

Programm *Elektrizität*  
Forschungsprojekt



PSEL-BfE-Projekt:

# Neue systemorientierte FACTS-Elemente

ausgearbeitet durch

***Dr. Dirk Westermann***

***ABB Hochspannungstechnik AG***

***TB AC-Systems***

***Brown Boveri Strasse 4, 8050 Zürich***

im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie und PSEL**

Vertragsnummer: 61 701

Projektnummer: 22 301

**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden.  
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor  
dieses Berichts verantwortlich.**

---

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	3
2.	FACTS-Elemente .....	5
2.1.	Unified Power Flow Controller .....	5
2.2.	Transformerless Advanced Series Compensation.....	6
2.3.	Potential transformatorloser Elemente .....	8
2.4.	Mittelspannungsanwendungen.....	10
3.	Gesamtsystem .....	12
3.1.	Einsatzplanung .....	12
3.2.	Systemintegration.....	13
3.3.	Wirtschaftlichkeit .....	15
4.	Zusammenfassung .....	18
5.	Literatur .....	20

## Kurzfassung

Die Systementwicklung von FACTS-Elementen optimaler Wirtschaftlichkeit ist die Zielsetzung des vorliegenden Entwicklungsprojektes. Als Referenz für die zu entwickelnden FACTS-Elemente stehen der Universale Lastflussregler (UPFC), der eine unabhängige Regelung der Wirk- und Blindleistungsflüsse sowie Spannungsregelung erlaubt, und die „Advanced Series Compensation“ (ASC), deren Integration ins Netz transformatorlos erfolgen kann und hinsichtlich wirtschaftlich optimaler Lösungen die technologische Basis für die Realisierung von Betriebsmitteln mit UPFC-Eigenschaften darstellt.

Beginnend beim Hardwareaufbau der eingesetzten Leistungselektronik bis hin zur Integration der Regelung des Gesamtsystems in die Netzbetriebsführung werden kostengünstige FACTS-Elemente durch Minimierung der primärtechnischen Einrichtungen entwickelt, die optimalen FACTS-Element-Funktionen und die optimale FACTS-Element-Anordnung im Netz abhängig von typischen Netzkonfigurationen festlegt und Verfahren zur Optimierung des Netzverhaltens erarbeitet.

## Abstract

The system development of FACTS-devices optimized with respect to economy is the major issue of this development project. As reference devices the Unified Power Flow Controller (UPFC) as well as the transformerless Advanced Series Compensation (ACS) have been adopted. The UPFC serves as a benchmark devices with respect to its unique control capabilities whereas the ACS is referred to as the technology platform of tailor made solutions.

Cost effectiveness is achieved by optimizing the primary engineering components such as coupling transformers as well as by optimal location, dimensioning and control which then affects the system planning horizon.

## Résumé

Le développement des dispositifs-FACTS économiquement optimisés représente l'objectif principal de ce projet de recherche et de développement. Le *Unified Power Flow Controller* (UPFC), qui permet un réglage indépendant de la puissance active, de la puissance réactive et de la tension est considéré comme modèle de référence. Le dispositif *Advance Series Compensation* (ASC) qui peut être connecté directement au réseau électrique (sans transformateur de connexion) représente une solution économique. L'avantage de cette technologie est aussi envisagé pour la réalisation des autres dispositifs-FACTS comme l'UPFC.

De la conception des systèmes d'électronique de puissance jusqu'aux stratégies de réglage et de conduite du réseau électrique, des concepts-FACTS économiques obtenus par la réduction des installations de la technique primaire sont développés. Selon le réseau électrique considéré, les fonctions et les configurations optimales des dispositifs-FACTS ont été déterminées. Les algorithmes et la méthodique pour l'optimisation du comportement des réseaux par les dispositifs-FACTS ont été élaborés.

# 1. Einleitung

Vor dem Hintergrund der Deregulierung in der elektrischen Energiewirtschaft entsteht einer erhöhter Bedarf an Flexibilität in Betrieb und Planung von elektrischen Energieübertragungssystemen. Dieser Bedarf kann einerseits durch konventionelle Ausmassnahmen, wie der Neuerrichtung von Übertragungsstrecken gedeckt werden. Andererseits ist der veränderter Netzbetrieb oftmals marktbestimmt und damit kurz- bis mittelfristig Änderungen unterworfen.

Während die Errichtung neuer Übertragungsstrecken eine langfristige Massnahme darstellt, besteht heute die Möglichkeit, durch den Einsatz leistungselektronischer Betriebsmittel über die Erhöhung der Regelbarkeit des Übertragungsnetzes den erhöhten Anforderungen an den Netzbetrieb gerecht zu werden. Zur Realisierung dieser Betriebsmittel werden leistungselektronische Komponenten wie thyristorgeregelte Reaktoren oder Kondensatoren oder auch welche auf Basis von Spannungsumrichtern eingesetzt. Letztere sind aufgrund der stetig steigenden Durchgangsleistungen der eingesetzten Halbleiterelemente auch im höheren Leistungsbereich bis einige hundert MVA verfügbar. Diese Umrichtertechnik bietet die technologische Grundlage für das hier beschriebene Entwicklungsprojekt, das auf die Systementwicklung elektrischer Energieübertragungssysteme mit leistungselektronischen Betriebsmitteln (auch Flexible AC Transmission Systems, FACTS) zielt. Der Einsatz von FACTS-Elementen ermöglicht durch

- anpassungsfähige Leistungsflussregelung,
- Vergrösserung der übertragbaren Leistung,
- schnelle Beeinflussung des Spannungsprofils

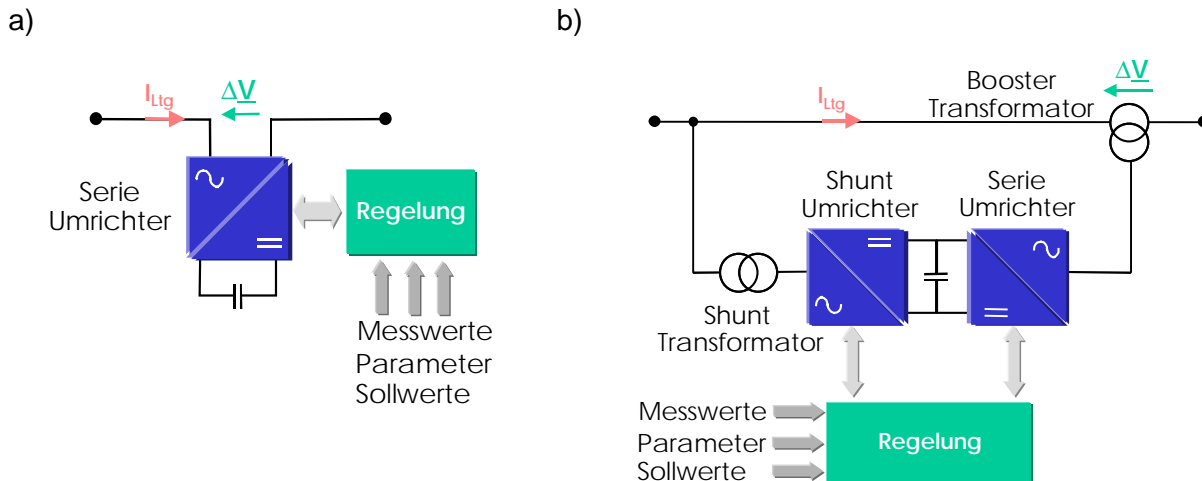
eine stärkere Auslastung bestehender Energieübertragungssysteme – erreichbar ohne platzintensive Zubaumassnahmen. Das Anwendungsgebiet erstreckt sich über die Hoch- und Höchstspannungsnetze hinaus bis hin zum Einsatz in der Mittelspannungsebene; hier zur Verbesserung der Versorgungsqualität. Vor diesem Hintergrund besteht die Zielsetzung des Projektes “Entwicklung neuer systemorientierter FACTS-Elemente”

- in der Entwicklung wirtschaftlicher FACTS-Element-Anlagenkonfigurationen durch Minimierung primärtechnischer Einrichtungen; hier die transformatorlose Spannungseinkopplung nebst Verfahren zur Gerätespezifikation,
- in der Entwicklung von Verfahren zur wirtschaftlichen Systemintegration unter Berücksichtigung der verschiedenen Instanzen der Netzbetriebsführung für den normalen und den gestörten Netzbetrieb,
- sowie der wirtschaftlichen Bewertung der FACTS-Anwendung nebst Entwicklung eines Verfahrens zur Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Die technologische Basis für diese Entwicklung ist ein Umrichter mit Gleichstromzwischenkreis. Dessen Wirkungsweise auf das Netz entspricht derer einer gesteuerten Spannungsquelle. Als Referenz für die statischen Betriebsmittel steht einerseits der Universale Leistungsflussregler (UPFC). Er erlaubt eine voneinander unabhängige Regelung der Wirk- und Blindleistungsflüsse über das Betriebsmittel sowie die Regelung der Spannungsbeträge am Anschlusspunkt. Als zweite

Anwendung wird die "Transformerless Advanced Series Compensation" (ASC) untersucht, deren Integration ins Netz transformatorlos erfolgen kann (vgl. Bild 1).

Die Anforderungen an die einzusetzenden FACTS-Elemente werden aus Systemuntersuchungen im Drehstromnetz abgeleitet. Geräteseitig erfolgte die praktische Umsetzung der untersuchten FACTS-Elemente auf reduziertem Spannungs- und Stromniveau. Systemseitig wurde die Geräteintegration im Rahmen von Fallbeispielen untersucht.



**Bild 1:** Schema der untersuchten FACTS-Elemente  
 a) Advanced Series Compensation – transformatorlos  
 b) Unified Power Flow Controller

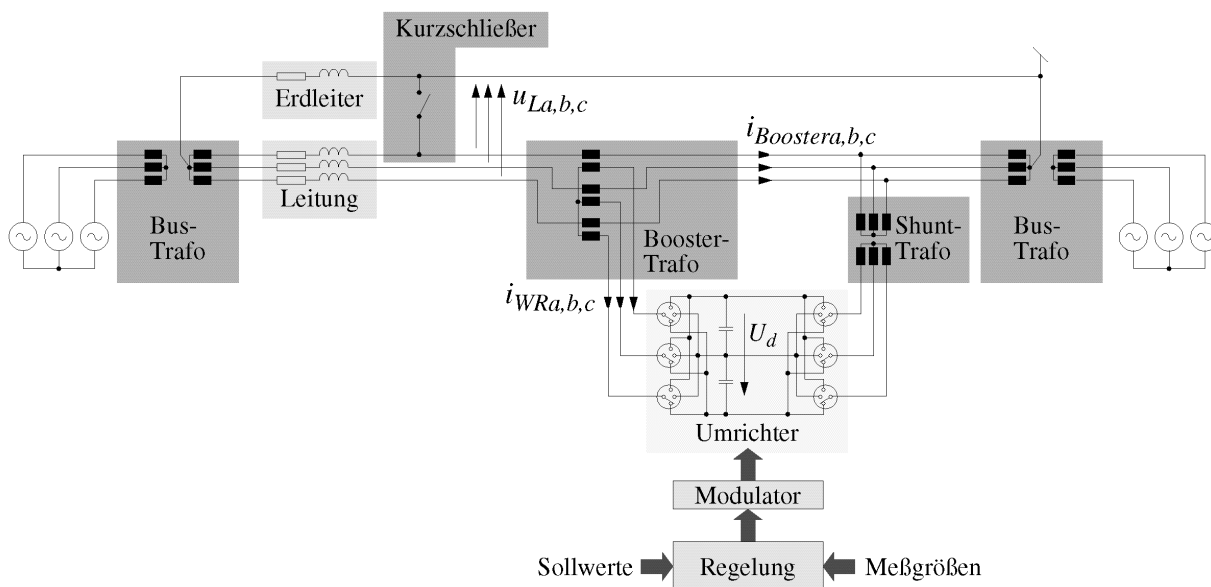
Parallel zu den Netzuntersuchungen einerseits und unter Berücksichtigung der Aufgaben der Netzbetriebsführung andererseits kommt hier die ökonomische Bewertung von Stabilitätskriterien sowie Betriebsmittelausfällen hinzu, woraus Kriterien für die Netzbetriebsführung beim Betrieb von FACTS-Elementen resultieren. Neben einer Zusammenfassung der Arbeiten zu den hier im Vordergrund stehenden Betriebsmitteln ASC und UPFC (bzgl. [1] und [2]) stellt eine Übersicht über die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (vgl. [4]) den dritten Schwerpunkt des vorliegenden Berichtes dar.

## 2. FACTS-Elemente

### 2.1. Unified Power Flow Controller

Aus der Untersuchung des Anlagenverhaltens im gestörten Netzbetrieb resultierten zahlreiche Auslegungsempfehlungen, insbesondere für die Gerätetopologie des UPFC. Besonderer Schwerpunkt bei der Analyse des Geräteverhaltens liegt dabei auf der Untersuchung der Auswirkung von Kurzschlüssen in der unmittelbaren Nähe der Seriesspannungseinkopplung.

Im Normalbetrieb ist eine Regelung des Leistungsflusses innerhalb von 200 ms ausreichend, um einen gewünschten Netzbetrieb zu erreichen. Weiterhin ist das X/R Verhältnis in vielen Netzen so hoch, dass der Einfluss der d (q) Komponente der Spannung auf die q (d) Komponente des Stromes vernachlässigbar ist und so eine entkoppelte Regelung von Wirk- und Blindleistung kein komplexes Entkopplungsnetzwerk im Regelkreis benötigt, was die Realisierung des Reglers erheblich vereinfacht. Dies gilt auch für den Shuntteil des UPFC, da die dominierenden Impedanzen zum Anschluss des Shuntumrichters an das Netz die X und R Werte des Shunttransformers sind.



**Bild 2:** Modellaufbau eines Unified Power Flow Controllers [2]

Hinsichtlich der Entwicklung geeigneter Schutzverfahren für den UPFC ist die Untersuchung einphasiger Erdschlüsse in unmittelbarer Nähe der Seriesspannungseinkopplung von besonderer Bedeutung. Hier treten grosse, den Boostertransformator sättigende, Nullströme auf, die im schlimmsten Fall – ohne geeignete Schutzverfahren – zu einer Zerstörung des Umrichters führen können. Im Rahmen von simulationstechnischen Untersuchungen sind daher diese im gestörten Netzbetrieb auftretenden Effekte ausführlich untersucht worden. Systemstudien haben gezeigt,

dass durch eine geeignete Transformatorausführung und die Realisierung einer sophistischen Regelung der Wechselrichterstrom wirksam begrenzenbar ist. Der einphasige Leitungs-Erdschluss in unmittelbarer Nähe des Serietransformators ist dabei einer der wichtigsten, weil

- bei einem Leitungs-Erdschluss grosse Kurzschluss-Phasenströme und ein grosser Nullkomponenten-Strom entstehen kann,
- diese Ströme auf den Wechselrichter übertragen werden und zu Fehlfunktionen oder im Extremfall sogar zu einer Zerstörung des Umrichters führen können und
- die Gefahr einer Transformatorsättigung besteht, was zu Sättigungsmagnetisierungsstromspitzen führt, die um Grössenordnungen über dem Nennstrom des Wechselrichters liegen und diesen im Extremfall zerstören können.

Es wurde gezeigt, dass der Sättigungsmagnetisierungsstrom hauptsächlich aus dem Wechselrichter und weniger aus der Leitung stammt. Ein Sättigen des Serietransformators ist deshalb unter allen Umständen zu verhindern.

Ausserdem wurde im Rahmen von [2] gezeigt, dass bei entsprechender Kern- und Wicklungsanordnung des Serietransformators

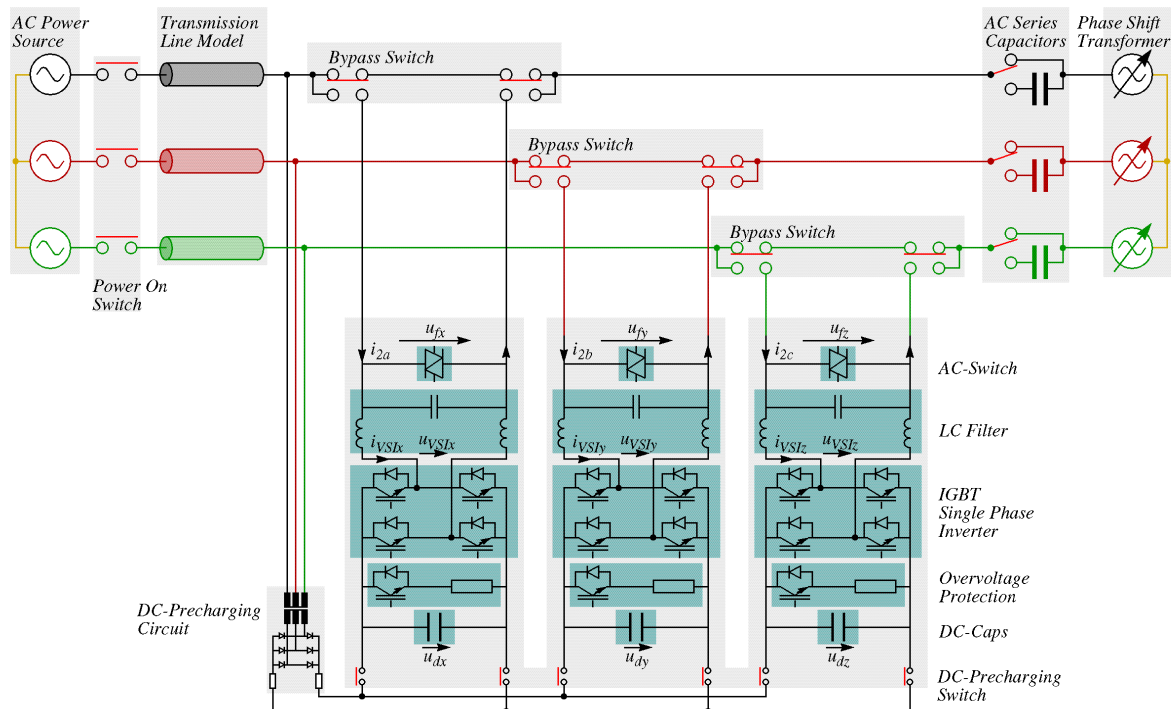
- ein Sättigen des Serietransformators bei einem einphasigen Leitungs-Erdschluss in den meisten Fällen vermieden werden kann und
- der dabei entstehende, grosse Nullkomponenten-Strom vom Wechselrichter ferngehalten werden kann und
- mit einer speziellen Reglerauslegung der Wechselrichterstrom seinen Nennwert nicht oder nur unwesentlich übersteigt.

## 2.2. Transformerless Advanced Series Compensation

Für die Leistungsflussregelung in Hochspannungsleitungen mit hohem  $X/R$  Verhältnis bietet sich eine kostengünstige Lösung an: der transformatorlose Seriekompensator. Der Kompensator ist dreimal einphasig aufgebaut. Er besteht in jeder Phase aus einer Serieschaltung von Wechselrichterbrücken, die je ihre eigene DC-Kapazität besitzen und auf ihrer AC-Seite aneinandergereiht direkt ohne Transformator in die Leitung geschaltet sind. Der Seriekompensator kann nur Blindleistung ins Netz einspeisen. Seine Ausgangsspannung muss daher immer senkrecht zum Leitungsstrom sein. Bei hohem  $X/R$  Verhältnis der Leitung genügt das, um den Leistungsfluss über einen weiten Bereich zu regeln. Die für die Leistungsflussregelung nötige installierte Leistung des Kompensators ist darüber hinaus klein im Vergleich zur geregelten Durchflussleistung der Leitung.

Durch die Serieschaltung von ganzen Wechselrichterbrücken (WR-Brücken) einerseits und von Halbleitern andererseits kann jede erforderliche Seriespannung ohne Serie-Transformator erzielt werden. Da der Kompensator nur Blindleistung liefern muss braucht er auf seiner DC-Seite keine DC-Speisung.





**Bild 3:** Modellaufbau einer Transformerless Advanced Series Compensation [1]

Im Vergleich zum UPFC kommt der Serienkompensator also auch ohne Shuntteil und dazu nötigen Shunttransformator aus. Dieser Kostenersparnis durch das Weglassen der Transformatoren von bis zu 40% steht ein erhöhter Aufwand an statischen Komponenten und ein eingeschränkter Regelbereich entgegen. Je nach Anforderung der praktischen Anwendung ist der transformatorlose reaktive Seriiekompensator jedoch die weitaus einfachere und kostengünstigere Lösung. Das Einsparen des Transformators hat unterschiedliche Konsequenzen [1]:

#### **Auswirkungen auf die Anlagenkonfiguration:**

- Die zur Einstellung des gewünschten Leistungsflusses durch die Leitung erforderliche Spannung wird allein durch Wechselrichter aufgebaut, die direkt in die Leitung geschaltet sind.
- Die erzeugte Spannung muss im Betrag genug gross sein (z.B. 65 kV), um die geforderte Aufgabe in einer Hochspannungsleitung (z.B. 326 kV) erfüllen zu können. Durch Serieschaltung mehrerer WR-Brücken kann das erforderliche Spannungsniveau aufgebaut werden.
- Durch versetzte Taktung der einzelnen seriegelagerten WR-Brücken gegeneinander kann eine der Sinusform sehr gut angenäherte Spannung erzeugt werden. Dadurch wird der Oberschwingungsgehalt der eingespeisten Spannung stark reduziert.
- Wird der Kompensator direkt am Sternpunkt eines bestehenden Leitungs-Transformators installiert, so wirkt die Streuinduktivität dieses bestehenden Transformators als Entkopplung. Falls der Kompensator im Zuge der Leitung aufgebaut wird müssen zusätzliche Entkopplungsinduktivitäten oder ein Filter am Kompensatorausgang installiert werden. Die verbleibenden Oberschwingungen im Leitungsstrom sind vernachlässigbar klein.

### **Auswirkungen auf die Regelung:**

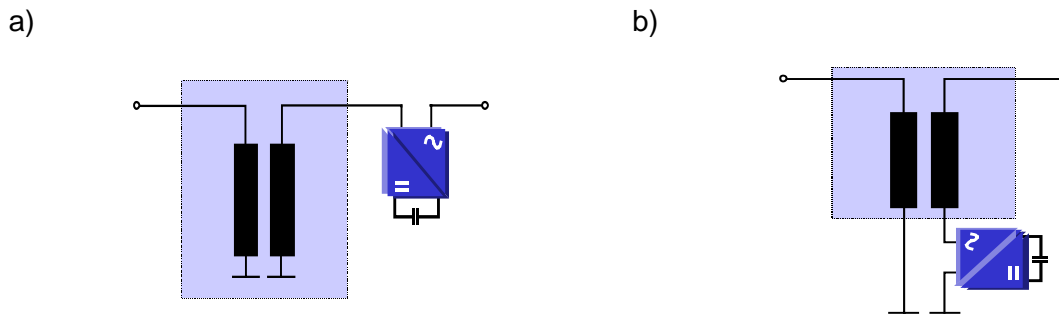
- Durch den transformatorlosen Aufbau muss jede WR-Brücke in jeder Phase einzeln geregelt werden. Der Leistungsfluss durch die Leitung kann allein mit Hilfe von Blindleistung eingestellt werden. Die Gleichspannung über den Kapazitäten des Wechselrichters wird gleichzeitig auf ihrem Sollwert gehalten, indem kurzzeitig Wirkleistung aus der Leitung bezogen oder an die Leitung abgegeben wird. Diese Regelungen des Leistungsflusses durch die Leitung und der Wechselrichter-Gleichspannung sind so entkoppelt worden, dass jede Teilaufgabe unabhängig voneinander ausgeführt werden kann.
- Die Gleichspannung kann entweder konstant auf einem Maximalwert gehalten oder in einem bestimmten Bereich variiert werden. Im ersten Fall wird die Amplitude der Ausgangsspannung für die Leistungsflussregelung allein durch Modulation eingestellt. Im zweiten Fall wird die Gleichspannung variiert, um damit auch die Amplitude der Ausgangsspannung bei gleichbleibendem Pulsmuster einzustellen. Mit dieser zweiten Regelungsmethode können die Verluste des Kompensators wie auch die eingespeisten Oberschwingungen im Vergleich zur Regelungsmethode mit konstanter Gleichspannung reduziert werden. Gleichzeitig kann der Arbeitsbereich bei kleinem Leistungsfluss durch die Leitung erweitert werden.

Im Rahmen von [1] wurde gezeigt, dass das Konzept des vorgestellten Kompensators machbar ist und dass die entwickelte Regelung einwandfrei funktioniert. Im Labormodell sind zusätzlich auch noch Massnahmen untersucht worden, die bei der Realisation einer solchen Anlage von grosser Wichtigkeit sind:

- Schutz der Anlage gegen Überspannung und Überstrom bei Netzfehlern.
- Direktes Aufstarten der Gleichspannungsseite ohne separate Vorladeeinrichtung.

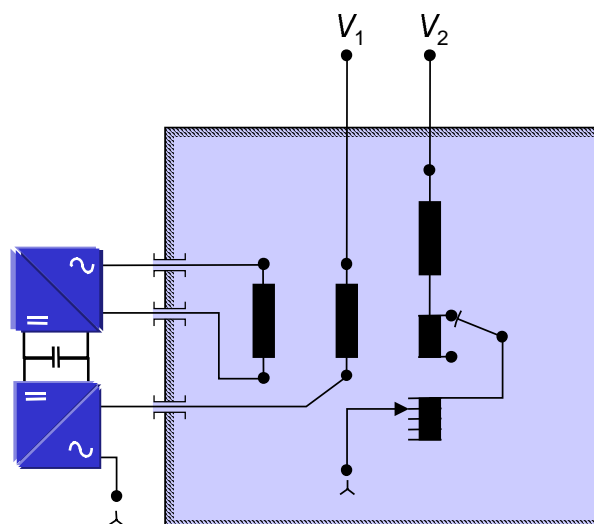
## **2.3. Potential transformatorloser Elemente**

Im Rahmen der transformatorlosen Einkopplung einer Zusatzspannung zur Leistungsflussregelung ist eine Herausführung der Transformatorsternpunktes als Anschlusspunkt der Leistungselektronik möglich. Das Funktionsprinzip der transformatorlosen Spannungseinkopplung wurde bereits beschrieben. Bei bereits vorhandenen Kuppel- oder anderen Netztransformatoren, ist dieser nach einer kleinen Gerätemodifikation weiter verwendbar. Die Einkopplung der Zusatzspannung erfolgt dann im herausgeführten Sternpunkt des Transformators (Bild 4 b). Dies stellt eine Nachrüstung bestehender Netzkomponenten mit leistungselektronischen Einrichtungen dar.



**Bild 4:** Transformatorlose Serienspannungseinkopplung  
 a) Unmittelbar in eine Übertragungsleitung  
 b) In den Sternpunkt eines Transformators

Für die nachträgliche Herausführung des Transformatorsternpunktes ist es erforderlich, die intern gebildete Sternpunktverbindung der Spulen R, S und T aufzutrennen und die nun freien Spulenenenden mit einem Leitermaterial so zu verlängern, dass diese durch neu anzubringende Bohrungen in der Kesselwandung herausgeführt werden können.



**Bild 5:** Prinzip der Erweiterung eines konventionellen Transformators mit Stufenschalter um leistungselektronische Komponenten zur Realisierung eines hybriden FACTS-Elementes zur schnellen Leistungsfluss- und / oder Spannungsregelung

Vor diesem Hintergrund kann unter Anwendung der Technologie des Serienkompensators eine Erweiterung des Arbeitsbereiches als hybride Lösung realisiert werden. Dieser Ansatz gleicht dem des UPFC in Topologie, indem ein weiterer Shuntumrichter eingesetzt wird. Die Primärfunktion des Shuntumrichters ist die Speisung des Zwischenkreises, so dass der Serieumrichter eine Spannung von beliebiger Amplitude und Phase einspeisen kann.

Dies bedeutet, dass auch Wirkleistung eingespeist werden und somit einen Vierquadrantenbetrieb des Serienkompensator ermöglicht. Der Shuntumrichter muss – bei Effektivwertbetrachtung – lediglich für die vom Serieumrichter benötigte maximale Wirkleistung ausgelegt werden, was die Dimensionen des zusätzlichen Umrichters klein hält. Eine zusätzliche Regelung der Anschlussspannung ist ebenfalls möglich.

## 2.4. Mittelspannungsanwendungen

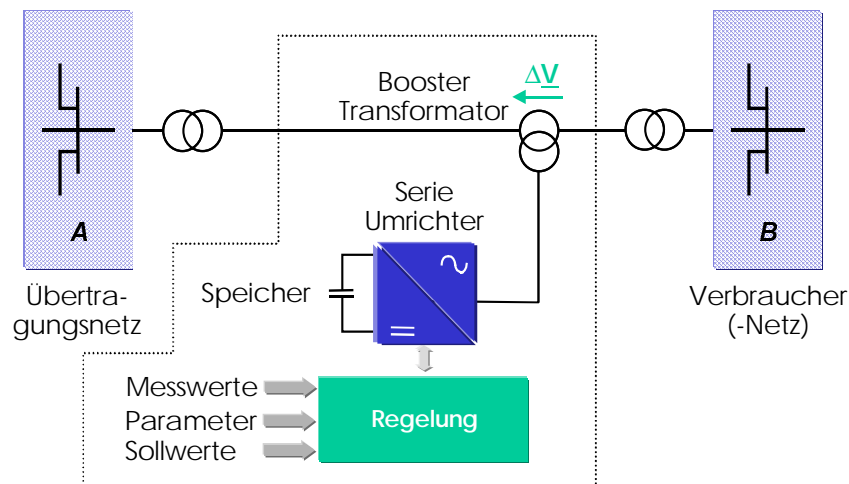
Zahlreiche auf der gleichen technologischen Plattform basierenden Anwendungen sind im Mittelspannungsbereich zu finden. Hier liegt der Anwendungsschwerpunkt weniger auf der Kommutierung von Leistungsflüssen oder der Dämpfung von Leistungsspendelungen, sondern mehr auf der Vergrößerung der Qualität der Versorgungsspannung oder der Verminderung der von Verbrauchern ins Netz emittierten Störungen. Zu diesen Störungen zählen hauptsächlich:

- Spannungsunsymmetrie,
- Oberwellen,
- Flicker,
- Spannungseinbrüche und –anstiege,
- Versorgungsunterbrechungen.

Die zur Kompensation dieser Störungen eingesetzten Geräte ähneln in ihrer Topologie den FACTS Elementen. Auch hier kommen Spannungsumrichter in Shunt- und Serienschaltung zum Einsatz. Hinsichtlich des deutlich geringeren Isolationsniveaus und der im Vergleich zur Hoch – und Höchstspannungsanwendungen geringeren Strombelastung, sind diese Geräte unter Anwendung der ebenfalls im – Rahmen der FACTS-Entwicklung gewonnenen Erkenntnisse – integrierbar und kostengünstig zu konstruieren. Da die Zielsetzung dieser Power-Quality-Betriebsmittel in der Abhilfe der oben genannten Störungen liegt, ist eine schnelle Antwortzeit ebenso erforderlich, wie eine robuste Ereigniserkennung, da nur damit eine optimale Versorgungsqualität gewährleistet werden kann. Daher liegt neben der Gerätetechnik hier ein besonderer Schwerpunkt auf der Gestaltung der Signalverarbeitung und des Regelungssystems, dass im Bereich weniger Millisekunden oder sogar im Mikrosekundenbereich reagieren muss. Die im Zusammenhang mit der transformatorlosen Spannungseinkopplung sowie der Geräteintegration gewonnen Ergebnisse, können hier unmittelbar übernommen werden und führen auch in diesem Bereich zu kostenoptimalen Gerätekonfigurationen für Power-Quality-Betriebsmittel.

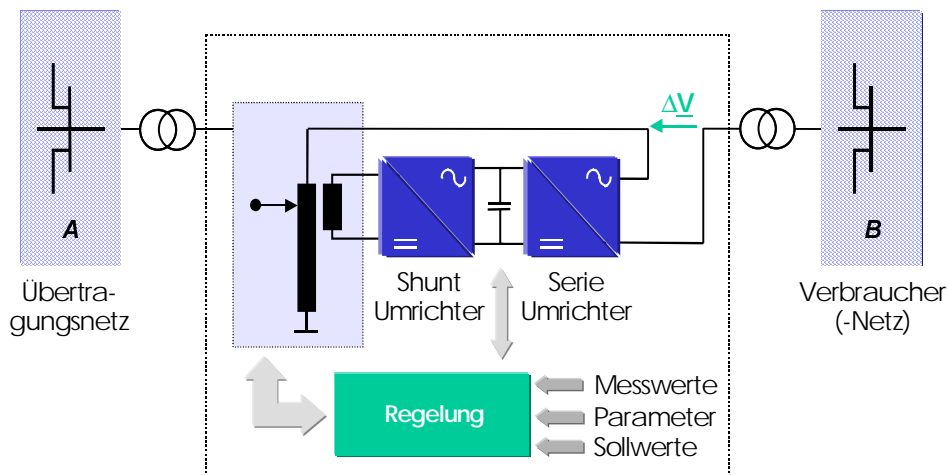
Der Dynamic Voltage Restorer (DVR) beispielsweise koppelt in Serie zu einer Übertragungsleitung eine Zusatzspannung ein. Dies gewährleistet ein symmetrisches Drehstromsystem mit konstantem Effektivwert auf der Verbraucherseite. Die einzuspeisende Energie wird durch einen Energiespeicher – hier als Kondensatorspeicher ausgeführt - bereitgestellt (Bild 6).

Eine typische Anwendung, in der zur Verbesserung der Versorgungsqualität das DVR-Konzept Einsatz findet, ist der Schutz eines gegen Spannungsabsenkungen sensitiven Verbrauchers. Bereits einphasige Spannungsabsenkungen um einige 10% im Millisekundenbereich können hier zu einem Ausfall einer ganzen Tagesproduktion durch Produktionsunterbrechung führen. Der eingesetzte DVR korrigiert ein- und dreiphasige Spannungsabsenkungen bis 80% über einen Zeitraum von einigen 100 ms.



**Bild 6:** Einsatz eines Spannungsumrichters zur Serienspannungseinkopplung zur Kompensation von Spannungseinbrüchen (Dynamic Voltage Restorer)

In Netzen hoher Kurzschlussleistung kann der Energiespeicher zur Wirkleistungsbereitstellung reduziert werden oder sogar vollständig entfallen. Bei einer Anlagenausführung als Unified Voltage Controller (UVC) koppelt in Serie zu einer Übertragungsleitung ein Spannungsumrichter eine Zusatzspannung ein (vgl. [6]). Dies gewährleistet ein symmetrisches Drehstromsystem konstanter Amplitude auf der Verbraucherseite ohne die Energieentnahme aus einem aufgeladenen Speicher während der Spannungskorrektur.



**Bild 7:** Anwendung von Spannungsumrichtern als Serie- und Shuntumrichter zur Regelung der Verbraucherspannung in Kombination mit einem Spartransformator unter Ausnutzung der Sternpunktspannung und der transformatorlosen Netzkopplung

Die wesentlichen Systemkomponenten des UVC sind der Spartransformator in Sternschaltung mit einer galvanisch getrennten Tertiärwicklung und der Shunt- sowie Serie-Umrichter. Wie eine Serienspannungseinkopplung wirkt der pro Phase angeordnete Serie-Umrichter.

Die maximal mögliche Spannungsabsenkung auf der Sekundärseite des Abspanntransformators an der Kuppelstelle zum Übertragungsnetz bestimmt das Übersetzungsverhältnis des Spartransformators. Es berechnet sich aus der Hälfte der Spannungsabsenkung. Soll der UVC beispielsweise eine Spannungsabsenkung von maximal 40% auf der Sekundärseite von diese Transformators korrigieren, ist ein Übersetzungsverhältnis von  $\ddot{u} \approx 1.25$  erforderlich.

Ohne Spannungsabsenkung erzeugt der Serie-Umrichter eine der Hochsetzung durch den Spartransformator entgegenwirkende Zusatzspannung, so dass das Gesamtübersetzungsverhältnis des UVC gleich eins wird. Ein zusätzlicher Stufenschalter, auch in Leistungselektronik ausführbar, vergrössert den Regelbereich.

Neben der Spannungskorrektur bei Netzfehlern bietet der UVC zahlreiche Vorteile im ungestörten Netzbetrieb. Durch die kontinuierliche Spannungseinkopplung kann mit einer geeigneten Reglerstruktur die aktive Regelung des Leistungsfaktors der angeschlossenen Verbraucher erfolgen.

In vermaschten Verteilungsnetztopologien ermöglicht die nach Betrag und Phase frei regelbare Zusatzspannung eine gezielte Beeinflussung der Leistungsflüsse. Diese führen aufgrund vorwiegend thermischer Probleme gerade bei Kabelnetzen oftmals zu lokalen Engpässen in der Übertragungskapazität. Als Folge besteht die Gefahr abnehmender Versorgungsqualität durch unnötige Schutzauslösungen.

Durch gezielte Regelung der Blindleistungsabgabe trägt der UVC dazu bei, den im Vergleich zu Freileitungen erhöhten kapazitiven Blindleistungsbedarf von Kabelnetzen, der vorwiegend in Schwachlastzeiten auftritt und zu häufig unzulässigen Spannungsüberhöhungen führt, dezentral zu decken. Auch die durch den vermehrten Einsatz von dezentralen Energieerzeugungsanlagen bedingte Oberschwingungsbelastung in der Verteilungsnetzebene reduziert der UVC durch aktive Filterung über die Spannungseinkopplung mit dem Shunt-Umrichter im ungestörten Netzbetrieb.

### **3. Gesamtsystem**

#### **3.1. Einsatzplanung**

Die Beurteilung eines Mehrfacheinsatzes von FACTS-Elementen erfolgt anhand netzwerktheoretischer Verfahren, in denen die Funktion des FACTS-Elementes als variable Reaktanz bzw. Spannungsquelle betrachtet wird. Um Verluste, Spannungsamplituden, Winkel, zu berücksichtigen, erfolgt die Netzdarstellung den heutigen Anforderungen der Netzanalyse entsprechend als Leistungsflussmodell.

Zur Erreichung einen gewünschten Leistungsflusses, ist ein optimierender Lastfluss erforderlich. Gegenüber dem bekannten Optimalen Lastfluss (OPF) sind dafür Erweiterungen notwendig, die auch die durch FACTS-Elemente gegebenen Stellmöglichkeiten berücksichtigen [3].

Die Grenzwerte und Sollwerte der einzelnen Stromkreise sind bekannt. Zusammengefasst umfasst das entwickelte Verfahren folgende Schritte:

- Mit einem topologischen Verfahren werden mögliche Einsatzorte für FACTS-Elemente in einem ersten Schritt identifiziert.
- An den Stellen, an denen der Leistungsfluss begrenzt werden soll, liefert der optimierende Lastfluss Sensitivitätskoeffizienten (Schattenpreise), deren Höhe Auskunft über die Wirksamkeit eines FACTS-Elements an dieser Stelle gibt.
- Mit dem optimierenden Lastfluss, in dem alle relevanten Grenzwerte berücksichtigt sind, wird die erforderliche Leistung der FACTS-Elemente bestimmt.
- Sind mehrere Kombinationen von Standorten möglich, so werden diese überprüft und auf ihre technischen und wirtschaftlichen Vorteile untersucht.
- Gegebenenfalls sind mehrere Lastzustände sowie verschiedene topologische Zustände zu betrachten, um eine möglichst allgemeine Lösung zu erhalten.

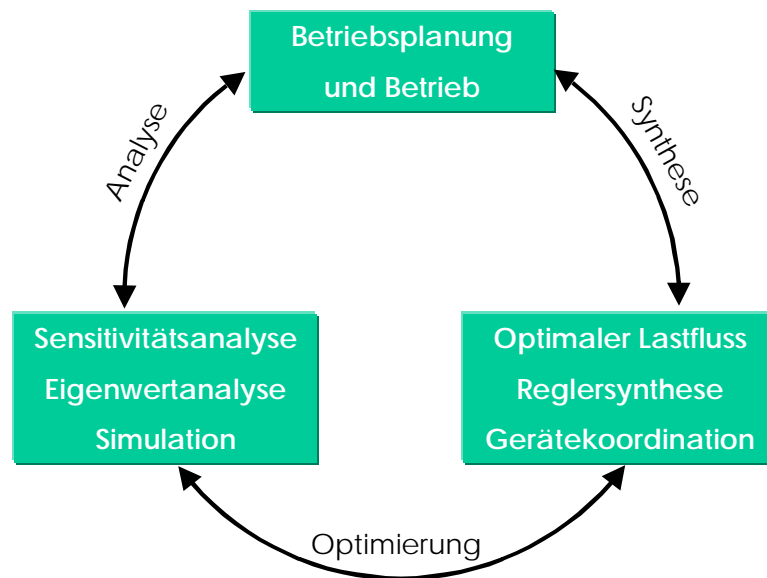
Aus dem einfachen topologischen Verfahren und auch durch Anwendung eines optimierenden Leistungsflusses lassen sich durch Umrechnung der Leistungswerte oder der einzukoppelnden Spannungen Reaktanzwerte einschliesslich ihrer Vorzeichen ableiten, die zur Korrektur des Leistungsflusses notwendig sind. Umgekehrt können durch iteratives Einfügen von Reaktanzen in Stromkreise, sofern es sich um eine geringe Anzahl von kritischen Zweigen handelt, Werte bestimmt werden, die eine Leistungsflusskorrektur bewirken. Aus diesen Reaktanzwerten folgen dann die Leistungswerte oder Spannungen, die auf die FACTS-Elemente zu übertragen sind. Die Bestimmung erfolgt durch Anwendung einer gewöhnlichen Lastflussberechnung.

Dieses Verfahren ist dann besonders einfach anzuwenden, wenn es sich um die Begrenzung eines bestimmten Flusses handelt. Ohne den Einsatz eines FACTS-Elementes ist der Fluss bekannt. Ausgehend von diesem unerwünschten Fluss wird durch Einfügen einer Reaktanz in Reihe mit der Leitungsreaktanz erstere variiert, bis sich der gewünschte Fluss einstellt. Die so bestimmte Reaktanz zusammen mit dem Strom ergibt die Leistung des Elementes. Sofern sich keine sekundären unerwünschten Auswirkungen ergeben, wird die Lösung in wenigen Iterationen gefunden.

## 3.2. Systemintegration

Die Systemintegration von FACTS-Elementen umfasst neben der gerätetechnischen Integration in das Netz auch die Anbindung an die leittechnischen Einrichtungen nebst systemtechnischer Anpassung an die bereits vorhandenen Regelungseinrichtungen im Überbertragungssystem. Für diese Vorgänge vordefinierte Parametersätze und –strukturen für die Regelungssysteme zu entwickeln, ist aufgrund der speziell auf die Anwendung zuzuschneidenden Systeme ebenso wenig möglich, wie die Erarbeitung einer allgemeingültigen Geräteauslegung.

Die Systementwicklung zur Lösung dieser Problemstellung zielt auf die Entwicklung eines Prozesses, der eine strukturierte Vorgehensweise bei der Auslegung und Integration von FACTS-Elementen beschreibt (vgl. Bild 8 und Bild 9).

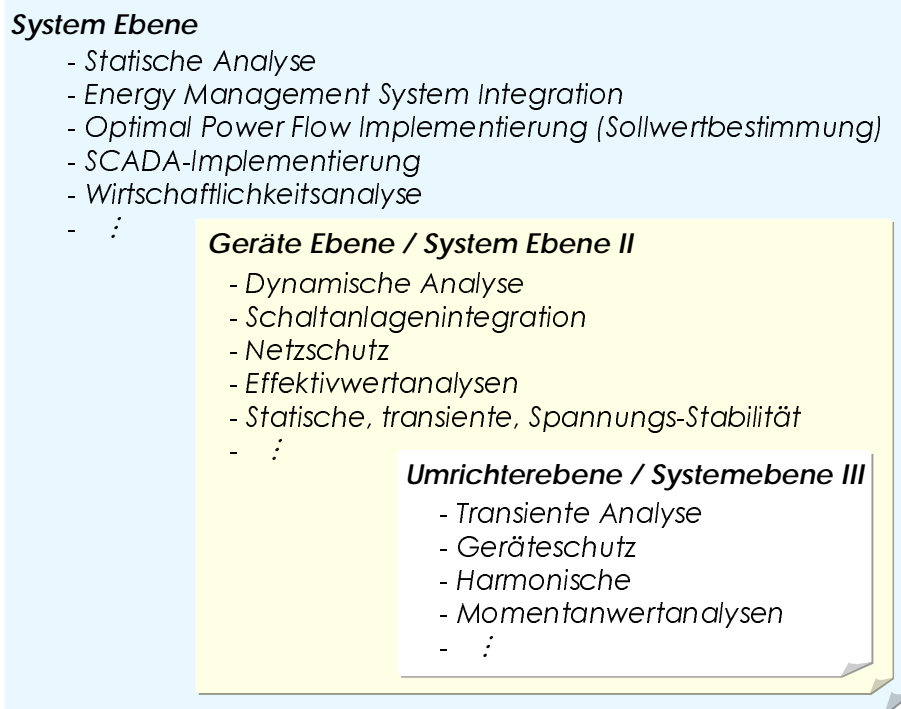


**Bild 8:** Mögliche Instanzen bei der übergeordneten Systemintegration und Gerätespezifikation

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Hierarchieebenen in einem elektrischen Energieübertragungssysteme steht im ersten Schritt die Analyse des Gesamtsystems im Vordergrund. Hier kommen gängige Verfahren zur Systemanalyse zum Einsatz. Nach Abschluss der Einsatzplanung, die neben dem Einsatzort bzw. den Einsatzorten auch eine erste Abschätzung der Baugrösse und Gerätetopologie erlaubt, erfolgt eine detailliertere Betrachtung der Netzumgebung am Einbauort hinsichtlich einer genauen Spezifikation der elektrischen Parameter des Gerätes. In einem iterativen Prozess erfolgt dann eine detaillierte Gerätetopologiebestimmung sowie die Festlegung weiterer konstruktiver Details.

Leistungsflussregelung als übergeordnete betriebliche Aufgabe erfolgt in der Regel über die in der Leitwarte angeordnete und um die neuen Betriebsmittel entsprechend erweiterte Betriebsführungssoftware. Hier erfolgt eine Sollwertbestimmung für die dezentral angeordneten FACTS-Elemente. Wird das schnelle Reaktionsvermögen dieser Betriebsmittel überdies für die Dämpfung dynamischer Vorgänge ausgenutzt ist die Dämpfungsregelung zunächst lokal zu realisieren. Eine Abstimmung mit den bereits im System vorhandenen Geräten schneller Reaktionszeit ist unbedingt erforderlich. Nur eine gesamtliche Betrachtung dieser Einrichtungen ermöglicht eine Parameterwahl, die eine gegenseitige Beeinflussung ausschliesst und den Gesamtnutzen der FACTS-Elemente optimiert.



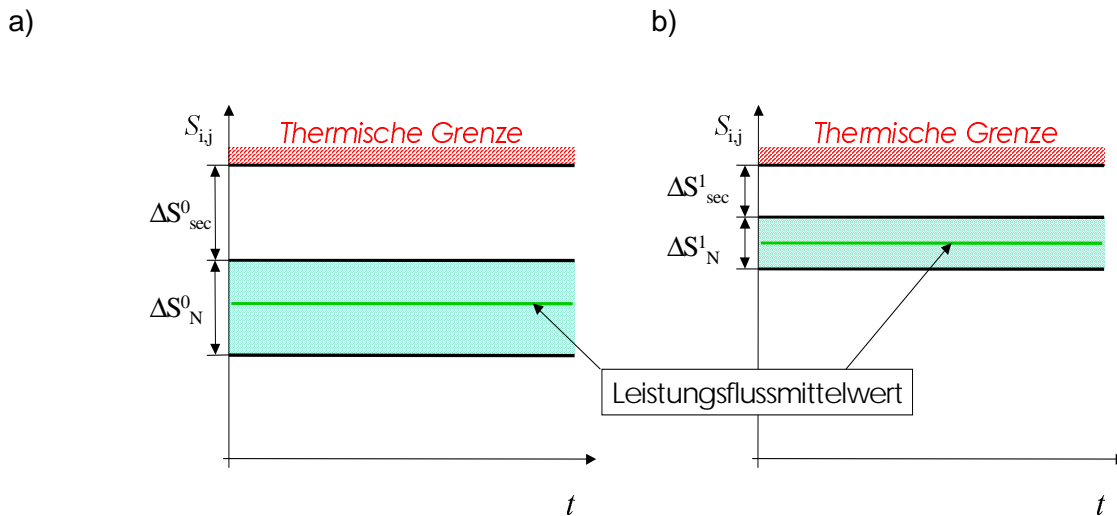


**Bild 9:** Relevante Systemebenen bei der Integration von FACTS-Elementen in elektrische Energieübertragungssysteme

### 3.3. Wirtschaftlichkeit

In der Vergangenheit standen quantifizierbare Faktoren im Vordergrund von Wirtschaftlichkeitsanalysen, wobei nicht quantifizierbare Faktoren lediglich als mehr oder weniger systematische Begründungen zur Installation neuer Betriebsmittel betrachtet wurden. Angesichts der aktuellen energiewirtschaftlichen Tendenzen, den physikalischen Energiefluss vom wirtschaftlichen Energiefluss getrennt zu betrachten, wächst die Bedeutung nicht quantifizierbarer Faktoren, insbesondere auch im Bereich von Zuverlässigkeit und Abwicklung von Lieferverträgen. Allgemein bestimmen anwenderspezifische Regulationsanforderungen die nicht quantifizierbaren Faktoren. Ein anderer Aspekt dieser Systembetrachtung ist die Anpassungsfähigkeit von FACTS-Elementen an spezifische Bedürfnisse eines Versorgungsunternehmens, welche zu der Einführung von massgeschneiderten FACTS-Elementen führen. Letztere zielen auf Geräte mit sehr kurzen Amortisationszeiten, die insbesondere durch die in den vorstehenden Kapiteln beschriebenen Anlagenlösungen ermöglicht werden.

Im Fall von mit natürlicher Leistung betreibbaren Übertragungsleitungen kann durch den gezielten Einsatz von FACTS-Elementen die wirksame natürliche Leistung verändert werden. Zusätzlich muss eine solche Leitung im sicheren Betriebszustand eine Sicherheitsmarge aufweisen, um Überlastsituationen zu vermeiden. Die wirtschaftlichste Belastung einer Leitung stellt der Leistungsmittelwert des Übertragungsmediums dar und kann von der wirtschaftlichsten Stromdichte abgeleitet werden (vgl. Bild 10 a).



**Bild 10:** Durchschnittliche Belastungsgrenze eines Übertragungsmediums mit Sicherheitsmarge  
 a) Ohne Leistungsflussregelung  
 b) Mit Leistungsflussregelung

Durch die Anwendung von FACTS-Elementen zur Reduktion der Auswirkung von Lastschwankungen auf das Übertragungsmedium kann die wirtschaftlichste Belastung der Leitung durch eine dann kleiner zu dimensionierende Sicherheitsmarge  $\Delta S_{sec}$  erhöht werden (vgl. Bild 10 b). Angenommen, dass auch bei erhöhter Belastung die Übertragung die gleiche Verfügbarkeit wie zuvor aufweisen muss ist eine schnelle Regelung erforderlich. Die ersten Schritte in der Auswertung einer solchen Lösung ist die Analyse des vom Versorgungsunternehmen spezifizierten Nutzens.

Im Zusammenhang mit energiewirtschaftlichen Aspekten resultiert der Vorteil von FACTS-Elementen zur Leistungsflussregelung und somit zur Regelung von Übertragungswegen aus spezifischen Funktionalitäten, wie zum Beispiel:

- Einsparen von Übertragungsgebühren durch Kommutierung von Leistungsflüssen auf eigene Übertragungswege,
- Erhöhte Stabilität und Ausgleichen der Belastung zwischen Übertragungsleitungen, um Verlust von Exportkapazitäten und dementsprechend Verlust von Erlösen zu vermeiden,
- Glätten der Leitungsbelastung durch schnelle Stromregelung zur Erhöhung des Exportvolumens über bestimmte Leitungen,
- Bereitstellen von Übertragungskorridoren zur Übertragung von Wirkleistungssekundenreserve ermöglicht optimalen Einsatz der Reserven,

Zur wirtschaftlichen Evaluierung werden alle massgebenden Faktoren auf einer qualitativen Ebene betrachtet und repräsentieren infolgedessen eine genauere Darstellung der systemischen Auswertung zusätzlicher FACTS-Elemente im Übertragungsnetz. Daraufhin werden wirkliche spezifische Vorteile des Einsatzes neuer Technologien im Übertragungsnetz ersichtlich. Im ersten Schritt zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit einer Investition erfolgt dann eine Kostenabschätzung an-

hand spezifischer Gerätekosten. Hier bestehen weitere Freiheitsgrade hinsichtlich der tatsächlichen Anlagengestaltung. Wesentlich bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung ist die Gegenüberstellung der Anlagenkosten mit den Wirtschaftlichkeitsfaktoren (vgl. Tabelle 1).

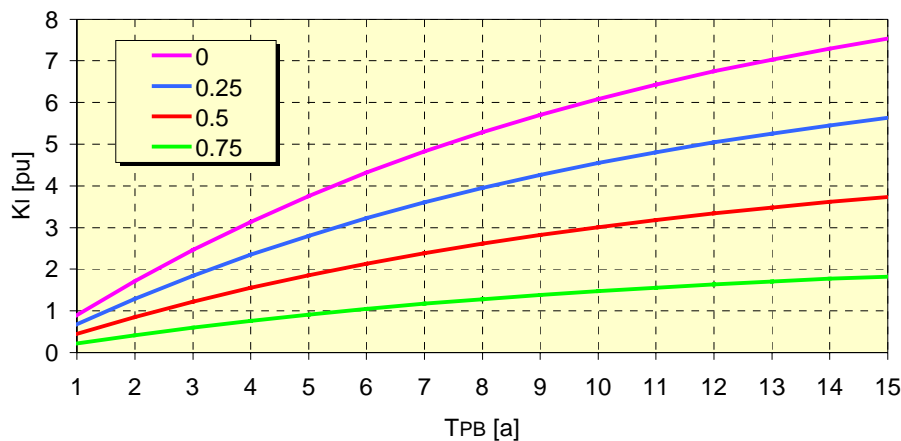
**Tabelle 1:** Auswahl wesentlicher Wirtschaftlichkeitskriterien nebst Wirtschaftlichkeitsfaktoren

<b>Wirtschaftlichkeitskriterium</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsfaktor</b>
Verschiebung oder Ersatz von Investitionen	Kapitalkostenreduktion
Einsparung durch Verlustreduktion	Kostenreduktion
Vermeidung von Ausfällen – Erhöhung der Versorgungssicherheit	Ausfallkosten; Verminderte Regressionszahlungen oder Haftpflichtleistungen
Erhöhung der Transportkapazität / Exportkapazität	Mehrumsatz
Verlagerung der Produktion in höherwertige Tarifzeiten	Optimale Ressourcennutzung
Abtransport lokaler Erzeugung	Verringerung Produktionsverlust
Nicht quantifizierbare Vorteile	Vertragliche Optimierung

Die Analyse von Fallbeispielen zeigt deutlich, dass bereits der Einsatz von FACTS-Elementen kleiner Leistung zur Abhilfe vorherrschender Netzprobleme führt. FACTS-Elemente haben nicht nur in longitudinalen Netzen mit langen Leitungen ihren Einsatzbereich, sondern helfen lokal wirkend auch in stark vermaschten Netzen, ein Übertragungsnetz anpassungsfähiger zu betreiben. Darüber hinaus zeigt die Einsatzplanung für diesen Fall, dass mehrere Einsatzorte für FACTS-Elemente verschiedener Funktionalität zur Lösung eines speziellen Übertragungsengpasses geeignet sind. Bezogen auf diesen Fall ist die Wirtschaftlichkeit der Lösung bereits aufgrund der Verschiebung geplanter Investitionen in das Übertragungsnetz gerechtfertigt.

Unter Annahme beispielsweise eines Leistungsflussreglers der die vorher erwähnten Regelungsfunktionen ermöglicht kann man allgemein die Gerätekosten ( $K_i$ ) ins Verhältnis zu der Amortisationszeit ( $T_{PB}$ ) setzen (vgl. Bild 11).

Für eine gezielte Anwendung eines Leistungsflussreglers zur Verlustminimierung sind die variablen Kosten durch die Verluste des Gerätes und die Erlöse durch die Einsparungen an Primärenergie gegeben. Unter Annahme, dass die Verluste eines FACTS-Elementes vernachlässigbar sind und die Amortisationszeit fünf Jahre beträgt, sollte der Leistungsflussregler maximal ungefähr das vierfache der jährlichen Einsparungen an Primärenergie kosten.



**Bild 11:** Erforderliche Investitionskosten bezüglich jährlicher Erlöse im Vergleich zu Amortisationszeit für unterschiedliche variable Kosten (0 pu .. 0.75 pu) und 1% festgelegten Kosten

Erfolgt eine Anwendung des Leistungsflussreglers zur schnellen Leistungsflussregelung, um z.B. das Exportvolumen vergrössern zu können, weisen die variablen Kosten und Erlöse beeinflussenden Faktoren eine sehr grosse Bandbreite auf. Daher ist es nicht möglich, ein alle qualitativen Faktoren enthaltendes allgemeines Wirtschaftsmodell für diese Anwendungen zu formulieren.

## 4. Zusammenfassung

Verschiedene Gerätekonzepte im Bereich der leistungselektronischen Betriebsmittel für die elektrische Energieübertragung (FACTS-Elemente) sind heute bekannt und Gegenstand vieler wissenschaftlich technischer Untersuchungen. Die systemorientierte Entwicklung, die den gesamten Prozess von der Problemidentifikation im Netz bis zur Inbetriebnahme eines massgeschneiderten Gerätes betrachtet, ist grundlegend für einen wirtschaftlich Einsatz dieser neuen Elemente. Die gesamtheitliche Betrachtung der hier zugrunde liegende Problematik ermöglicht neben der wirtschaftlichen Optimierung der Gerätetopologie auch eine effektive Systemintegration.

Unter Ausnutzung der bekannten Gerätekonzepte und durch den Einsatz heute verfügbarer Technologien aus dem Bereich der Leistungselektronik sind FACTS-Elemente realisierbar, die bezüglich einer speziellen Netzproblematik angepasst und durch die Reduktion primärtechnischer Einrichtungen kostenmässig im Vergleich zu den bekannten Geräteausführungen deutlich günstiger realisiert werden können. Als Beispiel für so ein Betriebsmittel ist hier die transformatorlose Seriенkompensation untersucht worden. Diese auf Spannungsumrichtern basierende Einrichtung zeichnet sich durch eine transformatorlose Seriенspannungseinkopplung zur Regelung der Übertragungsparameter einer Leitung aus. Da die Transformatorkosten im Rahmen von FACTS-Anwendungen an den Gesamtkosten einen Anteil von bis zu 40% aufweisen können, ist durch das Einsparen der Transformatoren eine erhebliche Kostenreduktion erfolgt.

Das Prinzip der transformatorlosen Spannungseinkopplung zeigt überdies einen Weg für massgeschneiderte Lösungen auf. Das Ergänzen bestehender Anlagen mit leistungselektronischen Geräten, von Spannungseinkopplung in den Sternpunkt eines Transformators bis hin zur Integration von konventionellen Netzkupplern mit schnellen Regelungseinrichtungen auf Spannungsumrichterbasis, bietet die Grundlage für systemorientierte FACTS-Elemente.

Der Einsatz von FACTS-Elementen für elektrische Energiesysteme ist nicht auf die Hoch- und Höchstspannungsebene beschränkt sondern ermöglicht auch in Verteilungsnetzen auf der Mittelspannungsebene eine Verbesserung der Betriebsverhaltens. Hier stehen aufgrund der spezifischen Problemstellungen weniger die Leistungsflussregelung und Systemdämpfung im Vordergrund, sondern mehr die Verbesserung der Versorgungsqualität. Unter Verwendung der gleichen Technologieplattform finden hier Geräte zur Kompensation von Spannungseinbrüchen, unterbrechungsfreien Stromversorgung, aktiven Filterung, etc. ein grosses Anwendungsgebiet. Auch die Kombination dieser Funktionalitäten mit leistungsflussregelnden Eigenschaften ermöglicht in Verteilungsnetzen einen vergrösserten Spielraum in der Betriebsführung und gleichmässigeren Ausnutzung der installierten Übertragungs- bzw. Verteilungseinrichtungen. Mit den vorliegenden Ergebnissen sind neben anpassungsfähigeren Übertragungsnetzen auch "Flexible AC Distribution Systems, FACDS" realisierbar.

Neben der Entwicklung des grundsätzlichen Verfahrens zur Systemplanung und –spezifikation mit FACTS-Elementen lag ein besonderer Schwerpunkt auf der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit dieser Einrichtungen. Über die Analyse der Wirtschaftlichkeitsfaktoren hinaus und die Berechnung spezifischer Anlagenkosten, ist anhand von Fallbeispielen unter Analyse quantifizierbarer und nicht quantifizierbarer Faktoren die Wirtschaftlichkeit von FACTS-Elementen nachgewiesen worden. Je nach Anwendungsgebiet eignen sich FACTS-Elemente nicht nur zur Verbesserung des Betriebsverhaltens langer Leitungen. Aufgrund der sehr geringen zu installierenden Leistungen ist deren wirtschaftliches Anwendungsgebiet insbesondere auch in stark vermaschten Übertragungsnetzen zu suchen.

In vielen Fällen, wie beispielsweise bei lokalen Engpässen oder einem veränderten Exportverhalten, ermöglicht bereits die Anwendung sehr kleiner Einheiten Abhilfe für diese Problemstellungen. Systemorientierung bei diesen Ausführungen bedeutet vorrangig die Analyse und Spezifikation einer zusätzlichen Funktion, die spezifische Netzprobleme löst und durch die Integration leistungselektronischer Einrichtungen zum System wirtschaftlich hinzugefügt werden kann. Die Betrachtung der Installation eines "neuen Betriebsmittels" tritt dabei in den Hintergrund. Mit den Ergebnissen des hier beschriebenen Projektes liegt damit neben einer Grundlage für Spezifikation systemorientierter FACTS-Elemente, deren technische Realisierung bezüglich aller Instanzen der elektrischen Energieübertragung und –verteilung, auch ein Verfahren zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit dieser Einrichtungen unter Berücksichtigung des Gesamtsystems vor.

## 5. Literatur

- [1] Beer, A.: "*Transformerless Advanced Series Compensation*", Dissertation in Bearbeitung beim Institut für Leistungselektronik und Messtechnik, ETH Zürich
- [2] Erb, Th.: "*Untersuchung des Verhaltens des UPFC im Netzbetrieb und bei Netzstörungen*", Dissertation, Institut für Leistungselektronik und Messtechnik, ETH Zürich, 1999
- [3] Orfanogianni, T.: "*A flexible software environment for steady-state power flow optimization with series FACTS devices*", Dissertation, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, 2000
- [4] PSEL-BfE-Projekt 22301/61701 – Teilbericht: "*Wirtschaftlichkeit von FACTS-Elementen*"
- [5] Arora, A.; Chan, K.; Jauch, T.; Kara, A.; Wirth, E.: "*Innovative system solutions for power quality enhancement*", ABB Review 3/98
- [6] Jauch, Th.; Kara, A.; Rahmani, M.; Westermann, D.: "*Verbesserung der Versorgungsqualität durch schnelle Spannungskorrektur*", ABB Review, 4/1998, S. 25-36
- [7] Daehler, P.; Pfister, R.; Rahmani, M.; Westermann, D.: "*Protection of industrial plants against voltage Dips and Swells using the dynamic voltage restorer*", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> regional CIGRE conference for Arab States, 25.05.99 – 27.05.99, Doha, Qatar
- [8] Guay, J.; Pfister, R.; Rahmani, M.; Westermann, D.: "*Hybrid FACTS device applications for tailor-made solutions*", CIGRE Symposium, 7.6.99 – 9.6.99, London
- [9] Guay, J.; Pfister, R.; John, A.; Westermann, D.: "*Innovative Lösungen zur Sicherstellung der Versorgungsqualität*", VDE/ETG-Tage 99, 10.99, München,
- [10] Germod, A, et.al. : Berichtswesen zum PSEL Projekt 151, "*L'impact des FACTS a la conduite des réseaux électriques*"
- [11] Stemmler, H.: "*State of the Art and Future Trends in High Power Electronics*", Invited Lecture for the International Power Electronics Conference (IPEC '00), Proceedings Vol.1, pp.4-14, 3-7 April 2000, Tokyo, Japan

