

# 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>	
1.1 Masseinheiten . . . . .	2	
1.2 Umrechnungsfaktoren . . . . .	2	
1.3 Dezimalfaktoren . . . . .	2	
1.4 Energien . . . . .	2	
1.5 Leistung . . . . .	3	
1.6 Schweizer Strom-Mix . . . . .	3	
1.7 Investitions- und Kostenrechnung . . . . .	3	
<b>2 Wasserdargebot für Wasserkraft</b>	<b>4</b>	
2.1 Abflussganglinie . . . . .	4	
2.2 Abflussdauerkurve . . . . .	4	
2.3 Nutzwassermenge . . . . .	4	
<b>3 Wasserkraft</b>	<b>5</b>	
3.1 Kontinuitätsgleichung des Durchflusses . . . . .	5	
3.2 Bernoulli-Druck-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke . . . . .	5	
3.3 Bernoulli-Höhen-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke . . . . .	5	
3.4 Örtliche Energieverluste . . . . .	5	
3.5 Reibungsverluste (Formel von Strickler) . . . . .	5	
3.6 Verlusthöhe durch Reibung . . . . .	5	
3.7 Reynolds-Zahl $Re$ . . . . .	5	
3.8 Verlustbeiwert . . . . .	6	
3.9 Nettogefälle $H_n$ . . . . .	6	
3.10 Hydraulische Leistung $P_{hyd}$ . . . . .	6	
3.11 Mechanische Leistung $P_{mech}$ . . . . .	6	
3.12 Elektrische Leistung $P_{el}$ . . . . .	6	
3.13 Elektrische Energie $E$ . . . . .	6	
<b>4 Wasserkraftwerk-Typen</b>	<b>7</b>	
4.1 Klassifizierung . . . . .	7	
4.2 Einteilung nach technischen Aspekten . . . . .	7	
4.3 Einteilung nach energiewirtschaftlichen Aspekten . . . . .	7	
4.4 Einteilung nach Betriebsart . . . . .	7	
4.5 Einteilung nach der installierten Leistung . . . . .	7	
4.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten . . . . .	7	
4.7 Wasserturbinen und Pumpen . . . . .	7	
4.8 Laufwasserkraftwerke LWK . . . . .	7	
4.9 LWK mit Kaplanrädern . . . . .	7	
4.10 LWK mit Rohrturbinen . . . . .	7	
4.11 LWK mit Straffoturbinen . . . . .	8	
4.12 Mitteldruckanlagen . . . . .	8	
4.13 Hochdruck- (Speicher-) Anlagen . . . . .	8	
4.14 Pumpspeicherkraftwerke PSW . . . . .	8	
4.15 Gezeitenkraftwerke . . . . .	8	
4.16 Wellenkraftwerk . . . . .	8	
4.17 Wasserwirbelkraftwerk . . . . .	8	
<b>5 Turbinen Kenngrößen</b>	<b>9</b>	
5.1 Nettofallhöhe und Durchfluss . . . . .	9	
5.2 Hydraulische Leistung . . . . .	9	
5.3 Mechanische Leistung an der Turbinenwelle . . . . .	9	
5.4 Winkelgeschwindigkeit . . . . .	9	
5.5 Betriebszustände der Maschinengruppe . . . . .	9	
<b>6 Atomkraftwerk</b>	<b>9</b>	
6.1 Kernphysikalische Grundlagen . . . . .	9	
6.2 Spaltung schwerer Kerne . . . . .	9	
<b>7 Windenergie</b>	<b>9</b>	
7.1 Windeleistung . . . . .	9	
<b>8 Windenergiekonverter (WEK)</b>	<b>9</b>	
8.1 Netzkopplung . . . . .	9	
<b>9 Netze Allgemein</b>	<b>10</b>	
9.1 Interessen der Erzeuger . . . . .	10	
9.2 Anforderungen an das Stromnetz . . . . .	10	
<b>10 Netzebenen</b>	<b>10</b>	
10.1 NE1: Übertragungsnetz . . . . .	10	
10.2 NE3: Überregionales Verteilnetz . . . . .	11	
10.3 NE5: Verteilnetz . . . . .	11	
10.4 NE7: Verteilnetz . . . . .	11	
<b>11 Netztopologien</b>	<b>11</b>	
11.1 Strahlnetz . . . . .	11	
11.2 Ringnetz . . . . .	11	
11.3 Maschennetz . . . . .	11	
<b>12 Leitungen</b>	<b>12</b>	
12.1 Freileitungen . . . . .	12	
12.2 Masten . . . . .	12	
12.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen . . . . .	12	
12.4 Mastenformen . . . . .	12	
12.5 Freileitungen: Vor- und Nachteile . . . . .	12	
<b>13 Kabelleitungen</b>	<b>12</b>	
13.1 Aufbau Allgemein . . . . .	12	
13.2 Aufbau . . . . .	12	
13.3 Erdverkabelung in der Schweiz . . . . .	12	
<b>14 Schaltanlagen / Umspannwerke</b>	<b>13</b>	
14.1 Aufgabe . . . . .	13	
14.2 Aufbau . . . . .	13	
14.3 Transformator . . . . .	13	
14.4 Leistungsschalter . . . . .	13	
14.5 Lastschalter . . . . .	13	
14.6 Trennschalter . . . . .	13	
14.7 Sonstiges . . . . .	13	
14.8 Schaltfelder Aufbau . . . . .	13	
14.9 Regeln beim Schalten (Reihenfolge) . . . . .	13	
<b>15 Leitungsbeläge</b>	<b>14</b>	
15.1 Elektrisches und magnetisches Feld . . . . .	14	
15.2 Widerstandsbelag . . . . .	14	
15.3 Skin-Effekt . . . . .	14	
15.4 Ableitungsbelag . . . . .	14	
15.5 Induktivitätsbelag . . . . .	14	
15.6 Induktivitätsbelag . . . . .	14	
15.7 Kapazitätsbelag . . . . .	14	
15.8 Verdrillung . . . . .	15	
15.9 Bündelleiter . . . . .	15	
<b>16 Leitungsmodell</b>	<b>15</b>	
16.1 Leitungsgleichungen . . . . .	15	
16.2 Lösung der Leitungsgleichung . . . . .	15	
16.3 Allgemein und für 50Hz . . . . .	16	
16.4 Vereinfachung für "kurze" Leitungen . . . . .	16	
<b>17 Betriebsverhalten</b>	<b>16</b>	
17.1 Natürliche Leistung . . . . .	16	
17.2 Wellenimpedanz . . . . .	16	
17.3 Unternatürliche Belastung . . . . .	16	
17.4 Übernatürliche Belastung . . . . .	16	
17.5 Praxis . . . . .	16	
17.6 Leerlauf . . . . .	16	
17.7 Kurzschluss . . . . .	16	
17.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung . . . . .	16	
<b>18 Transformatormodell</b>	<b>17</b>	
18.1 Idealer Transformatoren . . . . .	17	
18.2 Reales Transformatormodell . . . . .	17	
18.3 Praktisches Transformatormodell . . . . .	17	
18.4 Umrechnung von Impedanzen . . . . .	17	
18.5 Dreiphasentransformatoren . . . . .	17	
18.6 Schaltgruppen . . . . .	17	
<b>19 Leistungsfluss über eine Leitung</b>	<b>17</b>	
19.1 Leistungsfluss . . . . .	17	
19.2 Leistungsübertragung . . . . .	17	
19.3 Praxis (Vereinfachung) . . . . .	18	
19.4 Maximale Wirkleistungsübertragung . . . . .	18	
<b>20 Lastflussproblem</b>	<b>18</b>	
20.1 Problemformulierung . . . . .	18	
20.2 Analyse der Spannung-Leistung Verhältnisse . . . . .	18	

# 1 Energie- und Elektrizitätswirtschaft

## 1.1 Masseinheiten

Masseinheit	Zeichen	Umrechnung
Watt	(W)	
Pferdestärke	(PS)	1 PS ≈ 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<sub>pot</sub>

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

[W <sub>pot</sub> ]	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<sub>kin</sub>

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

[W <sub>kin</sub> ]	Kinetische Energie	.....	Ws = Nm = J
[m]	Masse	.....	kg
[v]	Geschwindigkeit	.....	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

### 1.4.3 Federenergie W<sub>F</sub>

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

[W <sub>F</sub> ]	Federenergie	.....	Ws = Nm = J
[F]	Kraft	.....	N = kg · $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
[s]	Verschiebung (Auslenkung)	.....	m

### 1.4.4 Kondensatorenergie W<sub>C</sub>

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

[W <sub>C</sub> ]	Kondensatorenergie	.....	Ws = Nm = J
[C]	Kapazität	.....	$F = \frac{A \cdot s}{V}$
[U]	Spannung	.....	V

### 1.4.5 Induktivitätsenergie W<sub>L</sub>

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

[W <sub>L</sub> ]	Induktivitätsenergie	.....	Ws = Nm = J
[L]	Induktivität	.....	$H = \frac{V_s}{A}$
[I]	Stromstärke	.....	A

### 1.4.6 Batterieenergie W<sub>bat</sub>

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

[W <sub>bat</sub> ]	Batterieenergie	.....	Ws = Nm = J
[Q]	Elektrische Ladung	.....	C = As
[U]	Spannung	.....	V

## 1.4.7 Thermische Energie W<sub>th</sub>

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

[W <sub>th</sub> ]	Thermische Energie	.....	Ws = Nm = J
[m]	Masse	.....	kg
[c]	Spezifische Wärmekapazität	.....	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
[\vartheta <sub>1</sub> ]	Anfangstemperatur	.....	°C oder K
[\vartheta <sub>2</sub> ]	Endtemperatur	.....	°C oder K

## 1.4.8 Spezifische Energie e

$$e = \frac{W}{m} \quad W = e \cdot m$$

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

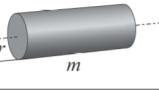
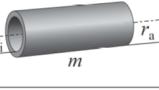
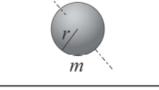
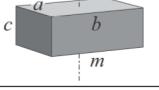
## 1.4.9 Rotationsenergie W<sub>rot</sub>

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

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

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

## Massenträgheitsmoment J

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

## 1.5 Leistung

### 1.5.1 Rotationsleistung $P_{\text{rot}}$

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

$[P_{\text{rot}}]$	Rotationsleistung .....	$W = \frac{J}{s} = \frac{\text{Nm}}{s}$
$[M]$	Drehmoment .....	Nm
$[\omega]$	Winkelgeschwindigkeit .....	$\frac{\text{rad}}{s}$
$[f]$	Drehfrequenz .....	$\text{Hz} = \frac{1}{s}$
$[n]$	Umdrehungen pro Minute .....	$\frac{1}{\text{min}} = \frac{\text{U}}{\text{min}}$

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

$$P_{\text{th}} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad \dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

$[P_{\text{th}}]$	Thermische Leistung .....	$W = \frac{J}{s}$
$[\dot{m}]$	Massenstrom .....	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
$[c]$	Spezifische Wärmekapazität .....	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$[\Delta\vartheta]$	Temperaturdifferenz .....	K oder $^{\circ}\text{C}$
$[\rho]$	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 .....	$W = \frac{J}{s}$
$[U]$	Wärmedurchgangskoeffizient .....	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$
$[A]$	Fläche .....	$\text{m}^2$
$[\Delta\vartheta]$	Temperaturdifferenz .....	K

### 1.5.4 Mechanische Leistung $P_v$

$$P_v = F \cdot v \quad F = m \cdot g$$

$[P_v]$	Mechanische Leistung .....	$W = \frac{J}{s} = \frac{\text{Nm}}{s}$
$[F]$	Kraft .....	$N = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$[m]$	Masse .....	kg
$[g]$	Erdbeschleunigung .....	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$[v]$	Geschwindigkeit .....	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

### 1.5.5 Leistung der Solaranlage $P_{\text{pv}}$

$$P_{\text{pv}} = \eta \cdot A \cdot E$$

$[P_{\text{pv}}]$	Elektrische Leistung .....	$W = \frac{J}{s}$
$[\eta]$	Wirkungsgrad .....	-
$[A]$	Fläche der Solaranlage .....	$\text{m}^2$
$[E]$	Einstrahlung .....	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

### 1.5.6 Leistung eines Wasserkraftwerks $P$

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

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

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

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

$[P_{\odot}]$	Wirkleistung .....	$W = \frac{J}{s}$
$[U]$	Verkettete Spannung .....	V
$[I]$	Stromstärke .....	A
$[\cos(\varphi)]$	Leistungsfaktor .....	-

## 1.6 Schweizer Strom-Mix

38.1%	Kernkraft
32.3%	Speicherwerkse
24.2%	Laufkraftwerk
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 $K_K$

$$K_K = A \cdot I$$

$[K_K]$	Kapitalkosten .....	CHF oder €
$[A]$	Annuitätsfaktor .....	1
$[I]$	Investitionen .....	CHF oder €

#### 1.7.3 Unterhaltskosten $K_U$

$$K_U = p_U \cdot I$$

$[K_U]$	Unterhaltskosten .....	CHF oder €
$[p_U]$	Unterhaltskosten-Prozentsatz .....	1
$[I]$	Investitionen .....	CHF oder €

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

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

$$[K_{\text{Fix}}] \quad \text{Fix-Kosten ....., CHF oder €}$$

#### 1.7.5 Erlös oder Deckungsbeitrag $E$

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

$[E]$	Erlös .....	CHF oder €
$[t_{VL}]$	Volllaststunden .....	h
$[C]$	Grenzkosten .....	$\frac{\text{CHF}}{\text{MWh}}$ oder $\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$
$[P]$	Leistung .....	$W = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \frac{J}{s}$

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

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

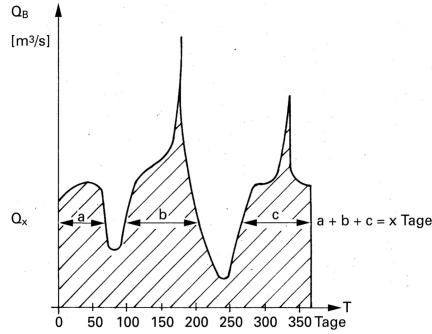
#### 1.7.7 Variable Kosten $K_V$

$[G]$	Ergebnis .....	CHF oder €
$[E]$	Erlös .....	CHF oder €
$[K_{\text{Fix}}]$	Fix-Kosten .....	CHF oder €
$[K_{\text{Var}}]$	Variable Kosten .....	CHF oder €

## **2 Wasserdargebot für Wasserkraft**

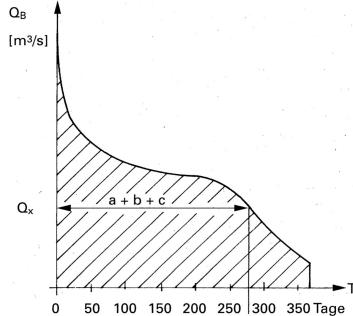
## 2.1 Abflussganglinie

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



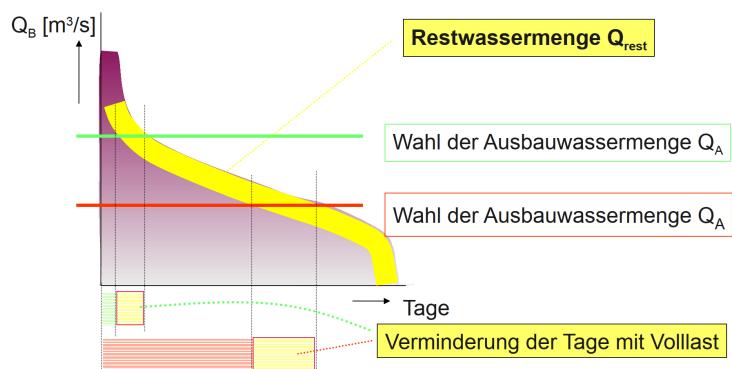
## 2.2 Abflussdauerkurve

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

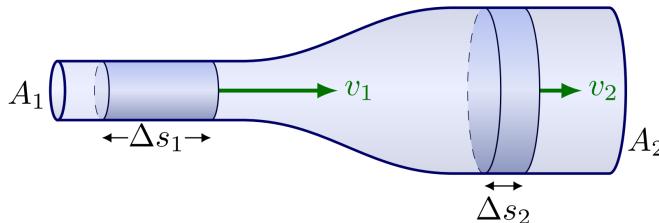


$$Q_{Nutz} = Q_B - Q_{Rest}$$

$[Q_{Nutz}]$	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

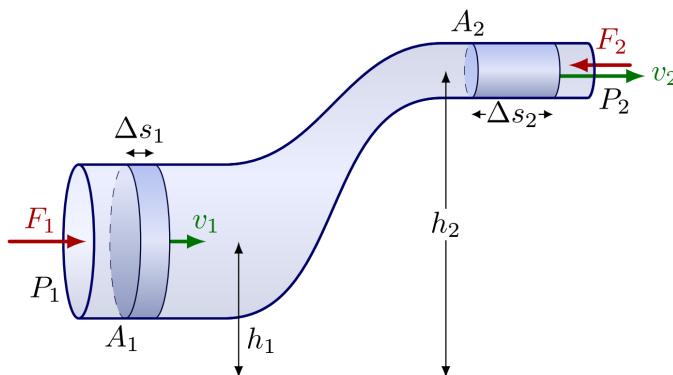


Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Erhaltung des Volumenstroms in einer strömenden Flüssigkeit:

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

$[Q_x]$	Durchflussrate	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
$[A_x]$	Querschnittsfläche	$\text{m}^2$
$[v_x]$	Fließgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$[\dot{V}]$	Volumenstrom (Volumen pro Zeit)	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
$[\Delta V]$	Volumenänderung	$\text{m}^3$
$[\Delta t]$	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)	$\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$
$[\rho g z]$	Potentielle Energie	$\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$
$[p]$	Druckenergie	$\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

$$\underbrace{\frac{p}{A}}_A + \underbrace{\rho g z}_B + \underbrace{\frac{1}{2} \rho v^2}_C = \underbrace{\text{constant}}_D$$

### 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 = $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
$[\rho]$	Dichte des Wassers	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$[g]$	Erdbeschleunigung	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$[v]$	Geschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$[\frac{p}{\rho g}]$	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	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$[g]$	Erdbeschleunigung	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

### 3.5 Reibungsverluste (Formel von Strickler)

$$h_{v,r} = \frac{v^2 \cdot L}{K_{St}^2 \cdot R_h^{4/3}}$$

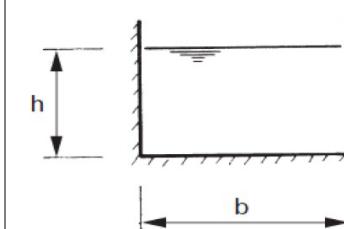
$[h_{v,r}]$	Reibungsverlusthöhe	m
$[v]$	Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$[L]$	Länge der Strömungsstrecke	m
$[K_{St}]$	Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler	$\frac{\text{m}^{1/3}}{\text{s}}$
$[R_h]$	Hydraulischer Radius	m

### 3.5.1 Tabelle Rauhigkeitsbeiwert $K_{St}$ nach Strickler

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

### 3.5.2 Hydraulischer Radius

#### Rechteckqueerschnitt



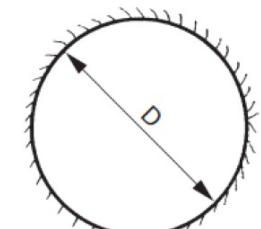
$$F = b \cdot h$$

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

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

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

#### Kreisqueerschnitt



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

$$P = D \cdot \pi$$

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

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

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

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

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

### 3.6 Verlusthöhe durch Reibung

$$h_{v,r} = \lambda \cdot \frac{L}{d_{hy}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

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

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

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

$$[L] \quad \text{Länge} \quad \text{m}$$

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

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

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

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

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

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

Zusammenhang des hydraulischen Durchmessers:

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

### 3.7 Reynolds-Zahl Re

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

$$\text{Re} = \frac{v_m \cdot d_{hy}}{\nu} \quad \text{Bemerkung: } d_{hy} = d_{\text{Kreisrohr}} = d_i$$

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

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

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

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

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

### 3.8 Verlustbeiwert

$$\lambda = \left( \frac{1}{-2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71}\right)} \right)^2$$

$$\lambda = \left( \frac{1}{-2 \cdot \log\left(\frac{k}{d_{hy} \cdot 3,71}\right)} \right)^2$$

[λ]	Verlustbeiwert .....	–
[k]	äquivalente Rauheit .....	mm
[d <sub>hy</sub> ]	Hydraulischer Durchmesser .....	m

### 3.9 Nettogefälle H<sub>n</sub>

$$H_n = H - \sum H_v - \frac{v^2}{2g}$$

$$\sum H_v = C \cdot Q^2$$

[H <sub>n</sub> ]	Nettofallhöhe .....	m
[H]	Bruttogefälle .....	m
[Σ H <sub>v</sub> ]	Summe der hydraulischen Verluste .....	m
[C]	Faktor bei Bestimmung der Verluste .....	$\frac{s^2}{m^5}$
[Q]	Volumenstrom .....	$\frac{m^3}{s}$
[v]	Strömungsgeschwindigkeit im Unterwasser .....	$\frac{m}{s}$
[g]	Erdbeschleunigung g = 9,81 .....	$\frac{m}{s^2}$

### 3.10 Hydraulische Leistung P<sub>hyd</sub>

$$P_{hyd} = \frac{m \cdot g \cdot H_n}{t}$$

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

$$\frac{m}{t} = \rho \cdot Q$$

[P <sub>hyd</sub> ]	Hydraulische Leistung .....	W
[m]	Masse .....	kg
[g]	Erdbeschleunigung, g = 9,81 .....	$\frac{m}{s^2}$
[H <sub>n</sub> ]	Nettofallhöhe .....	m
[t]	Zeit .....	s
[ρ]	Dichte des Wassers, ρ = 1000 .....	$\frac{kg}{m^3}$
[Q]	Nutzwassermenge .....	$\frac{m^3}{s}$

### 3.11 Mechanische Leistung P<sub>mech</sub>

$$P_{mech} = \eta_t \cdot P_{hyd}$$

$$P_{mech} = \eta_t \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n$$

[P <sub>mech</sub> ]	Mechanische Leistung an der Turbinen-Generator-Welle ....	W
[P <sub>hyd</sub> ]	Hydraulische Leistung .....	W
[η <sub>t</sub> ]	Turbinenwirkungsgrad .....	–

### 3.12 Elektrische Leistung P<sub>el</sub>

$$P_{el} = \eta_g \cdot P_{mech}$$

$$P_{el} = \eta_g \cdot \eta_t \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n$$

[P <sub>el</sub> ]	Elektrische Leistung an den Generatorklemmen ....	W
[P <sub>mech</sub> ]	Mechanische Leistung .....	W
[η <sub>g</sub> ]	Generatorwirkungsgrad .....	–

### 3.13 Elektrische Energie E

$$E = \int P_{el} \cdot dt$$

$$E = \int \eta_g \cdot \eta_t \cdot \rho \cdot Q \cdot H_n \cdot \rho \cdot g \cdot dt$$

$$E = \rho \cdot g \cdot \int \eta_g \cdot \eta_t \cdot Q \cdot H_n \cdot dt$$

[E]	Elektrische Energie .....	Ws
[P <sub>el</sub> ]	Elektrische Leistung .....	W
[η <sub>g</sub> ]	Generatorwirkungsgrad .....	–
[η <sub>t</sub> ]	Turbinenwirkungsgrad .....	–
[Q]	Nutzwassermenge .....	$\frac{m^3}{s}$
[H <sub>n</sub> ]	Nettofallhöhe .....	m
[ρ]	Dichte des Wassers, ρ = 1000 .....	$\frac{kg}{m^3}$
[g]	Erdbeschleunigung, g = 9,81 .....	$\frac{m}{s^2}$
[t]	Zeit .....	s

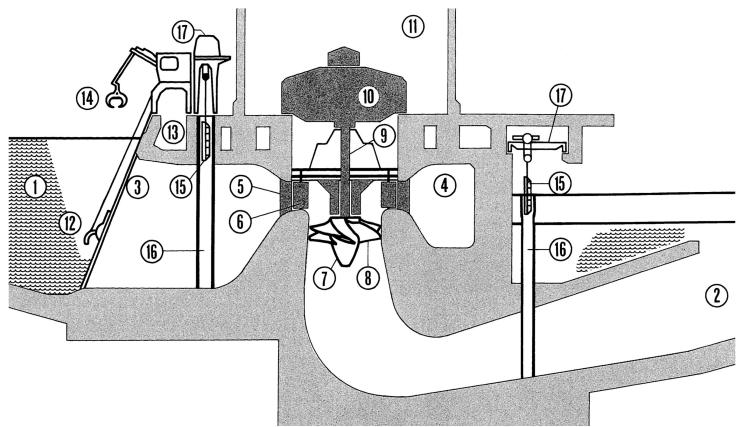
## 4 Wasserkraftwerk-Typen

### 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



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

### 4.3 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 ( $P > 10 \text{ MW}$ )

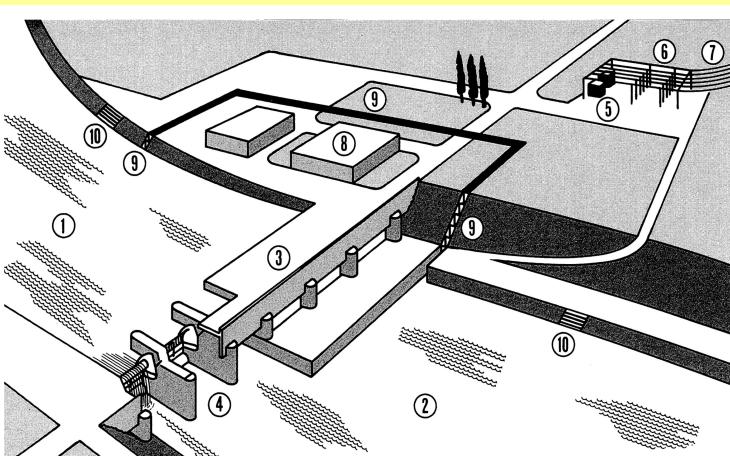
### 4.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten

- 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



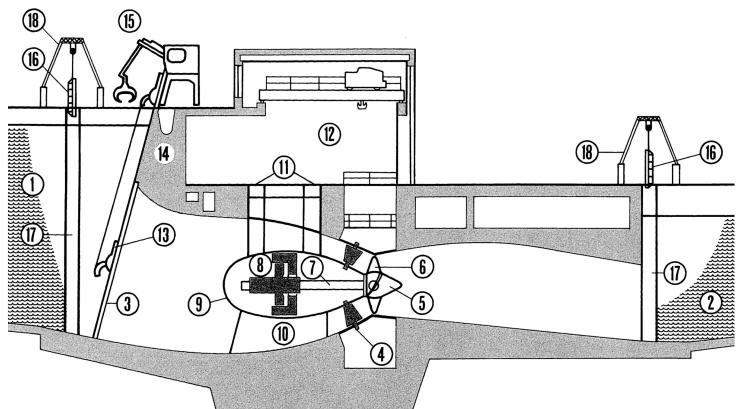
1	Oberwasser	6	Schaltanlage
2	Unterwasser	7	Leitungen
3	Maschinenhaus	8	Betriebsgebäude
4	Stauwehr	9	Fischtrappe
5	Transformatoren	10	Einrichtung für den Schiffstransport

### 4.9 LWK mit Kaplanturbinen

- Turbine Vertikal verbaut

### 4.10 LWK mit Rohrturbinen

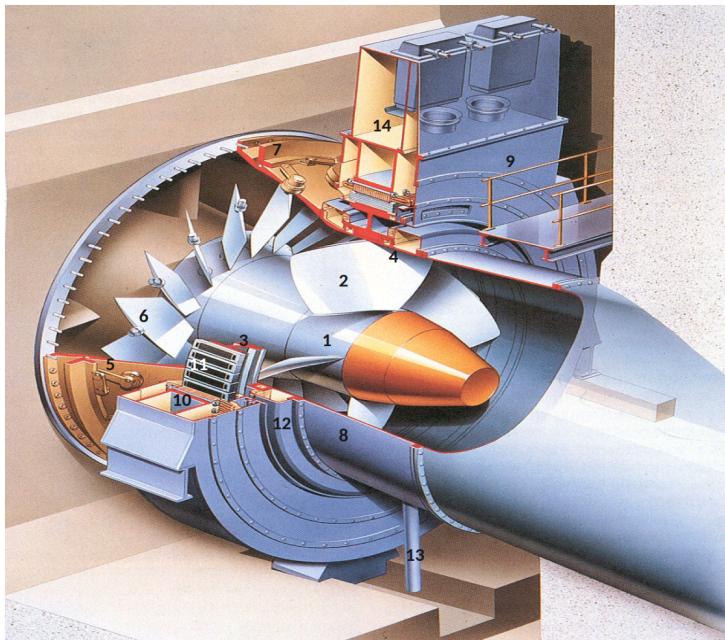
- Turbine Horizontal verbaut
- bis 25m Fallhöhe



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

## 4.11 LWK mit Strafloturbinen

- Weiterentwicklung der Rohrturbine
- Rotor Turbine und Generator bilden Einheit



1	Laufdradnabe	8	Rohrleitung
2	Propellerblatt	9	Generator
3	Rotorring	10	Stator
4	Entlastungsring	11	Rotor
5	Turbinengehäuse	12	Ringdichtungs-Leckwasser-Kollektor
6	Leitschaufel	13	Leckwasserableitung
7	Leitradverstellring	14	Kühler

## 4.12 Mitteldruckanlagen

- bis circa 50m Fallhöhe
- ( $<= 5$  bar Druck)

## 4.13 Hochdruck- (Speicher-) Anlagen

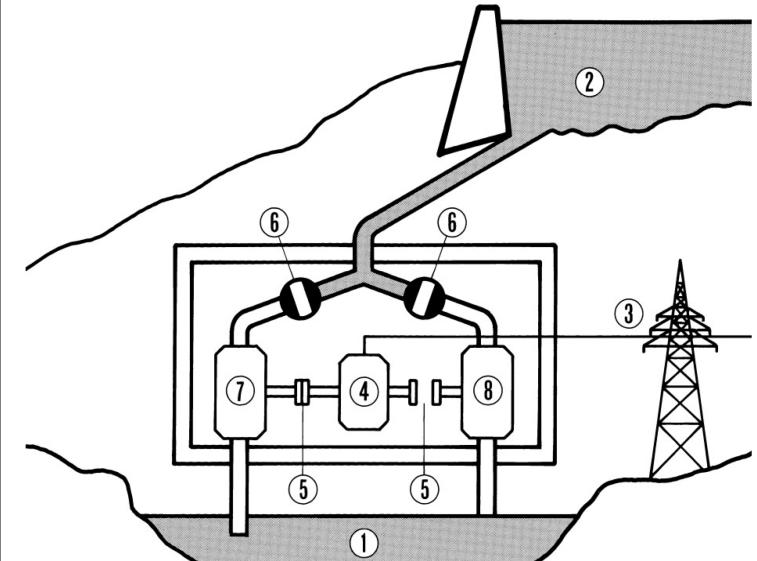
- ab circa 50m Fallhöhe
- ( $> 5$  bar Druck, bis weit über 100 bar möglich)



1	Stausee	10	Wasserschloss
2	Wasserfassung	11	Druckschacht
3	Freispiegelstollen (keine Druckleitung)	12	Zentrale
4	Staumauer	13	Turbine
5	Grundablass (für kontrollierten Ablauf)	14	Kugelschieber
6	Hochwasserentlastung (= Überlauf)	15	Generator
7	Einlauf	16	Energieableitung, Transformatoren
8	Drosselklappe	17	Schaltanlage
9	Druckstollen	18	Unterwasserstollen

## 4.14 Pumpspeicherkraftwerk PSW

- Pumpspeicherkraftwerk mit konventionellem Maschinensatz (Dreimaschinensatz)
- Wirkungsgrad der PSW: 65 – 80%



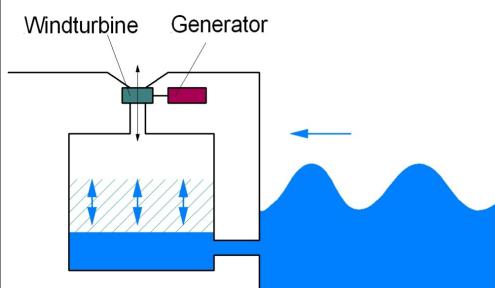
1	Unteres Becken	5	Kupplung
2	Oberes Becken	6	Kugelschieber
3	Energieableitung, Stromleitung	7	Pumpe
4	Motorgenerator	8	Turbine

## 4.15 Gezeitenkraftwerke

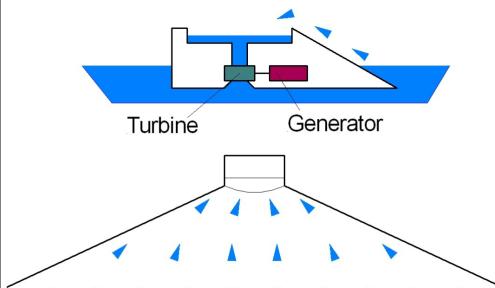
- Nutzung des Tidenhubs
- Früher meist mit Staudammbauweise (hohe Umwelteinwirkungen)
- Heute meist Meereströmungs-Kraftwerk
- Grösste Europäische Anlage in Frankreich (240 MW)

## 4.16 Wellenkraftwerk

### 4.16.1 Wellenkraftwerk mit Pneumatischer Kammer



### 4.16.2 Wellenkraftwerk mit Rampe



## 4.17 Wasserwirbelkraftwerk

- Für Kleinwasserkraft
- Geringe Fallhöhen und Durchfluss möglich:  
 $h \geq 0.5\text{m}$  und  $Q \geq 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- Geringerer Wirkungsgrad
- Besser Fischgängig

## 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

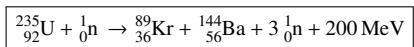
### 6.1 Kernphysikalische Grundlagen

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

$[A]$	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.

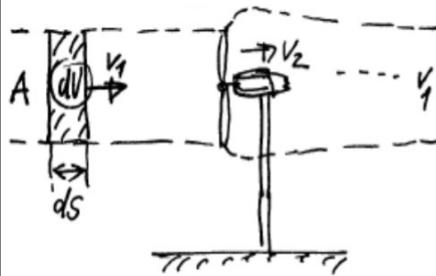
Dies geschieht mit einem Moderator wie „leichtes“ Wasser oder Graphit.

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

To be continued ...

## 7 Windenergie

### 7.1 Windeleistung



$$\frac{v_2}{v_1} > 0$$

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

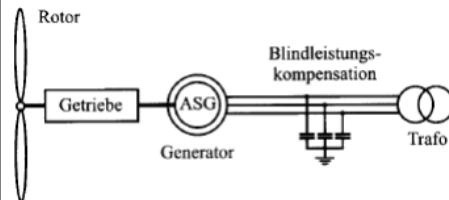
$[P_{\max}]$	Theoretische Windleistung .....	$W$
$[P_W]$	Effektiv nutzbare praktische Windleistung .....	$W$
$[c_P]$	Leistungsbeiwert, $c_P = 0.4 \dots 0.5$ .....	-
$[A]$	Rotorfläche (projizierte Fläche senkrecht zur Strömung) .....	$m^2$
$[\rho_{\text{Luft}}]$	Dichte Luft, $\approx 1,29 \frac{kg}{m^3}$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

### 8 Windenergiekonverter (WEK)

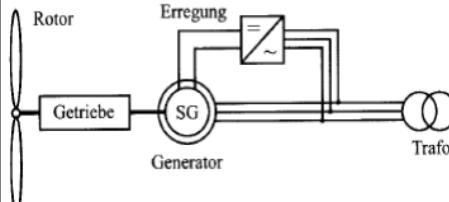
#### 8.1 Netzkopplung

DU = Direktumrichter, ZKU = Zwischenkreis-Umrichter

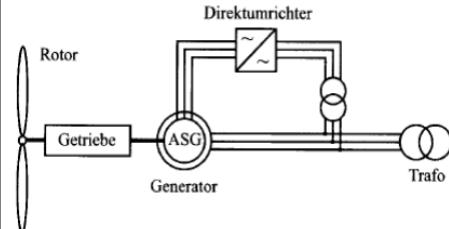
##### 8.1.1 Direkte Netzkopplung mit ASM



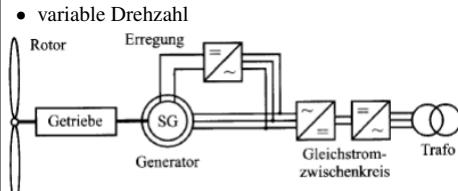
##### 8.1.2 Direkte Netzkopplung mit SM



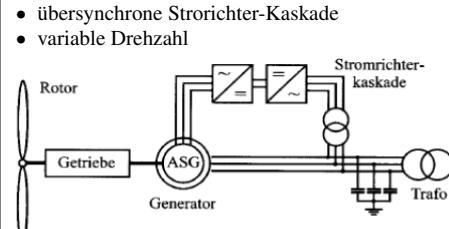
##### 8.1.3 Direkte Netzkopplung mit ASM und DU im Läufer



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

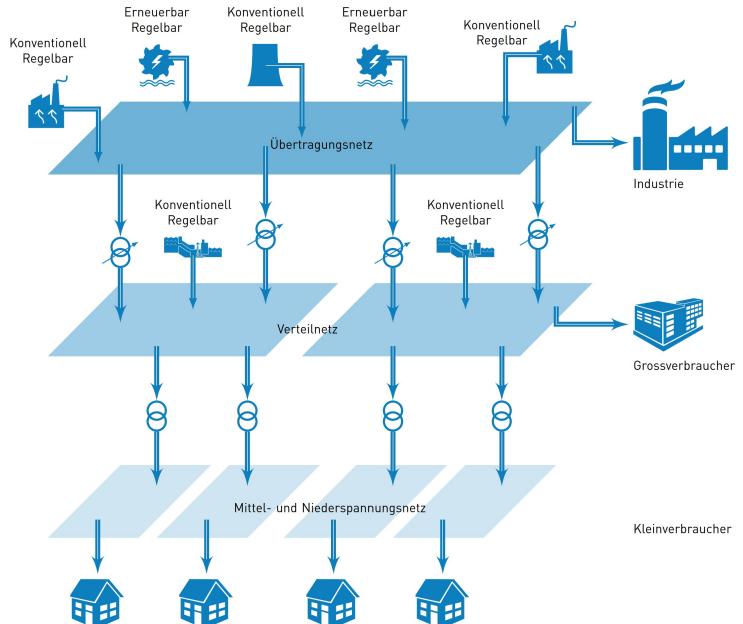


##### 8.1.5 Direkte Netzkopplung mit ASM und ZKU im Läufer

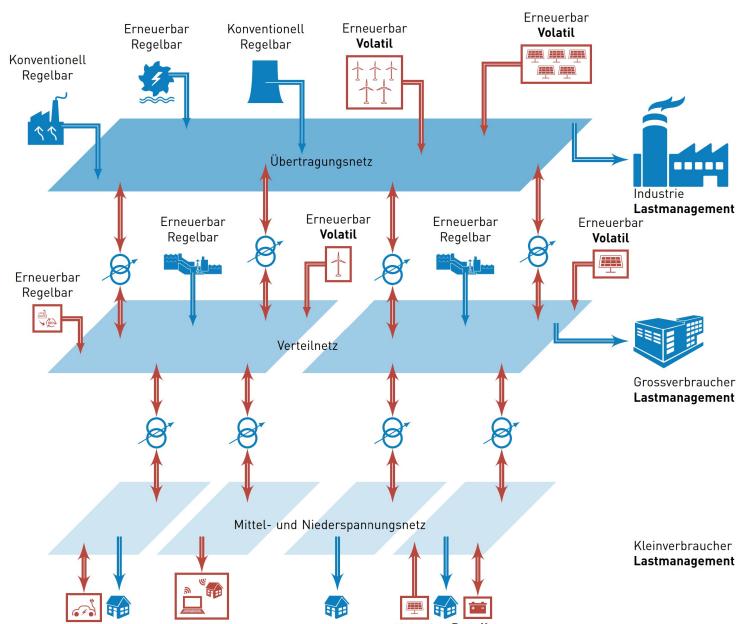


## 9 Netze Allgemein

### 9.0.1 Stromnetz früher



### 9.0.2 Stromnetz heute



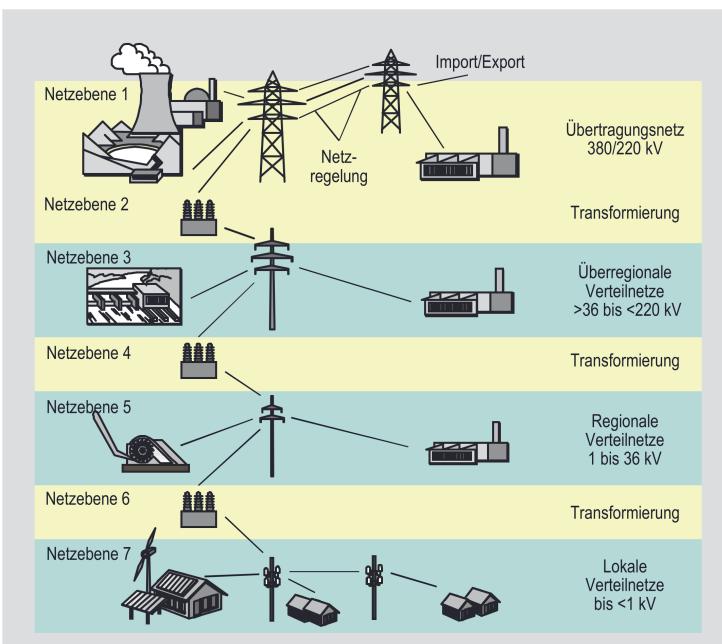
### 9.1 Interessen der Erzeuger

- 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

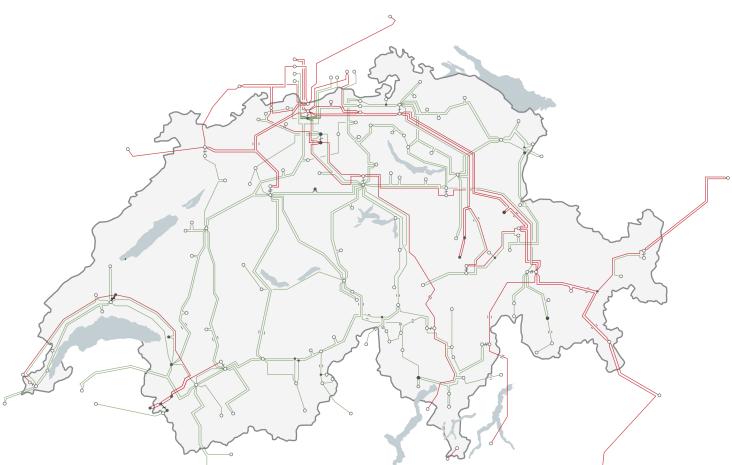


Spannungsebene	Spannungsbereich	Leistung
<b>Höchstspannung</b>	380 kV, 220 kV	> 300 MVA
<b>Hochspannung</b>	150 kV bis 50 kV	< 100 MVA
<b>Mittelspannung</b>	36 kV bis 6 kV	< 30 MVA
<b>Niederspannung</b>	0,4 kV	< 1 MVA

### 10.1 NE1: Übertragungsnetz

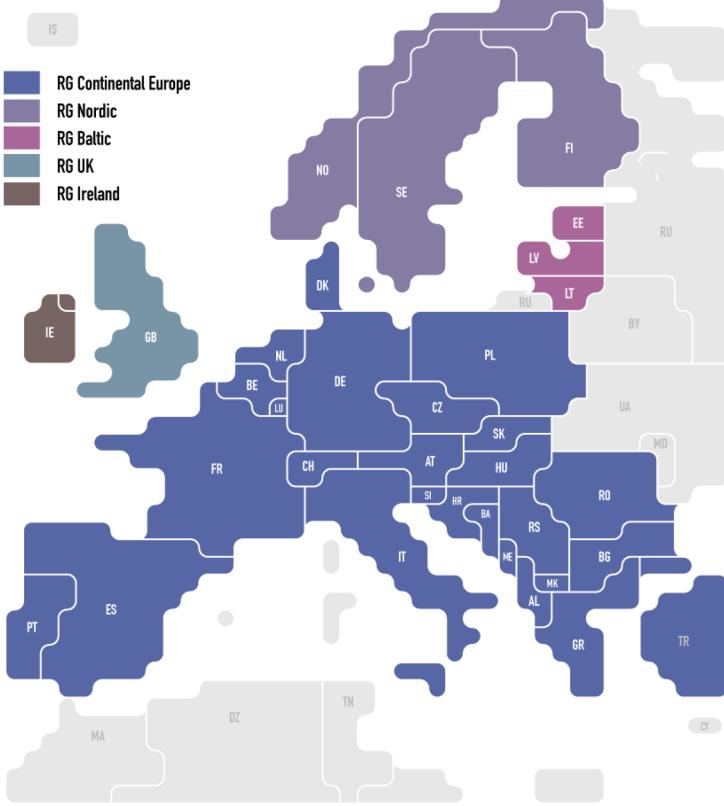
- 380 kV und 220 kV
- Zweck
  - Abtransport der großen Kraftwerksleistungen (typ. > 300 MVA)
  - Versorgung der Verteilnetze
  - Weiträumiger Energietransport
  - Internationaler Verbundbetrieb, Energieaustausch
- Ausdehnung: national, international
- Topologie: (stark) vermaschtes Netz
- Technologie: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

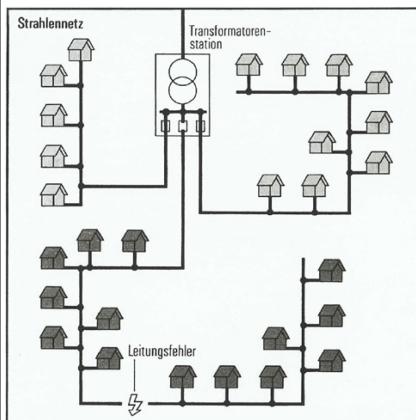
- 20 kV, 10 kV
- Zweck
  - Abtransport kleiner Kraftwerksleistungen (< 30 MVA)
  - Anschluss von Industrie- und Gewerbe Kunden
  - Regionale Verteilung
- Ausdehnung: Kanton, Tal
- Topologie: Ringnetz, Strahlennetz
- Technologie: Freileitungen und Kabel

## 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



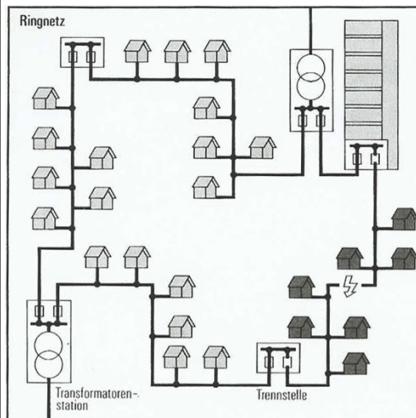
#### Pro:

- 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



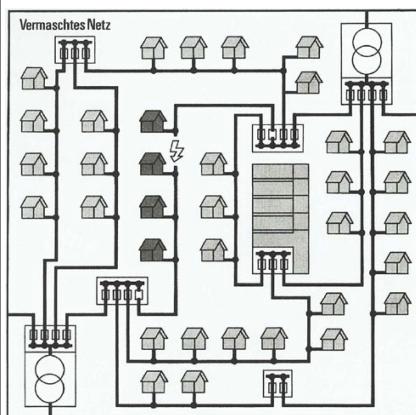
#### Pro:

- 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 Projektions- 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.
- Kableitungen** 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).

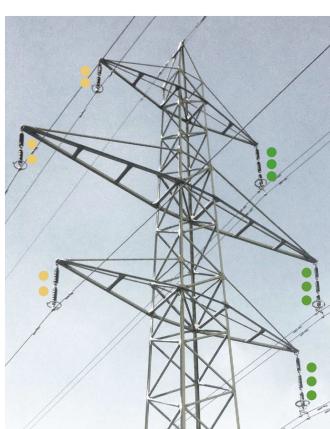
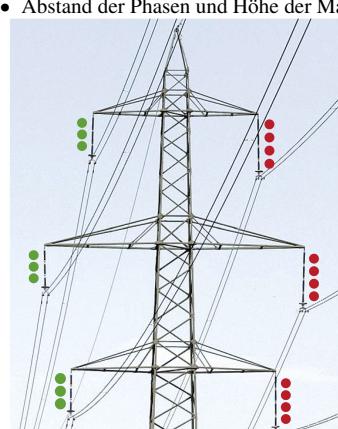
### Materialien:

- Stahl-Gittermast
- Betonmast
- Stahlrohrmast
- Holzmast

## 12.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen

### Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale:

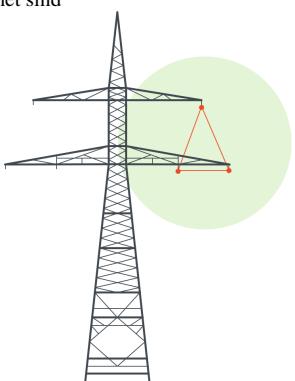
- Anzahl Phasen
- Länge der Isolatorenketten (Je höher die Spannung, umso länger sind die Isolatorenketten)
- Abstand der Phasen und Höhe der Masten



## 12.4 Mastenformen

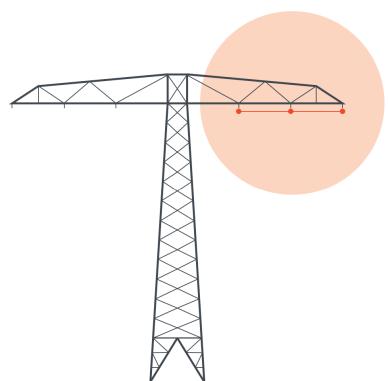
### 12.4.1 Donau mast

Zwei Drehstromkreise bei denen die Leiter jeweils im Dreieck angeordnet sind



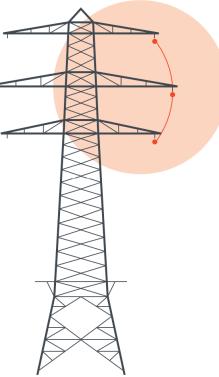
### 12.4.2 Einebenenmast

Niedrige Bauhöhe und eine größere Trassenbreite



## 12.4.3 Tonnenmast

Eine geringe Trassenbreite, sind aber höher als vergleichbare Donau-masten



## 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:

Radielles elektrisches Feld, Verwendung im Nieder- und Mittelspannungsbereich

### Einleiterkabel:

Radielles 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

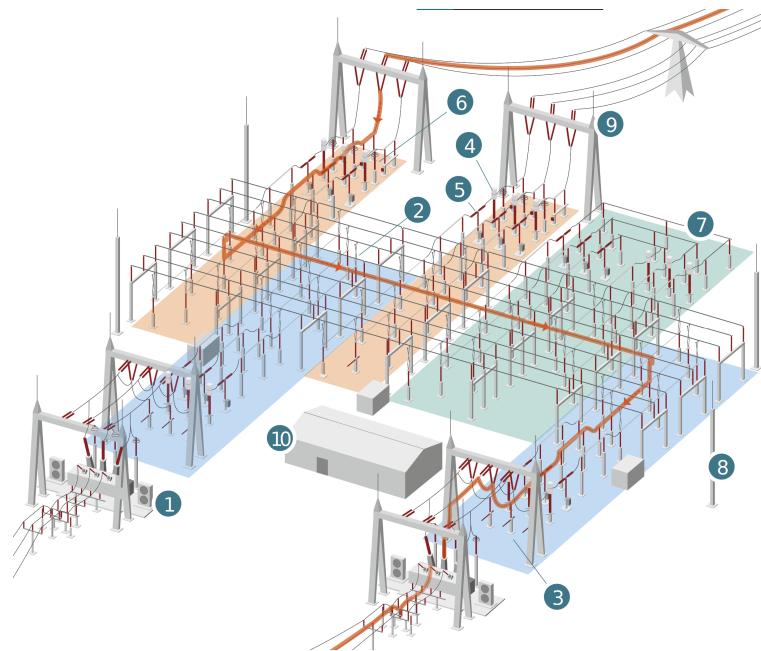
Netzebene 1	8 km
Netzebene 3	1'893 km
Netzebene 5	30'607 km
Netzebene 7	72'852 km

## 14 Schaltanlagen / Umspannwerke

### 14.1 Aufgabe

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

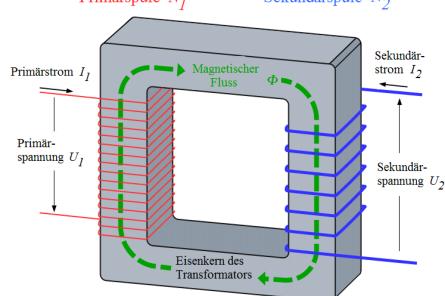
### 14.2 Aufbau



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

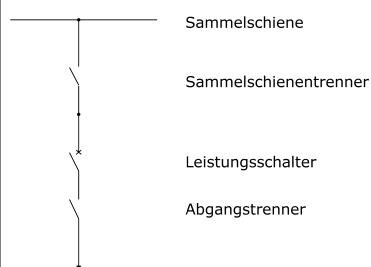
Spannungsabhängiger Widerstand, Bei hoher Spannung verringert sich Widerstand schlagartig



### 14.8 Schalfelder Aufbau

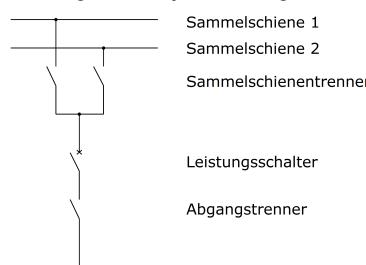
#### 14.8.1 Einfachsammelschiene

- übersichtliche und billige Lösung



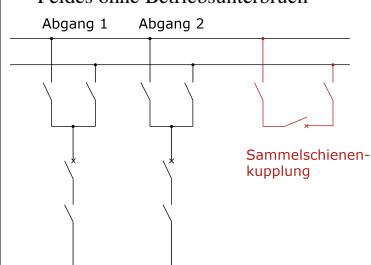
#### 14.8.2 Doppelsammelschiene

- ein Sammelschienenwechsel eines beliebigen Feldes jederzeit möglich



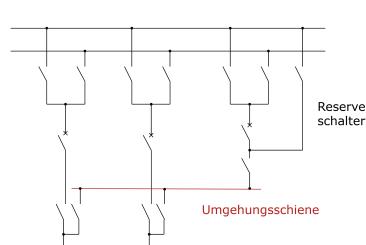
#### 14.8.3 Sammelschienenkupplung

- 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 Allgemein

Es muss immer beidseitig spannungsfrei sein, um ein Teil auszutauschen.  
Es darf kein Strom fließen.

#### 14.9.2 Ausschalten

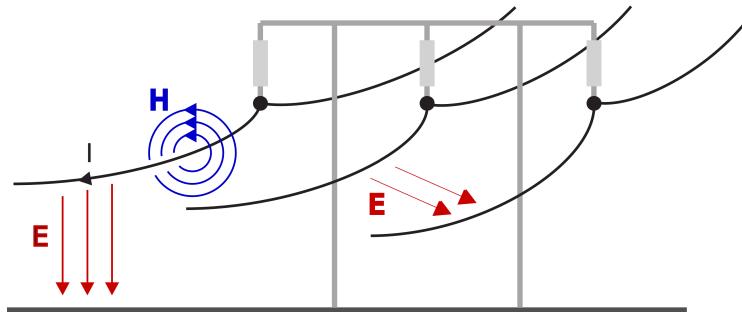
Beim Ausschalten werden Leistungsschalter zuerst geöffnet, dann Last- und Trennschalter

#### 14.9.3 Einschalten

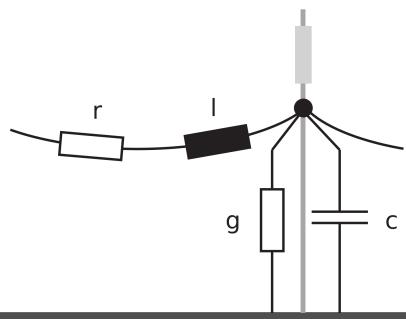
Beim Einschalten müssen zuerst Trennschalter, dann Lastschalter und zuletzt Leistungsschalter geschlossen werden

## 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) .....	$\text{m}$
$[\rho]$	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:

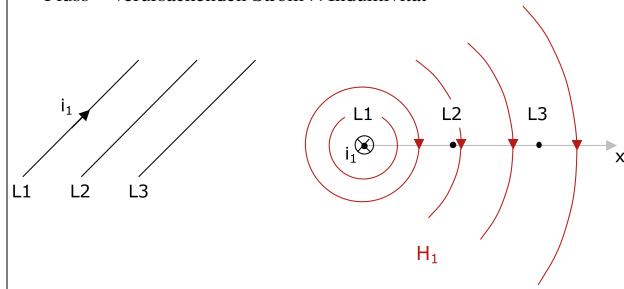
Bei **Bündelleitern** wird der Skin-Effekt durch die Aufspaltung des Querschnitts **abgeschwächt**.

### 15.4 Ableitungsbelag

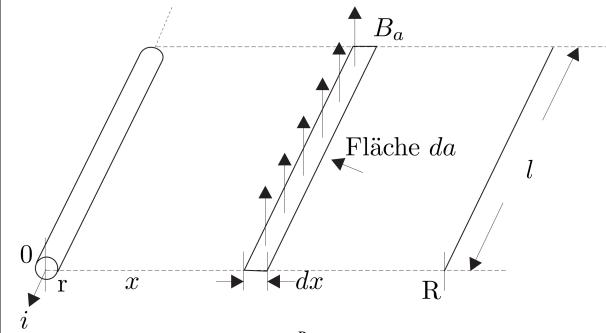
- Ursache: die Verluste des Dielektrikums zwischen den Leitern und zwischen Leiter und Erde
- $G'$  ist sehr klein und kann bei normalen Betriebsverhältnissen gegenüber  $\omega C'$  vernachlässigt werden
- $G'$  ist grösser wenn Teilentladungen (Corona-Effekt) auftreten.
- **Witterungsabhängig**

## 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

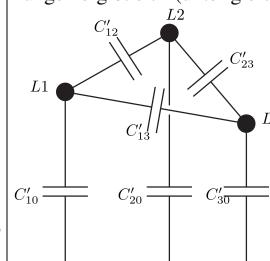
$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \frac{d}{0,78 \cdot r} \right) \quad d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

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

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

## 15.7 Kapazitätsbelag

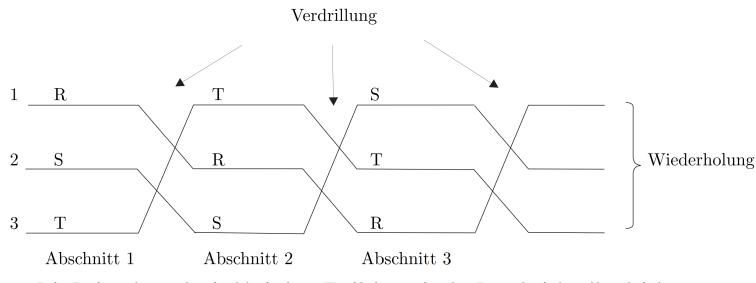
Die elektrische Feldstärke durch Leiter  $L_1$  sowie der Potentialunterschied zwischen Punkten außerhalb von  $L_1$  erzeugen den Kapazitätsbelag. Durch Überlagerung der Einzelspannungen ergibt sich (unter gleichen Annahmen wie für  $L'$ ):



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

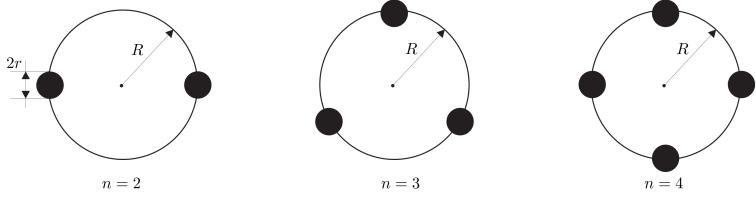
$[C']$	Kapazitätsbelag .....	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$
$[k]$	Geometriefaktor (abhängig z. B. von Masthöhe, Durchhang) .....	-
$[d]$	Mittlerer Leiterabstand .....	$\text{m}$
$[r]$	Leiterradius .....	$\text{m}$

## 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

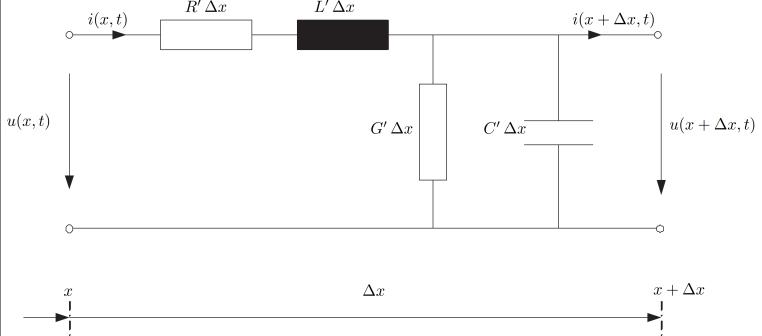


$$r_{eq} = \sqrt[n]{n \cdot R^{(n-1)} \cdot r}$$

[ $r_{eq}$ ]	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

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_a + \underline{U}_b = \underline{U}^+ \cdot e^{-\gamma x} + \underline{U}^- \cdot e^{\gamma x}$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_a + \underline{I}_b = \underline{I}^+ \cdot e^{-\gamma x} + \underline{I}^- \cdot e^{\gamma x}$$

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

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

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

$$\underline{U}(x = 0) = \underline{U}_1 = \underline{U}^+ + \underline{U}^-$$

$$\underline{I}(x = 0) = \underline{I}_1 = \frac{1}{Z_W} (\underline{U}^+ - \underline{U}^-)$$

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

$$\underline{U}^+ = \frac{\underline{U}_1 + Z_W \cdot \underline{I}_1}{2}$$

$$\underline{U}^- = \frac{\underline{U}_1 - Z_W \cdot \underline{I}_1}{2}$$

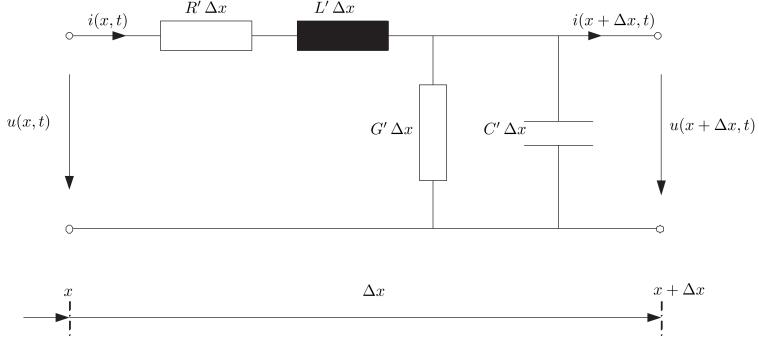
$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} - Z_W \cdot \underline{I}_1 \cdot \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 \cdot \cosh(\gamma x) - Z_W \cdot \underline{I}_1 \cdot \sinh(\gamma x)$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_1 \cdot \cosh(\gamma x) - \frac{\underline{U}_1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma x)$$

## 16.3 Allgemein und für 50Hz

### 16.3.1 Modell Allgemein mit exakter Zweitor-Gleichung



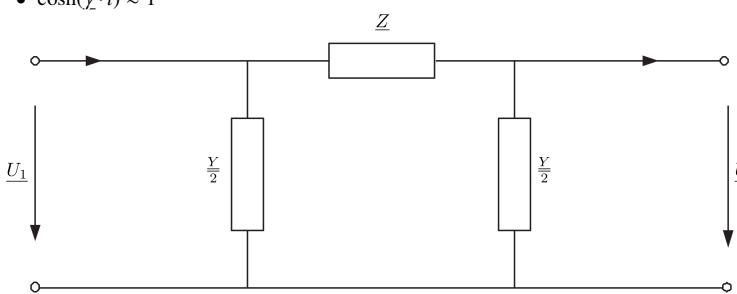
$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot l) & \underline{Z}_W \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \\ \frac{1}{\underline{Z}_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot l) & \cosh(\gamma \cdot l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

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

### 16.3.2 Modell Vereinfacht

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

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



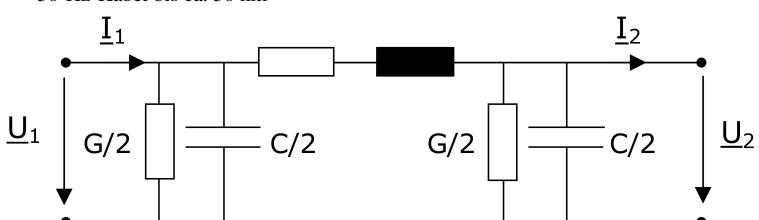
$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \underline{Z} \cdot \frac{Y}{2} & \underline{Z} \\ \frac{Y}{2} \cdot (2 + \underline{Z} \cdot \frac{Y}{2}) & 1 + \underline{Z} \cdot \frac{Y}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

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

### 16.4 Vereinfachung für "kurze" Leitungen

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

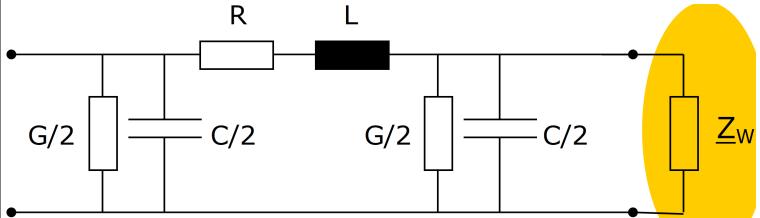
- 50-Hz-Freileitungen bis ca. 250 km
- 50-Hz-Kabel bis ca. 50 km



## 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

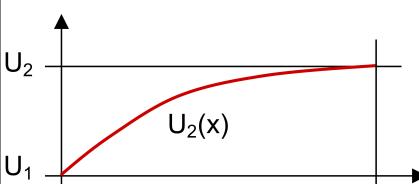
- Die Lastimpedanz ist niedriger als die Wellenimpedanz.
- Die Last nimmt mehr als die natürliche Leistung auf.
- Die Längsinduktivität „verbraucht“ mehr Blindleistung als die Querkapazität „erzeugt“.
- Die Spannung am Leitungsende ist tiefer als am Leitungsanfang.

### 17.5 Praxis

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

### 17.6 Leerlauf

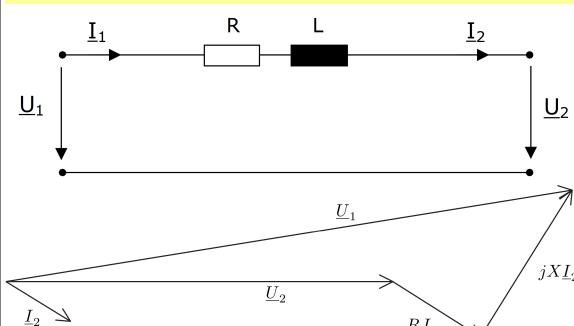
- Extremfall der unternatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Kapazität
- Spannung steigt entlang der Leitung an
- Spannungsüberhöhung am Leitungsende (Ferranti Effekt)



### 17.7 Kurzschluss

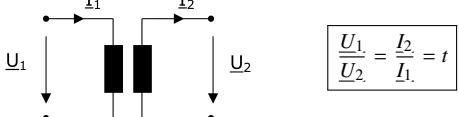
- Extremfall der übernatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Induktivität
- Spannung sinkt entlang der Leitung ab

### 17.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung

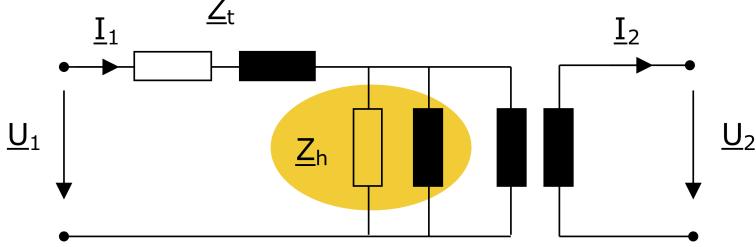


## 18 Transformatormodell

### 18.1 Idealer Transformator

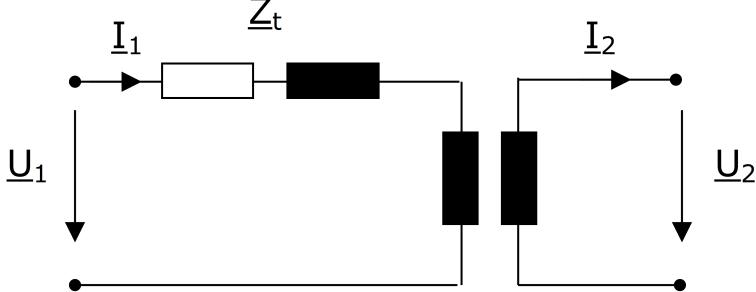


### 18.2 Reales Transformatormodell



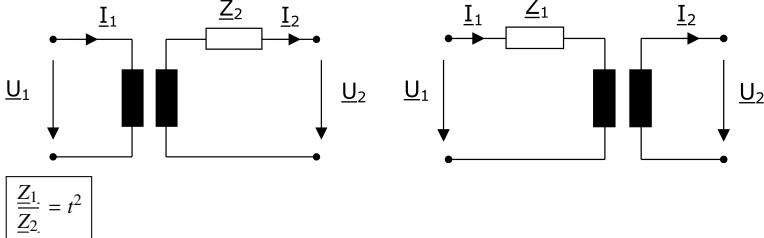
- Streuverluste
- Wicklungsverluste
- Kernverluste

### 18.3 Praktisches Transformatormodell



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

### 18.4 Umrechnung von Impedanzen



### 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:  $t$

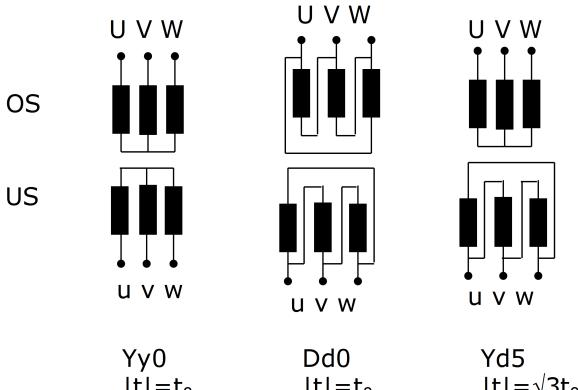
#### Mögliche Schaltungen

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

#### Bezeichnung

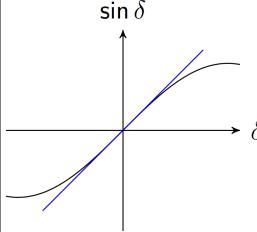
- 1. Buchstabe (groß): Schaltung Oberspannungsseite
- 2. Buchstabe (klein): Schaltung Unterspannungsseite
- Zahl: Phasendrehung = Zahl  $\times 30^\circ$

### 18.6 Schaltgruppen

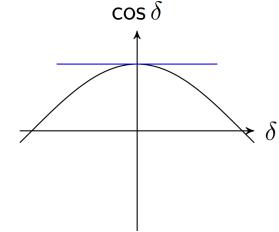


## 19 Leistungsfluss über eine Leitung

### 19.0.1 Mathematische Vereinfachungen im Voraus



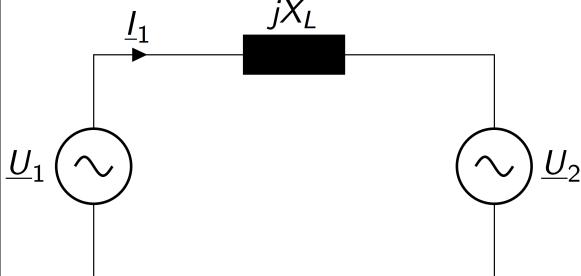
- für kleinere Winkel:  $\sin \delta \approx \delta$
- Maximale Steigung



- für kleinere Winkel:  $\cos \delta \approx 1$
- Minimale Steigung

### 19.1 Leistungsfluss

- Verlustlose Leitung
- Ideale Spannungsquellen  $U_1$  und  $U_2$



### 19.2 Leistungsübertragung

$$U_1 = U_1 \cdot e^{j \cdot \theta_1} \quad U_2 = U_2 \cdot e^{j \cdot \theta_2}$$

$$X_L = \omega \cdot L \quad X_L = \omega \cdot L' \cdot l \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$I_1 = \frac{U_1 - U_2}{j \cdot X_L} = \frac{U_1 \cdot e^{j \cdot \theta_1} - U_2 \cdot e^{j \cdot \theta_2}}{j \cdot X_L}$$

$$I_1^* = \frac{U_1 \cdot e^{-j \cdot \theta_1} - U_2 \cdot e^{-j \cdot \theta_2}}{-j \cdot X_L} = \frac{j}{X_L} (U_1 \cdot e^{-j \cdot \theta_1} - U_2 \cdot e^{-j \cdot \theta_2})$$

$$\delta = \theta_1 - \theta_2$$

$$S_1 = U_1 \cdot I_1^* \quad S_1 = P_1 + j \cdot Q_1$$

$$S_1 = U_1 \cdot U_2 \cdot \underbrace{\frac{1}{X_L} \cdot \sin(\delta)}_{P_1} + j \left( \underbrace{U_1^2 \cdot \frac{1}{X_L} - U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cos(\delta)}_{Q_1} \right)$$

$$P_1 = \text{Re}\{U_1 \cdot I_1^*\}$$

$$P_1 = U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cdot \sin(\delta)$$

$$Q_1 = \text{Im}\{U_1 \cdot I_1^*\}$$

$$Q_1 = U_1^2 \cdot \frac{1}{X_L} - U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cos(\delta)$$

$U_1$	Effektive Spannungen am Leitungsanfang	.....	V
$U_2$	Effektive Spannungen am Leitungsende	.....	V
$\theta_1$	Phasenwinkel der Spannungen am Leitungsanfang	..	rad
$\theta_2$	Phasenwinkel der Spannungen am Leitungsende	...	rad
$j$	Imaginäre Einheit ( $j^2 = -1$ )	.....	-
$\omega$	Kreisfrequenz	.....	rad/s
$f$	Netzfrequenz	.....	Hz
$L$	Induktivität der Leitung	.....	H
$L'$	Induktivität pro Längeneinheit	.....	H/m
$l$	Leitungslänge	.....	m
$X_L$	Reaktanz der Leitung	.....	$\Omega$
$I_1$	Strom am Leitungsanfang	.....	A
$I_1^*$	Komplex konjugierter Strom	.....	A
$S_1$	Scheinleistung am Leitungsanfang	.....	VA
$P_1$	Wirkleistung	.....	W
$Q_1$	Blindleistung	.....	VAR
$\delta$	Phasendifferenz	.....	rad

## 19.3 Praxis (Vereinfachung)

- $U_1 \approx U_2$
- $\delta$  in der Regel klein,  $\delta \leq 40^\circ$

Mit den Vereinfachungen (Anfangs Kapitel) und den aufgeführten Punkten ergibt sich:

$$P_1 = U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cdot \delta$$

$$Q_1 = U_1 \cdot \frac{1}{X_L} \cdot (U_1 - U_2)$$

## 19.3.1 Erkenntnisse für Wirk- und Blindleistung

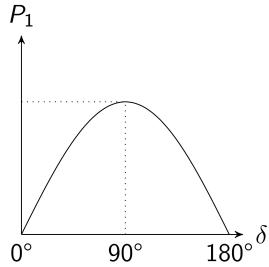
### • Wirkleistung

- Stark abhängig von der Spannungswinkeldifferenz  $\delta$
- wenig abhängig von der Spannungsbetrag  $U_1, U_2$

### • Blindleistung

- wenig von der Spannungswinkeldifferenz  $\delta$
- Stark abhängig von der Spannungsbetragsdifferenz  $U_1 - U_2$

## 19.4 Maximale Wirkleistungsübertragung

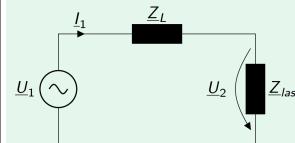


$$P_{1\max} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L}$$

## 20 Lastflussproblem

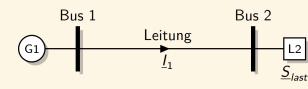
### 20.1 Problemformulierung

#### Schaltungsanalyse



- Gegeben: Impedanzen
- Strom  $I_1$  mit dem ohmschen Gesetz berechnen

#### Elektrische Energienetze



- Gegeben: Komplexe Leistung
- Wie berechnen wir den Strom  $I_1$

#### Schaltungsanalyse

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_L + Z_{last}}$$

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot Z_{last}}{Z_L + Z_{last}}$$

- Explizite Gleichung für  $U_2$
- Lineares Problem

#### Elektrische Energienetze

$$S_{last} = \frac{U_2 I_1^*}{U_2} = \frac{U_2 I_1}{U_1 - Z_L I_1}$$

$$U_2 = U_1 - Z_L \frac{S_{last}}{U_2}$$

- Implizite Gleichung für  $U_2$
- Nichtlineare Gleichung

## 20.2 Analyse der Spannung-Leistung Verhältnisse

$$P_{last} = -U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cdot \sin \delta$$

$$Q_{last} = -U_1^2 \cdot \frac{1}{X_L} + U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cdot \cos \delta$$

Nach der Elimination von  $\delta$  ergibt sich:

$$P_{last}^2 + \left( Q_{last} + \frac{U_2^2}{X_L} \right)^2 - \frac{U_1^2 \cdot U_2^2}{X_L^2} = 0$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{U_1^2}{2} - Q_{last} \cdot X_L \pm \sqrt{\frac{U_1^4}{4} - P_{last}^2 \cdot X_L^2 - Q_{last} \cdot U_1^2 \cdot X_L}}$$

Voraussetzung, dass mindestens eine Lösung existiert, ist:

$$(2 \cdot Q_{last} \cdot X_L - U_1^2)^2 - 4 \cdot X_L^2 \cdot (P_{last}^2 + (Q_{last})^2) \geq 0$$

- 2 Lösungen für  $U_2$
- Stabile Lösung bei hohen Spannungen
- Instabile Lösung bei niedrigen Spannungen
- Die PV-Kurve wird auch „Nasenkurve“ genannt

### 20.2.1 PV-Kurve, Nasenkurve

