

# Ableitströme in Fehlerstrom-geschützter Umgebung

Für einen besseren Personenschutz werden in elektrischen Installationen vermehrt Fehlerstrom-Schutzschalter eingesetzt. Diese lösen aber, durch die von elektrischen Anlagen verursachten Ableitströme, oft unnötigerweise aus. Daraus folgen Maschinenstandzeiten und Kosten, die sich jedoch verhindern lassen - mit Wissen um hohe Ableitströme und gezielten Massnahmen dagegen. Da Frequenzrichter und Netzfilter wesentliche Gründe für Ströme gegen Erde sind, verdienen sie besondere Aufmerksamkeit.

Zusätzlich zu Sicherungen oder Leitungsschutzschaltern, kommen heute in elektrischen Anlagen vermehrt Fehlerstromschutzschalter (auch FI-Schutzschalter oder RCD\*) vor. Sicherungen schützen die elektrischen Anlagen primär vor Kurzschlüssen und Bränden. Die Fehlerstromschutzschalter hingegen sorgen für einen zuverlässigen Personenschutz. Sie erfassen Fehlerströme gegen Erde, zum Beispiel hervorgerufen durch einen Isolationsfehler, und schalten diese ab, bevor Personen gefährdet werden. Das Problem dabei ist, dass ein RCD nicht unterscheiden kann zwischen Ableitströmen, die im normalen Betrieb entstehen, und gefährlichen Fehlerströmen. Insbesondere Frequenzrichter (FU), die es für den energieeffizienten Betrieb von Motoren braucht, verursachen grosse Ableitströme.



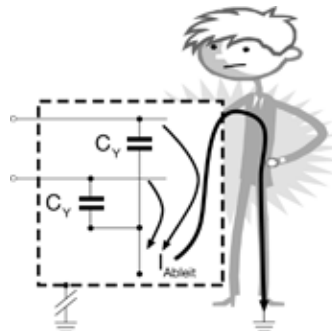
**Frequenzrichter und Motoren**  
(Quelle: Control Techniques AG Schweiz)

Aber auch die Kapazitäten der Leitungen und die Netzfilter, die zur Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) nötig sind, erzeugen zusätzlich Ströme gegen Erde. Die Summe aller Ableitströme kann so den Fehlerstromschutzschalter zum Ansprechen bringen und alle Verbraucher am gleichen Leitungsstrang abschalten. Dies hat Maschinenstandzeiten zur Folge, verursacht Produktionsausfälle und damit erhebliche Kosten. Doch es gibt Mittel gegen zu hohe Ableitströme, um einen effizienten aber auch sicheren Betrieb zu garantieren.

## Ableitstrom versus Fehlerstrom

Unter Ableitstrom versteht man den Strom, der in einem fehlerfreien Stromkreis zur Erde oder zu einem fremden leitfähigen Teil fliesst. Das

heisst, der Strom fliesst nicht durch den Nullleiter zurück. Gleiches macht ein Fehlerstrom, der aufgrund eines Isolationsfehlers zwischen spannungsführenden Leitern zu Erde zurückfliesst. Auch wenn eine Person einen unter Spannung stehenden Leiter direkt berührt, fliesst ein Fehlerstrom gegen Erde. Der vorgeschaltete RCD detektiert diesen Fehlerstrom und unterbricht den Stromkreis sofort.



**Abb. 1: Bei unterbrochenem Erdleiter sind Ableitströme für den Menschen gefährlich**  
(Quelle: SCHURTER AG)

Solche Fehlerströme haben einen hohen ohmschen Anteil, im Gegensatz zu den Ableitströmen, die überwiegend kapazitiv sind. Der RCD kann aber nicht zwischen den verschiedenen Erdströmen unterscheiden. Deshalb kann er bereits auslösen, wenn die Summe aller Ableitströme über dem Auslöseschwellwert liegt. Dies ist auch im normalen Betrieb möglich, ohne dass ein Fehler vorliegt.

Die Ableitströme sind abhängig vom Aufbau eines Antriebssystems, von der Netzspannung, Pulsweitenmodulations-Frequenz des Umrichters, Leitungslänge und den eingesetzten Störschutzfiltern. Weiter haben Netzimpedanz und das Erdungskonzept der Anlage einen wesentlichen Einfluss.

## Ableitströme von Frequenzrichtern

Sowohl beim 1-Phasen-FU als auch beim 3-Phasen-FU wird zuerst die Netzspannung über eine Brückenschaltung gleichgerichtet und geglättet. Der Wechselrichter formt da-

raus eine Ausgangsspannung, die in Spannungsamplitude und Frequenz, entsprechend der gewünschten Motordrehzahl, variieren kann.

Ableitströme im Frequenzrichter entstehen durch die internen Entstör-Massnahmen und alle parasitären Kapazitäten im FU und Motorkabel. Die grössten Ableitströme verursacht aber die Arbeitsweise des Frequenzrichters. Dieser regelt stufenlos die Motordrehzahl mit einer Pulsweitenmodulation (PWM). Dabei entstehen Ableitströme weit oberhalb der Netzfrequenz von 50 Hz. So kann die Schaltfrequenz des FU zum Beispiel 4 kHz betragen, die dazugehörigen Oberwellen aber sehr hohe Amplituden in höheren Frequenzen haben. Diese Frequenzen gehen über die Motorleitung zum Motor. Dabei wirkt die Motorleitung mit geerdeter Abschirmung wie ein Kondensator gegen Erde. Über diese Kapazität werden Ströme gegen Erde abgeleitet. Es empfiehlt sich, gefilterte und ungefilterte Leitungen zu trennen, da sonst die hochfrequenten Störsignale auf das gefilterte Kabel übertragen werden können (siehe Abb. 2).

## Transiente Ableitströme

Beim Aus- oder Einschalten der Anlage können ausserdem transiente Ableitströme entstehen. Das Einschalten bewirkt, je nach Phasenwinkel, steil ansteigende Spannungsspitzen infolge des schnellen Spannungsanstieges. Dasselbe geschieht aber auch beim Ausschalten infolge der Induktivitäten im Stromkreis. Diese schnellen Spannungsspitzen erzeugen über die Filterkondensatoren einen transienten Ableitstrom gegen Erde. So kann es passieren, dass der Fehlerstromschutzschalter, beim ersten Einschalten der Anlage, den Betrieb lahmlegt.

Eine Möglichkeit, dies zu verhindern, ist der Einsatz von RCD mit verzögertem Ansprechverhalten. Um die Personenschutzfunktion des RCD nicht allzu stark zu beeinträchtigen, sind dieser Ansprechverzögerung enge Grenzen gesetzt. RCD Typ B haben in der Regel bereits eine Ansprechverzögerung. Ist kein solcher RCD verbaut, kann man die Maschine relativ einfach schrittweise starten. So lassen sich bei Maschinen mit mehreren Einheiten die verschiedenen FU nacheinander hochfahren.

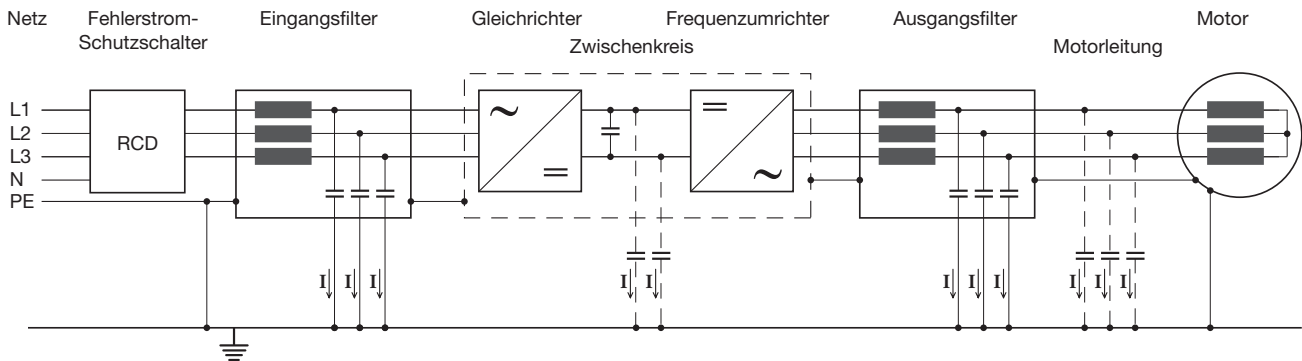


Abb. 2: Typische Ableitströme in einem Motorantrieb mit Frequenzumrichter (Quelle: SCHURTER AG)

### Eigenschaften der Fehlerstromschutzschalter

Der Fehlerstromschutzschalter muss bei einer Fehlfunktion den Stromkreis sofort unterbrechen. Dabei gibt es verschiedene Ausführungen. Häufig verwendet werden solche mit einem Auslösewert von 300 mA zum Schutz vor Bränden und von 30 mA für den Personenschutz. Werden die Auslösewerte durch einen Isolationsfehler oder durch eine Berührung erreicht, schaltet der FI-Schutzschalter sofort aus.

Nach der seit Juni 2007 gültigen DIN VDE 0100-410 sind für alle Steckdosenstromkreise bis 20 A Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit einem Bemessungsfehlerstrom bis max. 30 mA vorzusehen. Das gilt auch für Stromkreise bis 32 A im Aussenbereich zum Anschluss von tragbaren Betriebsmitteln. Die Möglichkeit, dass auch nicht fest angeschlossene Maschinen oder Geräte mit einer FI-geschützten Elektroinstallation verbunden sind, ist somit relativ gross. Als Hersteller sollte man deshalb seine Maschine auf Ableitströme überprüfen.

Neben den verschiedenen Auslösewerten gilt es auch die verschiedenen Charakteristiken der RCD zu beachten. Je nach Typ lösen sie nur bei sinusförmigem Fehlerstrom aus. Oder sie sind allstromsensitiv und messen auch die anderen Ströme im Frequenzbereich von 0 bis mehrere Kilohertz (siehe Tab. 1).

Abbildung 3 zeigt die Auslösekennlinie eines allstromsensitiven Fehlerstromschutzschalters Typ B+. Dieser Schutzschalter erfasst Fehlerströme bis 20 kHz. Der Auslösewert von 30 mA ist im Bereich der Netzfrequenz von 50 Hz gegeben, da dort die Möglichkeit eines Fehlerstromes am grössten ist. Der zulässige Auslösewert steigt mit zunehmender Frequenz an. Damit werden die hochfrequenten Ableitströme des FU bereits berücksichtigt.

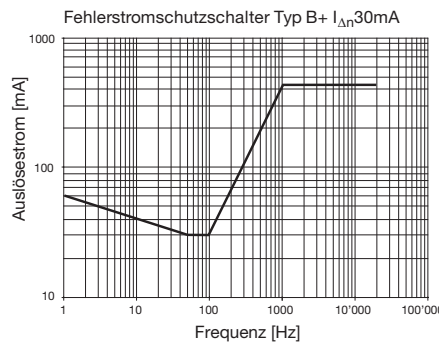


Abb. 3: Auslösekennlinie eines allstromsensitiven Fehlerstromschutzschalters (Quelle: SCHURTER AG)

Lassen sich die Ableitströme einer Anlage nicht unterhalb der Ansprechschwelle des FI-Schutzschalters bringen, gibt es die Möglichkeit, diesen durch ein Differenzstrommessgerät (RCM) zu ersetzen. Dabei werden der möglichst konstante Ableitstrom der Anlage (z.B. 60 mA) und der FI-Auslösewert (30 mA) summiert (90 mA) und eingestellt. Das RCM erlaubt den normalen Ableitstrom der Anlage, unterbricht aber sofort beim Überschreiten der summierten Limite.

### Ableitströme messen

Es empfiehlt sich, bei jeder neu aufgebauten Maschine, den Ableitstrom zu messen. Die einfachste Methode ist es, den Strom auf dem Erdleiter mit einem Zangenamperemeter zu messen (siehe Abb. 4).

Doch die meisten Zangenamperemeter zeigen nur den 50-Hz-Strom an, deshalb bietet sich eine Messung mit einem Ableitstrom-Analyse-System an. Abbildung 5 zeigt, dass die Ableitströme im höheren Frequenzbereich (Beispiel



Abb. 4: Erdleiter-Strommessung (Quelle: SCHURTER AG)

14 mA @ 6 kHz) grösser als der 50 Hz (6 mA @ 50 Hz) sein können. Anhand eines solchen Messergebnisses können die Ursachen der Ableitströme bereits abgeschätzt und Abhilfemassnahmen ergriffen werden.

Wichtig bei einer Ableitstrommessung ist, dass man den Strom während verschiedener Betriebszustände misst. Insbesondere eine Änderung der Motordrehzahl kann einen grossen Einfluss auf die resultierenden Ableitströme haben. So können zum Beispiel die Ableitströme massiv grösser werden, wenn die FU-Schaltfrequenz einem Vielfachen der Eigenresonanzfrequenz des EMV-Filters entspricht. Das Filter wird dabei zum Schwingen gebracht und kann hohe Ableitströme generieren.

### Ableitströme von Filtern

In den EMV-Filtern sind Kondensatoren von allen Leitern gegen Erde verdrahtet. Über jeden dieser Y-Kondensatoren fliesst, entsprechend der Kondensatorgrösse, Netzspannung und Frequenz ein fortwährender Strom. In einem idealen 3-Phasen-Netz mit sinusförmiger Spannung ist die Summe all dieser Ströme null. In der Praxis entsteht aber, durch die starke Verzerrung der Netzspannung, ein andauernder Ableitstrom gegen Erde. Dieser ist auch vorhanden, wenn die Maschine nicht läuft, die Spannung also nur am Filter anliegt. Die meisten Filterhersteller geben den maximal zu erwartenden Ableitstrom an, so dass man gut das geeignete Filter auswählen kann. Allerdings ist zu bedenken, dass dies theoretische Werte sind, die wegen unsymmetrischer Belastung oder höherer Frequenz (> 50 Hz) abweichen können. Deshalb sollte man die Ströme gegen Erde mit eingebauten Filtern im Betrieb nachmessen (siehe Abb. 6).

FI-Typ	Symbol	Fehlerstrom	Charakteristik
AC		wechselstromsensitiv	sinusförmiger Wechselstrom
A		pulsstromsensitiv	sinusförmiger Wechselstrom pulsförmiger Gleichstrom
B		allstromsensitiv	alle Ströme bis 2 kHz
B+		allstromsensitiv	alle Ströme bis 20 kHz

Tab. 1: Charakteristiken der RCD (Quelle: SCHURTER AG)

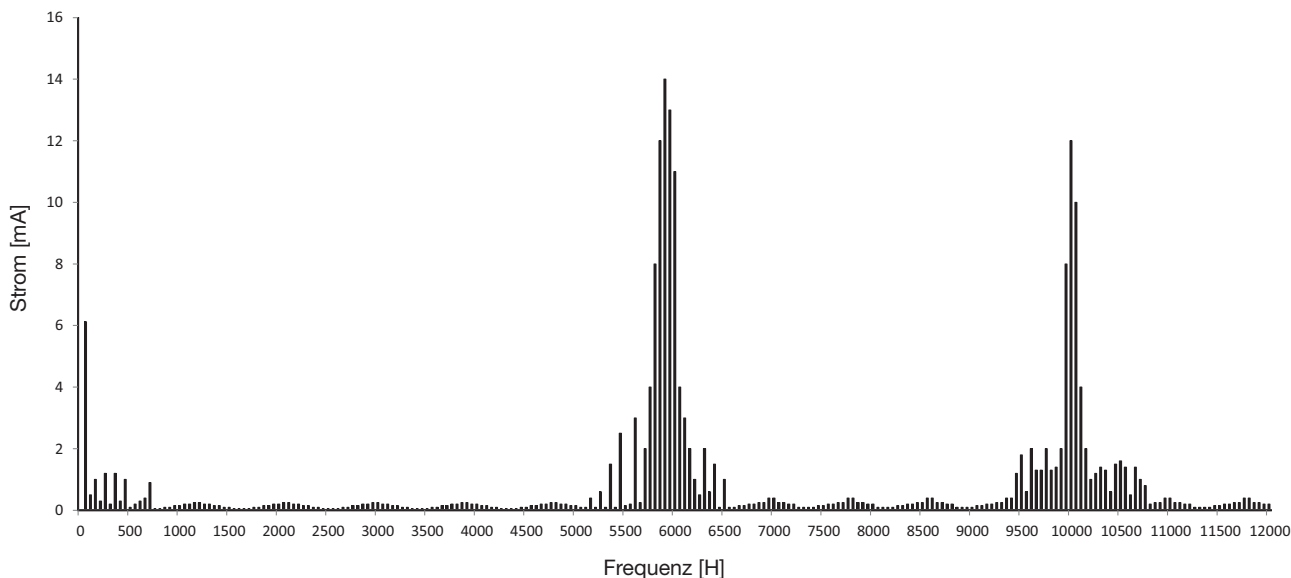


Abb. 5: Ableitströme im Frequenzbereich (Quelle: SCHURTER AG)

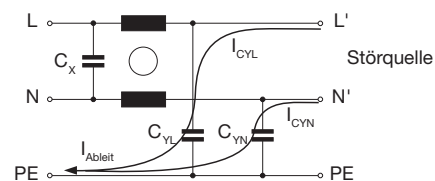


Abb. 6: Filterableitströme (Quelle: SCHURTER AG)

Viele FU werden mit bereits integrierten oder sogenannten Unterbau-Filtern geliefert. Dies sind meist einfache, preiswerte Filter mit kleinen Drosseln und grossen Kondensatoren zwischen den Polleitern und Erde, welche grosse Ableitströme verursachen. Die Filterwirkung der grossen Y-Kondensatoren lässt sich meist nur durch grössere Induktivitäten ersetzen. So muss zum Beispiel ein einstufiges Filter mit grossen Y-Kondensatoren durch ein zweistufiges Filter mit zwei Drosseln ersetzt werden, welches grösser und teurer ist.

Oftmals gibt es zu den beiliegenden Filtern auch gleich eine EMV-Konformitätserklärung. Diese gilt jedoch nur für einen idealen Aufbau und kurze Motorleitungen. Längere Motorleitungen, mit zum Beispiel mehr als 10 m, erfordern eine neue EMV-Messung. Lange Motorleitungen erzeugen auch eine grössere Kapazität gegen Erde, die wiederum grössere Ableitströme zur Folge haben. Diese zusätzlichen asymmetrischen Ströme können zu einer magnetischen Sättigung der Drossel im Filter führen. Dadurch verliert das Filter einen grossen Teil seiner Wirkung und die Anlage überschreitet die zulässigen EMV-Grenzwerte.

### Ableitströme im Filter reduzieren

Abhilfe schaffen hier kürzere Leitungen oder ein Ausgangsfilter. Dieses Filter, auch Sinusfilter genannt, sollte direkt am Ausgang des FU eingesetzt werden. Es verringert, durch die Reduzierung der Flankensteilheit der Motorspannung, wirkungsvoll die Ableitströme oberhalb 1 kHz.



Sinusausgangsfilter FMAC SINE von SCHURTER

Werden mehrere FU in einer Anlage eingesetzt, kann es sich lohnen, anstelle eines Filters für jeden FU, ein gemeinsames Filter am Netzeingang zu verwenden. Dies spart nicht nur Kosten und Platz, sondern verkleinert auch den Ableitstrom. Viele Hersteller bieten auch besonders ableitstromarme Filter für die FU oder Summenfilter am Netzeingang an.

Eine besonders einfache und effektive Möglichkeit den Ableitstrom zu verringern, ist die Verwendung eines 4-Leiter-Filter mit Neutralleiter anstelle der 3-Leiter-Filter. Die meisten Filter mit Neutralleiter haben kleinere Ableitströme, da viele Kondensatoren zwischen Polleiter und Neutralleiter verbunden werden. Dadurch kann der Hauptteil der Ableitströme über den Neutralleiter zurückfliessen. Da der Neutralleiter gleich wie die Polleiter durch den Fehlerstromschutzschalter gemessen wird, löst dieser nicht aus, da die Summe der Ströme gleich ist. Ist die Dämpfung eines Filters nicht ausreichend, kann dieses mit einer zusätzlichen Netzdrossel kombiniert werden. Diese reduziert die Stromwelligkeit und Oberschwingungen und sorgt somit für kleinere Ableitströme.

satoren zwischen Polleiter und Neutralleiter verbunden werden. Dadurch kann der Hauptteil der Ableitströme über den Neutralleiter zurückfliessen. Da der Neutralleiter gleich wie die Polleiter durch den Fehlerstromschutzschalter gemessen wird, löst dieser nicht aus, da die Summe der Ströme gleich ist. Ist die Dämpfung eines Filters nicht ausreichend, kann dieses mit einer zusätzlichen Netzdrossel kombiniert werden. Diese reduziert die Stromwelligkeit und Oberschwingungen und sorgt somit für kleinere Ableitströme.

### Fazit

Zusammenfassend eignen sich folgende Massnahmen gegen zu hohe Ableitströme bei Anlagen mit Frequenzumrichtern. Sie lassen sich auch gut kombiniert anwenden:

- Stromkreise in RCD-geschützt und ungeschützt aufteilen
- Gefilterte und ungefilterte Kabel trennen
- Schrittweises Starten der FU
- Frequenzumrichter nahe beim Motor (kurze Motorleitungen)
- Überspannungsschutz zum Schutz vor Spannungsspitzen
- RCD mit verzögertem Ansprechverhalten
- Differenzstrommessgerät (RCM)
- Netzdrosseln
- Summenfilter am Netzeingang anstelle mehrerer einzelner Filter
- 4-Leiter-Filter mit Nulleiter anstelle 3-Leiter-Filter verwenden
- Ausgangsfilter (Sinusfilter)
- Ableitstromarme Filter

### \*Bemerkung:

Fehlerstromschutzeinrichtungen werden RCD (residual current protective device = Reststromschutzgerät) oder FI-Schutzschalter genannt.

SCHURTER bietet eine breite Palette an Netzfiltern und Ausgangsfiltern an, viele davon auch als ableitstromarme Versionen. Mit dem professionellen EMV-Messservice von SCHURTER wird das für eine Anwendung optimale Filter bestimmt und zusätzlich auch der Ableitstrom der Anlage gemessen. Passt keines der Standardprodukte, wird in kurzer Zeit eine kundenspezifische Lösung entwickelt.

#### Unternehmen

SCHURTER ist ein weltweit führender Innovator und Produzent von Elektro- und Elektronikkomponenten. Im Zentrum stehen die sichere Stromzuführung und die einfache Bedienung von Geräten. Die grosse Produktpalette umfasst Standardlösungen in den Bereichen Geräteschutz, Gerätestecker und -verbindungen, EMV-Produkte, Schalter, Eingabesysteme und Elektronikdienstleistungen. Das weltweite Netz der Vertretungen garantiert zuverlässige Lieferungen und einen professionellen Service. Wo Standardprodukte nicht genügen, erarbeitet SCHURTER kundenspezifische Lösungen.



Hauptsitz Luzern

#### Hauptsitz

Division Components  
SCHURTER Group

SCHURTER AG  
Werkhofstrasse 8-12  
Postfach  
6002 Luzern  
Schweiz  
schurter.com

#### Kontakt

Asien-Pazifik  
T +65 6291 2111  
info@schurter.com.sg

Europa (Hauptsitz)  
T +41 41 369 31 11  
contact@schurter.ch

USA  
T +1 707 636 3000  
info@schurterinc.com