

# Energiesysteme

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

Autoren: Luca Loop, Ramon Schläpfer

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

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Energie- und Elektrizitätswirtschaft</b>	<b>3</b>	
1.1 Masseinheiten . . . . .	3	12
1.2 Umrechnungsfaktoren . . . . .	3	12
1.3 Dezimalfaktoren . . . . .	3	12
1.4 Energien . . . . .	3	13
1.5 Vor- und Nachteile Elektroenergie . . . . .	3	13
1.6 Anteil Elektrische Energie . . . . .	3	13
1.7 Leistung . . . . .	4	13
1.8 Schweizer Strom-Mix . . . . .	4	13
1.9 Investitions- und Kostenrechnung . . . . .	4	13
1.10 Kraftwerke im Vergleich . . . . .	4	13
<b>2 Wasserdargebot für Wasserkraft</b>	<b>5</b>	
2.1 Abflussganglinie . . . . .	5	13
2.2 Abflussdauerkurve . . . . .	5	13
2.3 Nutzwassermenge . . . . .	5	13
2.4 Triebwassersystem . . . . .	5	13
<b>3 Wasserkraft</b>	<b>5</b>	
3.1 Kontinuitätsgleichung des Durchflusses . . . . .	5	13
3.2 Bernoulli-Druck-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke . . . . .	5	13
3.3 Bernoulli-Höhen-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke . . . . .	5	13
3.4 Örtliche Energieverluste . . . . .	6	13
3.5 Reibungsverluste (Formel von Strickler) . . . . .	6	13
3.6 Verlusthöhe durch Rohreibung (Alternative zu Strickler) . . . . .	6	13
3.7 Reynolds-Zahl $Re$ . . . . .	6	13
3.8 Verlustbeiwert . . . . .	6	13
3.9 Nettogefälle $H_n$ . . . . .	6	13
3.10 Hydraulische Leistung $P_{hyd}$ . . . . .	6	13
3.11 Mechanische Leistung $P_{mech}$ (Turbinenleistung) . . . . .	6	13
3.12 Elektrische Leistung $P_{el}$ . . . . .	6	13
3.13 Elektrische Energie $E$ . . . . .	6	13
<b>4 Talsperren</b>	<b>7</b>	
4.1 Bogenstaumauer . . . . .	7	13
4.2 Gewichtsstaumauer . . . . .	7	13
4.3 Staudamm . . . . .	7	13
4.4 Hochwassersicherheit . . . . .	7	13
<b>5 Synchronmaschinen</b>	<b>7</b>	
5.1 Typen . . . . .	7	13
5.2 Betriebsarten Generator . . . . .	7	13
5.3 Drehmoment, Kippmoment, Stabilitätsgrenze, Leistung . . . . .	8	13
5.4 Zeigerdiagramm . . . . .	8	13
<b>6 Abschlussorgane bei Speicherkraftwerken</b>	<b>8</b>	
6.1 Schützen . . . . .	8	13
6.2 Klappen . . . . .	8	13
6.3 Drosselklappen . . . . .	8	13
6.4 Kugelschieber . . . . .	9	13
6.5 Ring- und Eckringschieber . . . . .	9	13
<b>7 Laufwasserkraftwerke</b>	<b>9</b>	
7.1 Stauanlagen bei Laufwasserkraftwerken . . . . .	9	13
7.2 Ort des Maschinenhauses . . . . .	9	13
7.3 Wasserfassung . . . . .	9	13
7.4 Entsender . . . . .	9	13
7.5 Verhinderung von Schwall und Sunk . . . . .	9	13
7.6 Abfluss-/Leistungsregelung . . . . .	9	13
7.7 Flusskraftwerkstypen . . . . .	10	13
7.8 Arten von Wehr- und Sektorverschlüssen . . . . .	10	13
<b>8 Wasserkraftwerk-Typen</b>	<b>10</b>	
8.1 Klassifizierung . . . . .	10	13
8.2 Einteilung nach technischen Aspekten . . . . .	10	13
8.3 Einteilung nach energiewirtschaftlichen Aspekten . . . . .	10	13
8.4 Einteilung nach Betriebsart . . . . .	10	13
8.5 Einteilung nach der installierten Leistung . . . . .	10	13
8.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten . . . . .	10	13
8.7 Wasserturbinen und Pumpen . . . . .	10	13
8.8 Laufwasserkraftwerke (LWK) . . . . .	10	13
8.9 LWK mit Kaplanturbinen . . . . .	11	13
8.10 LWK mit Rohrturbinen . . . . .	11	13
8.11 Wasserwirbelkraftwerk . . . . .	11	13
8.12 LWK mit Strafloturbinen . . . . .	11	13
8.13 Mitteldruckanlagen . . . . .	11	13
8.14 Pumpspeicherkraftwerke (PSW) . . . . .	11	13
8.15 Hochdruck- (Speicher-) Anlagen . . . . .	12	13
<b>8.16 Wasserschloss</b> . . . . .	12	12
<b>8.17 Gezeitenkraftwerke</b> . . . . .	12	12
<b>8.18 Wellenkraftwerk</b> . . . . .	12	12
<b>9 Kenngrößen Turbinen</b>	<b>13</b>	
9.1 Hydraulische Leistung . . . . .	13	13
9.2 Mechanische Leistung an der Turbinenwelle . . . . .	13	13
9.3 Winkelgeschwindigkeit . . . . .	13	13
9.4 Betriebszustände der Maschinengruppe . . . . .	13	13
9.5 Spezifische Drehzahl $n_q$ . . . . .	13	13
<b>10 Turbinen</b>	<b>13</b>	
10.1 Pelzturbine . . . . .	13	13
10.2 Francisturbinen . . . . .	13	13
10.3 Reaktionsturbinen . . . . .	13	13
10.4 Kaplanturbinen . . . . .	14	13
10.5 Rohrturbinen (= horizontale Kaplanturbinen) . . . . .	14	13
10.6 Strafloturbinen . . . . .	14	13
10.7 Speicherpumpen und Pumpturbinen . . . . .	14	13
10.8 Wahl des Generators . . . . .	15	13
10.9 Kochrezept zur Grob-Auslegung von Pumpen und Turbinen . . . . .	15	13
<b>11 Thermische Kraftwerke/ Dampfkraftwerke</b>	<b>15</b>	
11.1 Funktionsweise . . . . .	15	15
11.2 Thermodynamik . . . . .	15	15
11.3 Kreisprozesse . . . . .	15	15
11.4 Joule-Prozess für Gasturbinen . . . . .	16	15
11.5 Enthalpie . . . . .	16	15
11.6 Mollier-Diagramm . . . . .	16	15
11.7 Anleitung Mollier Diagramm (s - h) . . . . .	16	15
11.8 Varianten . . . . .	17	15
11.9 Komponenten . . . . .	17	15
<b>12 Atomkraftwerk</b>	<b>17</b>	
12.1 Kernphysikalische Grundlagen . . . . .	17	17
12.2 Spaltung schwerer Kerne . . . . .	17	17
<b>13 Gasturbinenkraftwerke</b>	<b>17</b>	
13.1 Vor- und Nachteile . . . . .	17	17
13.2 Funktionsprinzip . . . . .	18	17
13.3 Thermodynamische Grundlage . . . . .	18	17
13.4 Gasturbine mit Luftvorwärmer . . . . .	18	17
13.5 Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD) . . . . .	18	17
13.6 Solarthermische Kraftwerke . . . . .	18	17
13.7 Geothermische Kraftwerke . . . . .	18	17
13.8 Verstromung von Biomasse . . . . .	18	17
<b>14 Windenergie</b>	<b>19</b>	
14.1 Windeleistung . . . . .	19	19
14.2 Netzkopplung . . . . .	19	19
<b>15 Netze Allgemein</b>	<b>19</b>	
15.1 Interessen der Erzeuger . . . . .	19	19
15.2 Anforderungen an das Stromnetz . . . . .	19	19
15.3 Herausforderungen . . . . .	19	19
<b>16 Netzebenen</b>	<b>20</b>	
16.1 NE1: Übertragungsnetz . . . . .	20	20
16.2 NE3: Überregionales Verteilnetz . . . . .	20	20
16.3 NE5: Verteilnetz . . . . .	20	20
16.4 NE7: Verteilnetz . . . . .	20	20
<b>17 Netztopologien</b>	<b>21</b>	
17.1 Strahlnetz . . . . .	21	21
17.2 Ringnetz . . . . .	21	21
17.3 Maschennetz . . . . .	21	21
<b>18 Leitungen</b>	<b>21</b>	
18.1 Freileitungen . . . . .	21	21
18.2 Kabelleitungen . . . . .	22	21
<b>19 Schaltanlagen / Umspannwerke</b>	<b>22</b>	
19.1 Aufgabe . . . . .	22	22
19.2 Aufbau . . . . .	22	22
19.3 Komponenten . . . . .	22	22
19.4 Schaltfelder Aufbau . . . . .	23	22
19.5 Regeln beim Schalten (Reihenfolge) . . . . .	23	22

<b>20 Leitungsbeläge</b>	<b>23</b>	<b>26 Störungen in Stromnetzen</b>	<b>28</b>
20.1 Elektrisches und magnetisches Feld . . . . .	23	26.1 Normaler Betriebszustand . . . . .	28
20.2 Widerstandsbelag . . . . .	23	26.2 Definitionen: Fehler, Störung, Schaden . . . . .	28
20.3 Skin-Effekt . . . . .	23	26.3 Fehlerarten . . . . .	28
20.4 Ableitungsbelag . . . . .	23	26.4 Sternpunktbehandlung . . . . .	28
20.5 Induktivitätsbelag . . . . .	24	26.5 Sternpunktspannung 2 (Störimpedanz $\Delta Z$ beigefügt) . . . . .	29
20.6 Induktivitätsbelag . . . . .	24		
20.7 Kapazitätsbelag . . . . .	24		
20.8 Verdrillung . . . . .	24		
20.9 Bündelleiter . . . . .	24		
<b>21 Leitungsmodell</b>	<b>25</b>	<b>27 Leitechnik</b>	<b>29</b>
21.1 Leitungsgleichungen . . . . .	25	27.1 Ruhestromauslösung . . . . .	29
21.2 Lösung der Leitungsgleichung . . . . .	25		
21.3 Allgemein und für 50Hz . . . . .	25		
21.4 PI-Ersatzschaltung (Modell Vereinfacht) . . . . .	25		
<b>22 Betriebsverhalten</b>	<b>26</b>	<b>28 Schutztechnik</b>	<b>29</b>
22.1 Natürliche Leistung . . . . .	26	28.1 Aufgaben der Schutztechnik . . . . .	29
22.2 Wellenimpedanz . . . . .	26	28.2 Selektivität . . . . .	29
22.3 Unternatürliche Belastung . . . . .	26	28.3 Überstrom-Zeit-Schutz . . . . .	29
22.4 Übernatürliche Belastung . . . . .	26	28.4 Unabhängiger Maximalstrom Zeitschutz - UMZ . . . . .	29
22.5 Praxis . . . . .	26	28.5 Abhängiges Maximalstrom Zeitschutz - AMZ . . . . .	29
22.6 Leerlauf . . . . .	26	28.6 Zeitstaffelung . . . . .	29
22.7 Kurzschluss . . . . .	26	28.7 Distanzschutz . . . . .	29
22.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung . . . . .	26	28.8 Differentialschutz . . . . .	30
<b>23 Transformator</b>	<b>26</b>	28.9 Schwefelhexafluorid (SF6) . . . . .	30
23.1 Idealer Transformator . . . . .	26		
23.2 Verluste im Transformator . . . . .	26		
23.3 Praktisches Transformatormodell . . . . .	26		
23.4 Umrechnung von Impedanzen . . . . .	26		
23.5 Leerlauf / Kurzschluss . . . . .	26		
23.6 Dreiphasentransformatoren . . . . .	27		
23.7 Schaltgruppen . . . . .	27		
<b>24 Leistungsfluss über eine Leitung</b>	<b>27</b>	<b>29 Stabilität</b>	<b>30</b>
24.1 Leistungsfluss . . . . .	27	29.1 Stabilitätsbegriff . . . . .	30
24.2 Leistungsübertragung . . . . .	27	29.2 Aufgaben des Netzbetriebs . . . . .	30
24.3 Praxis (Vereinfachung) . . . . .	27	29.3 Statische Stabilität (Kleinsignalstabilität) . . . . .	30
24.4 Maximale Wirkleistungsübertragung . . . . .	27	29.4 Dynamische Stabilität (Grosssignalstabilität) . . . . .	30
<b>25 Lastflussproblem (P-Q Problem)</b>	<b>28</b>	<b>30 Frequenzregelung</b>	<b>30</b>
25.1 Problemformulierung . . . . .	28	30.1 Modell eines einzelnen Synchrongenerators . . . . .	30
25.2 Analyse der Spannung-Leistung Verhältnisses . . . . .	28	30.2 Modell des elektrischen Netzes . . . . .	30
		30.3 Abweichungen vom Lastfahrplan . . . . .	31
		30.4 Transientenregelung und Schwingungsdämpfung . . . . .	31
		30.5 (n-1)-Sicherheitsprinzip . . . . .	31
		30.6 Primärregelung . . . . .	31
		30.7 Sekundärregelung . . . . .	31
		30.8 Tertiärregelung . . . . .	31
		30.9 Regelkonzept $\omega \neq 50\text{ Hz}$ – was passiert? . . . . .	31
		30.10 Europäisches Netzmodell - Kraftwerksverlust . . . . .	31
		<b>31 Transiente Stabilität</b>	<b>32</b>
		31.1 Mechanische zu Elektrischer Leistung . . . . .	32
		31.2 Flächenkriterium . . . . .	32
		<b>32 Spannungsregelung</b>	<b>32</b>
		32.1 Spannungskollaps . . . . .	32
		32.2 Spannungs-Blindleistungs-Regelung . . . . .	32
		32.3 Grundlagen Spannungshaltung . . . . .	33
		32.4 Spannunshaltung in der Schweiz . . . . .	33
		32.5 Kraftwerke . . . . .	33
		32.6 Unterlagerte Netze . . . . .	33

# 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

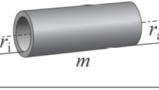
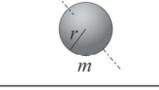
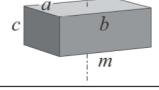
## 1.4.9 Rotationsenergie W<sub>rot</sub>

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

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

[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 Vor- und Nachteile Elektroenergie

### Vorteile

- einfach zu verteilen
- beliebig klein dosierbar
- gut regulierbar
- Einfach in andere Energieformen wandelbar
- problemlos und sauber in der Anwendung (keine Emissionen)
- Vielfältig einsetzbar

### Nachteile

- leistungsgebunden
- Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Bedarf
- kann nicht direkt aus der Natur gewonnen werden
- Speicherung ist aufwendig

## 1.6 Anteil Elektrische Energie

In der Schweiz beträgt der Anteil Elektrischer Energie bei rund 25% bis 30% des gesamten Endenergieverbrauchs.

## 1.7 Leistung

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

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

### 1.7.2 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 .....	$W = \frac{J}{s}$
[ $\dot{m}$ ] 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 .....	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

### 1.7.3 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

### 1.7.4 Mechanische Leistung $P_v$

$P_v = F \cdot v$	$F = m \cdot g$
[ $P_v$ ] 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 .....	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$

### 1.7.5 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 .....	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

### 1.7.6 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 .....	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
[ $h$ ] Höhendifferenz .....	m

### 1.7.7 Verminderung des Wasserstands in einem Stausee $\Delta h$

$\Delta h = \frac{V}{A_{\text{Stausee}}} = \frac{Q \cdot t}{A_{\text{Stausee}}}$	
[ $h$ ] Wasserstandssenkung im Stausee .....	m
[ $V$ ] Entnommenes Wasservolumen .....	$\text{m}^3$
[ $A_{\text{Stausee}}$ ] Oberfläche des Stausees .....	$\text{m}^2$
[ $Q$ ] Volumenstrom (z. B. Turbinenstrom) .....	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
[ $t$ ] Zeitdauer der Entnahme .....	s

### 1.7.8 Drehstrom-Leistungsberechnung $P_O$

$P_O = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$	
[ $P_O$ ] Wirkleistung .....	$W = \frac{J}{s}$
[ $U$ ] Verkettete Spannung .....	V
[ $I$ ] Stromstärke .....	A
[ $\cos(\varphi)$ ] Leistungsfaktor .....	-

## 1.8 Schweizer Strom-Mix

38.1%	Kernkraft
32.3%	Speicherwerkse
24.2%	Laufkraftwerk
5.4%	konventionell-thermische Kraftwerk
1.52 %	Kehrichtverbrennungsanlagen
0.29 %	Biomasse
0.19 %	Abwasserreinigungsanlagen
0.13 %	Photovoltaik
0.06 %	Windkraft

## 1.9 Investitions- und Kostenrechnung

### 1.9.1 Annuitätsfaktor $A$

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

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

### 1.9.2 Kapitalkosten $K_K$

$$K_K = A \cdot I$$

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

### 1.9.3 Unterhaltskosten $K_U$

$$K_U = p_U \cdot I$$

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

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

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

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

### 1.9.5 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 .....	$W = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \frac{J}{s}$

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

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

### 1.9.7 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 €

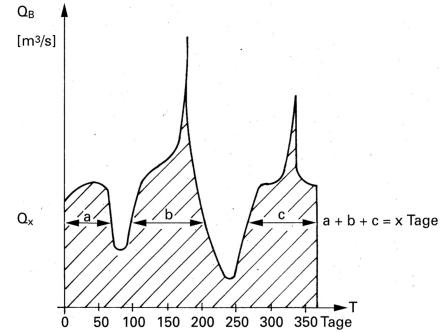
## 1.10 Kraftwerke im Vergleich

Kraftwerksart	$P_{el}/\text{MW}$	$\eta/\%$	$W/P_{el}$ kWh/kW
Kernkraftwerke	500...1300	33...37	1,3...4
Dampfkraftwerke	100...1000	35...43	0,5...1,1
Wasserkraftwerke	10...820	85...95	0,2...0,4
GuD-Kraftwerke	100...300	50...58	0,8...1,1
Gasturbinenkraftwerke	10...265	34...39,5	0,2...0,5
BHKW	0,05...20	32...40	0,8...1,3
Windkraftanlagen	0,01...5	20...30	$7 \cdot 10^3 \dots 20 \cdot 10^3$
Solarkraftwerke	...80	10...14	5...10
PV-Kraftwerke	...7	6...12	$7 \cdot 10^3 \dots 20 \cdot 10^3$

## 2 Wasserdargebot für Wasserkraft

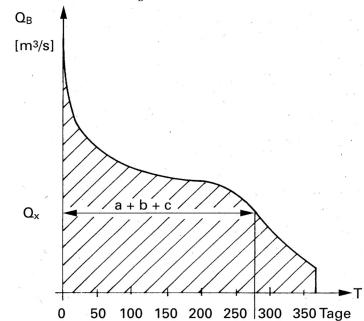
### 2.1 Abflussganglinie

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



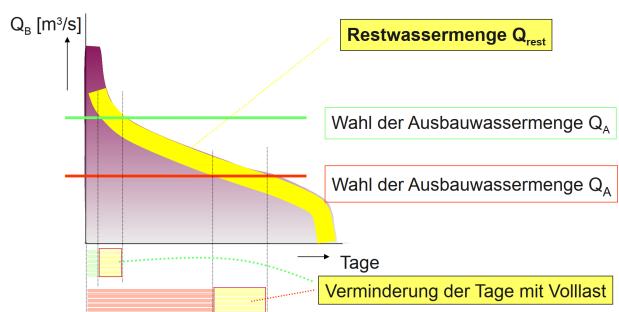
### 2.2 Abflussdauerkurve

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 .....  $\frac{m^3}{s}$

#### 2.3.1 Mindest Restwassermenge $Q_{Rest}$

$Q_{Rest}$  muss aufgrund von ökologischen Mindestanforderungen **immer** gewährleistet sein.

#### Abflussmenge $Q_{347}$

#### Restwassermenge

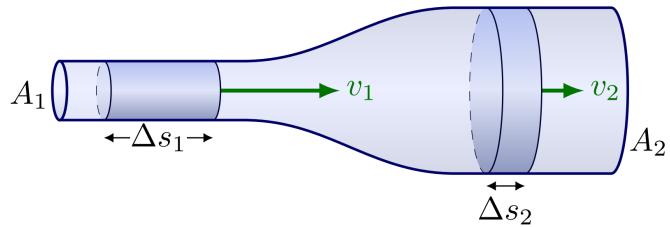
bis 60 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	50 l/s
und für je weitere 10 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	8 l/s mehr
bis 160 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	130 l/s
und für je weitere 10 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	4,4 l/s mehr
bis 500 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	280 l/s
und für je weitere 100 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	31 l/s mehr
bis 2500 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	900 l/s
und für je weitere 100 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	21,3 l/s mehr
bis 10 000 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	2 500 l/s
und für je weitere 1 000 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	150 l/s mehr
ab 60 000 l/s Abflussmenge $Q_{347}$	10 000 l/s

### 2.4 Triebwassersystem

Ein Triebwassersystem führt das Wasser vom Speicher zur Turbine eines Wasserkraftwerks. Es beinhaltet die Leitungswägen wie Stollen und Druckleitungen. Verluste darin sind bei Speicherwerkwerken bedeutsam, bei Laufwasserkraftwerken jedoch meist vernachlässigbar.

## 3 Wasserkraft

### 3.1 Kontinuitätsgleichung des Durchflusses



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

$$Q = A \cdot v$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

$$Q = \dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{const}$$

$[Q_x]$  Durchflussrate .....  $\frac{m^3}{s}$

$[A_x]$  Querschnittsfläche .....  $m^2$

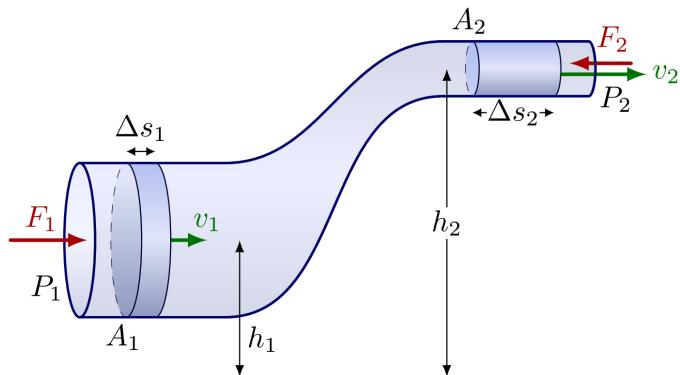
$[v_x]$  Fließgeschwindigkeit .....  $\frac{m}{s}$

$[\dot{V}]$  Volumenstrom (Volumen pro Zeit) .....  $\frac{m^3}{s}$

$[\Delta V]$  Volumenänderung .....  $m^3$

$[\Delta t]$  Zeitänderung ..... s

### 3.2 Bernoulli-Druck-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke



$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z + p = E_{kin} + E_{pot} + p = E_{tot} = H \cdot \rho \cdot g = \text{const.}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

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

$$p = \left( H - z - \frac{v^2}{2g} \right) \cdot \rho \cdot g$$

$[E_{kin}]$  Kinetische Energie (pro Kubikmeter) .....  $\frac{J}{m^3}$

$[E_{pot}]$  Potentielle Energie (pro Kubikmeter) .....  $\frac{J}{m^3}$

$[p]$  Druckenergie (pro Kubikmeter) .....  $\frac{J}{m^3}$

### 3.3 Bernoulli-Höhen-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke

$$H = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + \sum H_v \quad h_p = H - z - \frac{v^2}{2g} \quad h_v = \frac{v^2}{2g} \quad l_h = \frac{z}{H} \cdot 100$$

$[H]$  Bruttofallhöhe ..... m

$[z]$  Höhe ..... m

$[p]$  Druck ..... Pa =  $\frac{N}{m^2}$

$[\rho]$  Dichte des Wassers 1000  $\frac{kg}{m^3}$  .....  $\frac{kg}{m^3}$

$[g]$  Erdbeschleunigung .....  $\frac{m}{s^2}$

$[v]$  Geschwindigkeit .....  $\frac{m}{s}$

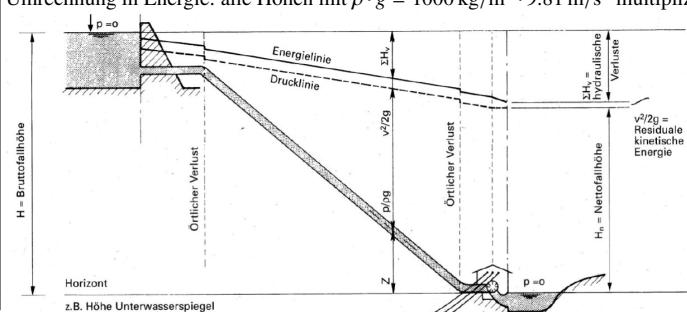
$[h_p]$  Druckhöhe ..... m

$[h_v]$  Geschwindigkeitshöhe ..... m

$[\sum H_v]$  Hydraulische Energieverluste ..... m

$[l_h]$  Höhenlage ..... %

Umrechnung in Energie: alle Höhen mit  $\rho \cdot g = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$  multiplizieren.



### 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 .....	$\frac{m}{s^2}$

Berechnung des Verlustbeiwert  $\zeta \in [0, 1]$  aus zwei gegebenen Durchmesser  $d_1$  und  $d_2$ . Für Rohrerweiterung:

$$\zeta = \left(1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right)^2$$

für  $d_1 < d_2$

### 3.5 Reibungsverluste (Formel von Strickler)

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

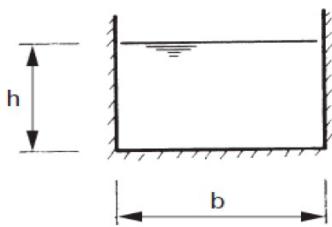
[ $h_{v,r}$ ]	Reibungsverlusthöhe .....	m
[ $v$ ]	Strömungsgeschwindigkeit .....	$\frac{m}{s}$
[ $L$ ]	Länge der Strömungsstrecke .....	m
[ $K_{St}$ ]	Rauigkeitsbeiwert nach Strickler	$\frac{m^{1/3}}{s}$
[ $R_h$ ]	Hydraulischer Radius .....	m

### 3.5.1 Tabelle Rauigkeitsbeiwert $K_{St}$ 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



$$F = b \cdot h$$

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

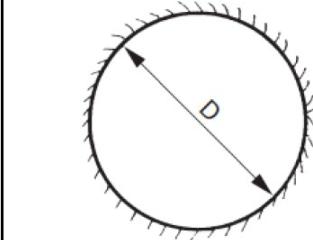
$$R_h = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h} \quad R_h = \frac{F}{P}$$

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

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

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

#### Kreisqueerschnitt



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

$$P = D \cdot \pi$$

$$R_h = \frac{D}{4} \quad R_h = \frac{F}{P}$$

### 3.6 Verlusthöhe durch Rohreibung (Alternative zu Strickler)

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

[ $h_{v,r}$ ]	Verlusthöhe durch Reibung .....	m
[ $L$ ]	Länge .....	m
[ $v_m$ ]	Mittlere Geschwindigkeit .....	$\frac{m}{s}$
[ $Q$ ]	Durchfluss .....	$\frac{m^3}{s}$
[ $d_i$ ]	Innendurchmesser .....	m
[ $d_{hy}$ ]	Hydraulischer Durchmesser .....	m
[ $I_u$ ]	Benetzter Umfang .....	m
[ $\lambda$ ]	Verlustbeiwert .....	-

Zusammenhang des hydraulischen Durchmessers:

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

### 3.7 Reynolds-Zahl Re

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

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

[ $Re$ ]	Reynolds-Zahl (dimensionslos) .....	-
[ $v_m$ ]	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit .....	$\frac{m}{s}$
[ $d_{hy}$ ]	Hydraulischer Durchmesser .....	m
[ $d_i$ ]	Innendurchmesser (für Kreisrohr gleich $d_{hy}$ ) .....	m
[ $v$ ]	Kinematische Viskosität .....	$\frac{m^2}{s}$

Temperatur °C	0	10	20	30
kinematische Viskosität $\nu$	$1.78 \cdot 10^{-6}$	$1.30 \cdot 10^{-6}$	$1.00 \cdot 10^{-6}$	$8.06 \cdot 10^{-7}$

### 3.8 Verlustbeiwert

$$\lambda = \left( \frac{1}{-2 \cdot \log \left( \frac{\epsilon}{3.71} \right)} \right)^2 \quad \lambda = \left( \frac{1}{-2 \cdot \log \left( \frac{k}{d_{hy} \cdot 3.71} \right)} \right)^2$$

[ $\lambda$ ]	Verlustbeiwert .....	-
[ $k$ ]	äquivalente Rauheit .....	mm
[ $d_{hy}$ ]	Hydraulischer Durchmesser .....	m

### 3.9 Nettogefälle $H_n$

$$H_n = H - \sum H_v - \frac{v^2}{2g} \quad \sum H_v = C \cdot Q^2$$

Achtung: Falls örtliche Energieverluste bereits berechnet wurde, kann auf den Term  $\frac{v^2}{2g}$  verzichtet werden.

[ $H_n$ ]	Nettofallhöhe .....	m
[ $H$ ]	Bruttogefälle .....	m
[ $\sum H_v$ ]	Summe der hydraulischen Verluste .....	m
[ $C$ ]	Faktor bei Bestimmung der Verluste .....	$\frac{s^2}{m^3}$
[ $Q$ ]	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 $P_{hyd}$

$$P_{hyd} = \frac{m \cdot g \cdot H_n}{t} \quad P_{el} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n \cdot \eta_{ges} \quad \frac{m}{t} = \rho \cdot Q$$

[ $P_{hyd}$ ]	Hydraulische Leistung .....	W
[ $m$ ]	Masse .....	kg
[ $H_n$ ]	Nettofallhöhe .....	m
[ $t$ ]	Zeit .....	s
[ $\rho$ ]	Dichte des Wassers, $\rho = 1000$ .....	$\frac{kg}{m^3}$
[ $Q$ ]	Nutzwassermenge .....	$\frac{m^3}{s}$
[ $\eta$ ]	Wirkungsgrad (Turbine, Generator) .....	-

### 3.11 Mechanische Leistung $P_{mech}$ (Turbinenleistung)

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

[ $P_{hyd}$ ]	Hydraulische Leistung .....	W
[ $\eta_t$ ]	Turbinenwirkungsgrad .....	-

### 3.12 Elektrische Leistung $P_{el}$

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

Falls mehr Wirkungsgrade als nur die der Turbine und des Generators angegeben sind, müssen diese zwingend ebenfalls berücksichtigt werden.

$$[\eta_g] \quad \text{Generatorwirkungsgrad} \dots \dots \dots -$$

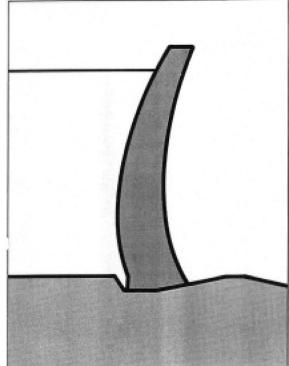
### 3.13 Elektrische Energie $E$

$$E = \int P_{el} \cdot dt \quad E = \int \eta_g \cdot \eta_t \cdot \rho \cdot Q \cdot H_n \cdot \rho \cdot g \cdot dt \quad E = \rho \cdot g \cdot \int \eta_g \cdot \eta_t \cdot Q \cdot H_n \cdot dt$$

[ $\eta_g$ ]	Generatorwirkungsgrad .....	-
[ $\eta_t$ ]	Turbinenwirkungsgrad .....	-
[ $Q$ ]	Nutzwassermenge .....	$\frac{m^3}{s}$
[ $H_n$ ]	Nettofallhöhe .....	m
[ $\rho$ ]	Dichte des Wassers, $\rho = 1000$ .....	$\frac{kg}{m^3}$
[ $t$ ]	Zeit .....	s

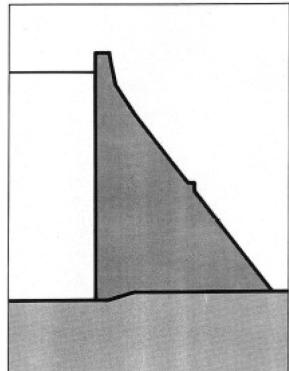
## 4 Talsperren

### 4.1 Bogenstaumauer



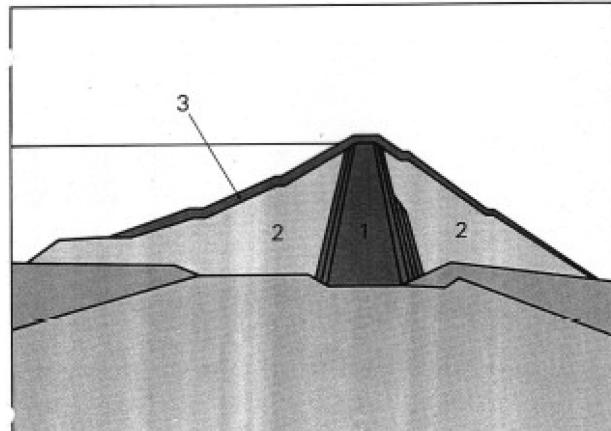
- Beton
- Schlank
- Kraft wird links und rechts in den Hang geleitet (Gewölbewirkung)
- Beispiel: Verzasca Damm (Tessin)

### 4.2 Gewichtsstaumauer



- Beton oder Mauerwerk
- Hohes Eigengewicht
- Kraft wird durch Eigengewicht gehalten
- Beispiel: Grande Dixence (Wallis) Höchste Gewichtsstaumauer der Welt

### 4.3 Staudamm



1. Kern
2. Stützkörper
3. Schutzschicht

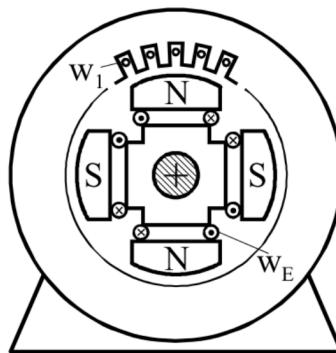
- Aufgeschüttet
- Flacher Böschungswinkel
- Steinschüttung unterschiedlicher Korngrösse
- Beispiel: Stausee Mattmark (Wallis) (Höchster Erdschüttedamm der Welt)

### 4.4 Hochwassersicherheit

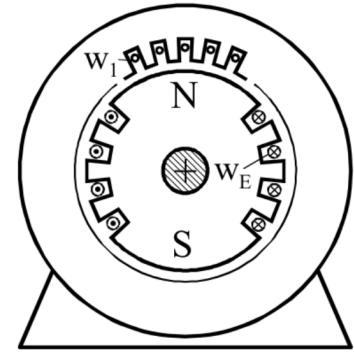
1. Überlaufbauwerk, Hochwasserentlastung  
=> verhindert den Abfluss über Krone
2. evtl. Mittelablass
3. Grundablass

## 5 Synchronmaschinen

### 5.1 Typen



Innenpol-Schenkelpolmaschine



Vollpolmaschine (Turbogenerator)

Zwei oder vier Pole

$n = 3000$  oder  $5000$  U/min

Sinusförmiges Magnetfeld

> 80 Einzelpole möglich

Langsam drehend, gut für Wasserkraft

Eher rechteckiges Magnetfeld

### 5.2 Betriebsarten Generator

#### 5.2.1 Leerlauf

$[U_p]$	Polradspannung .....	V
$[f]$	Frequenz = Mech.f * p .....	Hz
$[w_1 \xi_1]$	Wirk Windungszahl Stator .....	-
$[\Phi_h]$	Magn. Fluss durch Erregerstrom $I_E$	Wb

#### 5.2.2 Generator mit Last

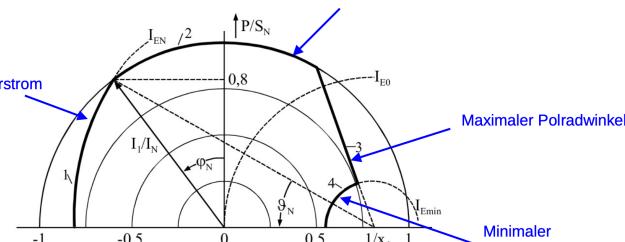
$U_1 = U_p + I_1 \cdot (R_1 + j(X_h + X_{\sigma 1}))$	$[U_1]$	Klemmenspannung .....	V
$X_d = X_h + X_{\sigma 1}$	$[U_p]$	Polradspannung .....	V
	$[U_x]$	Spannung über $X_d$ .....	V
	$[I_1]$	Statorstrom .....	A
$U_1 = U_p + I_1 \cdot (R_1 + j(X_h + X_{\sigma 1}))$	$[X_h]$	Hauptreaktanz .....	H
$\phi = \angle I_1 U_1$	$[X_{\sigma 1}]$	Streureaktanz .....	H
$I_1 = j \cdot \frac{U_p - U_1}{X_d}$	$[X_d]$	Synchronreaktanz .....	H
$I_1 = \frac{S}{3 \cdot U_1}$	$U_x = j \cdot I_1 \cdot X_d$	Phasenverschiebung .....	rad/ $^\circ$
	$[\phi]$	Polradwinkel .....	$^\circ$
	$[\theta]$		
	$[S]$	Scheinleistung .....	VA
$I_e = \frac{U_p}{U_1}$	$[I_e]$	Nennerregerstrom .....	A
	$[I_{e0}]$	Leerlauferregerstrom .....	A

Maximaler Ständerstrom  $I_1$

Maximaler Erregerstrom  $I_E \sim U_p$

Maximaler Polradwinkel

Minimale Erregerstrom  $I_{Emin}$



Leistungsdiagramm

### 5.3 Drehmoment, Kippmoment, Stabilitätsgrenze, Leistung

- Im Normalbetrieb  $\vartheta \approx 30^\circ$  (Turbogenerator),  $\vartheta = 20 - 25^\circ$  (Schenkelpolmaschine)
- Nenndrehmoment etwa halb so gross wie Kippmoment ( $\sin 30^\circ = 1/2$ )
- Sicherheitsmarge für transiente Vorgänge:  $\vartheta$  zwischen  $70 - 80^\circ$

$$P_1 = |U_1| \cdot |I_1| \cdot \cos \phi$$

$$P_1 = \frac{|U_1|}{X_d} \cdot \sin \vartheta$$

$$P_{tot} = 3 \cdot P_1$$

$$P_{tot} = P_{mech} = \Omega \cdot M = \frac{\omega}{p} \cdot M$$

$$M = P_{tot} \cdot \frac{p}{\omega} = 3 \cdot |U_1| \frac{|U_p|}{X_d} \sin \vartheta \cdot \frac{p}{\omega}$$

$$M_k = 3 \cdot |U_1| \frac{|U_p|}{X_d} \frac{p}{\omega} \Rightarrow \vartheta = 90^\circ$$

$[U_1]$	Klemmenspannung .....	V
$[U_p]$	Polradspannung .....	V
$[I_1]$	Statorstrom .....	A
$[X_d]$	Synchronreaktanz .....	H
$[\phi]$	Phasenverschiebung .....	rad/ $^\circ$
$[\vartheta]$	Polradwinkel .....	°
$[P]$	Leistung an $L_1$ .....	W
$[P_{tot}]$	Gesamtleistung .....	W
$[P_{mech}]$	Mechanische Leistung ....	W
$[\Omega]$	Kreisfrequenz Rotor .....	rad/s
$[\omega]$	Kreisfrequenz .....	rad/s
$[p]$	Polpaarzahl .....	-
$[M]$	Drehmoment .....	Nm
$[M_k]$	Kippmoment $ \vartheta  > 90^\circ$ ....	Nm

Gegeben:

Vekettete Spannung  $U_n = 13 \text{ kV}$ , Scheinleistung  $S = 100 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0.87$ , Synchronre Längsreaktanz  $X_d = 140\%$ , Subtransiente Reaktanz  $X_d'' = 15\%$ , Leerlauf Erregerstrom  $I_{E0}$ , Drehzahl  $n = 600 \text{ u/min}$

Gesucht:

Polradwinkel  $\vartheta$ , Polradspannung  $U_p$ , Erregerstrom  $I_{En}$  für  $X_h \approx const.$ , Polpaarzahl  $p$ , Anfangskurzschlusswechselstrom  $I_k''$

Lösung:

$$U_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{13 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 7.5 \text{ kV} \quad X_n = X_d \cdot \frac{U_n^2}{S} = 1.4 \cdot \frac{(23 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 2.365 \Omega$$

$$I_1 = \frac{S}{3 \cdot U_1} = \frac{100 \text{ MVA}}{3 \cdot 7.5 \text{ kV}} = 4.441 \text{ kA}$$

$$U_x = jX_n \cdot I_1 = 2.37 \Omega \cdot 4.441 \text{ kA} = 10.53 \text{ kV}$$

$\Rightarrow U_x$  In Zeigerdiagramm mit Winkel  $\varphi$  gegenüber  $U_1$  eintragen,  $U_p$  und  $\vartheta$  auslesen.

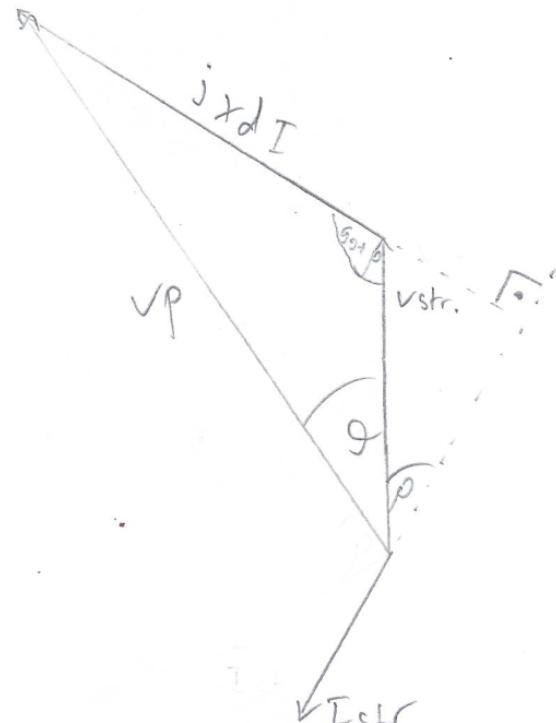
$\Rightarrow U_p = 15.5 \text{ kV}, \vartheta = 35^\circ$

$$I_{En} = I_{E0} \cdot \frac{U_p}{U_1} = 400 \text{ A} \cdot \frac{15.5 \text{ kV}}{7.5 \text{ kV}} = 826 \text{ A}$$

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \text{ min/s} \cdot 50 \text{ Hz}}{600 \text{ u/min}} = 5$$

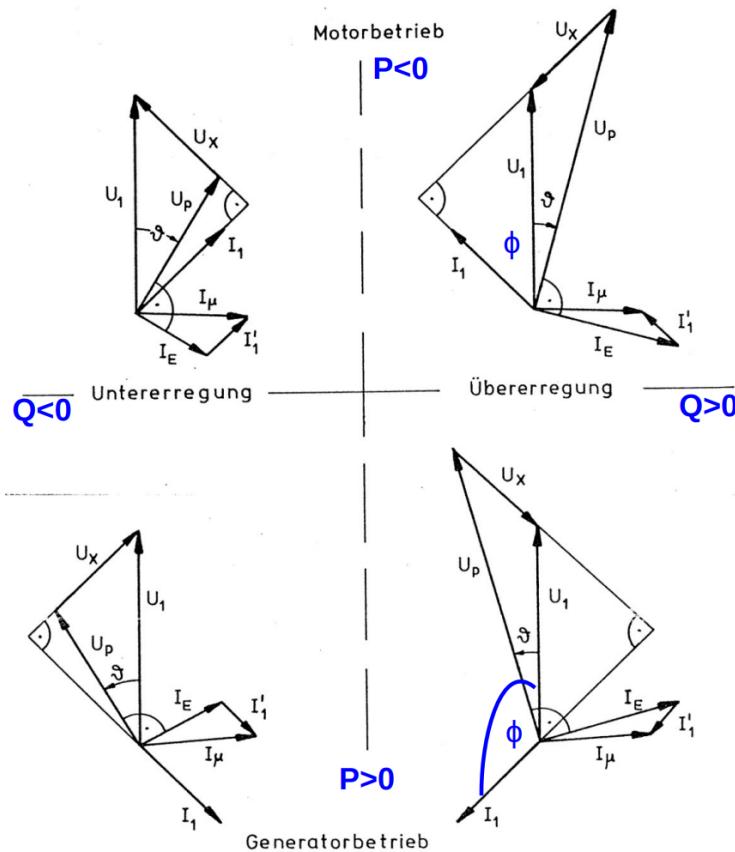
$$X_n'' = X_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S}$$

$$I_k'' = \frac{U_1}{X_n''}$$



### 5.4 Zeigerdiagramm

- Verbraucherzählfeilsystem: Beim Generatorbetrieb zeigt  $I_1$  in die andere Richtung als  $U_1$
- $U_x = j \cdot I_1 \cdot X_d$  ist die Spannung an der Synchronreaktanz (immer senkrecht zu  $I_1$ )
- Erregerstrom  $I_E$  immer senkrecht zu  $U_p$
- Sind  $U_1$ ,  $I_1$  und  $X_d$  gegeben können  $U_x$ ,  $U_p$  und  $\vartheta$  konstruktiv bestimmt werden.
- Polradwinkel  $\vartheta > 0^\circ$ : Motorbetrieb,  $\vartheta < 0^\circ$ : Generatorbetrieb
- Polradwinkel wächst mit Belastung
- $\phi > 0^\circ$ : Übererregt,  $\phi < 0^\circ$ : Untererregt



Verbesserung Wirkleistungsabgabe  $\Rightarrow$  Turbinenregulierung  
Verbesserung Blindleistungsabgabe  $\Rightarrow$  SM-Erregung

### 6 Abschlussorgane bei Speicherkraftwerken

#### 6.1 Schützen

Aufgabe: Binäre Regelung des Wasserdurchflusses („Auf und zu“)

Anwendung: Grundablass, Seeabschluss, Abschluss gegen das Unterwasser

Vorteile: Einfacher Aufbau, sichere Absperrung

Nachteile: Keine Zwischenstellungen („halb offen“ nicht möglich)

Beispiel: Regulierschütz und Reserveschütz beim Grundablass

Sonstiges: Zwei Schützen pro Grundablass für Betrieb und Revision; schnelle Schliess- und Öffnungszeiten sind entscheidend, um Druckstöße zu vermeiden.

#### 6.2 Klappen

Aufgabe: Wasserfluss absperren (Notverschluss, Wartung)

Anwendung: Saugrohrklappen beim Kraftwerk Mapragg

Vorteile: Schnelles Schliessen, einfacher Aufbau

Nachteile: Keine Regelungsfunktion („halb offen“ nicht möglich)

Beispiel: Saugrohrklappen Mapragg

Sonstiges: Dienen als definitiver Abschluss bei Stillstand oder Wartung; Schliess- und Öffnungszeiten dürfen nicht verändert werden, um Druckstöße zu vermeiden.

#### 6.3 Drosselklappen

Aufgabe: Regelbarer Durchfluss durch horizontales Verschieben (Spalt lässt Wasser durch)

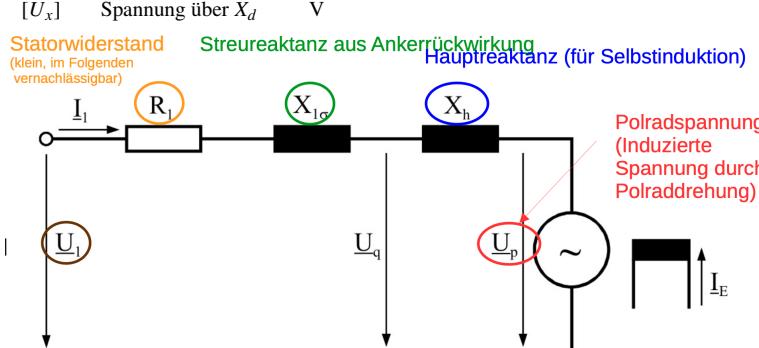
Anwendung: Einsatz bei variablen Durchflüssen

Vorteile: Regelbarkeit des Durchflusses möglich

Nachteile: Höhere hydraulische Verluste

Beispiel: Horizontal verschiebbarer Rohrschieber

Sonstiges: Wird nur selten bei Speicher- oder Laufwasserkraftwerken eingesetzt, da dort meist binäre Regelung bevorzugt wird.



Beispiel Übererregter Generator

## 6.4 Kugelschieber

**Aufbau:** Drehbare Kugel mit Loch

**Aufgabe:** Absperren des Wasserflusses mit nahezu verlustfreiem Durchfluss im offenen Zustand

**Anwendung:** Definitiver Abschluss (Betriebsring und Reservering)

**Vorteile:** Im offenen Zustand nahezu verlustfrei

**Nachteile:** Wartung und Betrieb der Dichtung (Betriebsring) aufwändig

**Beispiel:** Kugelschieber in Wasserkraftwerken mit Betriebsring und Reservering

**Sonstiges:** Betriebsring sorgt für Abdichtung zwischen Gehäuse und Kugel, Reservering wird nur bei Revision geschlossen und gegen Wiederöffnen gesichert.

## 6.5 Ring- und Eckringschieber

**Aufgabe:** Steuerung des Wasserflusses innerhalb oder ausserhalb des Rohres

**Anwendung:** Ringschieber: innerhalb des Rohres; Eckringschieber: ausserhalb des Rohres

**Vorteile:** Flexibler Einbau, verschiedene Steuerungsmöglichkeiten

**Nachteile:** Erhöhter Konstruktions- und Wartungsaufwand

**Beispiel:** Ringschieber und Eckringschieber bei variablen Wasserführungen

**Sonstiges:** Ermöglichen Zwischenstellungen (feine Regelung), können jedoch zu höheren hydraulischen Verlusten führen.

## 7 Laufwasserkraftwerke

### 7.1 Stauanlagen bei Laufwasserkraftwerken

#### 7.1.1 Unterschied zu Speicherwerk

Das Wasser muss immer fliessen können – es kann weder gestoppt noch umgeleitet werden.

#### 7.1.2 Abfluss

Muss auch während Instandhaltungsarbeiten gewährleistet sein. Eine mindestens (n-1) - Sicherheit muss für wehrabschlüsse vorhanden sein. Auch beim Ausfall eines Ablassorgans (Verstopfung) muss das definierte Höchsthochwasser beherrschbar sein.

#### 7.2 Ort des Maschinenhauses

Maschinenhaus auf der Kurvenaussenseite

**Vorteile:**

- Druckhöhe vor den Trübinen ist grösser

**Nachteile:**

- Geschwemssel lagert sich vor allem vor dem Rechen ab
- Bei starkem Geschwemsseltrieb muss eventuell sogar das Kraftwerk abgestellt werden

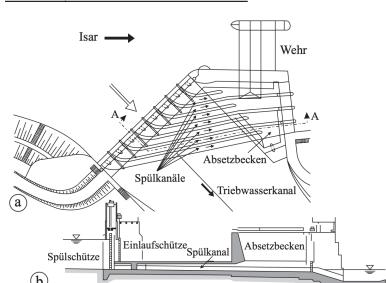
#### 7.3 Wasserfassung

Der Wasserhaushalt der Anlagen kann durch Ausleiten von Wasserfassungen beeinflusst werden.

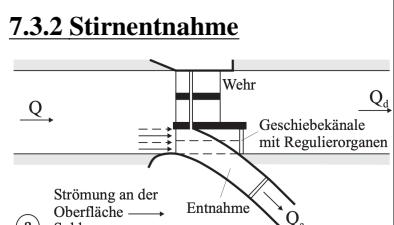
Das ist wichtig bei:

- Hochwasser, keine Konzentrationen verursachen (Abfluss durch das natürliche Bachbett und keine Konzentration auf einen Ort, z.B. auf ein Ausgleichsbecken, welches überläuft)
- Verhinderung von Geschiebeintrag in das Stollensystem bei Hochwasser ( $\Rightarrow$  wesentliche Minderung des Aufwands für die Wiederbetriebsnahme nach dem Hochwasser)

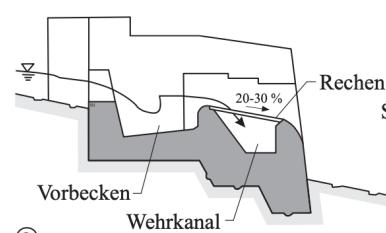
#### 7.3.1 Seitenentnahme



#### 7.3.2 Stirnentnahme

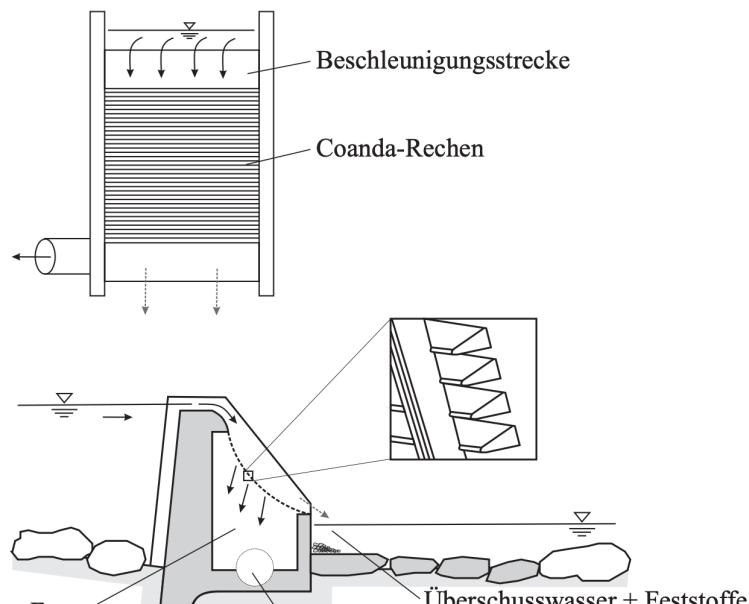


#### 7.3.3 Sohlenentnahme



- Rechen
- Stäbe längs zur Strömung
  - Für steile Gefälle und viel Geröll
  - Kies und Sand kommen weiter durch

## 7.3.4 Coanda Rechen

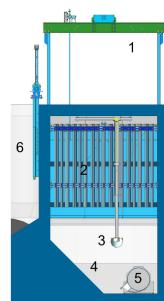
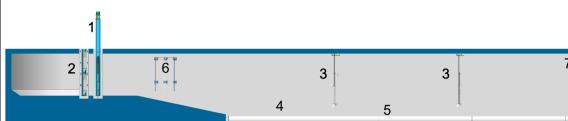


- Rechen wie ein „Mehrklingen-Rasierer“, Wasser wird abgeschnitten (Coanda Effekt)
- Fallhöhenverlust, daher nur in Mittel- und Hochdruckkraftwerken
- Stababstand 1 mm
- 90 % der Feststoffe, die grösser als 0,5 mm sind, werden abgehalten  $\Rightarrow$  oft wird kein Entsander mehr benötigt
- Schluckvermögen 140 l/s pro Laufmeter
- Benötigtes Gefälle von 1.3 m

#### 7.4 Entsander

Funktionsprinzip im Allgemeinen: Wassergeschwindigkeit so verkleinern, dass Körper einer bestimmten Korngrösse sich setzen können. Das automatische Spülen der Wasserfassung stellt eine Gefahr für Personen im Bachbett in unmittelbarer Nähe des Auslaufes dar.

- 1 Einlauf- / Regulierschütz
- 2 Beruhigungsrechen
- 3 Sonde zur Detektion der Sedimente
- 4 Entsanderbecken, Ablagerung der Sedimente
- 5 Abzugvorrichtung (System HSR)
- 6 Spülschütz
- 7 Übergang zum Freispiegelstellen



Der Wasserhaushalt der Anlagen kann durch Ausleiten von Wasserfassungen beeinflusst werden. Das ist wichtig bei:

- Hochwasser, keine Konzentrationen verursachen (Abfluss durch das natürliche Bachbett und keine Konzentration auf einen Ort, z.B. auf ein Ausgleichsbecken, welches überläuft)
- Verhinderung von Geschiebeintrag in das Stollensystem bei Hochwasser ( $\Rightarrow$  wesentliche Minderung des Aufwands für die Wiederbetriebsnahme nach dem Hochwasser)

#### 7.5 Verhinderung von Schwall und Sunk

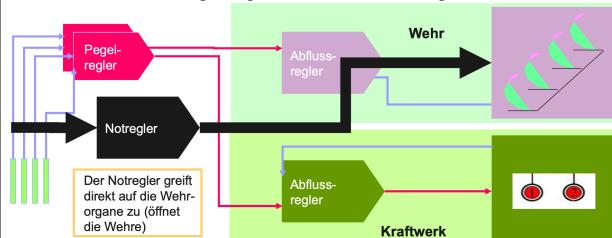
**Schwall** kann zu Überschwemmungen führen **Sunk** kann Schiffe auf Grund setzen.

- Wasserstrom durch das KW nicht plötzlich stoppen, sondern zunächst Turbinenleistung beibehalten
- Heizen des Flusswassers mit Wasserwiderstand (wie Tauchsieder)
- Danach Leistung allmählich zurückfahren
- Ermöglicht sprungfreie Umlagerung des Wasserstroms vom Kraftwerkskanal ins alte Flussbett

#### 7.6 Abfluss- / Leistungsregelung

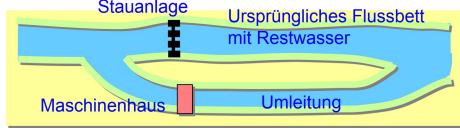
Funktionen Pegelregler:

- Zuordnung auf die einzelnen Stellorgane (Logik-Verteilfunktion im Sinne der Prioritäten)
- Kontinuierliche Regelung der einzelnen Stellorgane



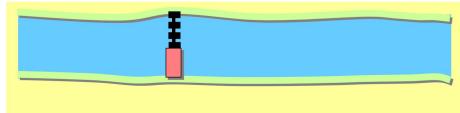
## 7.7 Flusskraftwerkstypen

### Ausleitungskraftwerke (Umleitungskraftwerke)

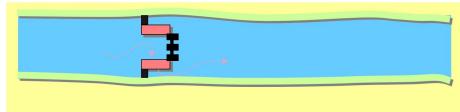


- Bessere Ausnutzung des Gefälles in flachen Tälern
- Wasserwirtschaftliche Belange
- Aspekte hinsichtlich des Grundwassers sowie kulturtechnische Erwägungen
- Einfacher zum Bauen

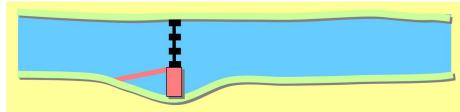
### Blockbauweise



### Zwillingsbauweise



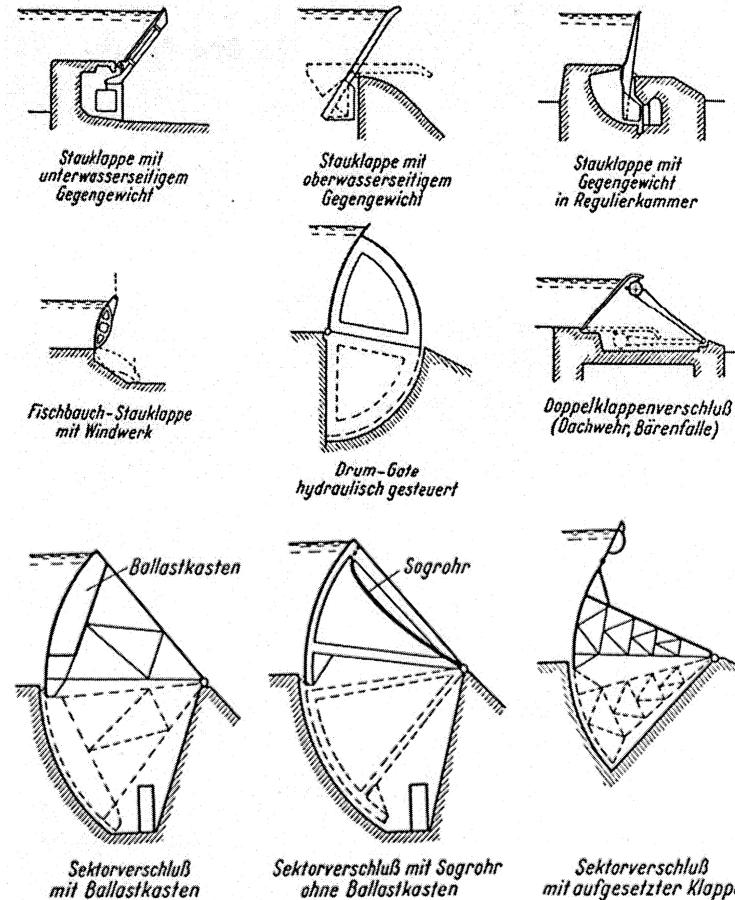
### Buchtenkraftwerk



Moderne Flusskraftwerke werden heute gemäss Bauweise 1 gebaut.

Der Wirkungsgrad bei Bauweise 2 und 3 ist schlechter als bei Bauweise 1.

## 7.8 Arten von Wehr- und Sektorverschlüssen



## 8 Wasserkraftwerk-Typen

### 8.1 Klassifizierung

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

### 8.2 Einteilung nach technischen Aspekten

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

### 8.3 Einteilung nach energiewirtschaftlichen Aspekten

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

### 8.4 Einteilung nach Betriebsart

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

### 8.5 Einteilung nach der installierten Leistung

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

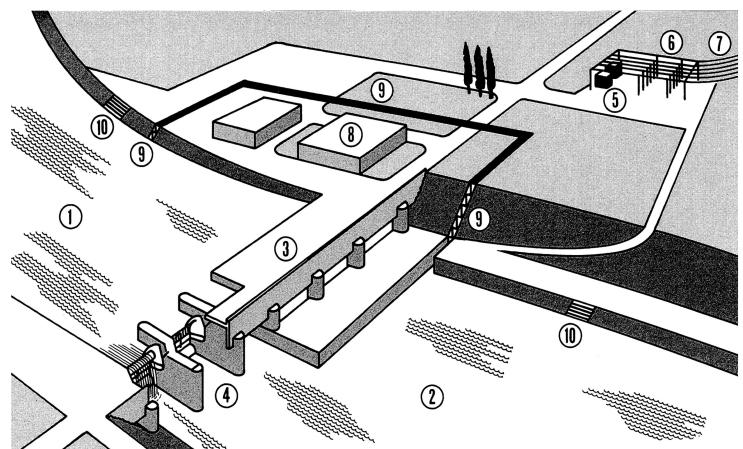
### 8.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten

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

### 8.7 Wasserturbinen und Pumpen

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

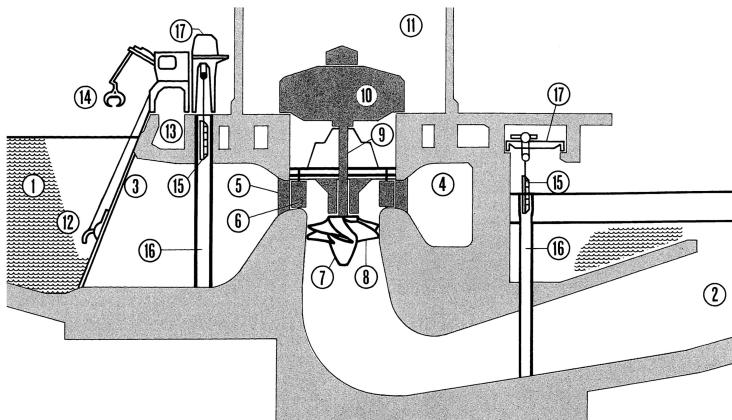
### 8.8 Laufwasserkraftwerke (LWK)



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

## 8.9 LWK mit Kaplanturbinen

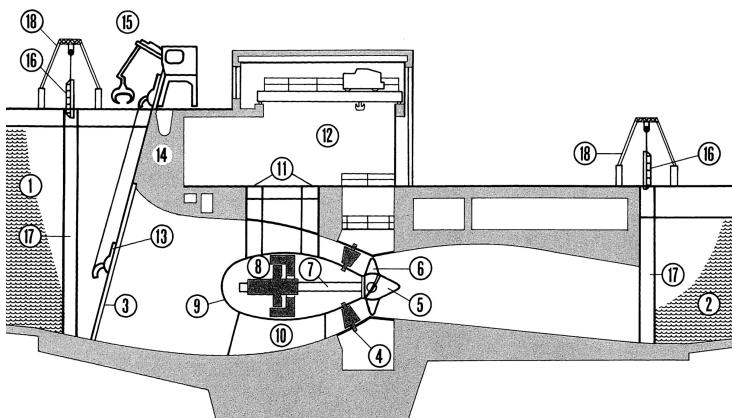
- Turbine Vertikal verbaut



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

## 8.10 LWK mit Rohrturbinen

- Turbine Horizontal verbaut
- bis 25m Fallhöhe



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

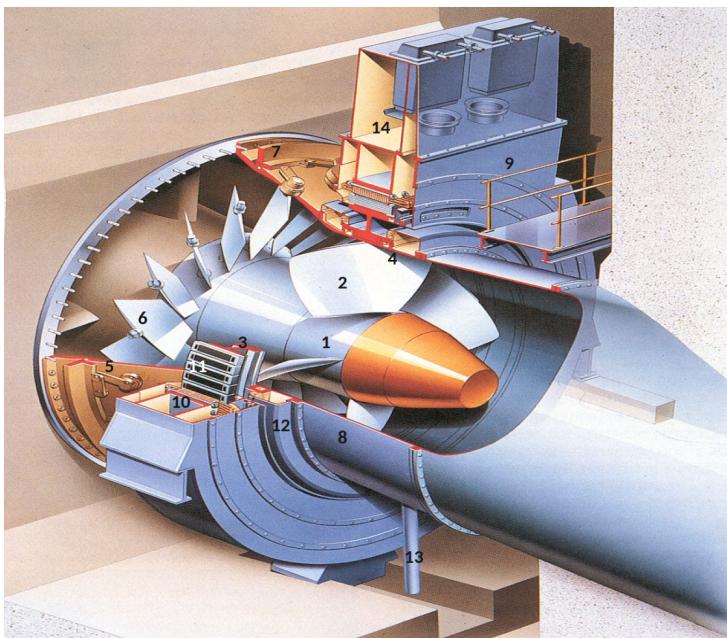
## 8.11 Wasserwirbelkraftwerk

- 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



## 8.12 LWK mit Strafoturbinen

- Weiterentwicklung der Rohrturbine
- Rotor Turbine und Generator bilden Einheit



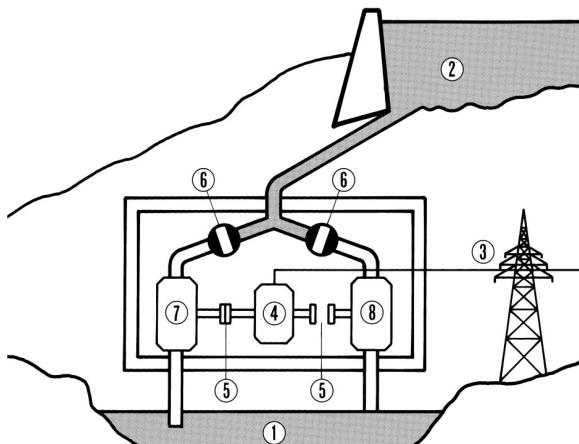
1	Laufradnabe	8	Rohrleitung
2	Propellerblatt	9	Generator
3	Rotorring	10	Stator
4	Entlastungsring	11	Rotor
5	Turbinengehäuse	12	Ringdichtungs-Leckwasser-Kollektor
6	Leitschaufel	13	Leckwasserableitung
7	Leitradverstellring	14	Kühler

## 8.13 Mitteldruckanlagen

- bis circa 50m Fallhöhe
- ( $\leq 5$  bar Druck)

## 8.14 Pumpspeicherkraftwerke (PSW)

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



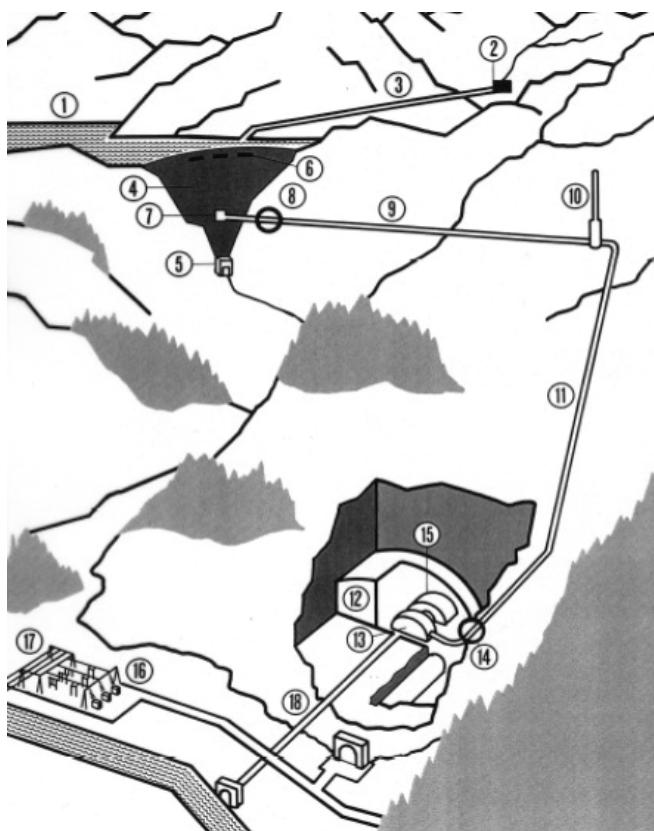
1	Unteres Becken	5	Kupplung
2	Oberes Becken	6	Kugelschieber
3	Energieableitung, Stromleitung	7	Pumpe
4	Motorgenerator	8	Turbine

### 8.14.1 Maschinensatz

Zweimaschinensatz: Motor/Generator und Pumpturbine  
Dreimaschinensatz: Motor/Generator, Turbine und Pumpe

## 8.15 Hochdruck- (Speicher-) Anlagen

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



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

### 8.15.1 Stollen und Schächte

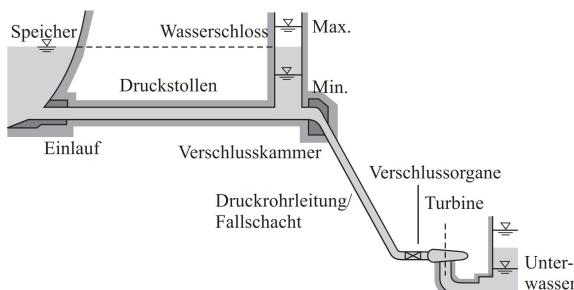
- Freispiegelstollen: flach, nicht voll gefüllt, Umgebungsdruck  
 Druckstollen (Betonverkl.): flach, voll gefüllt, Druck > Umgebungsdr.,  $v < 5 \text{ m/s}$   
 Druckschacht (Stahlpanzerung): steil, voll gefüllt, Druck  $\gg$  Umgebungdr.,  $v < 9 \text{ m/s}$

## 8.16 Wasserschloss

Das Wasserschloss ist ein nach oben offenes Gefäß. Im Druckstollen sind grosse Wassermassen vorhanden. Diese Wassermassen müssen:

- beim Anfahren der Maschinengruppen beschleunigt,
- beim Abstellen gebremst werden.

Das Wasserschloss dient als Puffer



$$V_{St} = l_{St} \cdot A_{St}$$

$$m_{ws} = \rho_w \cdot V_{St}$$

$$v_{St} = \frac{Q}{A_{St}}$$

$$V_s = l_s \cdot A_s^2$$

$$m_{ws} = \rho_w \cdot V_s$$

$$v_s = \frac{Q}{A_s}$$

$$E_{kSt} = \frac{m_{ws} \cdot V_{St}}{2}$$

$$E_{ks} = \frac{m_{ws} \cdot V_s}{2}$$

$$E_{ktot} = E_{kSt} + E_{ks}$$

$$E_{pot} = E_{ktot}$$

$$h_{ws} = \sqrt{\frac{E_{pot} \cdot 2}{\rho_w \cdot A_{ws} \cdot g}}$$

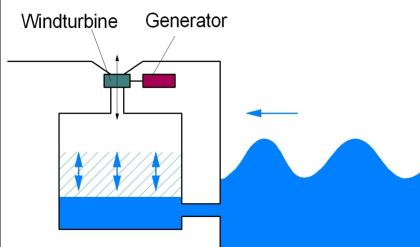
[l <sub>St</sub> ]	Stollenlänge .....	m
[A <sub>St</sub> ]	Stollenfläche .....	$\text{m}^2$
[V <sub>St</sub> ]	Stollenvolumen .....	$\text{m}^3$
[m <sub>wSt</sub> ]	Wassermasse im Stollen .....	kg
[v <sub>wSt</sub> ]	Fliessgeschwindigkeit im Stollen .....	$\text{m/s}$
[ρ <sub>w</sub> ]	Dichte des Wassers ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) .....	$\text{kg/m}^3$
[Q]	Druchfluss .....	$\text{m}^3/\text{s}$
[l <sub>s</sub> ]	Schachtlänge .....	m
[A <sub>s</sub> ]	Schachtfäche .....	$\text{m}^2$
[V <sub>s</sub> ]	Schachtvolumen .....	$\text{m}^3$
[m <sub>ws</sub> ]	Wassermasse im Schacht .....	kg
[v <sub>s</sub> ]	Fliessgeschwindigkeit im Schacht .....	$\text{m/s}$
[E <sub>kSt</sub> ]	Kinetische Energie im Stollen	J
[E <sub>ks</sub> ]	Kinetische Energie im Schacht	J
[E <sub>pot</sub> ]	Potentielle Energie	J
[A <sub>ws</sub> ]	Wasserschlossfläche .....	$\text{m}^2$
[h <sub>ws</sub> ]	Höhe des Wasserspiegels im Wasserschloss .....	$\text{m}^2$
[g]	Fallbeschleunigung ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) .....	$\text{m}^2$

## 8.17 Gezeitenkraftwerke

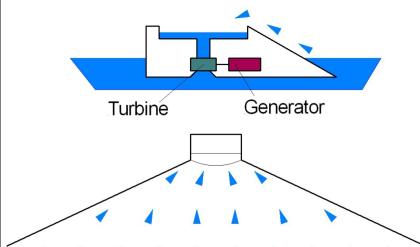
- Nutzung des Tidenhubs
- früher meist mit Staudammbauweise (hohe Umwelteinwirkungen)
- heute meist Meereströmungs-Kraftwerk
- Grösste Europäische Anlage in Frankreich (240 MW)

## 8.18 Wellenkraftwerk

### 8.18.1 Wellenkraftwerk mit Pneumatischer Kammer



### 8.18.2 Wellenkraftwerk mit Rampe



## 9 Kenngrößen Turbinen

### 9.1 Hydraulische Leistung

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

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

### 9.2 Mechanische Leistung an der Turbinenwelle

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

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

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

### 9.3 Winkelgeschwindigkeit

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

[ $\omega$ ]	Winkelgeschwindigkeit	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
[ $n$ ]	Drehzahl	$\frac{1}{\text{s}}$

### 9.4 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.

### 9.5 Spezifische Drehzahl $n_q$

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H_n^{3/4}}$$

[ $n_q$ ]	Spezifische Drehzahl	U/min
[ $n$ ]	Drehzahl der Turbine	U/min
[ $Q$ ]	Nutzwassermenge	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
[ $H_n$ ]	Nettofallhöhe	m

$n_q$  ist die Drehzahl einer Turbine in U/min, welche bei einem Gefälle von 1 m einen Volumenstrom von  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  aufweist (Ähnlichkeitsgesetz).

**Typische  $n_q$ :**

**Peltonturbinen** < 20 U/min

**Francisturbinen** ca. 20 bis ca. 100 U/min

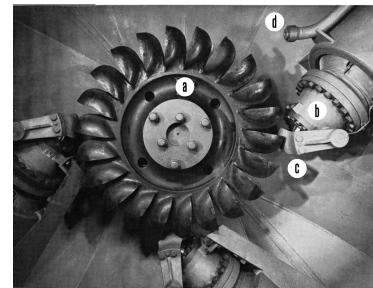
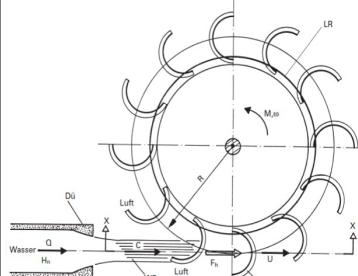
**Kaplanturbinen** > 100 U/min

## 10 Turbinen

Kurzüberblick:

- Aktionsturbinen:
  - Peltonturbinen
  - Durchströmturbinen
- Reaktionsturbinen:
  - Francisturbinen
  - Kaplan turbinen
  - Rohrturbinen
  - Kreiselpumpen als Turbinen

### 10.1 Peltonturbine



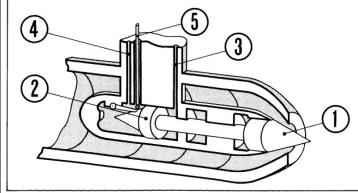
a Peltonrad

b Düse

c Strahlablenker

d Bremsdüse

Düse offen

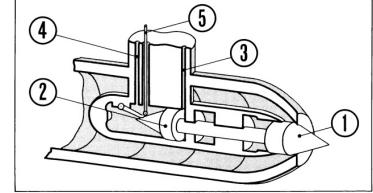


1. Düsenadel

2. Kolben

3. Öl zum öffnen

Düse geschlossen



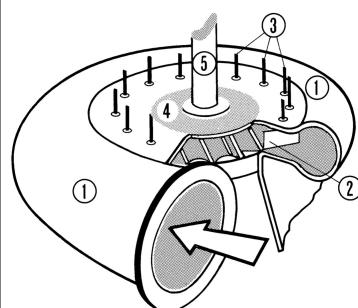
4. Öl zum Schliessen

5. Rückmeldung

### 10.1.1 Eingenschaften und Merkmale

- Guter Wirkungsgrad über einen großen Einsatzbereich von 10 bis 100% der max. Leistung
- Unkritische Maschine
- Der sogenannte Gletscherschliff muss beachtet werden (Erosion am Laufrad)
- Verschraubung Rad- / Generatorflansch (Kupplung) mit z.B. mechanisch vorgespannten Dehnschrauben
- Trockenlegung der Kupplung
- Wirkungsgradverbesserungen oft möglich
- Rissen im Bereich der Becherwurzel (hochbelastete Zone) gilt ein spezielles Augenmerk

### 10.2 Francisturbinen



1 Einlaufspirale

2 Leitschaufeln

3 Leitschaufelnachse

4 Laufrad

5 Turbinenwelle

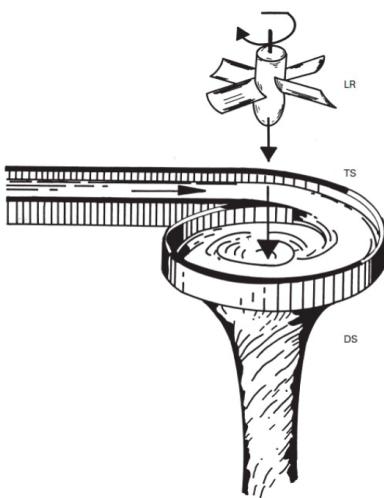
### 10.3 Reaktionsturbinen

- Francisturbinen
- Kaplanturbinen
- Rohrturbinen
- Kreiselpumpen als Turbinen

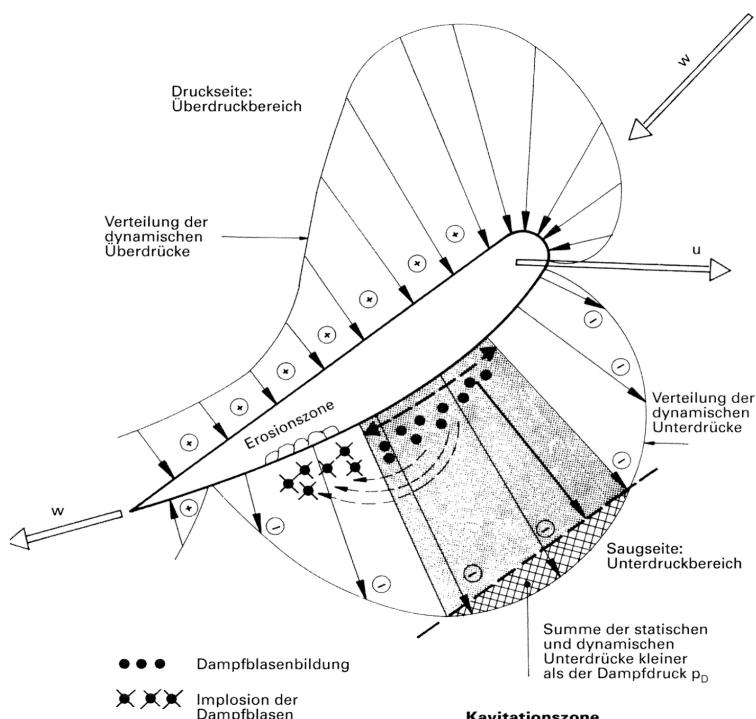
#### 10.3.1 Funktionsprinzip

**Turbinenspirale (TS):** exzentrisch zur Turbinenachse angeordneter Zulaufkanal, der die durch eine **Turbinenspirale** erzeugte Drallströmung (DS) veranschaulicht («Badewannenablass»)

**Laufrad (LR):** Schaufelrad, welches das in der **Drallströmung DS** platzierte Laufrad der Turbine darstellt



### 10.3.2 Kavitation



Turbinentyp	$n_D/n_N$
Francis, $n_q = 40 \dots 80$ U/min	1.7 ... 2.0
Francis, $n_q = 80 \dots 120$ U/min	2.0 ... 2.2
Propeller, feste Lauf- und Leitschaufeln	1.8 ... 2.2
Kaplan, verstellbare Laufschaufeln, feste Leitschaufeln	2.4 ... 2.8
Kaplan, verstellbare Lauf- und Leitschaufeln	2.4 ... 3.2
Pumpen im Turbinenbetrieb, $n_q = 30 \dots 100$ U/min	1.4 ... 1.8

Je grösser  $n_D/n_N$  desto stärker muss die Turbine dimensioniert werden

### Verhältnis der Volumenströme bei Durchgangs- bzw. Nenndrehzahl:

$n_q < 100$  U/min :  $Q_D < Q_N$

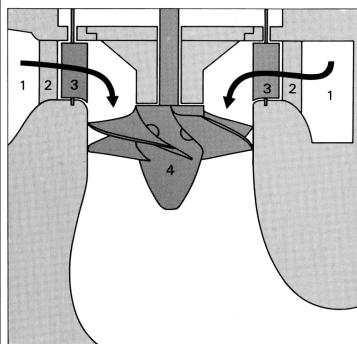
$n_q = 100$  U/min :  $Q_D = Q_N$

$n_q > 100$  U/min :  $Q_D > Q_N$

- Durchgangsdrehzahl  $n_D$
- Nenndrehzahl  $n_N$
- Spezifische Drehzahl  $n_q$

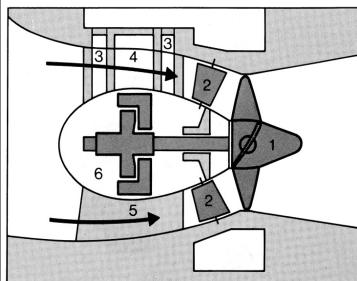
[ $n_D$ ]	Drehzahl bei Lastabwurf (plötzlicher Generatorverlust) .....	$\frac{U}{min}$
[ $n_N$ ]	Tatsächliche Drehzahl im Normalbetrieb .....	$\frac{U}{min}$
[ $n_q$ ]	Drehzahl einer skalierten Maschine ( $H = 1$ m, $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) .	$\frac{U}{min}$

### 10.4 Kaplan turbines



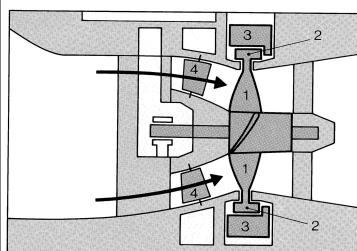
- 1 Einlaufspirale
- 2 Stützschaufeln
- 3 Leitschaufeln
- 4 Kaplan-Rad

### 10.5 Rohrturbinen (= horizontale Kaplan turbines)



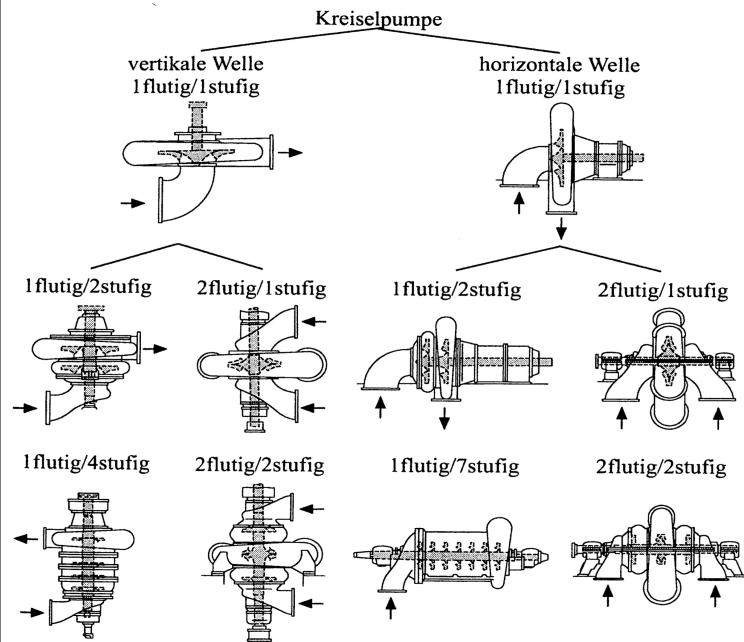
- 1 Schaufelrad
- 2 Leitschaufeln
- 3 Zustiegsschächte
- 4 Demontageschacht
- 5 Sockel
- 6 Generator

### 10.6 Strafturbinen



- 1 Laufradschaufeln
- 2 Rotor, Pole des Generators
- 3 Stator
- 4 Leitschaufeln

### 10.7 Speicherpumpen und Pumpturbinen



#### 10.7.1 Dreimaschinensatz

Besteht aus: Generator/Motor, Francisturbine und Speicherpumpe

##### Nachteile

- Zwei hydraulische Maschinen sowie eine grössere Anzahl Abschlussorgane sind nötig.

##### Vorteil

- Unabhängige Optimierung der Turbine und der Pumpe ist möglich.

## 10.8 Wahl des Generators

Der Generator muss synchron mit dem Netz drehen. Daher muss die definitive Drehzahl der in der Nähe liegenden Synchrongrunddrehzahl entsprechen.

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad n = \frac{3000}{p}$$

[n]	Drehzahl des Generators .....	U/min
[f]	Frequenz, meist 50 Hz .....	Hz = $\frac{1}{s}$
[p]	Polpaarzahl .....	(1, 2, 3, ...)

## 10.9 Kochrezept zur Grob-Auslegung von Pumpen und Turbinen

- Bestimmung der Netto-Fallhöhe  $H_n$
- Auswahl **Gesamtdurchfluss**  $Q$ , abhängig von Zufluss, Rückhaltemöglichkeit, Einsatztyp (z.B. Spitzenlast)
- Bestimmung der **hydraulischen Leistung** mithilfe der **elektrischen Leistung**  $P_{el}$  und dem Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{tot}$ :

$$P_{hyd} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_n = \frac{P_{el}}{\eta_{tot}}$$

- Auswahl **Turbinentyp**, **Turbinen-Durchfluss**  $Q$  und **spezifische Drehzahl**  $n_q$  aus Diagrammen  
(ggf. Aufteilung  $Q$  auf mehrere Turbinen / Pumpen)

- Bestimmung der **Turbinen-Drehzahl**:

$$n = n_q \cdot \frac{H_n^{3/4}}{Q^{1/2}}$$

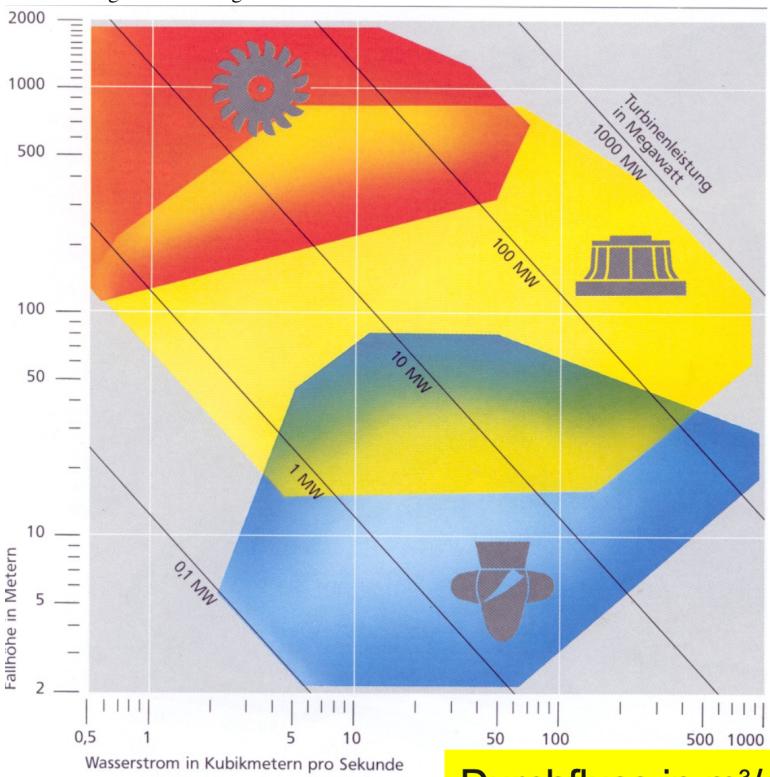
- Bestimmung der **Polpaarzahl**:

$$p = \frac{3000}{n}$$

(auf ganze Zahl runden und prüfen, ob  $n_q$  nach Rundung noch im möglichen Bereich liegt)

- Weitere Bedingungen zur **Feinauslegung**:

- Teillastverhalten, Wirkungsgrad, Betriebsbereiche
- Räumliche Bedingungen, Simulationen, Experimente
- ...
- Lösung ist ein Abwagen und iterativer Prozess



Peltonturbine, Francisturbine, Kaplanturbine

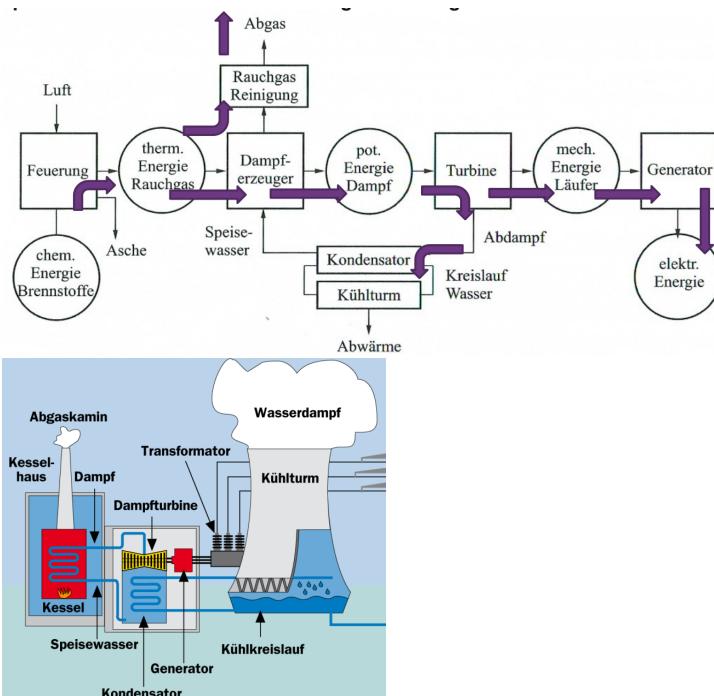
## 11 Thermische Kraftwerke/ Dampfkraftwerke

Gegen 90% der weltweiten Bereitstellung elektrischer Energie erfolgt in «Thermischen Kraftwerken».

Kraftwerkarten:

- Thermische Kraftwerke auf fossiler Basis (Dampf-, Gasturbinen-, Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (GUD), Blockheiz-, Diesel- Kraftwerke)
- Kernkraftwerke
- Geothermische Anlagen
- Solarthermische Anlagen
- Heizkraftwerke
- Kehrichtverbrennung mit thermischem Kraftwerk

## 11.1 Funktionsweise



- Brenn- und Treibstoffe, Geothermie, Solarthermie, atomare Bindungsenergie

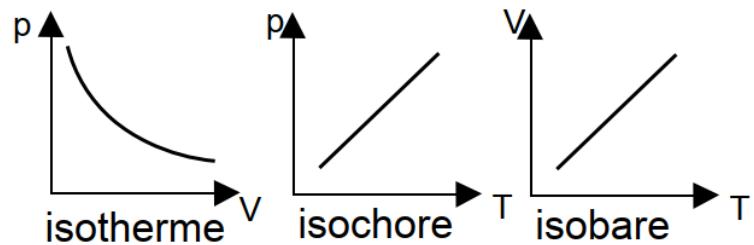
- Thermische Energie in Form von Gas oder Dampf

- Gas- oder Dampfturbine

- Generator

- Transformator/Netz

## 11.2 Thermodynamik



isotherme:  $T = const$ ,  $W = m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$

isochore:  $V = const$ ,  $Q = c_v \cdot m \cdot \Delta T$

isobare:  $p = const$ ,  $Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$

isotrop: Entropie bleibt konstant  $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{x-1}{x}} = \frac{T_4}{T_3}$

adiabatisch: Zustandsänderung ohne Wärmetausch mit der Umgebung

ideales Gas:  $\frac{p \cdot V}{T} = const$

Enthalpie: Wärmeinhalt,  $H = U + p \cdot V$ ,  $U$ : innere Energie

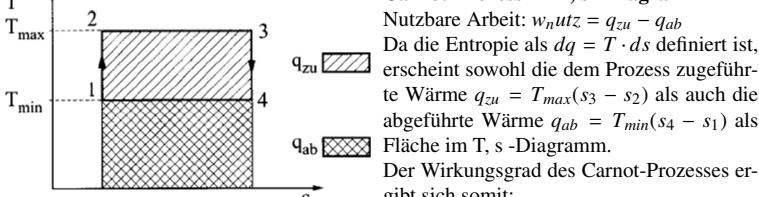
Entropie: Energie pro Temperatur  $T$ , Entropieänderung  $\Delta S = \frac{Q}{T}$ ,  $Q$ : zugeführte Wärme

## 11.3 Kreisprozesse

### 11.3.1 Carnot Prozess

Wärme (Dampferzeuger) -> Mechanische Arbeit (Dampfturbine)

Carnot-Prozess im T, s - Diagramm



Nutzbare Arbeit:  $w_{nutz} = q_{zu} - q_{ab}$

Da die Entropie als  $dq = T \cdot ds$  definiert ist, erscheint sowohl die dem Prozess zugeführte Wärme  $q_{zu} = T_{max}(s_3 - s_2)$  als auch die abgeführte Wärme  $q_{ab} = T_{min}(s_4 - s_1)$  als Fläche im T, s -Diagramm.

Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses ergibt sich somit:

Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta'_{th} = \frac{P_m - P_u}{P_{zu}} = \frac{(h_3 - h_4^*) \dot{m}_D - (h_2^* - h_1) \dot{m}_D}{(h_3 - h_2^*) \dot{m}_D}$$

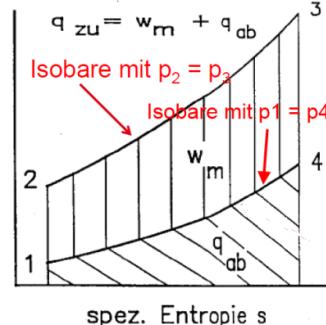
$$\eta'_{th} = 1 - \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 1 - \frac{(h_4^* - h_1) \dot{m}_D}{(h_3 - h_2^*) \dot{m}_D} = 1 - \frac{h_4^* - h_1}{h_3 - h_2^*}$$

[ $P_m$ ]	abgegebene mechanische Leistung der Wärmekraftmaschine ....	kW
[ $P_u$ ]	Leistung der (elektrisch angetriebenen) Speisewasserpumpe ....	kW
[ $P_{zu}$ ]	Leistungszufuhr aus dem Kessel .....	kW
[ $P_{ab}$ ]	abzuführende Wärmeleistung im Kondensator .....	kW
[ $\dot{m}_D$ ]	konstanter Dampf-Massenstrom pro Zeiteinheit .....	kg/s
[ $h$ ]	spezifische Enthalpie .....	kJ/kg
[ $Q$ ]	Wärmemenge .....	J

## 11.3.2 Wirkungsgrad erhöhen

- Zwischenüberhitzung
- Speisewasservorwärmung
- Erhöhung des Dampfdrucks und der Temperatur
- Kombination mit Gasturbine (GuD-Prozess)

## 11.4 Joule-Prozess für Gasturbinen

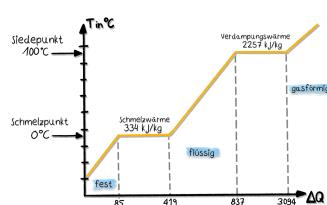


### Joule-Prozess im T, s - Diagramm

#### Ablauf:

- 1 - 2 Verdichtung,  $s$  const,  $p$  steigt (isotrop)
- 2 - 3 Erwärmung,  $s$  steigt,  $T$  steigt,  $p$  konstant (isobar)
- 3 - 4 Entspannung,  $s$  konstant,  $p$  sinkt (isotrop)
- 4 - 1 Abkühlung,  $s$  sinkt,  $T$  sinkt,  $p$  konstant (isobar)

## 11.5 Enthalpie



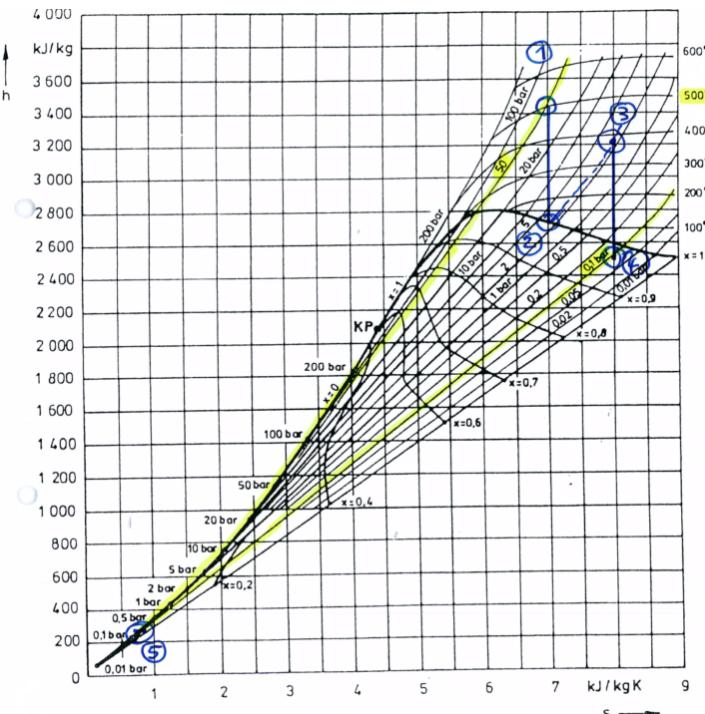
$$dH = dQ + V \cdot dp \quad \text{d.h. Enthalpie ändert mit Druck}$$

Verdampfungswärme:  $q_v = T_v \cdot \Delta S$

#### Arregatsänderungen:

- Fest - Flüssig: Schmelzen/ erstarren
  - Flüssig - Gas: Verdampfen/ kondensieren
  - Fest - Gas: Sublimieren/ Resublimieren
- $0^\circ\text{C} = 273\text{K}$

## 11.6 Mollier-Diagramm



Dampfturbine mit Zwischenüberhitzung

(1): Startdruck: 500 °C 50 bar

(1) zu (2): Entspannung in Turbine

(2) zu (3): Temperaturzufuhr mit konstantem Druck (isobar); Dampferzeuger(Energieeintrag,Q)

(3) zu (4): Entspannung in Turbine

$$x = \frac{m_D}{m_W + m_D}$$

$$\frac{m_w}{m_d} = \frac{1}{x} - 1$$

$$\Delta h_{liquid} = V \cdot \Delta p \quad (1\text{Bar} = 10^5\text{pa})$$

$$P = m_D \cdot \Delta h$$

$$P_{\text{mech}} = \dot{m}_k \cdot \eta_{\text{Th}} \cdot \eta_{\text{DE}} \cdot H$$

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 1 - \frac{\sum h_{tief}}{\sum h_{hoch}}$$

$$0^\circ\text{C} = 273\text{K}$$

Senkrechte  $[\Delta h]$  nicht beachten bei der Berechnung von Wirkungsgrad des Kreisprozesses.

[x]	Wasser dampfgehalt .....	kg/m <sup>3</sup>
[m <sub>D</sub> ]	Dampfmassegehalt .....	kg/m <sup>3</sup>
[m <sub>W</sub> ]	Wassermassegehalt .....	kg/m <sup>3</sup>
[\Delta h]	Entropie zweier Punkte senkrecht verbunden .....	kJ/kg
[V]	Volumen 0.001 m <sup>3</sup> .....	m <sup>3</sup>
[\Delta p]	Druckunterschied .....	Pa
[\eta <sub>th</sub> ]	Thermischer Wirkungsgrad .....	
[\eta <sub>c</sub> ]	Carnot-Faktor .....	K
[T <sub>o</sub> ]	Höchste Temperatur Prozess .....	K
[T <sub>u</sub> ]	Tiefste Temperatur über x=1 Grenze .....	W
[P <sub>mech</sub> ]	Mechanisch abgegebene Leistung .....	kg/s
[\dot{m}_k]	Massenstrom des eingesetzten Brennstoffs .....	
[\eta <sub>th</sub> ]	Thermischer Wirkungsgrad .....	
[\eta <sub>DE</sub> ]	Wirkungsgrad der Dampferzeugung bzw. Energieumwandlung .....	
[H]	Heizwert des Brennstoffs .....	J/kg

## 11.7 Anleitung Mollier Diagramm (s - h)

### 11.7.1 Clausius-Rankine-Prozess

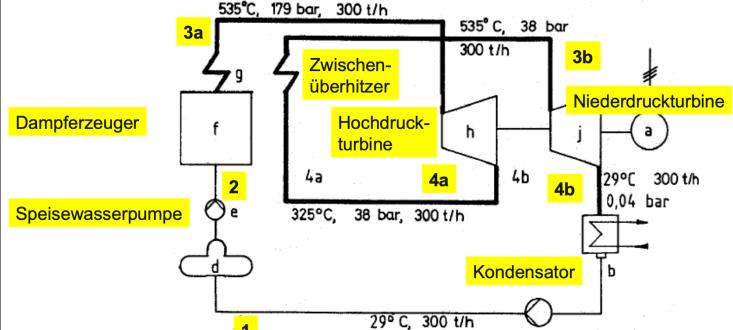
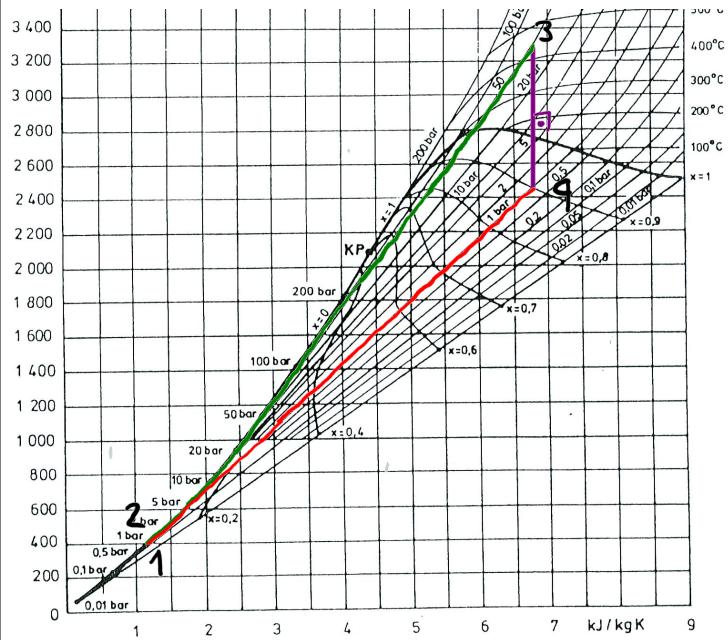
Sattdampfprozess (Dampfkreislauf)

1 - 2 Druckerhöhung mit Speiseerhöhung (von 1 Bar bis Zieldruck, senkrecht links unten)

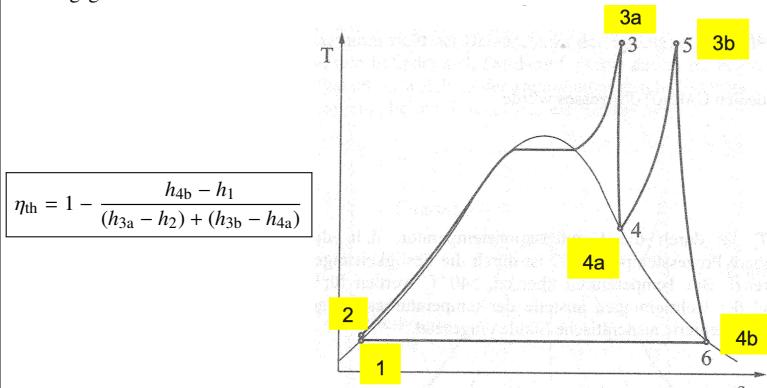
2 - 3 Dampferzeuger, Energiezugabe (Druck bleibt konstant)

3 - 4 Dampfturbine, Energieumwandlung zu mechanisch (Druckabnahme, s bleibt konstant (senkrechte Linie))

4 - 1 Kondensator, zurück zum Start, Verlustenergie (Druck konstant)



Wirkungsgrad:



## 11.8 Varianten

- Dampfkraftwerk mit Zwischenüberhitzung
- Dampfkraftwerke mit Abwärmenutzung

## 11.9 Komponenten

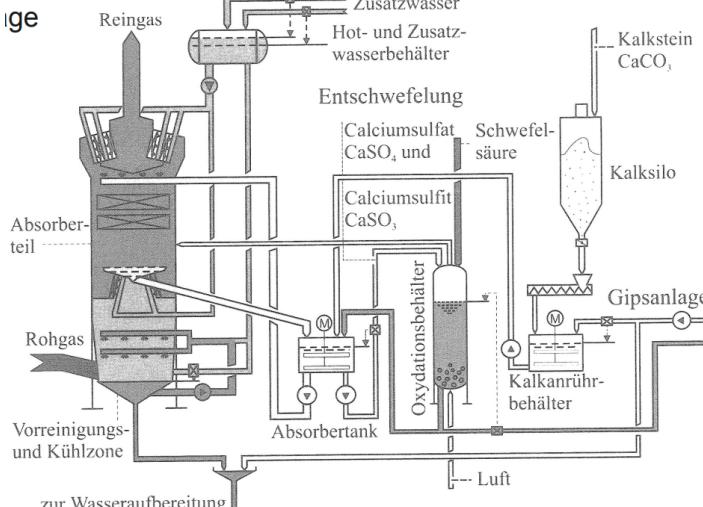
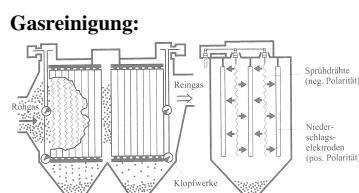
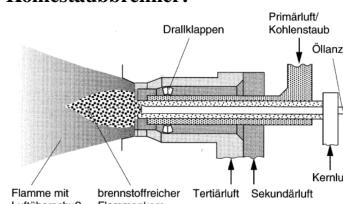
Komponenten fossiler befeuerten Dampfkraftwerke

- Kessel und Dampferzeuger
- Rauchgasreinigung
- Feuerungen und Brenner
- Dampferzeuger mit Wirbelschichtfeuerung
- Dampfturbinen
- Kühlsysteme für Dampfkraftwerke

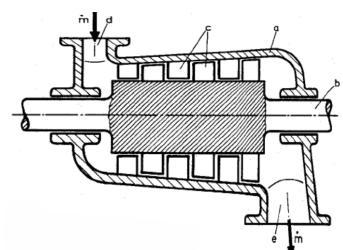
### Kühlsysteme:

- Frischwasserkühlung
- Ablaufkühlung
- Nasse Rückkühlung
- Trockene Rückkühlung
  - direktes System
  - indirekt mit Mischkondensator
  - indirekt mit Oberflächenkondensator

### Kohlestaubbrenner:



### Turbine:



- |          |                         |
|----------|-------------------------|
| a        | Gehäuse                 |
| b        | Läufer                  |
| c        | Schaufeln               |
| d        | Einströmstützen         |
| e        | Ausstromstützen         |
| f        | Zylinderschnitt         |
| g        | Leitgitter              |
| h        | Lauftgitter             |
| m        | Massestrom medium       |
| $F_\tau$ | Tangentialkraft Laufrad |

## 12 Atomkraftwerk

### 12.0.1 Merkmale Nukleare Dampferzeugung

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

### 12.0.2 Kernprozesse für die Energiegewinnung

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

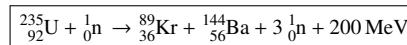
## 12.1 Kernphysikalische Grundlagen

$$A = Z + N \quad \text{Nuklid-Schreibweise: } {}_Z^A \text{Element} \quad \text{z. B. } {}_{92}^{235}\text{U}$$

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

### 12.2 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 (→ 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.

## 13 Gasturbinenkraftwerke

Luft wird in einem Verdichter komprimiert. Die komprimierte Luft wird in einer Brennkammer mit Brennstoff (z.B. Erdgas, Heizöl) gemischt und verbrannt, wodurch heiße Gase entstehen. Diese heißen Gase expandieren in einer Turbine und treiben diese an. Die Turbine treibt wiederum den Verdichter und einen Generator zur Stromerzeugung an.

### Vorteile gegenüber Dampfturbinen-Kraftwerken

- Schnelle Startzeit und hohe Flexibilität: Gasturbinen können sehr schnell hoch- und heruntergefahren werden, was sie ideal für die Abdeckung von Spitzenlasten macht.
- Geringerer Kühlwasserbedarf
- Kompaktere Bauweise
- Geringere Investitionskosten
- Geringere Emissionswerte (bei Erdgasbetrieb) im Vergleich zu konventionellen Kohle-Dampfkraftwerken.

### 13.1 Vor- und Nachteile

- **Vorteile:**
  - Kompakter und einfacher Aufbau
  - Hohe Leistungsdichte
  - Schnelle Bereitschaft
  - Relativ preisgünstige Investition
- **Nachteile:**
  - Nur hochwertige, schwefelarme Brennstoffe (Erdgas) sind wegen Schaufelkorrosion verwendbar.
  - Begrenzter Wirkungsgrad

## 13.2 Funktionsprinzip

$du = c_v \cdot dT$  Enthalpie bei isochorer (konstantes Volumen) Zustandsänderung

$dh = c_p \cdot dT$  Enthalpie bei adiabatischer (Wärmedichte) Zustandsänderung

$$R = c_p - c_v \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

- Einatomige Gase:  $\kappa = 1.66$  (Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, Radon)
- Zweiatomige Gase:  $\kappa = 1.40$  (Moleküle mit zwei Atomen)
- Dreiatomige Gase:  $\kappa = 1.30$  (Moleküle mit drei Atomen)

$$\Pi = \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = \frac{p_3}{p_4} = \left( \frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \Pi^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

[ $Q_{zu}$ ] Zugeführte Wärme .....

K

[ $Q_{ab}$ ] Abgeführte Wärme .....

K

[ $T_i$ ] Temperatur  $i$  .....

K

[ $p_i$ ] Druck  $i$  .....

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

[ $\eta_{th}$ ] Wirkungsgrad .....

-

[ $\Pi$ ] Druckverhältnis .....

-

[ $R$ ] Spezifische Gaskonstante 8.314462 .....

$$\frac{J}{mol \cdot K}$$

[ $c_v$ ] Wärmekapazität (konstantes Volumen) .....

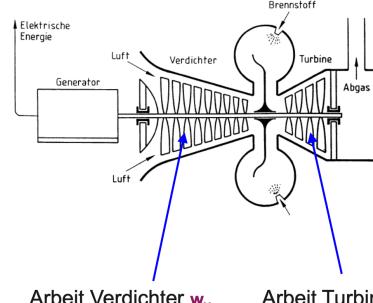
$$\frac{J}{kg \cdot K}$$

[ $c_p$ ] Wärmekapazität (konstanter Druck) .....

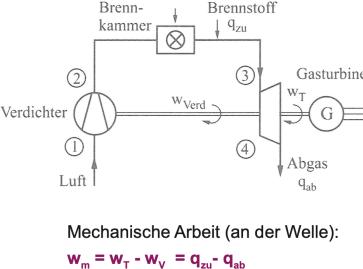
$$\frac{J}{kg \cdot K}$$

[ $\kappa$ ] Isotopen- bzw. Adiabatenexponent .....

-



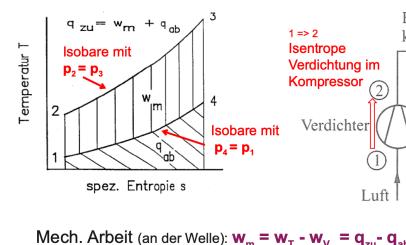
Arbeit Verdichter  $w_v$



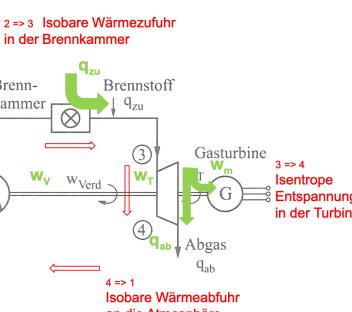
Mechanische Arbeit (an der Welle):  
 $w_m = w_T - w_v = q_{zu} - q_{ab}$

## 13.3 Thermodynamische Grundlage

der "ideale" Vergleichsprozess:  
Joule - Prozess im T, s - Diagramm



$$\text{Mech. Arbeit (an der Welle): } w_m = w_T - w_v = q_{zu} - q_{ab}$$



2  $\Rightarrow$  3 Isobare Wärmezufuhr  
in der Brennkammer

1  $\Rightarrow$  2 Isentrope  
Verdichtung im  
Kompressor

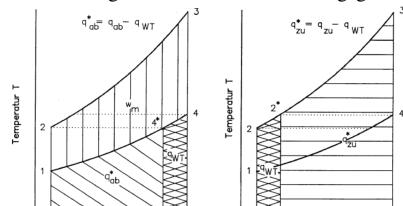
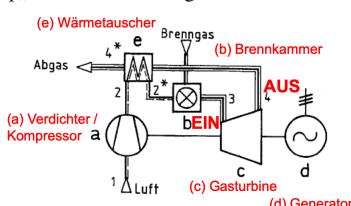
3  $\Rightarrow$  4 Isentrope  
Entspannung in der Turbine

4  $\Rightarrow$  1 Isobare Wärmeabfuhr  
an die Atmosphäre

## 13.4 Gasturbine mit Luftvorwärmer

Verbesserung des offenen GT - Prozesses

Vom Brennstoff aufzubringende Wärme verringert sich um  $q_{WT}$ , respektive die an die Umgebung abzuführende Wärme verringert sich um  $q_{WT}$ . Dadurch ergibt sich eine Verbesserung des therm. Wirkungsgrades.



Mechanische Arbeit  $w_m$ : Fläche 1-2-3-4

## 13.5 Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD)

Eigenschaften:

- Gasturbine
  - hohe Wärmeeintrittstemperatur (bis 1200 °C)
  - hohe Wärmeaustrittstemperatur (ca. 500 °C) Dampfturbinen
- Dampfturbine
  - Relative niedrige Wärmeeintrittstemperatur ( $\leq 550$  °C)
  - Niedrige Austrittstemperatur (ca. 40 °C)

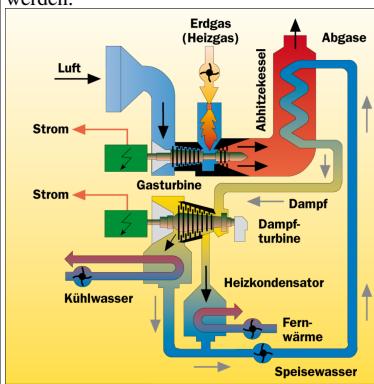
Kombination beider Prozesse  $\Rightarrow$  GuD mit hohem Wirkungsgrad

### Vorteile:

- 5 – 10 % höherer Wirkungsgrad als reine Dampf-KW
- Gutes Teillastverhalten (wichtig bei Lastfolgebetrieb, Einsatz Sekundärregulierung)
- Kostengünstiger Umbau älterer Dampf-KW
- Geringere Abwärme
- Nachteile:
  - 25 – 30 % der zugeführten Wärme muss in Form eines hochwertigen Brennstoffes (Gas) erfolgen.
  - Instandhaltungsaufwand an der hochbeanspruchten Gasturbine, Stillstandzeiten wegen der GT

### 13.5.1 Kombianlagen für Kraft-/Wärmekopplung (KWK)

Thermische Kraftwerke (Wärme- Kraft- Prinzip) geben aufgrund physikalischer Randbedingungen einen grossen Teil der Wärme als Anergie (60 – 70 %) an die Umgebung ab.  
 $\Rightarrow$  Mit der Nutzung der Abwärme kann der Gesamtwirkungsgrad wesentlich verbessert werden.



Wirkungsgrad:

$$\eta_{KWK} = \frac{W_{el} + Q_H}{W_{BS}}$$

[ $W_{el}$ ]	Stromproduktion .....	kWh
[ $Q_H$ ]	Wärmeauskopplung .....	J
[ $W_{BS}$ ]	Zugeführte Brennstoffenergie .....	J

## 13.6 Solarthermische Kraftwerke

Stromerzeugung wie bei thermischen Kraftwerken, jedoch mit Sonne Arten:

- Parabolrinnenkontrator
- Heliostatenfeld mit Turm
- Paraboloid-Dish
- Fresnel-Linse

## 13.7 Geothermische Kraftwerke

- Temperatur im Innern der Erde: 5000–6000 °C Wärmestrom zur Oberfläche (Abkühlung)
- Temperaturgradient: 3 K pro 100 m
- Geothermische Anomalien  $\Rightarrow$  neben der Wärmeleitung noch Konvektion bzw. Wärmetransport durch Materialtransport (Aufstieg von glutflüssigem Magmas oder aufwärts gerichtete Grundwasserbewegungen, aber meist in Erdbebengebieten)
- Umweltbeeinflussung:
  - chemisch aggressive und z.T. giftige Bestandteile  $\rightarrow$  Bauteile müssen Korrosionsbeständig sein
  - Zurückpumpen, verhindert auch das Absenken des Bodens

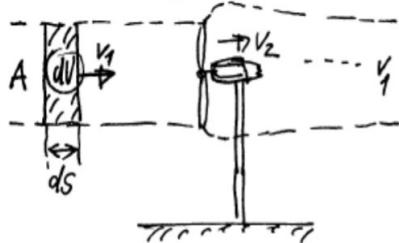
## 13.8 Verstromung von Biomasse

Energiegewinnung aus Pflanzen oder Pflanzenresten Verwendete Materialien:

- eigens dafür kultivierte landwirtschaftliche Nutzpflanzen wie Mais oder Raps
- schnell wachsende Gehölze
- Abfall- und Reststoffe aus Landwirtschaft, Haushalten und Industrie (beispielsweise Hackschnitzel aus der Holzindustrie, Altfett aus der Lebensmittelherstellung, aber auch Klärschlamm)

## 14 Windenergie

### 14.1 Windeleistung



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

$$P_W = \frac{P_{el}}{\eta} = c_P \cdot \frac{A \cdot \rho_{Luft}}{2} \cdot v_1^3$$

Achtung!  $v_1$  ist hoch 3!

$$W = \eta \cdot P_W \cdot \Delta t$$

$$T = \frac{W_{el} \text{ pro Jahr}}{P_{\max}}$$

$[P_{\max}]$	Theoretische Windleistung	.....
$[P_W]$	Effektiv nutzbare praktische Windleistung	.....
$[c_P]$	Leistungsbeiwert, $c_P = 0.4 \dots 0.5$	.....
$[A]$	Rotorfläche (projizierte Fläche senkrecht zur Strömung)	.....
$[\rho_{Luft}]$	Dichte Luft, $\approx 1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	.....
$[v_1]$	Anströmgeschwindigkeit des Windes	.....
$[\eta]$	Gesamtwirkungsgrad der Umwandlungskette	.....
$[\Delta t]$	Betrachteter Zeitraum	.....
$[W]$	Umgewandelte elektrische Arbeit	.....

#### 14.1.1 Leistungsbeiwert

Der Leistungsbeiwert beschreibt, wie viel der im Wind enthaltenen kinetischen Energie eine Windturbine maximal in nutzbare mechanische Leistung umwandeln kann. Laut Betz-Gesetz liegt das theoretische Maximum bei 0,593. In der Praxis erreichen moderne Windturbinen typischerweise Werte zwischen 0,4 und 0,5.

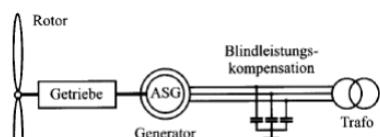
#### 14.1.2 Hohe Windgeschwindigkeiten

- Bei höheren Windgeschwindigkeit wird die Leistung begrenzt. Dies geschieht durch eine Pitch-Regelung (Blattwinkelverstellung).
- Abschaltung und ausdrehen aus dem Wind.

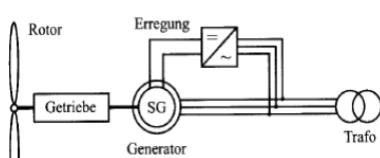
### 14.2 Netzkopplung

DU = Direktumrichter, ZKU = Zwischenkreis-Umrichter

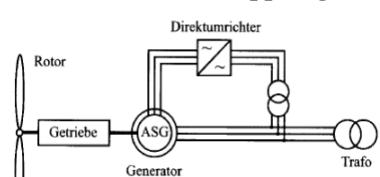
#### 14.2.1 Direkte Netzkopplung mit ASM



#### 14.2.2 Direkte Netzkopplung mit SM

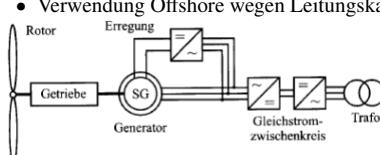


#### 14.2.3 Direkte Netzkopplung mit ASM und DU im Läufer



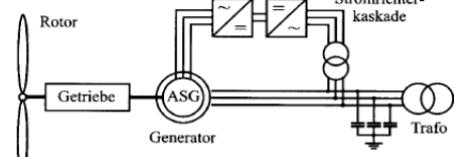
#### 14.2.4 Direkte Netzkopplung mit SM über Gleichstromzwischenkreis

- variable Drehzahl
- Verwendung Offshore wegen Leitungskapazitäten



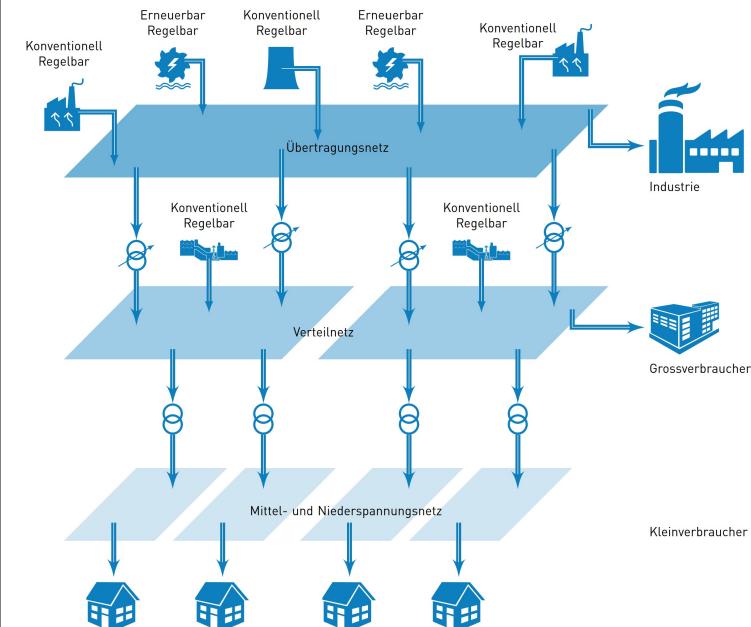
#### 14.2.5 Direkte Netzkopplung mit ASM und ZKU im Läufer

- übersynchrone Stromrichter-Kaskade
- variable Drehzahl

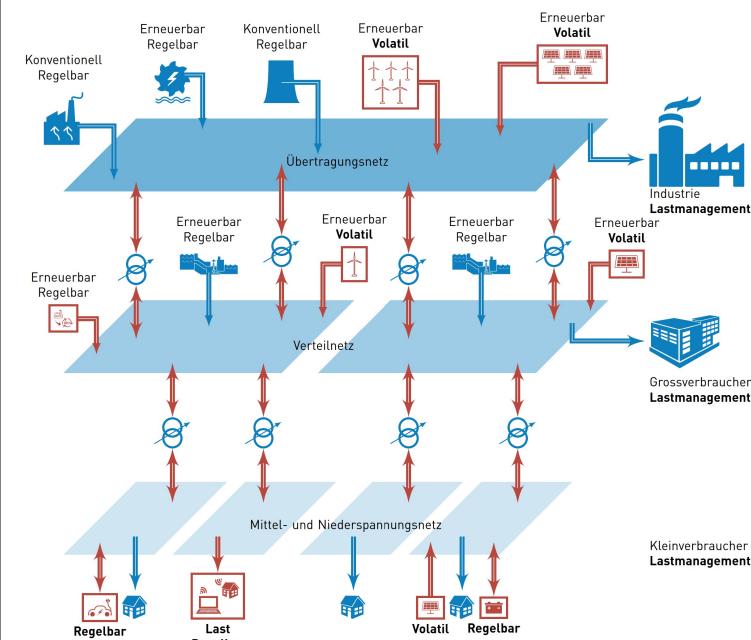


## 15 Netze Allgemein

### 15.0.1 Stromnetz früher



### 15.0.2 Stromnetz heute



### 15.1 Interessen der Erzeuger

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

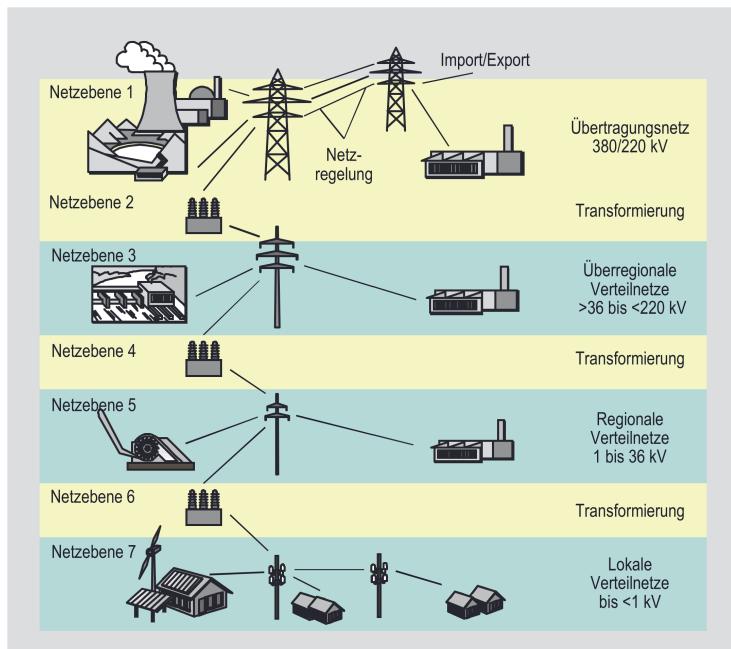
### 15.2 Anforderungen an das Stromnetz

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

### 15.3 Herausforderungen

- Volatile: Angebot und Nachfrage nicht vorhersehbar
- Angebot und Nachfrage muss immer gleich sein
- PV und Wind sind nur runterregelbar (Wasser- und Atomkraft sind auch raufregelbar)

## 16 Netzebenen

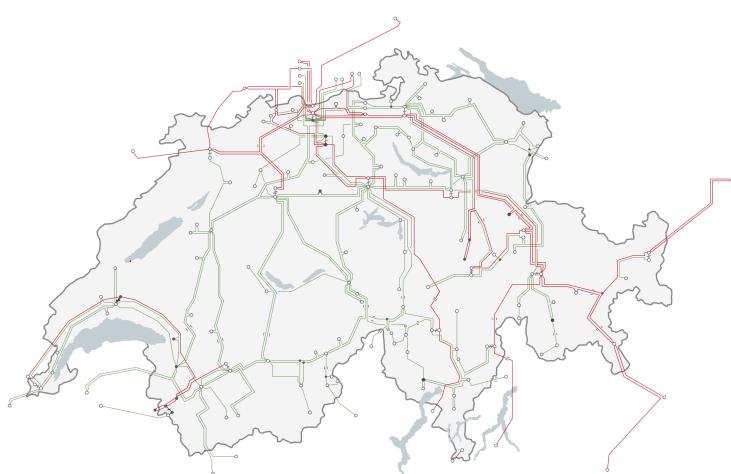


Spannungsebene	Spannungsbereich	Leistung
<b>Höchstspannung</b>	380 kV, 220 kV	> 300 MVA
<b>Hochspannung</b>	150 kV bis 50 kV	< 100 MVA
<b>Mittelpunktspannung</b>	36 kV bis 6 kV	< 30 MVA
<b>Niederspannung</b>	0,4 kV	< 1 MVA

### 16.1 NE1: Übertragungsnetz

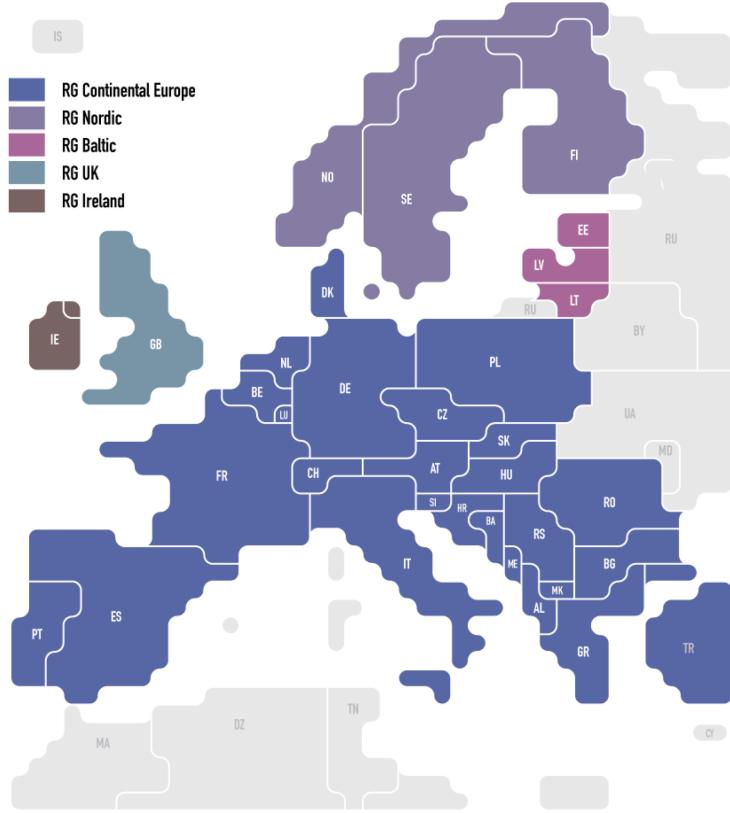
- 380 kV und 220 kV
- Zweck
  - Abtransport der großen Kraftwerksleistungen (typ. > 300 MVA)
  - Versorgung der Verteilnetze
  - Weitläufiger Energietransport
  - Internationaler Verbundbetrieb, Energieaustausch
- Ausdehnung: national, international
- Topologie: (stark) vermaschtes Netz
- Technologie: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

### 16.1.1 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

## 16.1.2 Entso-E



- koordinierter Systembetrieb
- koordinierte Marktlösungen
- koordinierte Systementwicklung

### 16.2 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

### 16.3 NE5: Verteilnetz

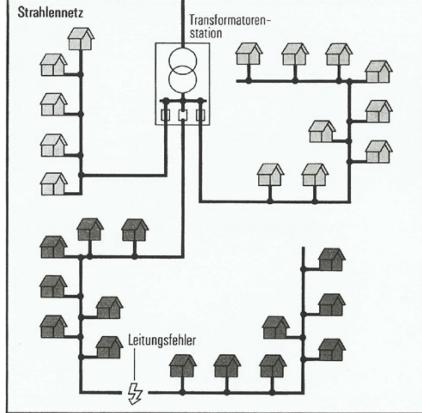
- 20 kV, 10 kV
- Zweck
  - Abtransport kleiner Kraftwerksleistungen (< 30 MVA)
  - Anschluss von Industrie- und Gewerbegebäuden
  - Regionale Verteilung
- Ausdehnung: Kanton, Tal
- Topologie: Ringnetz, Strahlennetz
- Technologie: Freileitungen und Kabel

### 16.4 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

## 17 Netztopologien

### 17.1 Strahlnetz

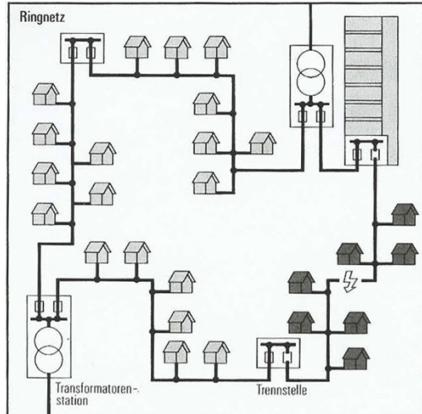
**Pro:**

- 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

### 17.2 Ringnetz

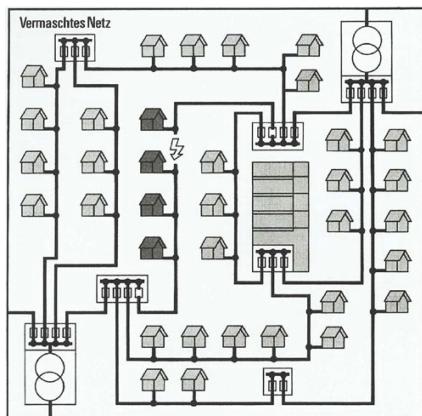
**Pro:**

- höhere Versorgungssicherheit
- geringere Verluste
- verbesserte Spannungshaltung

**Contra:**

- höhere Anspruch an die Qualifikation des Wartungspersonals

### 17.3 Maschennetz

**Pro:**

- eine optimale Versorgungszuverlässigkeit
- optimale Spannungshaltung
- minimale Leistungsverluste

**Contra:**

- hohe Investitionskosten
- hohe Projektions- und Wartungsaufwand
- höhere Kurzschlussströme

## 18 Leitungen

**Aufgabe:**

- Energieübertragung und -verteilung

**Wichtigsten Leitungsarten:**

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

### 18.1 Freileitungen

#### 18.1.1 Freileitungen: Vor- und Nachteile

**Pro:**

- günstige Investitionskosten
- bessere Zugänglichkeit bei Reparaturen ⇒ kürzere Wiederinbetriebnahmezeiten

**Contra:**

- atmosphärischen Einwirkungen ausgesetzt
- Akzeptanzprobleme

**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

#### 18.1.2 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).

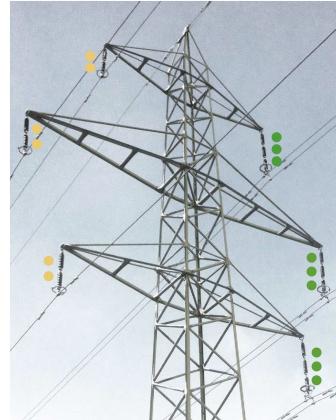
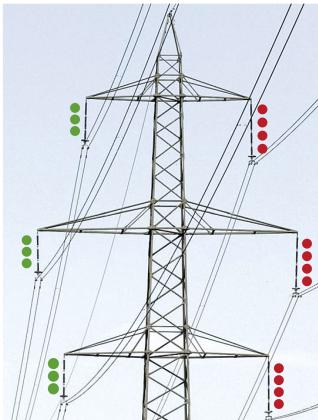
**Materialien:**

- Stahl-Gittermast
- Betonmast
- Stahlrohrmast
- Holzmast

#### 18.1.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen

**Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale:**

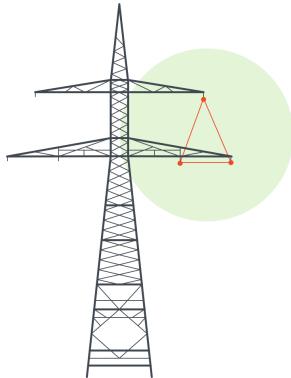
- Anzahl Phasen
- Länge der Isolatorenketten (Je höher die Spannung, umso länger sind die Isolatorenketten)
- Abstand der Phasen und Höhe der Masten



## 18.1.4 Mastenformen

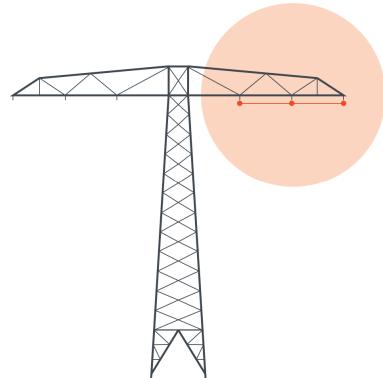
### Donaumast

Zwei Drehstromkreise bei denen die Leiter jeweils im Dreieck angeordnet sind



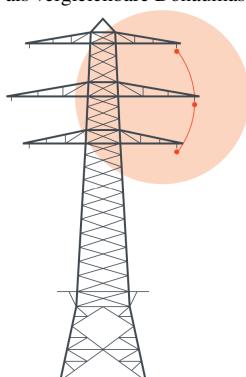
### Einebenenmast

Niedrige Bauhöhe und eine grössere Trassenbreite



### Tonnenmast

Eine geringe Trassenbreite, sind aber höher als vergleichbare Donaumästen



## 18.2 Kabelleitungen

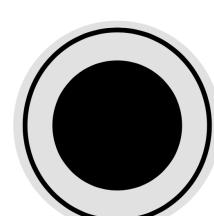
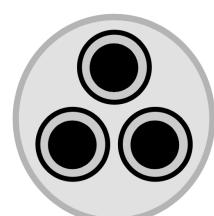
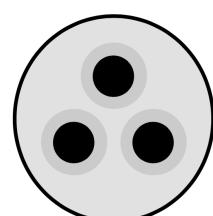
### 18.2.1 Material

**Leiter:** Kupfer oder Aluminium

**Isolierung:** öl-imprägniertes Papier oder Kunststoffe wie Polyäthylen (PE), vernetztes Polyäthylen (VPE) sowie Polyvinylchlorid (PVC)

**Schutzmantel:** Metall

### 18.2.2 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

### 18.2.3 Kabel: Vor- und Nachteile

#### Pro:

- geschützt vor atmosphärischen Einwirkungen ⇒ kleinere Ausfallsrate
- bessere Akzeptanz

#### Contra:

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

### 18.2.4 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

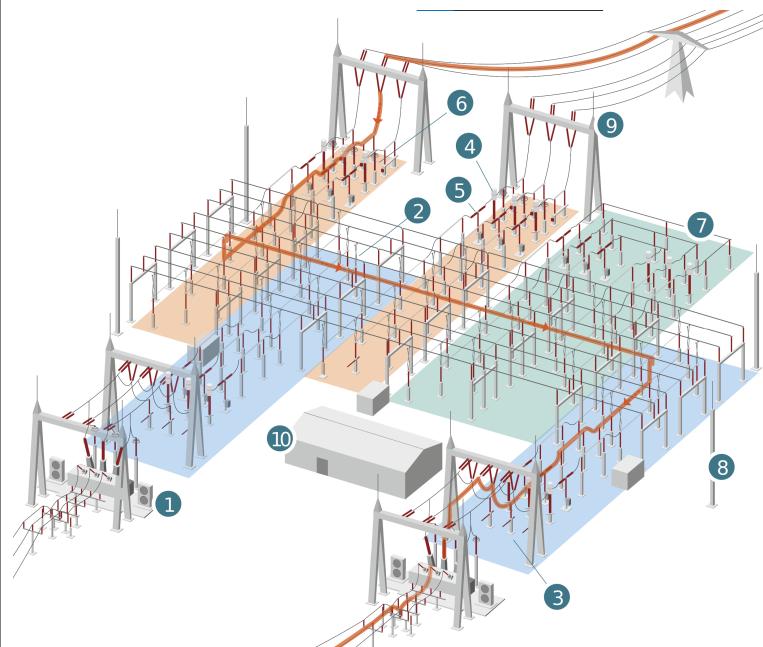
## 19 Schaltanlagen / Umspannwerke

Schaltanlagen: Kein Transformator, Umspannwerk: Mind. ein Transformator

### 19.1 Aufgabe

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

### 19.2 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

### 19.3 Komponenten

#### 19.3.1 Transformator

- Veränderung der Spannung
- Öl zur Isolation und zum Wärmeabtransport

#### 19.3.2 Leistungsschalter



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

#### 19.3.3 Lastschalter



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

#### 19.3.4 Trennschalter



- **Kein** Schalten von Last
- Öffnen eines Stromkreises (Trennung einer Anlage von den restlichen Anlagen)

#### 19.3.5 Messwandler

Messung der Spannung und Strom für Erkennung des Betriebszustandes



#### 19.3.6 Überspannungsableiter

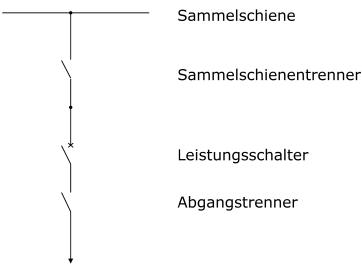
Spannungsabhängiger Widerstand, Bei hoher Spannung verringert sich Widerstand schlagartig



## 19.4 Schalfelder Aufbau

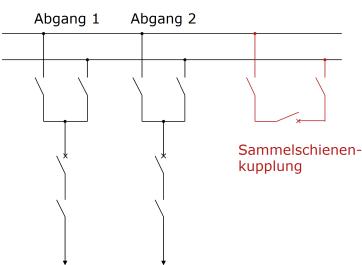
### 19.4.1 Einfachsammelschiene

- übersichtliche und billige Lösung



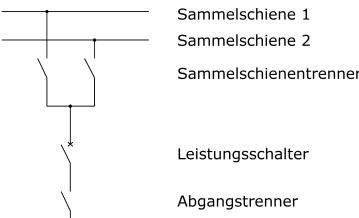
### 19.4.3 Sammelschienenkupplung

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



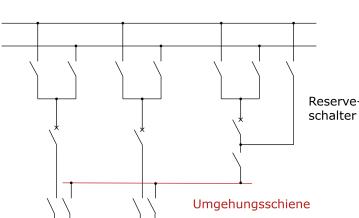
### 19.4.2 Doppelsammelschiene

- ein Sammelschienenumschaltvorgang eines beliebigen Feldes jederzeit möglich



### 19.4.4 Umgehungsschiene

- Bei dieser Schaltung ersetzt Reserveschalter den Kuppelschalter beim Sammelschienenumschaltvorgang



## 19.5 Regeln beim Schalten (Reihenfolge)

### 19.5.1 Allgemein

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

### 19.5.2 Ausschalten

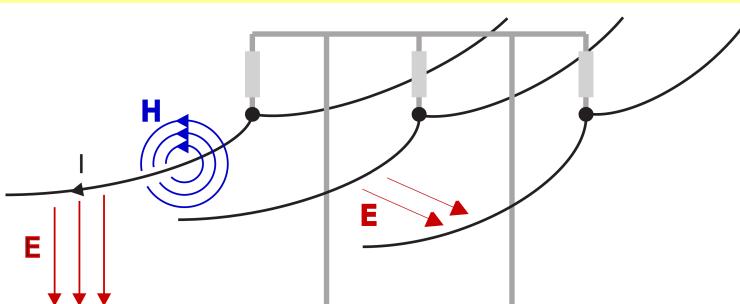
Beim Ausschalten werden Leistungsschalter zuerst geöffnet, dann Last- und Trennschalter

### 19.5.3 Einschalten

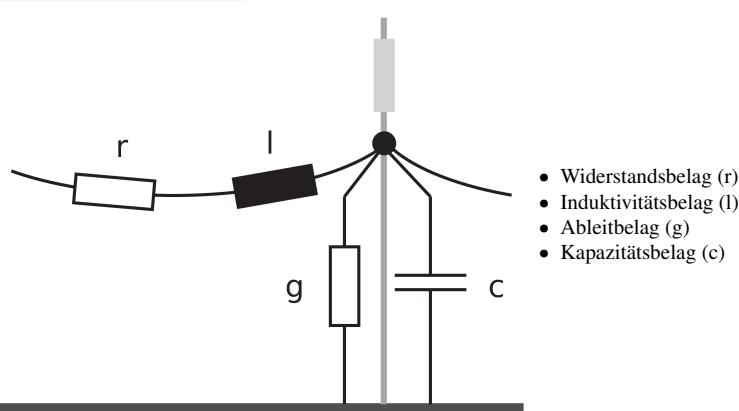
Beim Einschalten müssen zuerst Trennschalter, dann Lastschalter und zuletzt Leistungsschalter geschlossen werden

## 20 Leitungsbeläge

### 20.1 Elektrisches und magnetisches Feld



#### 20.1.1 Ersatzschaltbild



#### 20.2 Widerstandsbelag

## 20.2.1 Ursache

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

## 20.2.2 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	$^\circ\text{C}$

## 20.2.3 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	$\Omega/\text{m}$
$[\sigma]$	Verseifaktor (typisch $\sigma = 1,07$ )	-
$[\rho]$	Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand)	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
$[A]$	Leiterquerschnitt	$\text{mm}^2$

## 20.3 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:

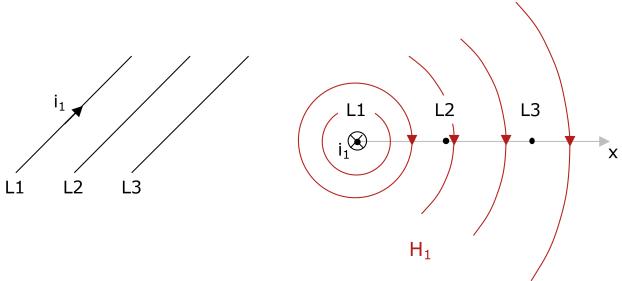
Bei **Bündelleitern** wird der Skin-Effekt durch die Aufspaltung des Querschnitts **abgeschwächt**.

## 20.4 Ableitungsbelag

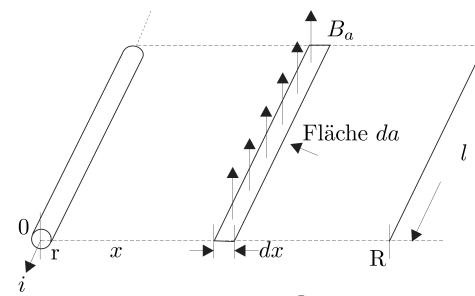
- Ursache: die Verluste des Dielektrikums zwischen den Leitern und zwischen Leiter und Erde
- $G'$  ist sehr klein und kann bei normalen Betriebsverhältnissen gegenüber  $\omega C'$  vernachlässigt werden
- $G'$  ist grösser wenn Teilentladungen (Corona-Effekt) auftreten.
- Witterungsabhängig

## 20.5 Induktivitätsbelag

- Ursache: Verkettung der magnetischen Flüsse
- Strom in L1 hat magnetische Flussverkettung zur Folge
- Fluss = verursachenden Strom  $\times$  Induktivität



### 20.5.1 Formeln



$$\phi_1 = \int_A B_1(x) da = \int_r^R B_1(x) dx$$

$$da = l dx$$

$$B_1(x) = \mu_0 H_1(x) \quad \text{and} \quad H_1(x) = \frac{i}{2\pi x}$$

$$\phi_1 = \mu_0 \int_r^R \frac{i}{2\pi x} l dx$$

$$= \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$$

$$\phi_1 = L_1 i$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$$

## 20.6 Induktivitätsbelag

Der Induktivitätsbelag  $L'$  in  $\text{H/m}$  enthält Eigeninduktivität und Kopplungsinduktivität.

Annahme: verdrillte Leitung, kreisförmiger Leiterquerschnitt

$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \frac{d}{0,78 \cdot r} \right)$$

$$d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

[ $L'$ ]	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 $4\pi \cdot 10^{-7}$	.....	$\frac{\text{H}}{\text{m}}$

### 20.6.1 Einfluss Leiterseilabstand auf Längsinduktivität

- Grösserer Abstand erhöht die Induktivität, da der magnetische Kopplungseffekt abnimmt.

- Kleinere Abstände verringern die Längsinduktivität wegen stärkerer magnetischer Verkettung zwischen Phasenleitern.

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

## 20.7 Kapazitätsbelag

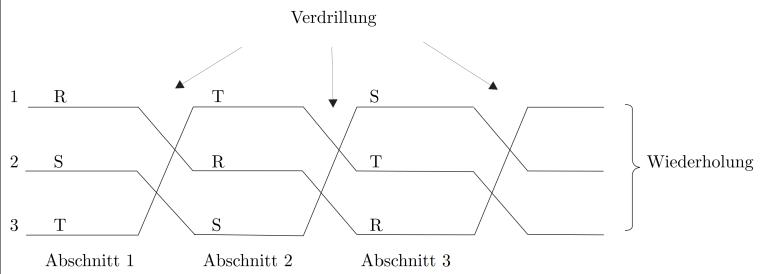
Verursacht durch Kapazitäten gegenüber anderen Außenleitern sowie der Umwelt (Mast/Boden).



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

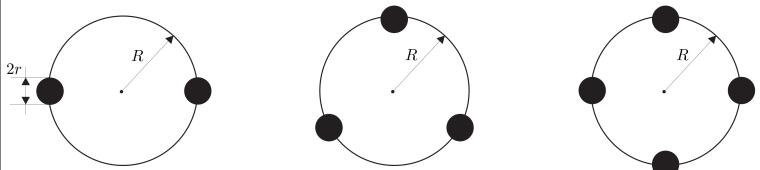
[ $C'$ ]	Kapazitätsbelag	.....	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$
[ $k$ ]	Geometriefaktor (abhängig z. B. von Masthöhe, Durchhang)	.....	-
[ $d$ ]	Mittlerer Leiterabstand	.....	$\text{m}$
[ $r$ ]	Leiterradius	.....	$\text{m}$

## 20.8 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).

## 20.9 Bündelleiter

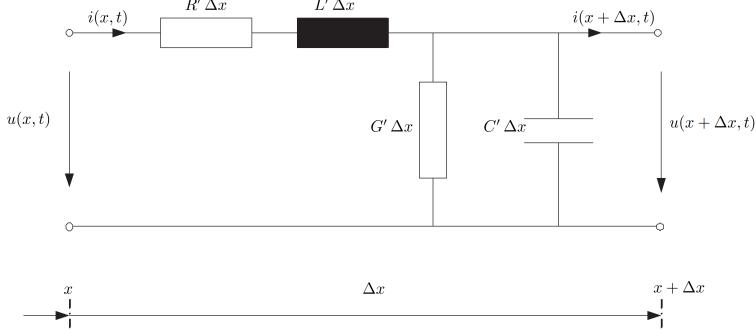


$$r_{\text{eq}} = \sqrt[n]{n \cdot R^{(n-1)} \cdot r}$$

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

## 21 Leitungsmodell

### 21.1 Leitungsgleichungen



#### 21.1.1 Allgemeine Differential Gleichung

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

#### 21.1.2 Allgemeine Differential Gleichung für Wechselstrom

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

#### 21.1.3 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:

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

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

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

## 21.2 Lösung der Leitungsgleichung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

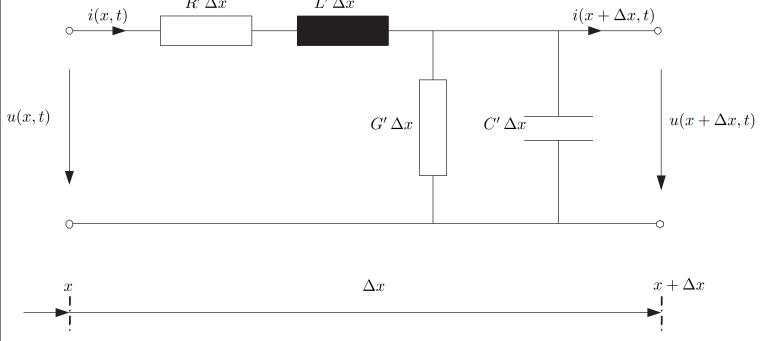
$$U(x) = U_1 \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} - Z_W \cdot I_1 \cdot \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

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

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

## 21.3 Allgemein und für 50Hz

### 21.3.1 Modell Allgemein mit exakter Zweitor-Gleichung



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

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

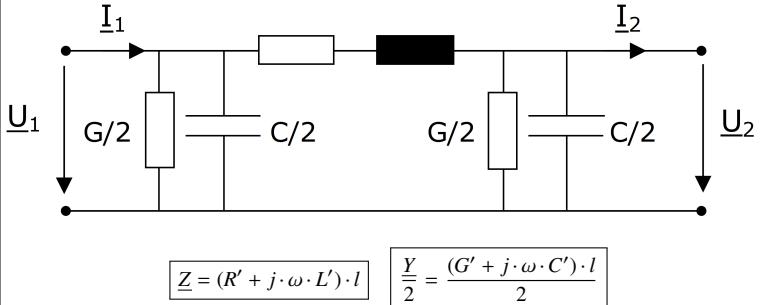
Leerlauf:  $I_2 = 0 \Rightarrow U_2 = \frac{U_1}{\cosh(\gamma l)}$

Kurzschluss:  $U_2 = 0 \Rightarrow I_2 = \frac{I_1}{\cosh(\gamma l)}$

#### 21.4 PI-Ersatzschaltung (Modell Vereinfacht)

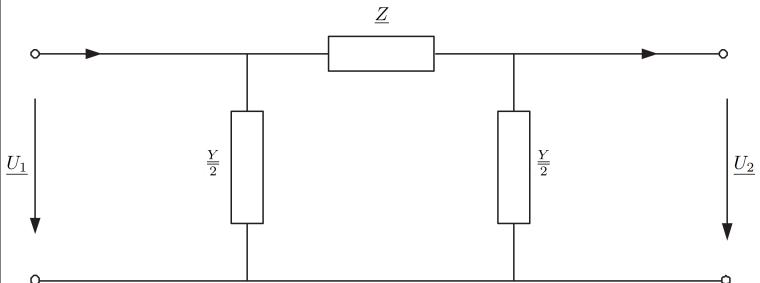
Wenn  $|\gamma \cdot l| \ll 1$ , kann die Vereinfachung  $\cosh \gamma l \approx 1$  und  $\sinh \gamma l = \gamma l$ :  
Vereinfachung für „kurze“ Leitungen mit konzentrierten Elementen R, G, L, C

- Querelemente bestehen aus Leitwert und Kapazität
- Längselemente bestehen aus Widerstand und Induktivität
- 50-Hz-Freileitungen bis ca. 250 km
- 50-Hz-Kabel bis ca. 50 km



$$Z = (R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot l$$

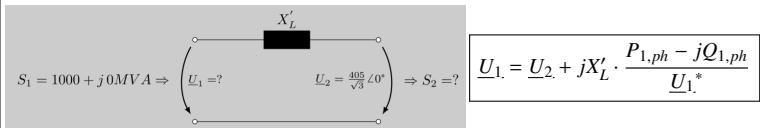
$$\frac{Y}{2} = \frac{(G' + j \cdot \omega \cdot C') \cdot l}{2}$$



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

$$|U_2| = |U_1| \cdot \sqrt{\frac{1}{(R' + j\omega L') \cdot l + \frac{1}{(G' + j\omega C') \cdot l}}}$$

#### 21.4.1 Übung Kraftwerk mit Doppelleitung an Netz

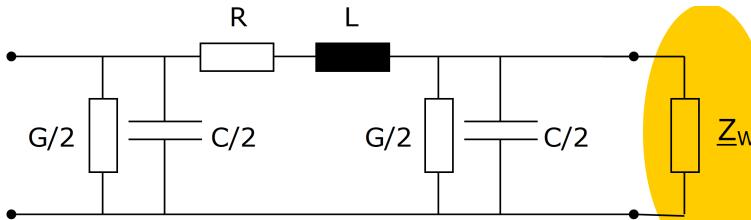


$$U_1 = U_2 + jX'_L \cdot \frac{P_{1,ph} + jQ_{1,ph}}{U_{1*}}$$

## 22 Betriebsverhalten

### 22.1 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.



### 22.2 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:  $Z_W = 30 \dots 50 \Omega$ .

### 22.3 Unternatürliche Belastung

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

### 22.4 Übernatürliche Belastung

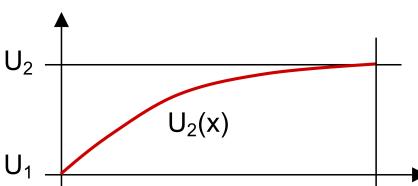
- Die Lastimpedanz ist niedriger als die Wellenimpedanz.
- Die Last nimmt mehr als die natürliche Leistung auf, Leitung gibt Blindleistung ab.
- Die Längsinduktivität „verbraucht“ mehr Blindleistung als die Querkapazität „erzeugt“.
- Die Spannung am Leitungsende ist tiefer als am Leitungsanfang.

### 22.5 Praxis

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

### 22.6 Leerlauf

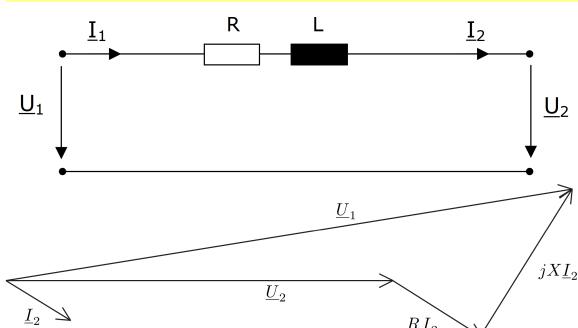
- Extremfall der unternatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Kapazität
- Spannung steigt entlang der Leitung an
- Spannungsüberhöhung am Leitungsende (Ferranti Effekt)



### 22.7 Kurzschluss

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

### 22.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung

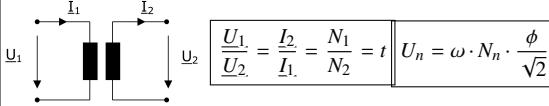


### 22.8.1 Phasenstrom durch Leitung

$$I_{\text{phase}} = \frac{U_{\text{phase}}}{Z_{\text{phase}}}$$

## 23 Transformator

### 23.1 Idealer Transformator

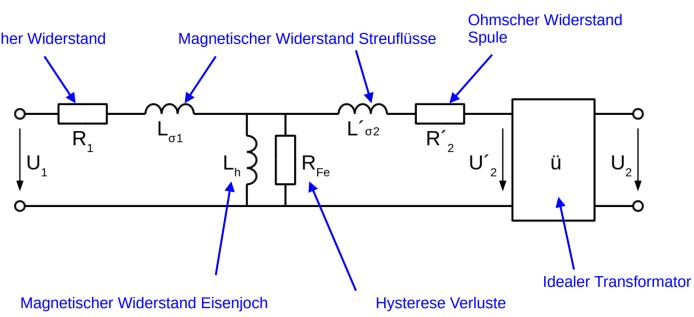


$$\phi = B \cdot A_{FE}$$

$$A_{FE} = \frac{\pi D \cdot k_a \cdot f_{FE}}{4}$$

[U <sub>1</sub> ]	Primärspannung	V
[I <sub>1</sub> ]	Primärstrom	A
[N <sub>1</sub> ]	Anz. Primärwindungen	-
[U <sub>2</sub> ]	Sekundärspannung	V
[I <sub>2</sub> ]	Sekundärstrom	A
[N <sub>2</sub> ]	Anz. Sekundärwindungen	n
[N <sub>n</sub> ]	Anz. Windungen an Ausgang n	n
[ϕ]	Magnetischer Fluss	Wb
[B]	Magnetische Flussdichte	T
[A <sub>FE</sub> ]	Wirksamer Eisenquerschnitt	m <sup>2</sup>
[D]	Durchmesser	m
[k <sub>a</sub> ]	Kernquerschnitt	-
[f <sub>FE</sub> ]	Eisfüllfaktor	-

### 23.2 Verluste im Transformator



- Streuverluste in  $L_{\sigma 1}$
- Wicklungsverluste in  $R_i$
- Kern-/Hystereseverluste in  $R_{FE}$
- Für  $L_h$  und  $R_{FE}$  ⇒ Leerlauf
- Für  $R_1, L_{\sigma 1}, R'_2, L'_{\sigma 2}$  ⇒ Kurzschluss

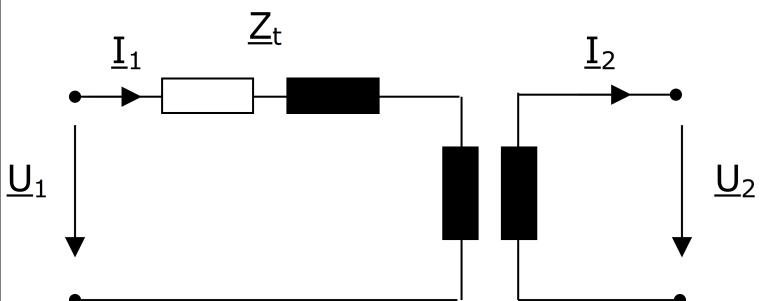
$$L'_{\sigma 2} = u^2 L_{\sigma 2}$$

$$I'_2 = u I_2$$

$$U'_2 = u U_2$$

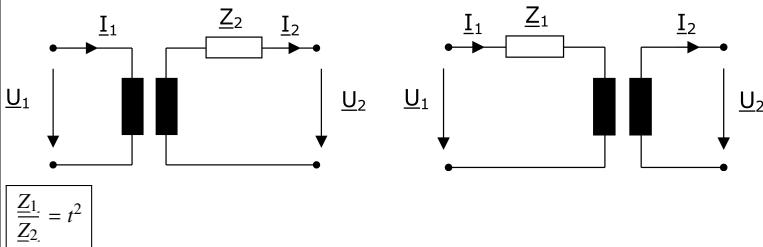
$$u = t$$

### 23.3 Praktisches Transformatormodell



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

### 23.4 Umrechnung von Impedanzen



### 23.5 Leerlauf / Kurzschluss

#### Leerlauf

Nur  $L_h$  und  $R_{FE}$  müssen beachtet werden.

$$I_1 = I_{R_{FE}} + I_{L_h} \Rightarrow |I_1| = \sqrt{|I_{R_{FE}}|^2 + |I_{L_h}|^2}$$

#### Kurzschluss

$L_h$  und  $R_{FE}$  nicht beachten ⇒ haben praktisch keinen Einfluss.

Kurzschlussspannung  $U_k = x\%$  von Nennspannung  $U_1$  so dass bei Kurzschluss Nennstrom fließt,  $P_{\text{nenn}}(R_1+R_2) = I_{1n} \cdot U_{1n}(R_1+R_2) = P_{ks}(R_1+R_2)$  Kupferverl. bleiben gleich.

## 23.6 Dreiphasentransformatoren

- Verschaltung der drei Phasenwicklungen auf Primär- und Sekundärseite wirkt sich auf Übersetzungsverhältnis aus.
- Parallelschaltung nur möglich, wenn sekundärseitig gleiche „Zahl“ (Bsp. Yy0 und Dd0)
- Amplitude und Phasenlage der Spannung können verändert werden.
- Übersetzungsverhältnis wird komplex:  $t$

## 23.7 Schaltgruppen

### Mögliche Schaltungen

- Y ... Sternschaltung
- D ... Dreieck-Schaltung
- Z ... „Zick-zack“ (Nur US)

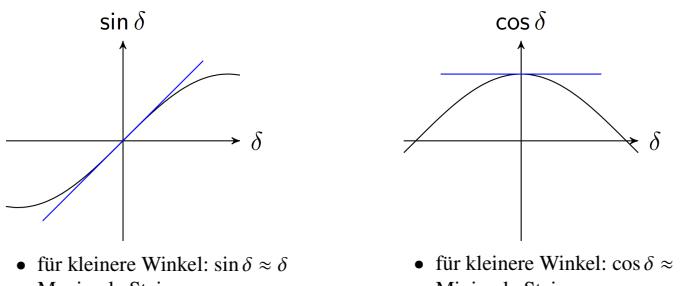
Bezeichnung		Zeigerbild		Schaltungsbild	
Kennzahl	Schaltgruppe	OS	US	OS	US
0	Yy0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				

### Übersetzungsverhältnisse:

Schaltgruppe	Verhältnis
Yy0	$U_{1n} = t \cdot U_{2n}$
	$U_1 = t \cdot U_2$
Dy5	$U_{1n} = \frac{t \cdot U_{2n}}{\sqrt{3}}$
Yd5	$U_{1n} = t \cdot U_{2n} \cdot \sqrt{3}$
Yz5	$U_{1n} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2n}}{2}$

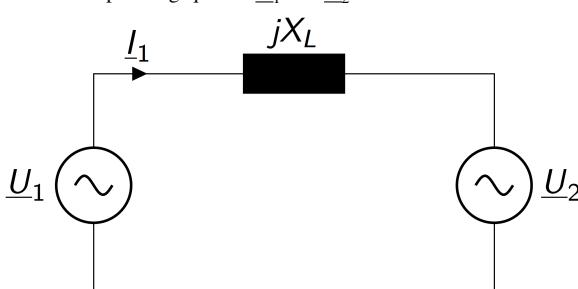
## 24 Leistungsfluss über eine Leitung

### 24.0.1 Mathematische Vereinfachungen im Voraus



## 24.1 Leistungsfluss

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



## 24.2 Leistungsübertragung

$$\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j \cdot \theta_1} \quad \underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j \cdot \theta_2}$$

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

$$I_1 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{j \cdot X_L} = \frac{U_1 \cdot e^{j \cdot \theta_1} - U_2 \cdot e^{j \cdot \theta_2}}{j \cdot X_L}$$

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

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

$$S_1 = \underline{U}_1 \cdot I_1^* \quad S_1 = P_1 + j \cdot Q_1$$

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

$$P_1 = \text{Re}\{\underline{U}_1 \cdot I_1^*\} \quad P_1 = U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cdot \sin(\delta)$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\underline{U}_1 \cdot I_1^*\} \quad Q_1 = U_1^2 \cdot \frac{1}{X_L} - U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X_L} \cos(\delta)$$

$U_1$	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

### 24.3 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:

$$P_{12} = U_1 \cdot U_2 \cdot \frac{1}{X} \cdot \sin(\delta_{12})$$

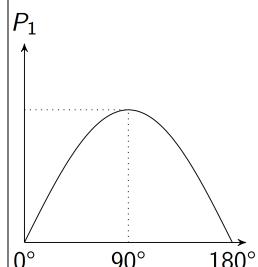
$$Q_{12} = \frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(\delta_{12})}{X}$$

$$Q_{21} = \frac{U_2^2}{X} - \frac{U_2 \cdot U_1 \cdot \cos(-\delta_{12})}{X}$$

### 24.3.1 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  $U_1, U_2$

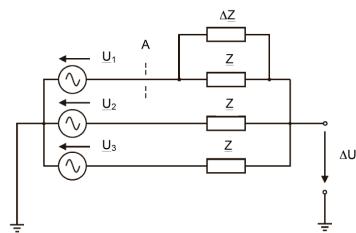
### 24.4 Maximale Wirkleistungsübertragung



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



## 26.5 Sternpunktspannung 2 (Störimpedanz $\Delta Z$ beigefügt)



$$\underline{\Delta U} = \frac{\underline{U}_1 \cdot \left(1 + \frac{Z}{\Delta Z}\right) + \underline{U}_2 + \underline{U}_3}{3 + \frac{Z}{\Delta Z}}$$

## 27 Leittechnik

### 27.1 Ruhestromauslösung

Funktion: Die Ruhestromauslösung (auch Arbeitsstromauslösung) ist ein Schutzprinzip, bei dem ein Auslösekriterium (z.B. ein Stromfluss in einem überwachten Kreis) beim Erreichen eines Schwellenwerts die Auslösung eines Schalters bewirkt. Im Normalzustand fließt kein Strom im Auslösekreis, bei einem Fehler jedoch schon, wodurch der Schutz ausgelöst wird.

Beispiel aus der Kraftwerkstechnik:

Überstromauslösung eines Generatorschutzrelais: Wenn der Strom im Generator einen bestimmten Grenzwert überschreitet (z.B. bei einem Kurzschluss), wird ein Signal an den Leistungsschalter gesendet, um den Generator vom Netz zu trennen.

Vorteil: Einfache und zuverlässige Detektion von Überströmen oder anderen Fehlerzuständen. Direkte Auslösung bei Erreichen des Grenzwertes.

Nachteile: Benötigt eine externe Energiequelle für den Auslösemechanismus. Bei Ausfall dieser Energiequelle (z.B. Hilfsspannung) ist der Schutz unwirksam. Dies im Gegensatz zur Ruhespannungsauslösung.

## 28 Schutztechnik

### 28.1 Aufgaben der Schutztechnik

- Gewährleistung der Kontinuität des Betriebs und die Stabilität des Netzes
- Sicheres, schnelles und selektives Abschalten der gestörten Netzelemente
- Schutzsystem muss die Fähigkeit haben, den Fehlerzustand vom normalen Betriebszustand genau zu unterscheiden.
- Einleitung von Massnahmen, die sich möglichst eng begrenzt auf den Fehlerort beziehen

### 28.2 Selektivität

- Selektivität gewährleistet, dass im Fehlerfall möglichst nur der fehlerhafte Netzbereich oder Verbraucher abgeschaltet wird und andere Netzbereiche und Verbraucher nicht mit beeinträchtigt werden.
- Erreichen durch Staffelung
  - Zeitstaffelung
  - Stromstaffelung
  - Impedanzstaffelung
- zeitverkürzte Selektivität erzielen: Die zeitverkürzte Selektivitäts-Steuerung (ZSS) nutzt eine Kommunikation zwischen den Leistungsschaltern, um unnötige Verzögerungen zu vermeiden.

### 28.3 Überstrom-Zeit-Schutz

Die Auswertung der Stromamplitude ist die einfachste Methode den normalen Betriebszustand eines Netzes von einem Netzfehler zu unterscheiden.

Anwendung: Leitungs-, Generator-, Transformatorm- und Sammelschienenschutz

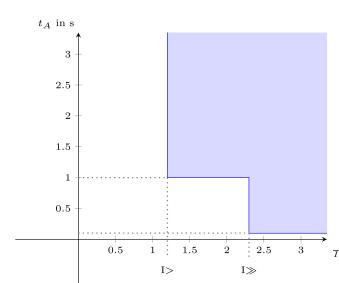
### 28.4 Unabhängiger Maximalstrom Zeitschutz - UMZ

Abschnittweise definiert

UMZ sendet den AUS-Befehl beim Überschreiten des Einstellwertes des Überstroms nach einer genau definierten Zeit.

Liegt der momentane Strom zwischen  $1.2I_N$  und  $2.3I_N$ , löst der Schutz nach 1 Sekunde aus ( $I >$ )

Liegt der Effektivwert über  $2.3I_N$  löst er nach 0.1 Sekunde aus ( $I \gg$ ).



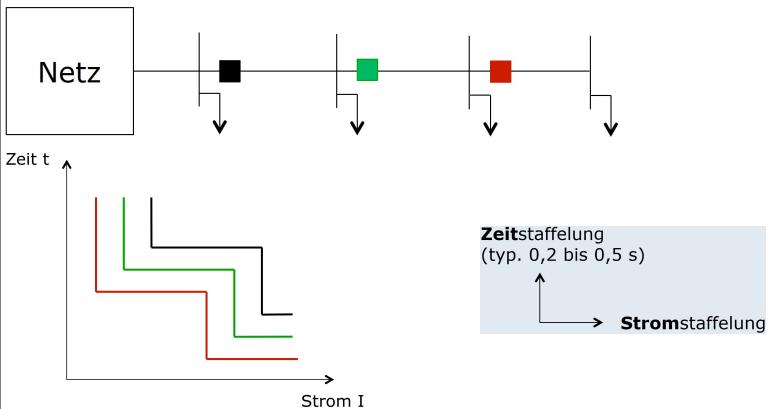
### 28.5 Abhängiges Maximalstrom Zeitschutz - AMZ

Als Funktion definiert

$$t(I) = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_P}\right)^{0.02}} \cdot T_P$$

$[t(I)]$	Auslösezeit	.....	s
$[I]$	Strom	.....	A
$[I_P]$	Parametrierbarer Anregestrom	.....	A
$[T_P]$	Multiplikator	.....	s

## 28.6 Zeitstaffelung



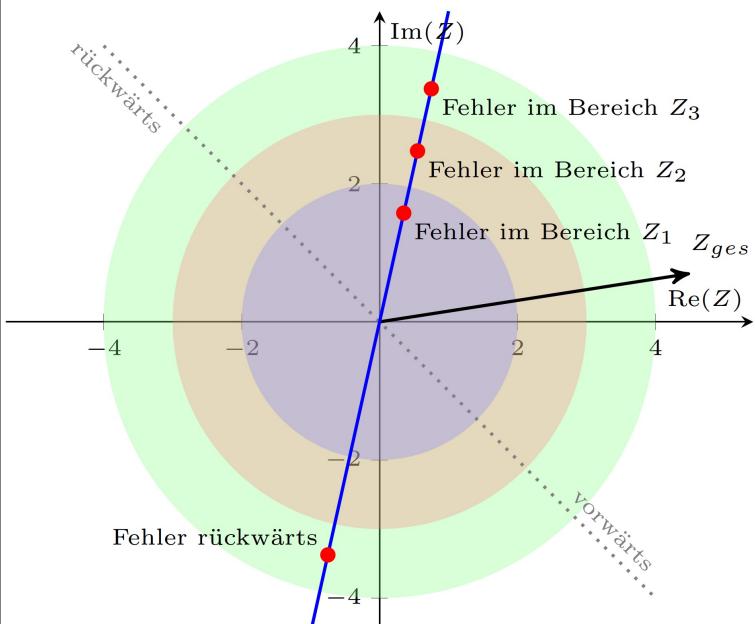
### Vorteile:

- Einfache Methode, den normalen Betriebszustand eines Netzes von einem Netzfehler zu unterscheiden.

### Nachteile:

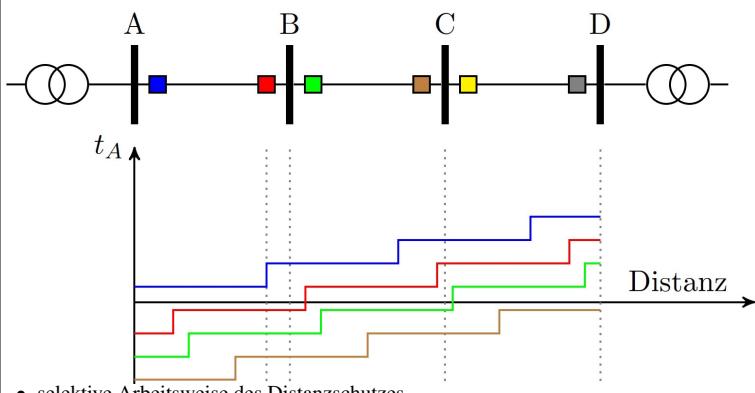
- Wenn die Einspeisung sich ändert, würde der Strang unter Umständen unselektiv abgeschaltet.
- In diesem Fall ist eine Fehlerortung nicht mehr möglich, da nur die Auslösezeit als Hilfsgröße zur Selektion des Fehlerorts dient.
- Die Auslösezeit nahe der Einspeisung wird immer grösser und somit fliessen grössere Kurzschlussströme eine verhältnismässig lange Zeit.
- Nur in radialen Systemen (Strahlennetz) verwendet.

### 28.7 Distanzschutz



- Nachteile des Überstromzeitschutzes, wie etwa lange Auslösezeiten oder fehlende Selektivität bei Abweichung vom Normalschaltzustand, ist behoben.
- Zeitstaffelschutz, dessen Auslösezeit mit grösser werdender Entfernung zwischen Fehlerstelle und Schutzgerät-Einbauort stufig ansteigt.
- Distanz ≡ Impedanz
- Reiner Kurzschlusschutz.
- Aus den Messwerten der Strom- und Spannungswandler wird die Impedanz ermittelt.
- $Z_1$ : Fehler nah,  $Z_3$  Fehler weit weg
- Fehler vorwärts oder rückwärts ist aufgrund der Stromrichtung

### 28.7.1 Staffelplan des Distanzschutzes

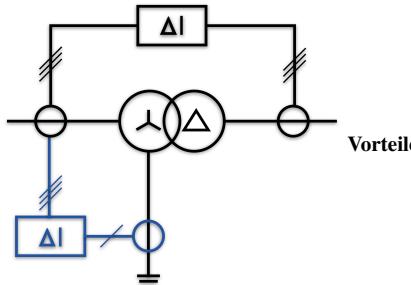


- Die stufenförmige Charakteristik der Auslösekennlinien sorgt dafür, dass Netzfehler schneller abgeschaltet werden
- Die vorgelagerten Schutzgeräte dienen als Reserveschutz
- Fehlerortung viel Präziser

## 28.8 Differentialschutz

### Prinzip:

- Das Erkennungsprinzip beruht auf dem ersten kirchhoffischen Gesetz. „Die Summe der zufließenden Ströme in einem elektrischen Knotenpunkt muss gleich der Summe der abfließenden Ströme sein“
- $I_{\text{Diff}} = |I_1 + I_2| > 0$  ist Fehlerfall
- Wird bei Transformatoren angewendet



- eine unverzögerte Abschaltung an jeder beliebigen Stelle des Schutzbereiches
- Die Abgrenzung des Schutzbereichs an den Leitungsenden. Damit sind, im Gegensatz zum Distanzschutz, 100 % der Leitung in Schnellzeit geschützt.

### Nachteile:

- keine Reserveschutzfunktionen für die angrenzenden Bereiche.

## 28.9 Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>)

- + Sehr gute elektrische Isolierfähigkeit (hohe Durchschlagfestigkeit).
- + Hervorragende Lichtbogenlöscheinigenschaften.
- + Nicht brennbar, ungiftig (im reinen Zustand).
- Sehr hohes Treibhauspotenzial (rund 23.500x stärker als CO<sub>2</sub>).
- lange Lebensdauer (ca. 3.200 Jahre).
- Bildung giftiger Zersetzungprodukte bei Lichtbogenentladung.

## 29 Stabilität

Idealzustand:

- Alle Generatoren drehen mit der gleichen konstanten Drehzahl
- Amplituden der Knotenspannungen sind konstant
- Polradwinkel / Spannungswinkel sind konstant

### 29.1 Stabilitätsbegriff

Die Stabilität des Stromnetzes ist die Fähigkeit eines elektrischen Stromnetzes, bei einem gegebenen Ausgangszustand **nach einer physikalischen Störung wieder einen Gleichgewichtszustand zu erreichen**, wobei die meisten Systemvariablen so begrenzt sind, dass praktisch das gesamte System intakt bleibt.

### 29.2 Aufgaben des Netzbetriebs

Technische Ziele:	Zu jedem Zeitpunkt Sicherstellung von ...
<b>Leistungsbilanz:</b>	Angebot = Nachfrage
<b>Synchronizität und Dämpfung:</b>	gleiche Frequenz an allen Knoten
<b>Frequenzstabilität:</b>	Frequenz = 50 Hz
<b>Spannungsstabilität:</b>	Spannung = Nennspannung
Technische Herausforderungen:	Beschreibung
<b>Variabilität</b>	Fluktuierende Last- und Angebotsverläufe
<b>Unsicherheit</b>	Ungenaue Last- und Angebotsvorhersagen
<b>Störungen</b>	Ausfälle, Leistungsoszillationen, Blackouts

### 29.3 Statische Stabilität (Kleinsignalstabilität)

- Es kann sich ein stabiles Gleichgewicht einstellen (Eingeschwungener Zustand)
- Lastfluss bildet konstanter Frequenz, konstanten Spannungen und Winkeln aus
- Entscheidend ist die Konfiguration des Systems:
  - Einspeisung
  - Netz (Eigenschaften der Netzelemente & Topologie)
  - Lasten

### 29.4 Dynamische Stabilität (Grosssignalstabilität)

- Nach einer Störung stellt sich erneut ein stabiles Gleichgewicht ein
- Frequenz, Spannung und Winkel sind vorübergehend veränderlich
- Entscheidend ist die Konfiguration des Systems sowie
  - Art der Störung (Schaltung, Kurzschluss, Lastsprung, ...)
  - Dauer der Störung (Wiedereinschaltzeit)

## 30 Frequenzregelung

Frequenzstabilität bezieht sich auf die Fähigkeit eines Stromversorgungssystems, eine konstante Frequenz nach einem schweren Systemstörfall aufrechtzuerhalten, der zu einem signifikanten Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Last führt. Sie hängt von der Fähigkeit ab, das Gleichgewicht zwischen Systemgeneration und Last bei minimalem unbedachtigtem Lastverlust aufrechtzuerhalten bzw. wiederherzustellen.

### 30.1 Modell eines einzelnen Synchrongenerators

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(P_{\text{Gen}} - P_{\text{Last}})}{2 \cdot H}$$

[ $\omega$ ]	Elektrische Winkelgeschwindigkeit	.....	rad
[ $t$ ]	Zeit	.....	s
[ $H$ ]	Trägheitskonstante (proportional zur Schwungmasse)	.....	s
[ $P_{\text{Gen}}$ ]	Erzeugte Leistung von der Turbine	.....	W
[ $P_{\text{Last}}$ ]	Elektrische Lastleistung (Netzeinspeisung)	.....	W

#### Beobachtungen:

- Wenn dauerhaft  $P_{\text{Gen}} > P_{\text{Last}}$ , wird  $\omega$  immer größer.
- Wenn dauerhaft  $P_{\text{Gen}} < P_{\text{Last}}$ , wird  $\omega$  immer kleiner.
- Je größer  $H$ , desto langsamer ändert sich  $\omega$ .

### 30.2 Modell des elektrischen Netzes

- mehrere gekoppelte Synchrongeneratoren,  $i = 1, \dots, N$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{(P_{\text{Gen},i} - P_{\text{Last},i})}{2 \cdot H_i}$$

- $P_{\text{Gen},i}$  folgt einem Fahrplan
- $P_{\text{Last},i}$  hängt von
  - den Lasten am Knoten  $i$
  - der elektrischen Kopplung mit anderen Knoten
  - der Lastbilanz aller anderen Knoten im Netz

#### 30.2.1 Transiente Stabilität und Synchronizität

Frequenz an jedem Knoten soll gleich sein.

$$\frac{d\omega_i}{dt} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega \quad \forall \text{ heisst f\"ur alle}$$

Wird überwiegend durch **passive Stabilität des Netzes** sichergestellt. Zusätzliche Massnahmen werden in Zukunft wichtiger werden.

## 30.2.2 Frequenzstabilität:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{k}$$

[ $\Delta f$ ]	Frequenzabweichung .....	Hz
[ $\Delta P$ ]	Änderung der Leistung (Differenz Erzeugung/Verbrauch) ...	W
[ $k$ ]	Proportionalitätsfaktor .....	Hz/W

Wird durch die **Grundenergiebeschaffung** und die **klassischen Systemdienstleistungen** (Netzbetreiber) sichergestellt.

## 30.3 Abweichungen vom Lastfahrplan

### 30.3.1 Problem

- Für Nachfragen und volatile Energiequellen sind nur unsichere Vorhersagen bekannt
- Durch diskretisierte Fahrplanprofile (z. B. in Schritten von Stunden oder 15 Minuten) können selbst bei genauer Vorhersage nicht alle Lastprofile erfüllt werden
- Störungen im Netz, z. B. Verlust eines Generators, einer Last oder einer Leitung ändern die Lastflussbilanz und müssen kompensiert werden

### 30.3.2 Lösung

- Automatische und klar geregelte Verfahren, um Fahrplanabweichungen zu kompensieren.
- Faire Aufgabenteilung über alle Netzregionen und nach Verursacherprinzip.
- Hierarchische Struktur mit mehreren Zeitebenen.

## 30.4 Transientenregelung und Schwingungsdämpfung

- Zeitraum: wenige Sekunden
- Störungen (z.B. Kurzschlüsse) lösen netzweite Oszillation und starke lokale Frequenzschwankungen im Netz aus
- Elektrische Kopplung zwischen den Generatoren und Schwungmassen  $H_i$  wirken der Störung **passiv entgegen**
- Zusätzliche **aktive Schwingungsdämpfung** durch Modulation ausgewählter  $P_{\text{Last},i}$  (*Power System Stabilizer*)
- Alle Generatoren konvergieren zur **Systemfrequenz  $\omega$**  und zur **Gesamtsystemdynamik**

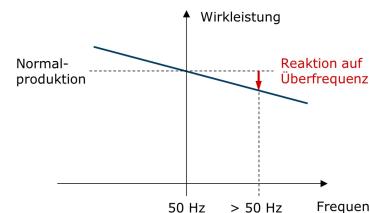
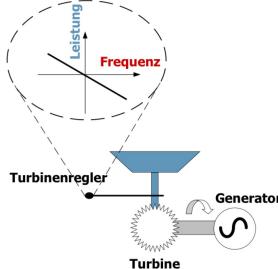
$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{2H_i}(P_{\text{Gen},i} - P_{\text{Last},i}) \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H}(P_{\text{Gen}} - P_{\text{Last}})$$

## 30.5 (n-1)-Sicherheitsprinzip

Das (n-1)-Sicherheitsprinzip besagt, dass der Ausfall eines beliebigen Betriebsmittels (z.B. Leitung, Transformator, Kraftwerksblock) in einem elektrischen Netz zu keiner Überlastung der verbleibenden Betriebsmittel und zu keinem Netzzusammenbruch führen darf. Das Netz muss auch nach dem Ausfall einer Komponente noch stabil und sicher betrieben werden können.

## 30.6 Primärregelung

Frequenz soll stabil gehalten werden.



- Typische Einsatzdauer: Sekunden bis wenige Minuten
- Regelcharakteristik wie ein proportional (P-Regler)
- Die Leistungsanpassung passiert automatisch
- Durch Fahrplanabweichung gibt es einen **dauerhaften Bilanzfehler  $P_{\text{Gen}} - P_{\text{Last}} \neq 0$**
- Die Frequenz beginnt vom Nominalwert  $\omega_0 = 50 \text{ Hz}$  abzuweichen
- Alle Generatoren im Netz ändern ihre erzeugte Leistung proportional zur Frequenzabweichung, um die Lastbilanz wiederherzustellen
- K-Faktor wird vom Netzbetreiber für jedes Kraftwerk festgelegt

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H}(P_{\text{Gen}} - P_{\text{Last}} - K(\omega - \omega_0))$$

### 30.6.1 Neue Systemfrequenz

$$\omega = \omega_0 + \frac{1}{K}(P_{\text{Gen}} - P_{\text{Last}})$$

## 30.7 Sekundärregelung

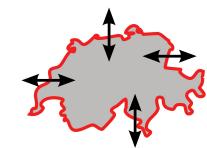
Frequenz wieder auf 50 Hz bringen.

- Typische Einsatzdauer: bis 15 Minuten
- Regelcharakteristik wie ein PI-Regler
- Die Leistungsanpassung passiert zentral automatisch
- Primärregelung führt zu Stabilität und ausgeglichener Gesamtlastbilanz, aber zu **permanenter Frequenzabweichung**
- Primärregelung muss entlastet werden, um im Störfall wieder zur Verfügung zu stehen
- Außerdem weicht die **Lastbilanz der betroffenen Regelzone** vom Fahrplan ab (führt zu Strafzahlungen)
- Die Generatoren einer Regelzone ändern ihre erzeugte Leistung, bis die Lastbilanz der Regelzone wiederhergestellt ist

### 30.7.1 Bilanzfehlers $e$ der Regelzone

z.B. der Schweiz (*Area Control Error*)

$$e = \sum_{i \in \text{Grenzleitungen}} (P_{\text{Leitung},i}^{\text{ist}} - P_{\text{Leitung},i}^{\text{soll}})$$



[ $e$ ]	Bilanzfehler .....	MW
[ $P_{\text{Leitung},i}^{\text{ist}}$ ]	Tatsächliche Leistung auf Leitung $i$ .....	MW
[ $P_{\text{Leitung},i}^{\text{soll}}$ ]	Soll-Leistung auf Leitung $i$ .....	MW

- Alle Generatoren der Regelzone erhalten das zentrale Stellsignal  $e$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{2H}(P_{\text{Gen},i} - P_{\text{Last},i} - K_1 \cdot e - K_2 \cdot \int e)$$

- Damit wird die **Lastbilanz der Regelzone** wieder ausgeglichen, bis  $e = 0$  erreicht ist
- Gleichzeitig wird die **Frequenzabweichung** kompensiert, da insgesamt wieder  $P_{\text{Gen}} = P_{\text{Last}}$  gilt.

## 30.8 Tertiärregelung

Regelreserven wieder frei machen.

- Typische Einsatzdauer: wenige Minuten bis mehrere Stunden
- Die Leistungsanpassung passiert oft manuell
- Sekundärregelung führt zu Frequenzkorrektur und ausgeglichener Lastbilanz der Regelzone
- Sekundärregelung muss entlastet werden**, um im Störfall wieder zur Verfügung zu stehen
- Dazu werden durch den Betreiber der Regelzone **manuell Reserveleistung aktiviert oder deaktiviert**, um  $P_{\text{Gen}}$  in der Regelzone zu korrigieren
- Die Sekundärregelung wird dabei automatisch zurückgefahren

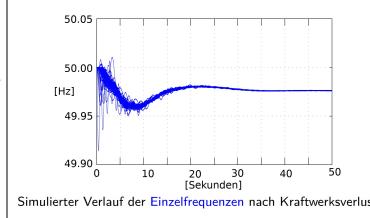
## 30.9 Regelkonzept $\omega \neq 50 \text{ Hz} - \text{was passiert?}$

- Erste Sekunden: alle reagieren
- Erste Minuten: ausgewählte «Teamkollegen» übernehmen
- Nach einigen Minuten: «Ersatzfahrer» steigt auf

## 30.10 Europäisches Netzmodell - Kraftwerksverlust

### 30.10.1 Transiente und Primärregelung

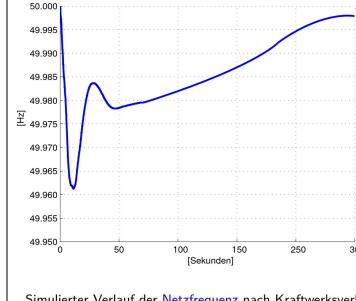
- Durch Verlust wird die Lastbilanz negativ, die Frequenz nimmt ab.
- Transiente Stabilität ist gewährleistet, das Netz bleibt synchron.



Das Gesamtnetz reagiert.

### 30.10.2 Sekundärregelung

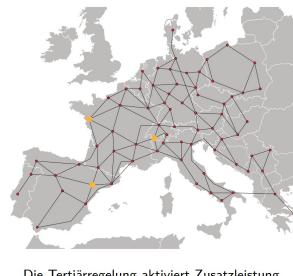
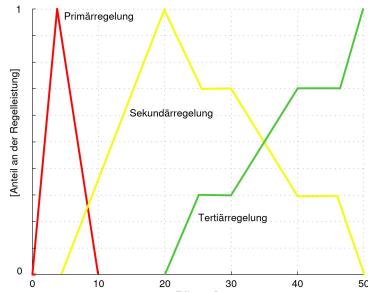
- Durch Integratoreffekt erfolgt Frequenzkorrektur.
- $P_{\text{Gen}}$  der Regelzone wird erhöht bis Lastbilanz ausgeglichen ist.



Die Sekundärregelung korrigiert die Lastbilanz der Regelzone.

### 30.10.3 Tertiärregelung

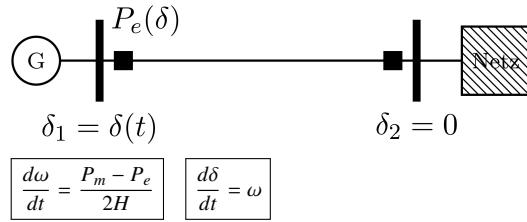
- Sekundärregelleistung wird schrittweise abgelöst.



## 31 Transiente Stabilität

*Transiente Stabilität* bezieht sich auf die Fähigkeit der Synchronität eines zusammengeschalteten Stromnetzes, nach einer Störung synchron zu bleiben. Sie hängt von der Fähigkeit ab, das Gleichgewicht zwischen dem elektromagnetischen Drehmoment und dem mechanischen Drehmoment jeder Synchronmaschine im System aufrechtzuerhalten bzw. wiederherzustellen.

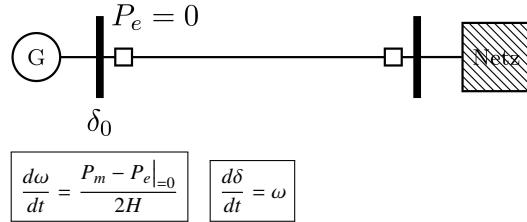
### 31.1 Mechanische zu Elektrischer Leistung



Im stabilen Zustand gilt:

$$P_m = P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0$$

#### 31.1.1 Fehlerfall, Lastabwurf, $P_e = 0$



Der Generator kann keine elektrische Leistung abgeben  $P_e|_{=0}$ .

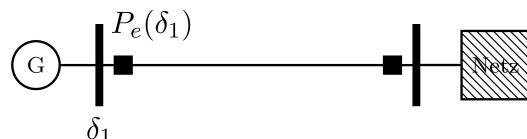
Es wird aber weiterhin mechanische Leistung dem Generator zugeführt.

Der Generator muss die von der Turbine zugeführte Energie  $P_m$  aufnehmen, indem er seine kinetische Energie erhöht, d.h. beschleunigt:

$$\frac{d\omega}{dt} > 0, \quad \omega \uparrow, \quad \delta \uparrow$$

[ $\omega$ ]	Winkelgeschwindigkeit	.....	rad
[ $t$ ]	Zeit	.....	s
[ $P_m$ ]	mechanische Leistung	.....	W
[ $P_e$ ]	elektrische Leistung	.....	W
[ $H$ ]	Trägheitsfaktor (proportional zur Schwungmasse)	.....	-
[ $\delta$ ]	Polradwinkel	.....	rad

#### 31.1.2 Wiedereinschalten nach Fehlerfall

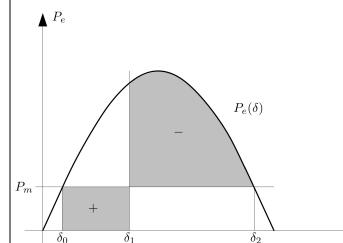


Nach wenigen Sekundenbruchteilen kommt es zu einer sogenannten automatischen Wiedereinschaltung: In der Hoffnung, dass der Lichtbogen erloschen ist, schaltet das Schutzgerät die Leitung wieder zu.

Die Schalter an beiden Leitungsenden werden nach Ablauf der Wiedereinschaltzeit (z. B. 500 ms) geschlossen.

In dieser Zeit ist  $\delta$  gestiegen ( $\delta = \delta_1$ ). Bei der Wiedereinschaltung ist  $P_e(\delta_1) > P_m$ . Der Generator bremst und baut so die überschüssige kinetische Energie ab.

## 31.2 Flächenkriterium



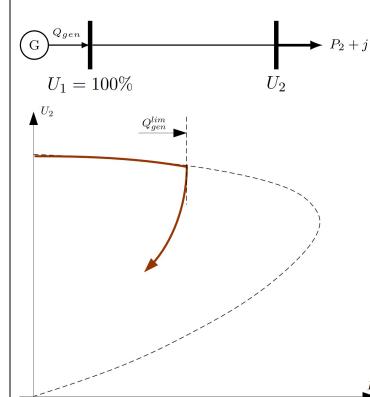
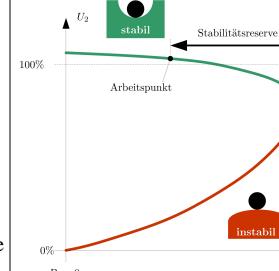
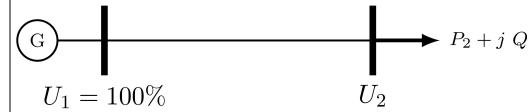
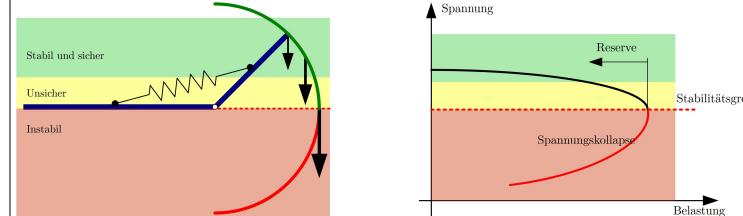
- + Fläche entspricht der Energie, die der Generator während einer halben Sekunde aufnehmen muss
- Fläche entspricht der maximalen Energie, welche der Generator wieder abbauen kann
- Flächenkriterium: - Fläche muss grösser sein als + Fläche.  
⇒ **Flächenbeseitigungszeit** enorm wichtig

## 32 Spannungsregelung

Unter Spannungsstabilität versteht man die Fähigkeit eines Stromversorgungssystems, an allen Bussen (Knoten) im System konstante Spannungen aufrechtzuerhalten, nachdem es einer Störung aus einem gegebenen Betriebszustand ausgesetzt wurde.

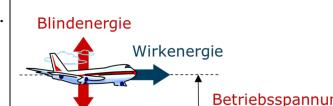
### 32.1 Spannungskollaps

- Spannung zu hoch: Isolationsdurchbruch
- Spannung zu tief: Spannungskollaps
- Abhängig von Nasenkurve



### 32.2 Spannungs-Blindleistungs-Regelung

#### 32.2.1 Spannungsänderung



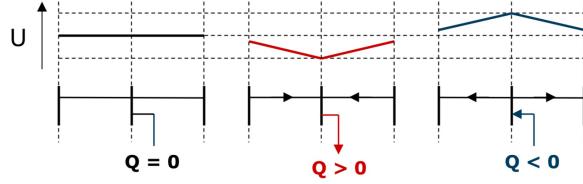
$$\Delta U \% = \frac{\Delta Q}{S_K} \cdot 100\% \quad \Delta U = \frac{\Delta Q}{S_K} \cdot U$$

[S_K]	Kurzschlussleistung	.....	VA
[ΔQ]	Veränderung der Blindleistung	.....	VAR
[U]	Referenz-Spannung (220 kV oder 380 kV)	.....	V
[ΔU]	Spannungsänderung	.....	V

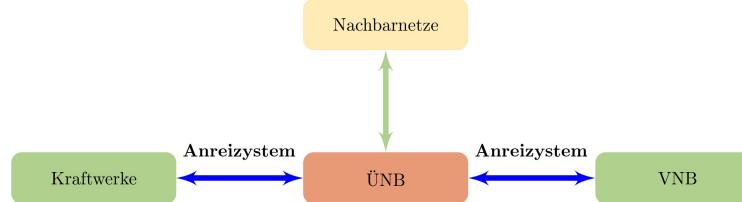
[ΔU<sub>%</sub>] Spannungsänderung in Prozent ..... %  
Eine Kapazität speist kapazitive Blindleistung ein, was den Spannungsfall über der Netzimpedanz verringert bzw. kompensiert. Dadurch erhöht sich die Knotenspannung.

### 32.2.2 Blindleistung

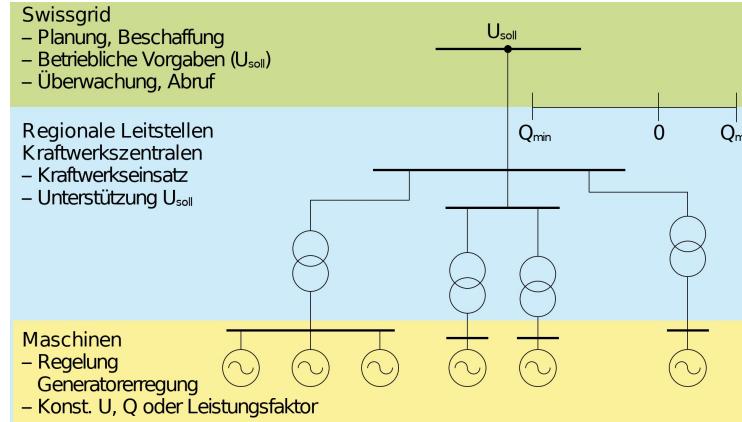
- Q-Bilanz eines Netzes ist immer ausgeglichen
- Q wirkt unmittelbar und lokal auf U
- Q fließt von höherer zu tieferer U
- Wenn Blindleistung aus dem Netz genommen wird sinkt die Spannung



### 32.3 Grundlagen Spannungshaltung

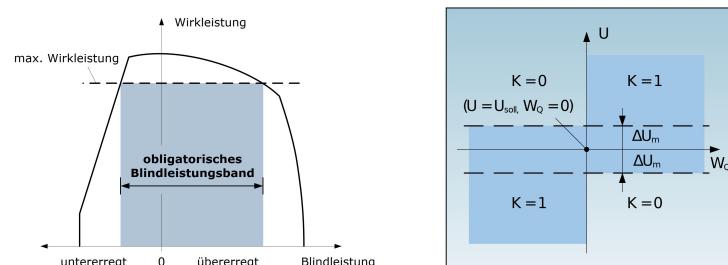


### 32.4 Spannungshaltung in der Schweiz

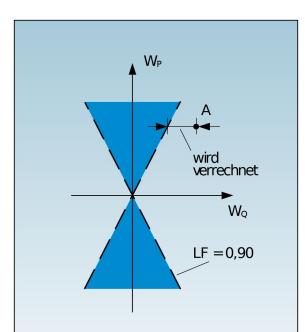


### 32.5 Kraftwerke

- geregelte Blindleistungsquellen
- Vergütung der anforderungskonformen Lieferung von Blindleistung.



### 32.6 Unterlagerte Netze



$$K = \frac{|\Delta U_m|}{|W_Q|} \leq \frac{1}{K_{\max}}$$

[W_P]	Wirkenergieaustausch ...	W
[W_Q]	Blindenergieaustausch ...	var
[LF]	Leistungsfaktor (0,9–1) ...	-
[ΔU_m]	Spannungsabweichung ...	kV
[K]	Verhältnis Spannungsabweichung zu Blindenergie	kV/Mvarh

Für einen Arbeitspunkt A wird die Blindenergie, die der Überschreitung des blauen Bereichs entspricht, in Rechnung gestellt.