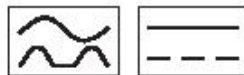


**Realisierung eines zuverlässigen  
Fehlerstromschutzes in elektrischen  
Anlagen mit Frequenzumrichtern**



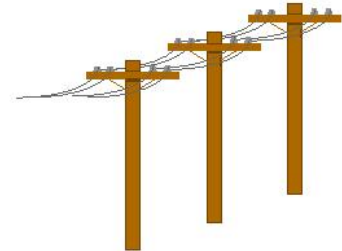
**Warum eigentlich ALLSTROMSENSITIV?**

## 1 Schutz vor Gefahren des elektrischen Stromes

### 1.1 Die Elektrizität

#### Eigenheiten

- Elektrizität ist eine Form von Energie; sie gehört zu unserem Alltag.
- Elektrizität ist an sich
  - geräuschlos
  - geruchlos
  - unsichtbar
  - schnell
  - leicht zu transportieren
  - leicht in andere Energieformen umzuwandeln
  - am Einsatzort ohne Rückstände einsetzbar



#### Wirkung

Wichtige Größen und Einheiten der Elektrizität sind

- Spannung Volt (V)
- Strom(stärke) Ampere (A)
- Widerstand Ohm (Ω)
- Leistung Watt (W)
- Arbeit (kWh)



Wird Spannung an einen elektrisch leitenden Gegenstand gelegt, fließt durch diesen ein elektrischer Strom, der um so größer ist, je größer die Spannung und je kleiner der elektrische Widerstand des Gegenstandes ist. Dieser Zusammenhang wird nach seinem Entdecker benannt, nämlich als das Ohmsche Gesetz:

$$U = R \times I$$

Je nach Art und Beschaffenheit des Objektes, an das Spannung gelegt wird, hat die Elektrizität unterschiedliche Wirkungen:

- Wir nehmen «nur» die Wirkung wahr, die durch Spannung und Strom erzeugt wird, und nicht die anstehende Spannung selber. So handelt es sich bei der Wirkung um eine indirekte Wahrnehmung.
- Wenn aber unser eigener Körper dieser leitende Gegenstand ist, können wir diesen Stromfluss direkt wahrnehmen. Je nach Stärke des Stromes reicht unser Empfinden von gar keinem bis zu stärksten Schmerzen, und die Folgen können Muskelverkrampfung, innere und äußere Verbrennungen, Herzkammerflimmern und Tod sein.

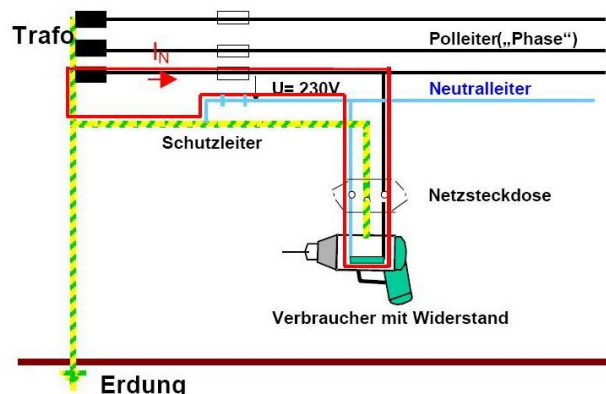
Die große Gefahr liegt darin, dass anstehende Spannung von unseren Sinnen nicht wahrgenommen wird, beim Berühren aber die Verletzung eintritt, bevor wir reagieren können.

### 1.2 Gefährdung

Man unterscheidet die Sachengefährdung und die Personengefährdung. In dieser Ausarbeitung werden wir uns auf die Auswirkungen der Personengefährdung beschränken.

#### Der Stromkreis

Um einen Stromkreis zu bilden braucht es eine Spannungsquelle (Trafo), eine Zu- und Rückleitung und einen Verbraucher (Bohrmaschine). Wenn nun der Schalter der Bohrmaschine gedrückt wird, kann ein Strom ( $I_N$ ) fließen.

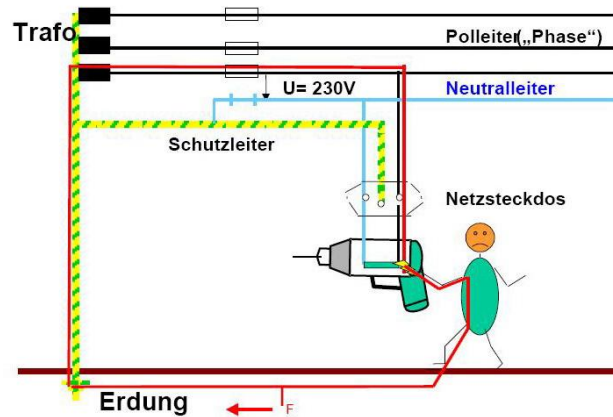


Kann nun durch einen Isolationsfehler das Gehäuse der Maschine unter Strom gelangen, fließt ein Teil des Stromes durch den Körper des Menschen gegen Erde und zurück zur Spannungsquelle (Trafo). Dadurch ist der Mensch lebensgefährlich bedroht.

Hauptsächlich sind die Stärke der Körperströme und ihre Dauer entscheidend für den Grad der Schädigung.

Die Stromstärke ist abhängig von der Berührungsspannung und vom Körperwiderstand.

Der Körperwiderstand wiederum wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst.



Die Durchströmungsdauer ist mit technischen Mitteln (automatische Abschaltung im Fehlerfall) zu begrenzen. Die Durchströmung löst entweder das gefährdete Herzkammerflimmern (mit Todesfolge) aus oder zerstört Körpergewebe durch Erwärmung, Verbrennung. Der Körper ist physisch ein heterogenes Gebilde, welches man sich zusammengesetzt aus zahllosen, miteinander verknüpften Teilwiderständen vorstellen kann. Fließt ein Strom durch ihn, teilt sich dieser im Innern entsprechend auf. Was die Provokation von Herzkammerflimmern betrifft, ist entscheidend, wie groß der durch das Herz fließende Teilstrom ist. Je nach Position von Stromeintrittsstelle und Stromaustrittsstelle ergeben sich unterschiedliche Teilströme im Körperinnern. Sehr ungünstige Verhältnisse liegen bei großflächigen Kontaktstellen vor, wie z.B. bei Elektrisierung in der Badewanne.

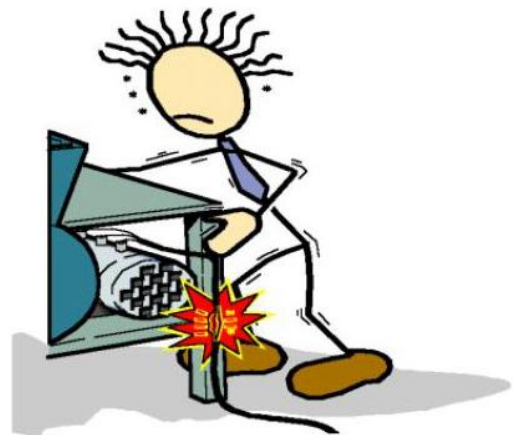
## Durchströmung

Eine Person kann mit unter Spannung stehenden Teilen direkt oder indirekt in Berührung kommen.

### Direktes Berühren



### Indirektes Berühren



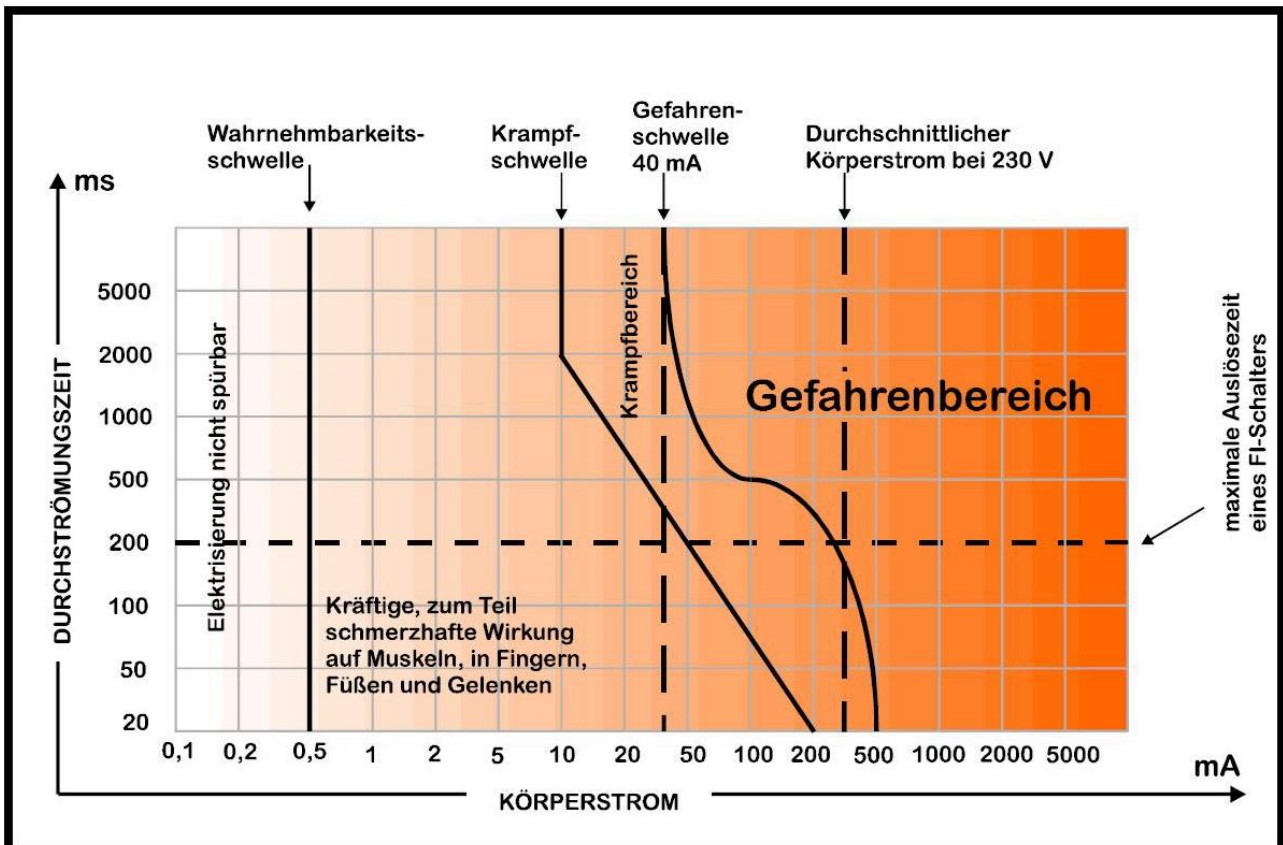
Ein Strom von über 50 mA (die Stromaufnahme einer 10-W-Glühlampe!) kann genügen, um das Herzkammerflimmern auszulösen. Wird nicht sofort Hilfe geleistet, tritt nach wenigen Minuten der Tod ein.

Hohe Ströme, bei Nieder- wie bei Hochspannung, führen zu schweren äußeren und inneren Verbrennungen. Flammbögen bewirken äußere Verbrennungen und gefährden das Augenlicht (Schweißblendung). Auch einzelne Stromstöße, z.B. von Kondensatorentladungen, können sich gefährlich auswirken.

## Wirkungen des Stroms auf den Menschen

	bis 1 mA	<b>Reizschwelle</b> , der Strom ist noch kaum spürbar.
	5 mA	<b>Elektrisieren</b> , Ameisenlaufen, Kribbeln, der Leiter kann noch losgelassen werden.
	15 mA	<b>Krampfschwelle</b> , Loslassgrenze, der Leiter kann nicht mehr losgelassen werden. Atemverkrampfungen können zum Erstickungstod führen.
	50 mA	<b>Gefahrenschwelle</b> , die Atmung ist behindert, evtl. Herzstillstand oder Herzkammerflimmern nach kurzer Zeit.
	ab 80 mA	<b>Todesschwelle</b> , tödliche Wirkung (Herzkammerflimmern) nach 0,3 s bis 1 s wahrscheinlich.

## Stromstärkezonen für Wechselstrom 50/60 Hz



## Folgeereignisse durch Elektrisierung

Je nach Situation muss mit erheblichen Verletzungen aus Folgeereignissen gerechnet werden. Die Bewegungen infolge Durchströmung oder Flammbogeneinwirkung sind reflexartig und somit unkontrollierbar. Beispiele:

- Schritt rückwärts und Fall über die Werkzeugkiste, Bodenunebenheiten
- Sturz von Leiter, Baugerüst
- Fingerverletzungen (Schnitte, Schürfungen etc.)

**2 Schutz vor Elektrounfällen**

Zu Unfällen kommt es häufig beim Umgang mit Elektrogeräten und Elektrowerkzeugen und bei in der Regel unbefugt vorgenommenen Arbeiten an elektrischen Ausrüstungen von Maschinen sowie an der festen Elektroinstallation.

In bestimmten Bereichen treten verstärkt Gefährdungen auf. Dazu gehören z.B. Nassbereiche der Metallindustrie und Kleinstbaustellen. Darüber hinaus kann es zu Gefährdungen beim Umgang mit Kernbohrmaschinen und handgeführten Nass- und Trockenschleifmaschinen oder beim Einsatz von elektrischen Geräten in der Landwirtschaft kommen. Auch im Privathaushalt und hier insbesondere in Badezimmern, im Freien (Gartenbereich) und in Küchen kommen Elektrounfälle vor.

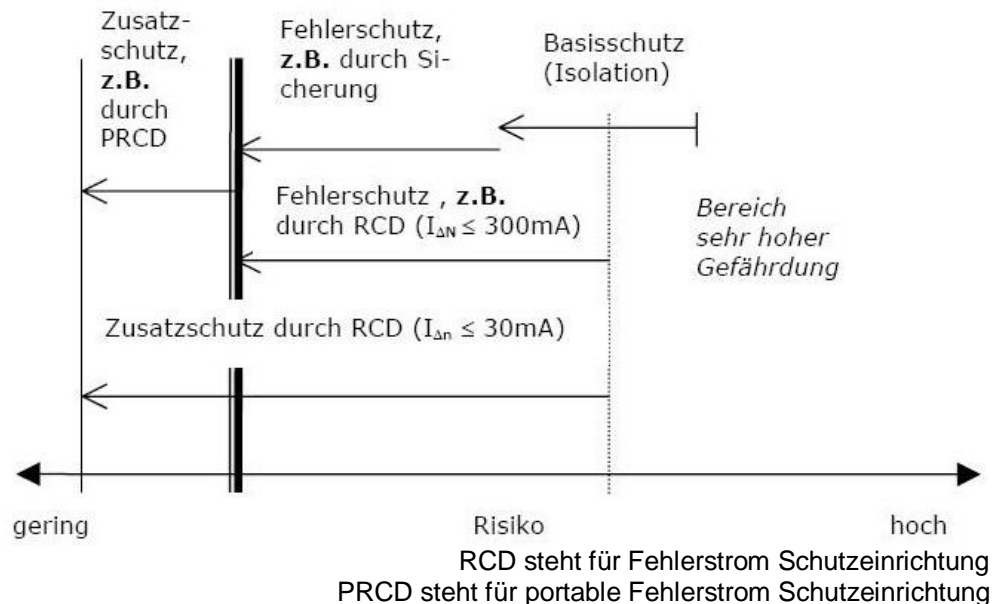
Gefährdungen können durch Schutzmaßnahmen wie in der Abbildung beschrieben reduziert werden. Diese Darstellung setzt jedoch voraus, dass die Installation vollkommen fehlerfrei errichtet wird, das heißt entsprechend den einschlägigen Gesetzen und Normen. Es wird gezeigt, wie im allgemeinen durch Zusatzschutz das Risiko reduziert werden kann; die Abbildung erhebt nicht den Anspruch, alle in der Praxis vorkommenden Situationen darzustellen und erläutert folgende Zusammenhänge:

Ein in der Regel durch Isolierung erreichter Basisschutz schützt gegen direktes Berühren von spannungsführenden Teilen. Falls dieser Basisschutz versagt (1. Fehler), begrenzt der Fehlerschutz die Gefährdung durch elektrischen Schlag. Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen ( $I_n = 30\text{mA}$ ) sorgen für Zusatzschutz bei direktem Berühren, falls Basisschutz und Fehlerschutz versagen.

Für den Fehlerschutz eingesetzte Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen ( $I_n = 300\text{mA}$ ) können, falls der Basisschutz versagt, auch erhebliche Teile des ursprünglich durch Basisschutz reduzierten Risikos mit abdecken.

Für den Zusatzschutz eingesetzte Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen ( $I_n = 30\text{mA}$ ) können, falls der Fehlerschutz versagt, auch erhebliche Teile des ursprünglich durch Fehler- und Basisschutz reduzierten Risikos mit abdecken.

**Abbildung:**



### Zusätzliche Isolierung oder Sonderisolierung

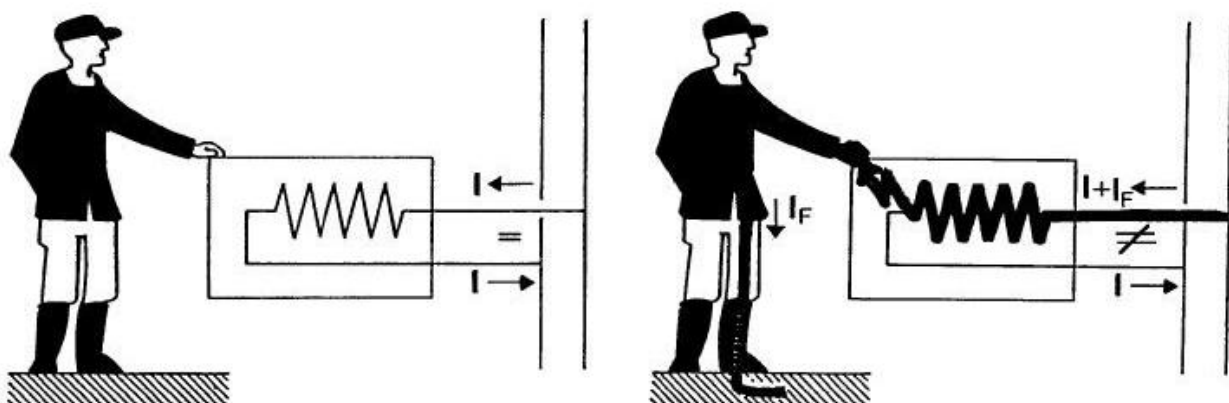
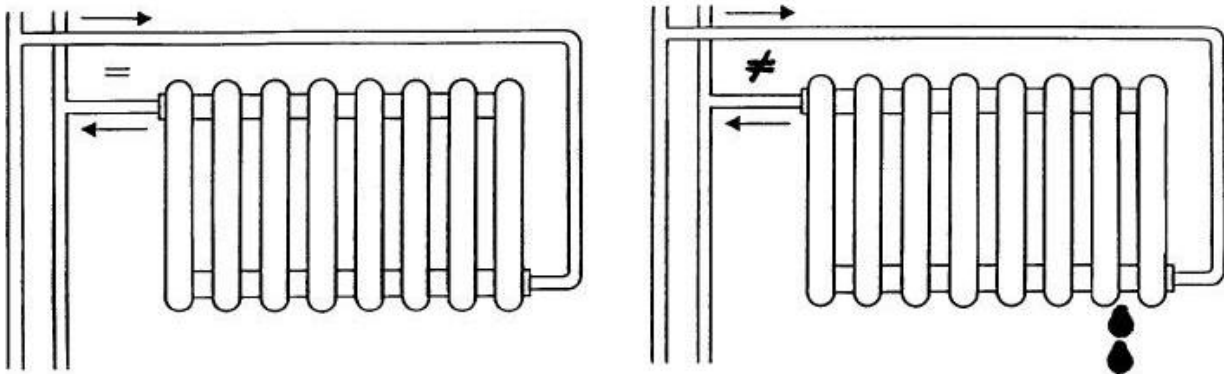
Unter diesem Begriff versteht man eine zweite Isolierung, die über der normalen Betriebsisolierung angebracht wird. Luft wird nicht als zusätzliche Schutzisolierung angesehen. Ist die zweite Isolierung aus einem anderen Isolierstoff als die erste, spricht man von einer Doppelisolierung (Sonderisolierung). Ist die zweite Isolierung aus dem gleichen Isolierstoff wie die erste, spricht man von einer verstärkten Isolierung.

### Schutzschaltungen

Die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung wird in den Niederspannungsinstallationen als zusätzliche Schutzmassnahme verwendet oder als Fehlerschutz an Orten, wo die Nullungsbedingungen nicht erfüllt werden können. Die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung kommt z.B. in feuchten und nassen Räumen, im Freien, in korrosionsgefährdeten Räumen oder bei Brandgefahr zur Anwendung, also an den Örtlichkeiten, wo eine erhöhte Gefahr für die Personen besteht.

Das Prinzip der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung kann man mit einem Radiator einer Heizung vergleichen werden. Die Menge Wasser die hinein fließt geht auch wieder heraus, wenn alles in Ordnung ist. Sonst tropft Wasser.

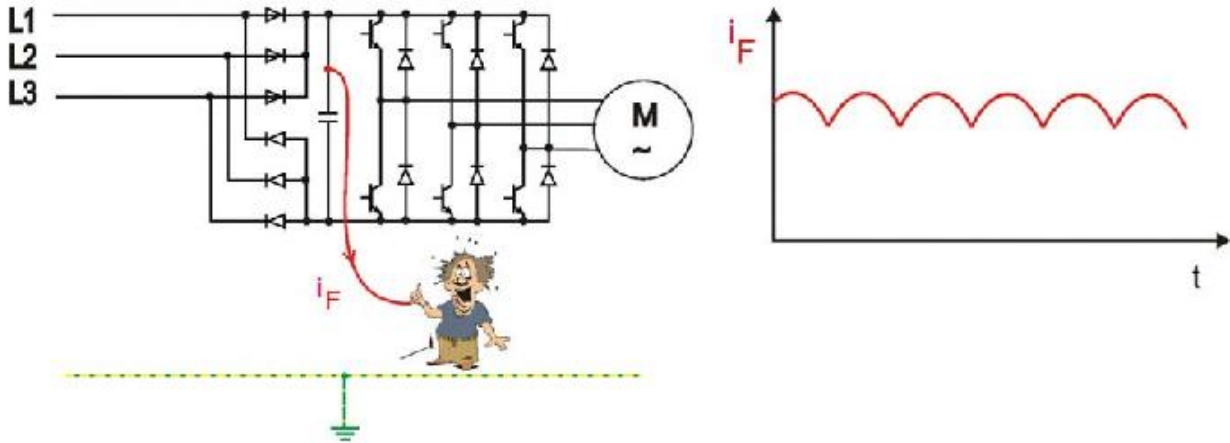
Die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung löst nicht aus, wenn die gleiche Menge Strom über einen Leiter hinein fließt und über den anderen Leiter wieder heraus. Kann jedoch ein Fehlerstrom gegen Erde fließen, infolge Beschädigung einer Isolation, muss die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung auslösen.



### 3 Einsatz von allstromsensitiven Fehlerstromschutzeinrichtungen RCD's (Typ B) in elektrischen Anlagen mit Frequenzumrichter:

Mehrphasig betriebene elektronische Betriebsmittel wie z. B. Frequenzumrichter oder Wechselrichter können im Fehlerfall wie in Bild 1 dargestellt einen glatten Gleichfehlerstrom erzeugen.

*Bild 1*



Dieser durch die B6 - Schaltung im Eingang des Frequenzumrichters hervorgerufene glatte Gleichfehlerstrom\* würde eine herkömmliche RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (früher FI – Schutzschalter) vom Typ A oder AC nicht auslösen, da im Summenstromwandler der RCD's keine zeitlich veränderliche Magnetisierung erfolgt, die für eine induktive Energieübertragung auf das Auslöserelais der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung notwendig ist. Je nach Höhe bewirkt der Gleichfehlerstrom stattdessen eine magnetische Vormagnetisierung des Wandlerkernes und erhöht damit die Auslöseschwelle der RCD's für weitere möglicherweise noch vorhandene Wechselfehlerströme bis hin zur Nichtauslösung.

\*

(im Anhang A wird die Entstehung des Gleichfehlerstromes aus den drei Einzelströmen der Phasen L1, L2 und L3 näher dargestellt.)

#### 4 Was sind Fehlerströme und was sind Ableitströme?

Fehlerströme sind überwiegend ohmsch und entstehen durch Isolationsfehler zwischen spannungsführenden Teilen und Erde, beispielsweise aufgrund von Schmutz und Feuchtigkeit in einem Gerät. Ein anderes Beispiel wäre ein Stromfluss zur Erde, wenn eine Person direkt eine Phase des Netzes berührt (siehe Bild 2a). Ableitströme sind häufig kapazitiv und fließen z. B. aufgrund von Entstörmaßnahmen durch Kondensatoren in EMV - Filtern oder über die Kapazität langer abgeschirmter Leitungen zur Erde (siehe Bild 2b).

Fehlerströme und auch Ableitströme können je nach Anwendung und elektrischer Anlage mehrere, von der Netzfrequenz 50 Hz deutlich verschiedene Frequenzanteile, gleichzeitig aufweisen. Die RCD's können Fehlerströme und Ableitströme nicht voneinander unterscheiden und bewerten sie deshalb gleichermaßen. So kann eine Auslösung bereits erfolgen, wenn die Summe aller fließenden Ableitströme die Auslöseschwelle der RCD's überschreitet, obwohl kein Fehler (Fehlerstrom) in der elektrischen Anlage vorliegt.

Bild 2a:

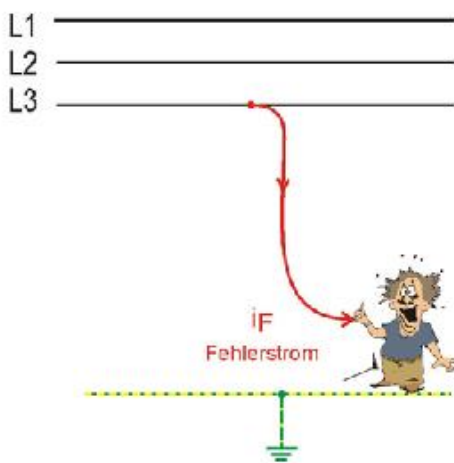
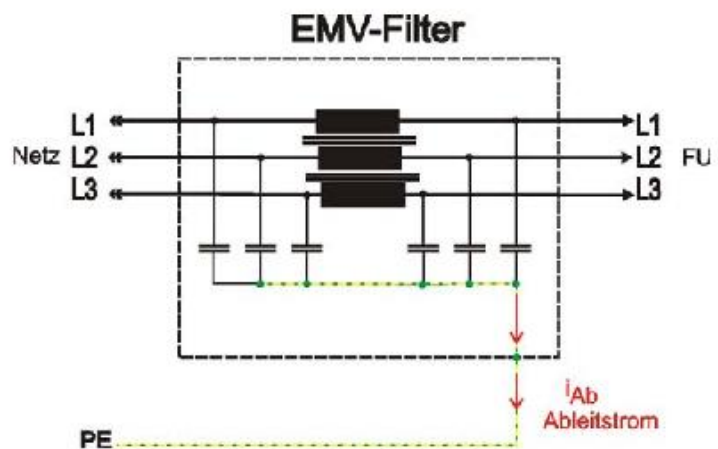


Bild 2b:

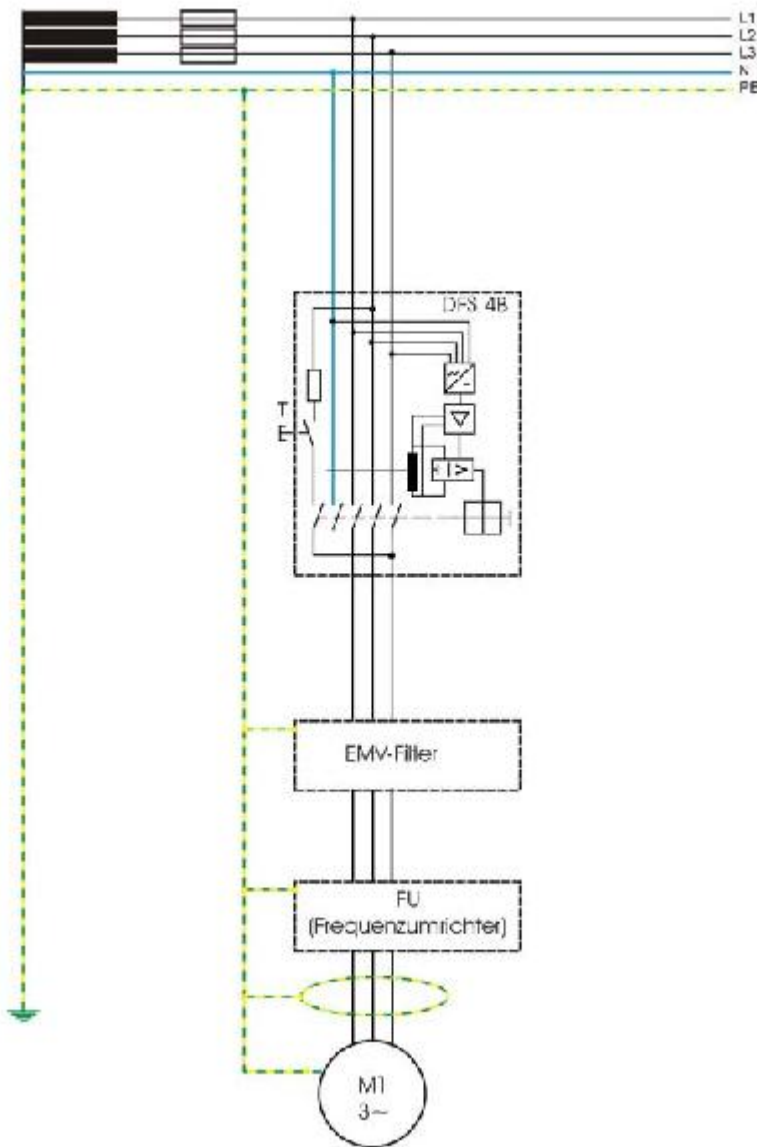




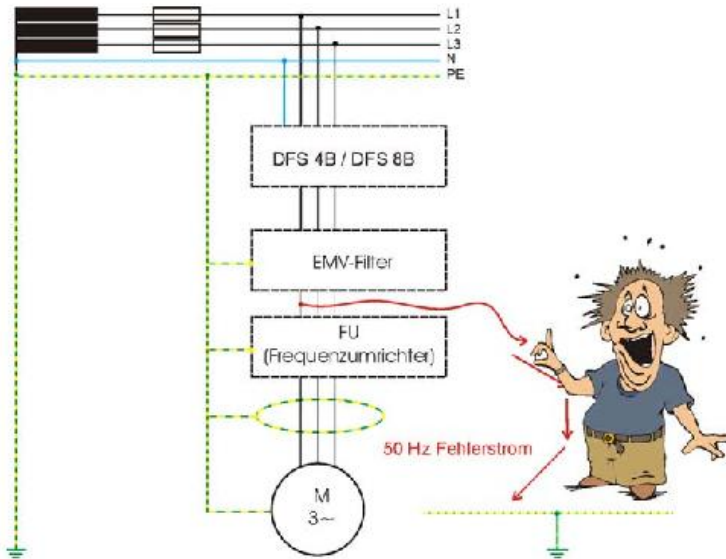
**5 Welche Fehlerströme können in Anlagen mit Frequenzumrichtern auftreten:**

Einige Beispiele möglicher Fehlerströme in einer Anlage mit einem Asynchronmotor, der mit einem Frequenzumrichter betrieben wird:

*Bild 3*

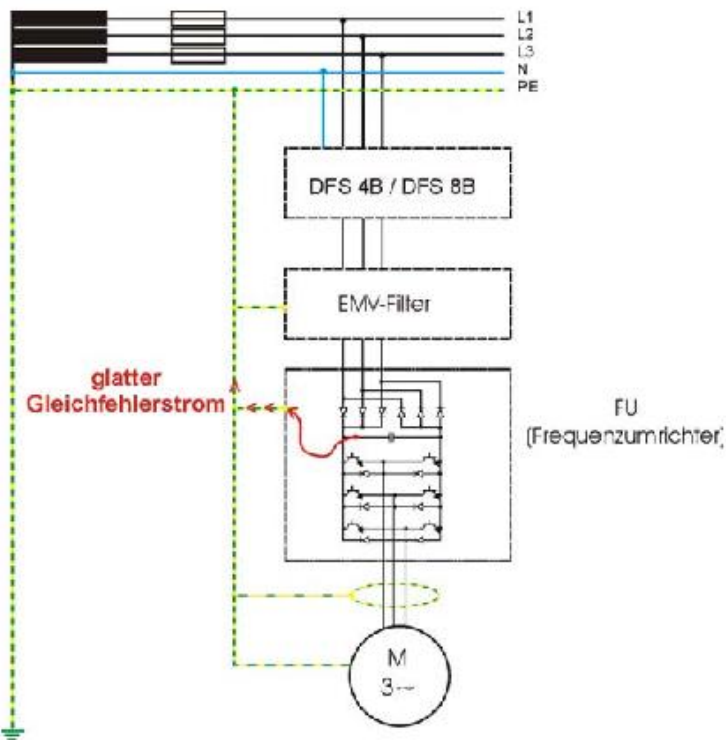


**Bild 3a:** Eine Person berührt am Eingang des Frequenzumrichter den Leiter L1



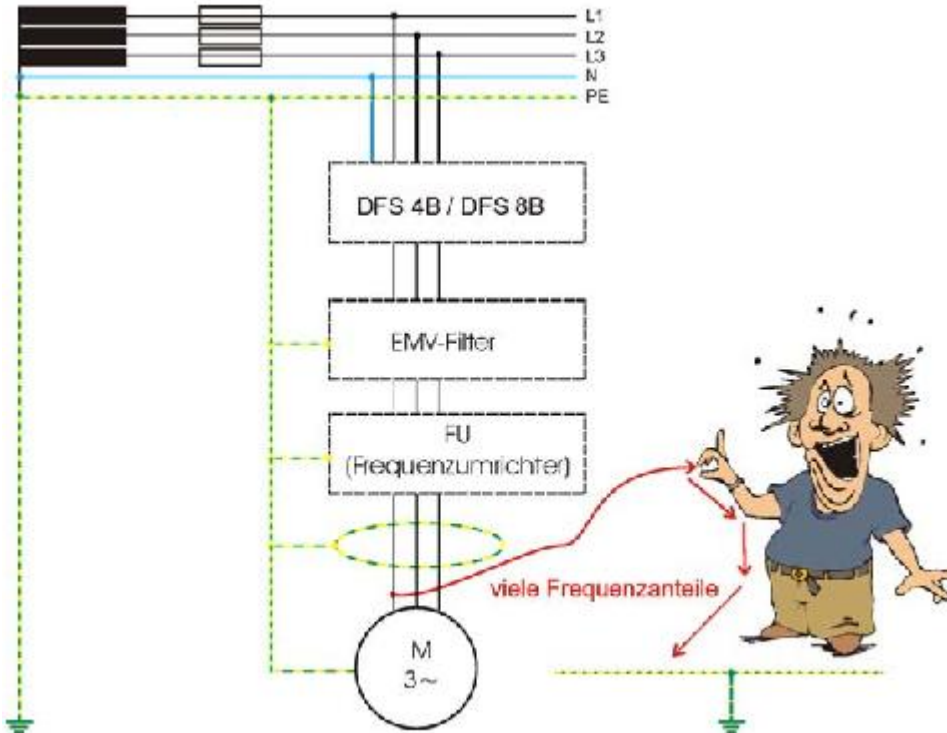
Es fließt ein rein sinusförmiger 50 Hz - Fehlerstrom durch den Körper der Person. Bei entsprechender Höhe dieses Fehlerstromes erfolgt eine sichere Auslösung des RCD's.

**Bild 3b** Isolationsfehler vom +Pol des Zwischenkreiskondensators zum Gehäuse des Frequenzumrichters



Dieser Fehler könnte z. B. durch Schmutz und Feuchteinwirkung verursacht sein. Hier fließt ein nahezu glatter Gleichfehlerstrom. Eine sichere Auslösung bei Verwendung eines allstromsensitiven RCD's ist bei entsprechender Höhe des Gleichfehlerstromes gewährleistet.

Bild 3c Eine Person berührt direkt die Zuleitung des Motors an L1



Beispiel: Der Motor wird mit einer Ausgangsfrequenz (auch als Maschinen- oder Motorfrequenz bezeichnet) von 10 Hz betrieben. Die Schaltfrequenz (auch als Chopper - oder Taktfrequenz bezeichnet) des Frequenzumrichters beträgt 8 kHz. Die Person berührt während des Betriebes den Leiter L1 im schadhaften Zuleitungskabel des Motors. Durch den Körper der Person fließt jetzt ein Fehlerstrom, der aus sehr vielen Frequenzanteilen besteht. Er enthält neben der Ausgangsfrequenz 10 Hz mit geringerer Amplitude auch die Schaltfrequenz des Frequenzumrichters mit 8 kHz und deren Oberschwingungen\* 16 kHz, 24 kHz, 32 kHz, usw. mit erheblichem Anteil.

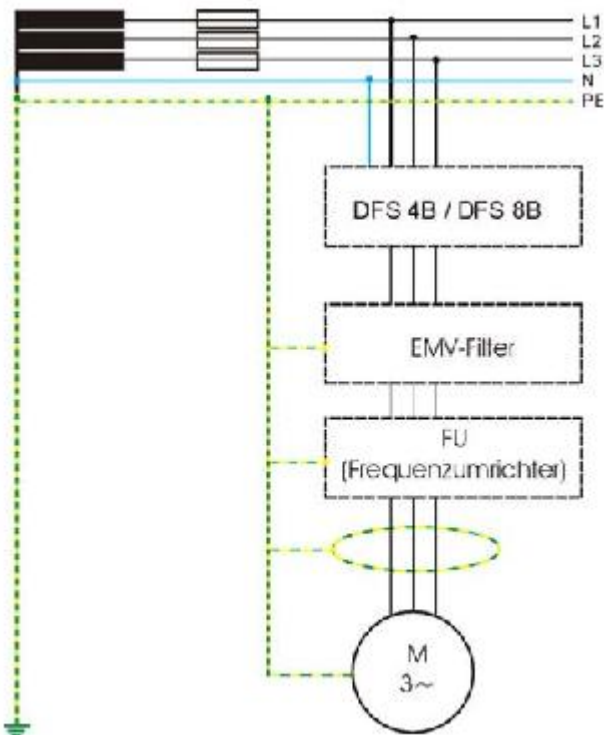
**\* (im Anhang B wird die Entstehung von Oberschwingungen näher erläutert)**

Für Körperströme mit Frequenzen oberhalb von 1 kHz liegt die Gefährdungsgrenze für Herzkammerflimmern beim Menschen über 400 mA. Jedoch kann ein hoher Fehlerstrom auch thermische Schäden im menschlichen Körper bewirken. Eine RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung, der den Menschen auch bei direktem Berühren eines spannungsführenden Teiles schützen soll, muss deshalb auch im Frequenzbereich oberhalb von 1 kHz noch eine ausreichende Empfindlichkeit aufweisen. Allstromsensitive RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen sollen deshalb lückenlos auch noch Fehlerstromanteile mit Frequenzen bis in den MHz-Bereich mit ausreichender Empfindlichkeit erfassen können, damit der durch den Bemessungsfehlerstrom gekennzeichnete Schutzpegel (Schutz bei indirektem Berühren, Brandschutz oder Schutz bei direktem Berühren) über den gesamten Frequenzbereich gegeben ist.

## 6 Welche Ableitströme können auftreten ?

Man unterscheidet stationäre, variable und transiente Ableitströme. Zur Erläuterung hierzu dient noch einmal das Beispiel einer Anlage mit einem Asynchronmotor, der mit einem Frequenzumrichter betrieben wird.

Bild 3c



Zur Einhaltung der einschlägigen EMV - Vorschriften (Elektromagnetische Verträglichkeit) darf der Frequenzumrichter nur über ein vorgeschaltetes EMV - Filter, welches auch schon im Frequenzumrichter integriert sein kann, betrieben werden. Da die pulsweitenmodulierte Ausgangsspannung des Frequenzumrichters äußerst steiflankig ist und somit Oberschwingungen hoher Amplituden und Frequenzen enthält, darf der Motor ebenfalls zur Einhaltung der EMV - Vorschriften nur über eine abgeschirmte Leitung mit dem Frequenzumrichter verbunden werden.

### **Stationäre Ableitströme:**

Das EMV - Filter besteht in einfachster Ausführung aus LC - Tiefpässen, deren Kondensatoren im Stern zum Schutzleiter geschaltet sind. Bei idealem Netz mit einer streng sinusförmigen Spannung ergibt die Summe aller kapazitiven Ströme durch diese Kondensatoren Null. Durch die mittlerweile starken Verzerrungen der Netzspannung ergibt sich jedoch in der Praxis ein kapazitiver Gesamtstrom ungleich Null, der fortwährend über den Schutzleiter abfließt und daher als stationärer Ableitstrom bezeichnet wird. Auch durch die Kommutierung der B6-Brückenschaltung im Eingang des Frequenzumrichters werden Ableitströme durch die internen Kondensatoren des EMV - Filters generiert. Der stationäre Ableitstrom ist auch bei nichtlaufendem Motor vorhanden (Reglersperre des Frequenzumrichters) und weist typischerweise Frequenzanteile von 100 Hz bis 1 kHz auf und kann eine Amplitude von mehreren hundert Milliampere haben. Besonders einfache und preiswerte EMV - Filter mit kleinen Induktivitäten und großen Kondensatoren bewirken hohe Ableitströme und können zur ungewollten Auslösung der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung führen.

Anmerkung zum Einsatz einphasig betriebener Frequenzumrichter:

Einphasig betriebene Frequenzumrichter sind oft mit einem integrierten EMV - Filter ausgestattet. Bei diesem Filter sind die Filterkondensatoren von L nach PE und N nach PE geschaltet. Dadurch entstehen hier nicht unerhebliche 50 Hz - Ableitströme. Bei Verwendung mehrerer Frequenzumrichter ist deshalb darauf zu achten, dass diese zur Kompensation der Ableitströme möglichst gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt werden, um eine Auslösung der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung zu vermeiden.

### **Variable Ableitströme:**

Wird der Motor jetzt durch den Frequenzumrichter in seiner Drehzahl geregelt, so treten noch weitere Frequenzanteile oberhalb von 1 kHz im Gesamtableitstrom auf. Besonders die Schaltfrequenz des Frequenzumrichters (typische Werte: 2, 4, 8, 16 kHz) und auch die dazugehörigen Oberschwingungen sind mit sehr hoher Amplitude vorhanden. Eine lange Motorleitung mit einer geerdeten Abschirmung wirkt wie ein Kondensator, der gegen Erde geschaltet ist und Ströme mit entsprechender Frequenz und deren harmonische Oberschwingungen dorthin ableitet.

Stationäre und variable Ableitströme verlaufen bei konstanter Drehzahl des Motors nahezu periodisch. Ein RCD reagiert auf diese Ableitströme mit einer Abschaltung, wenn sie in ihrer Höhe die Ansprechschwelle der RCD's bei der jeweiligen Frequenz überschreiten. Veränderungen der Drehzahl bewirken auch eine Veränderung der variablen Ableitströme sowohl im Frequenzspektrum als auch in der Amplitude und können möglicherweise dann eine Auslösung der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung bewirken.

Zur Vermeidung von Fehlauflösungen kann die allstromsensitive RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung so ausgelegt werden, dass sie generell auf Differenzströme im Frequenzbereich der Ableitströme unempfindlich reagiert. Wenn auch Fehlerströme in diesem Frequenzbereich vorkommen können, wird durch diese Maßnahme jedoch der Schutzzumfang eingeschränkt!

### **Transiente Ableitströme**

Bei Ausschaltvorgängen treten im Netz infolge der Induktivitäten in den Strompfaden Spannungsspitzen auf, die aufgrund der steilen Anstiegsflanken sehr hohe Frequenzanteile enthalten. Auch durch Einschaltungen bei ungünstigen Phasenwinkeln der Netzspannung enthält das Spektrum der Netzspannung kurzzeitig Hochfrequenzanteile infolge des schnellen Spannungsanstiegs. Diese hochfrequenten Spannungsanteile treiben über die o. a. Kapazitäten der EMV - Schutzmaßnahmen transiente Ströme zur Erde, die eine unerwünschte Abschaltung von RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen bewirken können. Bei Aufschaltung der Netzspannung mit Schaltern ohne Sprungschaltfunktion werden, je nach Schaltgeschwindigkeit, die drei Phasen zeitlich zueinander versetzt zugeschaltet. Solange nicht alle drei Leiter Spannung führen, fließt dann über die Filterkondensatoren des EMV - Filters der bereits zugeschalteten Leiter ein erhöhter Ableitstrom zur Erde. Fehlauflösungen infolge transienter Ableitströme können vielfach durch den Einsatz von RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit Ansprechverzögerung vermieden werden. Um die Schutzwirkung nicht unzulässig zu beeinträchtigen, darf die Ansprechverzögerung nur in engen Grenzen wirken. Hieraus folgt, dass der RCD auch gegen transiente Ableitströme nicht beliebig „immunisiert“ werden kann. Es ist darauf zu achten, dass die RCDs eine solche Ansprechverzögerung aufweisen. Überschreiten die transienten Ableitströme in ihrer Dauer jedoch die durch die Vorschriften vorgegebene höchstzulässige Abschaltzeit des RCD's, so kommt es dennoch bei entsprechender Höhe zu einer Auslösung!

## **7 Maßnahmen zur Reduzierung der Ableitströme:**

Wie weiter oben deutlich wurde, geht eine Ertüchtigung der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung gegen Fehlauflösungen durch Ableitströme in den meisten Fällen zu Lasten der Schutzwirkung. Es ist daher immer zu empfehlen, Ableitströme durch die folgenden Maßnahmen kleinstmöglich zu halten.

### **7.1 Reduzierung von stationären Ableitströmen:**

Viele Frequenzumrichter -Hersteller bieten mittlerweile auch s. g. ableitstromarme EMV - Filter an. Bei diesem Filtertyp treten bauartbedingt deutlich niedrigere Ableitströme auf, als bei Standardfiltern. In elektrischen Netzen, in denen der Neutralleiter vorhanden ist, kann ein 4 -Leiter - Filter eingesetzt werden. Dieser Filtertyp weist die geringsten Ableitströme auf. (Der Hauptanteil der Ableitströme wird jetzt über den Neutralleiter abgeführt). Durch weitere Maßnahmen sollte gewährleistet werden, dass die Netzspannung möglichst unverzerrt bleibt. Auf gar keinen Fall darf am Ausgang eines dreiphasigen EMV - Filters (ohne Neutralleiteranschluss) ein einphasiger Verbraucher wie z. B. eine Glühlampe gegen den Neutralleiter angeschlossen werden! Durch die unsymmetrische Belastung des Filters werden die Ableitströme weiter erhöht, und die Filterwirkung wird stark beeinträchtigt, so dass die zulässigen Grenzen zur Einhaltung der EMV - Vorschriften deutlich überschritten werden! Werden mehrere einphasig betriebene Frequenzumrichter verwendet, sollten diese zur Kompensation der Ableitströme gleichmäßig auf alle Phasen verteilt werden.

### **7.2 Reduzierung von variablen Ableitströmen:**

- Die abgeschirmte Motorzuleitung möglichst kurz halten.
- Sinus - Filter, EMV - Sinus - Filter oder Ausgangsdrosseln direkt hinter dem Ausgang des Frequenzumrichters (vor der Motorzuleitung) installieren. Diese verringern durch eine Reduzierung der Flankensteilheit der Ausgangsspannung des Frequenzumrichters die Ableitströme oberhalb von 1 kHz auf der Leitung zum Motor erheblich.

- Werden mehrere Frequenzumrichter mit eigenem EMV - Filter eingesetzt, können durch ein zusätzlich vorgeschaltetes gemeinsames 4 - Leiter - Filter die variablen Ableitströme erheblich reduziert werden.

### **7.3 Weitere Reduzierung von Ableitströmen:**

Netzdröseln, welche noch vor das EMV - Filter gesetzt werden, reduzieren die Stromwelligkeit samt Oberschwingungen und erhöhen zudem die Lebensdauer von Bauelementen im Frequenzumrichter. In elektrischen Anlagen mit mehreren Frequenzumrichter sollte an Stelle der einzelnen EMV - Filter eines jeden Frequenzumrichter ein Sammelfilter verwendet werden. Die Ableitströme der einzelnen EMV - Filter addieren sich. Hierbei ist die Summe der Ableitströme aller Einzelfilter meist größer als der Ableitstrom eines größeren gemeinsamen Filters.

Werden mehrere Frequenzumrichter in einer elektrischen Anlage verwendet, sollte vermieden werden, diese gleichzeitig hochzufahren. Bei gleichzeitiger Reglerfreigabe mehrerer Frequenzumrichter entstehen kurzzeitige hohe und sich addierende Ableitströme, welche zu einer ungewollten Auslösung führen können.

Anmerkung:

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Filter sind in der Regel als Zubehör bei den Herstellern der elektronischen Betriebsmittel (Frequenzumrichter, Wechselrichter, usw.) erhältlich. Hier sind auch ggfs. nähere technische Einzelheiten zu erfragen.

### **7.4 Reduzierung transienter Ableitströme beim Ein- und Ausschalten einer elektrischen Anlage mit elektronischen Betriebsmitteln:**

Wie bereits weiter oben erwähnt, müssen beim Einsatz elektronischer Betriebsmittel zur Einhaltung der EMV-Vorschriften Filter verwendet werden. Diese Filter enthalten z. B. bei einem 3 - Leiter - Standard - EMV - Filter u. a. eine Sternschaltung von drei Kondensatoren gegen Erde. Die meisten RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung enthalten ein einfaches Schaltwerk. Die zeitliche Schließung und Öffnung der einzelnen Strompfade ist abhängig von der Schaltgeschwindigkeit des Bedieners und kann u. U. eine Zeitdifferenz von 10 - 20 ms ergeben. Während dieser Zeit ist die Symmetrierung des Sternpunktes der drei Kondensatoren nicht mehr gegeben und es kann ein erheblicher kapazitiver Ableitstrom über den Schutzleiter fließen und den RCD sofort wieder zum Auslösen bringen. Daher sollte eine Zuschaltung und Trennung nur mit Hilfe eines zusätzlichen schnellschaltenden Schaltorgans (z. B. Trennschalter mit Sprungschaltfunktion oder allpolig schaltendes Schütz) und nicht mit der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung selbst erfolgen. In elektrischen Anlagen mit sehr vielen Frequenzumrichtern kann es besonders beim Einschalten in Ausnahmefällen trotz Zuschaltung mit einem schnellschaltenden Schaltorgan zu einer Auslösung kommen. In diesem Fall fließen bedingt durch die ungeladenen Filterkondensatoren sehr hohe Ableitströme über einen Zeitraum, der die höchstzulässige Abschaltzeit der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung überschreitet. Ein Sammel - EMV - Filter für mehrere Frequenzumrichter kann auch den hohen Einschaltableitstrom deutlich reduzieren  
**(siehe auch Punkt 5.3).**

### **7.5 Vermeidung erhöhter Ableitströme bei Schwingneigung des EMV - Filters:**

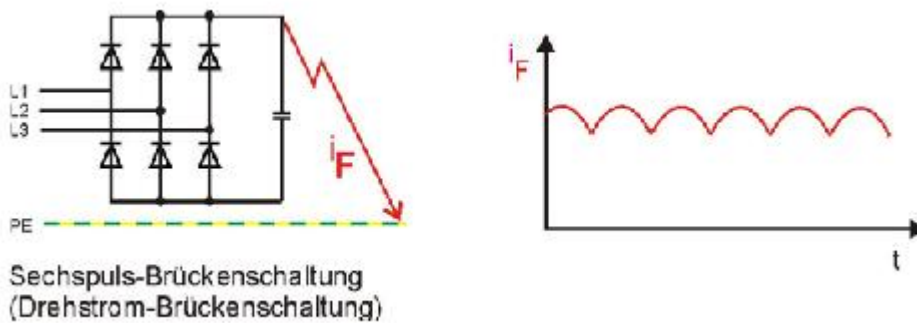
Bei elektronischen Betriebsmitteln wie z. B. Frequenzumrichter können in der Regel verschiedene Schaltfrequenzen (Chopper) gewählt werden. Im ungünstigen Fall kann die Schaltfrequenz zu einer Schwingneigung eines vorgeschalteten EMV -Filters und somit zu stark überhöhten Ableitströmen führen, welche dann eine Auslösung der RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung bewirken. In diesem Fall ist die Schaltfrequenz des Frequenzumrichters zu ändern!

**8 Richtige Anwendung eines allstromsensitiven Fehlerstromschutzes in einer elektrischen Anlage mit elektronischen Betriebsmitteln:**

**8.1 Vorschriftsmäßiger Einsatz von allstromsensitiven RCD's:**

Sind in elektrischen Anlagen glatte Gleichfehlerströme (keine Nullpunktberührung) bedingt durch den Einsatz bestimmter elektronischer Betriebsmittel zu erwarten, so sind laut VDE 0160 / EN 50178 (Errichtung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln Abschnitte 5.2.11.2 und 5.3.2.3) allstromsensitive RCD's zu verwenden. Dieses trifft z. B. für dreiphasig betriebene Frequenzumrichter zu, welche eingangsseitig in der Regel zur Gleichrichtung der Netzspannung eine Sechspuls - Brückenschaltung verwenden (siehe Bild 5).

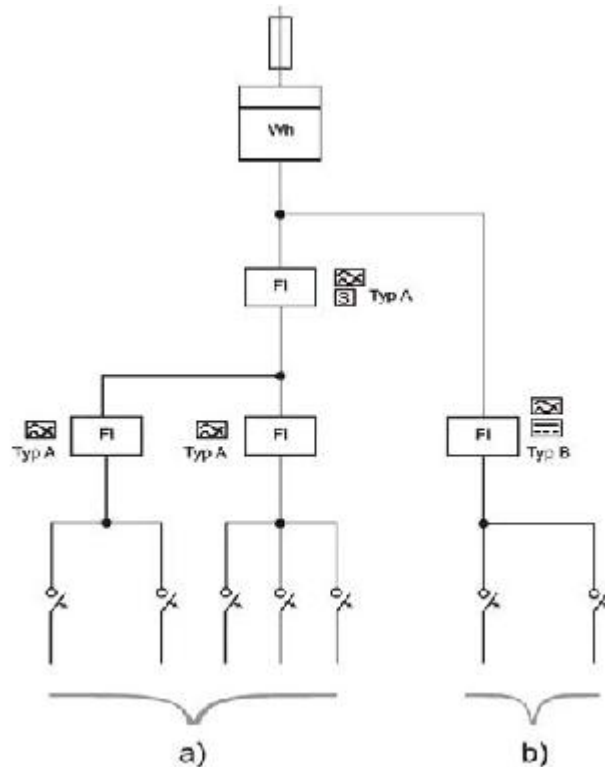
*Bild 5*



**9 Aufteilung der Stromkreise:**

Stromkreise mit elektronischen Betriebsmitteln wie Frequenzumrichter dürfen nach VDE 0160 / EN 50178 Abschnitt 5.3.2.3 keine pulsstromsensitiven Schutzeinrichtungen vorgeschaltet sein, da diese, wie bereits oben beschrieben, durch glatten Gleichfehlerstrom in ihrer Funktion beeinträchtigt werden (oder Vormagnetisierung des Wandlerkernes).

*Bild 6*



Zu Bild 6:

a): Stromkreise mit elektrischen Betriebsmitteln, bei denen im Fehlerfall Wechselfehlerströme oder / und pulsierende Gleichfehlerströme auftreten können.

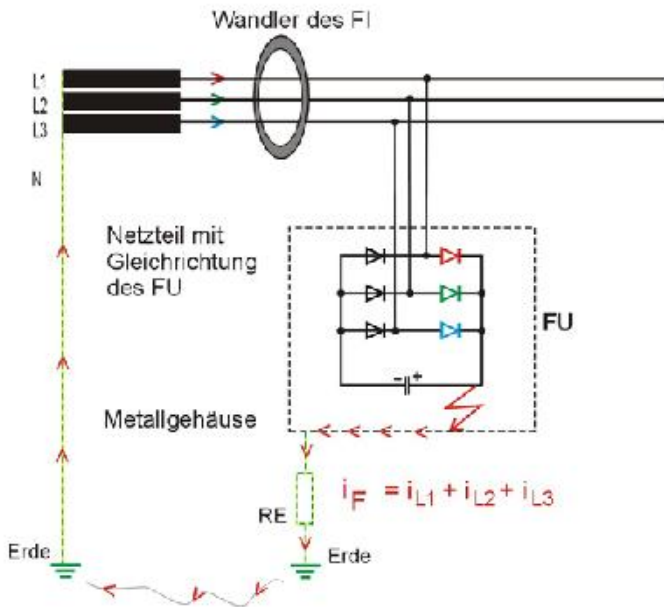
b): Stromkreise mit elektrischen Betriebsmitteln, bei denen im Fehlerfall Wechselfehlerströme oder / und pulsierende Gleichfehlerströme oder / und glatte Gleichfehlerströme auftreten können.



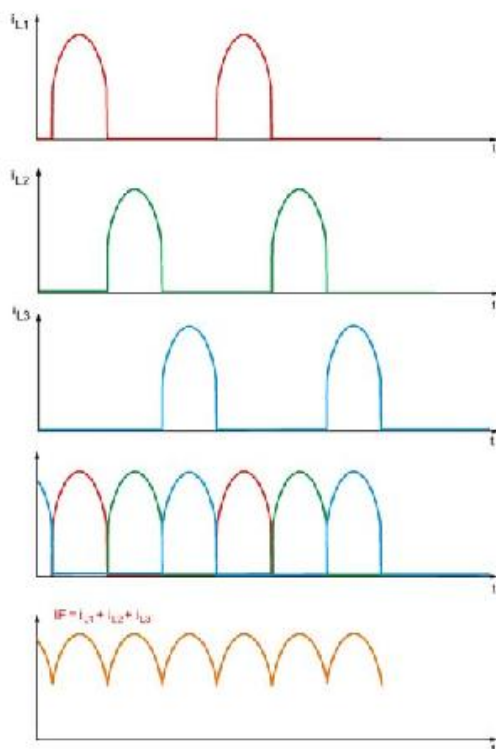
**Anhang A:**

Zusammensetzung des Gleichfehlerstromes aus den drei einzelnen Strömen der Phasen L1, L2, L3:

*Bild 7a* Vereinfachte Schaltung aus dreiphasigem Netz mit B6-Brückenschaltung des Frequenzumrichter und eines Isolationsfehlers



*Bild 7b* Darstellung der einzelnen Leiterströme und des sich daraus ergebenden Fehlerstromes



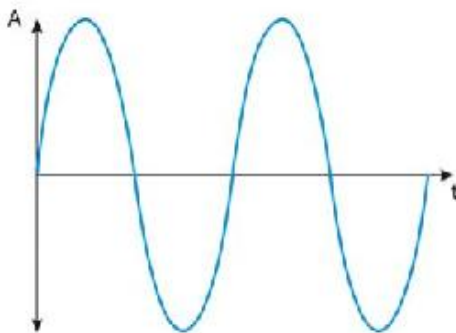
Der Fehlerstrom  $i_F$  ergibt sich aus einer Addition der einzelnen Ströme  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  und  $i_{L3}$  in den drei Leitern L1, L2 und L3. Die einzelnen Leiterströme  $i_{L1}$  bis  $i_{L3}$  stellen pulsierende Gleichfehlerströme mit längerer Nullpunktberührung dar, die sich aus der Kommutierung von drei der 6 Gleichrichterdioden ergeben. Ihre einzelnen magnetischen Flüsse addieren sich im Wandlerkern. Als Summe ergibt sich ein dem Fehlerstrom  $i_F$  proportionaler magnetischer Fluss mit hohem Gleichanteil, der eine Vormagnetisierung des Wandlerkernes bewirkt und eine weitere Wechselmagnetisierung durch möglicherweise noch vorhandene Wechselfehlerströme stark einschränkt und ggfs. sogar verhindert.

**Anhang B:**

Grundschiwingung und Oberschwingungen:

Die einfachste und mathematisch nicht mehr zerlegbare Schwingung ist sinusförmig (Bild 8a). Das Frequenzspektrum enthält nur eine einzige Frequenz: die Grundschiwingung  $f_1$  (Bild 8b). Würde man diese Sinusschiwingung über einen Verstärker wiedergeben, so hört sich diese sehr weich an. Anders hingegen eine Schwingung mit rechteckförmigem Verlauf (Bild 9a). Über einen Verstärker wiedergegeben, klingt diese Schwingung bei gleicher Grundschiwingung  $f_1$  recht hart und markant. Betrachtet man das Frequenzspektrum (Bild 9b) so sind neben der Grundschiwingung noch viele Oberschwingungen (auch Harmonische genannt) zu erkennen. Die rechteckförmige Schwingung setzt sich also aus einer Addition der sinusförmigen Grundschiwingung (mit der höchsten Amplitude) und vielen sinusförmigen Oberschwingungen zusammen. Die Oberschwingungen sind mathematische Vielfache der Grundschiwingung. Im Falle einer Rechteckschiwingung sind es nur ungeradzahliche Vielfache. Diese Reihe der Oberschwingungen setzt sich mit abnehmenden Amplituden bis ins Unendliche fort. (Durch eine Pulsweitenmodulation der rechteckförmigen Ausgangsspannung eines Frequenzumrichters sind auch geradzahliche Vielfache im Frequenzspektrum möglich.)

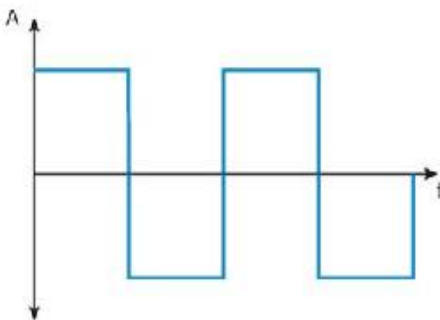
*Bild 8a* Sinusförmige Schwingung



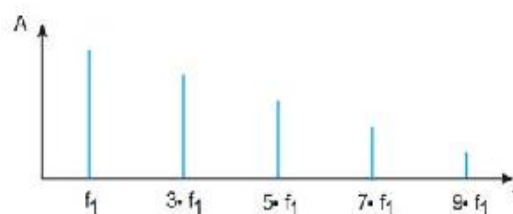
*Bild 8b:* Frequenzspektrum



*Bild 9a* Rechteckförmige Schwingung



*Bild 9b:* Frequenzspektrum



Rechteckförmige Ausgangsspannungen des Frequenzumrichters:

In Bild 1 ist eine stark vereinfachte Darstellung eines Frequenzumrichters zu sehen. Zu erkennen sind drei Transistorpaare, welche durch Schaltvorgänge die drei Ausgangsspannungen für den Motor generieren. Die Transistoren sind mit einer Steuerelektronik verbunden und erzeugen eine rechteckförmige Ausgangsspannung mit (überwiegend) konstanter Frequenz (Schalt- oder Chopperfrequenz) bei variierendem Pulsweitenverhältnis. Durch die Veränderung des Pulsweitenverhältnisses wird die Ausgangsfrequenz (Maschinenfrequenz) zur Drehzahlregelung des Motors erzeugt. Aufgrund der hohen Induktivitäten der Motorwicklungen entsteht dann ein fast sinusförmiger Strom mit der Ausgangsfrequenz durch den Motor. Die Schaltfrequenz des Frequenzumrichters mit den Oberschwingungen ist im Motor durch ein unangenehmes Piepen hörbar. Da eine abgeschirmte Motorzuleitung wie ein Kondensator wirkt, werden aufgrund der hohen rechteckförmigen Ausgangsspannungen des Frequenzumrichters dementsprechend hohe Ableitströme mit den Frequenzanteilen der Schaltfrequenz und Oberschwingungen generiert.