

# **Sicherung der elektrischen Versorgungsqualität durch Einsatz eines multifunktionalen aktiven Filters**

## **Ensuring a high degree of "security of energy supply" by use of a multifunctional active filter unit**

B. Sc. Frank Heinze und Dipl.-Ing. Peter Ulrich, H. Kleinknecht GmbH & Co. KG, Niederlassung Ilmenau, Weimarer Str. 1 b, D-98693 Ilmenau, Deutschland, [frank.heinze@kleinknecht.de](mailto:frank.heinze@kleinknecht.de) und [peter.ulrich@kleinknecht.de](mailto:peter.ulrich@kleinknecht.de)

### **Kurzfassung**

Heutige technologische Prozesse benötigen eine hohe Spannungsqualität, um störungsfrei abzulaufen. Gegenwärtig verschlechtert sich aber die Spannungsqualität, da immer mehr über Leistungselektronik gespeiste Abnehmer und immer weniger dämpfend wirkende Abnehmerlast in unseren Niederspannungsnetzen betrieben werden. Moderne aktive Filter sind derzeit in der Lage, spezialisiert einzelne Qualitätsmerkmale der Spannung zu verbessern. Der Parallelbetrieb mehrerer aktiver Filter in einem Netz führt jedoch oft nicht zur gewünschten Qualitätsverbesserung.

Im Beitrag werden ausgehend von einer Diskussion der Folgen unzureichender Spannungsqualität aus Sicht der Produktion die Anforderungen an moderne Kompensationsanlagen / aktive Filter hergeleitet. Nachfolgend wird eine technische Lösungsmöglichkeit erläutert, mit der die Spannungsqualität durch einen aktiven Filter umfassend und leistungsvariabel verbessert werden kann. Der Nachweis der Funktion erfolgt auf der Basis von Simulations- und Messergebnissen.

### **Abstract**

The technological processes of today require excellent power quality for smooth running without disturbance. However, in recent times voltage quality has slumped because ever more users get their power by means of power electronics and the types of user load on the low-voltage grids or networks provide ever less damping. The most up-to-date active filter systems are now capable of improving particular quality features on an individual, specialised basis. However, operating a number of active filters in parallel within a grid or network often fails to achieve the desired voltage quality improvement.

Starting with a discussion of the consequences of poor voltage quality, the present paper draws conclusions on what is required of modern compensation devices or active filters. There follows a description of a possible technical remedy, an active filter, whereby voltage quality may be comprehensively improved, with varying power. Evidence of how well it functions is provided in the form of simulation results and of actual measurements.

## **1 Ausgangspunkt und Problemstellung**

Unsere Versorgungsnetze wandeln sich – nicht nur wegen der aktuellen Energiepolitik. Während sich der Anteil ohmsch-induktiver Abnehmerbelastung verringert, werden immer mehr Abnehmer über leistungselektronische Bauelemente gespeist. Die Folge ist eine Verschlechterung der Spannungsqualität, die zu verminderter Produktqualität, ge- bzw. zerstörten Anlagen und im ungünstigsten Fall zu nachfolgendem Produktionsausfall führen kann. Beispiele dafür sind „kalte“ Schweißstellen in der Automobilindustrie, Unwucht in Walzmaschinen in der Stahlindustrie, Ausfall von SPS-Steuerungen, Transformatorzerstörung oder auch zusätzliche Blindenergiekosten gegenüber dem Energieversorger durch nicht eingehaltene Grenzwerte laut dem Energieliefervertrag.

Die Kennwerte der Spannungsqualität werden in der DIN EN 50160 [1] definiert, Verträglichkeitspegel in der DIN EN 61000-2-2 [2] bzw. -2-4 [3] angegeben. Um diese

Verträglichkeitspegel zu gewährleisten, werden Kompensationsanlagen eingesetzt, welche die Auswirkungen von Störmissionen reduzieren sollen. Oft werden mehrere Kompensationsanlagen mit unterschiedlichen Aufgaben in einem galvanisch gekoppelten Netz betrieben, die nicht immer optimal aufeinander bzw. auf den technologischen Prozess abgestimmt werden können. Im folgenden Abschnitt werden aktuelle Anforderungen an Kompensationsanlagen aufgeführt.

## **2 Anforderungen an eine moderne NS-Kompensationsanlage**

Die Aufgaben von Niederspannungs-Kompensationsanlagen änderten sich in den letzten Jahren grundlegend. Während noch vor wenigen Jahren im Wesentlichen kapazitive Blindleistung benötigt wurde, um den Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$  zu optimieren, müssen heute in Niederspannungsnetzen oft zeitgleich eine Vielzahl an Kompensationsaufgaben erfüllt werden, z. B.:

- dynamische Kompensation der Verschiebungsblindleistung (induktiv / kapazitiv)
- Minimierung der Spannungsverzerrung (Oberschwingungen)
- Kompensation von Flicker, die durch Wirk- und / oder Blindleistungschwankungen verursacht werden
- Kompensation von voltage dips / voltage swells
- Verbesserung des Unsymmetriegrades

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- parallele Erfüllung unterschiedlicher Kompensationsaufgaben durch eine Anlage
- Variabilität der aufgabenbezogenen Kompensationsleistung,
- problemlose Anlagenerweiterung
- zuverlässiger Betrieb
- einfaches Handling

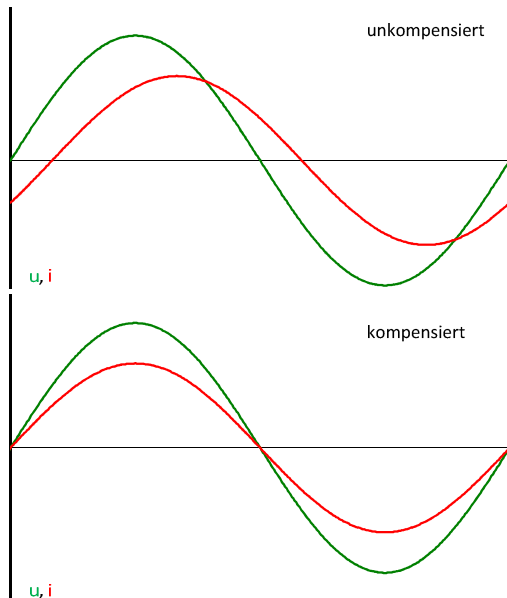
Oft ist es wünschenswert, dass sich die Kompensationsanlage nach einer Änderung der Abnehmerstruktur im Netzabschnitt auf die neuen Vor-Ort-Gegebenheiten anpassen lässt.

Diese Anforderungen lassen sich durch den Einsatz eines multifunktionalen aktiven Filters realisieren. Wesentliche Lösungsansätze werden nun vorgestellt.

### 3 Lösung „multifunktionaler aktiver Filter“

#### 3.1 Softwaretechnische Lösungsansätze

##### 3.1.1 Verschiebungsblindleistungskompensation



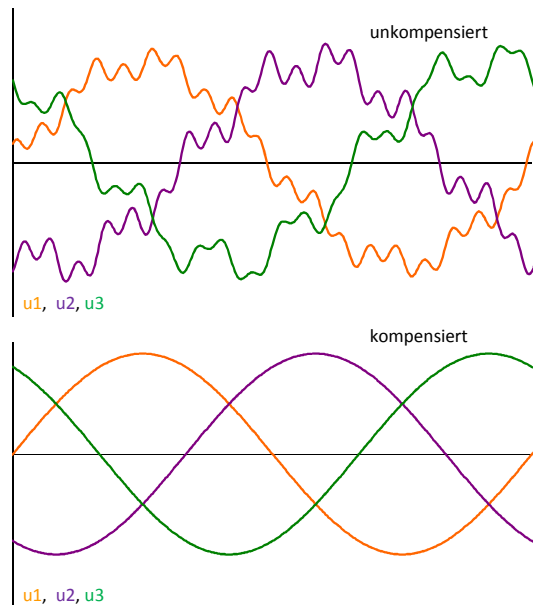
**Bild 1** (un-)kompensierte u-i-Momentanwertverläufe bei induktivem Leistungsbezug

Der Verschiebungsblindleistungsregler dient der Kompensation der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom (Bild 1) und damit der Optimierung des Verschiebungsfaktors  $\cos \varphi$ . Durch Einspeisung eines induktiven bzw. kapazitiven Blindstromes unter Berücksichti-

gung des Sollwertes  $\cos \varphi$  lässt sich der gewünschte Verschiebungsfaktor einfach realisieren.

##### 3.1.2 Oberschwingungskompensation

Eine Oberschwingungskompensation dient der Verringerung des Verzerrungsgrades der Spannung. Es werden Spannungs- und Stromregelung unterschieden. Das Ziel bei einer Spannungsregelung ist die Minimierung von Spannungsüberschwingungen (auch wenn im zu kompensierenden Netz keine Oberschwingungsquellen auftreten), bei einer Stromregelung die Reduzierung der Oberschwingungen des Einspeisestromes. Eine Stromregelung kompensiert also die Oberschwingungsstöremission der im zu kompensierenden Netz versorgten Abnehmer, wodurch letztlich die Spannungsverzerrung auf den Wert der Spannungsverzerrung des vorgeordneten speisenden Netzes reduziert werden kann. Bild 2 veranschaulicht unkompenzierte und kompensierte verzerrte Spannungsmomentanwertverläufe.



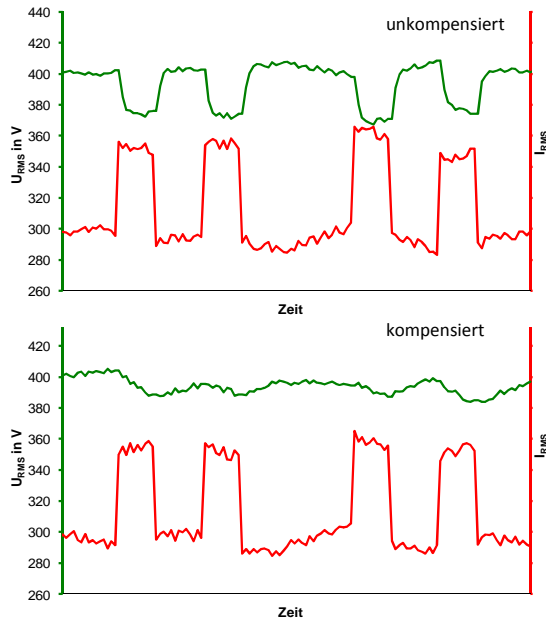
**Bild 2** (un-)kompensierte verzerrte u-Momentanwertverläufe

Es ist möglich, für jede diskrete Oberschwingung (2. - 50. Harmonische) Regler vorzusehen. In der Praxis reicht es meist aus, zeitgleich 10 diskrete Oberschwingungen zu kompensieren. Üblich ist eine Vorgabe für jeden einzelnen Regler bezüglich Regelfrequenz und maximalem Kompensationsstrom / Kompensationsleistung. Diese Herangehensweise lässt sich optimieren, indem man in Abhängigkeit von der aktuellen Spannungsverzerrung den einzelnen Reglern temporär die Regelfrequenz und den maximalen Kompensationsstrom zuweist. Ein solcher „Automatikbetrieb“ nutzt die zur Verfügung stehende Oberschwingungskompensationsleistung trotz begrenzter verfügbarer Regleranzahl stets optimal. Je nach technologischen Anforderungen können dabei höherfrequente Harmonische (häufige Ursache für IT-Störungen) oder stromstarke, meist niederfrequente, Harmonische

(häufige Ursache thermischer Sicherungsfehlauslösungen) priorisiert werden.

### 3.1.3 Flickerkompensation

Periodische Stromeffektivwertänderungen verursachen an der Netzimpedanz periodische Spannungseffektivwertänderungen, die in Abhängigkeit von Einbruchtiefe, -dauer und -form zu unzulässigen Flickerwerten  $P_{st}$  bzw.  $P_{lt}$  führen können. Ziel der Flickerkompensation ist es, durch Einspeisung eines 50-Hz-Blindstromes oder auch – bei entsprechender Zwischenkreisenergie – eines 50-Hz-Wirkstromes die Spannungseinbruchtiefe zu minimieren und die -einbruchsform zu „glätten“ (Bild 3).



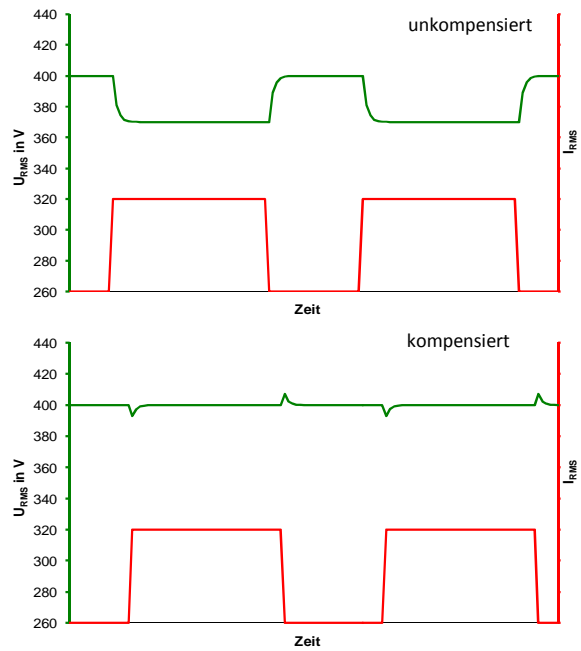
**Bild 3** (un-)kompensierte U-I-Effektivwertverläufe bei flickerverursachenden Lastsprüngen

Eine vollständige Kompensation von Spannungseinbrüchen, die von Wirklastsprüngen verursacht und mittels Blindstrom kompensiert werden, kann in kurzschlusschwachen Netzen zu einer Erhöhung des Flickerwertes im vorgeordneten Netz führen. In diesem Fall müssen die Regler so eingestellt werden, dass sich die  $P_{st}$ -Werte des kompensierten und des vorgeordneten Netzes bei maximaler kompensierter Störemission angleichen.

### 3.1.4 Kompensation lastverursachter voltage dip

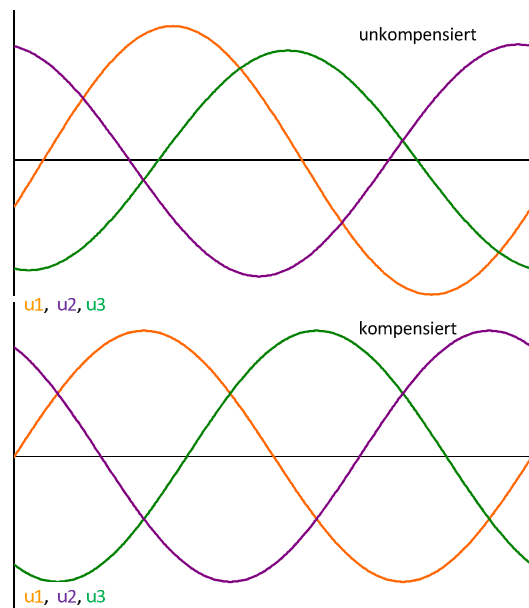
Leistungsstarke elektrische Abnehmer, die periodisch für nur wenige Netzperioden dem Netz Leistung entnehmen (z. B. Pressschweißmaschinen), verursachen Spannungseinbrüche und somit Flicker. Unter Kenntnis des Abnehmerverhaltens kann ein aktiver Filter dem gemessenen Laststrom kapazitiv gegensteuern, um den Spannungseinbruch zu verringern [4]. Bild 4 dokumentiert die Effektivwertverläufe des periodischen Laststromes und die zugehörige unkompensierte und die kompensierte Spannung. Der Vorteil einer solchen Steuerung liegt in der äußerst schnellen, nahezu vollständigen Kompensation des Spannungseinbruches. Im Unterschied zu dem im Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Verfahren zur Flickerkompensation

lässt es sich unter wirtschaftlichen Aspekten jedoch nur für Abnehmer(gruppen) verwenden, die nur kurzfristig Strom beziehen.



**Bild 4** (un-)kompensierte U-I-Effektivwertverläufe bei voltage-dip-verursachenden Lastsprüngen

### 3.1.5 Unsymmetriegradkompensation

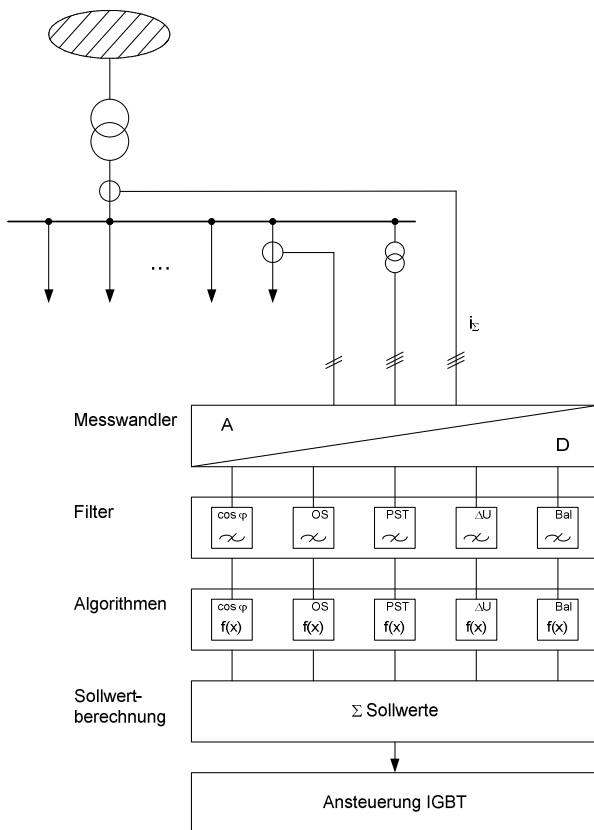


**Bild 5** (un-)kompensierte unsymmetrische u-Momentanwertverläufe

Leistungsstarke unsymmetrische Belastungen, z. B. zwei-phasige Induktionsöfen, führen zu einer Anhebung des Unsymmetriegrades der Spannung. Durch Kompensation des Gegensystems des Einspeisestromes wird die Spannung wieder symmetriert. Bild 5 dokumentiert die Momentanwertverläufe eines unsymmetrischen und eines symmetrierten dreiphasigen Spannungssystems.

### 3.1.6 Realisierung paralleler Kompensationsaufgaben

Bild 6 verdeutlicht stark vereinfacht das Funktionsprinzip. Die notwendigen elektrischen Größen – dreiphasig Spannungen und Einspeiseströme sowie zweiphasig Einspeiseströme von Abnehmer(gruppen), deren Leistungsbezug voltage dips verursachen und die entsprechend dem im Abschnitt 3.1.4 dargelegten Verfahren kompensiert werden sollen – werden über A/D-Wandler einer Steuereinheit zugeführt. Für jede Kompensationsaufgabe werden diese Größen separat gefiltert und einem Algorithmenblock zugeführt. Nachfolgend werden unter Berücksichtigung der jeweiligen anteiligen Leistung Sollwerte für jede Kompensationsaufgabe berechnet. Deren vorzeichenbehaftete Summe wird als Sollwert den Reglern der IGBT-Leistungsmodule zugeführt.



**Bild 6** vereinfachtes Funktionsprinzip multifunktionelle Regelung

## 3.2 Hardwaretechnische Lösungsansätze

### 3.2.1 Leistungsvervariabilität

Um Kompensationsleistung kundenspezifisch standardisiert anbieten zu können, ist ein modularer Aufbau sinnvoll. Üblich sind Master-Slave-Kombinationen.

Die Realisierung des multifunktionalen aktiven Filters unter Verwendung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen softwaretechnischen Lösungen erfolgte in standardisierten Modulen (Größe TS8-Rittalschrank). Die Messwerterfassung, -verarbeitung und Sollwertberechnung erfolgt in einem Steuerschrank, der identische 250-kvar-Leistungsmodul ansteuert. Somit ist es möglich, flexible

Leistungen anzubieten bzw. bei Bedarf auch Kompensationsleistung nachzurüsten.

### 3.2.2 Anpassung bei Änderung des Abnehmerverhaltens

In einem elektrischen Versorgungsnetz kann es zu Änderungen der Abnehmerstruktur / des Abnehmerverhaltens kommen, z. B. bei Leistungserhöhung, bei Modernisierung des Produktionsequipments oder bei Nutzung einer Werkhalle für eine neue Fertigungsstraße. Vorhandene Kompensationsanlagen sind dann nicht mehr optimal an den geänderten technologischen Prozess angepasst.

Die in Abschnitt 3.1 vorgestellten softwaretechnischen Lösungsansätze wurden für einen Einsatz des multifunktionalen aktiven Filters als zentrale Kompensation optimiert, die Hardware (Steuerschrank und Leistungsmodul) wurde unabhängig von den Kompensationsaufgaben konstruiert. Deshalb kann mit dem vorgestellten Konzept „multifunktionaler aktiver Filter“ sowohl die Änderung der Leistungsaufteilung für die unterschiedlichen Kompensationsaufgaben, als auch die Nachrüstung zusätzlicher Kompensationsaufgaben jederzeit softwaretechnisch erfolgen. Eine solche Kompensationsanlage „multifunktionaler aktiver Filter“ passt sich an die Anforderungen des jeweiligen technologischen Prozesses an.

## 3.3 Zuverlässigkeitserhöhung der Kompensationsanlage

Ein zuverlässiger Betrieb des multifunktionalen aktiven Filters wurde durch einen mehrstufigen Schutz realisiert:

- automatisches Leistungsderating zwecks Vermeidung thermischer Überlastung
- Resonanzdetektion verbunden mit temporärer Frequenzsperre
- Selektiver Schutz der einzelnen Leistungsmodul vor transienter Überlastung

Im Ergebnis schützt sich diese Kompensationsanlage selbst vor Überlastung. Die Kompensationsaufgaben werden dann mit verminderter Leistung weiter erfüllt. Wird ein kritischer Netzzustand „Resonanz“ festgestellt, so werden die betroffenen Frequenzen in der Oberschwingungsregelung temporär gesperrt – eine Wiederfreigabe erfolgt erst bei Vorliegen unkritischer Impedanzverhältnisse. Eine transiente Überlastung führt zu einer sofortigen Sperre der Zündimpulse des betroffenen Leistungsmoduls, die übrigen Leistungsmodul arbeiten entsprechend ihrer Sollwertvorgabe weiter.

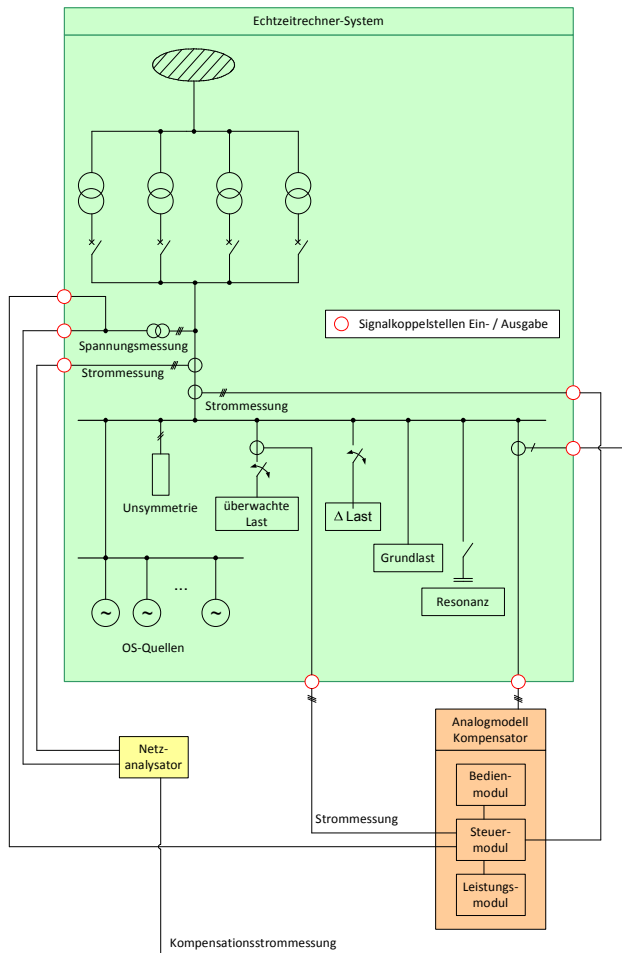
Der multifunktionelle aktive Filter lässt sich in Leitsysteme integrieren und fernsteuern.

## 4 Funktionsnachweis

### 4.1 Simulation mit Echtzeitrechner

Sowohl die Entwicklung als auch der Funktionsnachweis vor dem ersten Praxiseinsatz des multifunktionalen aktiven Filters erfolgten an einem Echtzeitrechnersystem (Bild 7). In diesem Echtzeitrechnersystem (grün hinterlegt) lassen sich dreiphasige elektrische Netze im Zeitbe-

reich berechnen – eine Netzperiode „dauert“ dann tatsächlich 20 ms. Das System verfügt über A/D- und D/A-Schnittstellen zum realen technischen Equipment. In diesem Fall wurden ein Analogmodell des multifunktionalen aktiven Filters (bestehend aus einem leistungsangepassten IGBT-Leistungsmodul und einem Steuerschrank (ocker hinterlegt) und ein PQ-Messgerät (gelb hinterlegt) angeschlossen. Die entsprechenden Messsignale wurden über Wandler ein- bzw. ausgekoppelt.



**Bild 7** Echtzeitrechner mit single-line-Netz und gekoppelte analoge Technik

In dem gewählten elektrischen Netz (Bild 7 – grün hinterlegt) lassen sich wesentliche Kennwerte

- Netzkurzschlussleistung
- Belastung
- Pulsmuster und Leistung variabler Lasten
- Oberschwingungsemissionen (Frequenzen, Beträge und Winkel)
- Resonanzfrequenzen der Impedanz

online ändern. Die Kompensationswirkung des multifunktionalen aktiven Filters lässt sich unter den verschiedensten Betriebszuständen der elektrischen Abnehmer / des elektrischen Netzes mit handelsüblichen PQ-Messgeräten messen und bewerten.

Vor dem ersten Praxiseinsatz wurde das reale elektrische Netz des Kunden mathematisch nachgebildet. Die Störemissionen und die Belastungen wurden entsprechend den

Ergebnissen von Messungen an Referenzanlagen hinterlegt. Während des Tests konnte der Kunde die Belastungsszenarien vorgeben. Die erzielten Simulationsergebnisse wurden nach Inbetriebnahme der Anlage messtechnisch bestätigt.

## 4.2 Praxiseinsatz

Multifunktionale aktive Filter des Typs „HKOMP<sub>act</sub>“ werden bereits erfolgreich als zentrale Kompensationsanlagen in Niederspannungsnetzen verschiedener Industriezweige genutzt. Wesentliche Aufgabe ist dort neben der Oberschwingungs- und Verschiebungsblindleistungskompensation die Vermeidung von voltage dips durch leistungsstarke Impulsabnehmer.

Derzeitig wird ein über einen MS/NS-Transformator angeschlossener multifunktionaler aktiver Filter dieses Typs als zentrale Kompensationsanlage für mehrere Elektroverdichter im MW-Bereich in einem Mittelspannungsnetz errichtet.

## 5 Fazit

Elektrische Abnehmer verschlechtern zunehmend mit ihren Störemissionen die Elektroenergiequalität. Somit wachsen die Anforderungen an Kompensationsanlagen. Multifunktionale aktive Filter, z. B. die „HKOMP<sub>act</sub>“, können gleichzeitig mehrere Aufgaben zur Verbesserung der Elektroenergiequalität erfüllen. Die für jede Teilaufgabe zur Verfügung stehende Teilleistung kann stets dem technologischen Prozess angepasst, weitere Aufgaben softwareseitig jederzeit nachgerüstet werden. Auch eine Leistungserhöhung ist durch Zuschalten weiterer Leistungsmodul möglich.

Multifunktionale aktive Filter sind zukunftssichere und variable Anlagen, die auch bei Änderung / Erweiterung des zu kompensierenden technologischen Prozesses einfach an ihre neuen Aufgaben optimal angepasst werden können.

## 6 Literatur

- [1] DIN EN 50160, Merkmale der Spannung in öffentlichen Niederspannungsnetzen, (2011)
- [2] DIN EN 61000-2-2, EMV - Verträglichkeit für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen, (2003)
- [3] DIN EN 61000-2-4, EMV - Verträglichkeit für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in Industrieanlagen, (2003)
- [4] D. Stade, P. Ulrich, B. Suck: Qualitätsgerechte Stromversorgung von Schweißanlagen, etz, H. 5 (2009), S. 42-47