

## 10.1 Dynamische Topologie

Das ganze System besteht aus einer verformbaren Schaltung zwischen Stromversorgung und Triebfahrzeug. Das Unterwerk versorgt die Energie mit Eigenschaften, die bei dem Triebfahrzeug benützt werden können. Es bekommt Energie mit anderen Eigenschaften die für den Transport aus dem Erzeugungsort angemessen sind.

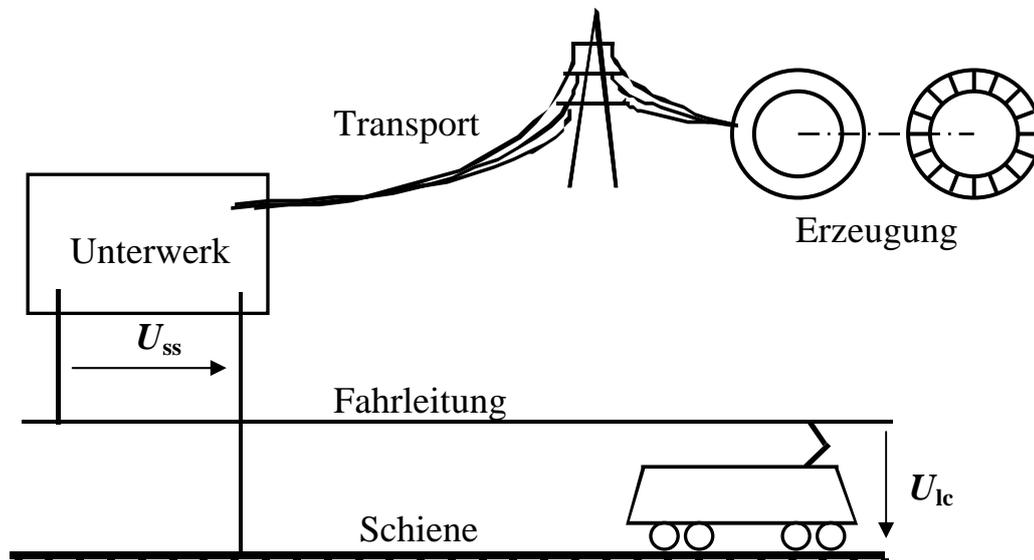


Fig. 10.3 Schematische Darstellung des elektrischen Zugförderungssystems.

## 10.2 Verfassung der elektrischen Schaltung

Die Traktionsschaltung besteht sich auch zwei sehr verschiedenen Stromleitern:

1. Die Fahrleitung die auf Träger isoliert ist und dessen Kenndaten schön bekannt sind.
2. Die Schienen und das Feld neben der Linie, wo der Strom mit unbestimmter Art fließt.

Man kann trotzdem ein vereinfachtes Schema skizzieren, der alle Impedanzen enthält.

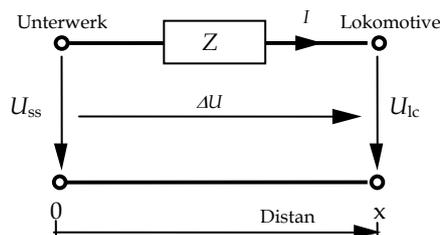


Fig 10.4 Traktionsschaltung : vereinfachter Schema.

Die Impedanz  $Z$  ist ab der Distanz abhängig; man spricht so von linearer Impedanz. Man hat einige Werten für typischen Fahrleitungen berechnet; für den Erdleiter hat man Mittelwerten gewählt. Das Gleis soll sorgfältig montiert werden: man soll die elektrische Kontinuität garantieren, sodass dem Hauptstrom durch die Scheinen fließt.

	Linear Impedanz [ $\Omega/\text{km}$ ]	
	Eingleisig	Zweigleisig
1,5 kV=	0,07	0,05
3 kV=	0,08	0,06
15 kV 16,7 Hz	$0,08 + j 0,13$	$0,05 + j 0,08$
25 kV 50 Hz	$0,13 + j 0,35$	$0,09 + j 0,21$

Fig. 10.10 Linear Impedanzen für typischen Linien.

Die Spannung die beim Triebfahrzeug wirklich benutzbar ist, ist die Spannung am Unterwerk minus den Spannungsabfall auf der Linie. Der Spannungsabfall hängt aus der Distanz Triebfahrzeug – Unterwerk und aus dem Strom, der beim Triebfahrzeug benützt wird. Die Linien sind nicht alle aus einem einzigen Unterwerk gespeist. Man kann auch auf beiden Enden einer Linie  $d$  aus Länge speisen, besonders in Gleichstrom.

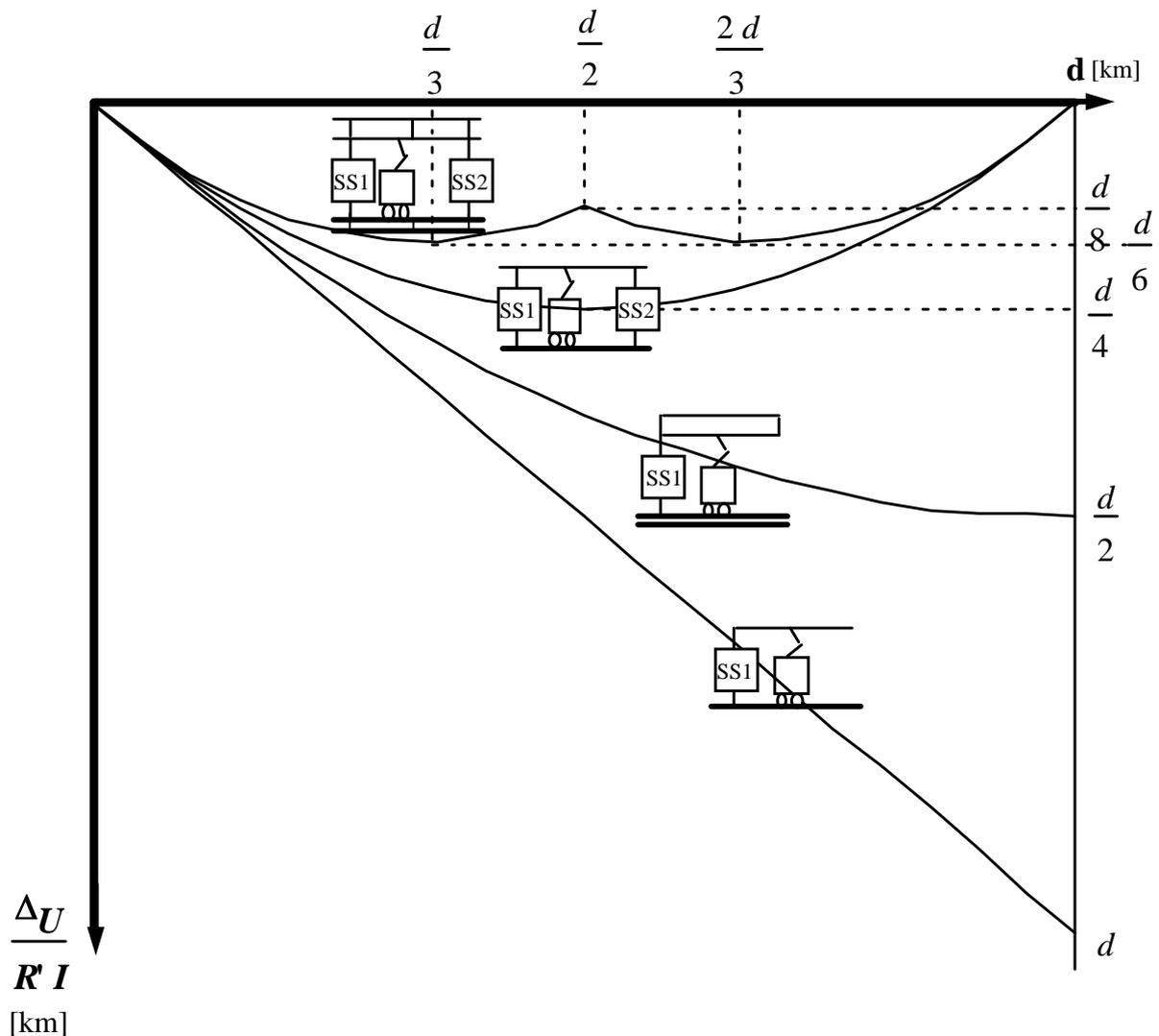
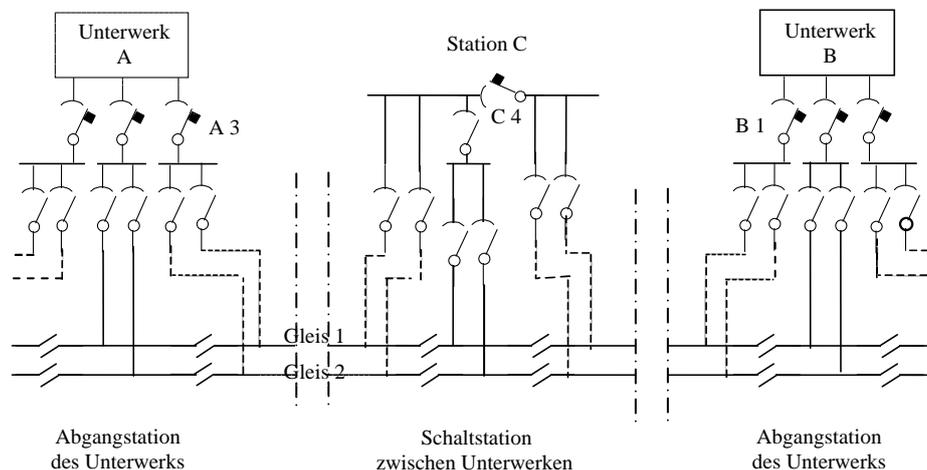


Fig. 10.17 Relativen Spannungsabfällen auf einer Linie.

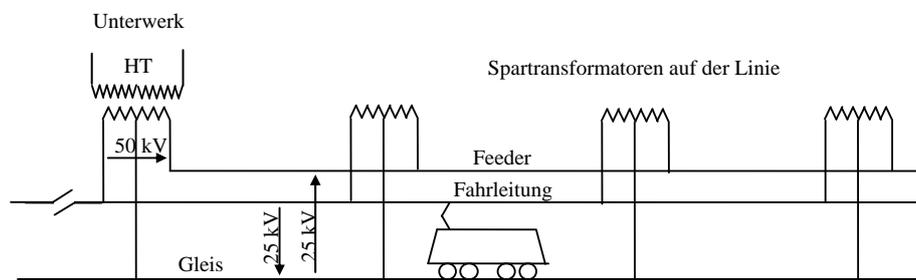
## 10.2 Zusammensetzung

Die Unterwerke und die Fahrleitung sind mit Schützen verbunden, die verschiedenen Anordnungen der Traktionsschaltung erlauben. Für Gleichstrom hat man kein Problem zwei Unterwerken in Parallel zu schalten. Für einphasigen Wechselstrom soll man die beiden Phasen beachten bevor man eventuell die Unterwerke in Parallel schaltet.



**Fig. 10.46** Kupplung zwischen zwei Unterwerken.

Um die lineare Impedanz zu reduzieren benützt man oft die Doppelspannungspeisung, mit Spartransformatoren auf der Linie.



**Figure 10.48** Speisung mit Doppelspannung: Beispiel für 25 kV.

	Intervalle zwischen Unterwerken [km]	Leistung pro Unterwerk [MVA]
<b>Gleichstrom 1500 V</b>	8 à 14	3 à 12
<b>Einphasen 16,7 Hz 15 kV</b>	30 à 60	10 à 30
<b>Einphasen 50 Hz 25 kV</b>	30 à 60	10 à 30
<b>Einphasen 50 Hz 2 x 25 kV</b>	40 à 90	30 à 60

**Tableau 10.52** Intervalle und Leistungen der Unterwerken für verschiedenen Systemen.

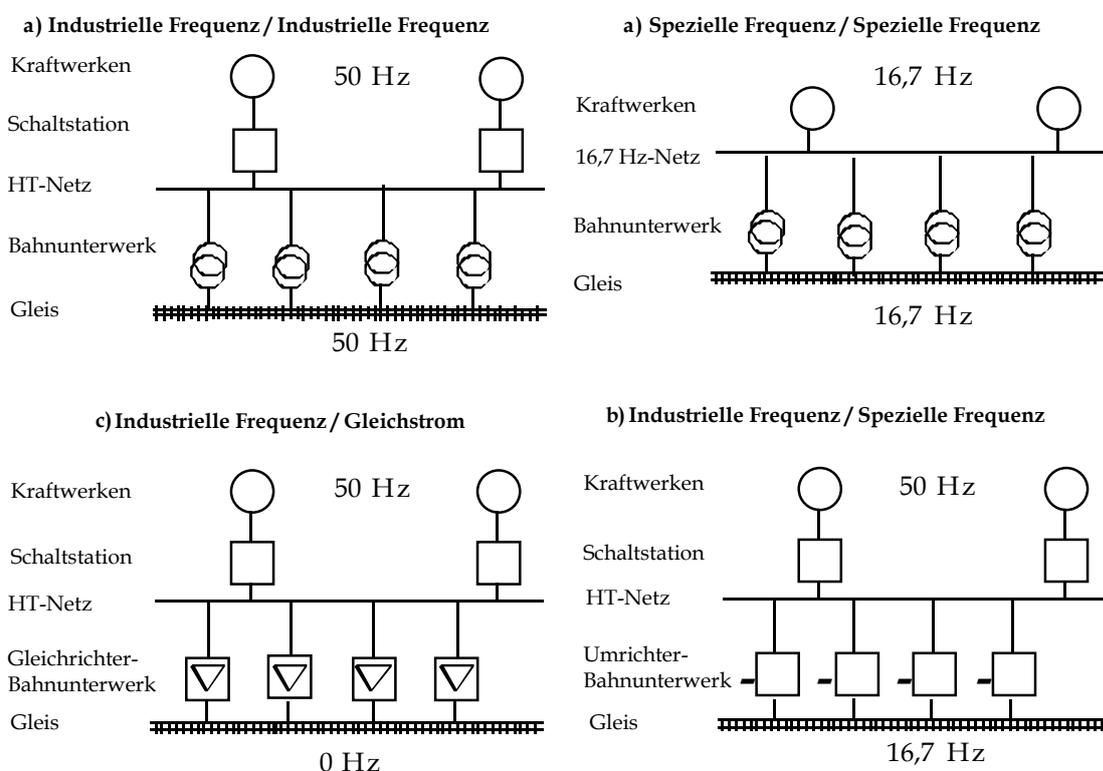
Der Transformator definiert die Nennleistung des Unterwerks, er kann kürzlich überlastet werden (z.B.  $200\% \cdot P_n$  während 2 Minuten). Für Gleichstrom-Unterwerk ist die Überlast noch durch den Maximalstrom des Gleichrichters begrenzt.

## 10.3 Anspeisung

Die Einphasen-Fahrleitungen mit industrieller Frequenz sind aus dem generellen Dreiphasen-Netz gespeist (Fig. 10.52a) bei Dreiphasen-Einphasen-Abspannstationen. Man soll die Spannungsunsymmetrie begrenzen, wenn man die Unterwerke auf dem Netz schaltet.

Die Gleichstrom-Fahrleitungen sind auch aus dem generellen Dreiphasen-Netz gespeist (Fig. 10.52c) bei Dreiphasen-Transformator und Gleichrichter. Am Anfang der elektrischen Zugförderung existierten auch Gleichstromkraftwerken die direkt die Fahrleitung anspeisen.

Die Einphasen-Fahrleitungen mit spezieller Frequenz dürfen aus Einphasen-Kraftwerken und Einphasen-Netz durch Einphasen-Unterwerke gespeist, aus dem generellen Netz und Umrichter-Unterwerke gespeist, oder durch eine Mischung beider Moden.



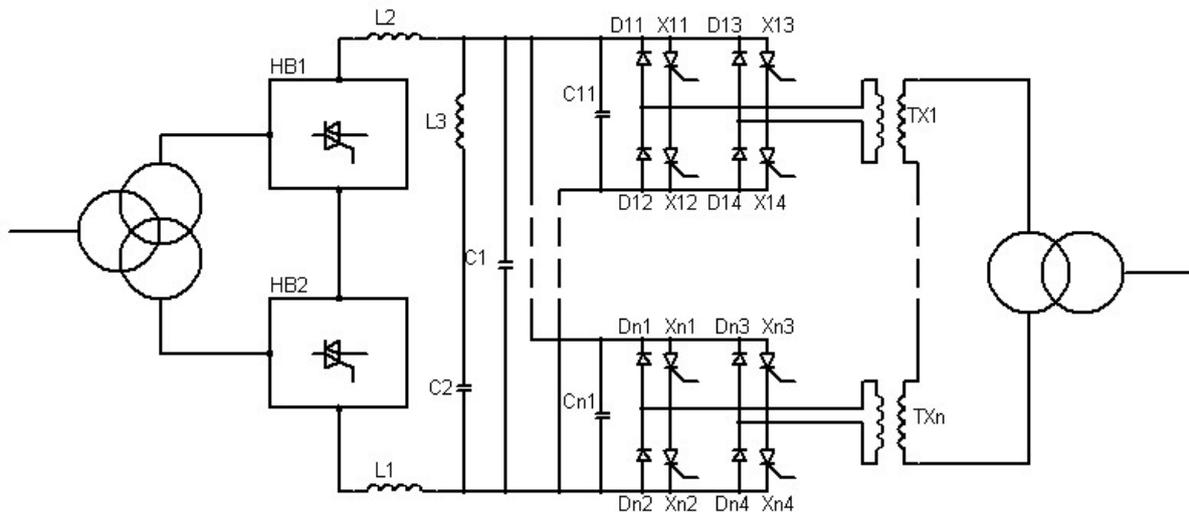
**Fig. 10.53** Verschiedene Anspeisungslösungen.

Für die Frequenzwandlung hat man zuerst rotierenden Umrichter benützt: starre für Netze ohne Eigenerzeugung und weiche für Netze mit Eigenerzeugung. Man baut jetzt statischen Umrichter mit Gleichspannung-Zwischenkreis (U-Umrichter). Seite Dreiphasen und Seite Einphasen baut man mehrere Einfachumrichter in Kaskade, um ein guten Oberschwingungsgehalt zu garantieren. Die ersten Realisierung wurden mit GTO gebaut (CFF: Giubiasco) [122]. Heute nützt man gern IGCT (DB: Bremen) [123], die die Leitungsverluste um 25 % reduzieren. Die Leistung der Steuerelektronik ist 5 bis 6 Mal niedriger und die Kommutierungsdauern 6 bis 8 Mal kürzer. Diese Kommutierungsdauern sind mit IGBT vergleichbar, die mehr Leitungsverluste haben. Die Silikonstruktur eines IGCT ist mit IGBT sehr nah, man kann so Produktion optimieren.

Diese Einrichtungen dürfen die Leistung in beiden Richtungen führen.

Solche Einrichtungen sind auch zwischen den generellen 50 Hz-Netz und die Einphasen 50 Hz Fahrleitung vorgesehen [147]. Mit einem bescheidenen Überpreis am Bau hat man niedrigere Betriebskosten:

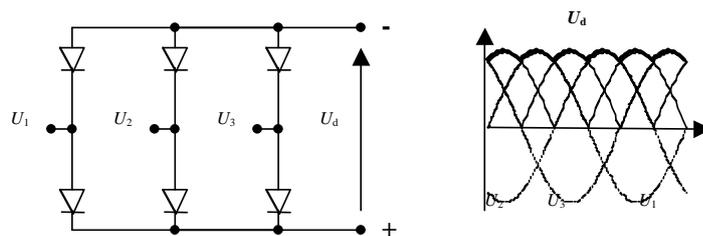
- Man hat keine Strafen am Energielieferant wegen Spannungsunsymmetrie zwischen Phasen zu bezahlen.
- Die Oberschwingungen aus Triebfahrzeugen sind bei den Filtern im Zwischenkreis vernichtet. Auch keine Strafe am Energielieferant.
- Die Blindleistung kommt aus dem Zwischenkreis. Auch keine Strafe am Energielieferant.
- Die Spannung an der Fahrleitung kann dynamisch geregelt werden: maximaler Wert wenn das Unterwerk liefert und minimaler Wert wenn es bekommt Leistung.



**Dreiphasen 50 Hz Umrichter      Umrichter      Transfo. mit      16.7 Hz**  
**Transformatoren      Zwischenkreis      in Parallel      Sekundär in Serie      Transfo.**

**Fig. 10.62** Frequenzumrichter.

Um die Gleichstrom Fahrleitung zu speisen nützt man heute weder rotierenden Maschinen noch Quecksilber-Gleichrichtern, die am Anfang der elektrische Zugsförderung zu finden waren. Man nützt Dioden-Gleichrichtern.



**Fig.10.64** Dreiphasen-Brückengleichrichter.

Auf Einphasenwechselstrom ist die lineare Impedanz komplex (Fig. 10.10). Am Triebfahrzeug ist die Spannung nicht nur niedriger als am Unterwerk, es ist auch in Phasen geschoben (Fig.10.69a). Anstatt die Distanz zwischen Unterwerk zu reduzieren, was sehr teuer sein kann, kann man Kondensatoren in Serie mit der Fahrleitung (RhB, NSB, fig. 10.69b) oder in Parallel (SNCF, Fig. 10.69c) hinzufügen. Die Spannung an der Fahrleitung ist nicht nur höher, das Unterwerk soll auch weniger Blindleistung liefern: die Phasenunterschied  $\varphi_{ss}$  zwischen die Spannung  $U_{ss}$  und der gelieferter Strom  $I$  ist kleiner.

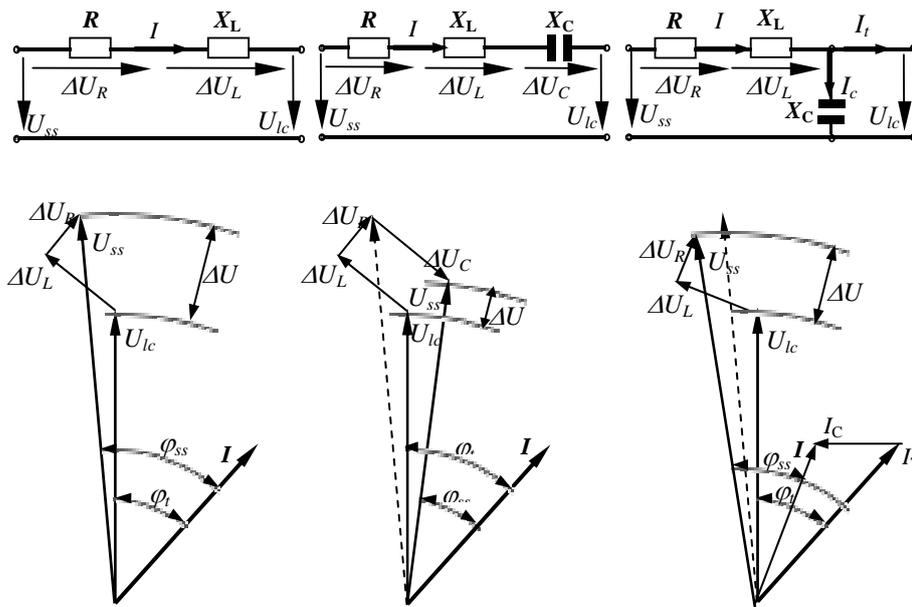


Fig. 10.69 Spannungsabfall-kompensation durch Kondensatoren.

Die passiven Komponenten sind nur auf Teilen der Linie mit einem bescheidenen Anzahl Lasten nützlich. Man installiert heute statischen Kompensatoren (SVC) die mit Kondensatoren, Induktivitäten und Halbleitern gebaut werden. Ein Software beobachtet Spannung und Strom an der Fahrleitung, es steuert die Halbleitern um die Blindleistung und Oberschwingungen zu minimieren Die Impedanz ist so in Echtzeit an der Last lokal angepasst.

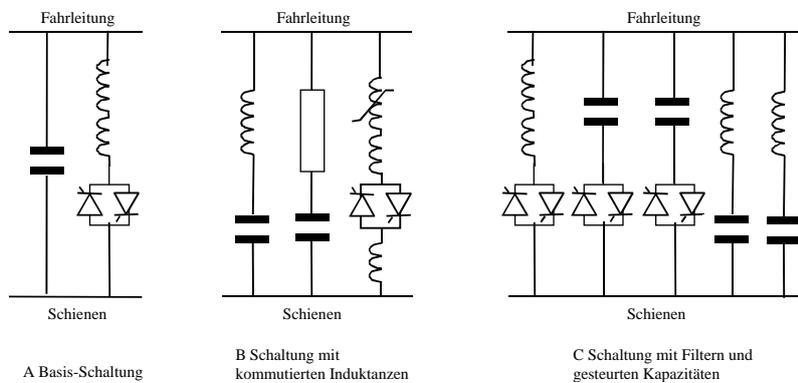


Fig. 10.71 Statische Kompensatoren für Blindleistung.

Die Gleichstrom-Unterwerke sind realen Spannungsquellen für  $U_0$  geregelt, mit eine interne Widerstand interne  $R_i$  und für ein Nennstrom  $I_{ssn}$ . Sie dürfen momentan überlastet werden.

$$U_{ss} = U_0 - R_i \cdot I_{ss} \tag{10.75}$$

$$I_{ss2h} = 1,5 \cdot I_{ssn} \quad I_{ss1min} = 3 \cdot I_{ssn} \tag{10.76}$$

Die Einphasen-Unterwerke ohne Leistungselektronik, dürfen auch überlastet werden.

$$I_{ss15min} = 1,5 \cdot I_{ssn} \quad I_{ss5min} = 2 \cdot I_{ssn} \tag{10.77}$$