

# White Paper: Wechselwirkung von Umrichtern in größeren Systemen, vor allem mobilen Anwendungen

## Einleitung

Bei elektrischen Installationen auf Basis eines DC-Zwischenkreises kommt es ganz natürlich zu Wechselwirkungen der Leistungskomponenten wie zum Beispiel Wechselrichter für Motoren und Generatoren oder DC/DC-Wandler. **Diese Wechselwirkungen äußern sich vor allem in Schwingungen von Strom und Spannung und sind keine Eigenschaft oder Fehler der einzelnen Leistungskomponenten, sondern eine systemische Eigenschaft des gesamten Aufbaus.** Damit muss für einen solchen Aufbau zwingend auch eine systemische Betrachtung erfolgen und durch geeignete Messungen verifiziert und eventuelle Gegenmaßnahmen optimiert werden. Nur so ist ein zuverlässiger und sicherer Betrieb solcher Systeme gewährleistet. Beobachtet man signifikante Schwingungen, so sind diese durch verschiedene Maßnahmen zu unterdrücken und messtechnisch zu bestätigen.

1. Oft ein Problem: Unerwünschte Schwingungen im DC-Zwischenkreis
2. Die Leitung als relevantes Element
3. Parasitäre Schwingkreise im DC-Kreis
4. Mehr Leistungskomponenten bedeuten mehr Wechselwirkungen
5. Wie real ist die Gefahr in der Praxis?
6. Lösungsansätze
  - 6.1 Generelles
  - 6.2 Orientierung: In welchen Einsatzfällen muss ich Maßnahmen zur Unterdrückung von unerwünschten Schwingungen treffen?

6.2.1 Anwendungen, bei welchen eher weniger mit unerwünschten Schwingungen im DC-Zwischenkreis zu rechnen ist

6.3 Gegenmaßnahmen

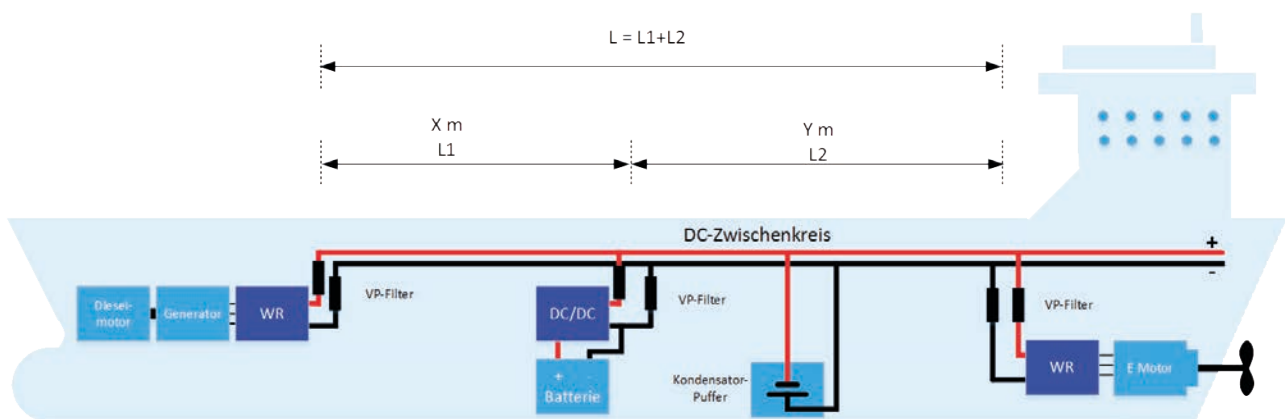
6.4 Vergleich AC Technik zur DC Technik

## 1 Oft ein Problem: Unerwünschte Schwingungen im DC-Zwischenkreis

Die folgende Beschreibung soll für die möglichen Fallstricke bei der Planung und Inbetriebnahme eines elektrisch betriebenen Antriebs, zum Beispiel in Schiffen oder Nutzfahrzeugen etc. sensibilisieren.

Die Verbraucher und Energieerzeuger werden in der Regel über einen gemeinsamen DC-Zwischenkreis miteinander gekoppelt. Er kann je nach Anwendung räumlich sehr groß ausfallen. Leitungslängen reichen von wenigen Metern bis über 100 Meter.

### Verteilte Systeme an einem DC-Zwischenkreis am Beispiel Schiff mit Elektroantrieb



## 2 Die Leitung als relevantes Element

Die einzelnen Komponenten im Zwischenkreis stehen miteinander in Wechselwirkung und bilden daher auch schwingungsfähige Systeme aus. Das beginnt bereits bei der reinen DC-Leitungsführung im Zusammenspiel mit den Eingangskapazitäten der Wechselrichter.

Eine Spannungs-Doppelleitung zum Beispiel für den Zwischenkreis hat bezogen auf ihre Länge einen Induktivitätsbelag sowie einen Kapazitätsbelag. Typische Werte von Doppelleitungen in DC-Zwischenkreisen liegen für den Induktivitätsbelag bei  $1 \mu\text{H}/\text{m}$  und für den Kapazitätsbelag bei  $100 \text{ pF}/\text{m}$ .

### 3 Parasitäre Schwingkreise im DC-Kreis

In Verbindung mit der Umrichterkapazität stellt eine solche Doppelleitung durch ihre Induktivität bereits einen LC-Schwingkreis dar. Weitere Komponenten wie Wechselrichter, DC/DC Wandler, Generatoren, Motoren und Batterien weisen ähnliche elektrische Kenngrößen auf, die in Kombination sehr komplexe schwingungsfähige Systeme darstellen können.

- Aus der umfangreichen ARADEX-Erfahrung: Die hierbei möglichen auftretenden Resonanzfrequenzen liegen in Bereichen, die durch die gängigen Taktfrequenzen von Wechselrichtern (2-16 kHz) leicht anregbar sind.
- Auch in DC-Kreisen liegen unerwünschte, parasitäre Schwingkreise vor, welche durch die systembedingte Taktung von Wechselrichtern, DC/DC-Wandlern etc. angeregt werden können

Diese Eigenschaft haben alle intern taktenden Umrichter, Wechselrichter oder DC/DC-Wandler.

### 4 Mehr Leistungskomponenten bedeuten mehr Wechselwirkungen

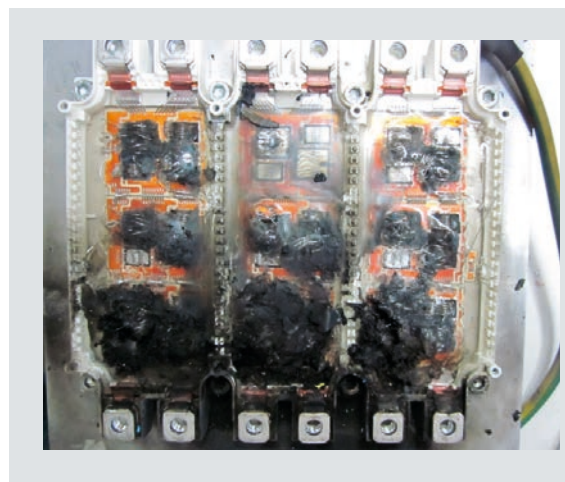
Das System wird deutlich komplexer, wenn sich in der Anlage mehrere Wechselrichter in womöglich unterschiedlichen Abständen und Leitungslängen und mit unterschiedlichen Taktfrequenzen befinden. Da jede Komponente – Generator, Antrieb, Bordnetz, Batterie, Solarzellen, etc. – an den Zwischenkreis mit einem Wechselrichter oder DC/DC Wandler angeschlossen wird, ist die Wahrscheinlichkeit für ungewollte Wechselwirkungen hoch und steigt mit der Anzahl der integrierten Komponenten.

Die Taktfrequenz eines Wechselrichters kann eine Resonanzfrequenz auch dann anregen, wenn sie leicht benachbart zu dieser Resonanzfrequenz liegt, da die Resonanzkurven dämpfungsbedingt eine gewisse Breite haben. Außerdem werden Resonanzen auch noch leicht durch die doppelte oder halbe Frequenz angeregt. Durch nichtlineare Effekte können sogar Summen und Differenzen von Wechselrichtertaktfrequenzen als anregende Störfrequenzen wirken. Die Wahrscheinlichkeit einer resonanten Anregung in einem solch komplexen System ist daher sehr hoch.

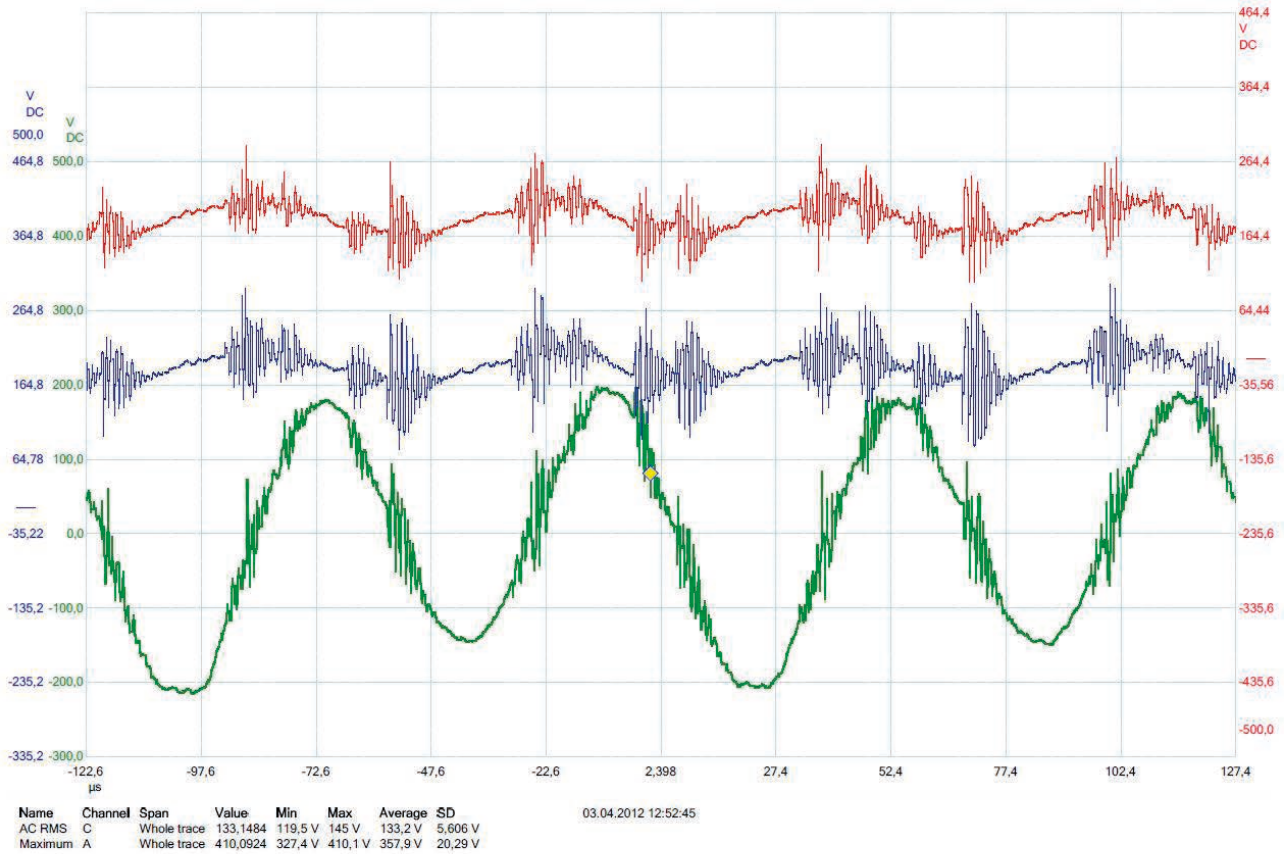
### 5 Wie real ist die Gefahr in der Praxis?

Neben einer starken Erwärmung der stromführenden Leiter kann dies zur Zerstörung von Komponenten oder zur Gefährdung von Leib und Leben führen. Im Zwischenkreis können auch stehende Wellen auftreten, die im Resonanzfall erhebliche Ströme, Überspannungen und Erwärmung verursachen.

Durch Stromschwingungen  
zerstörte Leistungs-  
halbleiterbauteile



Reale Messungen zeigen, dass bei auftretenden Resonanzschwingungen in einem DC-Zwischenkreis extrem hohe Wechselströme fließen können, bis hin zur Größenordnung der Nennströme. Die folgende Abbildung zeigt eine Resonanz - Stromschwingung in einem Zwischenkreis auf einem elektrisch angetriebenen Schiff mit einer Amplitude von ca. +/- 180 A (grüne Kurve, grüne Skala, Zahlenwerte in A). Bei einer Zwischenkreisspannung von 600 V sind das dann über 100 kW Leistung, die unkontrolliert im System pendeln.



Resonanzschwingung in einem DC-Zwischenkreis. Grüne Kurve: Strom in [A]

## 6 Lösungsansätze

### 6.1 Generelles

Generell können wir solche unerwünschten Resonanzschwingungen durch folgende Maßnahmen unterbinden:

- Einbau von angepassten HF-Filtern, welche sowohl die Frequenz verschieben als auch dämpfend wirken können. Es muss hier jedoch mit Phasenverschiebungen des Stroms gerechnet werden, die zusätzliche Effekte hervorrufen können.
- Änderung der Taktfrequenz der Umrichter. Hier sind die Möglichkeiten stark eingeschränkt, weil man mit einer geänderten Taktfrequenz auch viele andere Systemeigenschaften wie zum Beispiel die mögliche Nennleistung verändert.

ARADEX bietet hierzu System-Engineering bezogen auf den jeweiligen Aufbau an und auch passende Spezialfilter zur idealen Ankopplung der VP-Wechselrichter in ein Gesamtsystem.

- ➔ Sprechen Sie uns an. In unserer VPEQ-Reihe bieten wir die passenden Add-Ons zur optimalen Systemintegration unserer VECTOPOWER Produkte.

## 6.2 Orientierung: In welchen Einsatzfällen muss ich Maßnahmen zur Unterdrückung von unerwünschten Schwingungen treffen?

Diese Frage lässt sich nicht allgemeingültig beantworten. Eine Überprüfung auf mögliche unerwünschte Schwingungen im Rahmen der Inbetriebnahme von neuen Anlagen ist immer empfehlenswert. Aber sowohl aus den theoretischen Betrachtungen als auch aus zahlreichen umgesetzten Projekten dieser Art können wir schon für die Systemauslegung einige Hinweise geben.

### 6.2.1 Anwendungen, bei welchen eher weniger mit unerwünschten Schwingungen im DC-Zwischenkreis zu rechnen ist:

- nur ein Wechselrichter im System und dieser ist direkt an einer Batterie angeschlossen
- Neue Erkenntnisse: mehrere Wechselrichter im Verbund mit kurzen Leitungen innerhalb eines Schaltschranks und ausreichend hohen Kapazitäten im Zwischenkreis.

## 6.3 Gegenmaßnahmen

Für alle Anwendungen mit mehreren Wechselrichtern im Verbund und welche nicht die Besonderheiten aus 6.2.1 erfüllen, müssen wir im Zweifelsfall von einer Schwingungsneigung im DC-Zwischenkreis ausgehen. Die Gegenmaßnahmen bilden Filter, welche die Resonanzfrequenzen in unkritischere Bereiche verschieben und zugleich dämpfend wirken. ARADEX bietet in der VPEQ Reihe hierzu einige maßgeschneiderte Filter an. Meist reicht es aus, je einen vor jeden „+“ Anschluss der Wechselrichter zu schalten.

## 6.4 Vergleich AC Technik zur DC Technik

Nur als Hinweis der Vergleich zu verteilten AC-Systemen. Auch verteilte AC-Systeme neigen zum Schwingen. Koppelt man Wechselrichter aber mit Drosseln oder LCL-Filtern an, dann wirken diese genau wie die speziellen ARADEX DC-Filter. Nur sind die ARADEX DC-Filter erheblich kompakter, leichter und auch preiswerter.

