

Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze

Teil 2.1

Gleichstrom und Gleichspannung im Netz

Ausgabe 0.2, 30.11.2021

Autoren: Stephan Rupp

Kontakt: stephan.rupp@srupp.de

Web: <http://www.srupp.de>

Veröffentlicht unter [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen.....	5
1.1. Spannungsgeführter Betrieb der Netze.....	5
1.2. Aufbau eines Verteilnetzes.....	6
1.3. Isoliertes Netz.....	10
1.4. Selektiver Schutz.....	11
1.5. Anlagen im stromgeführten Betrieb am Netz.....	11
1.6. Wandler für Netze mit mehreren Spannungsebenen.....	12
1.7. Spannungsgeführter Betrieb von Anlagen.....	12
1.8. Planung und Projektierung von Netzen.....	12
2. Betrieb und Schutz.....	13
2.1. Schutzkonzept im Verteilnetz.....	13
2.2. Anschlusszonen.....	13
2.3. Anlagen am Netz.....	13
2.4. Betriebsverhalten.....	13
2.5. Schalter.....	13
2.6. Schnittstellen für Anlagen.....	13
3. Niederspannungsnetze.....	14
3.1. Anwendungsfälle.....	14
3.2. Stand der Normierung.....	14
3.3. Erdung und Berührungsschutz.....	14
3.4. Fehlerfälle und Schutzkonzept.....	14
3.5. Anwendungsbeispiel in der Simulation.....	14
3.6. Anforderungen an Anlagen am Netz.....	14
4. Mittelspannungsnetze.....	15
4.1. Anwendungsfälle.....	15
4.2. Stand der Normierung.....	15
4.3. Spannungsebenen.....	15
4.4. Fehlerfälle und Schutzkonzept.....	15
4.5. Anwendungsbeispiel in der Simulation.....	15
4.6. Anforderungen an Anlagen am Netz.....	15
5. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung.....	16
5.1. Anwendungsfälle.....	16
5.2. HGÜ-Strecke.....	16
5.3. Kopplung von HGÜ-Strecken.....	16
5.4. DC-Übertragungsnetze.....	16
6. Verbundnetz.....	17
6.1. Anwendungsfälle.....	17

6.2. Anlagen am AC-Netz.....	17
6.3. DC-Brücken im AC-Netz.....	17
6.4. Kraftwerksbetrieb am AC-Netz.....	17
7. Übungen.....	18
7.1.	18
7.2.	18
7.3.	18
7.4.	18

1. Grundlagen

Was haben Solaranlagen, Batteriespeicher einschließlich der Batterien für Elektrofahrzeuge, Elektrolyse und Brennstoffzellen gemeinsam? Es sind Gleichstromsysteme. Für den Anschluss ans Wechselspannungsnetz wird der Gleichstrom mit Hilfe leistungselektronischer Umrichter in Wechselstrom gewandelt. Selbst Windräder mit Synchronmaschinen, die nicht synchron mit dem Netz betrieben werden können, werden zunächst gleichgerichtet, dann synchron zur Netzfrequenz in Wechselstrom gewandelt.

Hierbei ist manchmal von Strom die Rede, manchmal von Spannung. Besonders reichlich hiervon Gebrauch macht die Bezeichnung „Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung“, kurz HGÜ, für Gleichstromstrecken in den höchsten Spannungsebenen der elektrischen Energieversorgungsnetze. Umgangssprachlich wird der Bezug elektrischer Energie mit „Stromverbrauch“ bezeichnet.

Basis dieser Sprachregelung ist die Betriebsweise elektrischer Energieversorgungsnetze: das Netz stellt die Spannung bereit. Die Anlage am Netz bezieht mit dem Strom elektrische Leistung, bzw. speist elektrische Leistung mit Hilfe des Stroms ins Netz. Auf diese Art erklärt sich die HGÜ: Über eine Hochspannungs-Strecke wird Leistung mit Hilfe des Gleichstroms übertragen. Anlagen sind somit Gleichstromsysteme, die an einem spannungsgeführten Netz betrieben werden.

Die Rolle des Gleichspannungsnetzes übernimmt hierbei der Umrichter am Anschluss eines Wechselspannungsnetzes (AC/DC-Wandler). Mehrere Gleichstromsysteme lassen sich effizienter an einem Gleichspannungsnetz betreiben.

1.1. Spannungsgeführter Betrieb der Netze

Ein spannungsgeführtes Netz ist in der Lage, elektrische Leistung aufzunehmen bzw. elektrische Leistung abzugeben. Idealerweise bleibt hierbei die Spannung konstant. Netze lassen sich folglich als Spannungsquellen abbilden, wie in folgender Abbildung dargestellt.

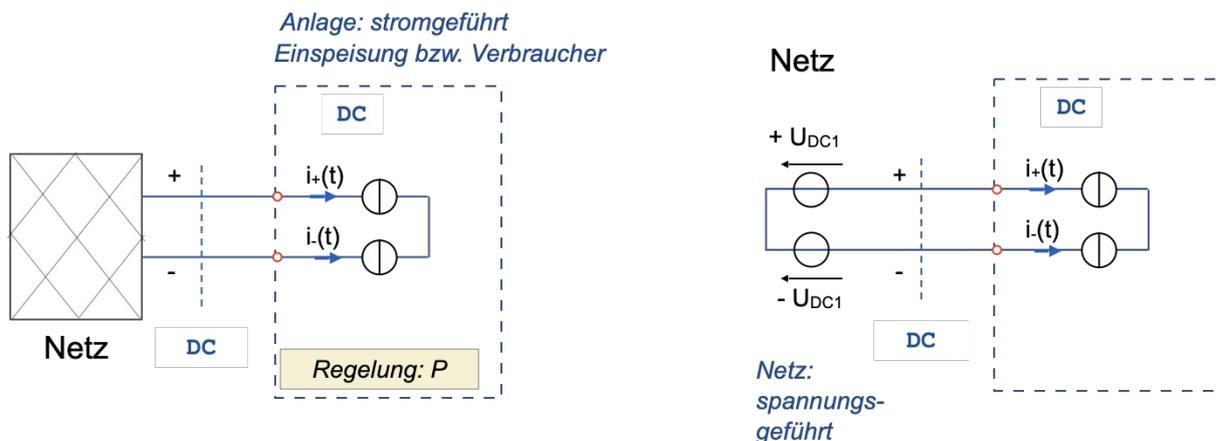


Bild 1.1 Netz mit Anlage

Die Anlage ist als Stromquelle dargestellt. Alternativ käme für eine Bezugsanlage (d.h. einen Verbraucher) auch ein ohmscher Widerstand als Ersatzschaltung in Frage.

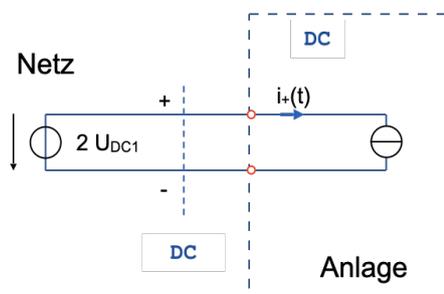
Frage 1.1.1: Leistungsbezug und Leistungsabgabe. Wie hängt bei einem ohmschen Widerstand die bezogene Leistung von der Netzspannung ab? Wie lässt sich bei einer Stromquelle die bezogene bzw. die abgegebene Leistung einstellen bzw. regeln? Wo finden sich ohmsche Verbraucher im Haushalt (am AC-Netz)?

Lösung: (1) bezogene Leistung $P = U^2/R$. (2) $P = U I$, somit lässt sich über das Vorzeichen des Stroms die Leistung einstellen. Ein Reger würde hierbei auf Schwankungen der Netzspannung U reagieren, indem er den Sollwert des Stroms aus dem Sollwert der Leistung und der gemessenen Netzspannung errechnet. (3) Grundsätzlich Kochplatte, Heizgerät und Föhn, wenn man die Temperatur nicht nach-

stellt oder regelt. Die Temperatureinstellung bzw. -regelung ist eine Leistungsregelung. Alle Verbraucher mit Umrichter sind leistungsgeregelt.

Frage 1.1.2: Lassen sich in der Abbildung die Spannungsquellen und Stromquellen zusammenfassen? Nehmen Sie hierfür an, dass die Beträge von $U_{DC1} = U_{DC2}$ und $i_{+,1} = i_{+,2}$. Skizzieren Sie die Anordnung.

Lösung: Ja: $U_{DC} = U_{DC1} - (-U_{DC2}) = 2 U_{DC1}$ und $i_{+} = -i_{-}$.



Frage 1.1.3: Die Anlage (Stromquelle) soll über ein Kabel mit dem Netz verbunden werden: a) zwei Leiter in einem ungeschirmten Kabel mit isoliertem Kabelmantel, b) zwei Einzelleiter mit geschirmten Kabelmantel. Welche Spannungen und Ströme erhält man an den Leitern im Kabel?

Lösung: Im Fall a) die Spannung U_{DC} zwischen Leiter 1 und Leiter 2, den Strom i_{+} in Leiter 1 und den Strom i_{-} in Leiter 2.

Frage 1.1.4: Wie groß sind die Effektivwerte und Scheitelwerte von Strom und Spannung? Berechnen Sie die insgesamt bezogene oder eingespeiste elektrische Leistung. Wie groß ist die pro Leiter (bzw. pro Kabel) übertragene Leistung? Wie groß sind die Verluste pro Leiter mit dem Leiterwiderstand R ?

Lösung: (1) Bei Gleichspannung und Gleichstrom sind die Effektivwerte gleich den Scheitelwerten. (2) Gesamtleistung $P = 2 U_{DC1} i_{+}$. (3) Jeder Leiter überträgt die Hälfte dieser Leistung. Leiter 1: $P_1 = U_{DC1} i_{+}$, Leiter 2: $P_2 = -U_{DC1} -i_{+} = U_{DC1} i_{+}$, (4) Verluste pro Leiter $P_V = i_{+}^2 R$.

1.2. Aufbau eines Verteilnetzes

Folgende Abbildung zeigt ein Netz als Spannungsversorgung für eine Sammelschiene, von der aus über Kabelstrecken Anlagen angeschlossen sind. Hierbei wurden die Kabel durch eine elektrische Ersatzschaltung (R , L , C) abgebildet. Die Anlagen sind als Stromquellen mit individuellen Leistungsbeiträgen nachgebildet.

Als Anlagen kommen sowohl Bezugsanlagen als auch Erzeuger in Frage, also etwa eine Kombination aus Solaranlagen, Batterien und Ladestationen. Die Verteilung ist symmetrisch aufgebaut: Alle Anlagen werden zwischen den beiden Leitern angeschlossen. Ein Neutralleiter ist nicht vorgesehen.

Netzseitig ist der Bezugspunkt (am Sternpunkt der beiden Spannungsquellen) geerdet. Ein Schutzleiter (PE) ist zu den Anlagen geführt, beispielsweise mit Hilfe eines geschirmten Kabelmantels. Netzseitig und anlagenseitig ist der Schutzleiter geerdet. Die Gehäuse der Anlagen sind mit dem Schutzleiter verbunden.

Diese Anordnung entspricht einer Niederspannungsverteilung in einem AC-Netz, wobei auf den Neutralleiter verzichtet wurde und die Spannung mit Hilfe der beiden Leiter L_1 und L_2 zu den Anlagen verteilt wird. In der gezeigten Anordnung ist nur der Betrieb von Anlagen zwischen L_1 und L_2 vorgesehen, das System ist bipolar ohne Neutralleiter. Der Begriff „Sternpunkt“ wurde aus der AC-Technik übernommen. In einem Gleichspannungsnetz hat der Stern nur die beiden Polaritäten Plus und Minus, entsprechend einer Phasenlage von 0 Grad und 180 Grad.

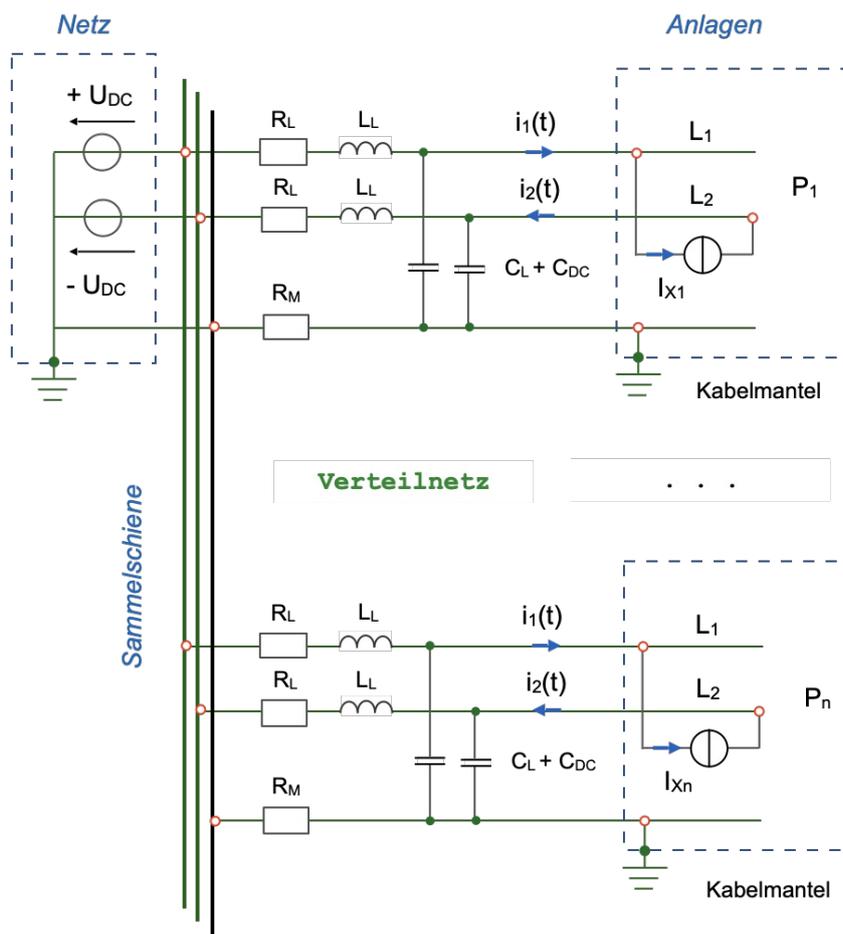


Bild 1.2.1 Verteilnetz mit Kabel und Anlagen

Für die Verteilung wäre somit ein zweiadriges, geschirmtes Kabel geeignet, bzw. zwei geschirmte Einzelleiter, bzw. ein nicht geschirmtes dreiadriges Kabel. Diese Wahl wird im Einzelfall von der Spannungsebene abhängen.

Frage 1.2.1: Schutzleiter und Erdung. Ein Isolationsfehler in einer der Anlagen führt zu einer Berührung eines Leiters mit dem Gehäuse. Welche Konsequenzen hat ein solcher Fehler?

Lösung: Der Isolationsfehler führt zu einem Erdschluss, d.h. einer Verbindung zwischen einem der beiden Leiter und Erde. Über den Schutzleiter und die Erdung fließt ein Strom zum Sternpunkt des Netzes. Der Strom wird transient durch die Leistungsimpedanz (R und L) begrenzt, dauerhaft als Gleichstrom nur durch den Leitungswiderstand. Während der Übergangsphase entlädt sich außerdem die Kabelkapazität in den Kurzschluss, sowie die Eingangskapazitäten aller angeschlossenen Verbraucher. Über Sicherungen oder Schutzeinrichtungen an den Abgängen könnte man versuchen, den Kurzschlussstrom zu unterbrechen, sofern das Netz (bzw. der diesbezügliche Umrichter als Spannungsquelle) nicht selber auf den Fehler reagiert und den Strom begrenzt.

Frage 1.2.2: Einführung eines Neutralleiters. Ergänzen Sie die Anordnung um ein Netz mit Neutralleiter. Welchen Vorteil bietet eine solche Anordnung gegenüber dem Ausgangssystem?

Lösung: Der Neutralleiter wird an den Sternpunkt des Netzes verbunden und als separater Leiter zur Verfügung gestellt. Gegenüber dem bipolaren System mit der Spannung $U_{DC} = 2 U_{DC1}$ steht nun eine weitere Spannungsebene zur Verfügung: U_{DC1} und $U_{DC2} = -U_{DC1}$. Hiervon können Anlagen geringerer Leistung Gebrauch machen, die für die halbe Spannung ausgelegt sind.

Frage 1.2.3: Erdströme. Folgende Abbildung zeigt einen bequemen Weg zur Realisierung eines Neutralleiters: Der Neutralleiter wird lokal aus dem Schutzleiter abgeleitet, das Netz hat einen kombinierten Schutzleiter-Neutralleiter (PEN). Leider erweist sich diese Topologie nicht als praxistauglich für Gleichspannungsnetze. Welche Gründe gibt es hierfür?

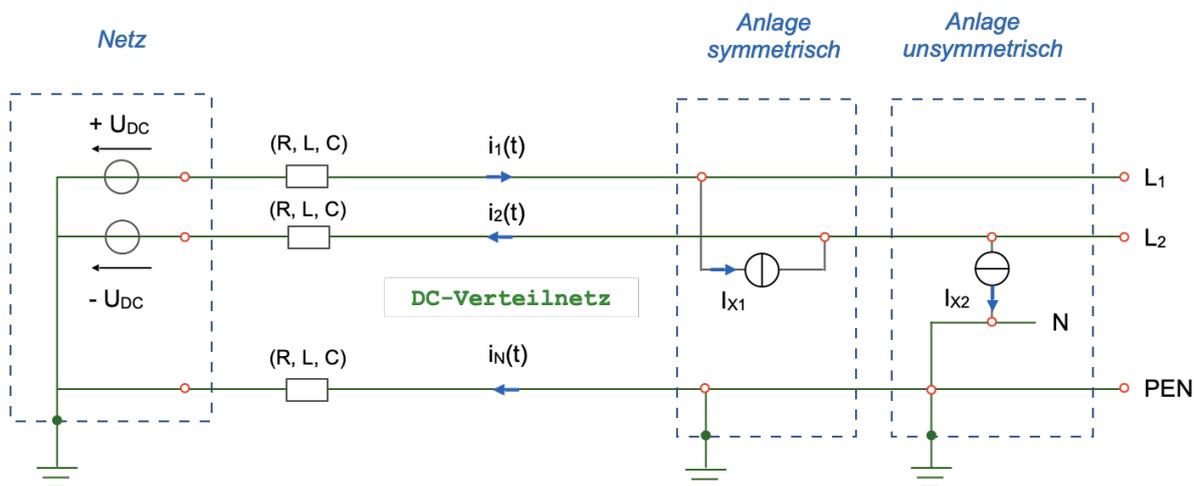


Bild 1.2.2 Kombierter Neutralleiter und Schutzleiter (PEN)

Lösung: Bei Gleichspannungssystemen führen Erdströme zur Korrosion der Erdungseinrichtungen, und somit zu Schäden an Gebäuden in Stahlbetonbauweise. In der Regel ist die Erdung besser als der Rückweg über den Schutzleiter. Solche Erdströme müssen bei Gleichspannungsnetzen vermieden werden.

In dieser Betriebsart, die auch als TN-C bezeichnet wird (geerdeter Sternpunkt mit kombiniertem Schutzleiter-Neutralleiter) bzw. als TN-C-S (geerdeter Sternpunkt mit kombiniertem Schutzleiter-Neutralleiter, wobei der Neutralleiter in der Unterverteilung separiert wird), sind bei Betrieb mit unsymmetrischen Anlagen die Ströme über den PEN dauerhaft. Daher würden sich hier dauerhafte Erdströme ergeben. Aus diesem Grund ist diese Konfiguration für Gleichspannungsverteilnetze nicht geeignet.

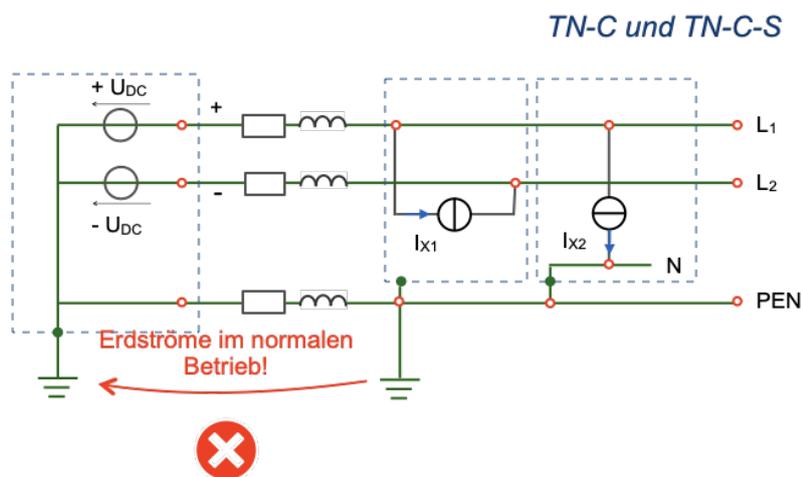


Bild 1.2.3 Verteilnetz mit TN-C bzw. TN-CS Topologie

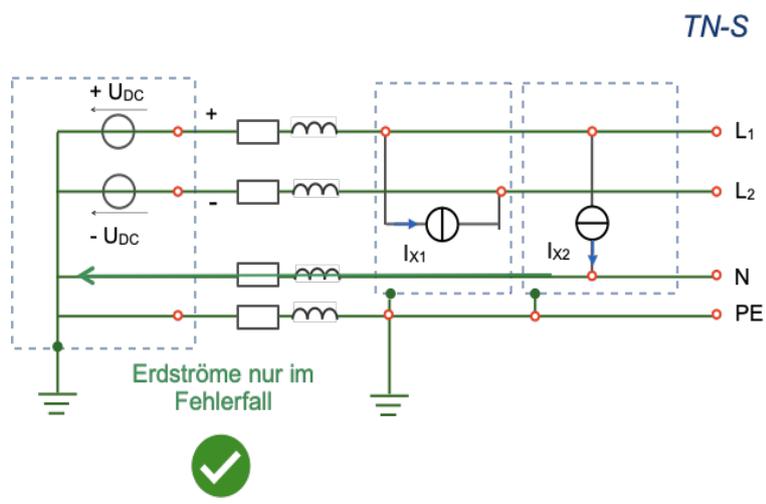


Bild 1.2.5 Verteilnetz mit TN-S Topologie

Geeignet ist jedoch die Verteilung mit separatem Neutralleiter (TN-S). In diesem Fall bleibt als Rückweg des Stroms bei unsymmetrischen Anlagen der Neutralleiter. Erdströme treten nur im Fehlerfall auf, und somit für eine sehr begrenzte Dauer. Die Abbildung oben zeigt eine Gegenüberstellung beider Systeme.

Lässt man den Neutralleiter weg, entspricht das TN-S System dem in Abbildung 1.2 gezeigten Verteilnetz (bzw. einem sogenannten TT-Netz mit Erdung am Sternpunkt und an den Anlagen, jedoch ohne Neutralleiter). Diese Form ist eine Spezialform des TN-S Netzes ohne Neutralleiter. Für eine Verteilung zu symmetrischen Anlagen ist diese Form ebenfalls unproblematisch. Erdströme gibt es auch hier nur im Fehlerfall.

Frage 1.2.4: Berührungsschutz. Für Niederspannungsnetze, in denen die Anlagen im Betrieb für Personen zugänglich sind, sind Maßnahmen zum Schutz vor Berührung erforderlich. Besitzt die Anlage ein metallisches Gehäuse, so wird dieses zu diesem Zweck geerdet, wie in folgender Abbildung gezeigt. Erläutern Sie die Funktionsweise des Berührungsschutzes.

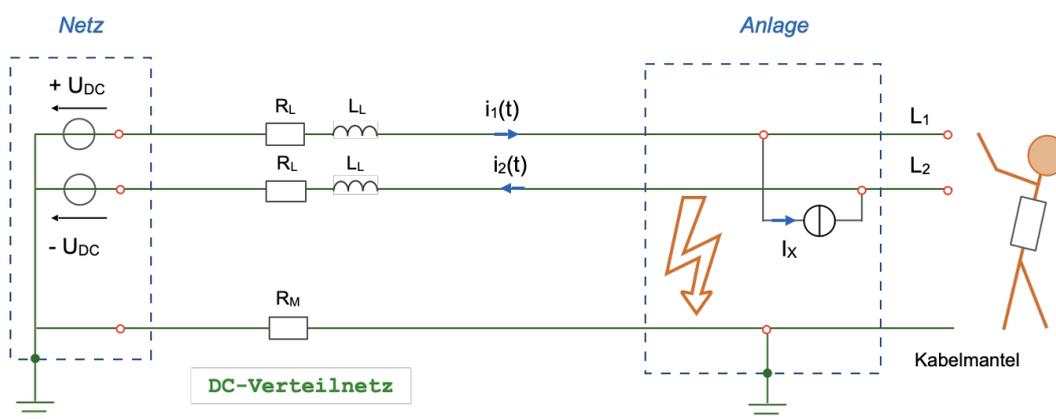


Bild 1.2.5 Berührungsschutz

Lösung: Ohne die Erdung am Gehäuse führte ein Isolationsfehler zu einer Berührungsspannung am Gehäuse, die über den Körperwiderstand zu einem tödlichen Berührungstrom führen kann. Durch die Erdung des Gehäuses verursacht der Isolationsfehler einen Kurzschluss. Der Kurzschlussstrom fließt

über die Erde ab, anstelle über den Körperwiderstand. Der Kurzschlussstrom kann durch eine Schutzvorrichtung unterbrochen werden, um thermische Schäden zu vermeiden.

Bemerkung: Isolationsfehler, die nicht zum Kurzschluss führen (z.B. bei der Berührung eines Leiters), haben einen Neutralleiterstrom bzw. Erdleiterstrom zur Folge. Solche Ströme lassen sich grundsätzlich mit Hilfe einer Fehlerstromüberwachung (FI-Relais) detektieren, worauf die Auslösung des Schutzes folgt. Für DC-Netze ließen sich ähnliche Methoden zur Isolationsüberwachung einsetzen.

1.3. Isoliertes Netz

Bei einem isolierten Netz (einem sogenannten IT-Netz) ist der Sternpunkt nicht mit der Erde verbunden, wie in folgender Abbildung dargestellt. Durch Erdung an Kabelmantel bzw. der Gehäuse an Geräten ergibt sich eine hochohmige Verbindung der Leiter mit der Erde. Hochohmig ist hierbei relativ zu den Nennimpedanzen zu verstehen, d.h. zum Verhältnis von Spannung und Strom.

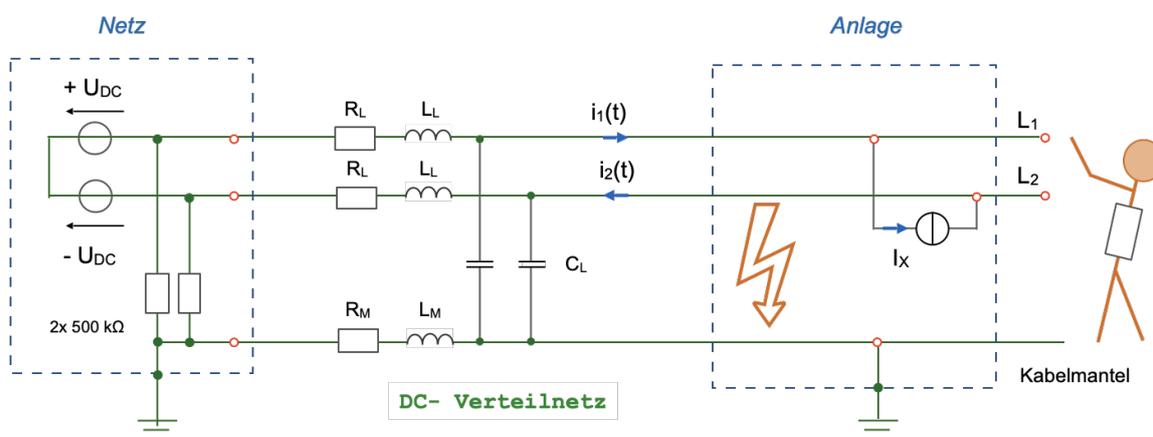


Bild 1.3.1 Berührungsschutz durch Isolation

Für den Fall, dass ein Berührungsschutz eingehalten werden muss, wäre eine hochohmige Erdung relativ zum Körperwiderstand zu verstehen, der mit ca. $1\text{ k}\Omega$ angenommen wird. Beträgt der Widerstand zwischen Leiter und Kabelmantel, Erde bzw. Bezugspotenzial ca. $500\text{ k}\Omega$, so beträgt der Strom bei einem Erdschluss pro kV ca. 2 mA . Ein solcher Strom wäre bei einer Berührung eines durch einen Isolationsfehler auf Leiterpotenzial befindlichen Gehäuses ungefährlich.

Frage 1.3.1: Welche Konsequenzen haben Erdschlüsse in einem Gerät für den Betrieb des Netzes? Welche Konsequenz hat die Berührung eines Gerätes mit einem solchen Isolationsfehler?

Lösung: Keine, das Netz kann im Fehlerzustand weiter betrieben werden. Die Berührung des Gehäuses auf Leiterpotenzial ist unkritisch, wenn die Fehlerströme zu gering für eine Schädigung sind, d.h. abhängig von der Betriebsspannung unterhalb von 20 mA bleiben. Auch die Berührung eines einzelnen Leiters ist unkritisch wegen der geringen Fehlerströme über die Erdung.

Frage 1.3.2: Nennen Sie Einsatzmöglichkeiten für isolierte Netze bzw. Beispiele für isolierte AC-Netze.

Lösung: Bei AC-Netzen z.B. Trenntransformatoren im Labor, Steckdosen für Rasierapparat bzw. Föhn im Badezimmer bei Hotels. In diesen Fällen sind Erdströme bei Kontakt zu einem Leiter unkritisch. Charakteristisch für diese Anwendungen ist die Isolation einzelner Anschlüsse ans Netz durch Transformatoren zur galvanischen Trennung der Anschlüsse von der Erdung des Versorgungsnetzes und voneinander.

Frage 1.3.3: Welche Konsequenzen haben folgende Doppelfehler: (1) Erdschluss von Leiter 1 und Erdschluss von Leiter 2, (2) Isolationsfehler von Leiter 1 an einem Gerät und Berührung von Leiter 2 (z.B. durch einen Isolationsfehler am Leiter 2 bzw. Zugang zu einer Steckdose), (3) Berührung von Leiter 1 und Leiter 2?

Lösung: (1) Kurzschluss zwischen beiden Leitern. Der Kurzschluss kann durch eine Sicherung am Anschlusspunkt der Leiter festgestellt und aufgetrennt werden; (2) und (3) lebensgefährlicher Kurzschluss über den Körperwiderstand.

Frage 1.3.4: Wie lassen sich Fehler in einem IT-Netz detektieren. Welche Fehlerindikatoren gibt es in einem verteilten IT-Netz? Vergleichen Sie die Situation mit einem verteilten TN-S-Netz.

Lösung: (1) Durch Isolationswächter, wie in folgender Abbildung dargestellt. Die Funktion entspricht einer Fehlerstromüberwachung ($i_1 + i_2 \neq 0$); ein Erdstrom deutet auf eine Veränderung der Leiter-Erd-Impedanz hin. (2) Durch Absicherung der Geräte an beiden Leitern.

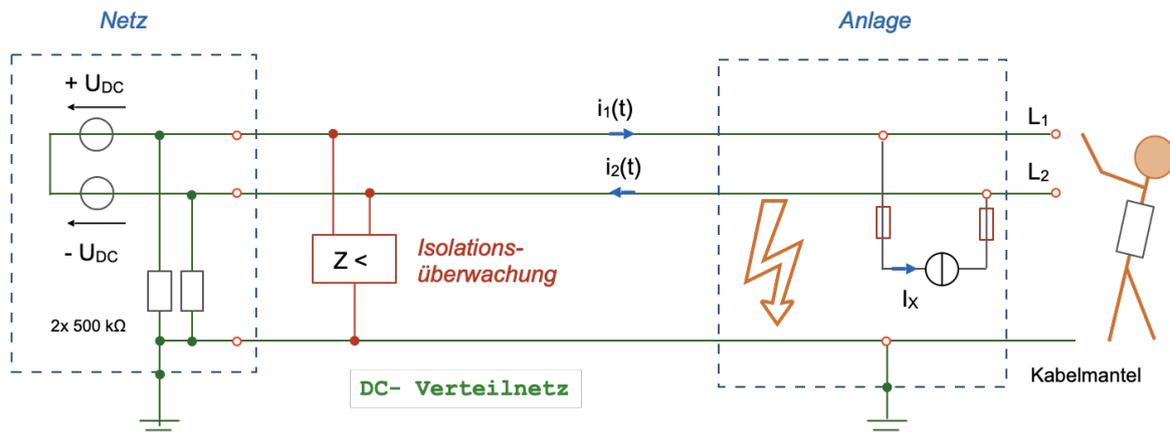


Bild 1.3.2 Schutz in einem IT-Netz

In diesem Fall führt die Detektion eines Isolationsfehlers mit Berührung zur Schutzauslösung, ein Isolationsfehler selbst (Leiter gegen Gehäuse) bleibt unbemerkt. Doppelte Isolationsfehler (Gehäuse an Leiter 1, Leiter 2 blank) mit Berührung kann der Isolationswächter ebenfalls nicht detektieren.

Ein IT-Netz liefert somit keine zuverlässigen Fehlerindikatoren. Speziell verteilte IT-Netze sind wegen der schwierigen Fehlerdetektion und Gefahr von Doppelfehlern nicht praktikabel. Der Einsatz ist abhängig vom speziellen Anwendungsfall, wenn beispielsweise die Toleranz gegenüber Erdschlüssen im Betrieb als Nutzen überwiegt (da andernfalls bei Abschaltung der Anlage ein Schaden entsteht). In diesem Fall bietet es sich an, solche Netzabschnitte isoliert zu betreiben.

Für verteilte Netze sind wegen der einfachen Fehlerindikation und wegen des besseren Schutzes gegen Berührungen TN-S-Netze von Vorteil. Gegen die Berührung beider Leiter gibt es keinen Schutz, auch nicht in einem TN-S-System.

1.4. Selektiver Schutz

- ... Sammelschienenfehler => Abschalten
- ... Fehler im Angang => selektives Abschalten
- ... Quellen (= Erzeugungsanlagen) und Verbraucher (= Bezugsanlagen)?
- ... Lastfluss und Betriebsart (stromgeführt oder spannungsführt)?
- ... aktive Anlagen: keine passiven Verbraucher und Erzeuger
- ...

1.5. Anlagen im stromgeführten Betrieb am Netz

- ... aktive Anlagen: keine passiven Verbraucher und Erzeuger

- ... Anlagen
- ... Regelstrategien
- ...

1.6. Wandler für Netze mit mehreren Spannungsebenen

- ...
- ...
- ...
- ...

1.7. Spannungsgeführter Betrieb von Anlagen

- ... mehrere Spannungsquellen im Parallelbetrieb
- ... Regelstrategien
- ...

1.8. Planung und Projektierung von Netzen

- ... Beispiel mit PowerFactory
- ... PV + Batterie + AC-Anschluss?
- ... Erläuterungen zu DC-Elementen in PF

2. Betrieb und Schutz

...

2.1. Schutzkonzept im Verteilnetz

... Sammelschiene, Abgang (selektiv abschalten)

... Fehlerindikation

... Reaktion auf Fehler (Strombegrenzung, Schutz der Anlagen, Schutzauslösung)

...

2.2. Anschlusszonen

...

...

...

2.3. Anlagen am Netz

... Netzbildung

... Anlagen

... Eigenschaften der Anlagen bei Fehlern

...

2.4. Betriebsverhalten

... Einschalten

... Abschalten

... Verhalten im Fehlerfall

...

2.5. Schalter

...

...Leistungsschalter, Lasttrennschalter?

...

2.6. Schnittstellen für Anlagen

... gefordertes Verhalten

... Anschlussrichtlinien

...

3. Niederspannungsnetze

...

3.1. Anwendungsfälle

...

3.2. Stand der Normierung

...

3.3. Erdung und Berührungsschutz

...

3.4. Fehlerfälle und Schutzkonzept

...

3.5. Anwendungsbeispiel in der Simulation

...

3.6. Anforderungen an Anlagen am Netz

...

4. Mittelspannungsnetze

...

4.1. Anwendungsfälle

...

4.2. Stand der Normierung

...

...

4.3. Spannungsebenen

...

...

4.4. Fehlerfälle und Schutzkonzept

...

4.5. Anwendungsbeispiel in der Simulation

...

4.6. Anforderungen an Anlagen am Netz

...

...

5. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

...

...

5.1. Anwendungsfälle

...

5.2. HGÜ-Strecke

... Beispiel mit Simulation

...

5.3. Kopplung von HGÜ-Strecken

... AC => DC

...

5.4. DC-Übertragungsnetze

...

...

...

6. Verbundnetz

...

...

6.1. Anwendungsfälle

...

...

...

6.2. Anlagen am AC-Netz

...

...

6.3. DC-Brücken im AC-Netz

...

..

6.4. Kraftwerksbetrieb am AC-Netz

... HGÜ, MVDC

...

...

...

7. Übungen

...

...

7.1. ...

...

7.2. ...

...

...

7.3. ...

...

...

7.4. ...

...

Englisch - Deutsch

Active power	Wirkleistung
Apparent power	Scheinleistung
Capacitor	Kapazität
Circuit breaker	Leistungsschalter
Line voltage	Leiter-zu-Leiter Spannung (Effektivwert)
Inductor	Induktivität
Nominal power	Nennleistung
Nominal voltage	Nennspannung
Peak value	Spitzenwert
Phase voltage	Leiter-zu-Nullleiter Spannung (Effektivwert)
Reactive power	Blindleistung
Resistor	Widerstand
Transformer	Transformator
Transmission	Übertragung
Voltage source	Spannungsquelle
Winding	Wicklung
...	
...	

Abkürzungen

AC	Alternating Current, Wechselstrom
DC	Direct Current, Gleichstrom
$T = 1/f$	Schwingungsdauer, Periodendauer [s]
$f = 1/T$	Frequenz, Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit [1/s]
$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung [1/s]
E	Energie [Joule, J, Nm, Ws, $\text{kg m}^2/\text{s}^2$] potentielle Energie $E_p = 1/2 k y^2$, kinetische Energie, Translation $E_k = 1/2 m v^2$, kinetische Energie, Rotation $E_r = 1/2 J \omega^2$, Energie elektrisches Feld $E_C = 1/2 C U^2$, Energie magnetisches Feld $E_L = 1/2 L I^2$
RMS	Root mean square (Effektivwert)
Z	komplexer Widerstand (Impedanz, impedance)
R	Wirkwiderstand (resistance)
X	Blindwiderstand (Reaktanz, reactance)
Y	komplexer Leitwert (Admittanz, admittance)
G	Wirkleitwert (conductance)
B	Blindleitwert (susceptance)
S	Scheinleistung (apparent power, in VA = Volt Ampere)
P	Wirkleistung (power, in Watt)
Q	Blindleistung (reactive power, in Var = Volt ampere reactive)
A	Ampere
deg	degrees (Phasenwinkel in Grad)
kV	Kilo Volt (1000V)
kVA	Kilo Volt Ampere (Scheinleistung S, zur Unterscheidung von kW = Wirkleistung))
kVar	Kilo Volt Ampere reactive (Blindleistung, Q)
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
ONT	Ortsnetztransformator
p.u.	per unit (auf Nennwert und physikalische Einheit normierte Größe)
PV	Photovoltaik
W	Watt (Wirkleistung, P)

Literatur

- (1) Stephan Rupp, Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze, [Teil 1.1: Aufbau der Netze](#), Vorlesungsunterlage, siehe auch: <http://www.srupp.de>
- (2) Gerd Balzer und Claus Neumann, Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen, Springer Vieweg, 2016, ISBN-13: 978-3662445464
- (3) Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie; Springer Vieweg, 4. Auflage, 2015, ISBN-13: 978-3662468555
- (4) Scilab/Xcos Open Source Simulationswerkzeug: <http://www.scilab.org/download/5.5.2>
- (5) Horst Kuchling, Taschenbuch der Physik, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 21. Auflage, 2014; ISBN-13: 978-3446442184
- (6) Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann, Detlef Schulz: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, 8. Auflage, 2010, ISBN 978-3834807366
- (7) Valentin Crastan, Elektrische Energieversorgung 1: Elektrische Energieversorgung 1: Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik, Springer Vieweg, 4. Auflage, 2015, ISBN-13: 978-3-662-45984-3
- (8) Valentin Crastan, Elektrische Energieversorgung 2: Energiewirtschaft und Klimaschutz, Elektrizitätswirtschaft und Liberalisierung, Kraftwerkstechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung, Springer Vieweg, 2. Ausgabe, 2017, ISBN-13: 978 - 3662489642
- (9) Valentin Crastan, Elektrische Energieversorgung 3: Dynamik, Regelung und Stabilität, Versorgungsqualität, Netzplanung, Betriebsplanung und -führung, Leit- und Informationstechnik, FACTS, HGÜ, Springer, 2. Ausgabe, 2012, ISBN-13: 978-3642200991

