

Energiesysteme

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

Autoren: Luca Loop

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

Inhaltsverzeichnis

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

1 Energie- und Elektrizitätswirtschaft

1.1 Masseinheiten

Masseinheit	Zeichen	Umrechnung
Watt	(W)	
Pferdestärke	(PS)	1 PS \approx 735 W
Joule	(J)	
Wattsekunde	(Ws)	1 Ws = 1 J
Kilowattstunde	(kWh)	1 kWh = 3 600 000 J = 3,6 MJ
Kalorie	(cal)	1 cal _{IT} = 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_{pot}

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

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

1.4.2 Kinetische Energie W_{kin}

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

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

1.4.3 Feder Energie W_F

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

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

1.4.4 Kondensator Energie W_C

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

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

1.4.5 Induktivität Energie W_L

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

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

1.4.6 Batterie Energie W_{bat}

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

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

1.4.7 Thermische Energie W_{th}

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

[W_{th}]	Thermische Energie	$Ws = Nm = J$
[m]	Masse	kg
[c]	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
[ϑ_1]	Anfangstemperatur	°C oder K
[ϑ_2]	Endtemperatur	°C oder K

1.4.8 Spezifische Energie e

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

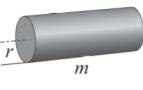
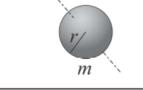
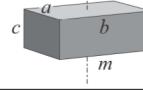
1.4.9 Rotations Energie W_{rot}

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

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

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

Massenträgheitsmoment J

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

1.5 Leistung

1.5.1 Rotations Leistung P_{rot}

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

1.5.2 Thermische Leistung P_{th}

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

1.5.3 Transmissions Wärmeverlustleistung P_{VW}

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

1.5.4 Mechanische Leistung P_v

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

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

1.5.5 Leistung der Solaranlage P_{PV}

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

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

1.5.6 Leistung eines Wasserkraftwerks P

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

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

1.5.7 Drehstrom Leistungsberechnung P_{\odot}

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

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

1.6 Schweizer Strom-Mix

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

1.7 Investitions- und Kostenrechnung

1.7.1 Annuitätsfaktor A

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

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

1.7.2 Kapitalkosten K_K

$$K_K = A \cdot I$$

[K _K]	Kapitalkosten	CHF oder €
[A]	Annuitätsfaktor	1
[I]	Investitionen	CHF oder €

1.7.3 Unterhaltskosten K_U

$$K_U = p_U \cdot I$$

[K _U]	Unterhaltskosten	CHF oder €
[p _U]	Unterhaltskosten-Prozentsatz	1
[I]	Investitionen	CHF oder €

1.7.4 Fix-Kosten K_{Fix}

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

[K _{Fix}]	Fix-Kosten	CHF oder €
---------------------	------------------	------------

1.7.5 Erlös oder Deckungsbeitrag E

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

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

1.7.6 Ergebnis (Gewinn oder Verlust) G

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

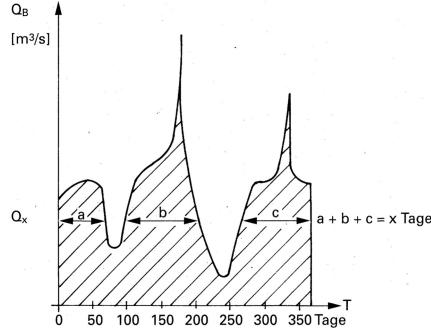
1.7.7 Variable Kosten K_{Var}

[G]	Ergebnis	CHF oder €
[E]	Erlös	CHF oder €
[K _{Fix}]	Fix-Kosten	CHF oder €
[K _{Var}]	Variable Kosten	CHF oder €

2 Wasserdargebot für Wasserkraft

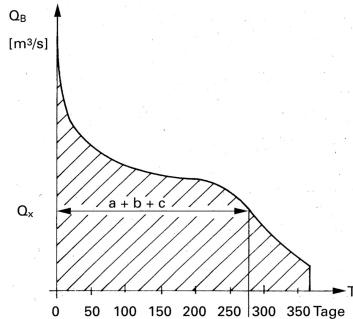
2.1 Abflussganglinie

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



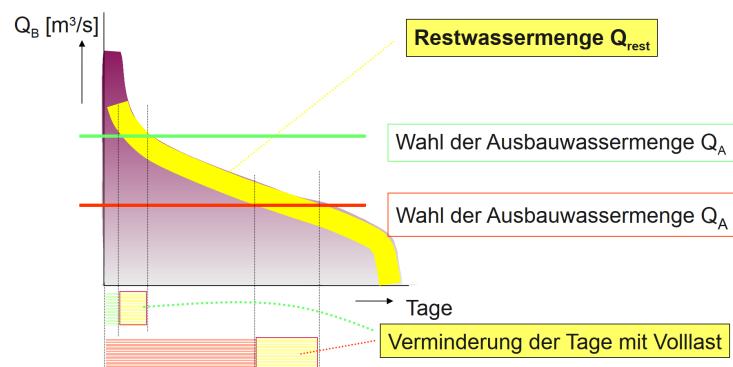
2.2 Abflussdauerkurve

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



Abfluss ist an 275 Tagen mindestens Q_x

2.3 Nutzwassermenge



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

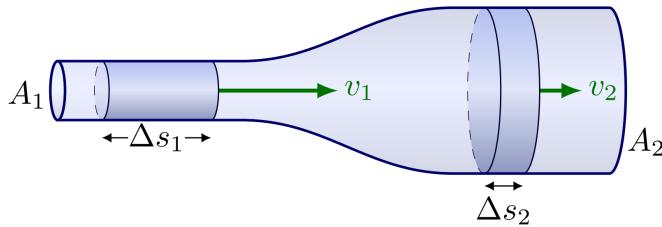
$[Q_{Nutz}]$ Nutzwassermenge $\frac{m^3}{s}$

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

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

3 Wasserkraft

3.1 Kontinuitätsgleichung des Durchflusses

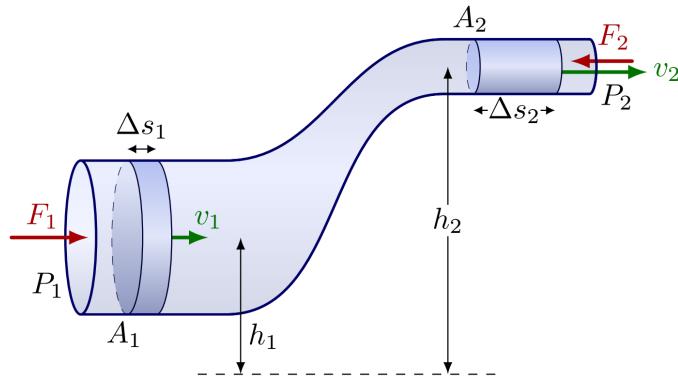


Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Erhaltung des Volumenstroms in einer strömenden Flüssigkeit:

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

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

3.2 Bernoulli-Druck-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke



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

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

$[\frac{1}{2} \rho v^2]$	Kinetische Energie (je Kubikmeter)	$\frac{J}{m^3}$
$[\rho g z]$	Potentielle Energie	$\frac{J}{m^3}$
$[p]$	Druckenergie	$\frac{J}{m^3}$
$\underbrace{\frac{p}{A}}_A + \underbrace{\rho g z}_B + \underbrace{\frac{1}{2} \rho v^2}_C = \underbrace{\text{constant}}_D$		

3.3 Bernoulli-Höhen-Gleichung für Speicherwasserkraftwerke

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

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

3.4 Örtliche Energieverluste

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

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

3.5 Reibungsverluste

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

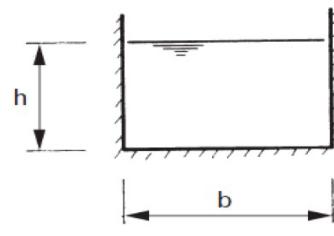
$[H_{vr}]$	Reibungsverlusthöhe	m
$[v]$	Strömungsgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$[L]$	Länge der Strömungsstrecke	m
$[K]$	Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler	$m^{1/3}/s$
$[R_h]$	Hydraulischer Radius	m

3.5.1 Tabelle Rauhigkeitsbeiwert K

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

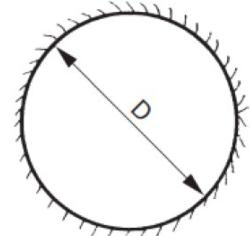
3.5.2 Hydraulischer Radius

Rechteckqueerschnitt



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

Kreisqueerschnitt



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

$[F]$	Abflussquerschnittsfläche	m^2
$[P]$	Benetzter Umfang	m
$[R_h]$	Hydraulischer Radius	m

3.6 Verlusthöhe durch Reibung

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

$[h_{vr,r}]$	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
$[l_u]$	Benetzter Umfang	m
$[\lambda]$	Verlustbeiwert	-

Zusammenhang des hydraulischen Durchmessers:

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

3.7 Reynolds-Zahl Re

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

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

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

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

4 Wasserkraftwerk-Typen

4.1 Klassifizierung

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

4.2 Einteilung nach technischen Aspekten

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

4.3 Einteilung nach energiewirtschaftlichen Aspekten

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

4.4 Einteilung nach Betriebsart

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

4.5 Einteilung nach der installierten Leistung

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

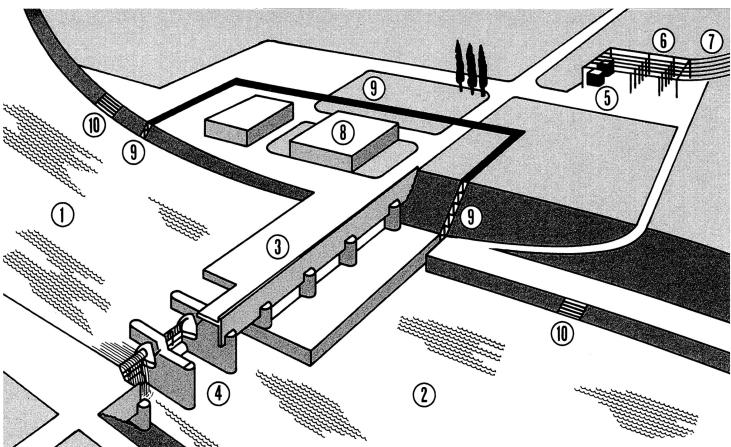
4.6 Einteilung nach wasserwirtschaftlichen Aspekten

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

4.7 Wasserturbinen und Pumpen

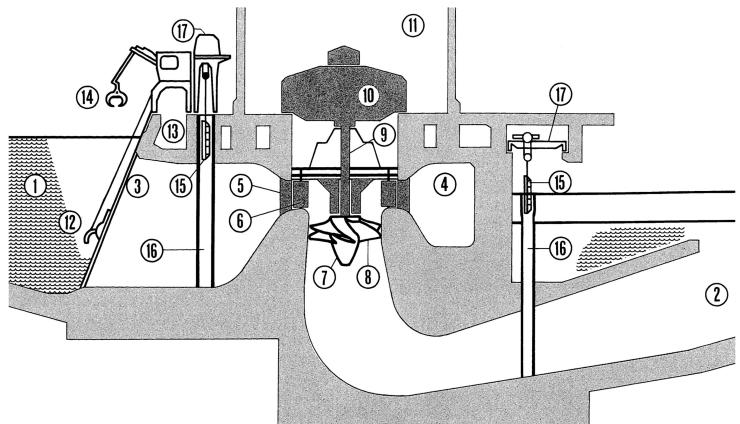
- **Aktionsturbinen:** Arbeit aus kinetischer Energie-Differenz
 - Pelzturbinen
- **Reaktionsturbinen:** Arbeit aus Druckdifferenz vor und nach Turbine
 - Francisturbinen (spiralförmig)
 - Kaplantrubinen (propellerförmig)
 - Rohrturbinen
 - Kreiselpumpen als Turbinen

4.8 Laufwasserkraftwerke LWK



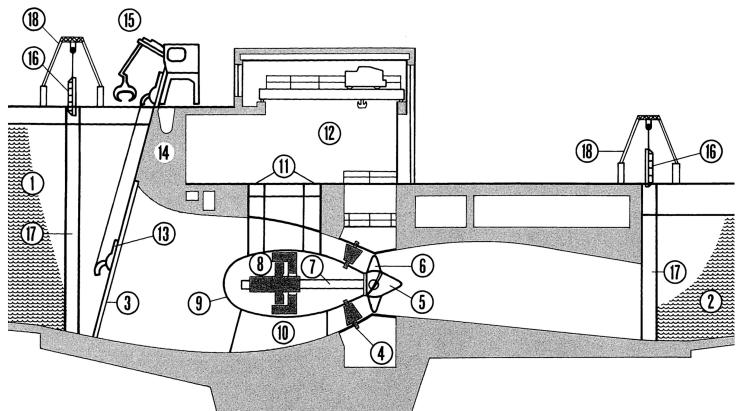
- | | | | |
|---|-----------------|----|--------------------------------------|
| 1 | Oberwasser | 6 | Schaltanlage |
| 2 | Unterwasser | 7 | Leitungen |
| 3 | Maschinenhaus | 8 | Betriebsgebäude |
| 4 | Stauwehr | 9 | Fischtreppen |
| 5 | Transformatoren | 10 | Einrichtung für den Schiffstransport |

4.9 LWK mit Kaplantrubinen Vertikal



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

4.10 LWK mit Kaplantrubinen Horizontal



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

5 Turbinen Kenngrößen

5.1 Nettofallhöhe und Durchfluss

5.2 Hydraulische Leistung

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

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

5.3 Mechanische Leistung an der Turbinenwelle

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

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

5.4 Winkelgeschwindigkeit

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

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

5.5 Betriebszustände der Maschinengruppe

(Maschinengruppe = Turbine/Pumpe + Generator/Motor)

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

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

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

6 Atomkraftwerk

6.0.1 Merkmale Nukleare Dampferzeugung

- Leistungsfähige Energiequelle
- CO₂ - freie Produktion elektrischer Energie
- Aufwändige Technologie
- Sicherheit
- Tiefenlager radioaktiver Stoffe
- Diskussion in Politik, Gesellschaft, Ethik

6.0.2 Kernprozesse für die Energiegewinnung

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

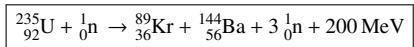
6.1 Kernphysikalische Grundlagen

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

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

6.2 Spaltung schwerer Kerne

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



- Bindungsenergie wird dabei frei.

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

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

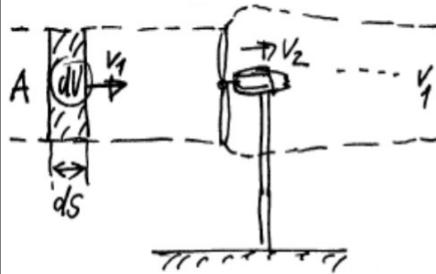
Dies geschieht mit einem Moderator wie „leichtes“ Wasser oder Graphit.

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

To be continued ...

7 Windenergie

7.1 Windeleistung



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

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

Achtung! v_1 ist hoch 3!

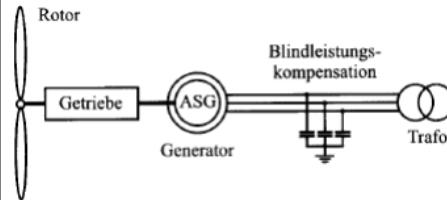
$[P_{\max}]$	Theoretische Windleistung	W
$[P_W]$	Effektiv nutzbare praktische Windleistung	W
$[c_P]$	Leistungsbeiwert, $c_P = 0.4 \dots 0.5$	-
$[A]$	Rotorfläche (projizierte Fläche senkrecht zur Strömung)	m^2
$[\rho_{\text{Luft}}]$	Dichte Luft, $\approx 1,29 \frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m^3}$
$[v_1]$	Anströmgeschwindigkeit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

8 Windenergiekonverter (WEK)

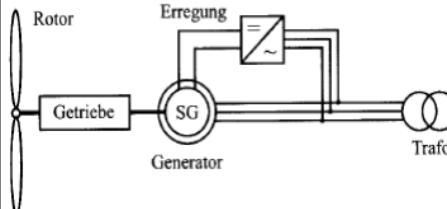
8.1 Netzkopplung

DU = Direktumrichter, ZKU = Zwischenkreis-Umrichter

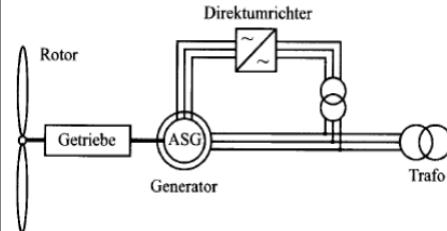
8.1.1 Direkte Netzkopplung mit ASM



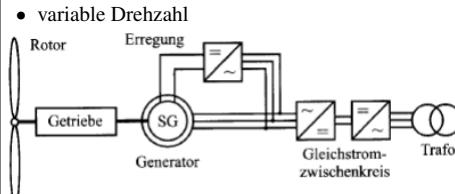
8.1.2 Direkte Netzkopplung mit SM



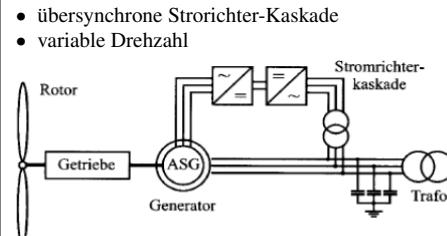
8.1.3 Direkte Netzkopplung mit ASM und DU im Läufer



8.1.4 Direkte Netzkopplung mit SM über Gleichstromzwischenkreis

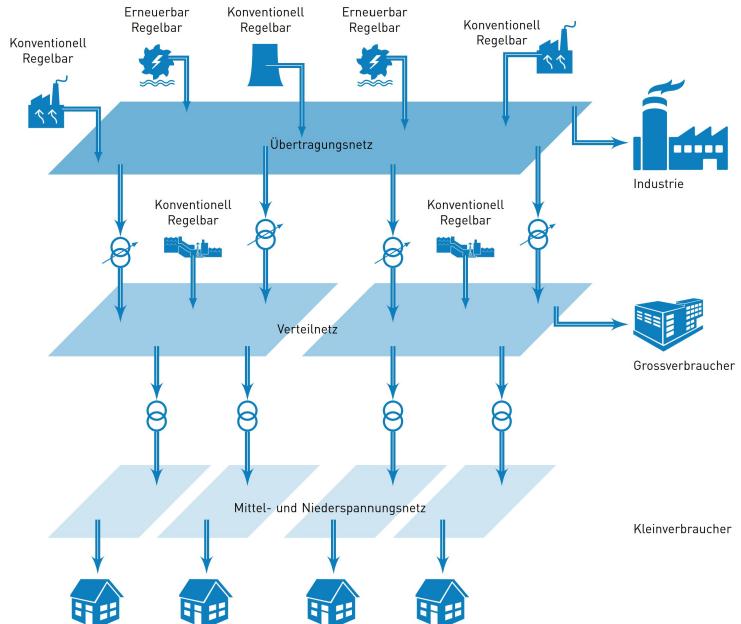


8.1.5 Direkte Netzkopplung mit ASM und ZKU im Läufer

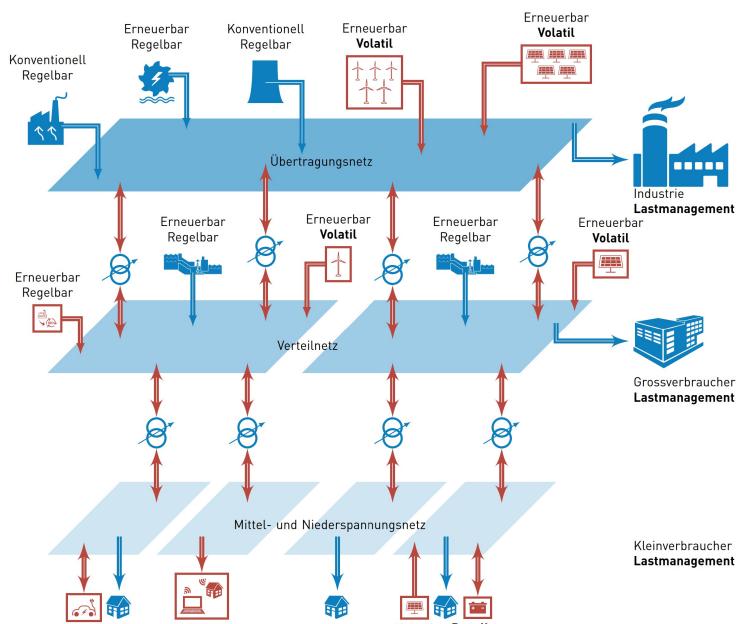


9 Netze Allgemein

9.0.1 Stromnetz früher



9.0.2 Stromnetz heute



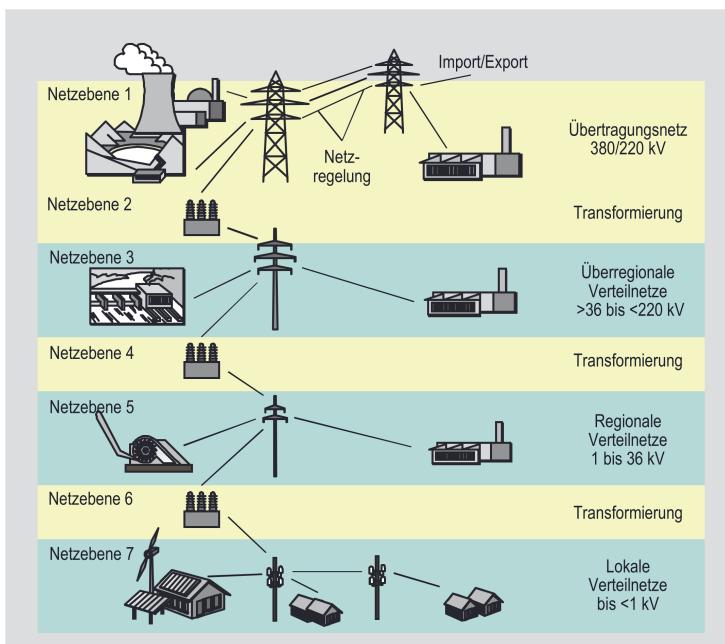
9.1 Interessen der Erzeuger

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

9.2 Anforderungen an das Stromnetz

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

10 Netzebenen

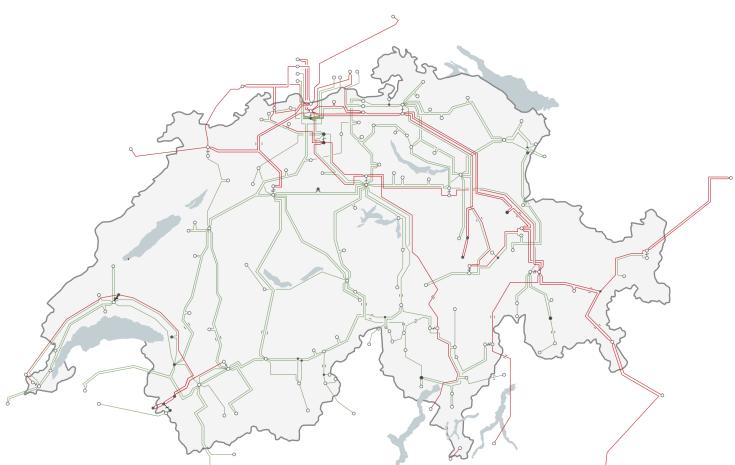


Spannungsebene	Spannungsbereich	Leistung
Höchstspannung	380 kV, 220 kV	> 300 MVA
Hochspannung	150 kV bis 50 kV	< 100 MVA
Mittelspannung	36 kV bis 6 kV	< 30 MVA
Niederspannung	0,4 kV	< 1 MVA

10.1 NE1: Übertragungsnetz

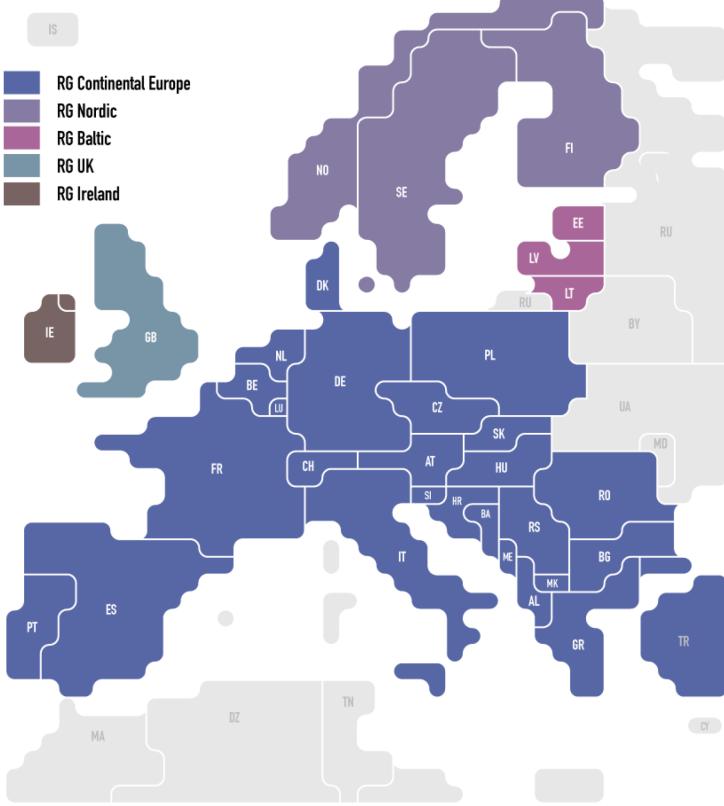
- 380 kV und 220 kV
- Zweck
 - Abtransport der großen Kraftwerksleistungen (typ. > 300 MVA)
 - Versorgung der Verteilnetze
 - Weiträumiger Energietransport
 - Internationaler Verbundbetrieb, Energieaustausch
- Ausdehnung: national, international
- Topologie: (stark) vermaschtes Netz
- Technologie: fast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

10.1.1 Schweizer Stromübertragungsnetz (Daten 2014)



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

10.1.2 Entso-E



- koordinierter Systembetrieb
- koordinierte Marktlösungen
- koordinierte Systementwicklung

10.2 NE3: Überregionales Verteilnetz

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

10.3 NE5: Verteilnetz

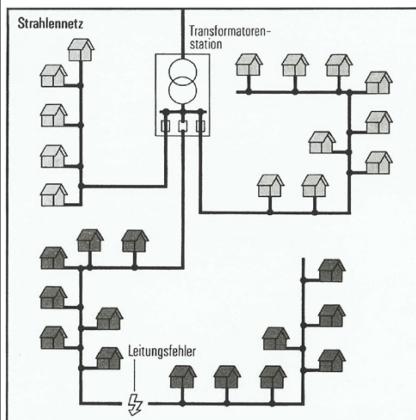
- 20 kV, 10 kV
- Zweck
 - Abtransport kleiner Kraftwerksleistungen (< 30 MVA)
 - Anschluss von Industrie- und Gewerbe Kunden
 - Regionale Verteilung
- Ausdehnung: Kanton, Tal
- Topologie: Ringnetz, Strahlennetz
- Technologie: Freileitungen und Kabel

10.4 NE7: Verteilnetz

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

11 Netztopologien

11.1 Strahlennetz



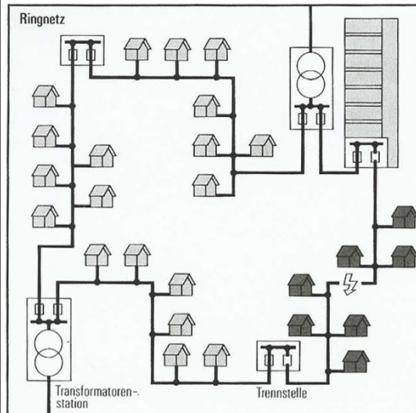
Pro:

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

Contra:

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

11.2 Ringnetz



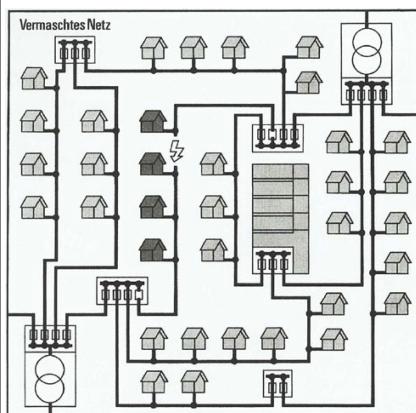
Pro:

- höhere Versorgungssicherheit
- geringere Verluste
- verbesserte Spannungshaltung

Contra:

- höhere Anspruch an die Qualifikation des Wartungspersonals

11.3 Maschennetz



Pro:

- eine optimale Versorgungszuverlässigkeit
- optimale Spannungshaltung
- minimale Leistungsverluste

Contra:

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

12 Leitungen

Aufgabe:

- Energieübertragung und -verteilung

Wichtigsten Leitungsarten:

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

12.1 Freileitungen

• Material:

- Al-Seile (99,5% Al), Aldrey-Seile (> 98,5% Al, Mg, Si, Fe) und Al-Stahl-Seile (Verhältnis Alu:Stahl typ. 6:1, z. B. 240/40 mm²), Kupfer ist bei neuen Leitungen immer seltener
- Aluminium-Drähten ⇒ eine gute elektrische Leitfähigkeit
- Stahlkern ⇒ mechanische Festigkeit
- Aluminium hat gegenüber Kupfer einen deutlichen Preisvorteil
- Ab 220 kV ⇒ Bündelleiter ⇒ Sie führen also zur **Verminderung des Wellenwiderstandes** und damit zur **Erhöhung der übertragbaren Leistung**.
- **Hochtemperaturleiter:**
 - normale Leiterseile $T_{max} = 80^{\circ}\text{C}$
 - Hochtemperaturseile $T_{max} = 210^{\circ}\text{C}$
 - Steigerung der Übertragungskapazität um bis zu 50 Prozent

12.2 Masten

Funktionen:

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

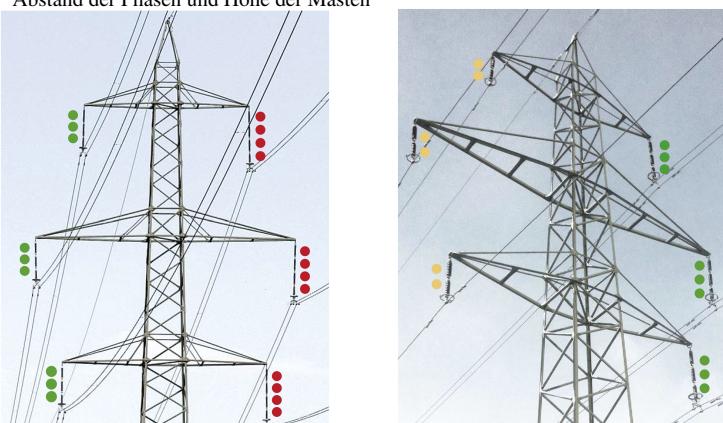
Materialien:

- Stahl-Gittermast
- Betonmast
- Stahlrohrmast
- Holzmast

12.3 Unterscheidungsmerkmale Freileitungen

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale:

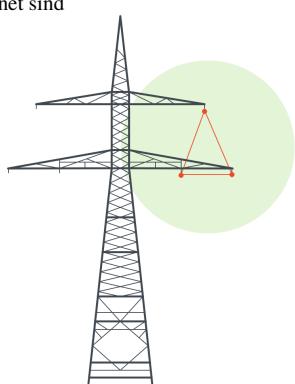
- Anzahl Phasen
- Länge der Isolatorenketten (Je höher die Spannung, umso länger sind die Isolatorenketten)
- Abstand der Phasen und Höhe der Masten



12.4 Mastenformen

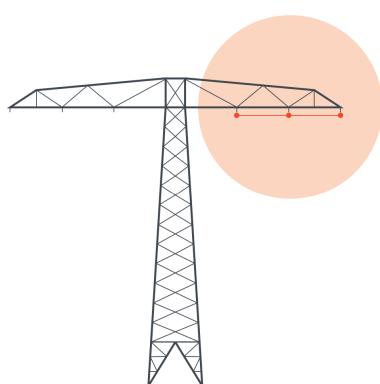
12.4.1 Donaumast

Zwei Drehstromkreise bei denen die Leiter jeweils im Dreieck angeordnet sind



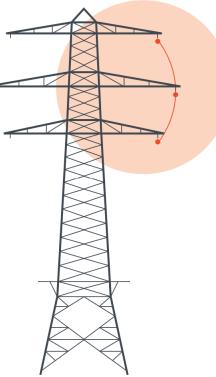
12.4.2 Einebenenmast

Niedrige Bauhöhe und eine größere Trassenbreite



12.4.3 Tonnenmast

Eine geringe Trassenbreite, sind aber höher als vergleichbare Donaumasten



12.5 Freileitungen: Vor- und Nachteile

Pro:

- günstige Investitionskosten
- bessere Zugänglichkeit bei Reparaturen ⇒ kürzere Wiederinbetriebnahmezeiten

Contra:

- atmosphärischen Einwirkungen ausgesetzt
- Akzeptanzprobleme

13 Kabelleitungen

13.0.1 Material

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

13.1 Aufbau Allgemein

13.2 Aufbau

Gürtelkabel:

Nichtradiales elektrisches Feld, Verwendung im Nieder- und Mittelspannungsbereich

Dreimantel-Kabel:

Radiales elektrisches Feld, Verwendung im Nieder- und Mittelspannungsbereich

Einleiterkabel:

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

13.2.1 Kabel: Vor- und Nachteile

Pro:

- geschützt vor atmosphärischen Einwirkungen ⇒ kleinere Ausfallsrate
- bessere Akzeptanz

Contra:

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

13.3 Erdverkabelung in der Schweiz

Erdverkabelung pro Netzebene in der Schweiz

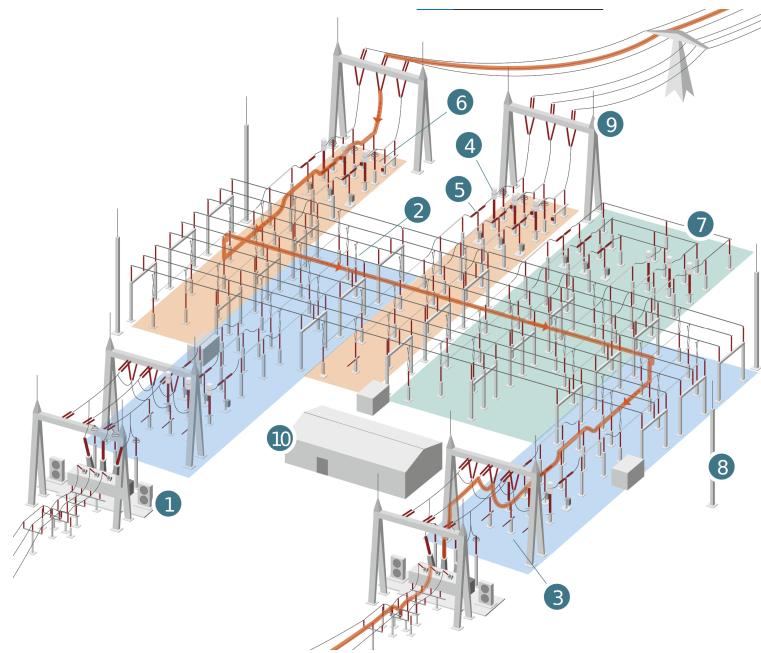
Netzebene 1	8 km
Netzebene 3	1'893 km
Netzebene 5	30'607 km
Netzebene 7	72'852 km

14 Schaltanlagen / Umspannwerke

14.1 Aufgabe

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

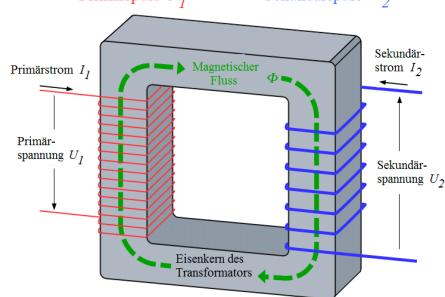
14.2 Aufbau



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

14.3 Transformator

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



14.4 Leistungsschalter



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

14.5 Lastschalter

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

14.6 Trennschalter



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

14.7 Sonstiges

14.7.1 Messwandler

Messung der Spannung und Strom für Erkennung des Betriebszustandes



14.7.2 Überspannungsableiter

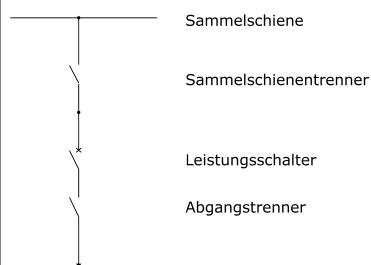
Spannungsabhängiger Widerstand, Bei hoher Spannung verringert sich Widerstand schlagartig



14.8 Schalfelder Aufbau

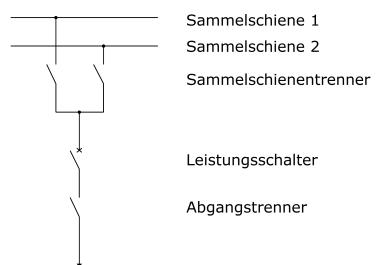
14.8.1 Einfachsammelschiene

- übersichtliche und billige Lösung



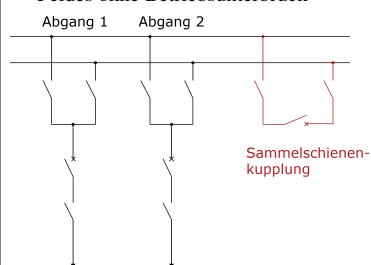
14.8.2 Doppelsammelschiene

- ein Sammelschienenwechsel eines beliebigen Feldes jederzeit möglich



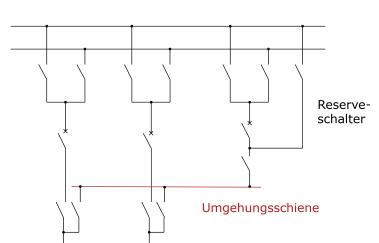
14.8.3 Sammelschienenkupplung

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



14.8.4 Umgehungsschiene

- Bei dieser Schaltung ersetzt Reserveschalter den Kuppelschalter beim Sammelschienenwechsel



14.9 Regeln beim Schalten (Reihenfolge)

14.9.1 Allgemein

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

14.9.2 Ausschalten

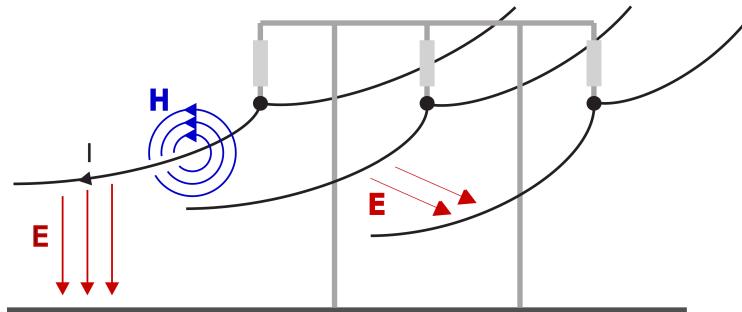
Beim Ausschalten werden Leistungsschalter zuerst geöffnet, dann Last- und Trennschalter

14.9.3 Einschalten

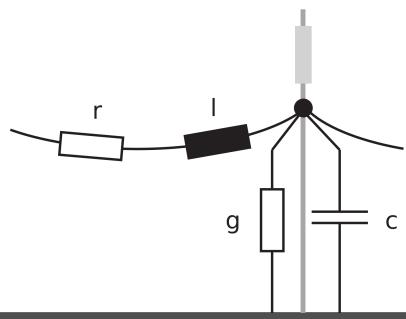
Beim Einschalten müssen zuerst Trennschalter, dann Lastschalter und zuletzt Leistungsschalter geschlossen werden

15 Leitungsbeläge

15.1 Elektrisches und magnetisches Feld



15.1.1 Ersatzschaltbild



15.2 Widerstandsbelag

15.2.1 Ursache

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

15.2.2 Temperaturabhängigkeit des Widerstands

Der spezifische Widerstand ρ ist temperaturabhängig und ergibt sich aus:

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

[ρ]	Spezifischer Widerstand	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
[ρ_{20°]	Spezifischer Widerstand bei 20°C	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
[α]	Temperaturkoeffizient	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$
[T]	Temperatur	$^\circ\text{C}$

15.2.3 Ohmscher Widerstand des Leiterseils

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

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

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

15.3 Skin-Effekt

Die Eindringtiefe δ des elektrischen Feldes in einen Leiter ergibt sich zu:

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

[δ]	Eindringtiefe des Stroms (Skin-Tiefe)	m
[ρ]	Spezifischer Widerstand des Leitermaterials	$\Omega \cdot \text{m}$
[ω]	Kreisfrequenz	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
[μ]	Permeabilität des Leitermaterials	$\frac{\text{H}}{\text{m}}$

Hinweis:

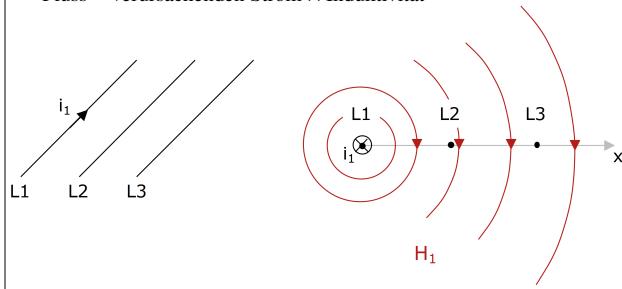
Bei **Bündelleitern** wird der Skin-Effekt durch die Aufspaltung des Querschnitts **abgeschwächt**.

15.4 Ableitungsbelag

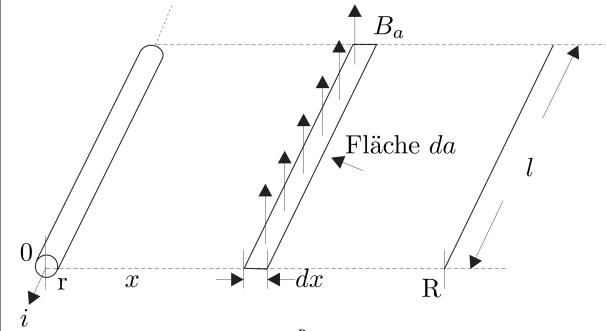
- Ursache: die Verluste des Dielektrikums zwischen den Leitern und zwischen Leiter und Erde
- G' ist sehr klein und kann bei normalen Betriebsverhältnissen gegenüber $\omega C'$ vernachlässigt werden
- G' ist grösser wenn Teilentladungen (Corona-Effekt) auftreten.
- **Witterungsabhängig**

15.5 Induktivitätsbelag

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



15.5.1 Formeln



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

15.6 Induktivitätsbelag

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

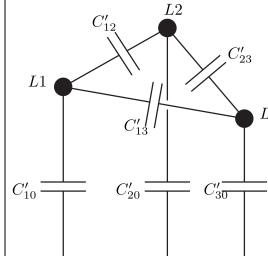
$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{d}{0,78 \cdot r} \right) \quad d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

[L']	Induktivitätsbelag	$\frac{\text{H}}{\text{m}}$
[r]	Leiterradius	m
[d]	Mittlerer Leiterabstand	m
[d_{ij}]	Abstand zwischen Phase i und j	m
[μ_0]	Magnetische Feldkonstante	$\frac{\text{H}}{\text{m}}$

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

15.7 Kapazitätsbelag

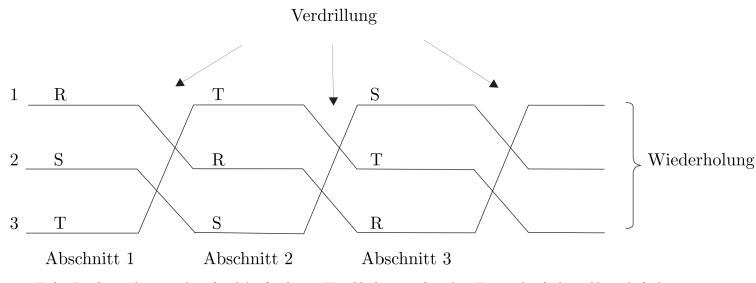
Die elektrische Feldstärke durch Leiter L_1 sowie der Potentialunterschied zwischen Punkten außerhalb von L_1 erzeugen den Kapazitätsbelag. Durch Überlagerung der Einzelspannungen ergibt sich (unter gleichen Annahmen wie für L'):



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

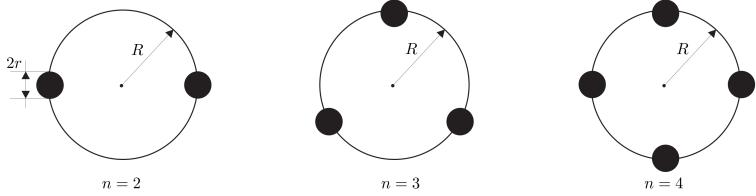
[C']	Kapazitätsbelag	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$
[k]	Geometriefaktor (abhängig z. B. von Masthöhe, Durchhang)	-
[d]	Mittlerer Leiterabstand	m
[r]	Leiterradius	m

15.8 Verdrillung



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

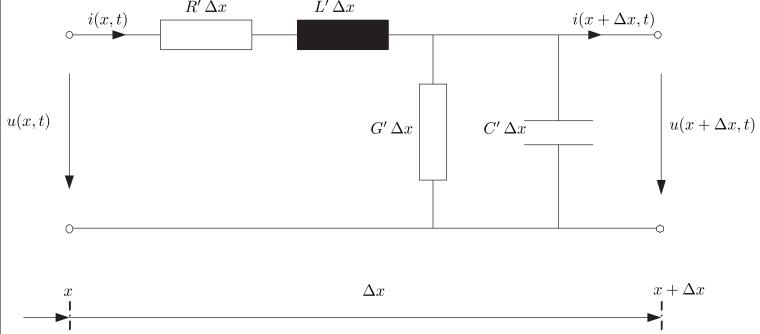
15.9 Bündelleiter



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

16 Leitungsmodell

16.1 Leitungsgleichungen



16.1.1 Allgemeine Differential Gleichung

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

16.1.2 Allgemeine Differential Gleichung für Wechselstrom

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

16.1.3 Weitere Gleichungen

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

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

Mit folgender Definition von γ ergibt sich:

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

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

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

16.2 Lösung der Leitungsgleichung

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

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

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

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

16.2.1 Wenn die Spannung der Leitung bekannt ist

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

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

16.2.2 Lösen nach U^+ und U^-

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

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

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

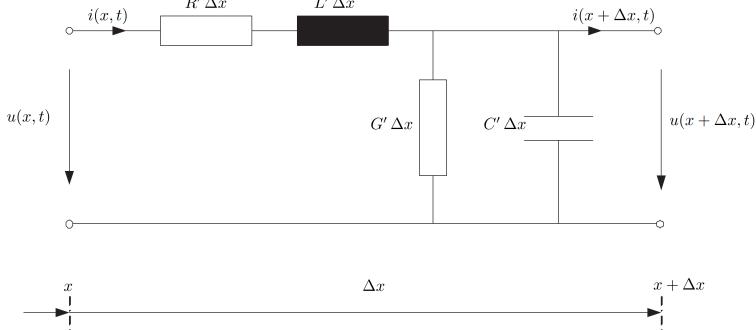
$$U(x) = U_1 \cdot \cosh(\gamma x) - Z_W \cdot I_1 \cdot \sinh(\gamma x)$$

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

□

16.3 Allgemein und für 50Hz

16.3.1 Modell Allgemein

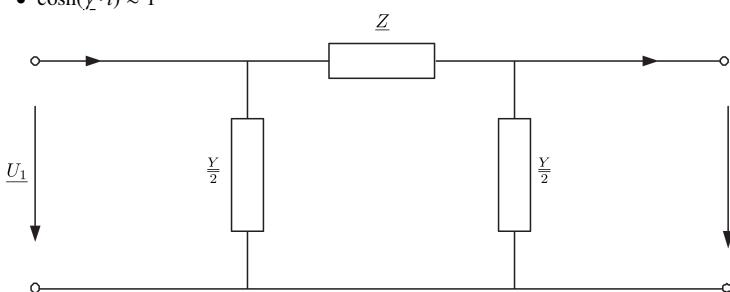


$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot l) & Z_W \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \\ \frac{1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot l) & \cosh(\gamma \cdot l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

16.3.2 Modell Vereinfacht

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

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



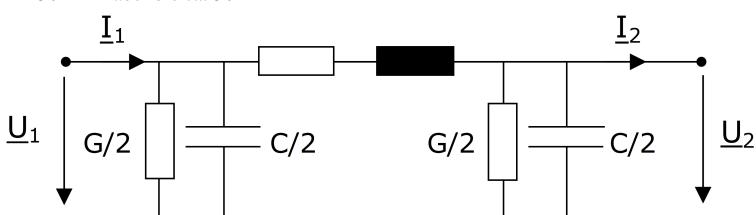
$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + Z \cdot \frac{Y}{2} & Z \\ \frac{Y}{2} \cdot \left(2 + Z \cdot \frac{Y}{2} \right) & 1 + Z \cdot \frac{Y}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

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

16.4 Vereinfachung für "kurze" Leitungen

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

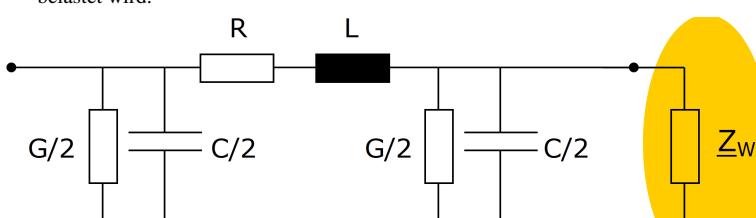
- 50-Hz-Freileitungen bis ca. 250 km
- 50-Hz-Kabel bis ca. 50 km



17 Betriebsverhalten

17.1 Natürliche Leistung

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



17.2 Wellenimpedanz

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

17.3 Unternatürliche Belastung

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

17.4 Übernatürliche Belastung

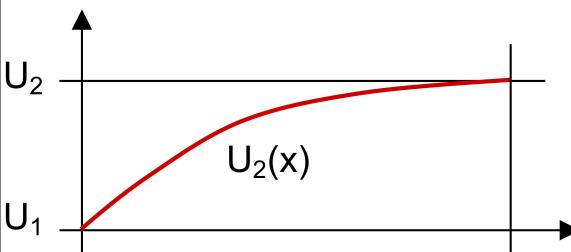
- Die Lastimpedanz ist niedriger als die Wellenimpedanz.
- Die Last nimmt mehr als die natürliche Leistung auf.
- Die Längsinduktivität „verbraucht“ mehr Blindleistung als die Querkapazität „erzeugt“.
- Die Spannung am Leitungsende ist tiefer als am Leitungsanfang.

17.5 Praxis

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

17.6 Leerlauf

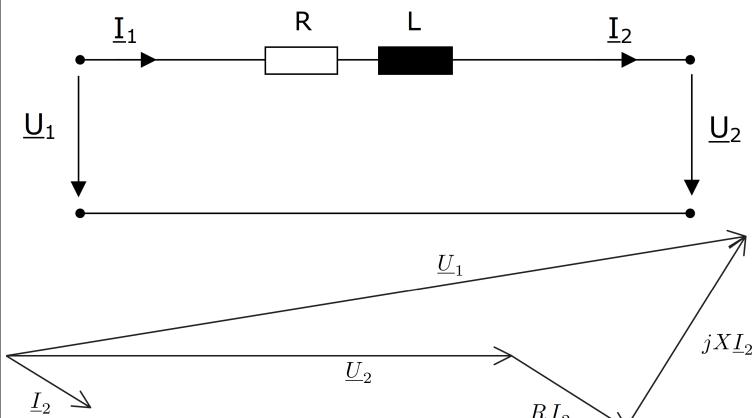
- Extremfall der unternatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Kapazität
- Spannung steigt entlang der Leitung an
- Spannungsüberhöhung am Leitungsende (Ferranti Effekt)



17.7 Kurzschluss

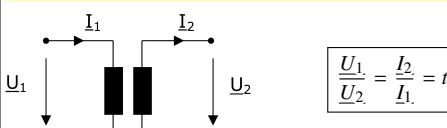
- Extremfall der übernatürlichen Belastung
- Leitung verhält sich wie Induktivität
- Spannung sinkt entlang der Leitung ab

17.8 Spannungsabfall entlang einer Leitung

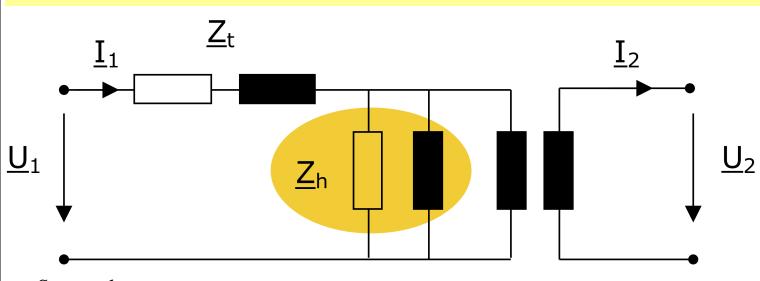


18 Transformatormodell

18.1 Idealer Transformator

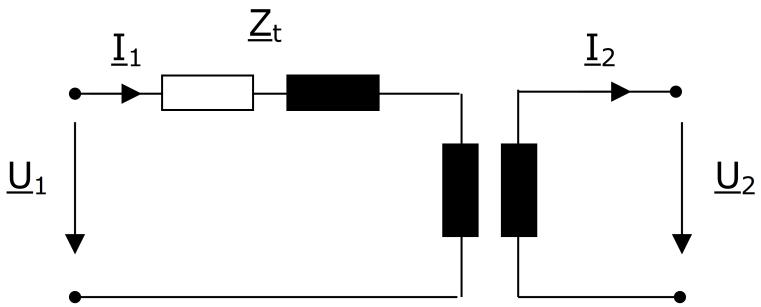


18.2 Reales Transformatormodell



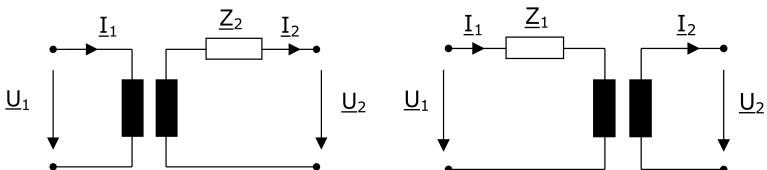
- Streuverluste
- Wicklungsverluste
- Kernverluste

18.3 Praktisches Transformatormodell



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

18.4 Umrechnung von Impedanzen



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

18.5 Dreiphasentransformatoren

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

Mögliche Schaltungen

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

Bezeichnung

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

18.6 Schaltgruppen

