

Planung und Analyse elektrischer Energieversorgungsnetze

Teil 2.1

Gleichspannungsnetze

Ausgabe 0.5, 30.06.2024

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. Erdströme durch Ableitung..... | 11 |
| 1.5. Schutzeinrichtungen..... | 12 |
| 1.6. Anlagen im stromgeführten Betrieb am Netz..... | 14 |
| 1.7. Spannungsgeführter Betrieb von Anlagen..... | 16 |
| 1.8. Wandler für Netze mit mehreren Spannungsebenen..... | 19 |
| 2. Leitungen | 21 |
| 2.1. Niederspannungskabel..... | 21 |
| 2.2. Leitungsmodell..... | 21 |
| 2.3. Mittelspannungskabel..... | 21 |
| 2.4. Leitungsmodell..... | 21 |
| 3. Konverter | 23 |
| 3.1. Zwei-Level-Konverter (AC/DC)..... | 23 |
| 3.2. Dreilevel-Konverter (AC/DC)..... | 23 |
| 3.3. Modulare Multilevel-Konverter (AC/DC)..... | 23 |
| 3.4. DC-Steller..... | 23 |
| 3.5. Dual-Active-Bridge Konverter..... | 23 |
| 3.6. | 23 |
| 4. Netze mit hoher Kurzschlussleistung | 24 |
| 4.1. Eigenschaften..... | 24 |
| 4.2. Modellnetz..... | 24 |
| 4.3. Fehlerfälle..... | 24 |
| 4.4. Fehlererkennung..... | 24 |
| 4.5. Fehlerklärung..... | 24 |
| 4.6. | 24 |
| 5. Netze mit Strombegrenzung | 25 |
| 5.1. Eigenschaften..... | 25 |
| 5.2. Modellnetz..... | 25 |
| 5.3. Fehlerfälle..... | 25 |
| 5.4. Fehlererkennung..... | 25 |
| 5.5. Fehlerklärung..... | 25 |
| 5.6. | 25 |
| 6. Netzbetrieb | 26 |
| 6.1. Funktionsprinzip..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2. Kennlinien..... | 26 |
| 6.3. Modellnetz..... | 26 |
| 6.4. Betriebsfälle..... | 26 |
| 7. Niederspannungsnetze..... | 27 |
| 7.1. Organisation der Spannungsebenen..... | 27 |
| 7.2. Anlagenschutz..... | 27 |
| 7.3. Leitungsschutz..... | 27 |
| 7.4. Kennlinien..... | 27 |
| 7.5. Modellnetz..... | 27 |
| 7.6. Betriebsfälle..... | 27 |
| 8. Mittelspannungsnetze..... | 28 |
| 8.1. Organisation der Spannungsebenen..... | 28 |
| 8.2. Anlagenschutz..... | 28 |
| 8.3. Leitungsschutz..... | 28 |
| 8.4. Kennlinien..... | 28 |
| 8.5. Modellnetz..... | 28 |
| 8.6. Betriebsfälle..... | 28 |

1. Grundlagen

In der elektrischen Energieversorgung stellt das Netz die Spannung bereit. Anlagen am Netz beziehen mit dem Strom elektrische Leistung, bzw. speisen 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 (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung).

Auch in der Mittelspannung und in der Niederspannung spielen Gleichspannungsnetze eine immer wichtigere Rolle, da PV-Anlagen, Batteriesysteme, Anlagen zur Elektrolyse, Brennstoffzellen, Windräder mit Vollumrichter und Schnellladestationen für Elektrofahrzeuge Gleichstromsysteme sind. Mehrere Gleichstromsysteme lassen sich effizienter an einem Gleichspannungsnetz betreiben. Die Rolle des Gleichspannungsnetzes am Anschluss an das Wechselspannungsnetzen übernimmt hierbei ein Umrichter (AC/DC-Wandler).

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.

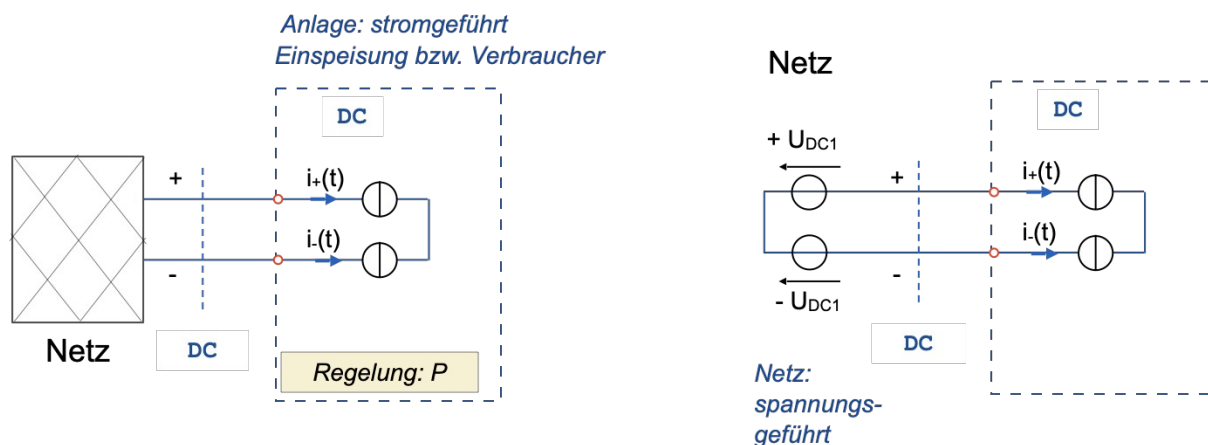


Bild 1.1 Netz mit Anlage

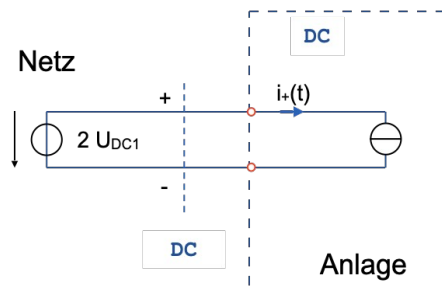
Die Anlage ist als Stromquelle dargestellt. Alternativ käme für eine Bezugsanlage (d.h. einen Verbraucher) auch ein ohmscher Widerstand als Ersatzschaltung in Frage.

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

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 $|i_+| = |i_-|$. 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.

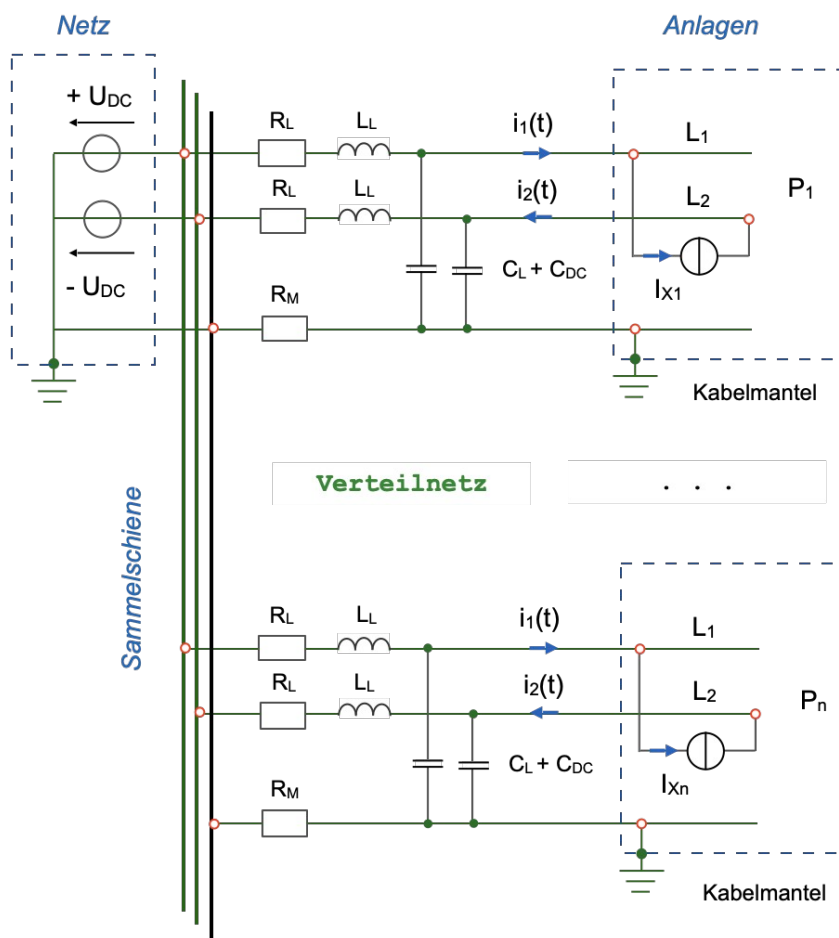


Bild 1.2.1 Verteilnetz mit Kabel und Anlagen

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?

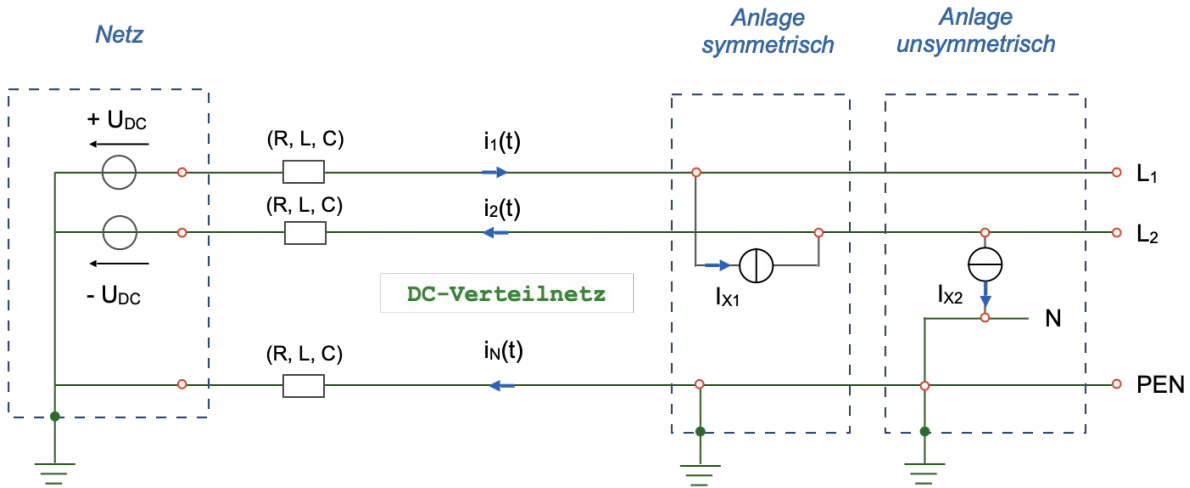


Bild 1.2.2 Kombierter Neutralleiter und Schutzleiter (PEN)

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.

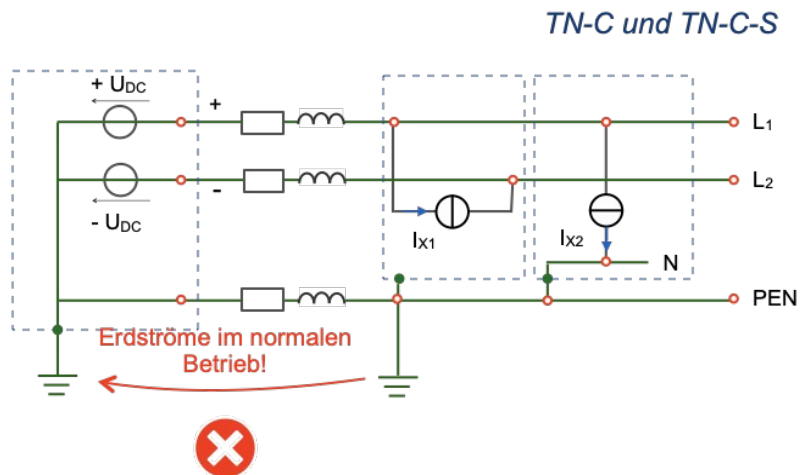


Bild 1.2.3 Verteilnetz mit TN-C bzw. TN-CS Topologie

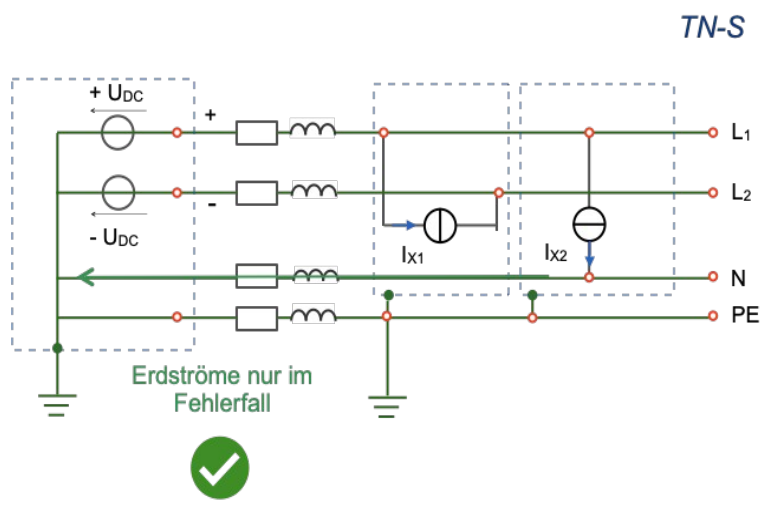


Bild 1.2.5 Verteilnetz mit TN-S Topologie

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.

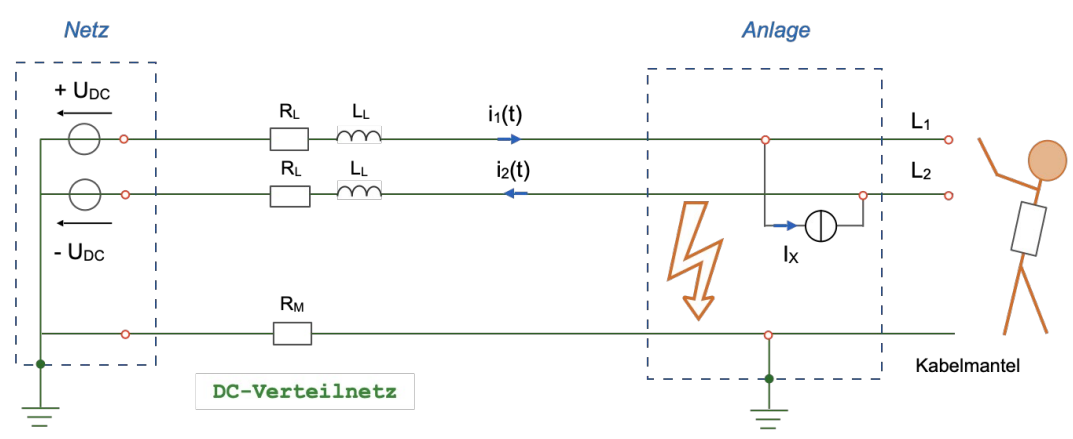


Bild 1.2.5 Berührungsschutz

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.

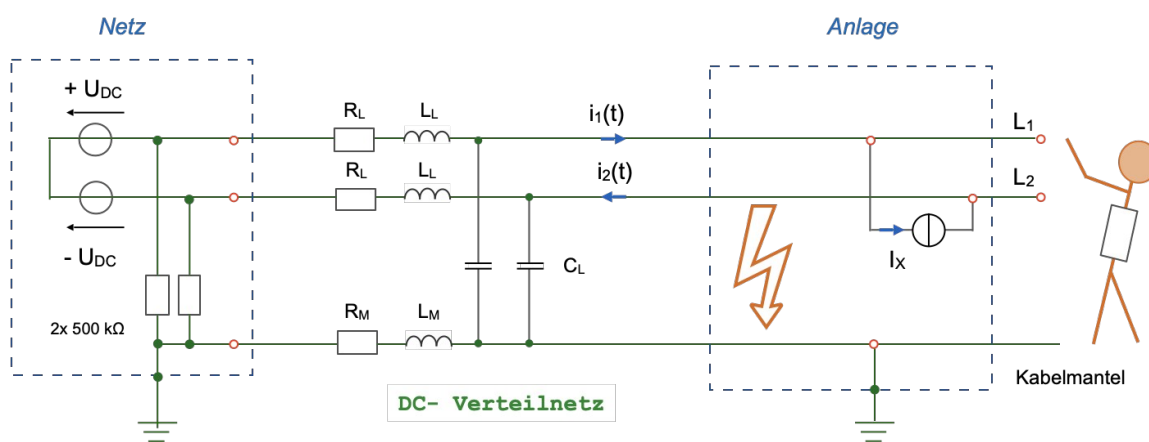


Bild 1.3.1 Berührungsschutz durch Isolation

Für den Fall, dass ein Berührungsschutz eingehalten werden muss, wäre eine hochohmige Erdung relativ zum Körperwiderstand zu verstehen, der mit ca. 1 kΩ angenommen wird. Beträgt der Widerstand zwischen Leiter und Kabelmantel, Erde bzw. Bezugspotenzial ca. 500 kΩ, 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.

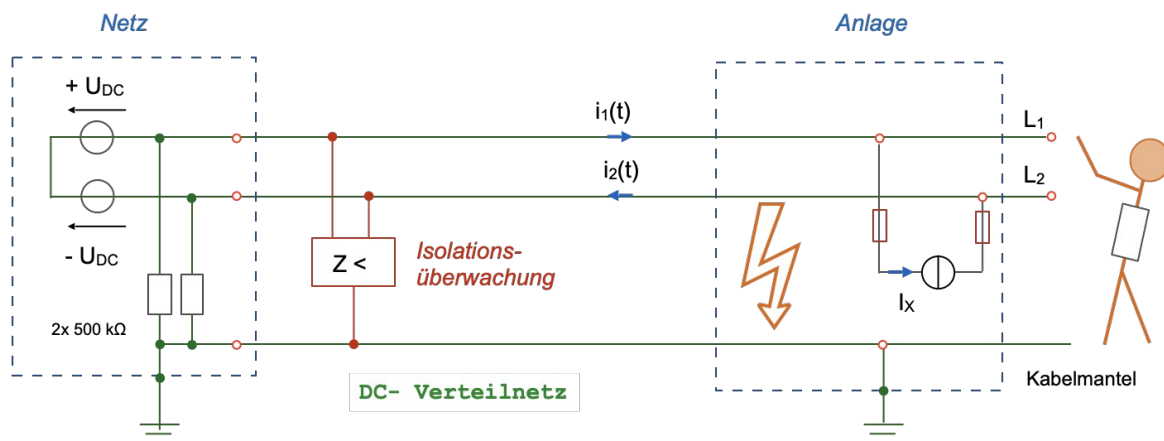


Bild 1.3.2 Schutz in einem IT-Netz

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. Erdströme durch Ableitung

Erdströme entstehen auch durch Ableitung zum Kabelmantel: Folgende Abbildung zeigt das Ersatzschaltbild, wenn man die Kabelverluste (serieller Widerstand R_L bzw. R_M) und die Ableitung über die Isolation zwischen Innenleiter und Mantel (G_L) mitberücksichtigt.

Nimmt man für Niederspannungskabel einen Verlustfaktor von $\tan(\delta) = 0,5 \cdot 10^{-3}$ an bei einem Kapazitätsbelag von $C'_L = 0,15 \mu\text{F}/\text{km}$, so berechnet sich bei 50 Hz die Admittanz $Y'_C = 47 \mu\text{S}/\text{km}$. Mit o.g. $\tan(\delta) = G'_L/Y'_L$ ergibt sich der Leitwert $G'_L = 23 \text{nS}/\text{km}$. Überschlägig erhält man für ein Kabel der Länge 1 km bei 1000 V Betriebsspannung einen Strom von $23 \mu\text{A}$. Bei einer Anzahl von 50 parallelen Kabeln ergeben sich Leckströme im Bereich einiger mA.

Diese Ströme sind klein, jedoch bei einem Gleichspannungssystem kontinuierlich. Beim Abfluss über die Erdung können solche Ströme durch Korrosion Schäden an Gebäuden anrichten, wenn diese in Stahlbetonbauweise ausgeführt sind.

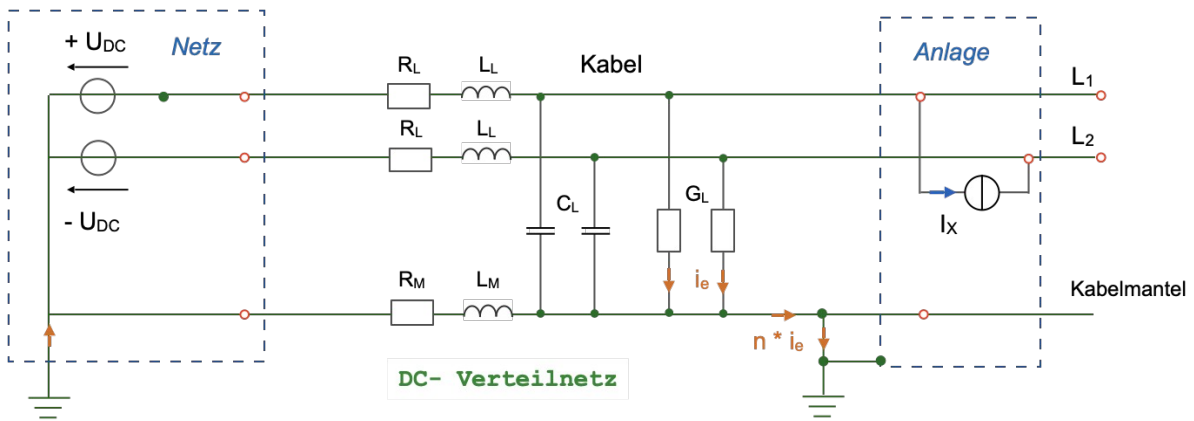


Bild 1.4.1 Minimale Erdströme durch Ableitung am Kabel

Frage 1.4.1: Der Widerstandsbelag über den Neutralleiter (bzw. Kabelmantel) sei mit $R'_M = 0,2 \Omega/\text{km}$ schlechter als der Widerstand des Erdungsystems. Welcher Spannungshub ergäbe sich über dem Neutralleiter, wenn Leckströme im Bereich einiger mA dieses Weg nähmen (d.h. die Erdung unterbrochen wäre)?

Lösung: Der Spannungsabfall wäre in der Größenordnung einiger $0,2 \text{ mV}/\text{km}$, d.h. 2 mV über eine Entfernung von 10 km .

Frage 1.4.2: Folgende Abbildung führt antiparallele Dioden als spannungsabhängige Impedanz $Z(U)$ in den Weg der Erdströme ein. Erklären Sie die Funktionsweise dieser Maßnahme in Bezug auf Leckströme über die Erdung. Wird der Schutz bei Isolationsfehlern hierdurch beeinträchtigt?

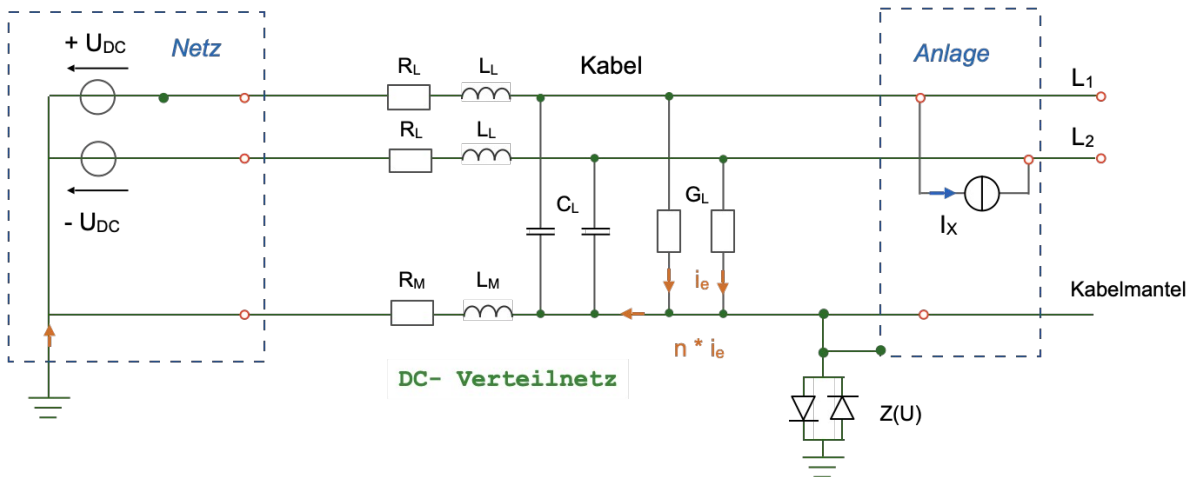


Bild 1.4.2 Begrenzung der Erdströme durch variable Impedanz $Z(U)$

Lösung: Gemäß der Diodenkennlinie ist die Impedanz der Dioden unterhalb der Schwellenspannung von ca. $0,6 \text{ V}$ hoch, darüber sehr gering. Näherungsweise stellt $Z(U)$ einen Schalter dar, der sich ab einer Schwellenspannung von $|U| > 0,6 \text{ V}$ öffnet. Bei einem Isolationsfehler wird diese Schwelle deutlich überschritten, der Fehlerstrom fließt über die Erdung. Leckströme erreichen bei Rückfluss über den Neutralleiter diese Schwelle nicht.

1.5. Schutzeinrichtungen

An einem Verteilnetz sind an einer Sammelschiene Anlagen angeschlossen, die als Erzeugungsanlagen Leistung einspeisen, bzw. als Bezugsanlagen Leistung entnehmen. Folgende Abbil-

dung zeigt ein Beispiel. Das Gleichspannungs-Verteilnetz ist außerdem an das Stromnetz (elektrisches Energieversorgungsnetz) mit Hilfe eines AC/DC-Wandlers angeschlossen.

In der Abbildung sind folgende Fehler dargestellt:

1. Kurzschluss in einem Abgang
2. Kurzschluss an der Sammelschiene
3. Kurzschluss am Anschluss der AC-Seite des Wandlers.

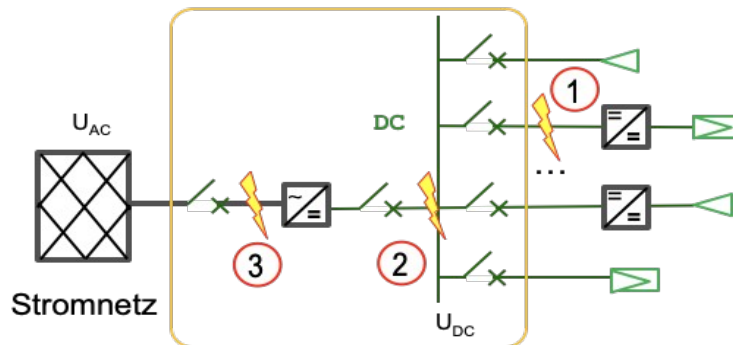


Bild 1.5 Fehlerfälle in der Gleichspannungsverteilung

Frage 1.5.1: Fehler am Abgang zu einer Anlage. Was ist das Ziel bei einem Fehler (Kurzschluss) an einem der Abgänge (Stichwort: selektives Abschalten)? Wie wäre dieses Ziel zu erreichen? Wodurch unterscheiden sich Bezugsanlage und Erzeugungsanlage am Abgang?

Lösung: Ziel ist die Abschaltung des defekten Teils, so dass die übrigen Teile des Netzes in Betrieb bleiben können. Dieses Ziel wäre durch Auslösen des Leistungsschalters im Abgang zu erreichen: dieser trennt den defekten Teil vom Netz. Die Detektion des Fehlers kann z.B. durch Messung des Stroms im Abgang erfolgen: Bei einem Kurzschluss wird dieser Strom zu groß.

Erzeugungsanlagen unterscheiden sich von Bezugsanlagen dadurch, dass diese ebenfalls in den Kurzschluss einspeisen. Eine Erzeugungsanlage muss daher am Anschlusspunkt ebenfalls geschützt werden, da sie andernfalls weiter in den Kurzschluss speist, auch nach Trennung des Abgangs an der Sammelschiene.

Frage 1.5.2: Sammelschienenfehler. Welches Ziel verfolgt die Schutz bei einem Sammelschienenfehler? Wie lässt sich dieses Ziel erreichen? Worin bestehen die Herausforderungen bei einem Gleichspannungssystem?

Lösung: Bei einem Sammelschienenfehler besteht keine Möglichkeit, Teile der Anlage weiter zu betreiben. Ziel ist hier die sichere Abschaltung. Da alle angeschlossenen Quellen (Netzanschluss und Erzeugungsanlagen) auf den Kurzschluss einspeisen, sollten die Leistungsschalter an den Abgängen der Anlagen auslösen.

Herausforderungen: Wegen der geringen Anschlussimpedanzen der Quellen steigen die Ströme im Kurzschlussfall sehr rasch an. Erzeugungsanlagen als Quellen sind ggf. strombegrenzt bzw. können ggf. rasch Leistung abregeln. Je nach Bauart stellt der Wandler am Netzanschlusspunkt eine große Kurzschlussleistung bereit. Die Leistungsschalter sind auf die Kurzschlussströme zu bemessen.

Frage 1.5.3: Fehler am AC-Anschluss. Welches Ziel verfolgt die Schutzeinrichtung bei einem Fehler am Anschluss des AC/DC-Wandlers ans Netz? Welche Besonderheiten ergeben sich bei Erzeugungsanlagen im unterlagerten Verteilnetz?

Lösung: Bei einem Kurzschluss in der Anschlussleitung speist die Kurzschlussleistung des AC-Netzes auf den Fehler ein; der Leistungsschalter löst strombasiert aus. Im AC-Netz begrenzen die Netzimpedanzen die Kurzschlussströme. Den wesentlichen Beitrag zur Netzimpedanz liefern die Streureaktanzen.

zen der Transformatoren: Bei Kurzschluss-Spannungen der Leistungstransformatoren im Bereich von 5% bis 10% betragen die Kurzschlussströme das 10-fache bis 20-fache der Bemessungsströme. Auf solche Ströme muss der Leistungsschalter ausgelegt werden.

Bei Erzeugungsanlagen im Verteilnetz speisen diese je nach Bauart des AC/DC-Wandlers ebenfalls auf den Kurzschluss auf der AC-Seite ein. Ggf. muss dieser Strombeitrag ebenfalls berücksichtigt werden. Hierbei unterscheiden sich elektrische Maschinen (z.B. Generatoren aus Dieselaggregaten) von über Wechselrichter angeschlossenen Erzeugern (z.B. Solaranlagen oder Batterien) in ihren Strombeiträgen und im zeitlichen Verhalten.

Frage 1.5.4: Auslegung der Leistungsschalter im DC-Netz. Worin besteht die Schwierigkeit bei der Auslegung der Leistungsschalter im DC-Netz? Welche Alternativen zu Leistungsschaltern kämen in Frage?

Lösung: Bei einem Kurzschluss an einem der Abgänge bzw. an der Sammelschiene speisen alle angeschlossenen Quellen in den Fehler. Alle Leistungsschalter wären auf die Summe der Kurzschlussströme der Quellen auszulegen.

Da den Strömen im Gleichspannungsnetz die Nulldurchgänge fehlen, die in einem AC-Netz einen Lichtbogen im Leistungsschalter zum Erlöschen bringen, sind DC-Leistungsschalter im Vergleich zu AC-Leistungsschaltern sehr viel aufwändiger zu realisieren.

Da der Aufwand von der Kurzschlussleistung der angeschlossenen Systeme abhängt, lässt sich an dieser Stelle der Aufwand deutlich reduzieren: Erzeugungsanlagen wie Batteriespeicher oder Solaranlagen haben je nach Bauart eine begrenzte Kurzschlussleistung, bzw. können im Fehlerfall den Strom ggf. rasch begrenzen.

Sollte der AC/DC-Wandler am Netzanschlusspunkt ebenfalls strombegrenzende Eigenschaften haben, wäre die Kurzschlussleistung der Quellen im Vergleich zu einem AC-Netz mit Maschinen als Erzeugungsanlagen vergleichsweise klein. Sind die Kurzschlussströme in der Größenordnung der Bemessungsströme, würden Lasttrennschalter genügen. Bemerkung: Lasttrennschalter sind auf Bemessungsströme ausgelegt und können Anlagen somit ausschalten und einschalten, nicht jedoch Kurzschlussströme.

In einem solchen Fall sind Kurzschlüsse nicht mehr durch Ströme zu detektieren, die weit über die Bemessungsströme ansteigen. Die Fehlererkennung muss mit anderen Methoden erfolgen, z.B. durch Spannungsmessungen. Spannungsbasierten Schutzeinrichtungen werden in umrichtergeführten AC-Netzen verwendet (Inselnetze, Microgrids), wobei in der AC-Verteilung dieser Netze konventionelle AC-Leistungsschalter eingesetzt werden.

1.6. Anlagen im stromgeführten Betrieb am Netz

Gleichspannungsnetze stellen Gleichspannung für Gleichstromsysteme bereit. Gleichstromsysteme sind erneuerbare Erzeuger wie PV-Anlagen, Verbraucher wie z.B. Ladesysteme für Elektrofahrzeuge, sowie Energiespeicher. Maschinen mit Frequenzumrichter und Batteriespeicher können sowohl als Verbraucher als auch als Erzeuger betrieben werden. Auch der AC/DC-Wandler am Anschlusspunkt zum Stromnetz ist in der Regel bidirektional ausgeführt. Unter Umständen gilt dies auch für Ladestationen für Elektrofahrzeuge, so dass Fahrzeugbatterien sich auch als Energiespeicher verwenden lassen.

Unabhängig von der Lastflussrichtung (Verbrauch oder Einspeisung) sind die meisten Anlagen stromgeführt: Da die Spannung im Verteilnetz konstant gehalten wird, wächst der Lastfluss (= Leistungsfluss) linear mit dem Strom. Je nach Vorzeichen des Stroms wird Leistung entnommen oder eingespeist. Verbraucher und Erzeuger sind meistens über den Strom leistungsgeregelt. Anlagen mit Batteriespeicher sind entweder leistungsgeregelt oder stromgeregelt. Folgende Abbildung zeigt ein Netz

mit stromgeführten Anlagen. Bemerkung: Die angegebenen Spannungen sind als Beispiel zur Illustration gedacht und ohne Einschränkung der Allgemeinheit.

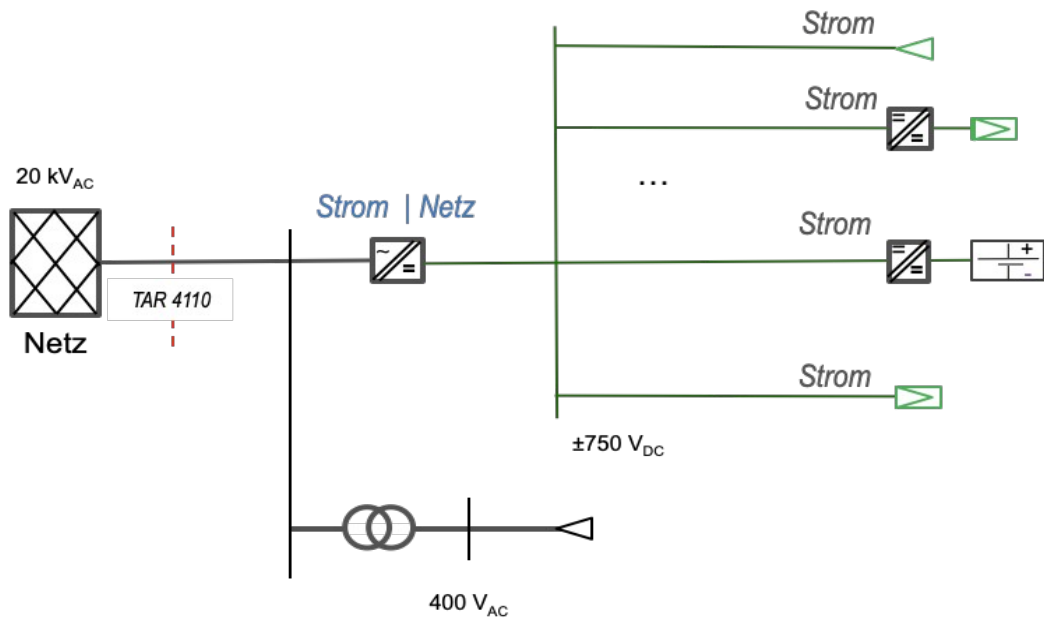
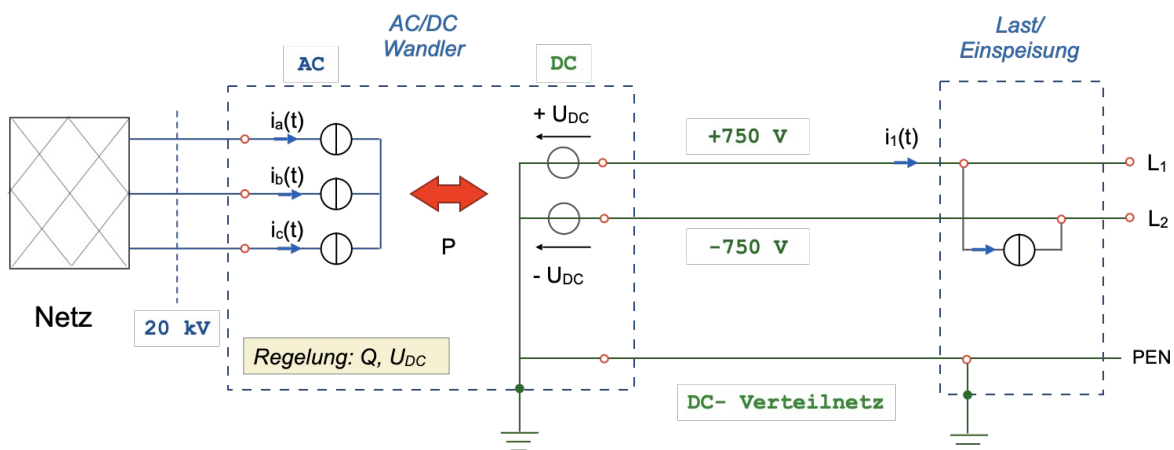


Bild 1.6 Verteilnetz mit Anlagen im stromgeführten Betrieb

Das Gleichspannungsnetz wird gebildet vom AC/DC-Wandler zum Stromnetz. Dieser hält die Gleichspannung konstant und wirkt somit auf der Gleichspannungsseite netzbildend. Wird der Gleichspannungsquelle, die der AC/DC-Wandler bildet, Leistung entnommen, so versorgt sich der AC/DC-Wandler mit der benötigten Leistung aus dem AC-Netz. Umgekehrt gibt er eine zugeführte Leistung weiter ins AC-Netz. Am AC-Anschluss verhält sich der AC/DC-Wandler somit stromgeführt.

Frage 1.6.1: Ersatzschaltbild AC/DC-Wandler: Wie könnte man ein Ersatzschaltbild des AC/DC-Wandlers mit Hilfe von Stromquellen und Spannungsquellen realisieren? Welches Konzept zur Regelung verfolgt der AC/DC-Wandler?

Lösung: siehe Abbildung unten.



Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, bildet das DC-Netz eine Spannungsquelle, die Anlagen repräsentieren Stromquellen an diesem Netz. Eine Spannungsquelle kann Leistung bereitstellen bzw. Leistung aufnehmen. Der AC/DC-Wandler stellt jedoch weder Quelle noch Generator dar: Er ist nur ein Wandler

zwischen Wechselspannung und Gleichspannung und daher in der Leistungsbilanz neutral (bis auf elektrische Verluste).

Im Quellenmodell muss daher die DC-seitig entnommene bzw. zugeführte Leistung an die AC-Seite weitergereicht werden: Beide Seiten sind über die Wirkleistung P gekoppelt. AC-seitig dient die Wirkleistung P als Führungsgröße für die Stromquellen am AC-Netz.

Die Regelstrategie für den AC/DC-Wandler folgt aus der Haltung einer konstanten DC-Spannung. Hieraus folgt die Wirkleistung P aus Messung der Ströme auf der DC-Seite. Die DC-seitig gemessene Wirkleistung dient als Führungsgröße für die Wirkleistung auf der AC-Seite (durch Führung der Wirkströme). Somit verbleibt AC-seitig noch die Blindleistung (über die Blindströme) als freier Parameter der Regelung innerhalb der Bemessungsgrenzen des Stroms.

Frage 1.6.2: Realisierung von Spannungsquellen. Wie lassen sich in der Praxis Spannungsquellen mit konstanten Wert realisieren?

Lösung: Als geregelte Spannungsquellen. Hierzu wird die Spannung am Ausgang gemessen und ein vorgegebener Sollwert der Spannung als Führungsgröße eines Reglers verwendet. Stellgröße der Regelstrecke (des Wandlers) ist entweder die Spannung oder der Strom.

Der Ausgang des Wandlers ist hierfür mit einer Kapazität C zwischen beiden DC-Phasen versehen. Diese Kapazität dient als Zwischenspeicher und liefert mit Hilfe der Spannung einen Leistungsindikator $U(P)$ liefert: Wird mehr Leistung entnommen, als der Wandler zuführt, sinkt durch Stromentnahme an der Kapazität C die Spannung am DC-Kreis (= Führungsgröße). Umgekehrt steigt die Spannung am DC-Kreis.

Frage 1.6.3: Regelstrategie Batteriespeicher. Wie wäre die Batterie im stromgeführten Betrieb geeignet zu führen? Hinweis: Als Batterien kämen Elektrofahrzeuge in Frage, sowie Energiespeicher.

Lösung: Bei Elektrofahrzeugen mit dem geeigneten Ladestrom abhängig von Fahrzeug und Ladezustand. Bei Energiespeichern nach Angebot und Nachfrage: Ist Solarstrom im Gleichspannungsnetz im Überfluss vorhanden, wird die Batterie geladen. Muss Strom aus dem Netz zu teuren Konditionen bezogen werden, kann es besser sein, sich aus der Batterie zu bedienen. Zur Führung der Batterie würde hier ein Batteriemanagementsystem mit passender Kommunikationstechnik und Messtechnik eingesetzt werden.

Frage 1.6.4: Mehrere Stromquellen am Netz. Was ist beim Betrieb mehrerer Stromquellen am Netz zu beachten? Was bedeutet ein solcher Betrieb regelungstechnisch?

Lösung: Die Ströme aller Quellen addieren sich an der Sammelschiene. Diese Art der Verschaltung ist elektrisch und regelungstechnisch unkompliziert: Die Regler arbeiten unabhängig voneinander; wegen der Addition der Ströme gibt es kaum Wechselwirkung zwischen den Anlagen.

1.7. Spannungsgeführter Betrieb von Anlagen

Energiespeicher können in Verbindung mit netzbildenden Wandlern ebenfalls Netze bereitstellen. Folgender Abbildung zeigt eine Anordnung, in der das an zwei Stellen der Fall ist:

1. Im DC-Netz übernimmt das Batteriesystem die Netzbildung als Anlage im spannungsgeführten Betrieb.
2. Im AC-Netz übernimmt der AC/DC-Wandler die Bereitstellung der AC-Spannung.

Für alle übrigen Anlagen bleiben die Aufgaben unverändert: Diese Anlagen verbleiben im stromgeführten Betrieb. Ein Grund für eine solche Anordnung wäre der Inselnetzbetrieb bei Ausfall des Stromnetzes bzw. bei Trennung vom Stromnetz. Anlagen am AC-Netz würden wie bei einer Notstromversorgung mit einem Dieselgenerator weiterhin versorgt, ebenso Anlagen am DC-Netz. Die Inselnetze lassen sich beim Wiederaufbau des Verbundnetzes wieder synchronisieren und zusammenführen.

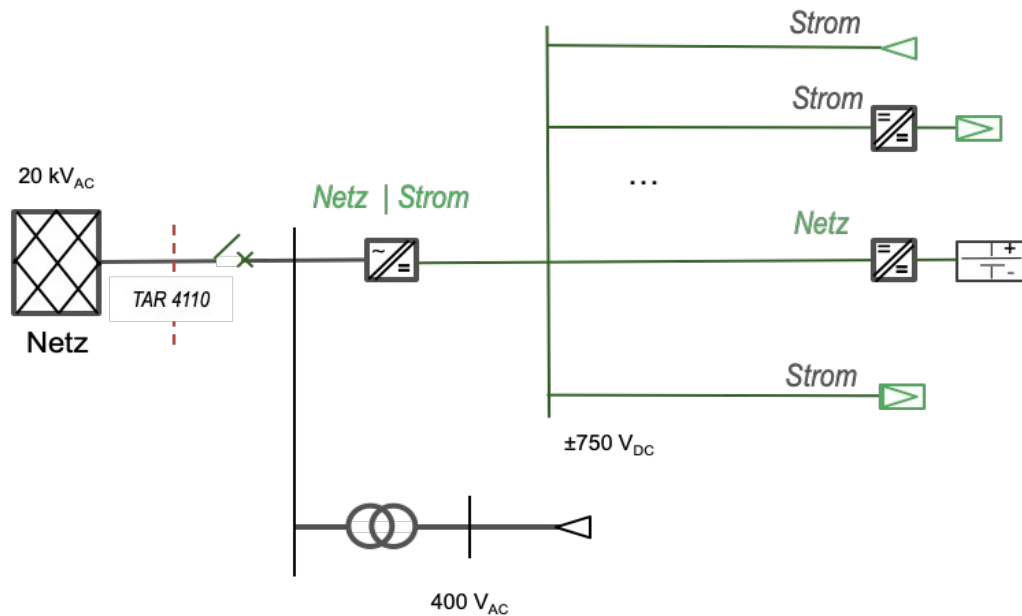


Bild 1.7 Verteilnetz mit Anlagen im stromgeführten und spannunggeführten Betrieb

Frage 1.7.1: Batteriesystems im spannunggeführten Betrieb. Warum muss das Batteriesystem in der gezeigten Anordnung in den spannunggeführten Betrieb umschalten? Worin unterscheidet sich der spannunggeführte Betrieb des Batteriesystems vom stromgeführten Betrieb?

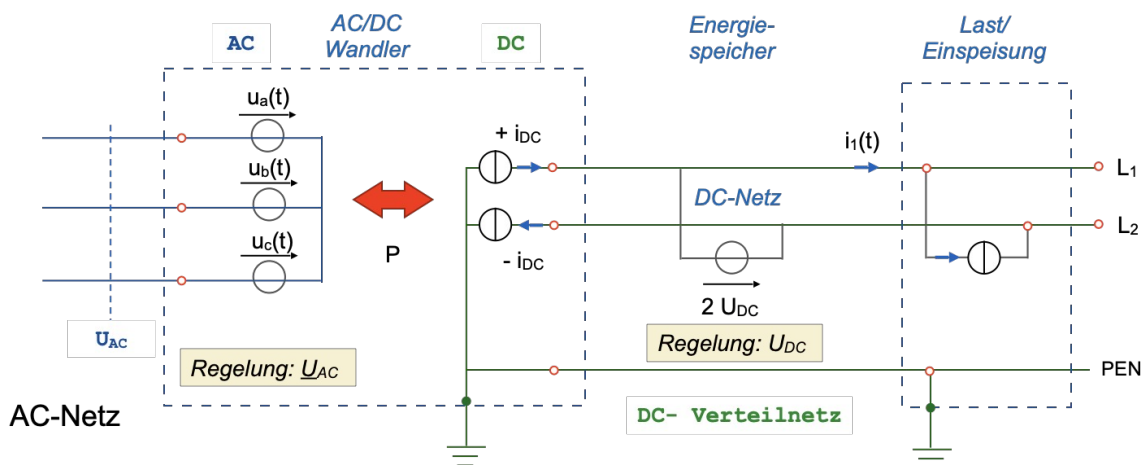
Lösung: Irgendeine Anlage muss die Spannungsführung übernehmen. In dieser Betriebsart richtet sich die bereitgestellte Leistung nach der Nachfrage: Eine spannunggeführte Anlage muss zu jeder Zeit Leistung aufnehmen oder abgeben können. Daher kommen hierfür nur Anlagen mit einer regelbaren Energiequelle in Frage, wie Batteriespeicher oder Dieselmotoren.

Frage 1.7.2: Betrieb des AC/DC-Wandlers. Warum kann der AC/DC-Wandler das DC-Netz nicht ebenfalls bereitstellen, sondern ist DC-seitig nun stromgeführt? Hat die Betriebsart (spannunggeführt oder stromgeführt) einen Einfluss auf den Lastfluss?

Lösung: Er stellt bereits das AC-Netz bereit und muss die hierfür benötigte Leistung dem DC-Netz entnehmen bzw. zuführen. Die Betriebsart hat keinen Einfluss auf den Lastfluss.

Frage 1.7.3: Ersatzschaltbild. Skizzieren Sie ein Ersatzschaltbild der Anlage.

Lösung:



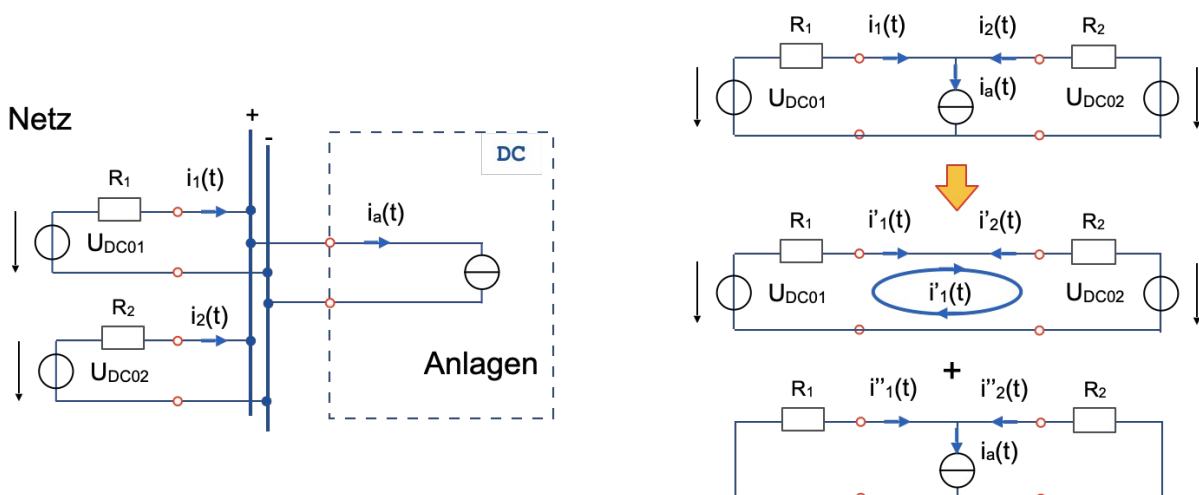
Der AC/DC-Wandler arbeitet jetzt auf der AC-Seite als Spannungsquelle (Regelung U_{AC}). Als System mit neutraler Leistungsbilanz (bis auf Verluste) bedient sich der AC/DC-Wandler aus der DC-Seite für die benötigte Leistung: DC-seitig arbeitet er nun als Stromquelle. Im Vergleich zum Betrieb aus Aufgabe 1.7 fehlt somit DC-seitig der Netzbildner (= Spannungsquelle).

Diese Aufgabe übernimmt nun das Energiespeichersystem: Es arbeitet als Spannungsquelle (Regelung U_{DC}). Alle übrigen Anlagen bleiben als Stromquellen im DC-Netz. Das Batteriesystem stellt nun die Abweichung aller eingespeisten Ströme und entnommenen Ströme bereit.

Frage 1.7.4: Mehrere Spannungsquellen am Netz. Es wäre denkbar, mehrere Anlagen spannungsggeführt zu betreiben, z.B. zwei Energiespeichersysteme im DC-Netz bzw. ein Energiespeichersystem im DC-Netz und einen Dieselgenerator im AC-Netz. Was ist hierbei elektrische zu beachten? Wie lassen sich die Anforderungen regelungstechnisch lösen?

Lösung: Der Betrieb zweier spannungsggeführten Systeme im DC-Netz führt zu parallel geschalteten Spannungsquellen im DC-Netz. Geringe Abweichungen beider Spannungen führt zu großen Ausgleichsströmen (Kreisströmen), da Spannungsabweichungen nur den Spannungsabfall über die Innenwiderstände der Spannungsquellen angepasst werden.

Die Leistungsbeiträge beider Quellen vergalten sich umgekehrt zum Verhältnis der Innenwiderstände. Hier muss der Regler also dafür sorgen, dass die Spannungen beider Quellen möglichst wenig voneinander abweichen.



Die Ersatzschaltung zeigt, dass man die Last und die Parallelschaltung der Spannungsquellen überlagern kann. Aus der Parallelschaltung der Spannungsquellen ergibt sich ein Kreisstrom $i'_1(t) = \Delta U / (R_1 + R_2)$, wobei ΔU die Differenz der Quellspannungen bezeichnet ($\Delta U = U_{DC01} - U_{DC02}$). Hierbei ist $i'_2(t) = -i'_1(t)$, unabhängig von der Last. Um die Kreisströme gering zu halten, müssen die Quellspannungen U_{DC01} und U_{DC02} möglichst genau übereinstimmen. Der Kreisstrom bewirkt, dass Leistung von einer Quelle in die andere Quelle übertragen wird.

Der Laststrom setzt sich anteilig aus Beiträgen beider Spannungsquellen zusammen, wobei die Anteile im Verhältnis der Innenwiderstände der Spannungsquellen ausfallen ($i''_1 / i''_2 = R_2 / R_1$, $i_a = i''_1 + i''_2$). Für eine gleichmäßige Belastung der Spannungsquellen sind somit möglichst gleiche Innenwiderstände erforderlich.

In den Zweigen der Spannungsquellen überlagern sich die Strombeiträge aus der Last und dem Kreisstrom ($i_1(t) = i'_1(t) + i''_1(t)$, $i_2(t) = i'_2(t) + i''_2(t)$). Fällt in einem Zweig die Summe aus Kreisstrom und dem Beitrag zum Laststrom negativ aus, so nimmt diese Quelle Leistung aus der anderen Quelle auf.

Beim Betrieb zweier Spannungsquellen im AC-Netz gelten die gleichen Regeln: Geringe Spannungsabweichungen führen zu hohen Kreisströmen zur Anpassung der Spannungen über den Innenimpedanzen. Auch hier müssen die Spannungen beider Quellen eng aneinander angeglichen werden, so wie die Impedanzen der Quellen möglichst genau übereinstimmen.

1.8. Wandler für Netze mit mehreren Spannungsebenen

Auch Gleichspannungsnetze lassen sich mit mehreren Spannungsebenen aufbauen. Die Gründe hierfür sind die gleichen wie für Wechsellspannungsnetze: Mit höheren Spannungen lassen sich bei vergleichbaren Strömen höhere Leistungen transportieren. Solche Netze benötigen dann zur Anpassung der Spannungsebenen Wandler, die als Gleichspannungstransformatoren arbeiten. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für ein solches Netz.

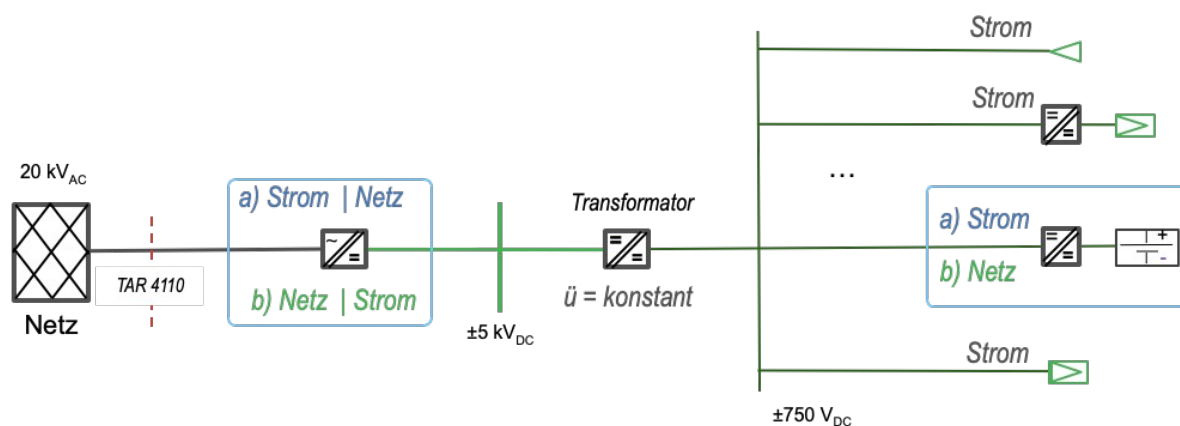


Bild 1.8 Gleichspannungsverteilung mit Netzanschluss, Gleichspannungstransformator und Anlagen

Im Netz sind die Anlagen im normalen Betrieb stromgeführt. Der Wandler am Anschluss an das Stromnetz bildet die oberste Spannungsebene des DC-Netzes. Die Aufgabe des Gleichspannungstransformators, die Primärspannung U_{DC1} in die Sekundärspannung U_{DC2} zu übersetzen.

Schaltet man die Betriebsweise des Netzes in einen Inselnetzbetrieb um, so ändern sich im Beispiel die Rollen zweier Wandler: Der Wandler am Anschlusspunkt ans Stromnetz arbeitet nun auf der AC-Seite netzbildend (siehe Abschnitt 1.7) und kann somit nicht gleichzeitig die obere Spannungsebene des DC-Netzes bereit stellen. Die Bereitstellung des DC-Netzes übernimmt nun der Wandler eines Energiespeichersystems: er arbeitet netzbildend auf der sekundären Spannungsebene U_{DC2} .

Die Betriebsart des Gleichspannungs-Transformators muss hierfür nicht umgestellt werden: Er bildet die obere Spannungsebene U_{DC1} nun aus der unteren Spannungsebene U_{DC2} .

Frage 1.8.1: Erläutern Sie das Funktionsprinzip des Transformators. Wie gelingt die Abbildung bzw. Transformation beider Spannungsebenen?

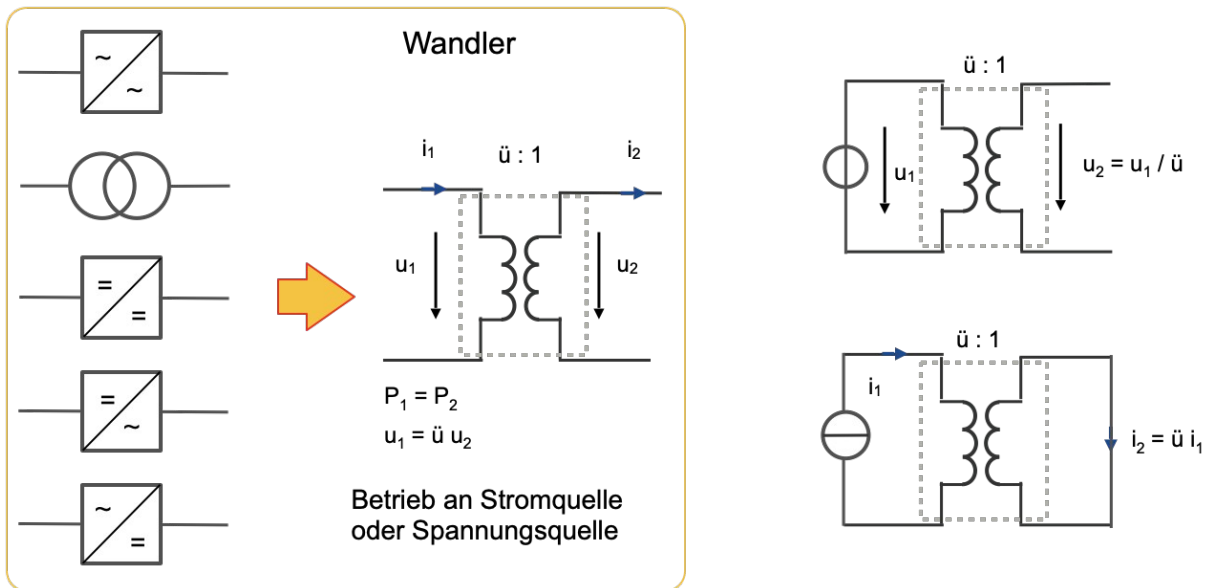
Lösung: Mit Hilfe des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} zwischen den Spannungsebenen. Für $\ddot{u}:1$ von der Primärseite (obere Spannungsebene) zur Sekundärseite (untere Spannungsebene) hält man das Verhältnis $\ddot{u} = u_{DC1}/u_{DC2}$ konstant.

Frage 1.8.2: Übersetzungsverhältnis der Ströme. Welches Übersetzungsverhältnis ergibt sich für die Ströme auf der Primärseite des Wandlers und auf der Sekundärseite des Wandlers, wenn man das Übersetzungsverhältnis der Spannungen wie in Frage 1.8.1 definiert?

Lösung: Für $\ddot{u} = u_{DC1}/u_{DC2}$ erhält man $\ddot{u} = i_{DC2}/i_{DC1}$. Grund hierfür ist die Invarianz der Leistung: $P_2 = P_1$. Abgesehen von Verlusten überträgt der Wandler die Leistung von der Primärseite auf die Sekundärseite, oder umgekehrt. Die Leistungen berechnen sich aus $P_1 = u_1 i_1$ und $P_2 = u_2 i_2$.

Frage 1.8.3: Ersatzschaltbild. Skizzieren Sie ein Ersatzschaltbild für den DC/DC-Wandler im Betrieb an einer Spannungsquelle bzw. Stromquelle.

Lösung: siehe Abbildung.



Funktionsprinzip bleibt das konstante Übersetzungsverhältnis \ddot{u} bei invarianter Leistung. Dieses Verhalten ist von AC-Transformatoren (Leistungstransformatoren in Wechselstromnetzen) bekannt.

Grundsätzlich lässt sich das Verhalten auf Wandler zwischen AC/DC und DC/DC übertragen, wobei die Sekundärseite und die Primärseite über das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} bei invarianter Leistung gekoppelt sind ($P_1 = P_2$). Das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} gilt sowohl für Spannungen und für Ströme und lässt sich für eine Steuerung bzw. Regelung auch aus Strömen und Spannungen an den Klemmen des Wandlers bestimmen.

Der durch ein Wicklungspaar angedeutete ideale Transformator im Ersatzschaltbild deutet auf eine galvanische Trennung der Primärseite von der Sekundärseite hin. Diese ist für das genannte Funktionsprinzip nicht zwingend erforderlich: Auch konventionelle DC-Hochsetzsteller oder DC-Tiefsetzsteller ohne galvanische Trennung lassen sich als DC-Transformatoren einsetzen.

Frage 1.8.4: Regelung des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} . Bei leistungselektronischen Wandlern wird üblicherweise der Strom bzw. die Spannung geregelt (stromgeführter Betrieb bzw. spannungsgeführter Betrieb, siehe Aufgaben 1.6 und 1.7). Wie ließe sich die Regelung des Übersetzungsverhältnisses bei einem Wandler in der Praxis ausführen?

Lösung: Wenn die Stellgröße des Wandlers (als Regelstrecke) die Führung des Stromes, bzw. der Spannung auf der Primärseite oder Sekundärseite zulässt kann diese Führung auf Basis des Übersetzungsverhältnisses als Führungsgröße durchgeführt werden.

In beiden Fällen wird das hierzu zunächst Übersetzungsverhältnis \ddot{u} ermittelt (= Istwert der Führungsgröße): Entweder durch Messung der Spannungen auf Primärseite und Sekundärseite und Berechnung von \ddot{u} , oder durch Messung der Ströme auf Primärseite und Sekundärseite und Berechnung von \ddot{u} . Die Differenz zwischen dem Sollwert von \ddot{u} und dem Istwert von \ddot{u} ist Eingangsgröße des Reglers.

Der Regler stellt entweder die Spannung primärseitig oder sekundärseitig so, dass $\ddot{u} = \ddot{u}_{\text{soll}}$ (= konstant), bzw. er stellt die Ströme primärseitig oder sekundärseitig entsprechend. Ströme bzw. Spannungen werden hierdurch nicht absolut vorgegeben, sondern nur im Verhältnis. Gibt beispielsweise die Spannung auf der Primärseite nach, so folgt die Sekundärseite.

2. Leitungen

2.1. Niederspannungskabel

...

2.2. Leitungsmodell

...

...

2.3. Mittelspannungskabel

...

Bild 2.3 ...

...

Frage 2.4.1:

Lösung: ...

....

Frage 2.4.2:

Lösung: ...

....

Frage 2.4.3:

Lösung: ...

....

Frage 2.4.4:

Lösung: ...

....

2.4. Leitungsmodell

...

Bild 2.3 Schnittstellen und Anschlussrichtlinien

...

...

Frage 2.5.1:

Lösung: ...

....

Frage 2.5.2:

Lösung: ...

....

Frage 2.5.3:

Lösung: ...

....

Frage 2.5.4:

Lösung: ...

....

3. Konverter

...

3.1. Zwei-Level-Konverter (AC/DC)

...

3.2. Dreilevel-Konverter (AC/DC)

...

3.3. Modulare Multilevel-Konverter (AC/DC)

...

3.4. DC-Steller

...

3.5. Dual-Active-Bridge Konverter

...

3.6. ...

...

4. Netze mit hoher Kurzschlussleistung

...

4.1. Eigenschaften

...

4.2. Modellnetz

...

4.3. Fehlerfälle

...

4.4. Fehlererkennung

...

...

4.5. Fehlerklärung

...

...

4.6. ...

...

5. Netze mit Strombegrenzung

...

...

5.1. Eigenschaften

...

5.2. Modellnetz

...

5.3. Fehlerfälle

...

5.4. Fehlererkennung

...

...

5.5. Fehlerklärung

...

...

5.6. ...

...

...

...

6. Netzbetrieb

...
...

6.1. Funktionsprinzip

...
...

6.2. Kennlinien

...
...
...
....

6.3. Modellnetz

...
...
...
.....

6.4. Betriebsfälle

...
...
...
...
...

7. Niederspannungsnetze

...
...

7.1. Organisation der Spannungsebenen

...
...

7.2. Anlagenschutz

...
...

7.3. Leitungsschutz

...
...

7.4. Kennlinien

...

7.5. Modellnetz

...
...

7.6. Betriebsfälle

...

8. Mittelspannungsnetze

...
...

8.1. Organisation der Spannungsebenen

...
...

8.2. Anlagenschutz

...
...

8.3. Leitungsschutz

...
...

8.4. Kennlinien

...
...
...

8.5. Modellnetz

...
...

8.6. Betriebsfälle

...

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 $E_C = 1/2 CU^2$, Energie magnetisches Feld $E_L = 1/2 LI^2$ |
| 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) Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende, Springer Berlin, 6. Auflage, 2019, ISBN 978-3-662-60373-4
- (3) Schmolke, Callondann, DIN VDE 0100 richtig angewandt, VDE-Schriftenreihe Normen verständlich, Band 106, 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Errichtung von Niederspannungsanlagen übersichtlich dargestellt, VDE-Verlag, 2022, ISBN 978-3-8007-5634-6
- (4) 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
- (5) ...
- (6) ...
- (7) ...

Anhang A – Kabeleigenschaften

...

...

Anhang B – Organisation der Spannungsebenen

...

Anhang C – Kraftwerksbetrieb mit Windparks

Dieser Anwendungsfall basiert auf dem Einsatz von Gleichspannungsnetze in der Mittelspannung (MVDC-Netze). Die Mittelspannung wird hierbei bis zu einer Spannung von 60 kV interpretiert. Ein mit Hilfe von Kabeln (statt Freileitungen) mit dieser Spannung realisiertes DC-System hat eine vergleichbare Transportkapazität wie ein Drehstromsystem mit 110 kV (hier beträgt die Spannung an einem Kabel $110/\sqrt{3}$ kV AC), besitzt jedoch wesentlich bessere Übertragungseigenschaften und lässt sich kostengünstiger realisieren.

Entwicklung der Netze

Im deutschen Stromnetz beträgt der Anteil erneuerbarer Erzeuger an der jährlichen Energieproduktion zum Stand des Jahres 2021 knapp 50%. Nach dem Ausstieg aus Kernenergie und Kohle sollen diese die gesamte Versorgung übernehmen, zusammen mit Gaskraftwerken. Folgende Abbildung zeigt eine Übersicht.

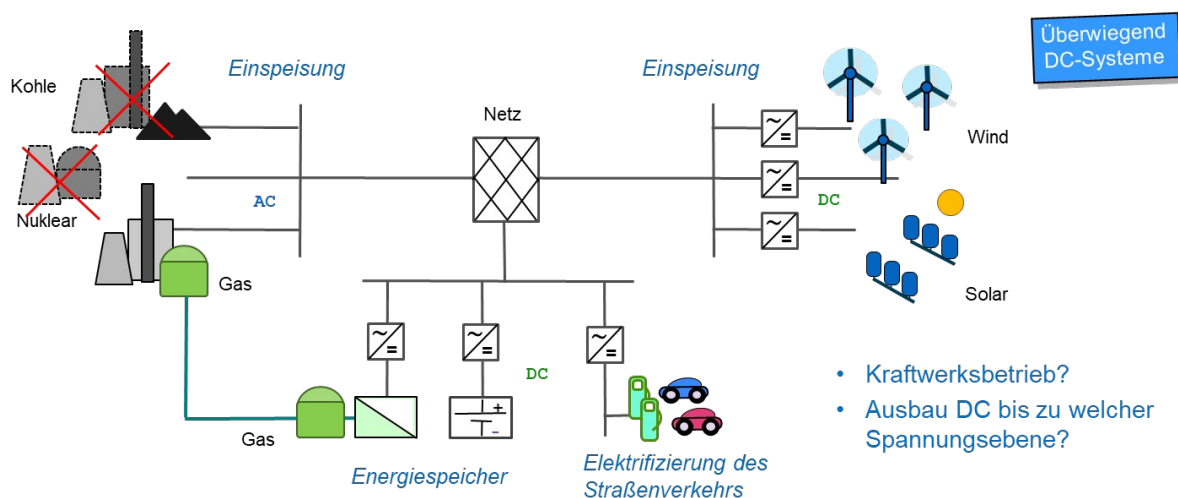


Bild C.1 Stromnetz nach dem Ausstieg aus Kernkraft und Kohle

Hierbei ist davon auszugehen, dass der Strombedarf insgesamt um ca. 50% wachsen wird, bedingt durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs und den Einsatz elektrischer Wärmepumpen anstelle von Ölheizungen und Gasheizungen.

Erneuerbare Erzeuger wie Windanlagen und Solaranlagen zusammen mit ihrem Speichersystemen (Batterien, Elektrolyse, Brennstoffzellen), sowie Ladesysteme für Fahrzeugbatterien haben eins gemeinsam: Es sind Gleichstromsysteme.

Zu den Aufgaben künftiger Netze zählen:

- Wie lässt sich mit erneuerbaren Erzeugern der Kraftwerksbetrieb sicherstellen?
- Wie weit erfolgt der Ausbau der Gleichstromsysteme ins Netz?

Nach dem heutigen Stand der Technik werden erneuerbare Erzeuger über AC-Verteilnetze zusammengeführt. Für die Anbindung erneuerbarer Erzeuger, wie z.B. Windparks, sowie künftiger Elektrolyseanlagen, Brennstoffzellen und Batteriesysteme spielen 110 kV Verteilnetze eine entscheidende Rolle. Folgende Abbildung zeigt einen Netzausschnitt des 110 kV-Verteilnetzes (blaue Linien) in Norddeutschland mit zwei Anschlusspunkten des 110 kV-Verteilnetzes an das 380 kV-Übertragungsnetz (rote Punkte). Umspannwerke mit Übergängen in die 20 kV AC-Mittelspannung finden sich an den Referenzpunkten C (blauen Punkten) im Netz. Dort sind Windparks angeschlossen, bzw. über die 20 kV Mittelspannung auch Ortschaften und Industriebetriebe.

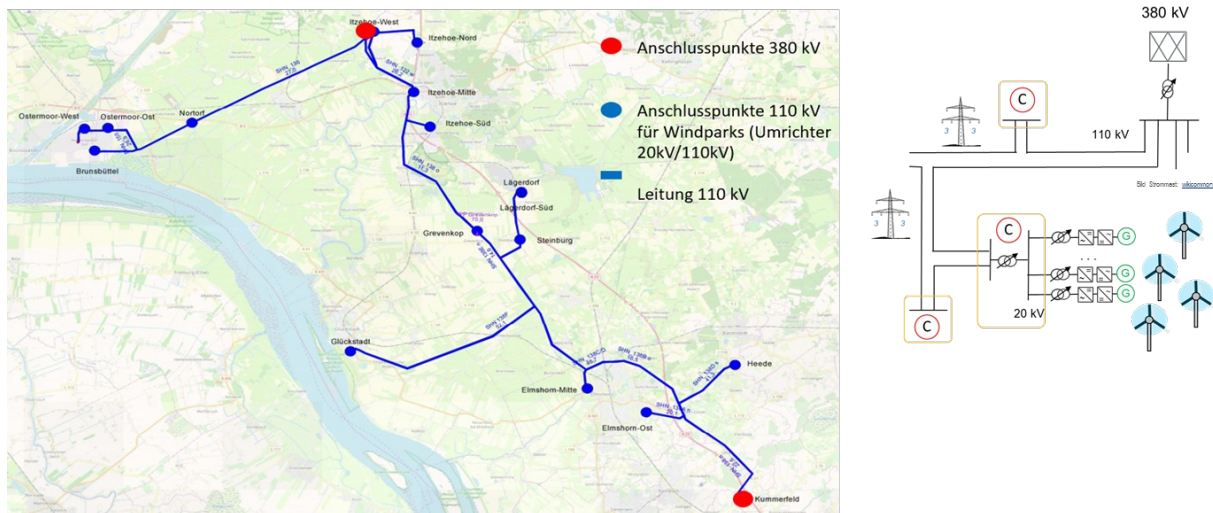


Bild B.2 Beispiel für ein Verteilnetz mit 110 kV AC

Die 110 kV Leitungen des Verteilnetzes sind üblicherweise als Freileitungen ausgeführt, wie rechts in der Abbildung skizziert. Hierbei ermöglicht die Ausführung mit zwei Anschlusspunkten ans Übertragungsnetz an den Leitungsenden eine Redundanz der Versorgung: Der Strom nimmt jeweils den kürzesten Weg zum nächsten Anschlusspunkt ans Übertragungsnetz (380 kV). Im Falle einer Leitungsunterbrechung ist der kürzeste Weg der zweite Anschlusspunkt am Referenzpunkt C. Die

Windparks heutiger Bauart verfügen über eine Anschlussleistung von ca. 40 MVA am Referenzpunkt C. An den Anschlusspunkten zum Übertragungsnetz werden zwischen 200 MVA und 300 MVA an Leistung aufgesammelt. Diese Leistung wird stromgeführt ins Netz gespeist.

Kraftwerksbetrieb mit erneuerbaren Erzeugern

Erneuerbare Erzeuger sind bis heute von diesen Systemdienstleistungen ausgenommen. Sie wirken nach Vorgaben durch die gängigen Anschlussrichtlinien (z.B. TAR 4110) netzstützend bzw. netzdienlich. Diese Funktionen verbleiben allerdings im stromgeführten Betrieb der Anlagen und beinhalten nicht die o.g. Systemdienstleistungen von Kraftwerken.

Für die Systemdienstleistungen verwenden konventionelle Kraftwerke ihren Energiespeicher: Das Kraftwerk stellt am Anschlusspunkt eine stabile Netzspannung bereit, unabhängig von der Entnahme oder der Einspeisung von Strom. Schnelle Lastschwankungen gleicht die Schwungmasse der Generator-Turbinensätze aus: Die sogenannte Momentanreserve stellt eine Mehrleistung aus der kinetischen Energie bereit, bzw. nimmt ein Überangebot als kinetische Energie auf.

Auf die resultierende Drehzahländerung $f(P)$ aus der Bereitstellung reagiert der Drehzahlregler des Kraftwerks mit einer Anpassung der Turbinenleistung $P(f)$. Letztere entspricht der Regelleistung als Primärregelleistung (unmittelbar durch den P-Regler) bzw. als Sekundärregelleistung (durch Anpassung des Arbeitspunktes des Reglers).

Ein Kraftwerksbetrieb erneuerbarer Erzeuger ist nach heutigem Stand der Technik nicht vorgesehen. Windparks folgen dem Angebot an Windleistung und arbeiten daher stromgeführt. Der Kraftwerksbetrieb bzw. spannungsgeführte Betrieb wäre jedoch durch den Einsatz von Energiespeichern möglich. Die Energiespeicher werden zur Speicherung eines Überangebotes an Windenergie als Elektrolyse (Power-to-Gas) sowieso benötigt, bzw. in umgekehrter Lastflussrichtung als Brennstoffzellen zur Erzeugung von Energie aus Gas, bzw. als Batteriespeichersysteme für den kurzfristigen Energieausgleich.

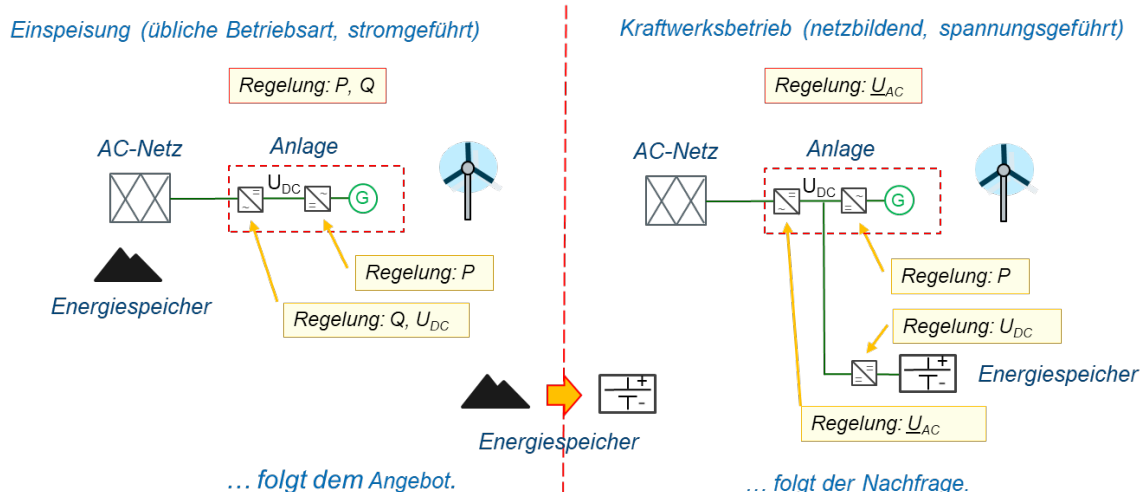


Bild C.3 Kraftwerksbetrieb konventionell und mit erneuerbaren Energien

Wie in Abbildung C.3 rechts dargestellt, ist für den Kraftwerksbetrieb nur eine passende Betriebsführung der Anlagen erforderlich, d.h. eine geeignete Software. Der Anlagenumrichter des Windrades bleibt hierbei völlig unverändert: Das Angebot an elektrischer Leistung folgt dem Angebot an Wind. Allerdings wird der netzseitige Umrichter auf den spannungsgeführten Betrieb umgestellt: Er stellt nun eine stabile Netzspannung bereit, zusammen mit den hiermit verbundenen weiteren Systemdienstleistungen.

Den Ausgleich zwischen vom Netz angeforderter Leistung und von der Anlage bereitgestellter Leistung übernimmt der Umrichter am Energiespeicher: er stellt eine stabile Spannung am DC-Netz bereit. Diese Art der Betriebsführung ist bereits Stand der Technik in Inselnetzen (dort vorwiegend in Kombination mit Batteriespeichern für Solarenergie in Kombination mit netzbildenden Umrichtern). Ebenso ist die Umschaltung vom stromgeführten Betrieb in den spannungsgeführten Betrieb bereits Stand der Technik an HGÜ-Kopfstationen.

Vom spannungsgeführten Betrieb in Netz ausgenommen sind bisher erneuerbare Erzeugungsanlagen. Der spannungsgeführte Betrieb im Verbund mit konventionellen Kraftwerken wäre auch technisch nicht machbar. Abgesehen davon ist ein solcher Ansatz wirtschaftlich nicht sinnvoll, da für den spannungsgeführten Betrieb, wie in Abbildung D.3 rechts dargestellt, jedes Windrad individuell mit einem Energiespeicher im DC-Zwischenkreis versorgt werden müsste.

Diese Lösung scheidet technisch aus, da die Anbindung über das 110 kV-Verteilnetz wegen des hiermit verbundenen Transformators auf 110 kV mit einer zu hohen Netzimpedanz verbunden ist. Konventionelle Kraftwerke arbeiten mit einem Maschinentransformator unmittelbar am 380 kV-Übertragungsnetz. Der Einsatz einer über eine vergleichsweise große Impedanz angebotenen weiteren Spannungsquelle (= Windrad über 110 kV) parallel zum Kraftwerk liefert keinen nennenswerten Beitrag mehr zum Kraftwerksbetrieb. Abgesehen davon wären einzelne Windräder als Kraftwerke wenig leistungsfähig (ca. 5 MW pro Windrad im Vergleich zu ca. 1 GW für konventionelle Kraftwerke).

Ein Verbundbetrieb erneuerbarer Erzeuger mit den im Netz verbliebenen Gaskraftwerken erscheint nur möglich, wenn diese direkt an den Transformator am Anschlusspunkt zum 380 kV-Netz angebunden sind, dieser also als Maschinentransformator arbeitet.

Einsatz von MVDC-Kabelsystemen

Der Einsatz von MVDC-Kabelsystemen hat das Potenzial, konventionelle 110 kV AC-Systeme zu ersetzen: Die Kopfstation am Referenzpunkt A in der folgenden Abbildung C.4 ist über einen Transformator direkt ans 380 kV-Netz angeschlossen. Sie arbeitet im spannungsgeführten Betrieb und kumuliert die Leistung aller angeschlossenen Erzeuger.

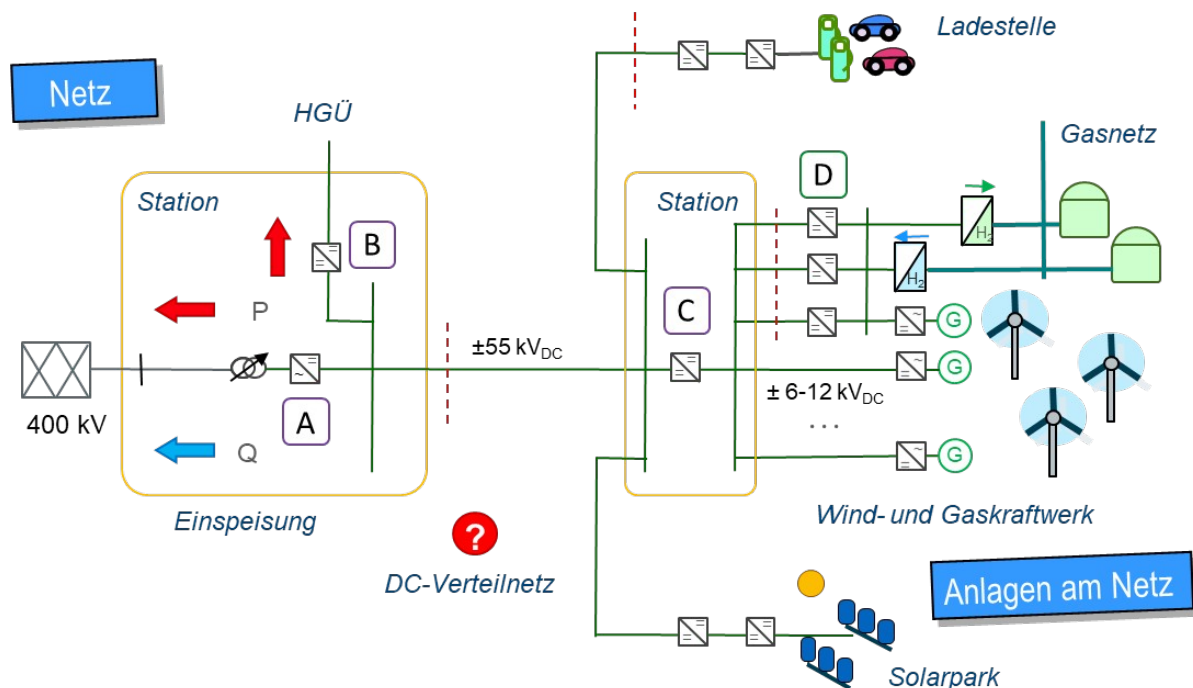


Bild C.4: Einsatz hybrider AC/DC-Netze der Energiewende

Das Leistungsangebot insgesamt entspricht somit der Leistung großer konventioneller Kraftwerke. Die Betriebsweise der Kopfstation am Referenzpunkt A entspricht außerdem dem heutigen Stand der Technik beim spannungsgeführten Betrieb von HGÜ-Kopfstationen.

Die Energiespeicher sind nun unmittelbar an das DC-Verteilnetz angebunden. Auf diese Art wird eine kleinteilige Realisierung für einzelne Windanlagen vermieden. Auch regulatorisch erscheint dieses Konzept leicht umsetzbar: Die Rolle des Windparkbetreibers bleibt unverändert. Allerdings reduzieren sich dessen Kosten, da ein Wechselrichter und Transformator für den Netzanschluss der einzelnen Windräder nicht mehr benötigt wird.

Der Wechselrichter findet sich nun an der Kopfstation A. Hierdurch ergibt sich zwar eine Verschiebung der Kosten vom Anlagenbetreiber zum Verteilnetzbetreiber, jedoch insgesamt kein Mehraufwand. Für eine wirtschaftliche Bewertung des Netzszenarios verbleiben somit:

- Der Aufwand für den anlagenseitigen Wandler am Referenzpunkt C gegenüber einem konventionellen Transformator an dieser Stelle.
- Der Aufwand für das DC-Verteilnetz auf Basis konventioneller 20 kV-AC-Kabel im Vergleich zu einem 110 kV AC-Kabelnetz.
- Der Aufwand für die DC-Umspannstation (Schaltanlagen und Schutztechnik) am Referenzpunkt C gegenüber einem konventionellen AC-Umspannwerk.

Im Rahmen der Energiewende ist ein weiterer Ausbau erneuerbarer Erzeuger, einschließlich Windanlagen um einen Faktor 2 bis 3 erforderlich. Daher ist absehbar, dass die vorhandene Basis an Windanlagen um diesen Faktor erweitert werden muss. Hierzu muss ein entsprechender Ausbau der Verteilnetze erfolgen.

Mangels Akzeptanz weiterer Freileitungen, z.B. für die 100 kV AC-Verteilung, sind Netzbetreiber angehalten, diese Erweiterungen als Kabelstrecken auszuführen. Für das DC-Verteilnetz wurde ein Referenznetz erstellt und dieses wirtschaftlich gegenüber den konventionellen AC-Verteilnetzen bewertet.

Für das Referenznetz wurde das bestehende 110 kV AC-Netz als Basis verwendet. Hierbei wurden die AC-Leitungen durch äquivalente DC-Leitungen mit vergleichbarer Transportkapazität ersetzt. Die Dimensionierung erfolgte mit den Ergebnissen der Untersuchungen aus Forschungsprojekten.

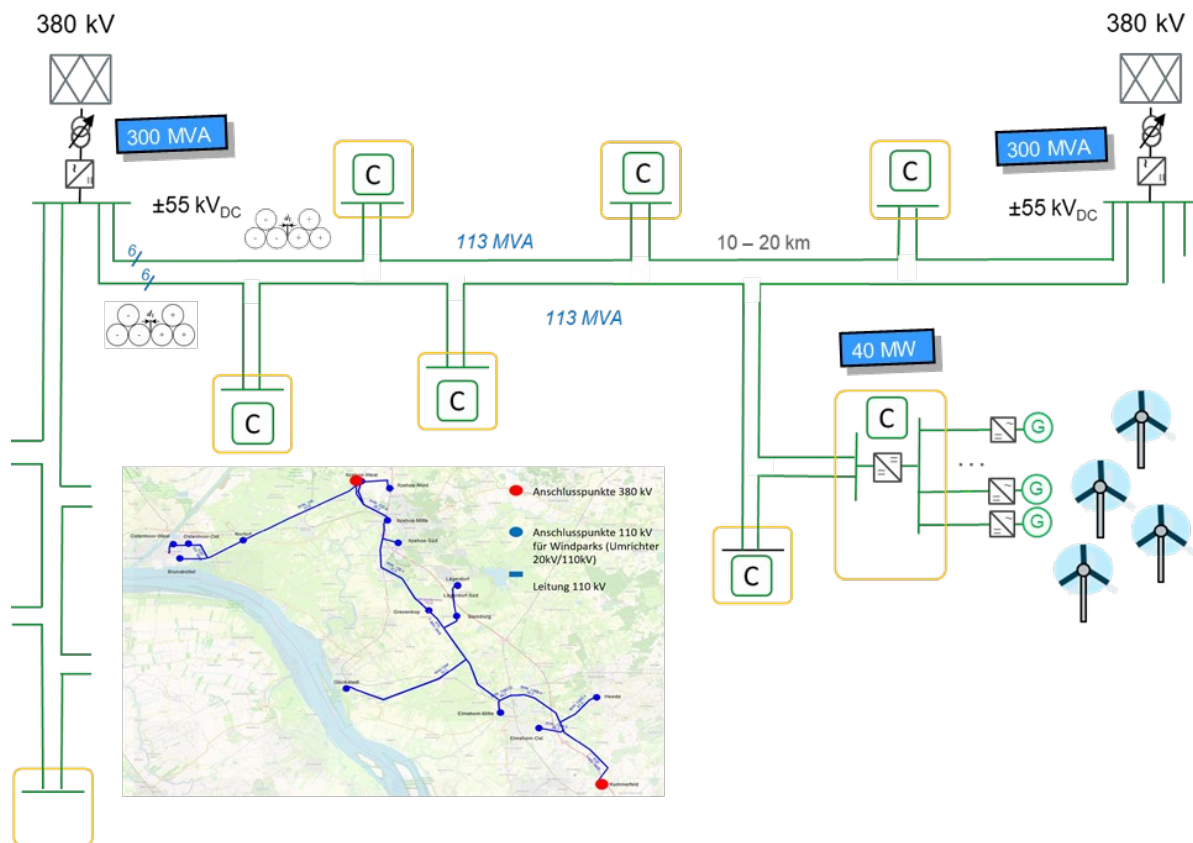


Bild C.5: Ersatz von 110 kV AC durch ein DC-Verteilnetz

Es zeigt sich, dass jeweils ein Dreierbündel konventioneller 20 kV AC-Leitungen mit einem Leiterquerschnitt von jeweils 240 mm² hierfür ausreicht. Die Verlegung kann auf die für 20 kV AC-Kabel gewohnte Weise erfolgen und ist daher vergleichsweise kostengünstig. Das Referenznetz bietet Anschlussmöglichkeiten für Windparks im Einzugsbereich beider Anschlusspunkte ans 380 kV-Netz mit einer Leistung von bis zu 300 MVA pro Anschlusspunkt und Referenznetz. Durch Anschluss mehrerer DC-Verteilnetze, wie in der Abbildung links dargestellt, lässt sich die Leistung am Anschlusspunkt steigern.

Eine Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit beruht auf auf folgenden Eckdaten:

- Systeme: Transformatoren zwischen 10 und 15 Euro/kVA gegenüber Marktpreisen für Umrichter zwischen 100 und 150 Euro/kVA (Faktor 10)
- Kabel einschließlich Garnituren und Verlegung: 110 kV AC zu 387 Euro/m im Vergleich zu 60 kV DC zu 107 Euro/m (Faktor 1/3)
- Schaltanlagen und Schutztechnik im Umspannwerk C: vergleichbar
- Referenznetz: 110 kV AC zu 233 Euro/kVA im Vergleich zu 60 kV DC zu 287 Euro/kVA bei heutigen Marktpreisen (ca. 25% mehr)

Somit ergibt sich die in Abbildung C.6 zusammengefasste Lage. Bei heutigen Marktpreisen erscheint der Einsatz der DC-Verteilnetze mit geringem Mehraufwand machbar. Es ist davon auszugehen, dass sich die Preise für Umrichtertechnik im Netz in Richtung der Preise für Umrichter am Netz entwickeln werden. Für Solarumrichter ist man heute bereits auf halben bis 1/3 des angenommenen Niveaus.

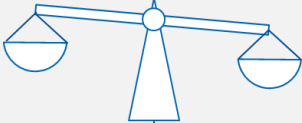
| 110 kV Kabelnetz | MVDC Kabelnetz |
|---|----------------|
| Kosten für Kabel, Transformatoren und Umrichter | |
|  +25% | |
| Möglichkeit zum Kraftwerksbetrieb mit erneuerbaren Energien | |
| ✘ | ✔ |
| Einsparmöglichkeiten für Schaltanlagen einschließlich Schutztechnik | |
| ✘ | ✔ |

Bild C.6: Wirtschaftliche Bewertung bei heutigen Marktpreisen

Es bleibt als entscheidender Mehrwert die Möglichkeit, die vorhandene Installation erneuerbaren Erzeugern zusammen mit ihren Energiespeichern für den Kraftwerksbetrieb einzusetzen und so den Schwund an konventioneller Kraftwerksleistung im Netz zu kompensieren. Hierzu ist lediglich die Betriebsführung der netzseitigen Wandler umzustellen.

- Der Betrieb der Umrichter an den Energiespeichern ist spannungsgeführt auszuführen, wodurch sich ein lokal umzusetzendes Regelkonzept ergibt, ohne Einsatz von Kommunikationstechnik zur Betriebsführung.
- Insgesamt sollten Stabilität und Versorgungssicherheit der elektrischen Energieversorgung hierdurch gegenüber dem heutigen Stand der Technik deutlich an Qualität gewinnen.

In der wirtschaftlichen Bewertung wurden die Aufwände für die Schaltanlagen und Schutztechnik im Umspannwerk am Referenzpunkt C als vergleichbar angenommen. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zeigen, dass der anlagenseitige Umrichter strombegrenzend ausgeführt wird. Daher entspricht der netzseitige Kurzschlussstrom dem Bemessungsstrom.

Somit kann die Auslegung der Schaltanlagen auf den Bemessungsstrom erfolgen, und nicht, wie in der AC-Technik üblich, auf den Kurzschlussstrom in Höhe des 20-fachen des Bemessungsstrom. Da die Umrichter nach den bisherigen Untersuchungen außerdem den Strom aus Gründen der Eigensicherheit schneller begrenzen als konventionelle Schutzgeräte, sollte sich der Aufwand durch Verzicht auf Leistungsschalter und Einsatz von Lasttrennschaltern weiter reduzieren lassen. In diesem Fall wäre das DC-Verteilnetz bereits mit heutigen Marktpreisen die wirtschaftlichere und zugleich leistungsfähigere Lösung.

Anhang D – ...

...