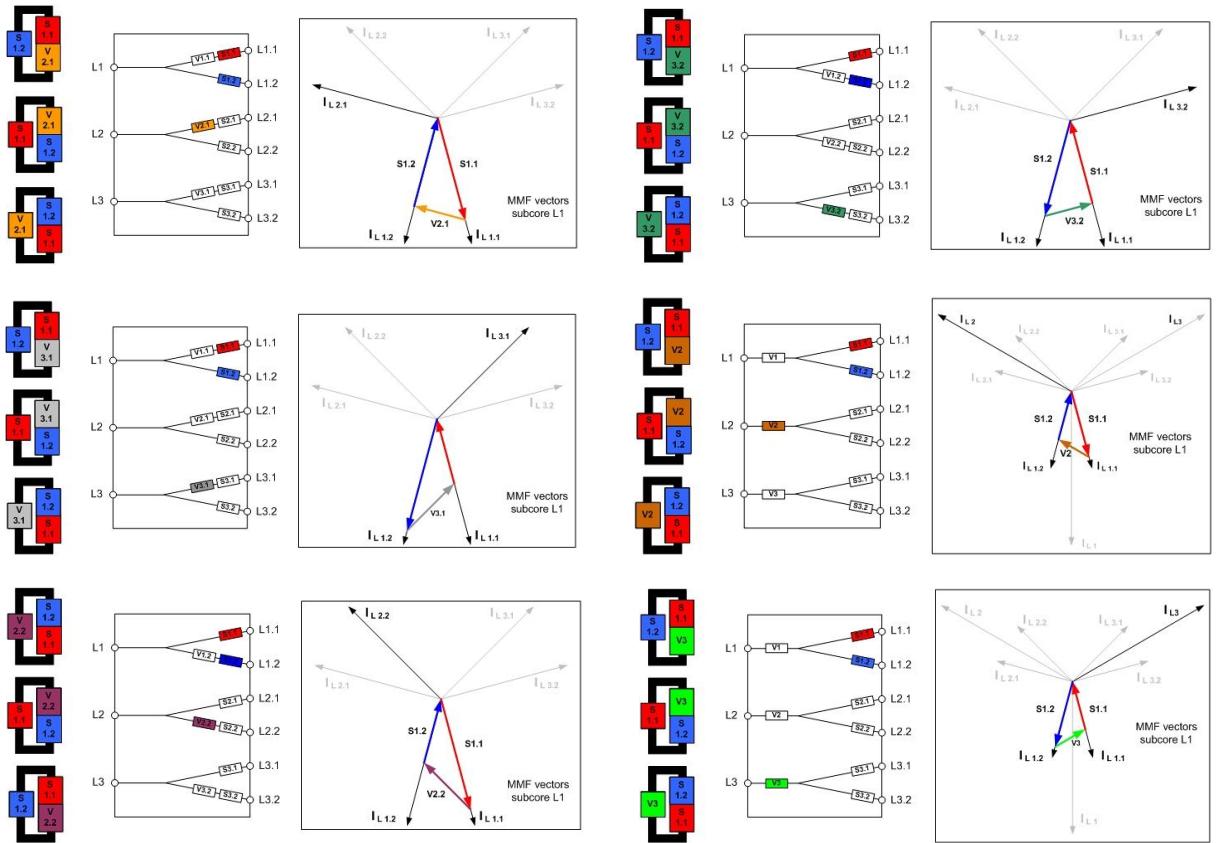
Figur 14 Applikation für integrierten induktiven Multipuls-Strom-Splitter im 12-Puls-Gleichrichter.

Als typische Anwendung stellt Figur 14 einen 12-Puls-Gleichrichter dar, welcher mit nur einer Komponente und reduziertem Materialaufwand auskommt.

Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit betraf die systematische Erfassung der möglichen Schaltungsanordnungen, welche diesem integrierten Ansatz genügen. Figur 15 für Schaltungen mit 12 Wicklungen und Figur 16 für Schaltungen mit 9 Wicklungen zeigen mögliche Varianten auf.

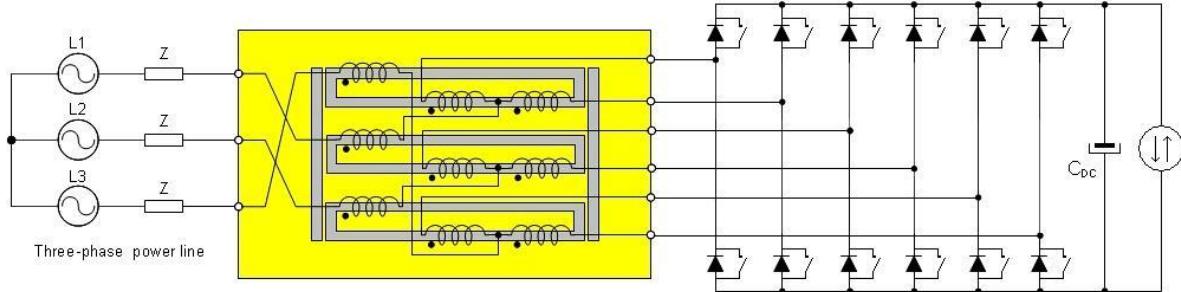


Figur 15 12-Wicklungs-Schaltungen und MMF Vektoren.



Figur 16 9-Wicklungs-Schaltungen und MMF Vektoren.

Ein hochinteressanter Anwendungsbereich für Multipuls-Strom-Splitter sind bi-direktionale Front-Ends oder auch reine DC/AC-Wandler. Im letzteren Fall spricht man konsequenterweise von einem **Strom-Merger**. Das Schema in Figur 17 zeigt dessen prinzipielle Beschaltung, wobei die magnetische Komponente genau gleich wie in obigen Beispielen beschaltet wird.



Figur 17 Bi-direktionales Front-End.

Einzig die Gleichrichterdioden müssen durch bi-direktionale Schaltelemente ersetzt werden und benötigen eine geeignete Steuerelektronik. Anwendungen sind unter anderem regenerative Umrichter, Energiespeicher (Batterie-Puffer), Solar-Wechselrichter. Diese Topologien sind ebenfalls Bestandteil der Patentanmeldungen [1], [2].

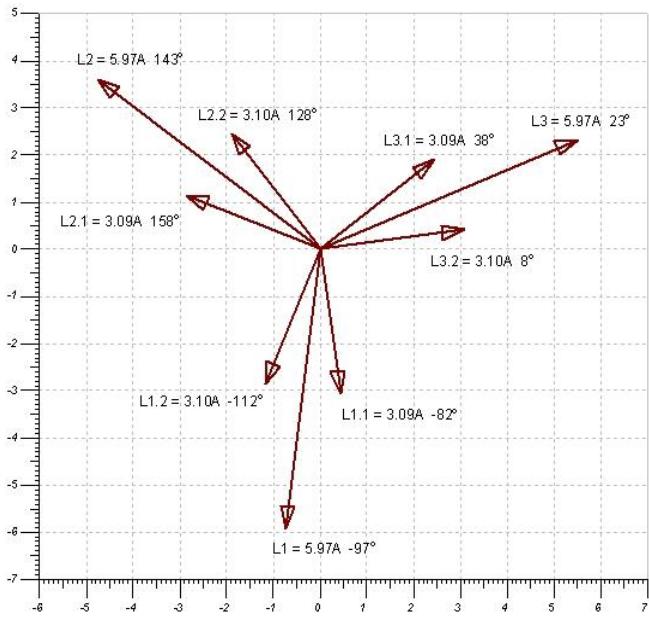
Designprozess

Im Folgenden soll das Vorgehen bei der Berechnung von Multipuls-Strom-Splittern kurz dargestellt werden. Der Designprozess ist mathematisch/physikalisch exakt und wird im Anschluss an dieses Projekt in geeigneter Form weitgehend automatisiert, um für die tägliche Anwendungspraxis eine optimale Effizienz und Entwurfssicherheit zu erreichen.

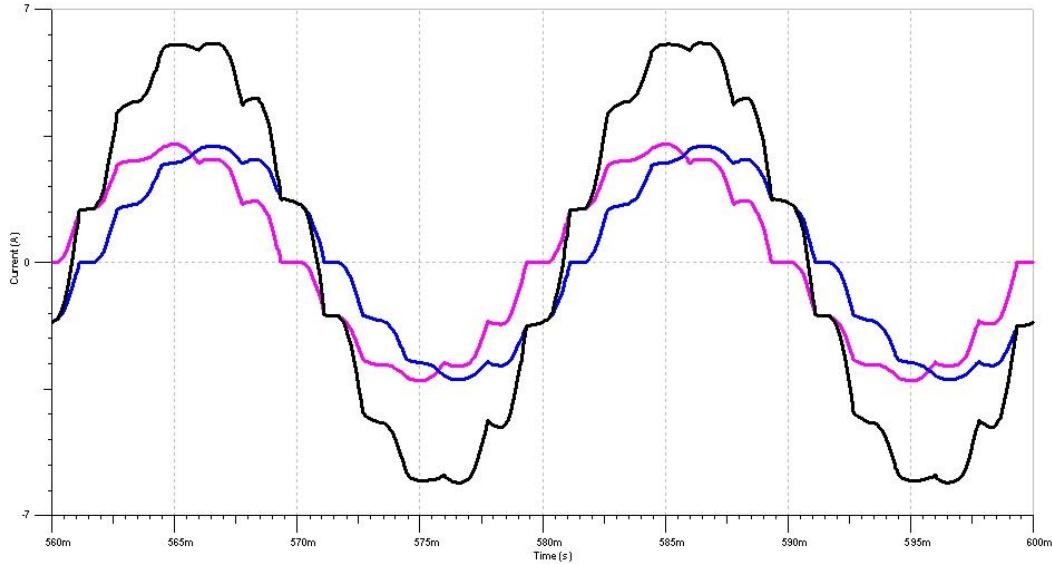
Wichtigste Design-Schritte:

- Spezifikation des Front-Ends (Spannung, Strom, DC-Link-Schaltung, Toleranzen etc.)
- Auswahl der Lösungsvariante
- Kern- und Windungs-Design:
 - Geometrische Berechnungen
 - Flux-Berechnungen
 - Thermische Berechnungen (Kern-, Kupferverluste)
 - Verhältnisberechnung der MMF (magneto-motive force) Vektoren
 - Berechnung der Windungszahlen
 - Windungszahl-Korrekturen (für reale Reluktanzen)
- Erstellung des Reluktanz- und elektrischen Modells
- Simulation des VCS mit linearer Last (resistiv)
- Simulation des VCS mit nichtlinearer Last (12-Puls Gleichrichter)

Die Figuren 18 und 19 zeigen Simulationsresultate: eine vektorielle Darstellung für eine resistive Last sowie ein Zeitdiagramm der Ein- und Ausgangsströme eines 12-Puls-Gleichrichters.



Figur 18 Simulation: Vektordarstellung der Ein- und Ausgangsströme eines induktiven Strom-Splitters mit ohmscher Last.



Figur 19 Simulation: Zeitdiagramm eines induktiven Splitters mit nichtlinearer Last (B12 Gleichrichter). Schwarz: Eingangsstrom, Lila, Blau: Ausgangsströme der selben Phase

Die so überprüfte Komponentenberechnung mittels eines handelsüblichen SPICE-Simulators unter Verwendung eines Mixed-Mode Modells (elektrische und magnetische Ebene) für die VCS-Komponente erlaubt in der Folge den exakten Prototypenbau.

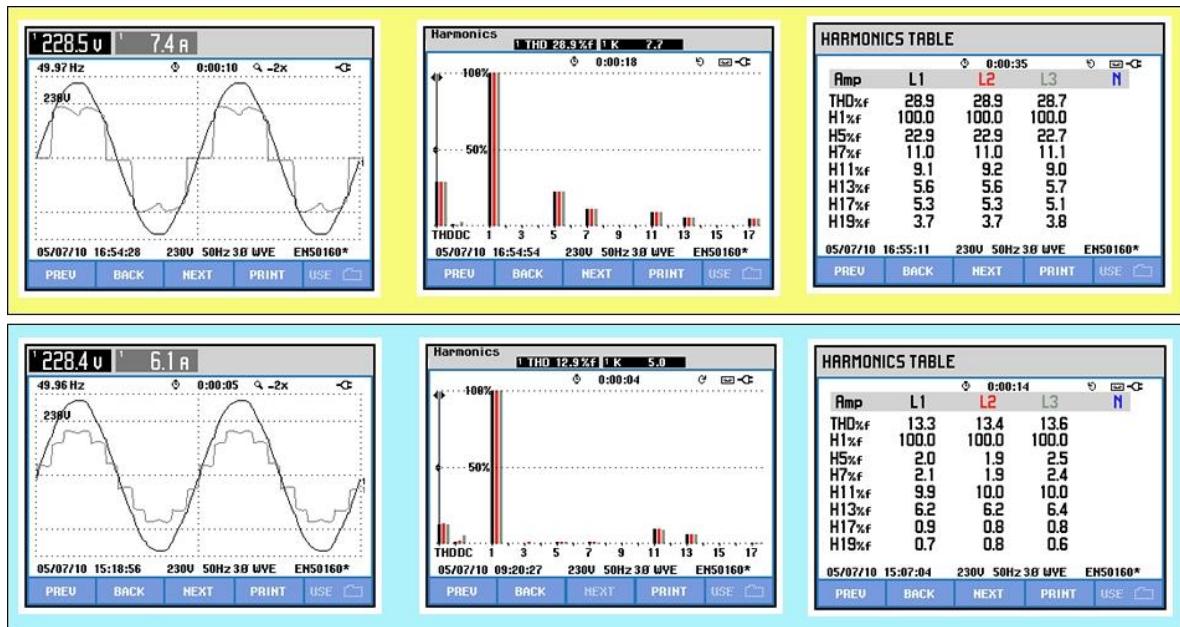
Prototypenbau und Applikationsmessungen

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden Funktionsmuster für eine Nominal-Last von 4kW (400VAC) berechnet und gebaut. In Figur 20 sind drei Versionen mit unterschiedlichen Wicklungsvarianten dargestellt. Alle drei Prototypen sind vom nicht-induktiven Typ.



Figur 20 4kW-Prototypen (verschiedene Wicklungsvarianten) eines nicht-induktiven Strom-Splitters.

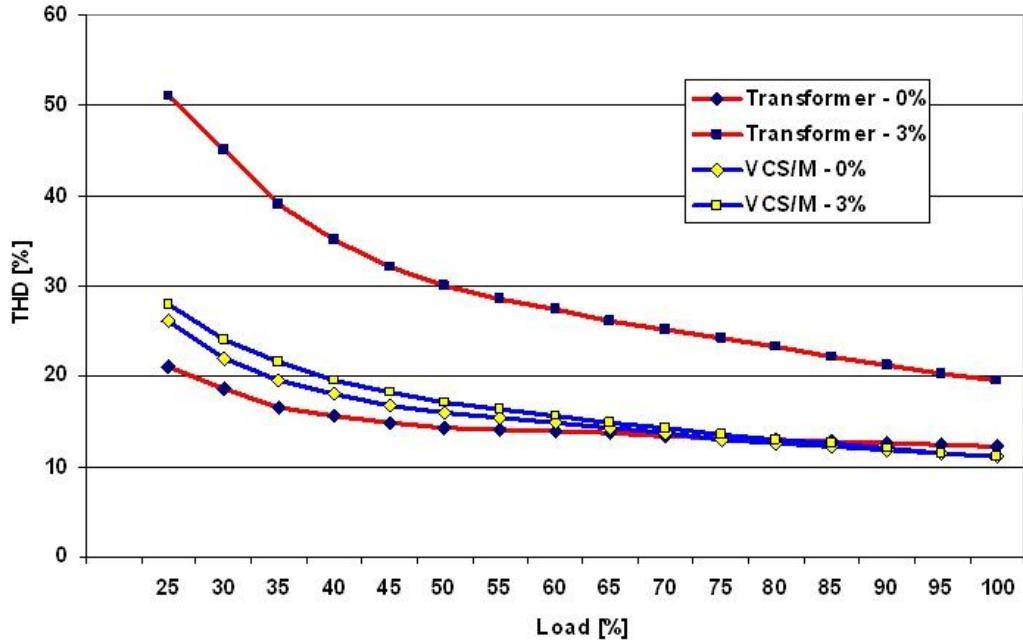
Die Hauptfunktion – Reduktion der Oberschwingungen – wird direkt an einem B12-Umrichter gemessen. In Figur 21 links sind Eingangsspannung und –strom der Phase L1 im Zeitdiagramm dargestellt, in der Mitte das Frequenzspektrum des Eingangsstroms, rechts Zahlenwerte zu den Stromspektren I_{L1} bis I_{L3} . Die obere Zeile (gelb hinterlegt) gibt die Situation ohne OS-Reduktionsmaßnahme wieder, unten (hellblau hinterlegt) wurde ein VCS-Prototyp vorgeschaltet (VCS: Vectorial Current Splitter).



Figur 21 Eingangsspannung und –strom (links), Strom-Oberwellen eines B6-Gleichrichters mit resistiver Last, oben direkt am Netz, unten mit vorgesetztem nicht-induktivem Strom-Splitter und B12-Gleichrichter an der gleichen Last.

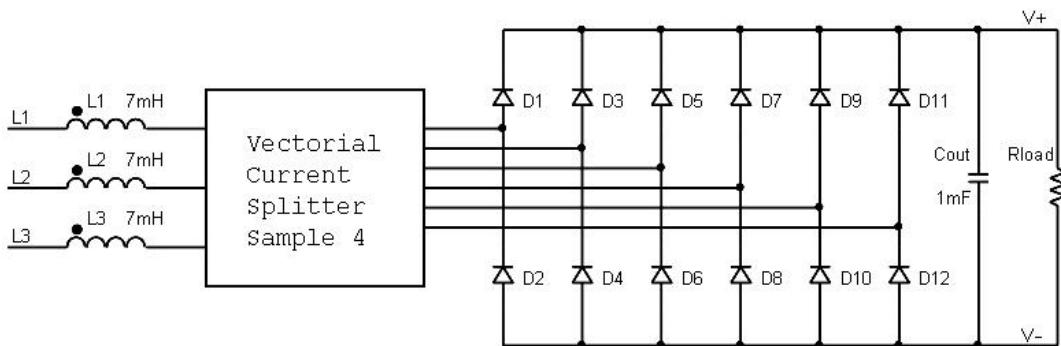
Simulations- und Messergebnisse stimmen gut überein; der erwartete THD-I von 13% wird erreicht. Deutlich zu erkennen ist, wie die 5., 7., 17., ... Harmonische verschwinden.

Eine herausragende Eigenschaft von Multipuls-Strom-Splittern ist deren Insensitivität gegenüber Schwankungen der Netzspannung. Dies sehr im Gegensatz zu Multipuls-Transformatoren, welche diesbezüglich ungünstige Eigenschaften aufweisen. Figur 22 zeigt, wie beim Strom-Splitter (blaue Kurven) der THD-I praktisch unabhängig von der Spannungssymmetrie bleibt. Die roten Kurven des Multipuls-Transformators sind diesbezüglich extrem empfindlich (gilt für Applikation mit grosser DC-Link-Kapazität, ohne AC- oder DC-Induktivität).

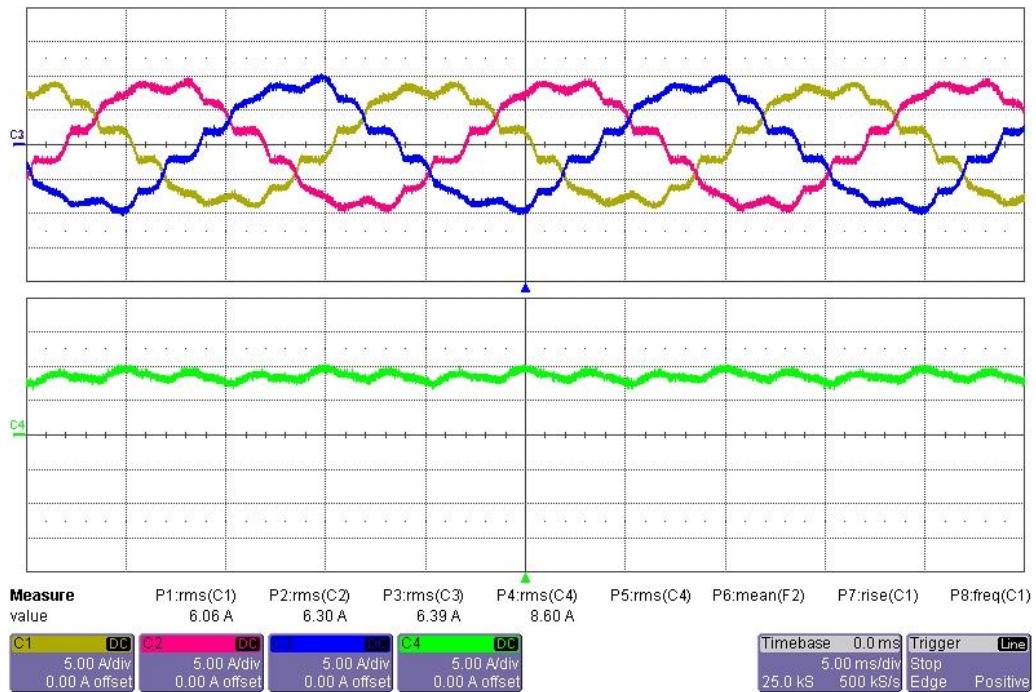


Figur 22 Herausragende Eigenschaft der Strom-Splitter: Sie sind insensitiv gegenüber Amplitudendifferenzen der Netzspannung. Dargestellt ist jeweils eine THDI-Messung mit 0% und 3% Spannungs-Asymmetrie.

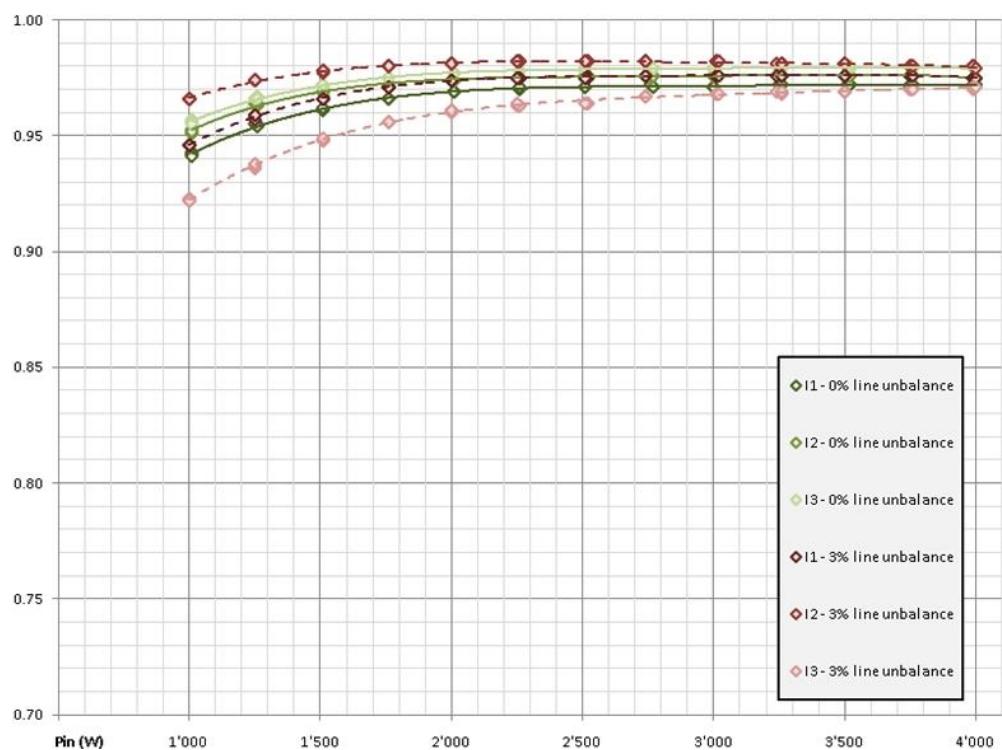
Die Verifikation der Funktionalität der Prototypen zusammen mit einer AC-Drossel soll zeigen, welche Performance von den neu definierten Combo-Komponenten (Figur 13) zu erwarten ist. Die in Figur 23 dargestellte Schaltung liefert Ergebnisse gemäss Figuren 24-26.



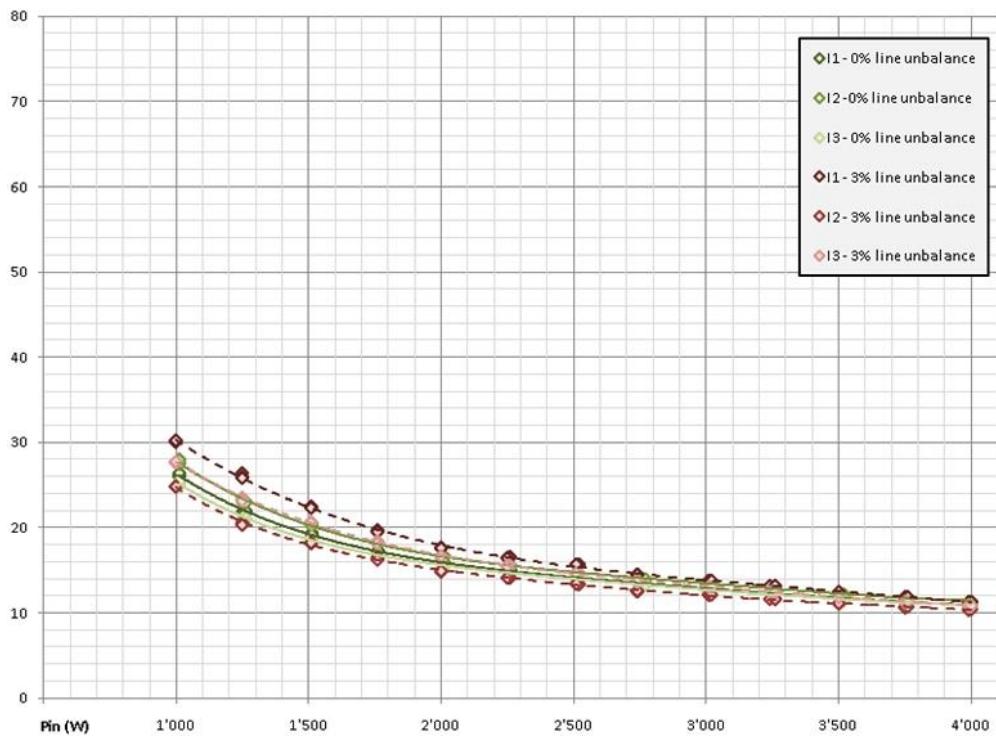
Figur 23 Strom-Splitter mit vorgestellter AC-Drossel – gleiche Funktionalität wie die neu definierten Combo-Cores.



Figur 24 Messergebnisse im Zeitbereich zur Schaltung Figur 23: oben 3-Phasen-Eingangsströme, unten DC-Strom nach dem Gleichrichter.



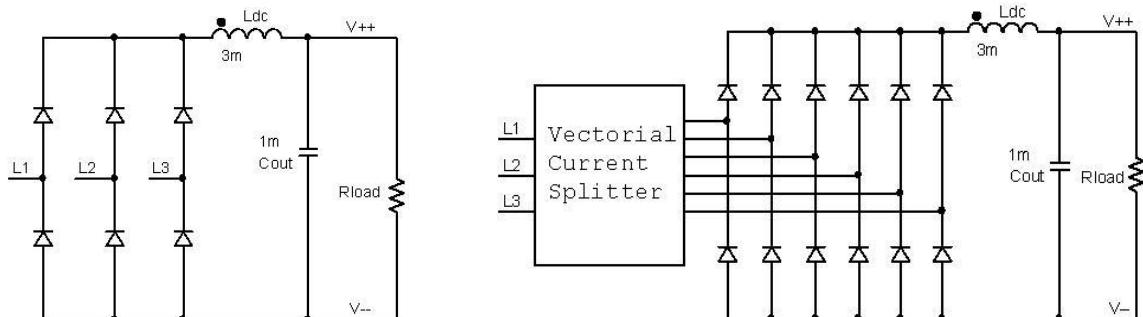
Figur 25 Power Factor in Funktion der Last (1 bis 4kW) und der Spannungs-Asymmetrie.



Figur 26 THD-I in Funktion der Last (1 bis 4kW) und der Spannungs-Asymmetrie.

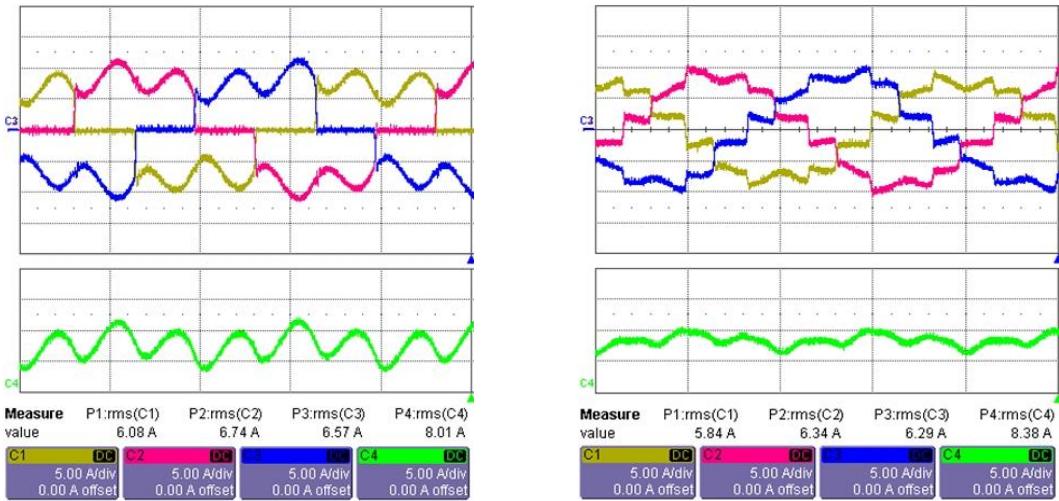
Die Ergebnisse sind ausgezeichnet – sie bestätigen die Erwartung, dass mit einer einzigen Combo-Komponente die **IEC-Norm 61000-3-2** erfüllt wird!

Vergleichsmessungen zwischen einer reinen B6-Gleichrichterschaltung mit DC-Link-Drossel und linearer (ohm'scher) Last und einem nicht-induktiven Strom-Splitter mit B12-Gleichrichter verdeutlichen die funktionalen Verbesserungen, die mit dieser Technologie erreichbar sind.



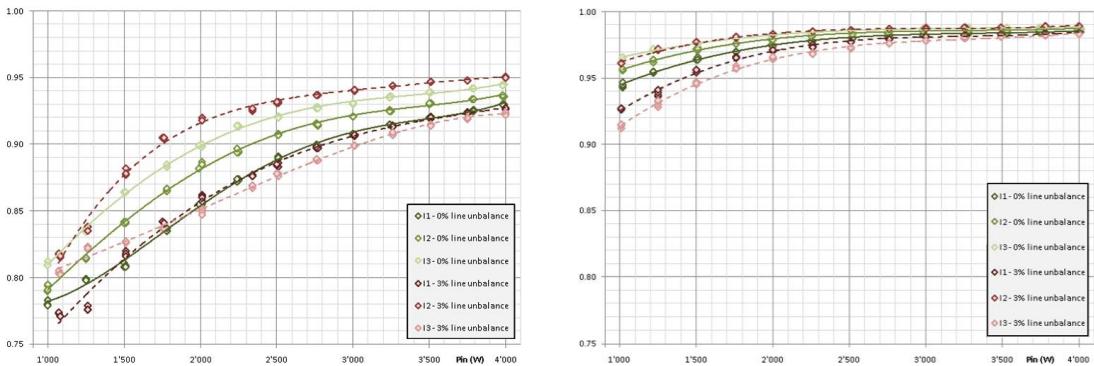
Figur 27 Schaltungstopologien des Vergleichstests: links ein B6-Gleichrichter, rechts ein nicht-induktiver Strom-Splitter mit B12-Gleichrichter, je mit DC-Kreis-Drossel und ohm'scher Last.

Die Schaltungen sind in Figur 27 dargestellt. L1, L2 und L3 bilden den 400VAC-Netzanschluss; gemessen werden die jeweiligen Phasenströme sowie der Laststrom an R_{load} . Die zugehörigen Zeitdiagramme zeigen Figur 28, links der B6-Gleichrichter ohne OS-Reduktion, rechts der Strom-Splitter mit B12-Gleichrichter. Dargestellt sind jeweils Eingangsströme der drei Phasen sowie der Gleichrichter-DC-Ausgangsstrom.



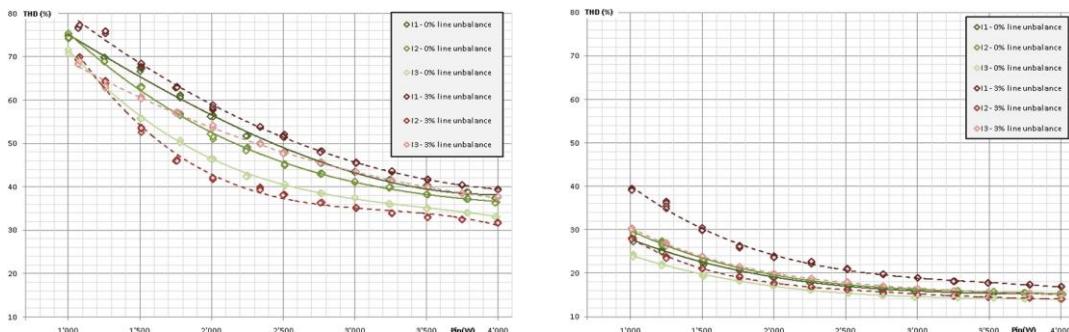
Figur 28 Phasenströme (oben) und Laststrom (unten) der beiden Topologien.

Hier wird klar erkennbar, wie der Strom-Splitter die offensichtlich vorhandene Spannungs-Asymmetrie dämpft und den Rippel des Laststroms deutlich reduziert. Auffällig ist zudem, dass der Laststrom deutlich grösser wird, obwohl die Phasenströme kleiner sind. Dies deutet auf einen verbesserten Power-Faktor, was in Figur 29 bestätigt wird. Spektakülär ist die Verringerung der PF-Reduktion in Abhängigkeit der Last (Skala von 1 bis 4kW) sowie die massive Reduktion der Abhängigkeit von Spannungs-Asymmetrien (rot: 3%, grün: 0%).



Figur 29 Power Faktor in Abhängigkeit der Last (1 - 4kW) und der Spannungs-Asymmetrie (0 - 3%).

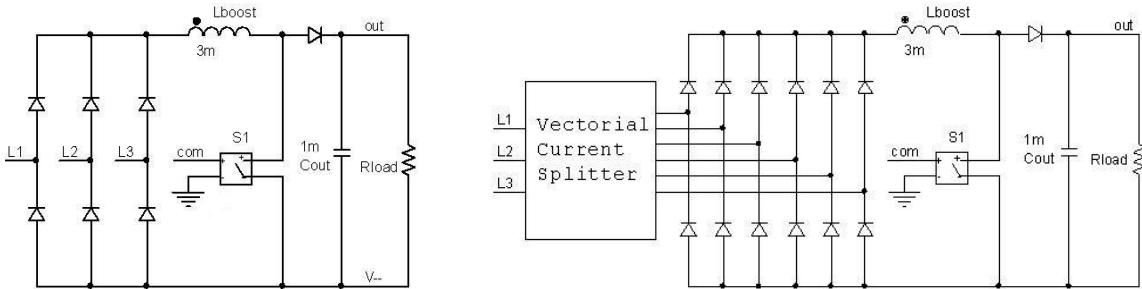
Diese Beobachtungen macht man auch für den Klirrfaktor THD-I (Figur 30): Während der B6-Gleichrichter bei Nennlast (4kW) THD-I-Werte von 32 - 40% aufweist (je nach Phase und Spannungssymmetrie), liegen die entsprechenden Werte beim Strom-Splitter bei 13 - 17%!



Figur 30 THD-I in Abhängigkeit der Last (1 - 4kW) und der Spannungs-Asymmetrie (0 - 3%).

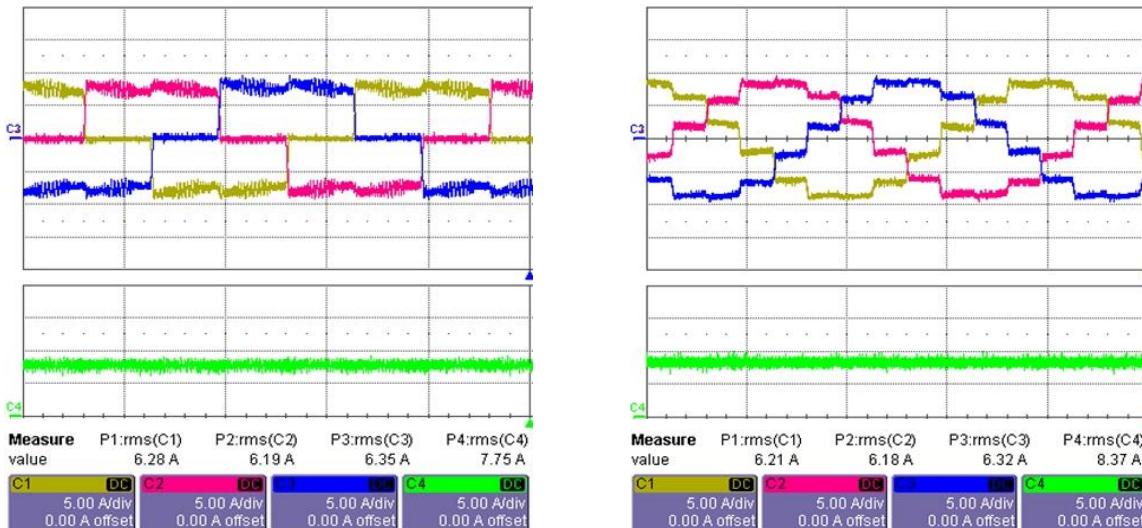
Bei halber Last (2kW) stehen 42 - 59% (B6-Schaltung) den hervorragenden Werten 16 - 24% des neuen Konzepts gegenüber.

In einem weiteren Vergleichstest wurden B6-Gleichrichter und Strom-Splitter mit B12-Gleichrichter mit einer getakteten Boost-Last beschaltet (Figur 31).



Figur 31 Schaltungstopologien des zweiten Vergleichstests: links ein B6-Gleichrichter, rechts ein nicht-induktiver Strom-Splitter mit B12-Gleichrichter, je mit DC-Kreis-Drossel und getakteter Last (constant current boost converter).

Die Resultate zeigen ähnliche Erkenntnisse wie die vorhergehenden Versuche: klar reduzierter Rippel des Laststroms, deutliche Verbesserung des Power-Faktors. Außerdem kann in Figur 32 beobachtet werden, dass die Schalttakt-Impulse auf den Eingangsströmen durch den Strom-Splitter stark gedämpft werden.

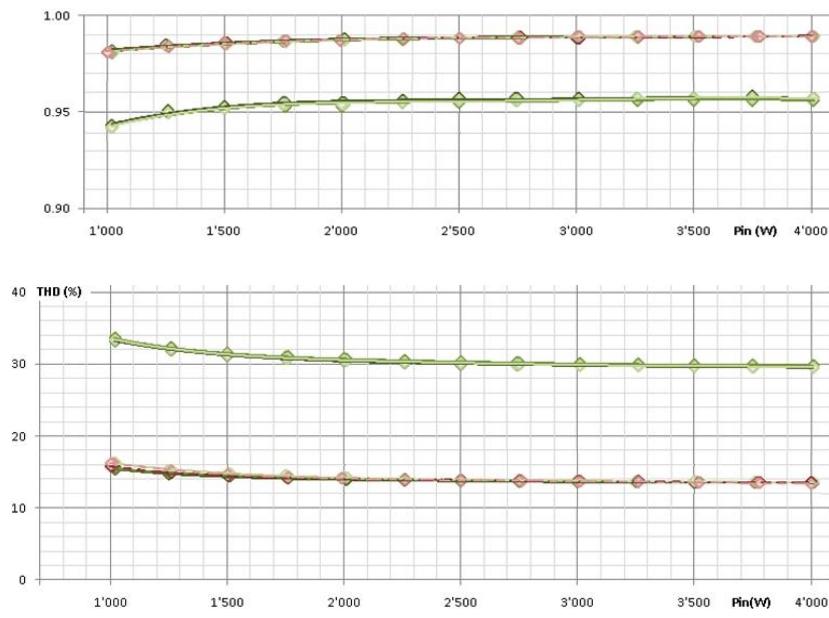


Figur 32 Phasenströme (oben) und Laststrom (unten) der Constant Current Boost Converter (links B6-, rechts VCS + B12-Gleichrichter).

Figur 33 belegt die Vermutung des deutlich verbesserten Power-Faktors: Während der B6-Gleichrichter zwischen 25 und 100%-Last PF-Werte von 0.94 - 0.96 erreicht, glänzt der Strom-Splitter mit hervorragenden 0.98 - 0.99.

Der THD-I des B6-Gleichrichters liegt bei Nennlast noch bei 30% und steigt bei fallender Belastung bis 34% (25% Nennlast). Die Werte des Strom-Splitters können sich auch sehen lassen (Nennlast: 13% THD-I, Viertellast: 16% THD-I).

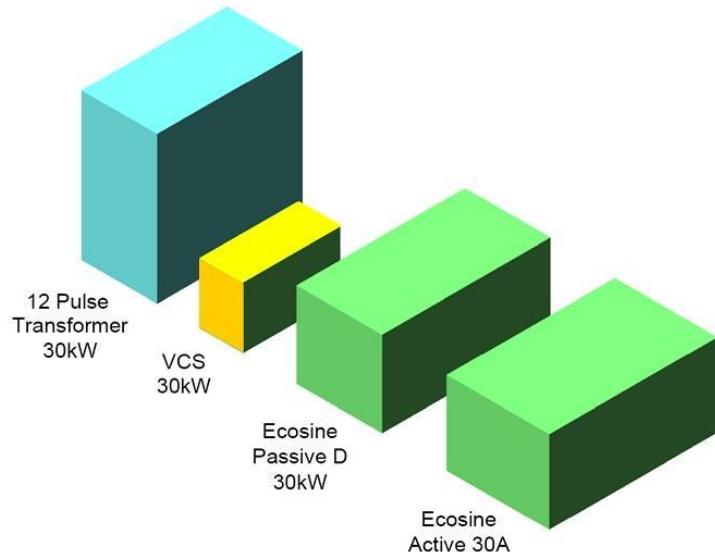
Fazit: Diese einfachen Vergleichsmessungen zeigen, wie massiv das Verbesserungspotenzial bezüglich Oberschwingungen und Power-Faktor ist.



Figur 33 Power Faktor (oben) und THD-I (unten) der Constant Current Boost Converter.
Grün: B6-Gleichrichter, Rot: VCS + B12-Gleichrichter

Größen- und Kostenvergleich

Diesem Projekt lag der Anspruch zu Grunde, eine Technologie zur Oberwellenreduktion zu konzipieren, welche die nötigen Investitionen für den Systembetreiber gegenüber aktuellen Lösungen deutlich reduziert. Am Beispiel der Entstörmassnahmen für eine 30kW-Last kann das vorgestellte Konzept eindrücklich zeigen, welche dramatischen Verbesserungen möglich sein werden. Figur 34 und Tabelle 3 stellen das ‚vergoldete‘ Resultat dieses Projekts (VCS) den State-of-the-Art Technologien 12-Puls-Transformator, sowie Passives und Aktives Harmonisches Filter gegenüber.



Figur 34 Größenvergleich verschiedener Technologien zur Reduktion der Stromoberwellen.

Technology	Mass kg	L mm	W mm	H mm	Mat. Cost CHF
12 Pulse Transformer 30kW	180	510	265	515	>800
12 Pulse Current Splitter 32kW	46	341	151	214	192
Passive Harmonic Filter 30kW	54	590	300	300	>800
Active Harmonic Filter 30A	47	590	360	290	>800

Tabelle 3 Typische Gewichte, Abmessungen und Materialkosten zu den in Figur 30 dargestellten Technologievarianten.

Der Gerechtigkeit halber muss erwähnt werden, dass die in Tabelle 3 gelisteten Harmonic Filter bei Nennlast eine THD-I-Performance von 5% erreichen, während die 12-Puls-Technologien hier mit 12% schlechter abschneiden. Der Vergleich ist trotzdem gültig: 18- und vor allem 24-Puls-Varianten erzielen ähnliche THD-I-Werte wie State-of-the-Art Harmonic Filter – bei Volumina und Kosten, die für die VCS-Technologie nicht schlechter aussehen als bei der hier vorgestellten 12-Puls-Variante.

Aktiv-Frontend-Lösungen liegen bezüglich Dimensionen gleichauf mit dem neuen Strom-Splitter, sind aber deutlich teurer und weisen klare Nachteile punkto Verluste und Zuverlässigkeit auf. Diese Aussage ist allerdings bezüglich Grösse der betriebenen Last zu relativieren:

- Je kleiner die Last, desto günstiger fallen die Kosten der Aktiv-Frontend-Lösung aus (sehr starke Abhängigkeit der Elektronik-Komponentenkosten von der produzierten Stückzahl). Außerdem ist die Verlustwärme in kleinen Leistungsbereichen einfach abzuführen, zum Beispiel via Gehäuse.
- Für sehr grosse Lasten (ab ca. 200kW) sind aktive Lösungen aus Kostengründen heute kaum sinnvoll realisierbar. Neben den exorbitanten Preisen für Leistungshalbleiter ist für das Temperaturmanagement ein massiver Aufwand zu treiben, typischerweise durch Verwendung von Flüssigkühlmitteln.

Diskussion

Energiesparpotenzial

Gemäss statistischen Daten des Bundesamtes für Energie (BFE) vom Juni 2009 [12] ist der gesamte Elektrizitätsverbrauch in der Schweiz zwischen 1980 und 2008 um 61% angestiegen. Der **Landesendverbrauch** nach Sektoren (Tabelle 4) macht deutlich, dass Haushalte, Industrie und Gewerbe, sowie die Erbringer von Dienstleistungen (inkl. die öffentliche Hand) rund 90% der Elektrizität verbrauchen. Zudem fällt auf, dass 2008 das Netz mit Verlusten von über 4400GWh zusätzlich belastet wurde.

	GWh (1 GWh = 3,6 TJ)		Verände- rung in %	Anteil in %	
	2007	2008		2007	2008
Landesverbrauch	61'750	63'147	2,3	100,0	100,0
Verluste (-)	4'318	4'418	2,3	7,0	7,0
Endverbrauch	57'432	58'729	2,3	93,0	93,0
<u>Endverbrauch nach Sektoren:</u>				100	100
Haushalte	17'472	17'897	2,4	30,4	30,5
Landwirtschaft	1'004	1'013	0,9	1,7	1,7
Industrie, ver- arbeitendes Gewerbe	18'995	19'280	1,5	33,1	32,8
Dienstleistungen	15'219	15'730	3,4	26,5	26,8
Verkehr*	4'742	4'809	1,4	8,3	8,2

Tabelle 4 Landesverbrauch Schweiz 2007-2008 nach Sektoren (Quelle: BFE)..

Die Studie „Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs nach Verwendungszwecken“, die im April 2008 im Auftrag des BFE von Prognos, Infras, CEPE und Basics herausgegeben wurde [13], ermöglicht eine weitere Differenzierung des Elektrizitätverbrauchs. In Tabelle 5 sind die Hauptverbraucher identifiziert.

	Industrie	Dienstleistungen	Total
Prozesse/Antriebe	10'585 GWh	4'546 GWh	15'131 GWh
HLK	308 GWh	4'577 GWh	4'885 GWh
Beleuchtung	1'639 GWh	3'807 GWh	5'446 GWh
Prozesswärme	6'478 GWh	-	6'478 GWh
	19'010 GWh (von 19'280 GWh)	12'930 GWh (von 15'730 GWh)	31'910 GWh (von 58'729 GWh)

Tabelle 5 Relevante Elektrizitätskonsumenten der Schweiz

Dieses Zahlenmaterial erlaubt folgende Schlüsse:

- Rund **1/3** des schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs entfällt auf **Prozesse/Antriebe** und **HLK** (Heizung, Lüftung, Klima).
- Bei Prozessen/Antrieben und in der HLK kommen zunehmend geregelte Antriebe mit **Frequenzumrichtern** zum Einsatz. Diese gelten heute weltweit als **relevante** Verursacher von Netzoberschwingungen.

Das Thema „Low Harmonic 3-Phase Rectifiers for Efficient Motor Systems“ ist somit für die elektrischen Verbraucher in der Schweiz (und anderswo) sehr relevant. Im Jahr 2009 lassen sich folgende Kennzahlen für den **Umrichter-Weltmarkt** festhalten (Quelle: IMS Research 2009 [32]):

- Marktvolumen für AC und DC Niederspannungs-Frequenzumrichter: \$10.95 Milliarden
- Compound Annual Growth Rate (CAGR) 2008-2013: 6.1% (APAC 10.4%)
- 90% AC Umrichter, 10% DC Umrichter

Die Verteilung des weltweiten Umrichter-Marktes auf die verschiedenen Applikationen ist in Tabelle 6 dargestellt.

Industriesegment	Marktanteil	CAGR
Automotive	3.9%	7.3%
Chemie und Petrochemie	3.9%	8.1%
HVAC	11.0%	8.2%
Kranbau	4.0%	2.8%
Aufzüge und Fahrstufen	2.2%	3.2%
Lebensmittel und Getränke	10.1%	8.2%
Maschinen und Robotik	3.1%	5.5%
Metallverarbeitung und Minenbau	8.6%	5.9%
Verpackungsmaschinen	5.4%	7.6%
Pharmaindustrie	1.8%	4.8%
Papierindustrie	6.4%	4.6%
Plastik und Gummi	6.4%	6.5%
Textilmaschinen	5.3%	1.7%
Wasseraufbereitung	5.7%	5.5%
Holzbearbeitung	2.3%	5.1%
Übrige	20.1%	8.5%

Tabelle 6 Umrichter-Weltmarkt nach Industriesegment (Quelle: IMS Research 2009). Die grau hinterlegten Industriesegmente repräsentieren diejenigen, die in den letzten Jahren vermehrt Lösungen zur Reduktion von Oberschwingungen eingesetzt haben und überdurchschnittlich für die Thematik sensibilisiert sind.

Markttreiber

Gemäss ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Deutschland) [33] wird heute weltweit ca. 1/3 der Elektrizität von **Elektromotoren** bezogen. Die Einsatzdichte von effizienzsteigernden Technologien wie Frequenzumrichtern ist noch relativ gering, wie am Beispiel von Deutschland erläutert werden soll.

In Deutschland waren 2008 ca. **35 Millionen** industriell genutzte Elektromotoren im Leistungsbereich von 0.75 bis 375kW im Einsatz. Davon wurden gerade mal **12%** mittels Frequenzumrichter geregelt. Selbst bei Neuinstallationen kommt blass bei jedem dritten Elektromotor dieser Leistungsklasse ein Frequenzumrichter zum Zuge. Die Prozentsätze lassen sich im Grossen und Ganzen auf die westlichen Industriestaaten übertragen.

Im Rahmen der neuen **EU-Verordnung** zu energiesparenden Elektromotoren und intelligenten Antrieben wird nun Druck aufgesetzt:

Die neue Regelung sieht vor, dass ab dem 16. Juni 2011 in Europa Drehstrom-Normmotoren der Größen 0.75 bis 375kW nur noch in Verkehr gebracht werden dürfen, wenn sie mindestens der international genormten **Energieeffizienzklasse IE2** entsprechen. Wenn alle Antriebssysteme in Europa mit Energiesparmotoren der neuen Generation ausgerüstet wären, würde das zu einer Energieeinsparung von rund **50TWh** führen.

Ab Januar 2015 verkauft IE2 Motoren dürfen nur noch mit elektronischer Drehzahlregelung eingesetzt werden. Alternativ ist dann der Einsatz von Motoren möglich, die mindestens der Effizienzklasse IE3 entsprechen. Diese sind heute jedoch noch sehr teuer und nicht in der Breite verfügbar.

Technisch und wirtschaftlich wäre es nach ZVEI-Untersuchungen sinnvoll, mindestens jeden zweiten Motor mit elektronischer Drehzahlregelung auszustatten. Das würde zu einer weiteren Energieeinsparung von **85TWh** führen.

In anderen Gebieten wie z.B. Nordamerika oder China sind vergleichbare Regelwerke in Vorbereitung oder teilweise bereits in Kraft.

Der flächendeckende Einsatz von Motorantrieben ist zur spürbaren Verbesserung der Energieeffizienz zwingend notwendig und künftig gemäss EUP-Richtlinie vorgeschrieben. Diese hohe Einsatzdichte wird allerdings nur dann technisch umsetzbar sein, wenn geeignete Massnahmen die **Netzverträglichkeit** sicherstellen. Die VCS (Vectorial Current Splitter) Technologie von Schaffner kann eine solche geeignete Massnahme sein, da Kosten, Größe, Gewicht und Eigenschaften im Teillastbereich den herkömmlichen Lösungen um Längen voraus sind. Die Hemmschwelle zum Einsatz OS-reduzierender Lösungen wird damit deutlich verringert.

Schlussfolgerungen

Szenario zur Marktentwicklung

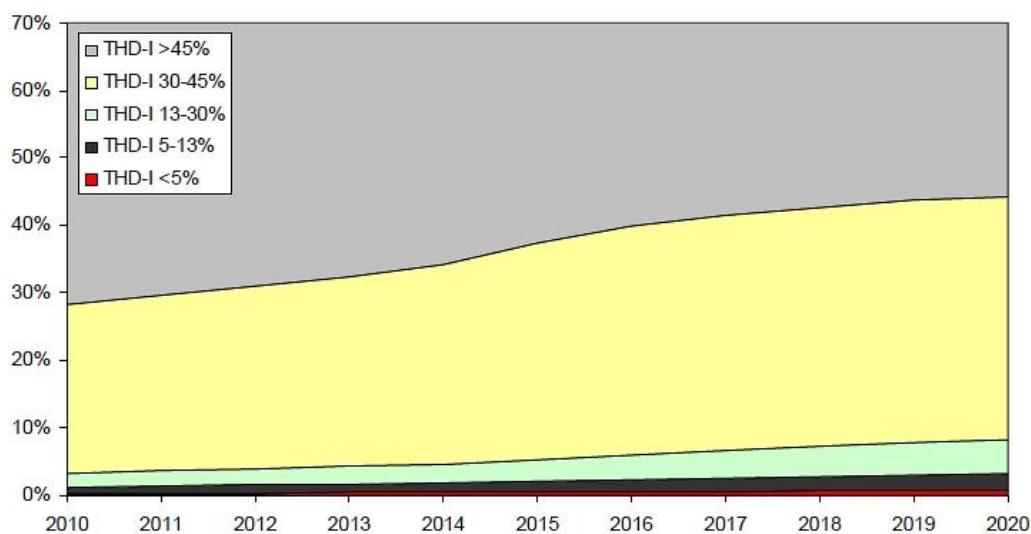
Das erste Szenario (Figur 35) geht davon aus, dass sich der standardmässige Einsatz von AC- und DC-Drosseln vorerst weiter durchsetzt. Diese erlauben dem OEM, sein Gerät als Low Harmonic Drive am Markt zu positionieren, ohne dass dafür zu hohe Kosten auflaufen.

Höherwertige Technologien wie passive und aktive OS-Filter werden zwar schrittweise Marktanteile gewinnen, bleiben jedoch aufgrund ihrer Grösse und Kosten gegen oben limitiert.

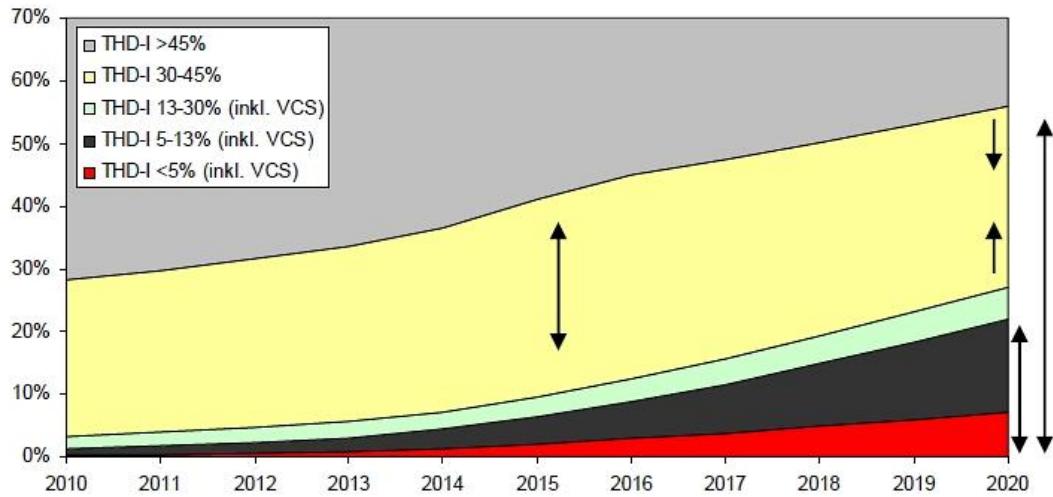
Dem zweiten Szenario (Figur 36) wird zu Grunde gelegt, dass ab 2011 schrittweise OS-Lösungen basierend auf der VCS Technologie verfügbar werden. Da zum jetzigen Zeitpunkt weder Marktpreise noch Herstellkosten verschiedener Leistungsklassen bekannt sind, nehmen wir an, dass eine VCS-Komponente ca. das 2-3-fache einer herkömmlichen 4% Netzdrossel kosten wird.

Die Grafiken stellen unterschiedliche Oberschwingungs-Reduktions-Klassen in Bezug zum Gesamteinsatz von Frequenzumrichtern (Y-Achse). Der Strom-Klirrfaktor THD-I wird folgendemassen gruppiert:

- THD-I >45%: Drives ohne OS-reduzierende Massnahmen
- THD-I 30-45%: Drives mit AC-Drossel und/oder DC-Zwischenkreisdrossel
- THD-I 13-30%: Drives mit einfachen Filterlösungen
- THD-I 5-13%: Drives mit passivem OS-Filter oder niederwertigem Multipuls-Trafo
- THD-I <5%: Drives mit aktivem OS-Filter oder höherwertigem Multipuls-Trafo



Figur 35 Oberschwingungsreduktion hauptsächlich mittels AC- und DC-Drosseln.



Figur 36 Verbesserung der Situation dank Multipuls-Strom-Splitter (VCS-Technologie).

Folgende Effekte sind gemäss Figur 36 zu erwarten:

1. weitgehende Substitution herkömmlicher Lösungen für THD-I <5%, 5-13% und 13-30%, also vor allem passive Filter und Multipuls-Transformatoren. Aktive Filter sind aufgrund ihrer Zusatzfunktionen und universellen Einsatzmöglichkeiten weniger betroffen.
2. Teilweise Substitution herkömmlicher AC- und DC-Verdrosselungen, da die Hemmschwelle zur besseren Lösung sinkt.
3. Marktausweitung für OS-Lösungen insgesamt.

In beiden Fällen wäre es jedoch vermessener anzunehmen, dass sich die Verbreitungsdichte von OS-reduzierenden Massnahmen deutlich über die 50%-Marke heben würde.

Industrialisierung der VCS/VCM-Technologien

Die grundlegenden Konzepte wurden im Rahmen dieses Projektes erarbeitet. Allerdings wurde auch ersichtlich, dass das Optimierungspotenzial anwendungsspezifisch noch bei weitem nicht ausgeschöpft ist und fokussierter Vertiefungsarbeiten in Energieeffizienz-relevanten Applikationsbereichen bedarf.

Diese nächste Projektphase ist in Vorbereitung. Sie wird einerseits die physikalischen, material- und schaltungstechnischen sowie konstruktiven Optimierungen der Multipuls-Strom-Splitter bearbeiten. Ziel ist die Beschreibung einer kostengünstigen Herstelltechnik, aber auch die Definition einer anwendungsgerechten Variabilität.

Andererseits sind einige Einsatzbereiche auf Grund der schon erzielten Resultate relativ leicht erreichbar. Schaffner EMV AG wird diese Märkte gezielt anpeilen und so die Verfügbarkeit von preiswerten Lösungen zur Oberwellen-Unterdrückung stark verbessern. Die Herausforderung wird darin bestehen, die grossen Hersteller und Anwender von einer völlig neuartigen Lösung zu überzeugen. Dies wird jedoch mit anschaulichen Vergleichen zu heutigen Technologien und der Hervorhebung der signifikanten Vorteile der VCS Technologie gelingen.

Referenzen

Patente

- [1] Andrzej Pietkiewicz: **Harmonic Cancelling Interphase Magnetic Device**, Patent application - PCT/EP2010/058157, Schaffner EMV AG, Application date: 10th June 2010.
- [2] Andrzej Pietkiewicz: **Integrated Magnetic Device for Low Harmonics Three-Phase Front-End**, Patent application: PCT/EP2010/058669, Schaffner EMV AG, Application date: 18th June 2010.
- [3] Kenichi Sakakibara: **Interphase reactor and three-phase multiplex rectifier**, Patent JP2007028846A, Daikin Ind. Ltd., Application date: 20th July 2005, Published: 15th Jan. 2010.
- [4] Kurata Iwao, Osawa Hiroshi: **Parallel 24-pulse Rectifier Circuit**, Patent JP2008278713A, Fuji Electric Systems Co. Ltd., Application date: 07th May 2007, Published: 13th Nov. 2008.
- [5] Mishi Abudara, Oguchi Kuniomi, Sakakibara Kenichi: **Three-Phase Rectifier**, Patent JP2000358372A, Daikin Ind. Ltd., Application date 11th June 1999, Published: 26th Dec. 2000.
- [6] Manfred Depenbrock: **Leistungseinspeiseschaltung mit Saugdrossel**, Patent DE 3826524 A1, Asea Brown Boveri AG, Anmeldetag 04.Aug. 1988, Offenlegungstag: 23 März 1989.

Internationale Standards

- [7] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen: **D-A-CH-CZ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen**, 2. Ausgabe 2007
- [8] IEC 61000-3-12: **Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase**, distributed 27th Aug. 2004
- [9] IEEE Std 519-1992: **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, ISBN 1-55937-239-7.
- [10] ENA Engineering Recommendation G5/4-1: **Planning levels for harmonic voltage Distortion and the connection of nonlinear Equipment to Transmission Systems And Distribution Networks in the United Kingdom**, October 2005.

BFE Dokumente

- [11] M. Lindegger, H.P. Biner, B. Eveguoz, D. Salathe: **Effizienzsteigerung eines hocheffizienten IEC 3kW Permanent-Magnet-Motors inklusiv energetische Messung als Pumpenanwendung**, BFE Vertrags- und Projektnummer: 153338 / 100915, Schlussbericht 15. November 2009.
- [12] Bundesamt für Energie, Bern: **Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2009**, <http://www.bfe.admin.ch>, Juni 2010.
- [13] Infras AG, Zürich, Prognos AG, Basel, CEPE ETH Zürich, Basics AG, Zürich : **Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs nach Verwendungszwecken**, <http://www.bfe.admin.ch>, April 2008.

Papers

- [14] G.Gong, U.Drofenik and J.W. Kolar: **12-Pulse Rectifier for More Electric Aircraft Applications**, ETH Zurich, Power Electronic Systems Laboratory, 2005.
- [15] Kuniomi Oguchi, Goro Maeda, Nobukazu Hoshi and Tomotsugu Kubota: **Coupling Rectifier Systems with Harmonic Cancelling Reactors**, IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2001, pp. 53-63
- [16] B.Singh, B.N.Singh, A.Chandra, K.Al-Haddad, A.Pandey, D.P.Kothar: **A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters**, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 51, No. 3, June 2004, pp. 641-660.
- [17] K. Mino, Y. Nishida and J. W. Kolar: **Novel Hybrid 12-Pulse Line-Interphase-Transformer Boost-Type Rectifier with Controlled Output Voltage and Sinusoidal Utility Currents**, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 127, 2007, No. 4 pp.382-390
- [18] G. Gong, M. L. Heldwein, U. Drofenik, J. Miniböck, K. Mino, J. W. Kolar: **Comparative Evaluation of Three-Phase High-Power-Factor AC-DC Converter Concepts for Application in Future More Electric Aircraft**, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 52, No. 3, June 2005.
- [19] E. Laboure, A. Cuniere, T.A. Meynard: **A Theoretical Approach to InterCell Transformers Application to Interleaved Converters**, IEE transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 1, Jan. 2008.
- [20] B. Cougo, V. Costan, T. Meynard, F. Forest, E.Laboure: **A New Intercell Transformer for Interleaved Converters**, Technical University Toulouse, 2008
- [21] S. Utz, M. Stadler and J.Pforr: **Active Phase-Shift Control of Multi-Phase Converters to Minimize Input Current Sub-Harmonics**, University of Applied Sciences Ingolstadt, Germany.
- [22] F. Zheng, Y. Pei, Y. Liu, L. Wang, X. Yang, Z. Wang: **Design Coupled Inductors For Interleaved Converters Using Three-Leg Core**, IEEE transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 12, Dec. 2008.
- [23] Vitaly Gelman: **Improving Power Quality through Harmonics Cancellation in Multiphase Rectifiers**, VG Controls Inc., USA, World Academy of Science, Engineering and Technology 63, 2010.

- [24] Kuniomi Oguchi, Yasuomi Maki: ***A Multilevel-Voltage Source Rectifier with a Three-Phase Diode Bridge Circuit as a Main Power Circuit***, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 30, No. 2, March/April 1994, 413
- [25] Sewan Choi, Bang Sup Lee, and Prasad N. Enjeti: ***New 24-Pulse Diode Rectifier Systems for Utility Interface of High-Power AC Motor Drives***, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, March/April 1997 531-541
- [26] Sewan Choi, Prasad N. Enjeti and Ira J. Pitel: ***Polyphase Transformer Arrangements with Reduced kVA Capacities for Harmonic Current Reduction in Rectifier-Type Utility Interface***, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.11, No.5, September 1996
- [27] Eugene A. Klingshirn: ***Harmonic Filters for Six-Phase and Other Multiphase Motors on Voltage Source Inverters***, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21. No. 4. May/June 1985. 588-594
- [28] Jun-koo Kang: ***Multi-Pulse Rectifier Solutions for Input Harmonics Mitigation***, Yaskawa Electric America, White Paper, December 1, 2005
- [29] YASKAWA: ***Power Line Harmonics and Instalation Considerations for AC and DC Drives***, Application Note AN.AFD.04, October 10, 2004
- [30] Karl M. Hink: ***Harmonic Mitigation of 12-Pulse Drives With Unbalanced Input Line Voltages***, Publication of MTE Corporation, USA, 2007.
- [31] Karl M. Hink: ***18-Pulse Drives and Voltage Unbalance***, Publication of MTE Corporation, USA, 2008.

Bücher, Diverse

- [32] IMS Research: ***The worldwide market for AC & DC motor drives 2006 - 2009***
- [33] ZVEI Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie: ***ZVEI News***
- [34] Albert Kloss: ***Oberschwingungen – Netzrückwirkungen der Leistungselektronik***, Berlin, Offenbach, VDE VERLAG, 1996, ISBN 3-8007-2157-0.
- [35] Bin Wu: ***High Power Converters and AC Drives***, IEEE Press, Wiley Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2006, ISBN-13 978-0-471-73171-9.
- [36] Dereck A., Paice: ***Power Electronic Converter Harmonics – Multipulse Methodes For Clean Power***, IEEE Press, New York, 1996.
- [37] H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes: ***Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning***, IEEE Press, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007, ISBN 978-0-470-10761-4.