

Aktivfilter im USV Netz

Erschienen in der Fachzeitschrift Elektrotechnik 12/02

– Eduard Jund und Markus Gehrig –

Grosse USV-Verteilnetze haben oft lange Leitungen bis zum Endverbraucher. Diese sind meistens Computer oder Peripheriegeräte, welche oft starke Netzurückwirkungen verursachen. Sie beeinflussen die Spannungsqualität in dem sie Oberschwingungen ins Netz einspeisen. Warum das so ist, welche Rolle die USV dabei spielt und wie eine Lösung aussehen kann, wird anhand eines konkret realisierten Projektes erläutert.

Die Fusion der beiden Grossbanken Schweizerische Bankgesellschaft (UBS) und Schweizerischer Bankverein (SBV) zur neuen UBS AG war die Ursache für das Projekt eines gemeinsamen Handelsraumes (United Trading Floor).

Aus Gründen der Konzentration auf einen einzigen Standort, Zürich, wurde ein Handelsraum gesucht, der das Investment Banking beider Institute aufnehmen konnte. Dieser Standort musste folgenden Anforderungen genügen:

- Die Möglichkeit 650 Händler in einem Raum unterzubringen
- Verkehrstechnisch gute Lage (öffentlicher, privater Verkehr, Flughafen)
- Schnelle Realisierung (Ziel 12 Monate) ohne Beeinträchtigung des Bankbetriebs
- Leistungsfähige Kommunikations- und Gebäudetechnik

Die Wahl fiel auf das 1994 fertig gestellte Swiss Banking Center in Opfikon-Glattbrugg, das die gestellten Bedingungen in geradezu optimaler Weise erfüllen konnte.

Der sehr eng bemessene Termin, die Realisierung inkl. Umzug der Arbeitsplätze vom 15. April 1998 bis 16. April 1999 stellte sehr hohe Anforderungen. So musste u. a.

- Das Bankgeschäfts ohne Einschränkung betrieben werden können
- Die bestehende hohe Qualität der Benutzerfreundlichkeit erhalten bleiben
- Die Sicherheit für das Business und die Baustelle jederzeit gewährleistet sein usw

Wir wollen uns in diesem Artikel auf einen Aspekt aus dem Bereich der Technik, nämlich auf die Stromversorgung, konzentrieren.

Allein für den Betrieb der Händlerplätze und der IT-Infrastruktur wird ca. 950 kW Leistung benötigt. Alle diese Anlagen sind von den redundanten USV-Anlagen versorgt.
 Der gesamte elektrische Energiebedarf bewegt sich zwischen 1200 bis 4300 kW in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit. Dieser Bedarf kann bei Ausfall der öffentlichen Stromversorgung mit der hauseigenen Netzersatzanlage abgedeckt werden.

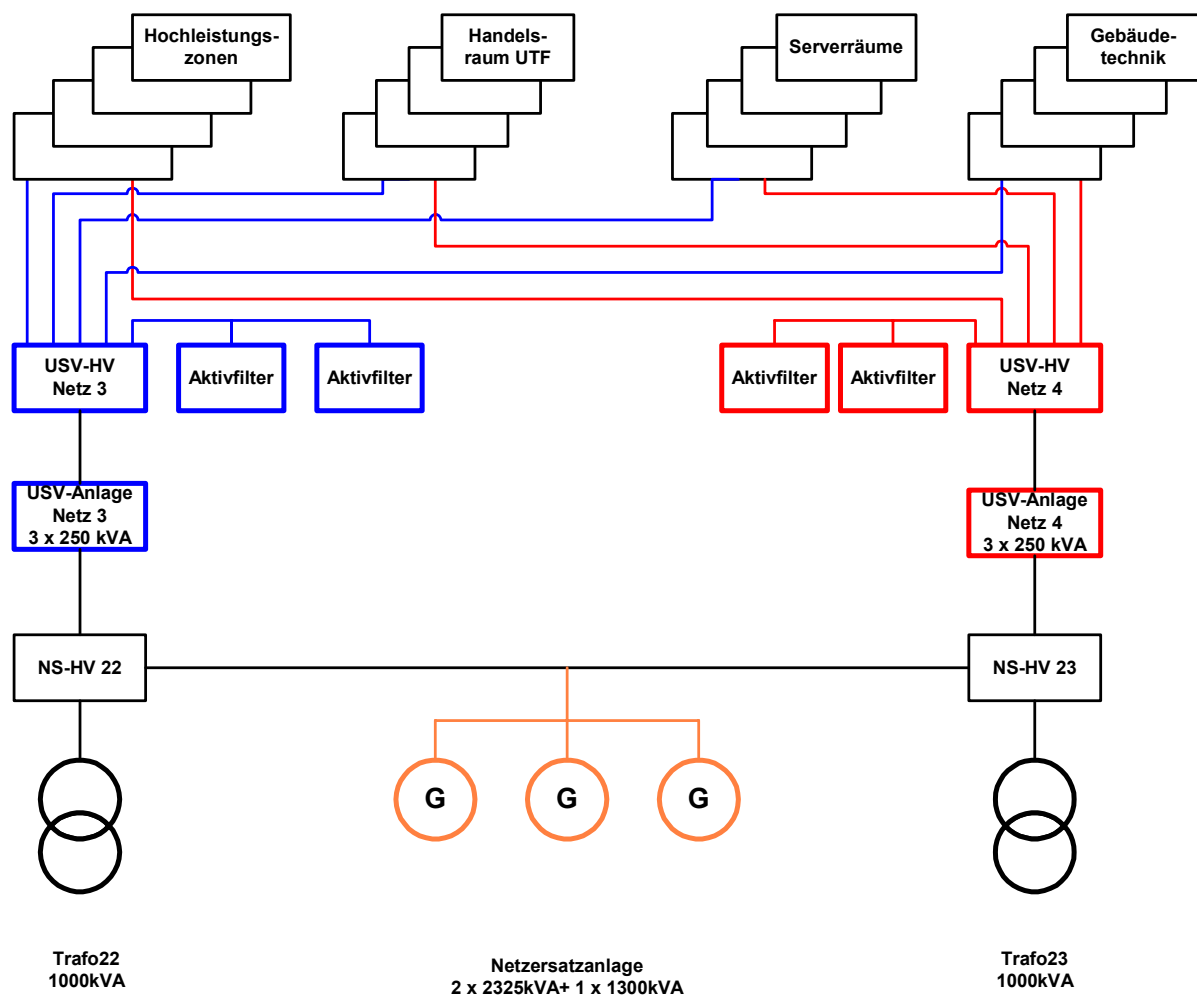


Abbildung 1: Prinzipschema Energieversorgung

Zwei Problemstellungen eine Lösung

■ Problem A: Auf Grund der stark nicht linearen Belastung können die USV-Anlagen nicht mit der vollen Scheinleistung belastet werden, was im Laufe der Jahre zu fehlender Redundanz und damit zu einer ungenügenden Verfügbarkeit geführt hat. Zum einen verursachen stark verzerrte Lastströme bei USV-Anlagen zusätzliche Belastungen und damit auch zusätzliche Verluste und Wärmeentwicklungen. Zum anderen sind USV-Anlagen im ungünstigeren Fall für $\cos \varphi$ 0.8, im besseren Fall für $\cos \varphi$ 0.9 konstruiert. Die aktuellen IT Komponenten sind oft mit Netzgeräten ausgerüstet, welche stark verzerrte Ströme (besonders der 3. Harmonischen) aufnehmen. Diese sind üblicherweise praktisch genau in Phase mit der Spannung. Wir haben also genau das was die USV nicht mag. Mit der im Laufe der Jahre zugenommenen Last und mit der starken Tendenz zu mehr verzerrter Last ist die Auslastung so angewachsen, dass die Redundanz nicht mehr gewährleistet war. Das heisst bei einem Ausfall einer Anlage wären die übrigen überlastet worden und hätten die Last auf den Bypass gegeben.

■ Problem B: Die Spannungsqualität am Ende der Speisleitungen war ungenügend. Bei der Inbetriebsetzung stellte sich heraus, dass in Teilen des Handelsraums die Flachbildschirme dunkel blieben. Der THD Wert war so hoch, dass sie schlichtweg den Dienst versagten. Messtechnische Überprüfungen ergaben, dass die Verzerrung der Spannung über 8% (Grenzwert IEC 1000-2-2) lag. Abklärungen mit dem Hersteller zeigten eindeutig, dass die Spannungsqualität die Ursache des Problems war. Physikalisch ist das zwar nicht ganz präzise, denn der Strom der Netzgeräte der Flatscreens selbst verursacht ja den Spannungsabfall an den Netzimpedanzen und damit den OS Spannungsbeitrag. Da setzte die Lösung an, wie wir weiter unten noch erfahren werden.

Eine Lösung für zwei Probleme

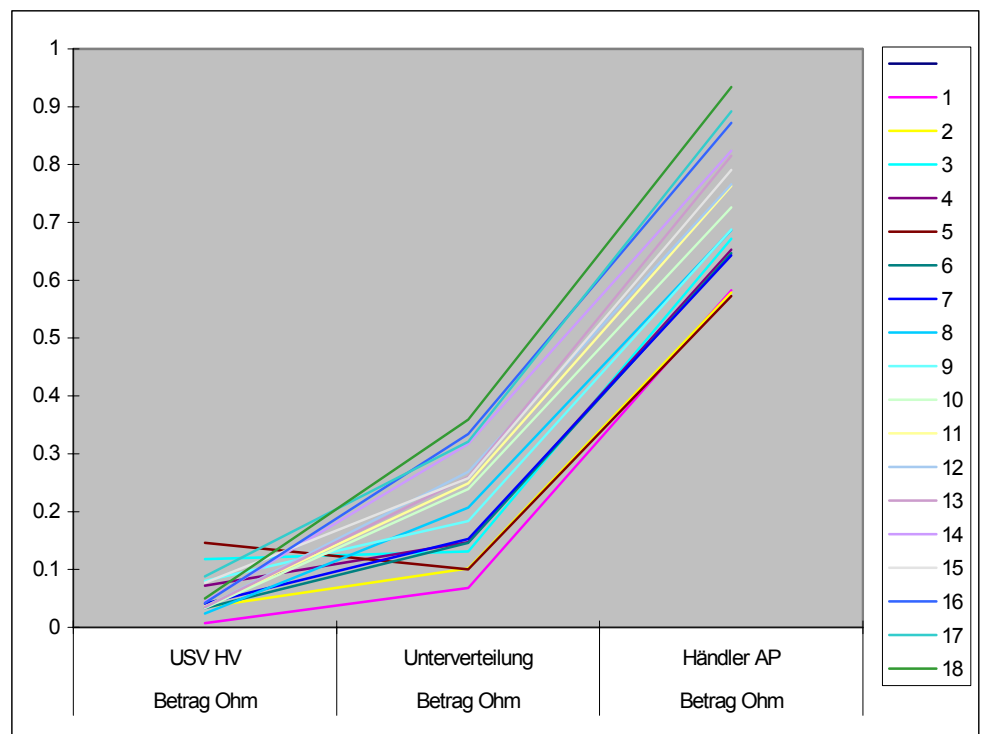
Mit Aktivfiltern (AF) können OS Ströme kompensiert werden. Beide Problemstellungen, obwohl sie divergente Voraussetzungen haben, wollten wir mit einer Lösung abdecken.

- Wenn das Problem A optimal gelöst werden soll, muss das AF in der Nähe der USV platziert werden
- Wenn das Problem B optimal gelöst werden soll, muss das AF beim OS-erzeugenden Verbraucher angeordnet werden

Die Untersuchung wurde durchgeführt, weil sich rasch abzeichnete, dass in jedem Fall mehr oder weniger grosse Investitionen nötig waren und zudem eine suboptimale Lösungen die Investitionssicherheit stark gefährden würde. Drei mögliche Lösungen waren denkbar:

- AF bei den USV-Anlagen (USV HV) platzieren (2 Anlagen wären nötig)
- AF bei den Unterverteilungen platzieren (ca. 8 einzelne Anlagen wären nötig)
- AF bei den Verbrauchern installieren (ca. 650 Geräte wären nötig!)

Die Wirksamkeit im Zusammenhang mit der örtlichen Anordnung hängt vom Impedanzverlauf im Leitungszug ab. Entsprechende Messungen haben das folgende qualitative Resultat ergeben:



© MG Power Engineering AG

Abbildung 2: Impedanzverlauf im Leitungszug

Daraus ist ersichtlich, dass die Leitungsimpedanz $Z(f)$ erst ab der Unterverteilung stark zunimmt. Dass die fünfte Harmonische eine negative Steigung aufweist, kann auf eine Resonanzerscheinung zurückzuführen sein. Die Anordnung beim Endverbraucher fällt aus den folgenden Gründen ausser Betracht:

- Problem A kann nur unbefriedigend gelöst werden
- Problem B wird zwar sehr effektiv gelöst, jedoch ist die Anzahl der notwendigen Geräte derart hoch, dass diese Lösung aus der Sicht der Kosten nicht interessant ist

Die Anordnung bei den Unterverteilungen wurde untersucht und ist aus den folgenden Gründen nicht interessant:

- Da der Impedanzverlauf erst ab der Unterverteilung stark zunimmt, ist diese Lösung für das Problem A nur geringfügig besser als die Anordnung bei der USV (zentral)
- Die Kosten für die Infrastruktur (Kühlung, Anpassung der Verteilungen) sind sehr hoch
- Problem A kann nicht befriedigend gelöst werden, da neben den Unterverteilungen für die HAP auch noch Unterverteilungen für die Systemräume vorhanden sind. Daran sind ebenfalls nichtlineare Verbraucher angeschlossen

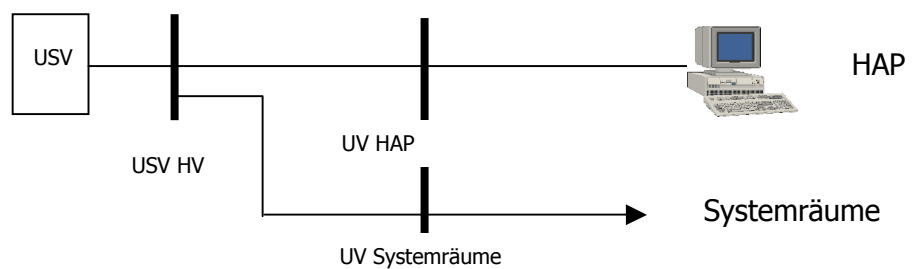


Abbildung 3: Prinzip USV Netz

Die Anordnung bei der USV Hauptverteilung USV-HV erweist sich als am günstigsten aus den folgenden Gründen:

- Es ist sehr wahrscheinlich, dass das Problem A weitgehend entschärft wird
- In wie weit das Problem B damit gelöst wird hängt von den Impedanzverhältnissen ab. Genügend ist wenn der Klirrfaktor beim HAP unter 8% zu liegen kommt und keine Harmonische über den Grenzwerten zu liegen kommt
- Die Zentrale Anordnung hat den Vorteil dass die Infrastrukturanpassungen nur an einem Ort anfallen (insbesondere die Kühlung)
- Die Gesamtkosten sind mit Fr. 480'000.- nur halb so hoch wie bei der dezentralen Lösung.

Da damals über solche Probleme wenig praktische Erfahrung vorlag musste das Resultat vorsichtig hochgerechnet und nach verschiedenen Kriterien beurteilt werden. Auf Grund der in Tabelle 1: Szenarien beschriebenen Szenarien wurde dann der Investitionsentscheid gefällt.

| Best case | Realistic case | Worst case |
|--|--|--|
| 15 % bessere Leistungsausnutzung der USV Anlagen Klirrfaktor < 5 % | 10 % bessere Leistungsausnutzung der USV Anlagen Klirrfaktor < 8 % (Grenzwert der Norm EN 50160 beträgt 8 %) | 5 % bessere Leistungsausnutzung der USV Anlagen Klirrfaktor vereinzelt leicht über 8 % (vereinzelt über der Norm) |
| Zusammenfassung: Wesentlich bessere Leistungsausnutzung der USV-Anlagen Spannungsqualität mit genügend Spielraum in der Norm | Zusammenfassung: Moderat bessere Leistungsausnutzung der USV-Anlagen Spannungsqualität in der Norm | Zusammenfassung: Geringfügig bessere Leistungsausnutzung der USV-Anlagen Spannungsqualität nur teilweise in der Norm |

Tabelle 1: Szenarien

An den USV Anlagen in Europastrasse 1 und 2 sind Verbraucher mit stark nichtlinearer Last angeschlossen. Nicht lineare Lasten enthalten Blindleistungen verschiedener Arten:

- Grundwellenblindleistung kaum vorhanden
- Oberschwingungsblindleistung stark vorhanden

Und andere Phänomene wie:

- Unsymmetrische Belastungen mässig vorhanden
- Flicker schnelle Schaltvorgänge im Netz wenig vorhanden

Alle diese Phänomene können teilweise gleichzeitig mit Aktivfiltern beseitigt werden, so dass die USV Anlagen mit einem weitgehend sinusförmigen Strom belastet werden, was einen besseren Auslastungsgrad ermöglicht.

In der Regelung der AF standen zwei unterschiedliche Technologien zur Auswahl, welche ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben:

■ Regelung über die schnelle Fourier-Transformation FFT
Dabei wird der Messstrom bzw. die Messspannung einer schnellen Fouriertransformation unterzogen. Das Spektrum (Frequenzbereich) wird mit einer OS-Parametertabelle verglichen. Ein digitaler Regler generiert das Signal, für die Ansteuerung des Wechselrichters. Es wird ein Pulsmuster (im Zeitbereich) generiert, welches dem verzerrten Laststrom entgegenwirkt. Da die rechnerische Verarbeitung der FFT Zeit beansprucht wird jeweils eine Periode gemessen und ausgewertet und in der darauf folgenden korrigiert.

■ Regelung über den Momentanwert gemäss Bild 4

Im Gegensatz zur FFT-Methode wird hier der Messstrom bzw. die Messspannung im Zeitbereich ausgewertet in dem die Momentanwerte $u(t)$ bzw. $i(t)$ mit einer reinen Schwingung verglichen werden. Der analoge PID-Regler generiert einen Wechselrichterstromsollwert. Der Zweipunkt Stromregler generiert das Signal für die Wechselrichteransteuerung. Neben diesen beiden beschriebenen Typen gibt es noch andere abgeleitete Techniken.

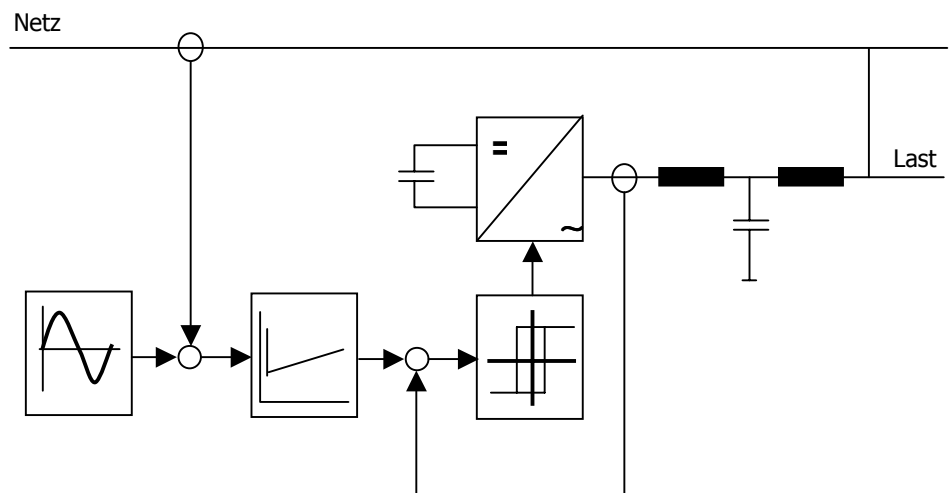


Abbildung 4: Momentanwertregelung

Aus kommerziellen und technischen (Dimensionierung und Parametrierung) Überlegungen wurde ein Aktivfilter mit Regelung über die FFT gewählt.

Die Dimensionierung des Aktivfilters hängt mit den zu kompensierenden Strömen zusammen und wird nach folgender Gleichung ermittelt.

$$I_G = \sqrt{\sum_{v=2}^{25} I_v^2}$$

Gleichung 1: Dimensionierung Aktivfilter

mit:

v = Ordnungszahl Harmonische (oft auch n verwendet)

I_G = Gesamtkompensationsstrom (effektiv)

I_v = Kompensationsstrom von v

Daneben werden noch weitere Faktoren wie Umgebungsbedingungen, Temperaturen und Leistungsreserven mitberücksichtigt. Mit speziellen Berechnungstabellen werden die Filter durch den Elektroingenieur massgeschneidert dimensioniert und parametrisiert.

Einbindung in die bestehende Anlage

Das Filter darf nicht in die USV Ausgangsleitungen einspeisen, da Beeinflussungen der USV-Spannungsregelung nicht ganz ausgeschlossen werden können. Denn diese Leitungen führen Ausgleichsströme der USV-Anlagen. Selbst die Entwicklungsabteilung des Herstellers konnte damals keine genauen Aussagen dazu machen. Was sicher vorausgesagt werden konnte ist, dass die Regelzeit von einer Periode (20 ms) genügend kurz ist um negative Beeinflussungen zu vermeiden. Da die Strommessung für die Regelung des Aktivfilters möglichst alle nicht linearen Verbraucher erfassen soll, haben wir verschiedene teilweise aufwändige Schaltschrankanpassungen bzw. Erweiterungen entworfen. Als Favorit hat sich dann eine sehr einfache – jedoch einen Kompromiss darstellende – Lösung durchgesetzt. Die Schaltschränke (siehe *Abbildung 5*) waren bereits vorhanden. Die Messung musste nur noch in die Leistungsschaltereinschübe eingebaut werden. Die Schaltereinschübe sind so dimensioniert, dass sie redundant sind. Es war also möglich die Aktivfilter ohne Unterbrechung der Verbraucher zu installieren.

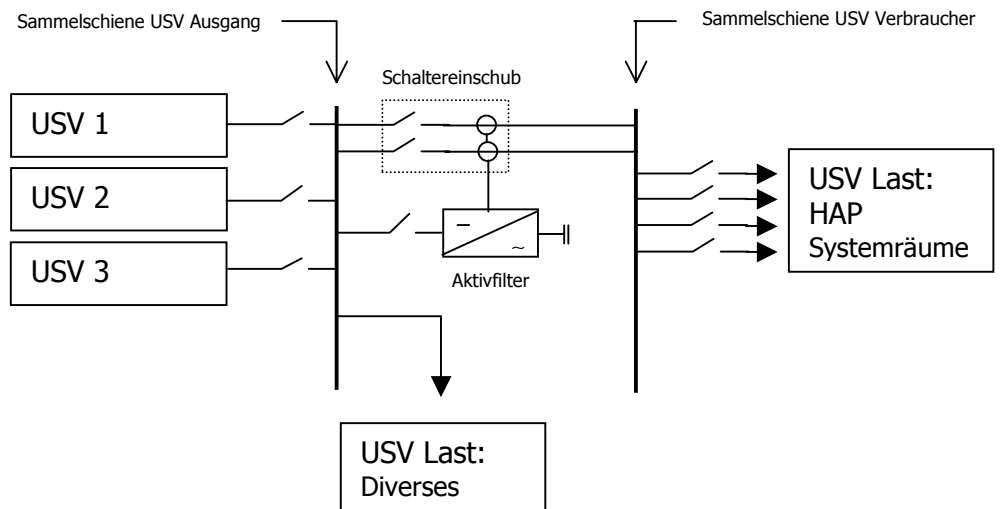


Abbildung 5: Prinzipschema USV Ausgangsverteilung mit Aktivfilter

Einen Kompromiss stellt diese Lösung deshalb dar, weil an der USV Ausgangsverteilung auch unlineare Lasten angeschlossen sind. Die Leistung ist jedoch geringer.

Unsere Erfahrung hat gezeigt, dass die USV Ausgangsseite immer zwei trennbare Sammelschienen haben sollte. An der USV Ausgangsschiene sollten keine Verbraucher angeschlossen sein. Das hat zwei Vorteile:

1. Die USV Anlagen können erweitert oder irgend welchen Tests unterzogen werden ohne, dass die Last beeinträchtigt wird. In einem solchen Fall wird die USV-Verbraucherschiene von einem Bypass gespeist, was bei dieser Verteilung ebenfalls (noch) nicht realisiert ist.
2. Die Messung für das Aktivfilter kann alle Verbraucher erfassen, was eine idealere Kompensation zulässt.

Die Aktivfilter wurden in zwei Schaltschränke eingebaut. Ein Aktivfilter besteht aus zwei Gehäusen welche übereinander eingebaut wurden. Die Kühlluft kommt von unten mit leichtem Überdruck aus dem Hohlboden in die Schaltschränke. Die warme Luft des unteren Gehäuses wird hinter dem Oberen durch oben aus dem Schrank geführt. Es musste ein Umluftkühlgerät bereitgestellt werden, welches die Wärmeleistung der beiden Aktivfilter von gesamthaft 8.4 kW abführen kann.

Resultate und Interpretation

Die Abbildung 6 zeigt die Wirkungen des Aktivfilters am Beispiel der 3. Harmonischen. In allen Bildern ist der Verlauf der Spannungen «oben» und der Verlauf des Stromes «unten» aufgeführt. In der Zeitachse ist im Bereich -2 bis 0 s das Netz **ohne** Aktivfilter und im Bereich > 0 s das Netz **mit** Aktivfilter aufgezeichnet. Die Tabelle 2 zeigt die numerischen Werte der Messungen in der USV Hauptverteilung.

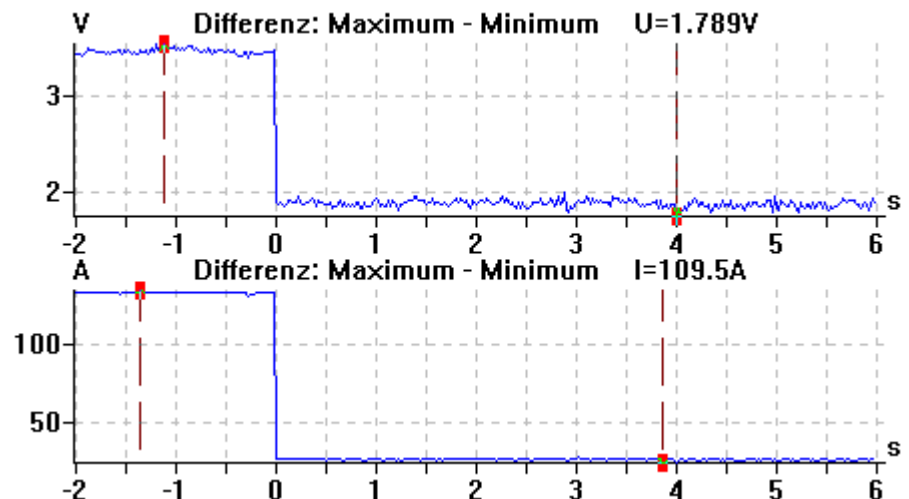


Abbildung 6: Wirkung AF am Beispiel der 3. OS

| | | AF AUS | AF EIN | Verbesserung |
|------------------------|-----------------------------|------------|------------|--------------|
| Laststrom | $I_{\text{eff}} \text{ L1}$ | 363 A | 341 A | 6.1 % |
| Klirrfaktor | THD i | 45.7 % | 13.1 % | 70 % |
| | THD u | 3.8 % | 1.7 % | 55 % |
| Crestfaktor | \hat{I}/I_{eff} | 2.26 | 1.76 | 22 % |
| Wirkleistung | P L1 | 74.6 kW | 76.86 kW | - 3 % |
| Scheinleistung | S L1 | 84.5 kVA | 79.2 kVA | 6.3 % |
| Blindleistung | Q L1 | -39.7 kVAr | -19.0 kVAr | 52 % |
| Leistungsfaktor | $\cos \varphi$ | 0.973 | 0.979 | - 0.6 % |
| Leistungsfaktor | λ | 0.883 | 0.971 | 9.1% |

Tabelle 2: Numerische Wert mit/ohne Aktivfilter gemessen in der USV HV

Die negativen Werte in der Spalte «Verbesserung» haben sich verschlechtert. Der erhöhte Wirkleistungsbezug ist darin begründet, dass das Filter die Energie für die OS Korrektur aus dem speisenden Netz nimmt. Dass der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ höher ist liegt daran, dass das Aktivfilter geringfügig kapazitiv ist. Beide Werte haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die USV Auslastung. Die USV Anlage kann mit dem Aktivfilter um 18% höher ausgelastet werden. Die genaue Berechnungsgrundlage übersteigt den Rahmen dieser Ausführungen.

Bei den Händlerarbeitsplätzen hat sich die Situation ebenfalls stark verbessert. Im Gegensatz zum Problem A der USV Auslastung, interessiert uns hier vor allem die Spannungsqualität. Der Klirrfaktor ohne das Aktivfilter bewegte sich zwischen 7 und 9%. Mit dem Aktivfilter sind die Werte auf 3.9 bis 5% gesunken.

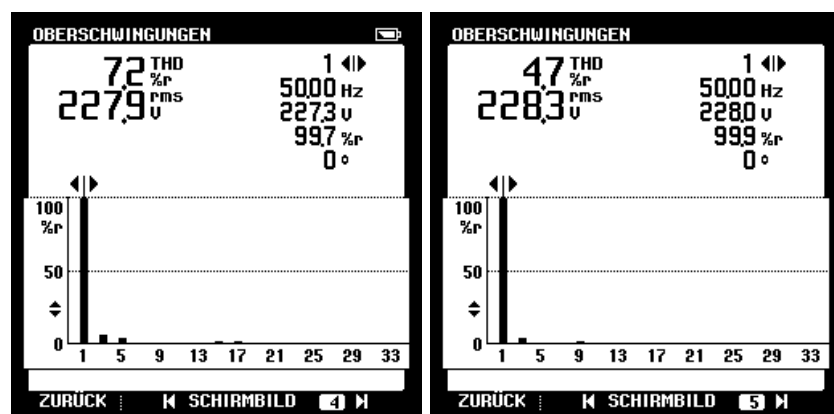


Abbildung 7: Messung HAP ohne (li) und mit (re) Filter

Zusammenfassend wollen wir die prognostizierten Daten (Tabelle 1) mit den erreichten Daten vergleichen:

- Der Auslastungsgrad der USV hat sich um mindestens 11% bis max. 18% verbessert. *Realistic case* ist erreicht.
- Der Klirrfaktor der Spannung liegt meistens unter 5%. Möglicherweise liegen die Werte vereinzelter Arbeitsplätze etwas höher. Der normative Grenzwert liegt bei 8 %. *Best case* ist teilweise erreicht.

Die Anlagen haben sich nach der nun dreijährigen Betriebsphase bewährt. Die Filterwirkung ist ausgezeichnet und erfüllt die gestellten Erwartungen. Durch die redundante Auslegung sind sie auch bei Ausfall eines Aktivfilters genügend, um Probleme mit den Bildschirmen zu vermeiden. Die aktuellen Messwerte der eingebauten Messgeräte (Tabelle 3) zeigen eindrücklich die Filterwirkung. Die Verbraucherwerte zeigen den enormen Oberwellenanteil und Neutralleiterstrom, der durch die angeschlossene Hardware erzeugt wird. Auf der Netzseite ist ersichtlich, welcher geringer Anteil davon noch übrigbleibt und durch die USV-Anlage zu bewältigen ist.

| Klirrfaktor | Netz | Verbraucher | Strom | Netz | Verbraucher |
|-------------|------|-------------|-------|------|-------------|
| k1 | 3% | 45% | I L1 | 320A | 350A |
| k2 | 3% | 47% | I L2 | 303A | 335A |
| k3 | 3% | 48% | I L3 | 255A | 283A |
| U | 400V | 400V | I N | 59A | 362A |

Tabelle 3: Messwerte Aktivfilter nach 3-jähriger Betriebszeit

Abkürzungen:

| | | | |
|-----|---|--------|---------------------|
| PF | Powerfactor Total bezogen auf RMS (λ) | HAP | Händlerarbeitsplatz |
| DPF | Displacement Power Factor ($\cos \varphi$) | AF | Aktivfilter |
| CF | Crestfactor oder auch Scheitelfaktor | OS | Oberschwingung |
| RMS | Root Mean Square (Effektivwert) | USV HV | USV Hauptverteilung |
| THD | Klirrfaktor | | |

Quellen:

- 1 **Elektrotechnik**; Ausgabe Juli 2001; Seite 117ff, Markus Gehrig, Stromversorgungen für Rechenzentren
- 2 **Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty**; 1996; McGraw-Hill, Electrical Power Systems Quality; Seite 132 f
- 3 **VSE und VEÖ (gemeinsame Hrsg.)**; 1995; Empfehlung für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen

Autoren:

Eduard Jund
Eidg. Dipl. Elektroinstallateur
Jobst Willers Engineering AG
Quellenstrasse 1
4310 Rheinfelden
Telefon: 044 851 37 45
Telefax: 044 851 37 46
Internet: www.willers.ch
Email: eduard.jund@willers.ch

vormals:

UBS AG, Technisches Gebäudemanagement
8152 Opfikon

Markus Gehrig
Dipl. El. Ing. TS/REG B
MG Power Engineering AG
Strehlgasse 32, 8600 Dübendorf
Telefon: 044 882 17 18
Telefax: 044 882 17 19
Internet: www.power-engineering.ch
E-mail: m.gehrig@power-engineering.ch