

# Energiesysteme

6. Semester – Dr. A Fuchs, Dr. T Demiray

Autoren: Luca Loop

<https://github.com/Luca-ET/EnSys.git>

## Inhaltsverzeichnis

|  |           |  |           |
|--|-----------|--|-----------|
| <b>1 Energie- und Elektrizitätswirtschaft</b>                        | <b>2</b>  | <b>11 Netztopologien</b>                             | <b>9</b>  |
| 1.1 Masseinheiten . . . . .  | 2         | 11.1 Strahlnetz . . . . .                            | 9         |
| 1.2 Umrechnungsfaktoren . . . . .                                    | 2         | 11.2 Ringnetz . . . . .                              | 9         |
| 1.3 Dezimalfaktoren . . . . .  | 2         | 11.3 Maschennetz . . . . .                           | 9         |
| 1.4 Energien . . . . .   | 2         |  |           |
| 1.5 Leistung . . . . .   | 2         |  |           |
| 1.6 Schweizer Strom-Mix . . . . .                                    | 3         |  |           |
| 1.7 Investitions- und Kostenrechnung . . . . .                       | 3         |  |           |
| <b>2 Wasserdargebot für Wasserkraft</b>                              | <b>4</b>  | <b>12 Leitungen</b>                                  | <b>9</b>  |
| 2.1 Abflussganglinie . . . . .                                       | 4         | 12.1 Freileitungen . . . . .                         | 10        |
| 2.2 Abflussdauerkurve . . . . .                                      | 4         | 12.2 Masten . . . . .                                | 10        |
| 2.3 Nutzwassermenge . . . . .  | 4         | 12.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen . . . . . | 10        |
| <b>3 Wasserkraft</b>   | <b>5</b>  | 12.4 Mastenformen . . . . .                          | 10        |
| 3.1 Kontinuitätsgleichung des Durchflusses . . . . .                 | 5         | 12.5 Freileitungen: Vor- und Nachteile . . . . .     | 10        |
| 3.2 Bernoulli-Druck-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke . . . . . | 5         |  |           |
| 3.3 Bernoulli-Höhen-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke . . . . . | 5         |  |           |
| 3.4 Örtliche Energieverluste . . . . .                               | 5         |  |           |
| 3.5 Reibungsverluste . . . . .                                       | 5         |  |           |
| 3.6 Verlusthöhe durch Reibung . . . . .                              | 5         |  |           |
| 3.7 Reynolds-Zahl $Re$ . . . . .                                     | 5         |  |           |
| <b>4 Wasserkraftwerk-Typen</b>                                       | <b>6</b>  | <b>13 Kabelleitungen</b>                             | <b>10</b> |
| 4.1 Klassifizierung . . . . .  | 6         | 13.1 Aufbau Allgemein . . . . .                      | 10        |
| 4.2 Einteilung nach technischen Aspekten . . . . .                   | 6         | 13.2 Aufbau . . . . .                                | 10        |
| 4.3 Einteilung nach energiewirtschaftlichen Aspekten . . . . .       | 6         | 13.3 Erdverkabelung in der Schweiz . . . . .         | 10        |
| 4.4 Einteilung nach Betriebsart . . . . .                            | 6         |  |           |
| 4.5 Einteilung nach der installierten Leistung . . . . .             | 6         |  |           |
| 4.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten . . . . .        | 6         |  |           |
| 4.7 Wasserturbinen und Pumpen . . . . .                              | 6         |  |           |
| 4.8 Laufwasserkraftwerke LWK . . . . .                               | 6         |  |           |
| 4.9 LWK mit Kaplan-turbinen Vertikal . . . . .                       | 6         |  |           |
| 4.10 LWK mit Kaplan-turbinen Horizontal . . . . .                    | 6         |  |           |
| <b>5 Turbinen Kenngrößen</b>   | <b>7</b>  | <b>14 Schaltanlagen / Umspannwerke</b>               | <b>11</b> |
| 5.1 Nettofallhöhe und Durchfluss . . . . .                           | 7         | 14.1 Aufgabe . . . . .                               | 11        |
| 5.2 Hydraulische Leistung . . . . .                                  | 7         | 14.2 Aufbau . . . . .                                | 11        |
| 5.3 Mechanische Leistung an der Turbinenwelle . . . . .              | 7         | 14.3 Transformator . . . . .                         | 11        |
| 5.4 Winkelgeschwindigkeit . . . . .                                  | 7         | 14.4 Leistungsschalter . . . . .                     | 11        |
| 5.5 Betriebszustände der Maschinengruppe . . . . .                   | 7         | 14.5 Lastschalter . . . . .                          | 11        |
| <b>6 Atomkraftwerk</b>   | <b>7</b>  | 14.6 Trennschalter . . . . .                         | 11        |
| 6.1 Kernphysikalische Grundlagen . . . . .                           | 7         | 14.7 Sonstiges . . . . .                             | 11        |
| 6.2 Spaltung schwerer Kerne . . . . .                                | 7         | 14.8 Schaltfelder Aufbau . . . . .                   | 11        |
| <b>7 Windenergie</b>   | <b>7</b>  | 14.9 Regeln beim Schalten (Reihenfolge) . . . . .    | 11        |
| 7.1 Windeleistung . . . . .  | 7         |  |           |
| <b>8 Windenergiekonverter (WEK)</b>                                  | <b>7</b>  | <b>15 Leitungsbeläge</b>                             | <b>12</b> |
| 8.1 Netzkopplung . . . . .   | 7         | 15.1 Elektrisches und magnetisches Feld . . . . .    | 12        |
| <b>9 Netze Allgemein</b>   | <b>8</b>  | 15.2 Widerstandsbelag . . . . .                      | 12        |
| 9.1 Interessen der Erzeuger . . . . .                                | 8         | 15.3 Skin-Effekt . . . . .                           | 12        |
| 9.2 Anforderungen an das Stromnetz . . . . .                         | 8         | 15.4 Ableitungsbelag . . . . .                       | 12        |
| <b>10 Netzebenen</b>   | <b>8</b>  | 15.5 Induktivitätsbelag . . . . .                    | 12        |
| 10.1 NE1: Übertragungsnetz . . . . .                                 | 8         | 15.6 Induktivitätsbelag . . . . .                    | 12        |
| 10.2 NE3: Überregionales Verteilnetz . . . . .                       | 9         | 15.7 Kapazitätsbelag . . . . .                       | 12        |
| 10.3 NE5: Verteilnetz . . . . .                                      | 9         | 15.8 Verdrillung . . . . .                           | 13        |
| 10.4 NE7: Verteilnetz . . . . .                                      | 9         | 15.9 Bündelleiter . . . . .                          | 13        |
| <b>11 Netztopologien</b>   | <b>9</b>  |  |           |
| 11.1 Strahlnetz . . . . .  | 9         |  |           |
| 11.2 Ringnetz . . . . .  | 9         |  |           |
| 11.3 Maschennetz . . . . .   | 9         |  |           |
| <b>12 Leitungen</b>  | <b>9</b>  |  |           |
| 12.1 Freileitungen . . . . .   | 10        |  |           |
| 12.2 Masten . . . . .  | 10        |  |           |
| 12.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen . . . . .                 | 10        |  |           |
| 12.4 Mastenformen . . . . .  | 10        |  |           |
| 12.5 Freileitungen: Vor- und Nachteile . . . . .                     | 10        |  |           |
| <b>13 Kabelleitungen</b>   | <b>10</b> |  |           |
| 13.1 Aufbau Allgemein . . . . .                                      | 10        |  |           |
| 13.2 Aufbau . . . . .  | 10        |  |           |
| 13.3 Erdverkabelung in der Schweiz . . . . .                         | 10        |  |           |
| <b>14 Schaltanlagen / Umspannwerke</b>                               | <b>11</b> |  |           |
| 14.1 Aufgabe . . . . .   | 11        |  |           |
| 14.2 Aufbau . . . . .  | 11        |  |           |
| 14.3 Transformator . . . . .   | 11        |  |           |
| 14.4 Leistungsschalter . . . . .                                     | 11        |  |           |
| 14.5 Lastschalter . . . . .  | 11        |  |           |
| 14.6 Trennschalter . . . . .   | 11        |  |           |
| 14.7 Sonstiges . . . . .   | 11        |  |           |
| 14.8 Schaltfelder Aufbau . . . . .                                   | 11        |  |           |
| 14.9 Regeln beim Schalten (Reihenfolge) . . . . .                    | 11        |  |           |
| <b>15 Leitungsbeläge</b>   | <b>12</b> |  |           |
| 15.1 Elektrisches und magnetisches Feld . . . . .                    | 12        |  |           |
| 15.2 Widerstandsbelag . . . . .                                      | 12        |  |           |
| 15.3 Skin-Effekt . . . . .   | 12        |  |           |
| 15.4 Ableitungsbelag . . . . .                                       | 12        |  |           |
| 15.5 Induktivitätsbelag . . . . .                                    | 12        |  |           |
| 15.6 Induktivitätsbelag . . . . .                                    | 12        |  |           |
| 15.7 Kapazitätsbelag . . . . .                                       | 12        |  |           |
| 15.8 Verdrillung . . . . .   | 13        |  |           |
| 15.9 Bündelleiter . . . . .  | 13        |  |           |
| <b>16 Leitungsmodell</b>   | <b>13</b> |  |           |
| 16.1 Leitungsgleichungen . . . . .                                   | 13        |  |           |
| 16.2 Lösung der Leitungsgleichung . . . . .                          | 13        |  |           |
| 16.3 Allgemein und für 50Hz . . . . .                                | 14        |  |           |
| 16.4 Vereinfachung für "kurze" Leitungen . . . . .                   | 14        |  |           |
| <b>17 Betriebsverhalten</b>  | <b>14</b> |  |           |
| 17.1 Natürliche Leistung . . . . .                                   | 14        |  |           |
| 17.2 Wellenimpedanz . . . . .  | 14        |  |           |
| 17.3 Unnaturalliche Belastung . . . . .                              | 14        |  |           |
| 17.4 Übernatürliche Belastung . . . . .                              | 14        |  |           |
| 17.5 Praxis . . . . .  | 14        |  |           |
| 17.6 Leerlauf . . . . .  | 14        |  |           |
| 17.7 Kurzschluss . . . . .   | 14        |  |           |
| 17.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung . . . . .                 | 14        |  |           |
| <b>18 Transformatormodell</b>  | <b>14</b> |  |           |
| 18.1 Idealer Transformator . . . . .                                 | 14        |  |           |
| 18.2 Reales Transformatormodell . . . . .                            | 14        |  |           |
| 18.3 Praktisches Transformatormodell . . . . .                       | 15        |  |           |
| 18.4 Umrechnung von Impedanzen . . . . .                             | 15        |  |           |
| 18.5 Dreiphasentransformatoren . . . . .                             | 15        |  |           |
| 18.6 Schaltgruppen . . . . .   | 15        |  |           |

# 1 Energie- und Elektrizitätswirtschaft

## 1.1 Masseinheiten

| Masseinheit    | Zeichen | Umrechnung                     |
|----------------|---------|--------------------------------|
| Watt           | (W)     |                                |
| Pferdestärke   | (PS)    | 1 PS $\approx$ 735 W           |
| Joule          | (J)     |                                |
| Wattsekunde    | (Ws)    | 1 Ws = 1 J                     |
| Kilowattstunde | (kWh)   | 1 kWh = 3 600 000 J = 3,6 MJ   |
| Kalorie        | (cal)   | 1 cal <sub>IT</sub> = 4,1868 J |

## 1.2 Umrechnungsfaktoren

| Von   Zu | J = Ws              | kWh                    | GWh                     | cal                    |
|----------|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| J = Ws   | 1                   | $0,2778 \cdot 10^{-6}$ | $0,2778 \cdot 10^{-12}$ | 0,2388                 |
| TJ       | $1 \cdot 10^{12}$   | $0,2778 \cdot 10^6$    | 0,2778                  | $0,2388 \cdot 10^{12}$ |
| kWh      | $3,6 \cdot 10^6$    | 1                      | $1 \cdot 10^{-6}$       | $0,8598 \cdot 10^6$    |
| GWh      | $3,6 \cdot 10^{12}$ | $1 \cdot 10^6$         | 1                       | $0,8598 \cdot 10^{12}$ |
| cal      | 4,1868              | $1,163 \cdot 10^{-6}$  | $1,163 \cdot 10^{-12}$  | 1                      |

## 1.3 Dezimalfaktoren

| Bezeichnung | Faktor    | Wert                  |
|-------------|-----------|-----------------------|
| Kilo (k)    | $10^3$    | 1 000                 |
| Mega (M)    | $10^6$    | 1 000 000             |
| Giga (G)    | $10^9$    | 1 000 000 000         |
| Tera (T)    | $10^{12}$ | 1 000 000 000 000     |
| Peta (P)    | $10^{15}$ | 1 000 000 000 000 000 |

## 1.4 Energien

### 1.4.1 Potentielle Energie $W_{\text{pot}}$

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

[ $W_{\text{pot}}$ ] Potentielle Energie .....  $Ws = Nm = J$   
 [ $m$ ] Masse ..... kg  
 [ $g$ ] Erdbeschleunigung .....  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$   
 [ $h$ ] Höhenunterschied ..... m

### 1.4.2 Kinetische Energie $W_{\text{kin}}$

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

[ $W_{\text{kin}}$ ] Kinetische Energie .....  $Ws = Nm = J$   
 [ $m$ ] Masse ..... kg  
 [ $v$ ] Geschwindigkeit ..... m/s

### 1.4.3 Feder Energie $W_F$

$$W_F = \frac{1}{2} \cdot F \cdot s$$

[ $W_F$ ] Federenergie .....  $Ws = Nm = J$   
 [ $F$ ] Kraft .....  $N = kg \cdot m/s^2$   
 [ $s$ ] Verschiebung (Auslenkung) ..... m

### 1.4.4 Kondensator Energie $W_C$

$$W_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

[ $W_C$ ] Kondensatorenergie .....  $Ws = Nm = J$   
 [ $C$ ] Kapazität .....  $F = \frac{A}{V}$   
 [ $U$ ] Spannung ..... V

### 1.4.5 Induktivität Energie $W_L$

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

[ $W_L$ ] Induktivitätsenergie .....  $Ws = Nm = J$   
 [ $L$ ] Induktivität .....  $H = \frac{V_s}{A}$   
 [ $I$ ] Stromstärke ..... A

### 1.4.6 Batterie Energie $W_{\text{bat}}$

$$W_{\text{bat}} = Q \cdot U$$

[ $W_{\text{bat}}$ ] Batterieenergie .....  $Ws = Nm = J$   
 [ $Q$ ] Elektrische Ladung ..... C = As  
 [ $U$ ] Spannung ..... V

### 1.4.7 Thermische Energie $W_{\text{th}}$

$$W_{\text{th}} = m \cdot c \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad c_{\text{Wasser}} = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

|                     |                                  |   |
|---------------------|----------------------------------|---|
| [ $W_{\text{th}}$ ] | Thermische Energie .....         | $Ws = Nm = J$                               |
| [ $m$ ]             | Masse .....                      | kg  |
| [ $c$ ]             | Spezifische Wärmekapazität ..... | $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| [ $\vartheta_1$ ]   | Anfangstemperatur .....          | °C oder K                                   |
| [ $\vartheta_2$ ]   | Endtemperatur .....              | °C oder K                                   |

### 1.4.8 Spezifische Energie e

|                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| $e = \frac{W}{m}$                 | $W = e \cdot m$              |
| [ $e$ ] Spezifische Energie ..... | $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$ |
| [ $W$ ] Gesamtenergie .....       | J                            |
| [ $m$ ] Masse .....               | kg                           |

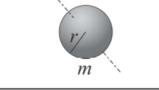
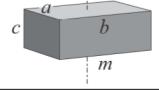
### 1.4.9 Rotations Energie $W_{\text{rot}}$

$$W_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad W_{\text{rot}} = 2 \cdot J \cdot \pi^2 \cdot f^2 \quad W_{\text{rot}} = \frac{J \cdot \pi^2 \cdot n^2}{1800}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad f = \frac{n}{60} \quad n = f \cdot 60$$

|                      |   |   |
|----------------------|---|---|
| [ $W_{\text{rot}}$ ] | Rotationsenergie .....                      | $Ws = Nm = J$                                 |
| [ $J$ ]              | Trägheitsmoment .....                       | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$                  |
| [ $\omega$ ]         | Winkelgeschwindigkeit .....                 | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$                 |
| [ $f$ ]              | Drehfrequenz, Umdrehungen pro Sekunde ..... | $\frac{1}{\text{s}} = \frac{U}{\text{sek}}$   |
| [ $n$ ]              | Umdrehungen pro Minute .....                | $\frac{1}{\text{min}} = \frac{U}{\text{min}}$ |

### Massenträgheitsmoment J

| Körper       | Trägheitsmoment  |
|--------------|--|
| Vollzylinder |  $\frac{mr^2}{2}$                  |
| Hohlzylinder |  $\frac{m(r_a^2 + r_i^2)}{2}$     |
| Kugel        |  $\frac{2}{5} mr^2$              |
| Quader       |  $\frac{m(a^2 + b^2 + c^2)}{12}$ |

### 1.5 Leistung

#### 1.5.1 Rotations Leistung $P_{\text{rot}}$

|                      |                                   |   |
|----------------------|-----------------------------------|---|
| $P = M \cdot \omega$ | $P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$ | $P = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60}$  |
| [ $P_{\text{rot}}$ ] | Rotations Leistung .....          | $W = \frac{J}{s} = \frac{Nm}{s}$              |
| [ $M$ ]              | Drehmoment .....                  | Nm  |
| [ $\omega$ ]         | Winkelgeschwindigkeit .....       | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$                 |
| [ $f$ ]              | Drehfrequenz .....                | $H_z = \frac{1}{s}$                           |
| [ $n$ ]              | Umdrehungen pro Minute .....      | $\frac{1}{\text{min}} = \frac{U}{\text{min}}$ |

#### 1.5.2 Thermische Leistung $P_{\text{th}}$

|   |                                  |   |
|---|----------------------------------|---|
| $P_{\text{th}} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta\vartheta$ | $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$   |   |
| [ $P_{\text{th}}$ ]                                     | Thermische Leistung .....        | $W = \frac{\text{J}}{\text{s}}$             |
| [ $\dot{m}$ ]   | Massenstrom .....                | $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$                |
| [ $c$ ]   | Spezifische Wärmekapazität ..... | $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| [ $\Delta\vartheta$ ]                                   | Temperaturdifferenz .....        | K oder °C                                   |
| [ $\rho$ ]  | Dichte .....                     | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$              |
| [ $\dot{V}$ ]   | Volumenstrom .....               | $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$               |

#### 1.5.3 Transmissions Wärmeverlustleistung $P_{\text{VW}}$

|   |                                  |  |
|---|----------------------------------|--|
| $P_{\text{VW}} = U \cdot A \cdot \Delta\vartheta$ |                                  |  |
| [ $P_{\text{VW}}$ ]                               | Wärmeverlustleistung .....       | $W = \frac{\text{J}}{\text{s}}$              |
| [ $U$ ]   | Wärmedurchgangskoeffizient ..... | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ |
| [ $A$ ]   | Fläche .....                     | $\text{m}^2$                                 |
| [ $\Delta\vartheta$ ]                             | Temperaturdifferenz .....        | K  |

#### 1.5.4 Mechanische Leistung $P_v$

|                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| $P_v = F \cdot v$ | $F = m \cdot g$ |
|-------------------|-----------------|

|                   |                            |                              |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| [P <sub>v</sub> ] | Mechanische Leistung ..... | $W = \frac{J}{s} = Nm/s$     |
| [F]               | Kraft .....                | $N = kg \cdot \frac{m}{s^2}$ |
| [m]               | Masse .....                | $kg$                         |
| [g]               | Erdbeschleunigung .....    | $\frac{m}{s^2}$              |
| [v]               | Geschwindigkeit .....      | $\frac{m}{s}$                |

### 1.5.5 Leistung der Solaranlage $P_{PV}$

$$P_{PV} = \eta \cdot A \cdot E$$

|                    |                              |                 |
|--------------------|------------------------------|-----------------|
| [P <sub>PV</sub> ] | Elektrische Leistung .....   | $W = J/s$       |
| [\eta]             | Wirkungsgrad .....           | -               |
| [A]                | Fläche der Solaranlage ..... | $m^2$           |
| [E]                | Einstrahlung .....           | $\frac{W}{m^2}$ |

### 1.5.6 Leistung eines Wasserkraftwerks $P$

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot h$$

|           |                            |                  |
|-----------|----------------------------|------------------|
| [P]       | Elektrische Leistung ..... | $W = J/s$        |
| [\eta]    | Wirkungsgrad .....         | -                |
| [\rho]    | Dichte .....               | $\frac{kg}{m^3}$ |
| [g]       | Erdbeschleunigung .....    | $\frac{m}{s^2}$  |
| [\dot{V}] | Volumenstrom .....         | $\frac{m^3}{s}$  |
| [h]       | Höhendifferenz .....       | $m$              |

### 1.5.7 Drehstrom Leistungsberechnung $P_{\odot}$

$$P_{\odot} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

|                       |                           |           |
|-----------------------|---------------------------|-----------|
| [P <sub>\odot</sub> ] | Wirkleistung .....        | $W = J/s$ |
| [U]                   | Verkettete Spannung ..... | $V$       |
| [I]                   | Stromstärke .....         | $A$       |
| [\cos(\varphi)]       | Leistungsfaktor .....     | -         |

### 1.6 Schweizer Strom-Mix

|        |                                     |
|--------|-------------------------------------|
| 38.1%  | Kernkraft                           |
| 32.3%  | Speicherkraftwerke                  |
| 24.2%  | Laufkraftwerke                      |
| 5.4%   | konventionell-thermische Kraftwerke |
| 1.52 % | Kehrichtverbrennungsanlagen         |
| 0.29 % | Biomasse                            |
| 0.19 % | Abwasserreinigungsanlagen           |
| 0.13 % | Photovoltaik                        |
| 0.06 % | Windkraft                           |

## 1.7 Investitions- und Kostenrechnung

### 1.7.1 Annuitätsfaktor $A$

$$A = \frac{(1 + i)^n \cdot i}{(1 + i)^n - 1}$$

|     |                             |   |
|-----|-----------------------------|---|
| [A] | Annuitätsfaktor .....       | 1 |
| [i] | Zinsen .....                | 1 |
| [n] | Anzahl Jahre Laufzeit ..... | 1 |

### 1.7.2 Kapitalkosten $K_K$

$$K_K = A \cdot I$$

|                   |                       |            |
|-------------------|-----------------------|------------|
| [K <sub>K</sub> ] | Kapitalkosten .....   | CHF oder € |
| [A]               | Annuitätsfaktor ..... | 1          |
| [I]               | Investitionen .....   | CHF oder € |

### 1.7.3 Unterhaltskosten $K_U$

$$K_U = p_U \cdot I$$

|                   |                                    |            |
|-------------------|------------------------------------|------------|
| [K <sub>U</sub> ] | Unterhaltskosten .....             | CHF oder € |
| [p <sub>U</sub> ] | Unterhaltskosten-Prozentsatz ..... | 1          |
| [I]               | Investitionen .....                | CHF oder € |

### 1.7.4 Fix-Kosten $K_{Fix}$

$$K_{Fix} = K_K + K_U = (A + p_U) \cdot I$$

|                     |                  |            |
|---------------------|------------------|------------|
| [K <sub>Fix</sub> ] | Fix-Kosten ..... | CHF oder € |
|---------------------|------------------|------------|

### 1.7.5 Erlös oder Deckungsbeitrag $E$

$$E = t_{VL} \cdot C \cdot P$$

|                    |                       |   |
|--------------------|-----------------------|---|
| [E]                | Erlös .....           | CHF oder €                                    |
| [t <sub>VL</sub> ] | Volllaststunden ..... | $h$   |
| [C]                | Grenzkosten .....     | $\frac{CHF}{MWh}$ oder $\frac{\epsilon}{MWh}$ |
| [P]                | Leistung .....        | $W = \frac{Nm}{s} = \frac{J}{s}$              |

### 1.7.6 Ergebnis (Gewinn oder Verlust) $G$

$$G = E - K_{Fix} - K_{Var}$$

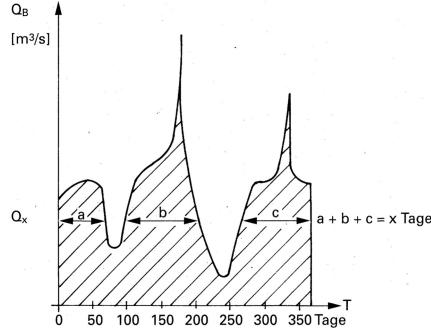
### 1.7.7 Variable Kosten $K_{Var}$

|                     |                       |            |
|---------------------|-----------------------|------------|
| [G]                 | Ergebnis .....        | CHF oder € |
| [E]                 | Erlös .....           | CHF oder € |
| [K <sub>Fix</sub> ] | Fix-Kosten .....      | CHF oder € |
| [K <sub>Var</sub> ] | Variable Kosten ..... | CHF oder € |

## 2 Wasserdargebot für Wasserkraft

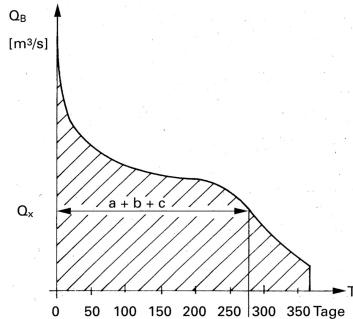
### 2.1 Abflussganglinie

Abfluss  $Q_B$  in  $\frac{m^3}{s}$  während eines Jahres (365 Tage)



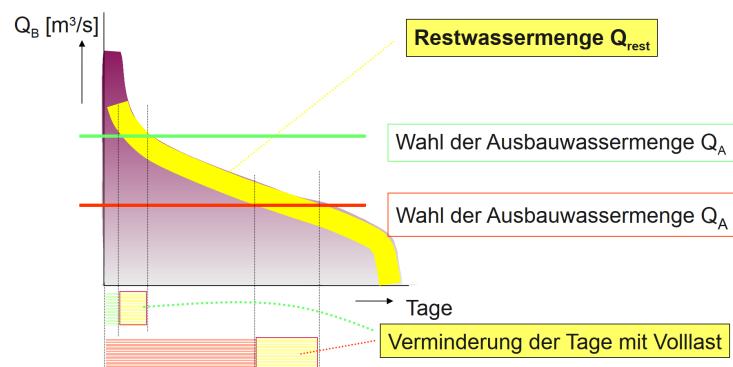
### 2.2 Abflussdauerkurve

Abfluss  $Q_B$  in  $\frac{m^3}{s}$  während eines Jahres (365 Tage), sortiert der Grösse nach



Abfluss ist an 275 Tagen mindestens  $Q_x$

### 2.3 Nutzwassermenge



$$Q_{Nutz} = Q_B - Q_{Rest}$$

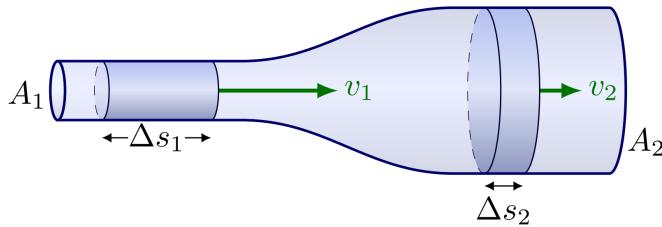
$[Q_{Nutz}]$  Nutzwassermenge .....  $\frac{m^3}{s}$

$[Q_B]$  Abflussmenge .....  $\frac{m^3}{s}$

$[Q_{Rest}]$  Restwassermenge .....  $\frac{m^3}{s}$

### 3 Wasserkraft

#### 3.1 Kontinuitätsgleichung des Durchflusses

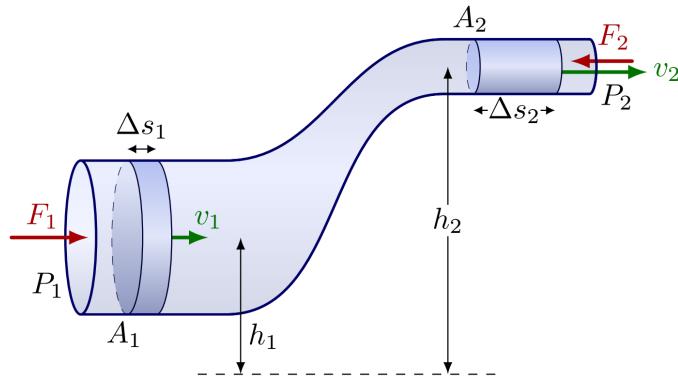


Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Erhaltung des Volumenstroms in einer strömenden Flüssigkeit:

$$Q = A \cdot v \quad Q_1 = Q_2 \quad A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad Q = \dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{const}$$

|              |                                 |                 |
|--------------|---------------------------------|-----------------|
| $[Q_x]$      | Durchflussrate                  | $\frac{m^3}{s}$ |
| $[A_x]$      | Querschnittsfläche              | $m^2$           |
| $[v_x]$      | Fliessgeschwindigkeit           | $\frac{m}{s}$   |
| $[\dot{V}]$  | Volumenstrom (Volumen pro Zeit) | $\frac{m^3}{s}$ |
| $[\Delta V]$ | Volumenänderung                 | $m^3$           |
| $[\Delta t]$ | Zeitänderung                    | s               |

#### 3.2 Bernoulli-Druck-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke



$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z + p = \text{constant}$$

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$$

|                          |                                    |                 |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------|
| $[\frac{1}{2} \rho v^2]$ | Kinetische Energie (je Kubikmeter) | $\frac{J}{m^3}$ |
| $[\rho g z]$             | Potentielle Energie                | $\frac{J}{m^3}$ |
| $[p]$                    | Druckenergie                       | $\frac{J}{m^3}$ |
| $A$                      | $B$                                | $C$             |

#### 3.3 Bernoulli-Höhen-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke

$$H = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + \sum H_v$$

|                      |                                 |                      |
|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| $[H]$                | Bruttogefälle                   | m                    |
| $[z]$                | Höhenlage (potenzielle Energie) | m                    |
| $[p]$                | Druck                           | $Pa = \frac{N}{m^2}$ |
| $[\rho]$             | Dichte des Wassers              | $\frac{kg}{m^3}$     |
| $[g]$                | Erdbeschleunigung               | $\frac{m}{s^2}$      |
| $[v]$                | Geschwindigkeit                 | $\frac{m}{s}$        |
| $[\frac{p}{\rho g}]$ | Druckhöhe                       | m                    |
| $\frac{v^2}{2g}$     | Geschwindigkeitshöhe            | m                    |
| $[\sum H_v]$         | Hydraulische Energieverluste    | m                    |

#### 3.4 Örtliche Energieverluste

$$h_v = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}$$

|           |                                |                 |
|-----------|--------------------------------|-----------------|
| $[h_v]$   | Örtliche Energieverlusthöhe    | m               |
| $[\zeta]$ | Verlustbeiwert (dimensionslos) | -               |
| $[v]$     | Geschwindigkeit                | $\frac{m}{s}$   |
| $[g]$     | Erdbeschleunigung              | $\frac{m}{s^2}$ |

### 3.5 Reibungsverluste

$$H_{vr} = \frac{v^2 \cdot L}{K^2 \cdot R_h^{4/3}}$$

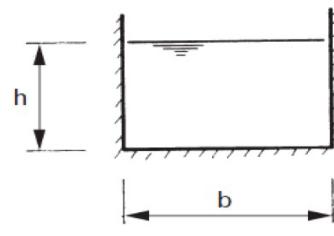
|            |                                   |               |
|------------|-----------------------------------|---------------|
| $[H_{vr}]$ | Reibungsverlusthöhe               | m             |
| $[v]$      | Strömungsgeschwindigkeit          | $\frac{m}{s}$ |
| $[L]$      | Länge der Strömungsstrecke        | m             |
| $[K]$      | Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler | $m^{1/3}/s$   |
| $[R_h]$    | Hydraulischer Radius              | m             |

#### 3.5.1 Tabelle Rauhigkeitsbeiwert K

| Material | Zustand                                   | $K [m^{1/3}/s]$ |
|----------|---|-----------------|
| Stahl    | neu                                       | 75              |
| Stahl    | schlechter Zustand, verrostet, verkrustet | 60              |
| Beton    | glatt                                     | 85              |
| Beton    | rauh                                      | 60              |
| PE, PVC  |   | 100             |

#### 3.5.2 Hydraulischer Radius

##### Rechteckqueerschnitt



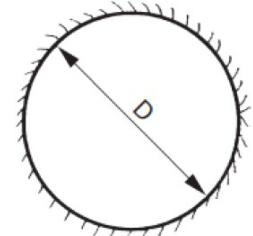
$$F = b \cdot h$$

$$P = b + 2 \cdot h$$

$$R_h = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h}$$

$$R_h = \frac{F}{P}$$

##### Kreisqueerschnitt



$$F = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$$

$$P = D \cdot \pi$$

$$R_h = \frac{D}{4}$$

$$R_h = \frac{F}{P}$$

$$[F] \quad \text{Abflussquerschnittsfläche} \quad m^2$$

$$[P] \quad \text{Benetzter Umfang} \quad m$$

$$[R_h] \quad \text{Hydraulischer Radius} \quad m$$

#### 3.6 Verlusthöhe durch Reibung

$$h_{v,r} = \lambda \cdot \frac{L}{d_{hy}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad h_{v,r} = \lambda \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d_i^4} \quad h_{v,r} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d_i^5}$$

$$[h_{v,r}] \quad \text{Verlusthöhe durch Reibung} \quad m$$

$$[L] \quad \text{Länge} \quad m$$

$$[v_m] \quad \text{Mittlere Geschwindigkeit} \quad \frac{m}{s}$$

$$[Q] \quad \text{Durchfluss} \quad \frac{m^3}{s}$$

$$[d_i] \quad \text{Innendurchmesser} \quad m$$

$$[d_{hy}] \quad \text{Hydraulischer Durchmesser} \quad m$$

$$[l_u] \quad \text{Benetzter Umfang} \quad m$$

$$[\lambda] \quad \text{Verlustbeiwert} \quad -$$

Zusammenhang des hydraulischen Durchmessers:

$$d_{hy} = d_{\text{Kreisrohr}} = d_i = 4R_{hy} = 4 \left( \frac{A}{l_u} \right)$$

#### 3.7 Reynolds-Zahl Re

Die Reynolds-Zahl Re beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Zähigkeitskräften in einer Strömung und wird wie folgt berechnet:

$$Re = \frac{v_m \cdot d_{hy}}{\nu}$$

Bemerkung:  $d_{hy} = d_{\text{Kreisrohr}} = d_i$

$$[Re] \quad \text{Reynolds-Zahl (dimensionslos)} \quad -$$

$$[v_m] \quad \text{Mittlere Strömungsgeschwindigkeit} \quad \frac{m}{s}$$

$$[d_{hy}] \quad \text{Hydraulischer Durchmesser} \quad m$$

$$[d_i] \quad \text{Innendurchmesser (für Kreisrohr gleich } d_{hy}) \quad m$$

$$[\nu] \quad \text{Kinematische Viskosität} \quad \frac{m^2}{s}$$

## 4 Wasserkraftwerk-Typen

### 4.1 Klassifizierung

- Laufwasserkraftwerke
- Mitteldruckanlagen
- Hochdruck- (Speicher-) Anlagen
- Pumpspeicherkraftwerke
- Gezeitenkraftwerke
- Wellenkraftwerke
- Wasserwirbelkraftwerke

### 4.2 Einteilung nach technischen Aspekten

- **Laufwasserkraftwerke**
  - Flusskraftwerke
    - \* Blockbauweise
    - \* Buchtenkraftwerke
    - \* Zwillingsbauweise (beidseitige Anordnung)
    - \* ...
  - Ausleitungskraftwerke
- **Speicherkraftwerke** mit natürlichem Zufluss
- **Pumpspeicherkraftwerke** (Speicherkraftwerke mit oder ohne natürlichem Zufluss)
- Gezeitenkraftwerke
- Wellenkraftwerke

### 4.3 Einteilung nach energiewirtschaftlichen Aspekten

- Grundlastkraftwerke (häufig verwendet, Laufwasser, Speicher mit vielen Vollaststunden)
- Mittellastkraftwerke
- Spitzenlastkraftwerke (Speicher mit wenig Vollaststunden)

### 4.4 Einteilung nach Betriebsart

- Verbundbetrieb (im Normalbetrieb alle Kraftwerke in der Schweiz)
- Inselbetrieb (Unabhängig vom Netz)

### 4.5 Einteilung nach der installierten Leistung

- Kleinwasserkraftwerke (in der Regel kleiner 10 MW)
- Grosswasserkraftwerke ( $P > 10 \text{ MW}$ )

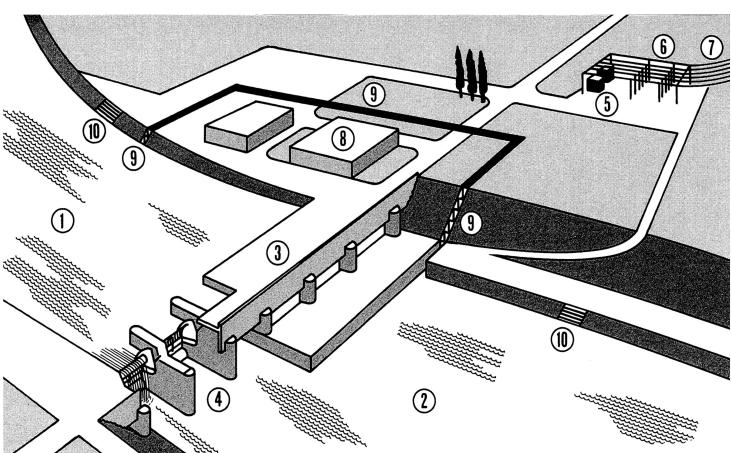
### 4.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten

- Wasserkraftwerke, die ausschliesslich elektrische Energie produzieren
- Wasserkraftanlagen für mehrere wasserwirtschaftliche Zielsetzungen (Mehrzweckanlagen, z. B. Trinkwasser)

### 4.7 Wasserturbinen und Pumpen

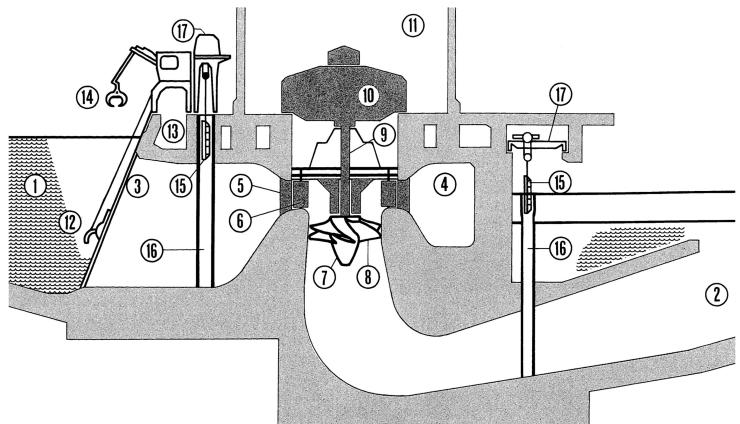
- **Aktionsturbinen:** Arbeit aus kinetischer Energie-Differenz
  - Pelztonturbinen
- **Reaktionsturbinen:** Arbeit aus Druckdifferenz vor und nach Turbine
  - Francisturbinen (spiralförmig)
  - Kaplanturbinen (propellerförmig)
  - Rohrturbinen
  - Kreiselpumpen als Turbinen

### 4.8 Laufwasserkraftwerke LWK



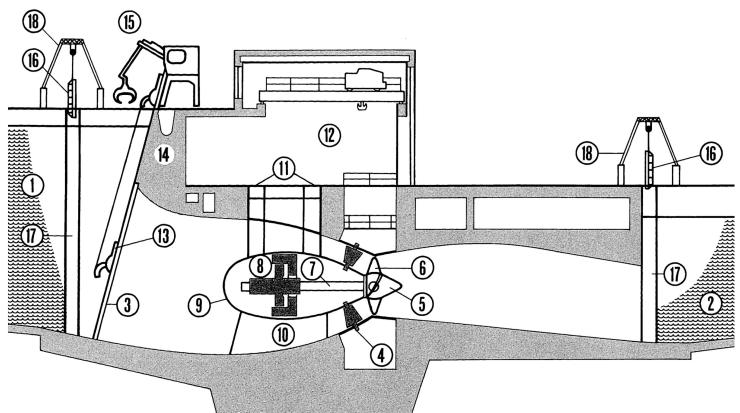
- |   |                 |    |                                      |
|---|-----------------|----|--------------------------------------|
| 1 | Oberwasser      | 6  | Schaltanlage                         |
| 2 | Unterwasser     | 7  | Leitungen                            |
| 3 | Maschinenhaus   | 8  | Betriebsgebäude                      |
| 4 | Stauwehr        | 9  | Fischtreppen                         |
| 5 | Transformatoren | 10 | Einrichtung für den Schiffstransport |

## 4.9 LWK mit Kaplanturbinen Vertikal



- |   |                  |    |                          |
|---|------------------|----|--------------------------|
| 1 | Oberwasser       | 10 | Generator                |
| 2 | Unterwasser      | 11 | Maschinenhaus            |
| 3 | Rechen           | 12 | Rechenreinigungsmaschine |
| 4 | Spirale          | 13 | Geschwemmselrinne        |
| 5 | Stützschaufeln   | 14 | Zangengreifer            |
| 6 | Leitschaufeln    | 15 | Dammbalken               |
| 7 | Laufrad          | 16 | Nuten für Dammbalken     |
| 8 | Laufradschaufeln | 17 | Dammbalkenkran           |
| 9 | Saugrohr         |    |                          |

## 4.10 LWK mit Kaplanturbinen Horizontal



- |   |                  |    |                          |
|---|------------------|----|--------------------------|
| 1 | Oberwasser       | 10 | Sockel                   |
| 2 | Unterwasser      | 11 | Einstiegsschächte        |
| 3 | Rechen           | 12 | Maschinenhalle           |
| 4 | Leitschaufeln    | 13 | Rechenreinigungsmaschine |
| 5 | Laufrad          | 14 | Geschwemmselrinne        |
| 6 | Laufradschaufeln | 15 | Zangengreifer            |
| 7 | Turbinenwelle    | 16 | Dammbalken               |
| 8 | Generator        | 17 | Nuten für die Dammbalken |
| 9 | Gehäuse          | 18 | Dammbalkenkran           |

## 5 Turbinen Kenngrößen

### 5.1 Nettofallhöhe und Durchfluss

### 5.2 Hydraulische Leistung

$$P_{\text{hyd}} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n$$

|                    |  |                  |
|--------------------|--|------------------|
| $[P_{\text{hyd}}]$ | Hydraulische Leistung .....                | $W$              |
| $[Q]$              | Nutzwassermenge .....                      | $m^3/s$          |
| $[H_n]$            | Nettofallhöhe .....                        | $m$              |
| $[\rho]$           | Dichte des Wassers ( $\rho = 1000$ ) ..... | $\frac{kg}{m^3}$ |
| $[g]$              | Erdbeschleunigung ( $g = 9.81$ ) .....     | $\frac{m}{s^2}$  |

### 5.3 Mechanische Leistung an der Turbinenwelle

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M$$

|                     |                             |                 |
|---------------------|-----------------------------|-----------------|
| $[P_{\text{mech}}]$ | Mechanische Leistung .....  | $W$             |
| $[\omega]$          | Winkelgeschwindigkeit ..... | $\frac{rad}{s}$ |
| $[M]$               | Drehmoment .....            | $Nm$            |

### 5.4 Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

|            |                             |                 |
|------------|-----------------------------|-----------------|
| $[\omega]$ | Winkelgeschwindigkeit ..... | $\frac{rad}{s}$ |
| $[n]$      | Drehzahl .....              | $\frac{1}{s}$   |

### 5.5 Betriebszustände der Maschinengruppe

(Maschinengruppe = Turbine/Pumpe + Generator/Motor)

- Inselbetrieb
- Parallelbetrieb, Verbundbetrieb
- Instationäre Vorgänge
  - Anfahren und Abstellen
  - Lastabwurf  $\Rightarrow$  Überdrehzahl

**Durchgangsdrehzahl**  $n_D$  (auch Schleuderdrehzahl genannt)  $\Rightarrow$  höchste erreichbare Drehzahl ohne Last (z.B. bei Versagen des Generators)

Die Durchgangsdrehzahl ist eine Bemessungsgröße. Die Maschinengruppe darf bei der Durchgangsdrehzahl keinen Schaden erleiden.

## 6 Atomkraftwerk

### 6.0.1 Merkmale Nukleare Dampferzeugung

- Leistungsfähige Energiequelle
- CO<sub>2</sub> - freie Produktion elektrischer Energie
- Aufwändige Technologie
- Sicherheit
- Tiefenlager radioaktiver Stoffe
- Diskussion in Politik, Gesellschaft, Ethik

### 6.0.2 Kernprozesse für die Energiegewinnung

- Künstliche Kernspaltung schwerer Kerne (Fission)
  - $\Rightarrow$  Kernkraftwerke 3. Generation
  - (Stand der Technik)
- Umwandlung von schweren Kernen in gut spaltbare Kerne im Brutprozess (Konversion)
  - $\Rightarrow$  Kernkraftwerke 4. Generation
  - (in Entwicklung)
- Verschmelzung leichter Kerne zu einem Kern (Fusion)
  - $\Rightarrow$  Grundlagenforschung in Bearbeitung

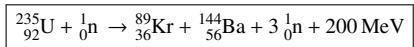
### 6.1 Kernphysikalische Grundlagen

$$A = Z + N \quad \text{Nuklid-Schreibweise: } \begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} \text{Element} \quad \text{z. B. } \begin{matrix} 235 \\ 92 \end{matrix} \text{U}$$

|       |   |   |
|-------|---|---|
| $[A]$ | Anzahl Kerneteilchen eines Atoms .....  | - |
| $[Z]$ | Anzahl Protonen (Kernladungszahl) ..... | - |
| $[N]$ | Anzahl Neutronen .....                  | - |

### 6.2 Spaltung schwerer Kerne

- Spaltung schwerer Kerne
- Einige Isotope besitzen die Eigenschaft, dass sie beim Beschießen mit langsamem Neutronen diese im Kern absorbieren und in zwei Tochterkerne zerfallen, wobei gleichzeitig 2-3 Neutronen frei werden.



- Bindungsenergie wird dabei frei.

Im Mittel sind dies:  $200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Ws pro Spaltung}$

- Die „schnellen“ Neutronen müssen abgebremst werden ( $\Rightarrow$  thermische Neutronen), so dass der Prozess nicht abbricht.

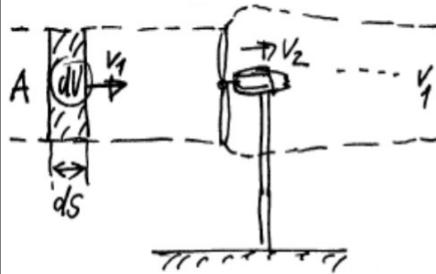
Dies geschieht mit einem Moderator wie „leichtes“ Wasser oder Graphit.

- Werden genügend thermische Neutronen zur Verfügung gestellt, hält sich durch eine Kettenreaktion der Spaltungsprozess selbst aufrecht.

To be continued ...

## 7 Windenergie

### 7.1 Windeleistung



$$\frac{1}{2} > 0$$

$$P_{\text{max}} = \frac{dW}{dt} = \frac{A \cdot \rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v_1^3 \quad P_W = c_P \cdot \frac{A \cdot \rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot v_1^3$$

Achtung!  $v_1$  ist hoch 3!

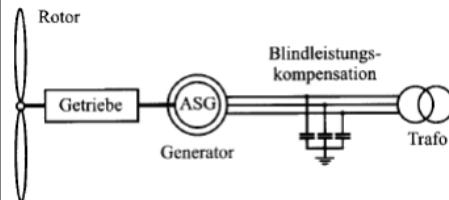
|                        |   |                  |
|------------------------|---|------------------|
| $[P_{\text{max}}]$     | Theoretische Windleistung .....                               | $W$              |
| $[P_W]$                | Effektiv nutzbare praktische Windleistung .....               | $W$              |
| $[c_P]$                | Leistungsbeiwert, $c_P = 0.4 \dots 0.5$ .....                 | -                |
| $[A]$                  | Rotorfläche (projizierte Fläche senkrecht zur Strömung) ..... | $m^2$            |
| $[\rho_{\text{Luft}}]$ | Dichte Luft, $\approx 1,29 \frac{kg}{m^3}$ .....              | $\frac{kg}{m^3}$ |
| $[v_1]$                | Anströmgeschwindigkeit des Windes .....                       | $\frac{m}{s}$    |

### 8 Windenergiekonverter (WEK)

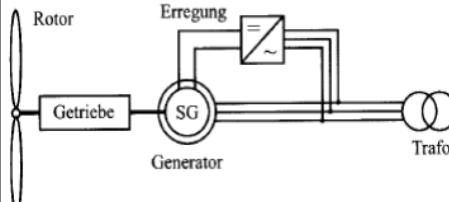
#### 8.1 Netzkopplung

DU = Direktumrichter, ZKU = Zwischenkreis-Umrichter

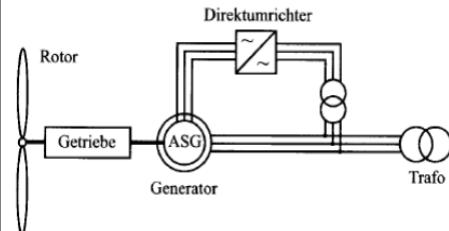
##### 8.1.1 Direkte Netzkopplung mit ASM



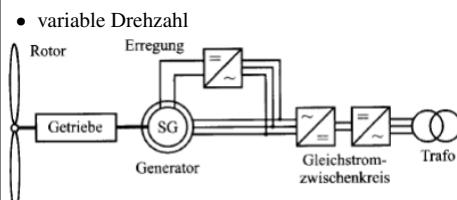
##### 8.1.2 Direkte Netzkopplung mit SM



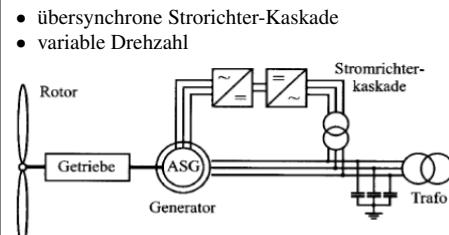
##### 8.1.3 Direkte Netzkopplung mit ASM und DU im Läufer



##### 8.1.4 Direkte Netzkopplung mit SM über Gleichstromzwischenkreis

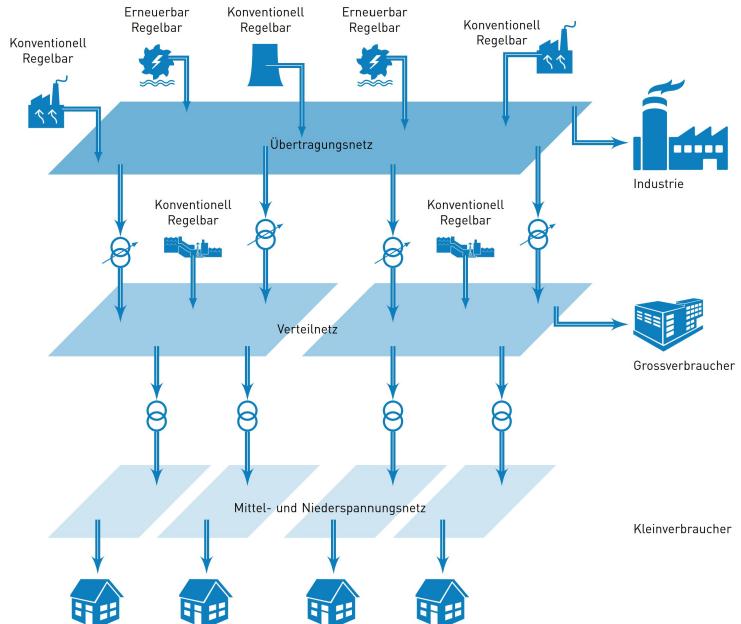


##### 8.1.5 Direkte Netzkopplung mit ASM und ZKU im Läufer

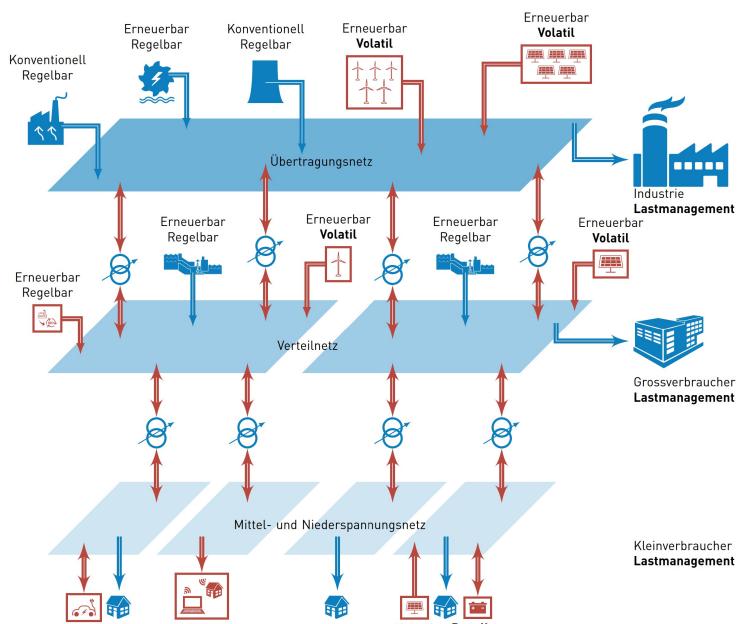


## 9 Netze Allgemein

### 9.0.1 Stromnetz früher



### 9.0.2 Stromnetz heute



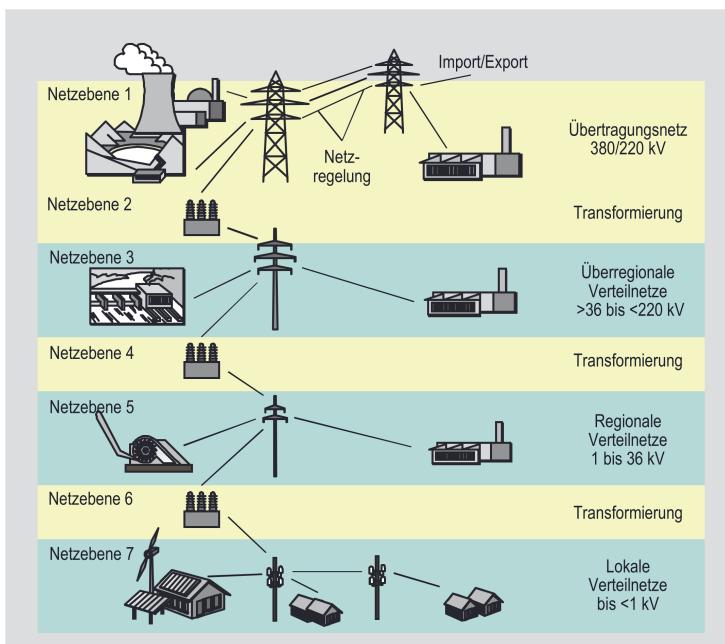
### 9.1 Interessen der Erzeuger

- Erzeuger**
  - Freier Netzzugang
  - Hohe Verfügbarkeit: produzierte Leistung kann jederzeit abgeführt werden
  - Geringe Kosten
- Verbraucher**
  - Netzanschluss
  - Hohe Versorgungssicherheit und -qualität
  - Geringe Kosten

### 9.2 Anforderungen an das Stromnetz

- Hohe Verfügbarkeit
- Hohe Versorgungsqualität
- Sicherheit
- Wirtschaftlichkeit
- Diskriminierungsfreiheit
- Transparenz

## 10 Netzebenen

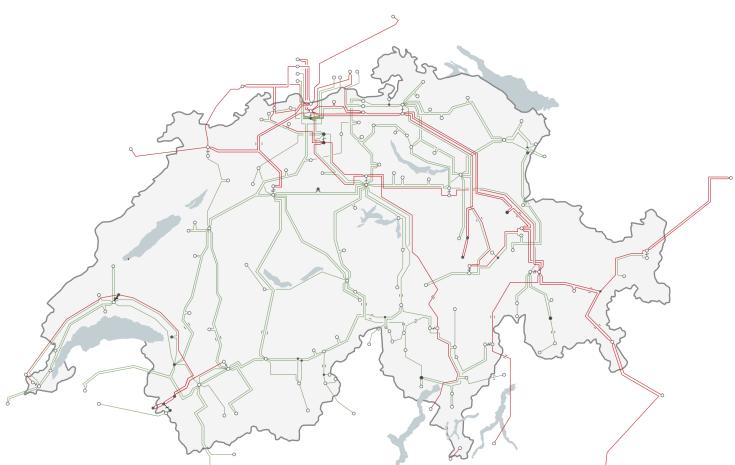


| Spannungsebene        | Spannungsbereich | Leistung  |
|-----------------------|------------------|-----------|
| <b>Höchstspannung</b> | 380 kV, 220 kV   | > 300 MVA |
| <b>Hochspannung</b>   | 150 kV bis 50 kV | < 100 MVA |
| <b>Mittelspannung</b> | 36 kV bis 6 kV   | < 30 MVA  |
| <b>Niederspannung</b> | 0,4 kV           | < 1 MVA   |

### 10.1 NE1: Übertragungsnetz

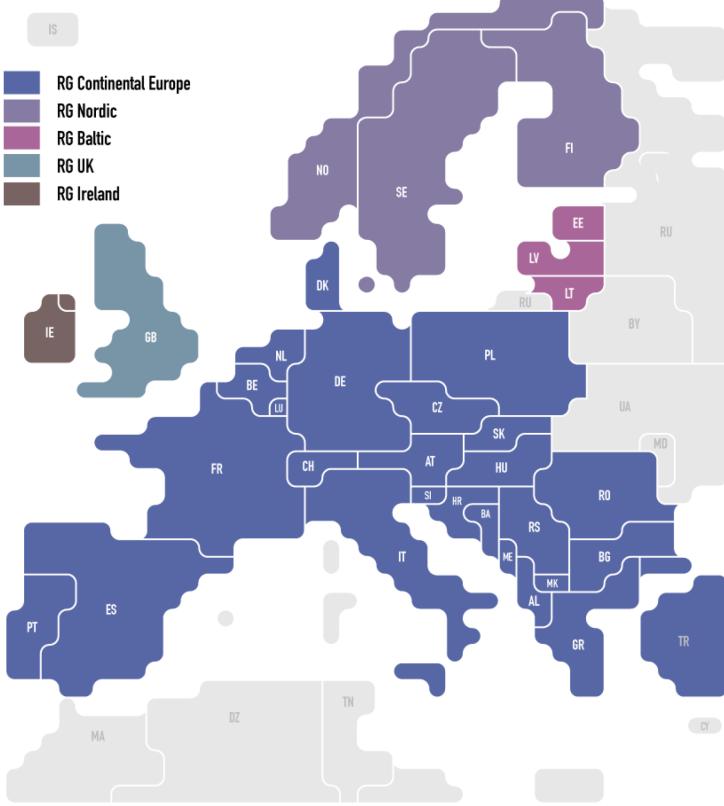
- 380 kV und 220 kV
- Zweck
  - Abtransport der großen Kraftwerksleistungen (typ. > 300 MVA)
  - Versorgung der Verteilnetze
  - Weiträumiger Energietransport
  - Internationaler Verbundbetrieb, Energieaustausch
- Ausdehnung: national, international
- Topologie: (stark) vermaschtes Netz
- Technologie: fast ausschließlich Freileitungen

#### 10.1.1 Schweizer Stromübertragungsnetz (Daten 2014)



- Gesamtlänge Übertragungsnetz Inland: 6700 km
  - Länge 380 kV: 1780 km
  - Länge 220 kV: 4920 km
- Gesamtzahl Leitungen im Übertragungsnetz: 246
  - Leitungen 380 kV: 48
  - Leitungen 220 kV: 198
- Anzahl Netzübergänge in das Ausland: 41

## 10.1.2 Entso-E



- koordinierter Systembetrieb
- koordinierte Marktlösungen
- koordinierte Systementwicklung

## 10.2 NE3: Überregionales Verteilnetz

- 150 kV, 132 kV, 60 kV
- Zweck
  - Abtransport mittlerer Kraftwerksleistungen (typ. 100 MVA)
  - Anschluss großer Industriekunden
  - Überregionale Verteilung
- Ausdehnung: mehrere Kantone
- Topologie: (leicht) vermaschtes Netz oder Ringnetz
- Technologie: vorwiegend Freileitungen

## 10.3 NE5: Verteilnetz

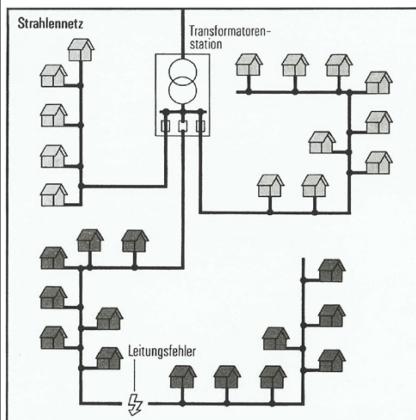
- 20 kV, 10 kV
- Zweck
  - Abtransport kleiner Kraftwerksleistungen (< 30 MVA)
  - Anschluss von Industrie- und Gewerbe Kunden
  - Regionale Verteilung
- Ausdehnung: Kanton, Tal
- Topologie: Ringnetz, Strahlennetz
- Technologie: Freileitungen und Kabel

## 10.4 NE7: Verteilnetz

- 400 V
- Zweck
  - Abtransport kleinsten Einspeisungen (kVA)
  - Feinverteilung zum Endverbraucher
  - Anschluss von Haushaltskunden
- Ausdehnung: typ. Gemeinde
- Topologie: offener Ring, Strahlennetz
- Technologie: Freileitungen und Kabel

## 11 Netztopologien

### 11.1 Strahlennetz



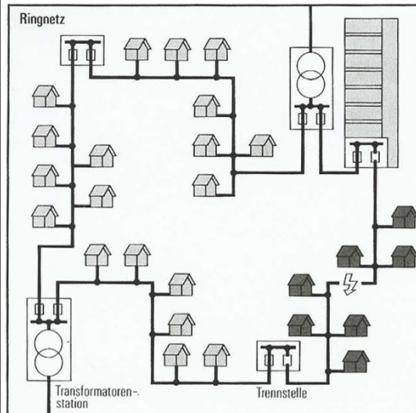
#### Pro:

- geringer Planungsaufwand
- große Übersichtlichkeit bei der Fehlersuche
- geringe Anforderungen an den Netzschatz

#### Contra:

- größer werdende Spannungsabfälle mit zunehmendem Abstand von der Einspeisung
- höhere Leistungsverluste mit zunehmendem Abstand von der Einspeisung

### 11.2 Ringnetz



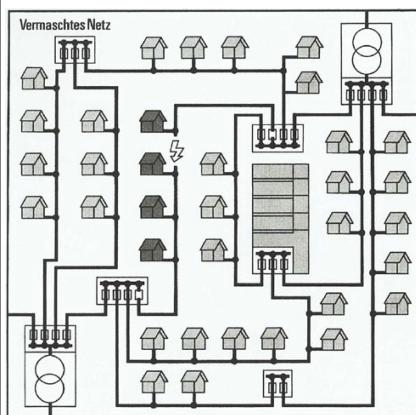
#### Pro:

- höhere Versorgungssicherheit
- geringere Verluste
- verbesserte Spannungshaltung

#### Contra:

- höhere Anspruch an die Qualifikation des Wartungspersonals

### 11.3 Maschennetz



#### Pro:

- eine optimale Versorgungszuverlässigkeit
- optimale Spannungshaltung
- minimale Leistungsverluste

#### Contra:

- hohe Investitionskosten
- hohe Projekts- und Wartungsaufwand
- höhere Kurzschlussströme

## 12 Leitungen

### Aufgabe:

- Energieübertragung und -verteilung

## Wichtigsten Leitungsarten:

- Freileitung
- Kabelleitung
- **Freileitungen** in praktisch allen Spannungsebenen von der Niederspannung bis zur Höchstspannung.
- **Kabelleitungen** mehr in den unteren Spannungsebenen.

## 12.1 Freileitungen

### • Material:

- Al-Seile (99,5% Al), Aldrey-Seile (> 98,5% Al, Mg, Si, Fe) und Al-Stahl-Seile (Verhältnis Alu:Stahl typ. 6:1, z. B. 240/40 mm<sup>2</sup>), Kupfer ist bei neuen Leitungen immer seltener
- Aluminium-Drähten ⇒ eine gute elektrische Leitfähigkeit
- Stahlkern ⇒ mechanische Festigkeit
- Aluminium hat gegenüber Kupfer einen deutlichen Preisvorteil
- Ab 220 kV ⇒ Bündelleiter ⇒ Sie führen also zur **Verminderung des Wellenwiderstandes** und damit zur **Erhöhung der übertragbaren Leistung**.
- **Hochtemperaturleiter:**
  - normale Leiterseile  $T_{max} = 80^{\circ}\text{C}$
  - Hochtemperaturseile  $T_{max} = 210^{\circ}\text{C}$
  - Steigerung der Übertragungskapazität um bis zu 50 Prozent

## 12.2 Masten

### Funktionen:

- **Tragmast:** Tragwerke für die Aufhängung der Leiter einer Freileitung
- **Abspannmasten:** An Winkelpunkten nehmen sie die Zugkräfte der Leiterseile auf.
- **Verdrillmast:** alle Außenleiter eines Stromkreises auf dem Mast tauschen ihre Plätze (verbessertes Übertragungsverhalten).

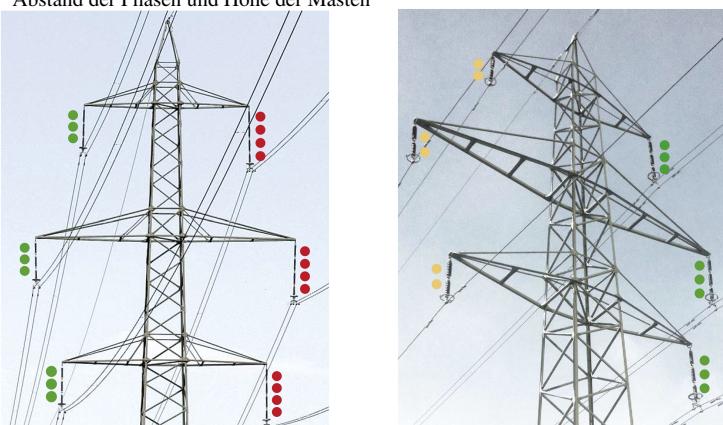
### Materialien:

- Stahl-Gittermast
- Betonmast
- Stahlrohrmast
- Holzmast

## 12.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen

### Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale:

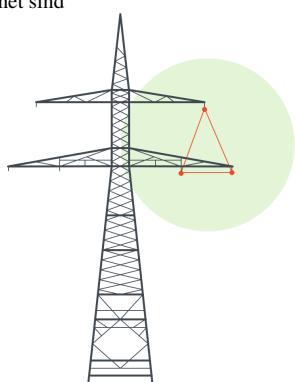
- Anzahl Phasen
- Länge der Isolatorenketten (Je höher die Spannung, umso länger sind die Isolatorenketten)
- Abstand der Phasen und Höhe der Masten



## 12.4 Mastenformen

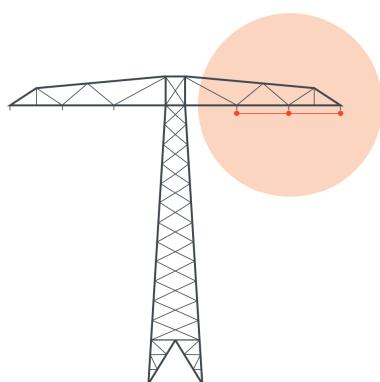
### 12.4.1 Donaumast

Zwei Drehstromkreise bei denen die Leiter jeweils im Dreieck angeordnet sind



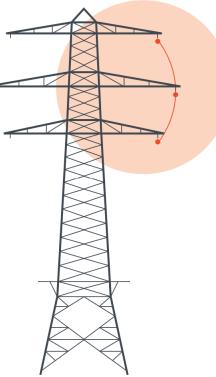
### 12.4.2 Einebenenmast

Niedrige Bauhöhe und eine größere Trassenbreite



## 12.4.3 Tonnenmast

Eine geringe Trassenbreite, sind aber höher als vergleichbare Donaumasten



## 12.5 Freileitungen: Vor- und Nachteile

### Pro:

- günstige Investitionskosten
- bessere Zugänglichkeit bei Reparaturen ⇒ kürzere Wiederinbetriebnahmezeiten

### Contra:

- atmosphärischen Einwirkungen ausgesetzt
- Akzeptanzprobleme

## 13 Kabelleitungen

### 13.0.1 Material

- |                      |   |
|----------------------|---|
| <b>Leiter:</b>       | Kupfer oder Aluminium   |
| <b>Isolierung:</b>   | öl-imprägnierte Papier oder Kunststoffe wie Polyäthylen (PE), vernetztes Polyäthylen (VPE) sowie Polyvinylchlorid (PVC) |
| <b>Schutzmantel:</b> | Metall  |

## 13.1 Aufbau Allgemein

## 13.2 Aufbau

### Gürtelkabel:

Nichtradiales elektrisches Feld, Verwendung im Nieder- und Mittelspannungsbereich

### Dreimantel-Kabel:

Radiales elektrisches Feld, Verwendung im Nieder- und Mittelspannungsbereich

### Einleiterkabel:

Radiales elektrisches Feld, Verwendung im oberen Mittelspannungs- und im Hochspannungsbereich

### 13.2.1 Kabel: Vor- und Nachteile

### Pro:

- geschützt vor atmosphärischen Einwirkungen ⇒ kleinere Ausfallsrate
- bessere Akzeptanz

### Contra:

- schwierigere Zugänglichkeit bei Reparaturen ⇒ längere Wiederinbetriebnahmezeiten
- im Hochspannungsbereich teurer (wirtschaftlich nur für kurze Strecken)

## 13.3 Erdverkabelung in der Schweiz

### Erdverkabelung pro Netzebene in der Schweiz

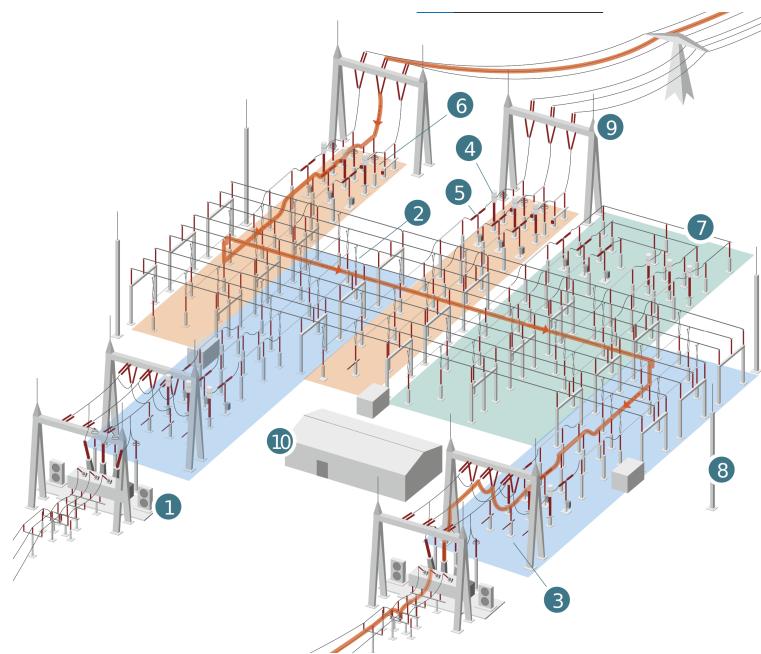
|             |           |
|-------------|-----------|
| Netzebene 1 | 8 km      |
| Netzebene 3 | 1'893 km  |
| Netzebene 5 | 30'607 km |
| Netzebene 7 | 72'852 km |

## 14 Schaltanlagen / Umspannwerke

### 14.1 Aufgabe

- Stromfluss herstellen oder unterbrechen
- Betriebsmittel unter Spannung setzen oder spannungslos schalten
- Topologie ändern
- Strom- und Spannungsmessung

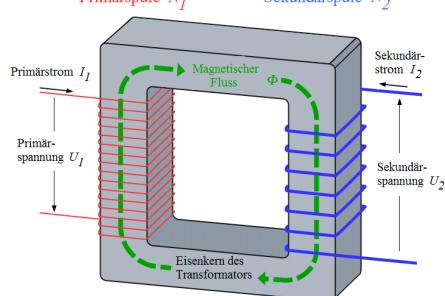
### 14.2 Aufbau



1. Transformatoren
2. Trennschalter
3. Erdungsschalter
4. Strom- und Spannungswandler
5. Leistungsschalter
6. Überspannungsableiter
7. Sammelschiene
8. Blitzschutzmast
9. Portal
10. Relais- und Betriebsgebäude

### 14.3 Transformator

- Veränderung der Spannung
  - Öl zur Isolation und zum Wärmeabtransport
- Primärspule  $N_1$       Sekundärspule  $N_2$



### 14.4 Leistungsschalter



- Schaltet Strom
- Ein- und Ausschalten von Leitungen und Anlagenteile
- Schaltet im Normalbetrieb und im Fehlerfall (Kurzschlussstromunterbrechung)

### 14.5 Lastschalter

- Schaltet Strom
- Kann bis zu ca. 2-fachem Laststrom unterbrechen

## 14.6 Trennschalter



- Leitungs- oder Sammelschienentrennschalter
- öffnen eines Stromkreises (Trennung einer Anlage von den restlichen Anlagen)
- Die Trennschalter schalten **keinen Strom**.

### 14.7 Sonstiges

#### 14.7.1 Messwandler

Messung der Spannung und Strom für Erkennung des Betriebszustandes



#### 14.7.2 Überspannungsableiter

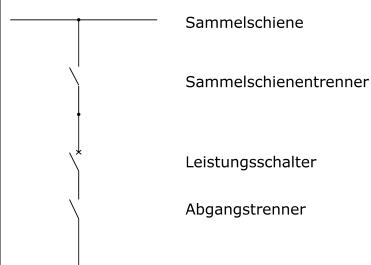
Spannungsabhängiger Widerstand. Bei hoher Spannung verringert sich Widerstand schlagartig



### 14.8 Schalfelder Aufbau

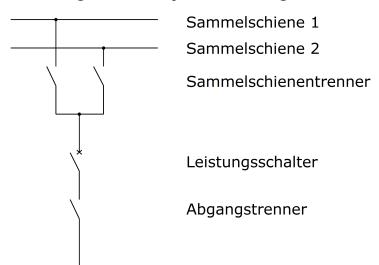
#### 14.8.1 Einfachsammelschiene

- übersichtliche und billige Lösung



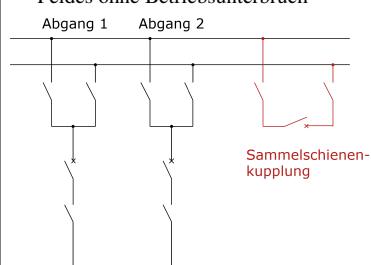
#### 14.8.2 Doppelsammelschiene

- ein Sammelschienenwechsel eines beliebigen Feldes jederzeit möglich



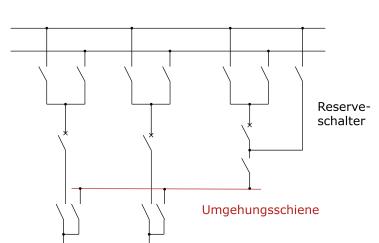
#### 14.8.3 Sammelschienenkupplung

- Ermöglicht die Parallelschaltung der beiden Sammelschienensysteme und damit den Sammelschienenwechsel des Feldes ohne Betriebsunterbruch



#### 14.8.4 Umgehungsschiene

- Bei dieser Schaltung ersetzt Reserveschalter den Kuppelschalter beim Sammelschienenwechsel



### 14.9 Regeln beim Schalten (Reihenfolge)

#### 14.9.1 Ausschalten

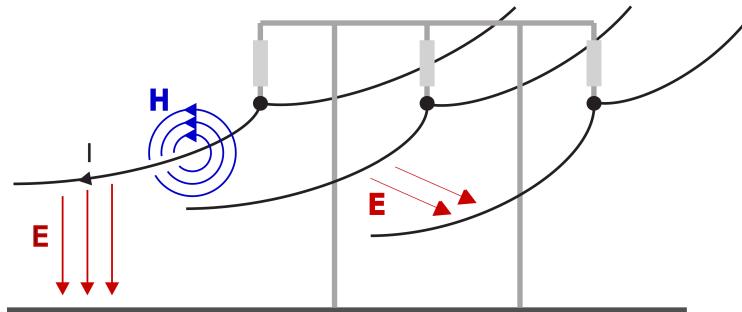
Beim Ausschalten werden Leistungsschalter zuerst geöffnet, dann Last- und Trennschalter

#### 14.9.2 Einschalten

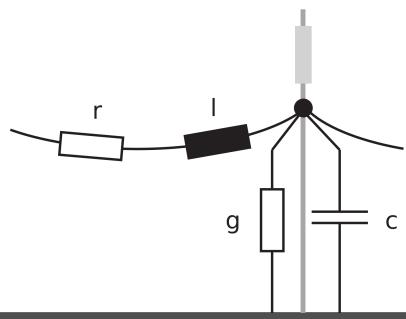
Beim Einschalten müssen zuerst Trennschalter, dann Lastschalter und zuletzt Leistungsschalter geschlossen werden

## 15 Leitungsbeläge

### 15.1 Elektrisches und magnetisches Feld



#### 15.1.1 Ersatzschaltbild



## 15.2 Widerstandsbelag

### 15.2.1 Ursache

- Ohmscher Widerstand des Leiterseils
- Bei Wechselstrom  $\Rightarrow$  Berücksichtigung der **Stromverdrängung** (*skin-effect*)

### 15.2.2 Temperaturabhängigkeit des Widerstands

Der spezifische Widerstand  $\rho$  ist temperaturabhängig und ergibt sich aus:

$$\rho = \rho_{20^\circ} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20^\circ)]$$

|                       |  |   |
|-----------------------|--|---|
| [ $\rho$ ]            | Spezifischer Widerstand .....                        | $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ |
| [ $\rho_{20^\circ}$ ] | Spezifischer Widerstand bei $20^\circ\text{C}$ ..... | $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ |
| [ $\alpha$ ]          | Temperaturkoeffizient .....                          | $\frac{1}{^\circ\text{C}}$                  |
| [ $T$ ]               | Temperatur .....                                     | $^\circ\text{C}$                            |

### 15.2.3 Ohmscher Widerstand des Leiterseils

Der spezifische Widerstand  $R'$  eines Leiterseils in  $\frac{\Omega}{\text{m}}$  ergibt sich zu:

$$R' = \sigma \cdot \frac{\rho}{A}$$

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| [ $R'$ ]     | Ohmscher Widerstand pro Meter .....           | $\Omega/\text{m}$                           |
| [ $\sigma$ ] | Vorseifaktor (typisch $\sigma = 1,07$ ) ..... | -   |
| [ $\rho$ ]   | Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand) ..... | $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ |
| [ $A$ ]      | Leiterquerschnitt .....                       | $\text{mm}^2$                               |

## 15.3 Skin-Effekt

Die Eindringtiefe  $\delta$  des elektrischen Feldes in einen Leiter ergibt sich zu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad \delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}}$$

|              |   |                               |
|--------------|---|-------------------------------|
| [ $\delta$ ] | Eindringtiefe des Stroms (Skin-Tiefe) .....       | m                             |
| [ $\rho$ ]   | Spezifischer Widerstand des Leitermaterials ..... | $\Omega \cdot \text{m}$       |
| [ $\omega$ ] | Kreisfrequenz .....                               | $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ |
| [ $\mu$ ]    | Permeabilität des Leitermaterials .....           | $\frac{\text{H}}{\text{m}}$   |

#### Hinweis:

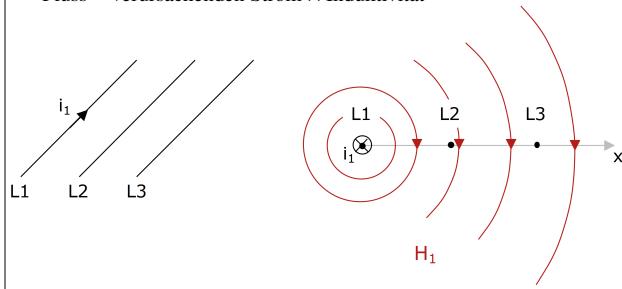
Bei **Bündelleitern** wird der Skin-Effekt durch die Aufspaltung des Querschnitts **abgeschwächt**.

### 15.4 Ableitungsbelag

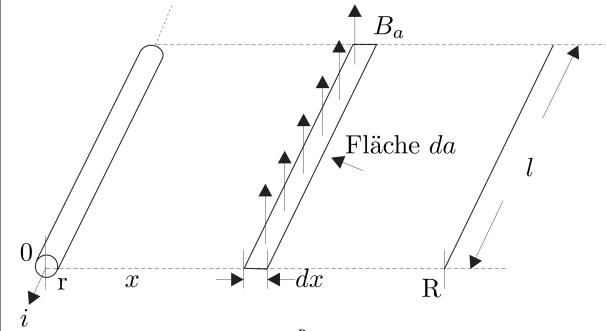
- Ursache: die Verluste des Dielektrikums zwischen den Leitern und zwischen Leiter und Erde
- $G'$  ist sehr klein und kann bei normalen Betriebsverhältnissen gegenüber  $\omega C'$  vernachlässigt werden
- $G'$  ist grösser wenn Teilentladungen (Corona-Effekt) auftreten.
- **Witterungsabhängig**

## 15.5 Induktivitätsbelag

- Ursache: Verkettung der magnetischen Flüsse
- Strom in  $L_1$  hat magnetische Flussverkettung zur Folge
- Fluss = verursachende Strom  $\times$  Induktivität



#### 15.5.1 Formeln



$$\begin{aligned}\phi_1 &= \int_A B_1(x) da = \int_r^R B_1(x) dx \\ da &= l dx \\ B_1(x) &= \mu_0 H_1(x) \quad \text{and} \quad H_1(x) = \frac{i}{2\pi x} \\ \phi_1 &= \mu_0 \int_r^R \frac{i}{2\pi x} l dx \\ &= \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \\ \phi_1 &= L_1 i \\ L_1 &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r}\end{aligned}$$

## 15.6 Induktivitätsbelag

Der Induktivitätsbelag  $L'$  in  $\text{H/m}$  enthält Eigeninduktivität und Kopplungsinduktivität. Annahme: verdrillte Leitung, kreisförmiger Leiterquerschnitt

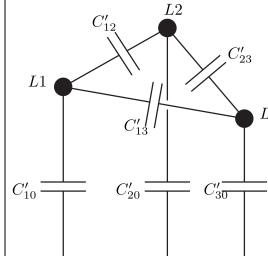
$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \frac{d}{0,78 \cdot r} \right) \quad d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

|              |  |                             |
|--------------|--|-----------------------------|
| [ $L'$ ]     | Induktivitätsbelag .....                 | $\frac{\text{H}}{\text{m}}$ |
| [ $r$ ]      | Leiterradius .....                       | m                           |
| [ $d$ ]      | Mittlerer Leiterabstand .....            | m                           |
| [ $d_{ij}$ ] | Abstand zwischen Phase $i$ und $j$ ..... | m                           |
| [ $\mu_0$ ]  | Magnetische Feldkonstante .....          | $\frac{\text{H}}{\text{m}}$ |

Der Abstand zwischen den Phasen (Leitern) wird jeweils ab dem Mittelpunkt des Leiters gemessen.

## 15.7 Kapazitätsbelag

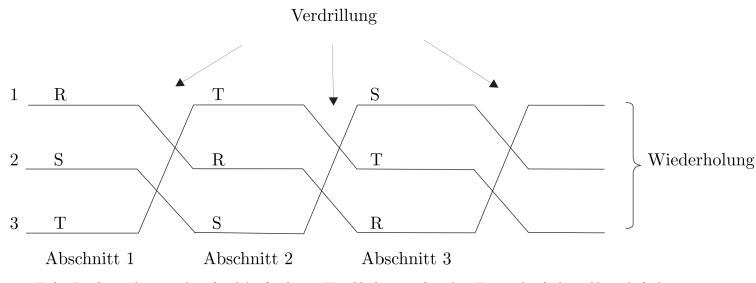
Die elektrische Feldstärke durch Leiter  $L_1$  sowie der Potentialunterschied zwischen Punkten außerhalb von  $L_1$  erzeugen den Kapazitätsbelag. Durch Überlagerung der Einzelspannungen ergibt sich (unter gleichen Annahmen wie für  $L'$ ):



$$C' = \frac{2\pi k}{\ln \left( \frac{d}{r} \right)}$$

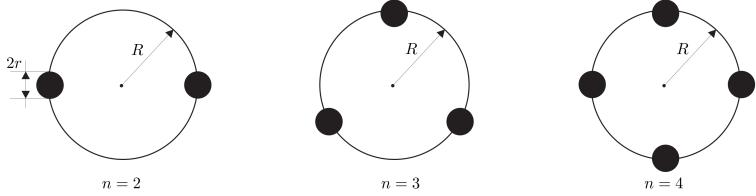
|          |  |                             |
|----------|--|-----------------------------|
| [ $C'$ ] | Kapazitätsbelag .....  | $\frac{\text{F}}{\text{m}}$ |
| [ $k$ ]  | Geometriefaktor (abhängig z. B. von Masthöhe, Durchhang) ..... | -                           |
| [ $d$ ]  | Mittlerer Leiterabstand .....                                  | m                           |
| [ $r$ ]  | Leiterradius .....   | m                           |

## 15.8 Verdrillung



- Die Leiterabstände sind bei einer Freileitung in der Regel nicht alle gleich.
- In Bezug auf die Koppelinduktivität ist die Leitung dann nicht symmetrisch.
- Man kann sie aber durch Phasentausch nach je einem Drittel der Leitungslänge symmetrisieren (verdrillen).

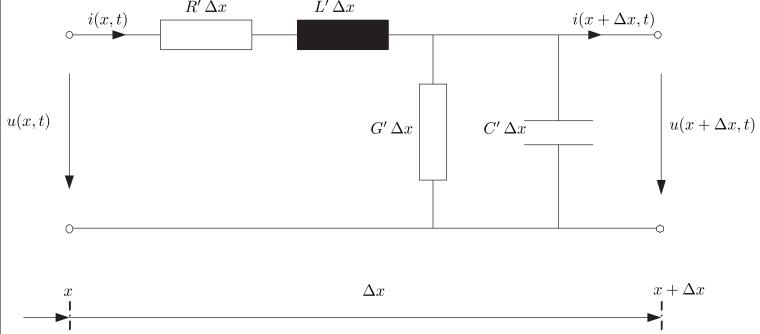
## 15.9 Bündelleiter



|              |  |   |
|--------------|--|---|
| [ $r_{eq}$ ] | Äquivalenter Leiterradius .....  | m |
| [ $R$ ]      | Radius des Kreises, auf welchem die Bündelleiter angeordnet sind ..... | m |
| [ $r$ ]      | Teilleiterradius .....   | m |
| [ $n$ ]      | Anzahl der Bündelleiter .....  | - |

## 16 Leitungsmodell

### 16.1 Leitungsgleichungen



#### 16.1.1 Allgemeine Differential Gleichung

$$\frac{\partial u}{\partial x} = - \left( R' + L' \frac{\partial}{\partial t} \right) \cdot i \quad \frac{\partial i}{\partial x} = - \left( G' + C' \frac{\partial}{\partial t} \right) \cdot u$$

#### 16.1.2 Allgemeine Differential Gleichung für Wechselstrom

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -(R' \cdot I + j\omega L' \cdot I) \quad \frac{\partial I}{\partial x} = -(G' \cdot U + j\omega C' \cdot U)$$

#### 16.1.3 Weitere Gleichungen

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = (R' + j\omega L') (G' + j\omega C') \cdot U$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = (R' + j\omega L') (G' + j\omega C') \cdot I$$

Mit folgender Definition von  $\gamma$  ergibt sich:

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \gamma^2 \cdot U$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = \gamma^2 \cdot I$$

## 16.2 Lösung der Leitungsgleichung

$$U(x) = U_a + U_b = U^+ \cdot e^{-\gamma x} + U^- \cdot e^{\gamma x}$$

$$I(x) = I_a + I_b = I^+ \cdot e^{-\gamma x} + I^- \cdot e^{\gamma x}$$

$$I(x) = \frac{-1}{R' + j\omega L'} \cdot \frac{dU}{dx} = \sqrt{\frac{G' + j\omega C'}{R' + j\omega L'}} \cdot (U^+ \cdot e^{-\gamma x} - U^- \cdot e^{\gamma x})$$

$$Z_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad \dots \text{Wellenimpedanz in } \Omega$$

#### 16.2.1 Wenn die Spannung der Leitung bekannt ist

$$U(x=0) = U_1 = U^+ + U^-$$

$$I(x=0) = I_1 = \frac{1}{Z_W} (U^+ - U^-)$$

#### 16.2.2 Lösen nach $U^+$ und $U^-$

$$U^+ = \frac{U_1 + Z_W \cdot I_1}{2}$$

$$U^- = \frac{U_1 - Z_W \cdot I_1}{2}$$

$$U(x) = U_1 \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} - Z_W \cdot I_1 \cdot \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

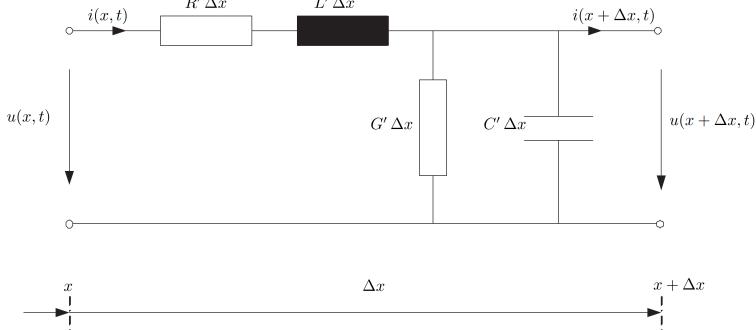
$$U(x) = U_1 \cdot \cosh(\gamma x) - Z_W \cdot I_1 \cdot \sinh(\gamma x)$$

$$I(x) = I_1 \cdot \cosh(\gamma x) - \frac{U_1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma x)$$

□

## 16.3 Allgemein und für 50Hz

### 16.3.1 Modell Allgemein

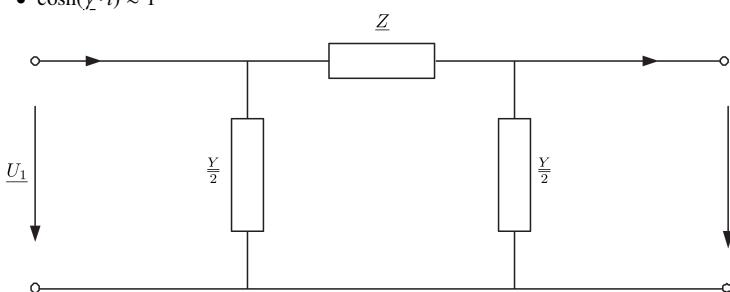


$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot l) & Z_W \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \\ \frac{1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot l) & \cosh(\gamma \cdot l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

### 16.3.2 Modell Vereinfacht

Wenn folgende 3 Punkte zutreffen, kann diese Vereinfachung angewendet werden:

- $|\gamma \cdot l| \ll 1$
- $\sinh(\gamma \cdot l) \approx \gamma \cdot l$
- $\cosh(\gamma \cdot l) \approx 1$



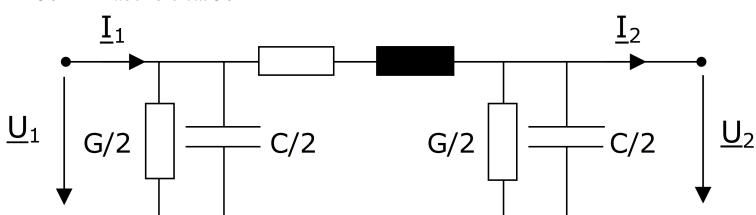
$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + Z \cdot \frac{Y}{2} & Z \\ \frac{Y}{2} \cdot \left( 2 + Z \cdot \frac{Y}{2} \right) & 1 + Z \cdot \frac{Y}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

$$Z = (R' + jX') \cdot l \quad \frac{Y}{2} = \frac{(G' + jB') \cdot l}{2}$$

### 16.4 Vereinfachung für "kurze" Leitungen

Vereinfachung für „kurze“ Leitungen mit konzentrierten Elementen R, G, L, C

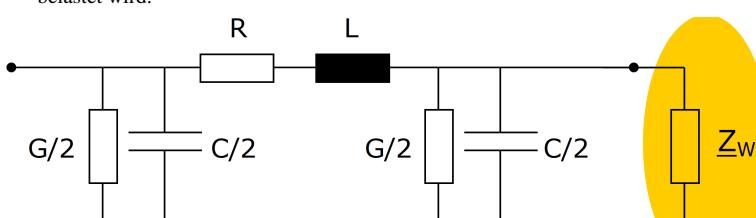
- 50-Hz-Freileitungen bis ca. 250 km
- 50-Hz-Kabel bis ca. 50 km



## 17 Betriebsverhalten

### 17.1 Natürliche Leistung

- Bei einer gewissen Belastung wird in den Querelementen genau so viel Blindleistung „erzeugt“ wie im Längspfad „verbraucht“ wird.
- Diese Belastung nennt man natürliche Belastung bzw. natürliche Leistung.
- Die Leitung verhält sich neutral bezüglich Blindleistung.
- Die natürliche Leistung wird übertragen, wenn die Leitung mit ihrer Wellenimpedanz belastet wird.



### 17.2 Wellenimpedanz

- Bei Abschluss mit der Wellenimpedanz „erzeugt“ die Leitung genau so viel Blindleistung wie sie „verbraucht“.
- Typische Wellenimpedanzwerte für Freileitung:  $Z_W = 200 \dots 400 \Omega$ .
- Typische Wellenimpedanzwerte für Kabel:  $Z_W = 30 \dots 50 \Omega$ .

## 17.3 Unternatürliche Belastung

- Die Lastimpedanz ist höher als die Wellenimpedanz.
- Die Last nimmt weniger als die natürliche Leistung auf.
- Die Längsinduktivität „verbraucht“ weniger Blindleistung als die Querkapazität „erzeugt“.
- Die Spannung am Leitungsende ist höher als am Leitungsanfang.

### 17.4 Übernatürliche Belastung

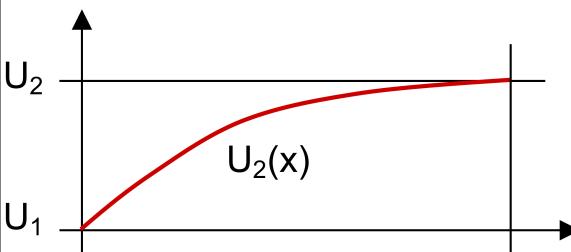
- Die Lastimpedanz ist niedriger als die Wellenimpedanz.
- Die Last nimmt mehr als die natürliche Leistung auf.
- Die Längsinduktivität „verbraucht“ mehr Blindleistung als die Querkapazität „erzeugt“.
- Die Spannung am Leitungsende ist tiefer als am Leitungsanfang.

### 17.5 Praxis

- Kabel ausschließlich **unternatürlich** betrieben
- **Freileitungen** meistens **unternatürlich** betrieben, in seltenen Fällen **übernatürlich**

### 17.6 Leerlauf

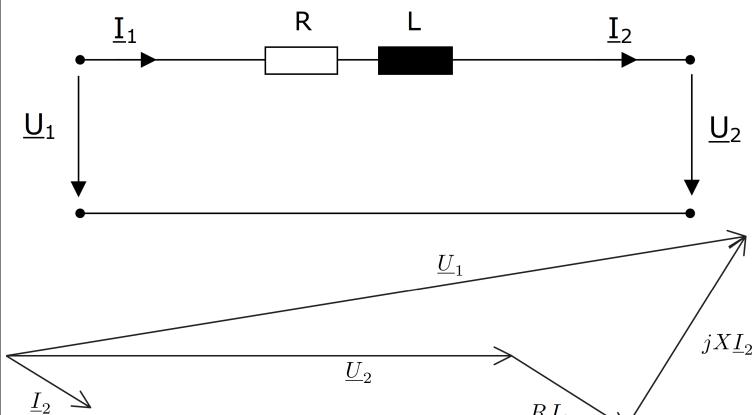
- Extremfall der unternatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Kapazität
- Spannung steigt entlang der Leitung an
- Spannungsüberhöhung am Leitungsende (Ferranti Effekt)



### 17.7 Kurzschluss

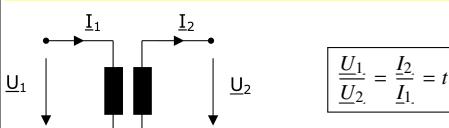
- Extremfall der übernatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Induktivität
- Spannung sinkt entlang der Leitung ab

### 17.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung

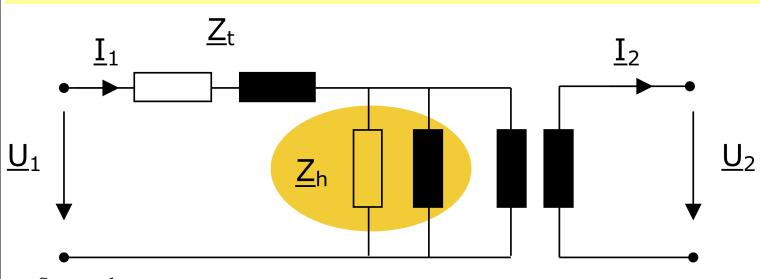


## 18 Transformatormodell

### 18.1 Idealer Transformator

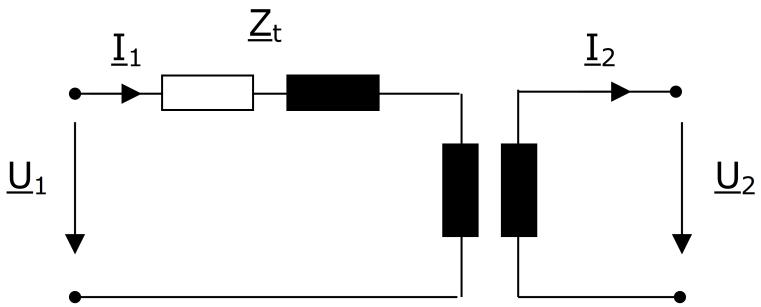


### 18.2 Reales Transformatormodell



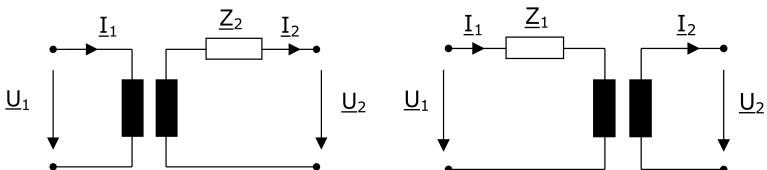
- Streuverluste
- Wicklungsverluste
- Kernverluste

### 18.3 Praktisches Transformatormodell



- $Z_h \gg Z_t \Rightarrow Z_h$  vernachlässigen
- $I_h \approx \% I_1$  von  $I_1$  bei großen Transformatoren
- Kernverluste

### 18.4 Umrechnung von Impedanzen



$$\frac{Z_1}{Z_2} = t^2$$

### 18.5 Dreiphasentransformatoren

- Verschaltung der drei Phasenwicklungen auf Primär- und Sekundärseite wirkt sich auf Übersetzungsverhältnis aus.
- Amplitude und Phasenlage der Spannung können verändert werden.
- Übersetzungsverhältnis wird komplex:  $t$

#### Mögliche Schaltungen

- Y ... Sternschaltung
- D ... Dreieck-Schaltung
- Z ... „Zick-zack“-Schaltung

#### Bezeichnung

- 1. Buchstabe (groß): Schaltung Oberspannungsseite
- 2. Buchstabe (klein): Schaltung Unterspannungsseite
- Zahl: Phasendrehung = Zahl  $\times 30^\circ$

### 18.6 Schaltgruppen

