

## Steigerung der Effizienz großer USV-Systeme - Teil 3

Um den Wirkungsgrad von USVen zu erhöhen, kann ein Hersteller drei Arten von elektrischen Verlusten reduzieren: den Leerlaufverlust, den proportionalen und den quadratischen Verlust.

Erhöhung des Wirkungsgrads von großen USVen

Um den Wirkungsgrad von USVen zu erhöhen, kann ein Hersteller drei Arten von elektrischen Verlusten reduzieren: den Leerlaufverlust, den proportionalen und den quadratischen Verlust. Mögliche Ansätze für die Realisierung dieses Ziels sind Modifizierungen bei der **Technologie**, der **Topologie** und der **Modularität**. Die genaue Kenntnis der Auswirkung dieser Faktoren auf den Wirkungsgrad ermöglicht eine sehr viel einfachere Erkennung von USV-Systemen mit niedrigen Stromkosten im Rahmen der Spezifikation.

### Steuerung: DSP- anstelle von Analogsteuerung

Viele Hersteller vollziehen zur Zeit den Umstieg von der analogen zur DSP-Steuerung. Dieser Umstieg ist so grundlegend wie der von einer herkömmlichen Uhr mit Zeigern und Uhrwerk zu einer digitalen Uhr mit Akku und LCD-Anzeige. Steuerungen mit digitaler Signalverarbeitung sind sehr viel smarter und schneller und somit in der Lage, einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung des Wirkungsgrades zu leisten. Darüber hinaus kommen sie im Vergleich zu analogen Schaltkreisen mit weniger Komponenten aus.

Moderne DSP-Steuerungen erhöhen den Wirkungsgrad durch intelligente, adaptive Schaltprozesse, bei denen die mit Hochfrequenz arbeitenden Hauptleistungsschalter die Ausgangsspannung präzise halten und dabei sehr viel weniger fehleranfällige Schaltvorgänge benötigen. Bei geringerer Last lässt sich mit DSP die Anzahl der Schaltvorgänge um bis zu 50 % reduzieren, was sich in einer spürbaren Verbesserung des Wirkungsgrads bemerkbar macht. Dazu kommt, dass DSP-Steuerungen sehr viel weniger Strom verbrauchen als frühere Steuerungsarten, wodurch sich eine Reduzierung des Leerlaufverlustes ergibt.

IGBT und DSP sind wichtigste technologische Entwicklungen, die bei der jüngsten Generation von USVProdukten zu einem deutlich höheren Wirkungsgrad geführt haben.

### Technologie

Dieser Faktor überschneidet sich tendenziell mit den Faktoren Topologie und Modularität, bezieht sich im Kontext dieser technischen Dokumentation jedoch ausschließlich auf die Bausteine einer USV einschließlich Hard- und Software.

### Technologische Modifikation: IGBTs anstelle von SCRs

Große USV-Systeme im Halbleitertechnik (statische USVen) wandeln Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt. Ein Teil dieses Prozesses erfolgt in Form extrem schneller Ein- und Ausschaltvorgänge, die zu Leistungsverlusten durch Abwärme führen. Die Abwärme wiederum entsteht aufgrund des uneinheitlichen/inhärenten elektrischen Schalterwiderstands. Tatsächlich kommt es auch bei einem offenen Schalter infolge von Verluststrom immer zu einem gewissen Wärmeverlust. Dieses Phänomen lässt sich mit einem Seil vergleichen, das sehr schnell durch die Hände einer das Seil haltenden Person gezogen wird. Dabei entspricht das Seil dem Strom, während die Hände dem Schalter gleichzusetzen sind. Wenn die Person das Seil sehr fest in den Händen hält (d. h. der Schalter geschlossen ist), wird mehr Wärme erzeugt, als wenn sie das Seil nur lose hält (d. h. der Schalter offen ist).

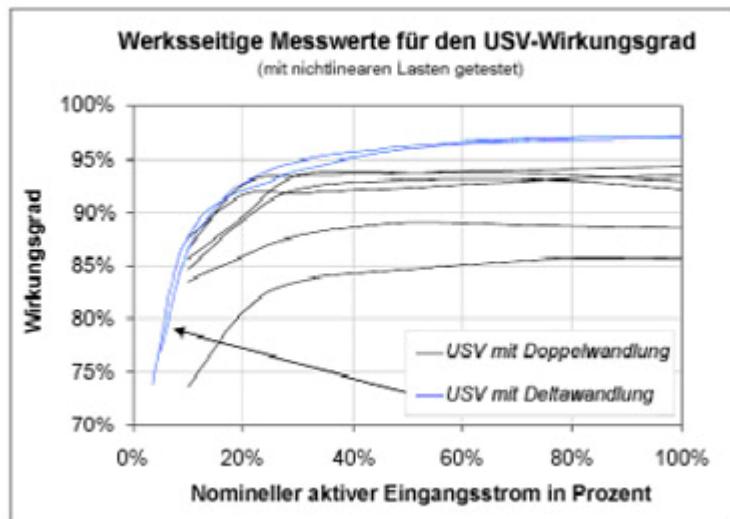
Früher erfolgte der Schaltvorgang durch siliziumgesteuerte Gleichrichter (SCRs) mit einer Hochstrom- /Hochspannungs-Schaltfunktionalität. SCRs wurden bis Mitte der 1990er Jahre standardmäßig in USVen verbaut und sind auch heute noch in einigen älteren

Systemkonzepten anzutreffen. SCRs waren zwar verhältnismäßig preisgünstig und leicht zu integrieren, hatten jedoch einige gravierende Nachteile. Am schwersten fiel ihre ausgeprägte Kurzschlussneigung ins Gewicht, was wiederum zu Kurzschlüssen an der empfindlichsten Stelle der USV führte – der Gleichstrom-Sammelschiene (DC-Bus). Um dies zu verhindern, mussten Schutzschaltungen und -vorrichtungen vorgesehen werden, wodurch sich die Anzahl der ausfallgefährdeten Komponenten weiter erhöhte. SCRs lassen sich einfach einschalten (ein 1- bis 2-V-Signal an der Gateelektrode reicht bereits aus), aber nur schwer ausschalten, da hierfür eine Sperrspannungsspitze notwendig ist. Im Gegensatz hierzu lassen sich Transistoren mit geringen Strömen ein- und ausschalten. Sie sind im Prinzip eingeschaltet, sobald das Gatesignal zugeführt wird, und ausgeschaltet, wenn dieses Signal nicht mehr vorhanden ist. Bis Mitte der 1990er Jahre wurde ihre Verbreitung jedoch durch ihre mangelnde Stromtragfähigkeit gebremst. Dieses Problem wurde mit der Einführung der Bipolartransistoren mit isolierter Gateelektrode (IGBTs) gelöst. Dank höherer Geschwindigkeiten und besserer Stromtragfähigkeit kann die Leistungswandlung mit IGBTs in einem so genannten PWM-Modus mit hoher Frequenz (Pulse Width Modulation, Pulsweitenmodulation) erfolgen. Die Hochfrequenz-PWM verringert die Größe der Filterkomponenten und sorgt so für eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrads.

### **Topologie**

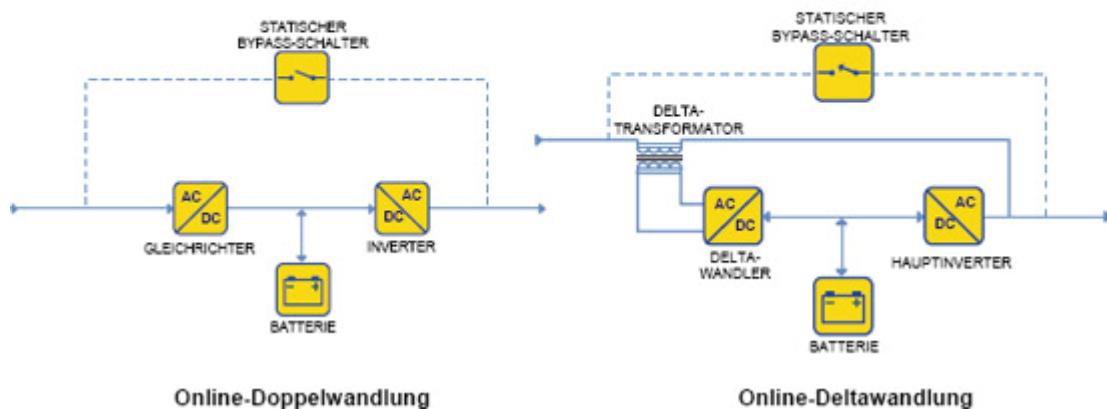
Die USV-Topologie bestimmt im Wesentlichen, wie die einzelnen Leistungsbauelemente intern miteinander verbunden sind. Anhand der Topologie können USV-Hersteller die elektrischen Verluste für einen bestimmte Anwendungs- oder Größenbereich gezielt verringern. Grundsätzlich kommen bei großen USV-Systemen zwei Arten von Topologien zum Einsatz: Online-Doppelwandlung und Online-Deltawandlung. Für Hochleistungs-USV-en mit über 200 kVA bietet laut einer aktuellen Veröffentlichung des US Electrical Power Research Institute die Topologie mit Online-Deltawandlung den besten Wirkungsgrad 3 (Abb. 4). Die Auswirkung der Topologie auf den USV-Wirkungsgrad wird im Folgenden näher erläutert.

**Abb. 4 – Auszug aus dem zitierten EPRI-Bericht (S. 20)**



**Abb. 5 – Zwei USV-Technologien für die Online-Wandlung**

Aus APC White Paper Nr. 1, „Die verschiedenen Arten von USV-Systemen“



Bei Systemen mit Online-Deltawandlung ist die Steigerung des Wirkungsgrads in erster Linie auf eine Reduzierung des Leerlaufverlustes zurückzuführen, wobei jedoch auch der geringere quadratische Verlust eine gewisse Rolle spielt. Durch die Reihenschaltung der Eingangstransformatoren lassen sich Eingangsstrom und Ausgangsspannung der USV vollständig regeln und steuern, ohne dass die gesamte ankommende Leistung in Gleichstrom und anschließend wieder in Wechselstrom gewandelt werden muss, wie dies bei einem System mit Online-Doppelwandlung der Fall ist. Dies ist in **Abbildung 5** dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Ausgangsspannung bei der USV mit Online-Deltawandlung durch den Ausgangswechselrichter vollständig regeneriert und vom Netzstrom galvanisch getrennt wird, wie dies auch bei USV mit Online-Doppelwandlung der Fall ist. Ein weiteres Beispiel dafür, wie die Topologie zur Reduzierung des Leerlaufverlustes beitragen kann, besteht in der Eliminierung des Eingangsfilters, der bei der Topologie mit Doppelwandlung benötigt wird. Herkömmliche USV-Systeme mit Doppelwandlung weisen hohe Oberwellen des Eingangsstroms (Verzerrungsfaktor zwischen 9 und 30 %) und einen niedrigen Leistungsfaktor (0,9 bis 0,8) auf. Aus diesem Grund werden sie mit einem Eingangsfilter versehen, der den Leistungsfaktor erhöht und die Oberwellen bzw. unerwünschten Ströme, die zu Wärmeverlusten bei netzaufwärts gelegenen Leitungen und Transformatoren führen, auf ein möglichst geringes Maß reduziert. Allerdings wirkt sich dieser Filter störend auf die Spannungsregelung bei motorbetriebenen Generatoren aus. Durch die Entnahme von Sinussstrom werden bei einer Topologie mit Deltawandlung vernachlässigbare Oberwellen (unter 3 %) mit einem Leistungsfaktor von 1 erzeugt, so dass

der Eingangsfilter überflüssig ist.

Die Deltawandlung ist ein gutes Beispiel dafür, wie USV-Hersteller anhand der Topologie den Wirkungsgrad ihrer Produkte steigern und ihren Stromverbrauch senken können, ohne dabei Einbußen bei der elektrischen Leistung hinnehmen zu müssen. Der folgende Vergleich verdeutlicht die Einsparungen.

### Die quantitative Auswirkung verschiedener Topologien

#### 1N-Topologie – Vergleich Deltawandlung und Doppelwandlung

Konfiguration A ist eine 1-MW-USV mit Online-Deltawandlung. Konfiguration B ist eine 1-MW-USV mit Online-Doppelwandlung. **Abbildung 6** zeigt die Wirkungsgradkurven der beiden USVEn als Funktion der prozentualen Last. In beiden Fällen soll die Last 300 kW betragen. Der Wirkungsgrad von Konfiguration A bei einer Last von 30 % beträgt 94,9 %, während Konfiguration B nur einen Wirkungsgrad von 88,7 % erreicht. Über die Gesamtnutzungsdauer der USV gesehen, führt ein um 6,2 % höherer Wirkungsgrad zu einer deutlichen Kostensparnis.

**Abb. 6 – Wirkungsgradkurven für Deltawandlung (Konfiguration A) und Doppelwandlung (Konfiguration B)**

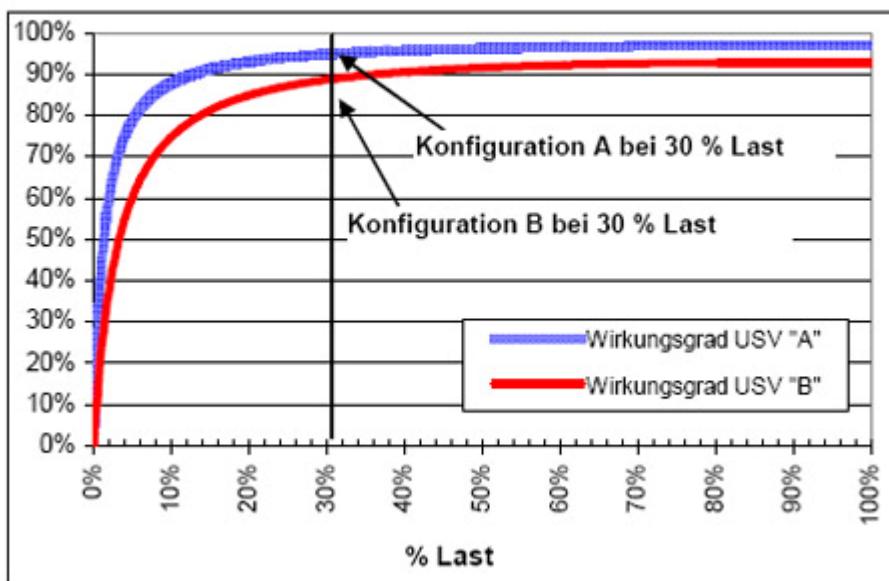


Tabelle 3 zeigt, dass Konfiguration A mit Deltawandlung um 58 % niedrigere Kosten aufweist als Konfiguration B mit Doppelwandlung. Dabei dürfte offensichtlich sein, dass der Leerlaufverlust mit mehr als 60 % aller Verluste den wichtigsten Faktor für die Kostensenkung darstellt.

USV-System	Wirkungsgrad %	Proportionaler Verlust	Leerlaufverlust	Quadratischer Verlust	Kühlkosten	Gesamtkosten durch geringen Wirkungsgrad	Kosteneinsparungen in % (10 Jahre)
Konfiguration A – Deltawandlung	94,87%	\$16.820	\$116.771	\$8.523	\$56.846	\$198.960	\$271.091 58%
Konfiguration B – Deltawandlung	88,67%	\$25.213	\$283.298	\$27.239	\$134.300	\$198.960	\$271.091 58%

*Tabelle 3 – 10-Jahres-Analyse von Wirkungsgrad und Kosten – Vergleich Deltawandlung und Doppelwandlung (1N)*

Die in Tabelle 3 aufgeführten Kosten verdoppeln sich nahezu, wenn die gleichen USVen in einer redundanten 2N-Architektur (d. h. mit zwei Systemen) implementiert werden. Der folgende Vergleich verdeutlicht die Einsparungen.

#### **2N-Topologie – Vergleich Deltawandlung und Doppelwandlung**

Konfiguration A besteht aus zwei redundanten (2N) 1-MW-USVen mit Online-Deltawandlung; Konfiguration B besteht aus zwei redundanten (2N) 1-MW-USVen mit Online-Doppelwandlung. Auch hier soll die Last jeweils 300 kW betragen. Dies bedeutet, dass jede USV lediglich eine Last von 15 % aufweist, da die zwei USVen in beiden Konfigurationen im Normalbetrieb nur jeweils die Hälfte der Last übernehmen. Tabelle 4 stellt die Kosten der 2N-Konfiguration dar. Dabei ist darauf zu verweisen, dass sich der quadratische Verlust aufgrund der 2N-Architektur zwar halbiert, der Leerlaufverlust jedoch verdoppelt, da er lastunabhängig ist.

USV-System	Wirkungsgrad %	Proportionaler Verlust	Leerlaufverlust	Quadratischer Verlust	Kühlkosten	Gesamtkosten durch geringen Wirkungsgrad	Kosteneinsparungen in % (10 Jahre)
Konfiguration A – Deltawandlung	91,17%	\$16.820	\$233.542	\$4.262	\$101.849	\$356.473	\$491.129 58%
Konfiguration B – Deltawandlung	81,28%	\$25.213	\$566.597	\$13.620	\$242.172	\$847.601	\$491.129 58%

*Tabelle 4 – 10-Jahres-Analyse von Wirkungsgrad und Kosten bei einer 300-kW-Last – Vergleich USV mit Deltawandlung und Doppelwandlung (2N-Architektur)*