

Windenergie

Christoph Hackl

Munich School of Engineering (MSE)
Research group "Control of Renewable Energy Systems (CRES)"
Technische Universität München (TUM)

Edgar-Lüscher-Lectures Dillingen/Donau 2014
30.09.2014

MSE Research group “Control of renewable energy systems (CRES)”



C. Dirscherl, M.Sc.



C. Hackl, Dr.-Ing.

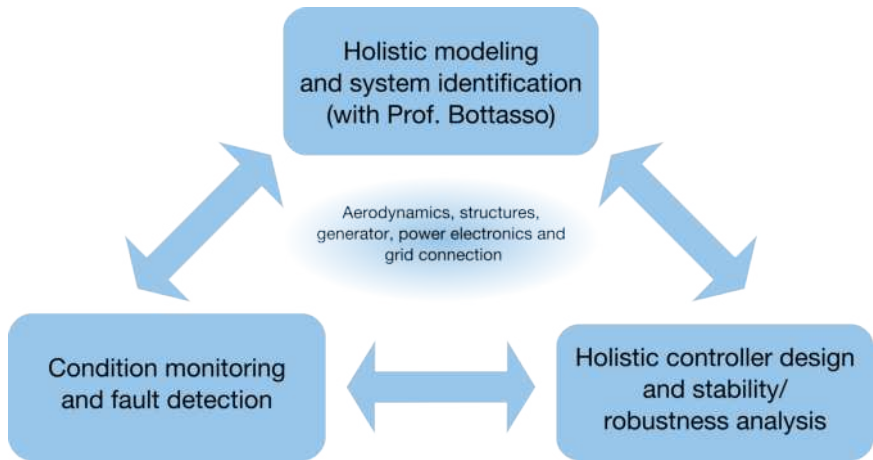


K. Schechner, M.Sc.

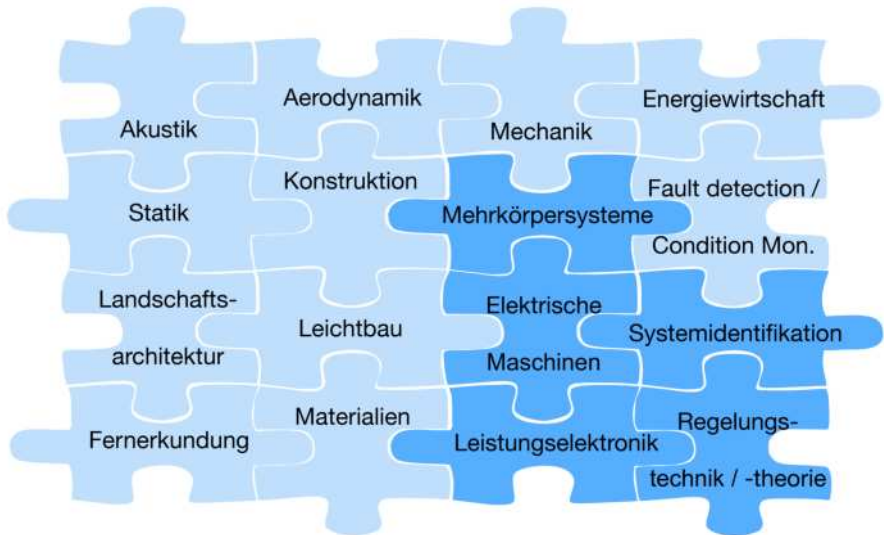
Kontakt und weiterführende Literatur

- Telefon: 089.289.16688
- Email: christoph.hackl@tum.de
- WWW: <http://www.cres.mse.tum.de/index.php?id=dillingen>
- Unreferenzierte Inhalte aus: C. Dirscherl, C. Hackl, K. Schechner, “Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung”, S. 1505–1578 in D. Schröder, “Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen”, Springer-Verlag, Berlin, 2014 (siehe [5])

CRES Forschungsschwerpunkte



(Wind-)Energieforschung = Interdisziplinarität



Gliederung

1 Einführung

- Zahlen und Fakten
- Historische Entwicklung der Windkraft
- Windkraft in Deutschland

2 Moderne Windkraftanlagen

- Kernkomponenten
- Betriebsbereiche
- Funktionsprinzip
- Verfügbarkeit und Fehlerursachen

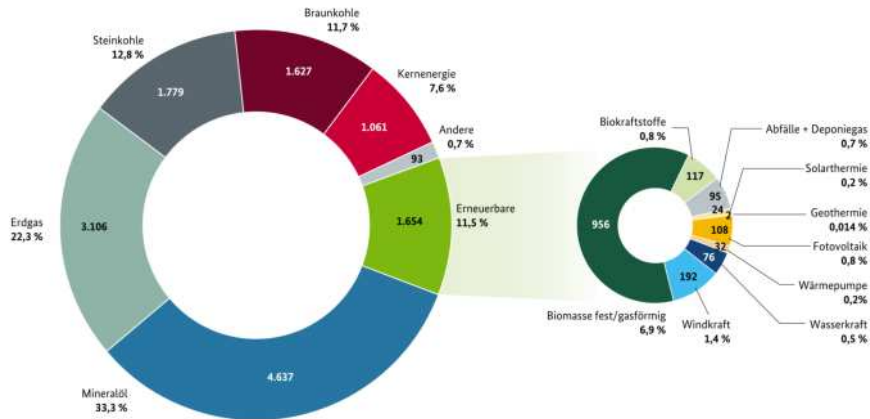
3 Modellierung und Regelung

- Beispiel: Windkraftanlage mit Synchrongenerator
- Turbine: Leistungsentnahme aus dem Wind
- Mechanik: Drehzahlregelung
- Leistungselektronik: Stromregelung
- Leistungselektronik: Regelung der Zwischenkreisspannung
- Leistungselektronik: Leistungsabgabe ins Netz
- Gesamte Anlage: Leistungsfluss

4 Zusammenfassung

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2013

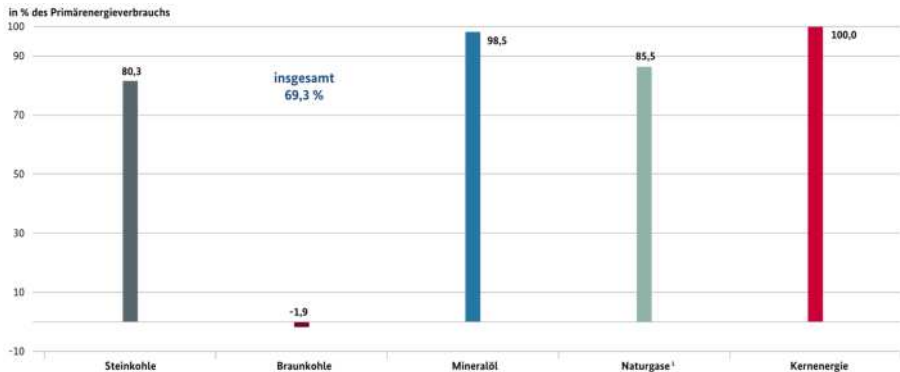
(insgesamt 13 908 PJ* = $3\,833 \cdot 10^9$ kWh, aus [3])



* Vorläufig

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

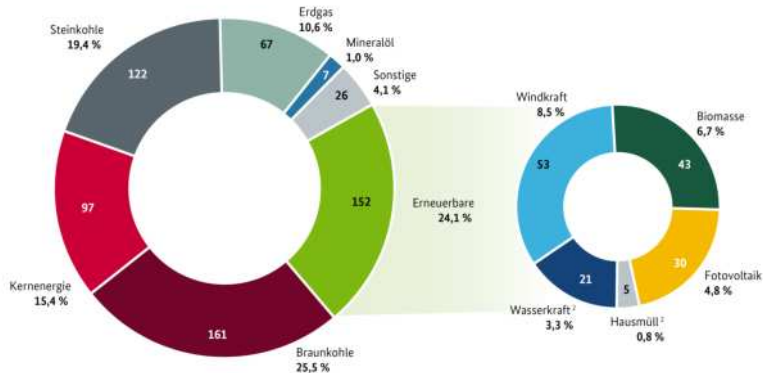
Nettoimportabhängigkeit nach Energieträger in Deutschland 2012 (aus [3])



¹ Erdgas, Erdöl, Gas, Grubengas

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Bruttostromerzeugung* in Deutschland 2013 (insgesamt $631 \text{ TW h}^1 = 631 \cdot 10^9 \text{ kW h}$, aus [3])

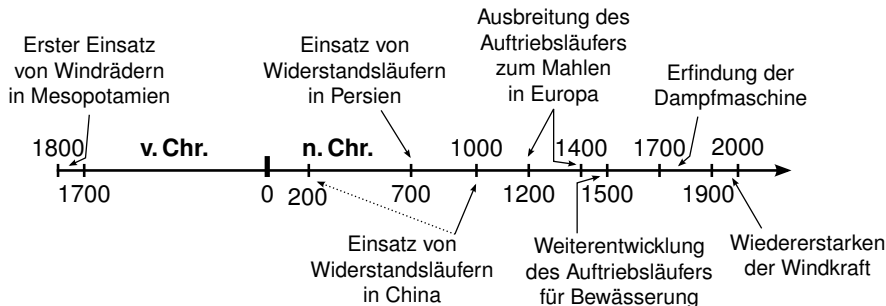


1 Vorläufig
2 Regenerativer Anteil

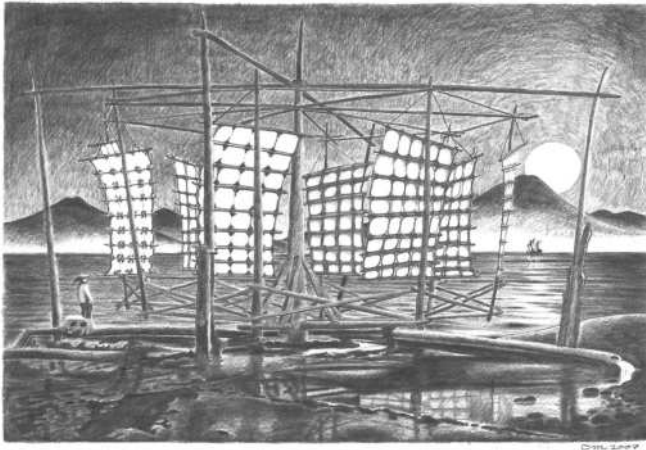
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

(* Nettostromerzeugung = Bruttostromerzeugung – Eigenstrombedarf der Kraftwerke)

Historische Entwicklung der Windkraft



Chinesische Windmühle



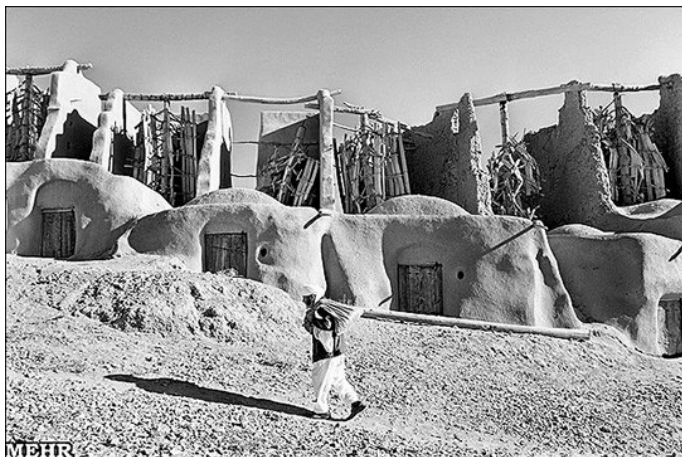
(http://de.wikipedia.org/wiki/Chinesische_Windm%C3%BChle)

Persische Windmühle (644 n. Chr., historisch belegt)



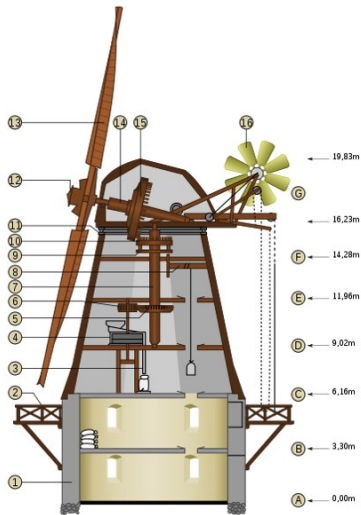
(Modell im deutschen Museum; http://de.wikipedia.org/wiki/Persische_Windm%C3%BChle)

Persische Windmühlen in Nashtifan (“bite of typhoon”)



(<http://payvand.com/blog/blog/2010/11/21/photos-centuries-old-windmills-of-nashtifan-in-iran>)

Holländische Windmühle (unbespannt)



(<http://de.wikipedia.org/wiki/Windm%C3%BChle>)

Moderne Windkraftanlagen (zur Stromerzeugung)



(<http://www.siemens.com/>)



(<http://www.ge.com/>)

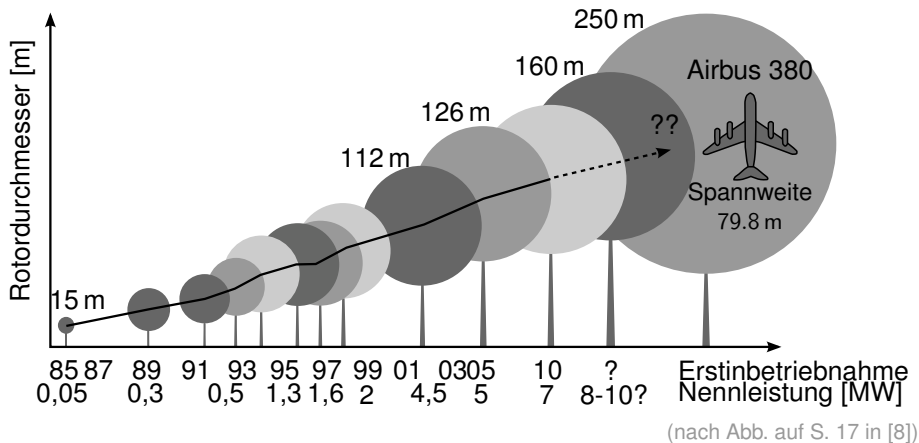


(<http://www.enercon.de/>)

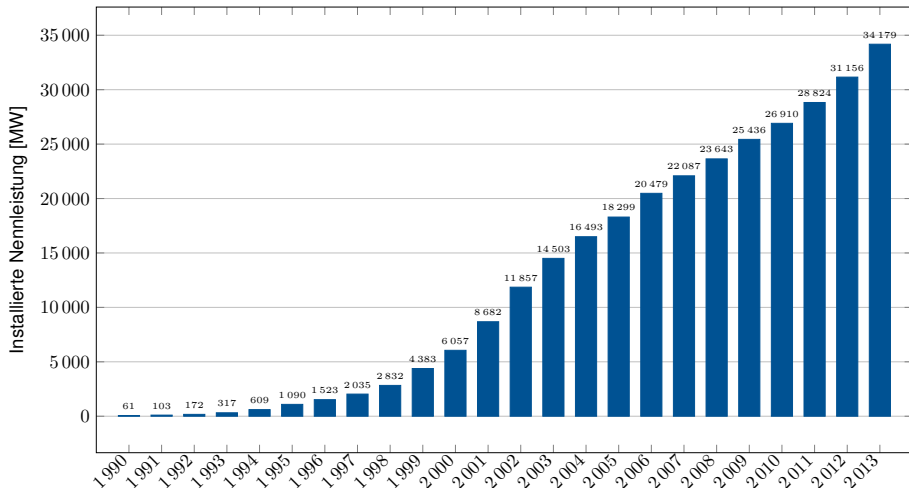
Eigenschaften

- Drei Rotorblätter
- Wirkungsweise nach dem Auftriebsprinzip
- Luv-Läufer mit horizontale Drehachse
- Dominierende Generatortopologien:
 - Synchrongenerator *ohne* Getriebe (Direktantrieb)
 - Doppeltgespeister Asynchrongenerator *mit* Getriebe

Größenentwicklung moderner Windkraftanlagen

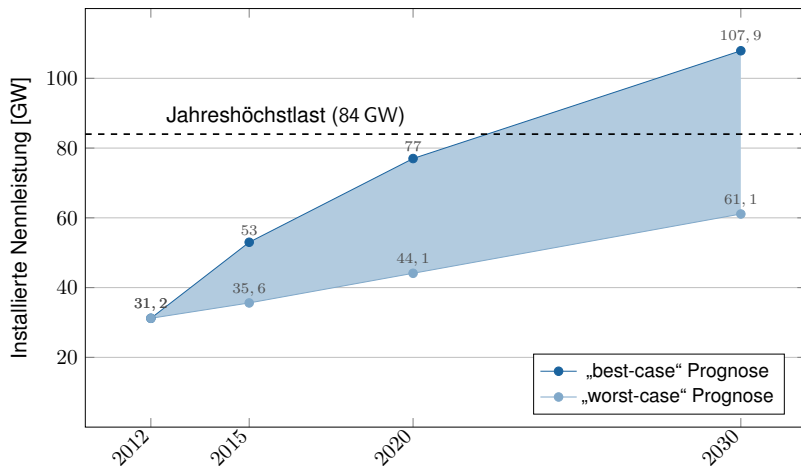


Installierte Windkraft-Nennleistung in Deutschland 1990-2013



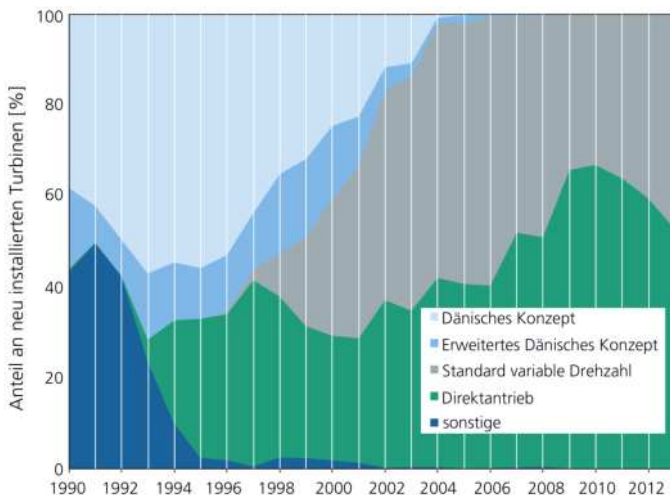
(nach Abb. 4 in [4])

Prognose der installierten Windkraft-Nennleistung in Deutschland 2030

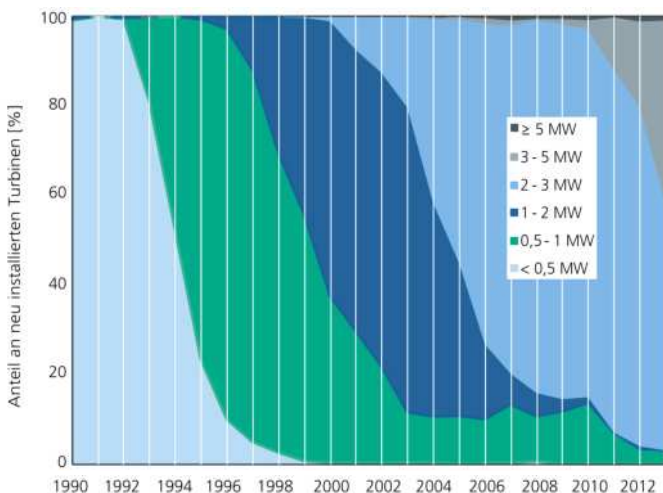


(Abb. basiert auf S. 6 in [1])

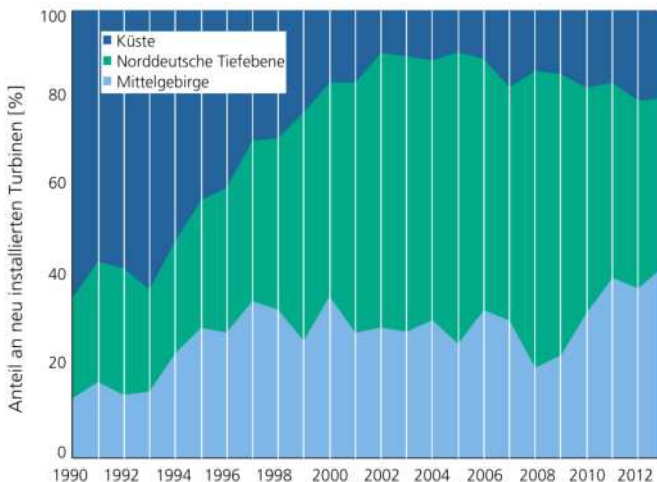
Prozentualer Anlagenzubau nach **Anlagentyp** in Deutschland 1990-2013 (aus [4])



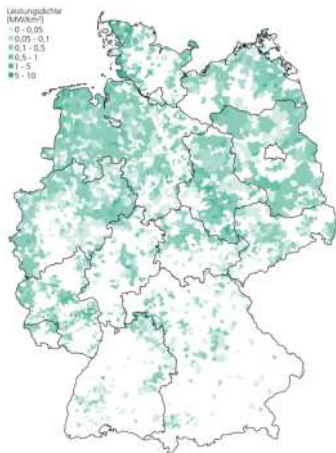
Prozentualer Anlagenzubau nach **Leistungsklasse** in Deutschland 1990-2013 (aus [4])



Prozentualer Anlagenzubau nach **Onshore-Standort** in Deutschland 1990-2013 (aus [4])

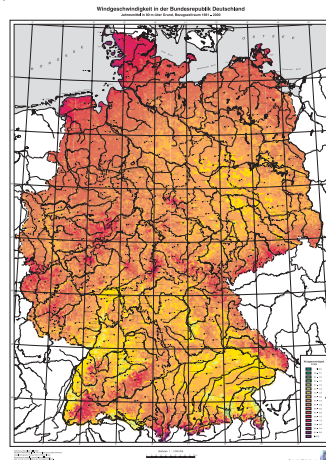


Verteilung der installierten Windkraft-Nennleistungs- dichte vs. Windverteilung (in 80 m Höhe)



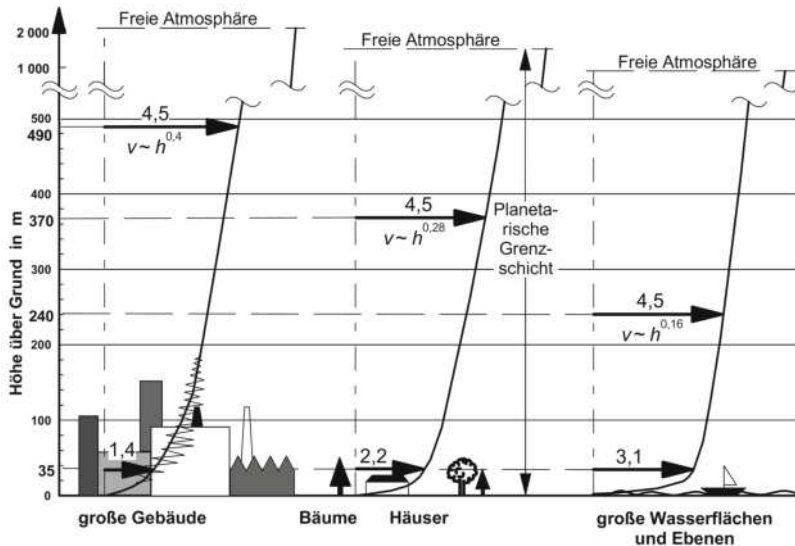
(aus [4])

vs.

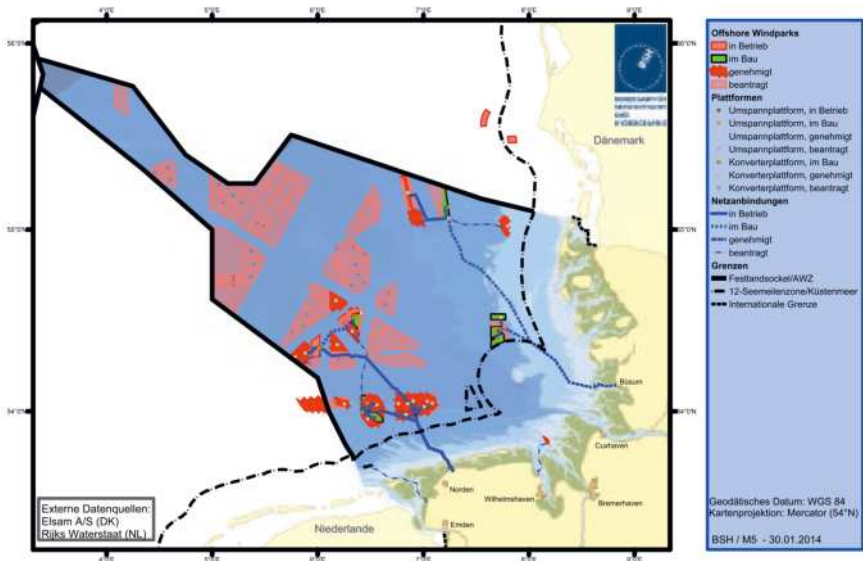


(siehe www.dwd.de)

Wind und Gelände (aus [11, Abb. 2.26])

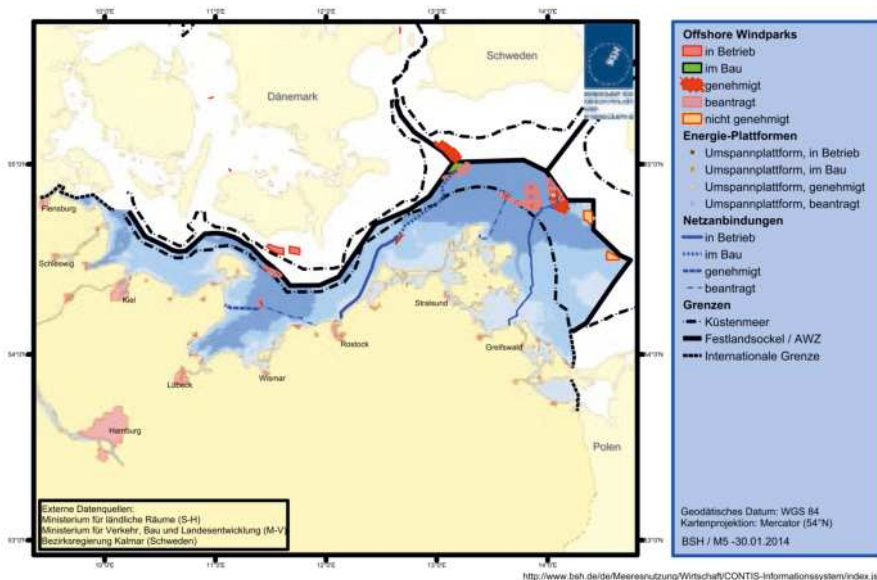


Offshore Windparks in der Nordsee (aus [4])



<http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/index.jsp>

Offshore Windparks in der Ostsee (aus [4])



Offshore versus Onshore



(aus [4])

VS.



(aus [4])

Vorteile

- + Bessere Windverhältnisse
- + 40 % Jahresauslastung (gg. 16 %)
- + Niedrigere Nabenhöhe
- + Keine Anwohner
- + Keine Hindernisse

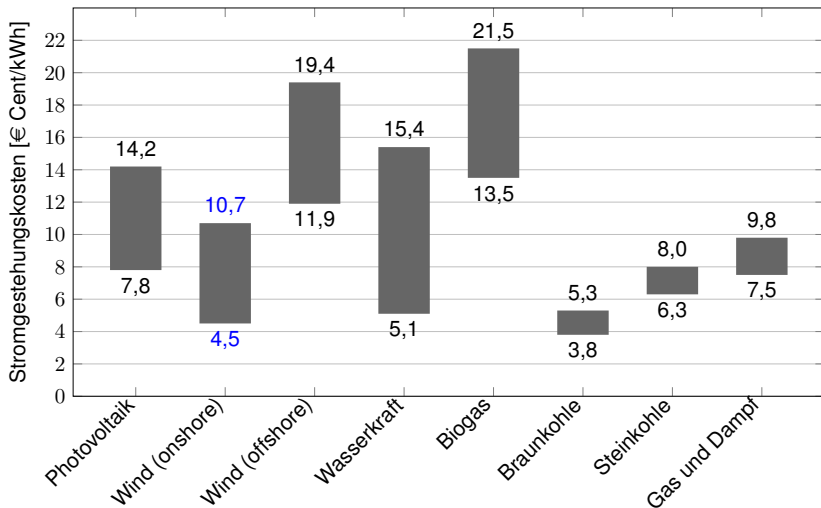
⋮

Nachteile

- Höherer Wartungsaufwand
- Aufwendige Anbindung ans Netz
- in Deutschland: fast nur "Farshore"
- Unfallgefahr / Schifffahrtswege
- Extreme Wetterbedingungen

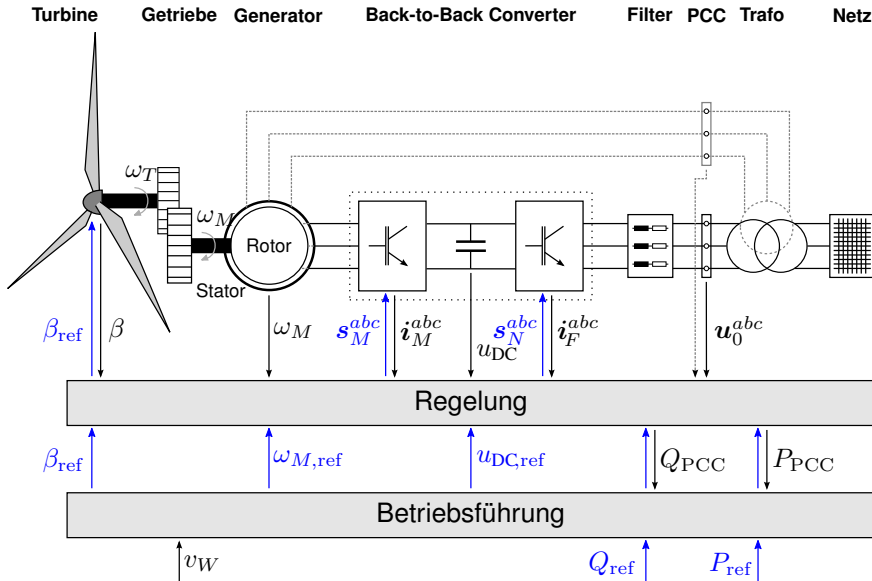
⋮

Stromgestehungskosten in Deutschland 2013



(nach Abb. 1 in [12] und Tab. 4.12 (ab 500 kW) in [6]).

Kernkomponenten



Innenleben einer Windkraftanlage



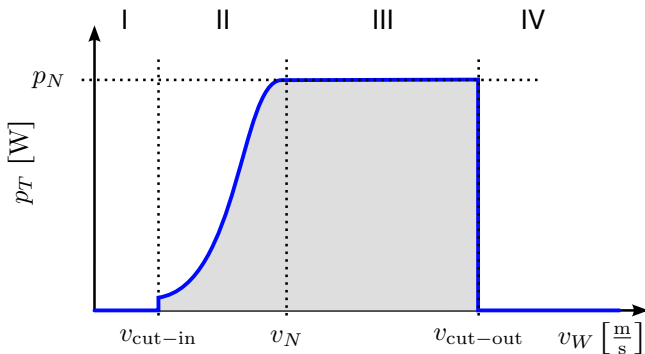
(<http://www.youtube.com/watch?v=NG1uGt6qUfM>; Länge: 7:16 min)

Aufbau einer Windkraftanlage



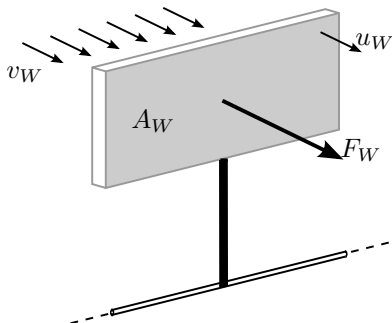
(<http://www.youtube.com/watch?v=jHn1n2tdnRc>; Länge: 2:00 min)

Betriebsbereiche bei versch. Windgeschwindigkeiten



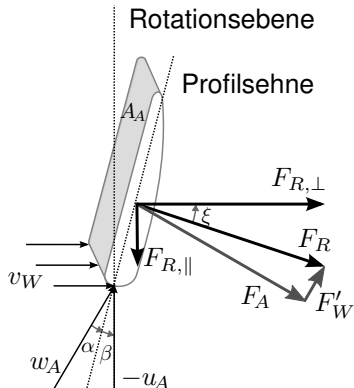
- Bereich I: Stillstand. Keine Ausgangsleistung, d.h. $p_T = 0$.
- Bereich II: Betrieb. Variable Ausgangsleistung, d.h. $0 < p_T < p_N$ (Ziel: Maximum power point tracking).
- Bereich III: Nennbetrieb. Nennausgangsleistung, d.h. $p_T = p_N$.
- Bereich IV: Stillstand (Sicherheitsabschaltung), d.h. $p_T = 0$.

Widerstandsläufer vs. Auftriebsläufer



$$F_W = \frac{1}{2} \rho c_W A_W \underbrace{(v_W - u_W)^2}_{=: w_W^2}$$

wobei $0 \leq u_W \leq v_W \wedge 0 \leq w_W \leq v_W$



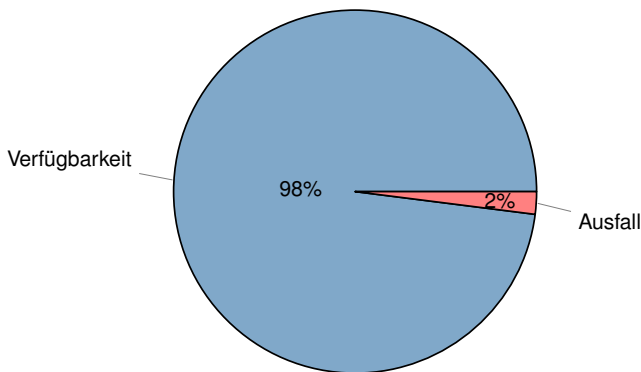
$$F_A = \frac{1}{2} \rho c_A A_A \underbrace{(v_W^2 + u_A^2)}_{=: w_A^2}$$

wobei $u_A \geq 0 \wedge w_A \geq v_W$

Auftriebsprinzip und Pitchen (beim Windsurfen)



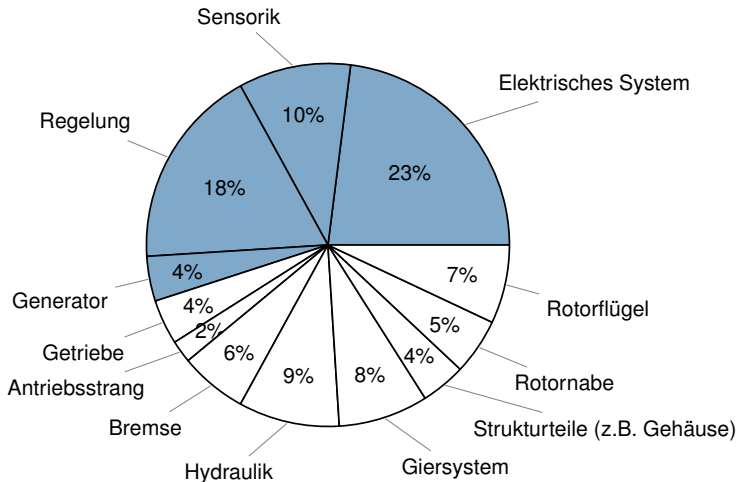
Verfügbarkeit (aus 15 jähriger Studie mit 1 500 WT, [10])



Bezogen auf Lebensdauer von 20 Jahren (=7 400 Tage):

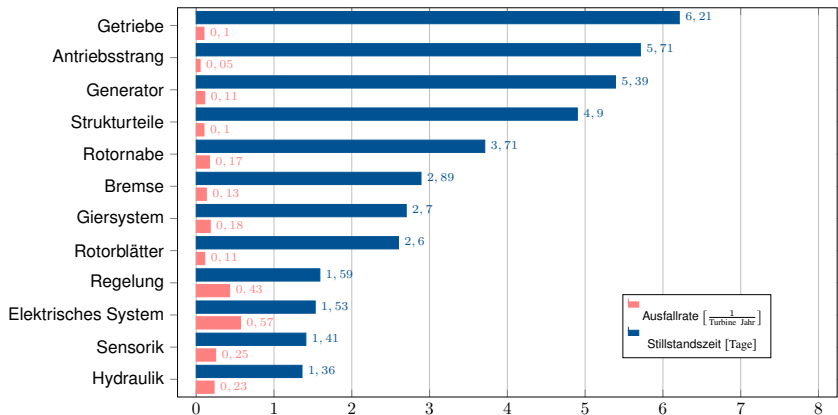
- Verfügbarkeit: 7 154 Tage Betriebsbereitschaft
- Ausfall: 146 Tage Stillstand

Fehlerverteilung auf Subsysteme



(basierend auf Abb. 2 in [10])

Ausfallrate und Stillstandszeiten



Durchschnittliche Stillstandszeit (über 20 Jahren):

(basierend auf Abb. 2 in [7])

- Elektrisches System: 18,9 Tage
- Regelung: 16,7 Tage
- Getriebe: 13,6 Tage

Seltener Fehlerfall: Brand



(<http://www.youtube.com/watch?v=0Chtr76jJyA>; Länge: 1:03 min)

Beispiel: Windkraftanlage mit Synchrongenerator

Windturbine SWT-2.3-113

Direktantrieb
(Permanentmagnet
Synchrongenerator (PMSG))

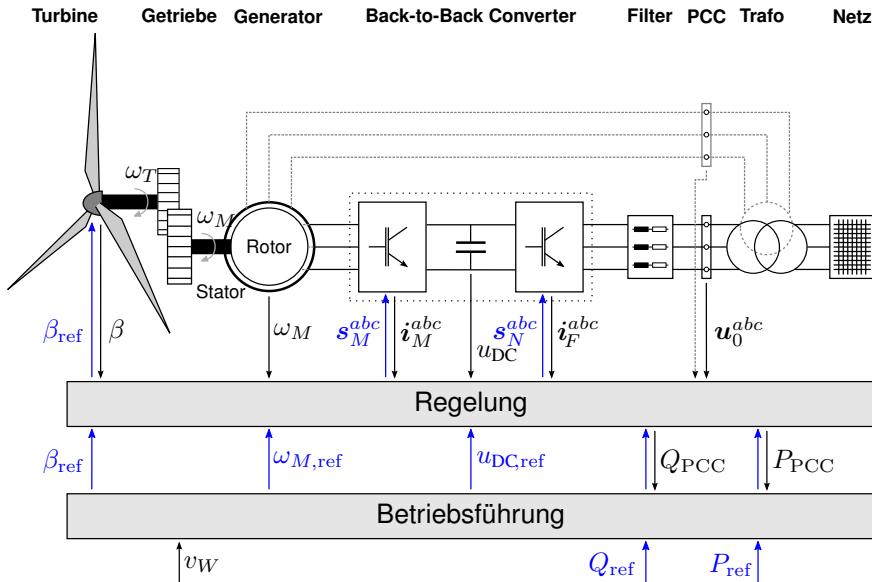


<http://www.siemens.com/press/de/pressebilder/>

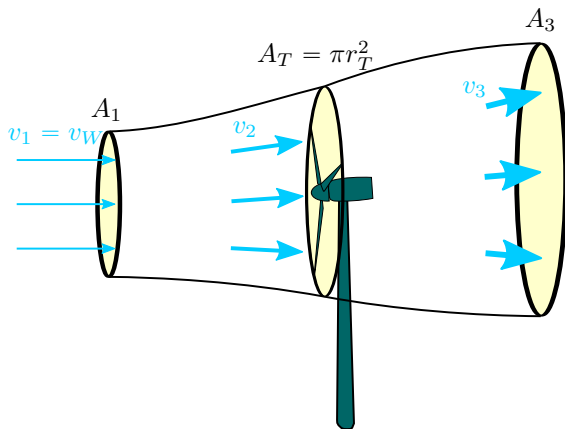


<http://www.siemens.com/press/de/pressebilder/>

Kernkomponenten (Wiederholung)

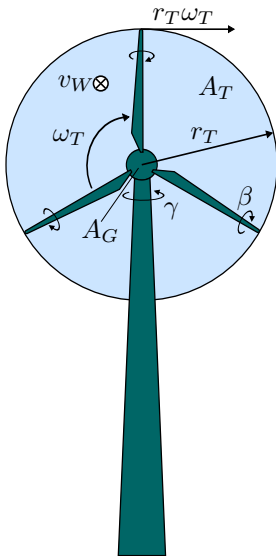


Windleistung, Turbinenleistung und Betzfaktor



$$p_W(t) = \frac{1}{2} \rho \pi r_T^2 v_W(t)^3 \Rightarrow p_T(t) = c_P(\cdot, \cdot) p_W(t) \leq \underbrace{c_{P, \text{Betz}}}_{=16/27 \approx 0,59} p_W(t) \quad (1)$$

Schnellaufzahl und Leistungsbeiwertapproximation



Schnellaufzahl (tip speed ratio)

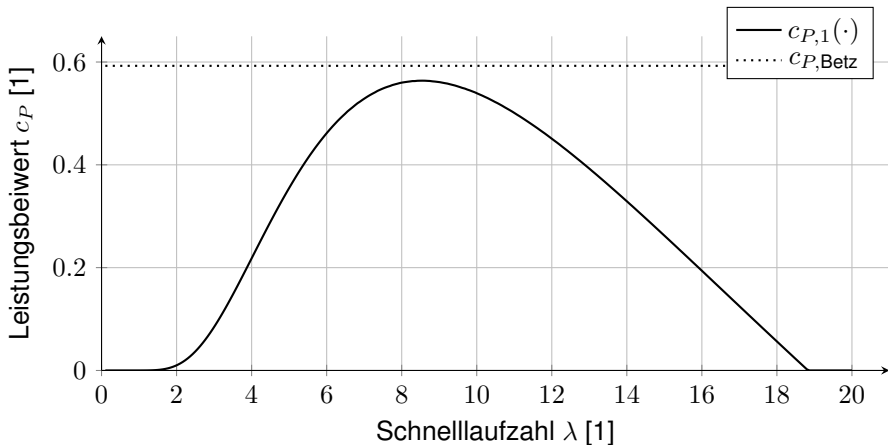
$$\lambda := \lambda(\omega_G, v_W) := \frac{r_T \omega_G}{g_r v_W} [1], \quad \omega_G = g_r \omega_T. \quad (2)$$

Leistungsfaktor/-beiwertapproximation

$$c_P: \overline{\mathcal{D}} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, \quad (\beta, \lambda) \mapsto c_P(\beta, \lambda) := c_1 [c_2 f(\beta, \lambda) - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5] e^{-c_6 f(\beta, \lambda)}$$

mit $\mathcal{D} := \{ (\beta, \lambda) \in \mathbb{R}_{\geq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \mid c_P(\beta, \lambda) > 0 \}$ (3)

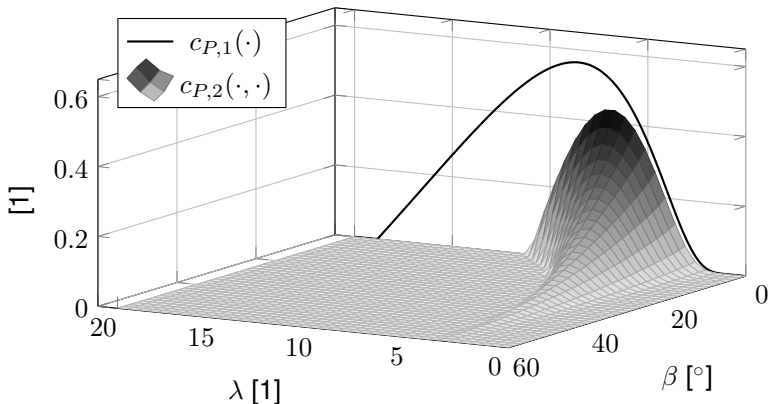
Leistungsbeiwert (ohne Pitchregelung)



Turbinenleistung (Leistungsaufnahme/-umsetzung)

$$p_T = c_{P,1}(\lambda) p_W(t) = c_{P,1}(\lambda) \frac{1}{2} \rho \pi r_T^2 v_W(t)^3 \leq c_{P,Betz} \frac{1}{2} \rho \pi r_T^2 v_W(t)^3 \quad (4)$$

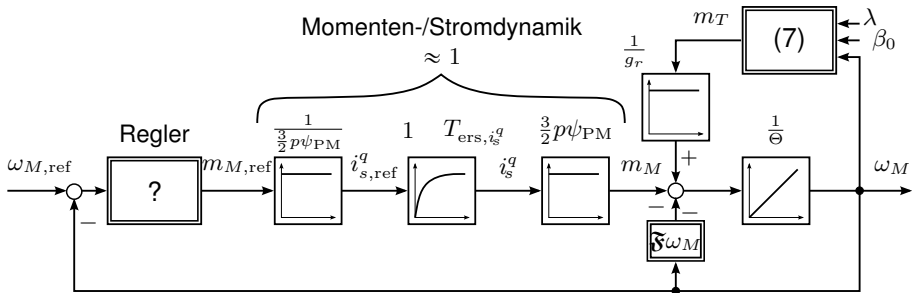
Leistungsbeiwert (mit Pitchregelung)



Turbinenleistung (Leistungsaufnahme/-umsetzung)

$$p_T(t) = c_{P,2}(\lambda, \beta) p_W(t) = c_{P,2}(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho \pi r_T^2 v_W(t)^3 \leq c_{P,\text{Betz}} \frac{1}{2} \rho \pi r_T^2 v_W(t)^3 \quad (5)$$

Mechanik und Drehzahlregelkreis



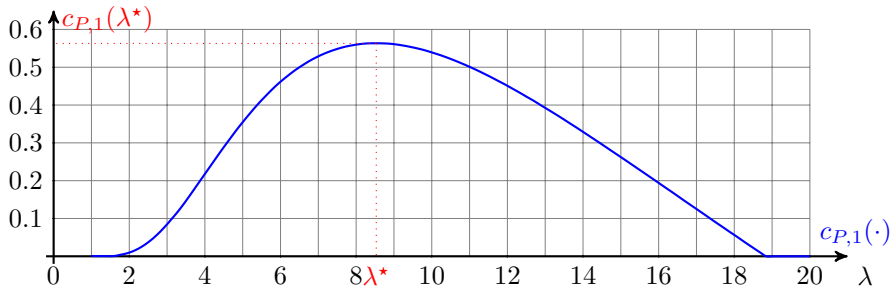
$$\frac{d}{dt} \omega_M = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{m_T(v_W, \beta_0, \lambda)}{g_r} - m_M - \mathfrak{F} \omega_M \right), \quad \omega_M(0) = \omega_M^0 \geq 0 \quad (6)$$

wobei

$$m_T(v_W, \beta_0, \lambda) = \frac{c_P(\beta_0, \lambda) P_W(t)}{\omega_M / g_r} \stackrel{(2)}{=} \frac{\varrho \pi r_T^3 v_W(t)^2}{2 g_r} \frac{c_P(\beta_0, \lambda)}{\lambda}. \quad (7)$$

Drehzahlregelung: Ziel und Regelgesetz

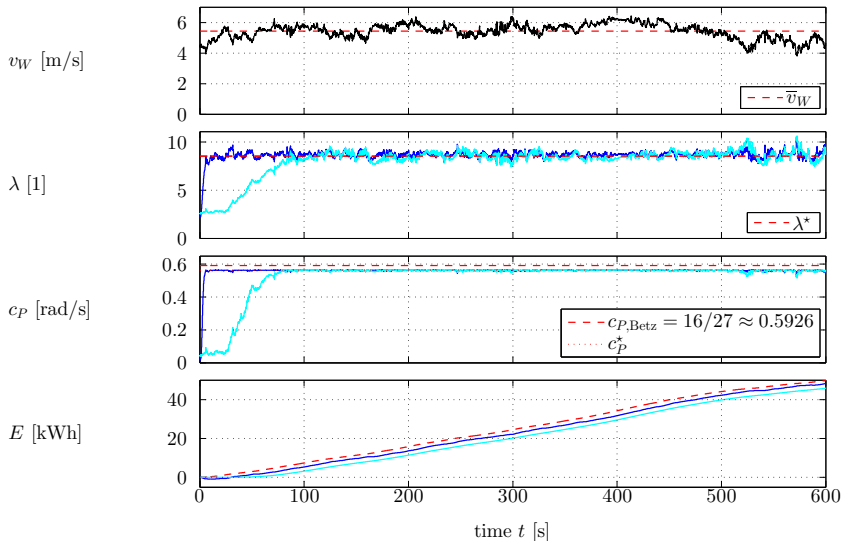
Ziel (in Betriebsbereich II)



Regelgesetz

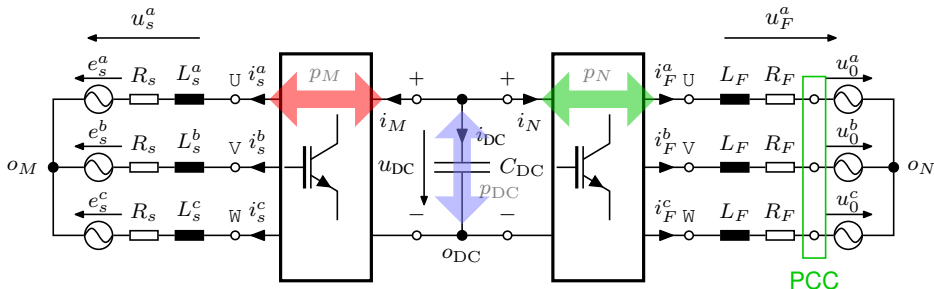
$$m_M(t) \approx m_{M,\text{ref}}(t) = k_P^* \omega_M(t)^2 \quad \text{mit} \quad k_P^* := \frac{\varrho \pi r_T^5}{2g_r^3} \frac{c_P(\lambda^*, \beta_0)}{(\lambda^*)^3} \quad \wedge \quad \omega_{M,\text{ref}} = 0. \quad (8)$$

Simulationsergebnisse: — FC, — CC (aus [9])



Elektrisches System (im abc -KoSy)

Generator, Back-to-Back Converter, Filter, Netzanschlusspunkt (PCC), Netz



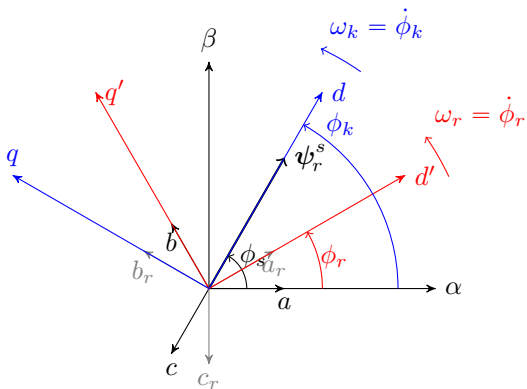
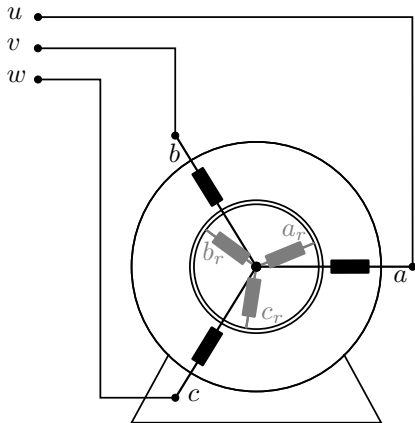
Kirchhoffsche Regeln (Knoten- & Maschenregel)

$$\mathbf{u}_s^{abc}(t) = R_s \mathbf{i}_s^{abc}(t) + \mathbf{L}_s^{abc} \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s^{abc} + \mathbf{e}_s^{abc}(t) \quad (9)$$

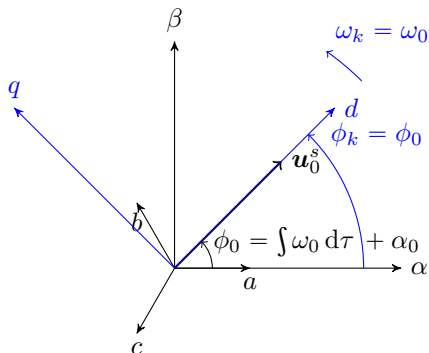
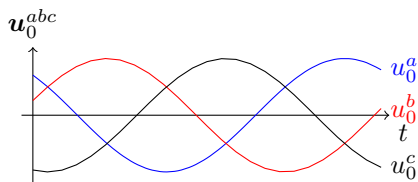
$$p_{DC}(t) = u_{DC}(t) C_{DC} \frac{d}{dt} u_{DC}(t) = - \underbrace{u_{DC}(t) i_M(t)}_{=p_M(t)} - \underbrace{u_{DC}(t) i_N(t)}_{=p_N(t)} \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_F^{abc}(t) = R_F \mathbf{i}_F^{abc}(t) + L_F \frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^{abc} + \mathbf{u}_0^{abc}(t) \quad (11)$$

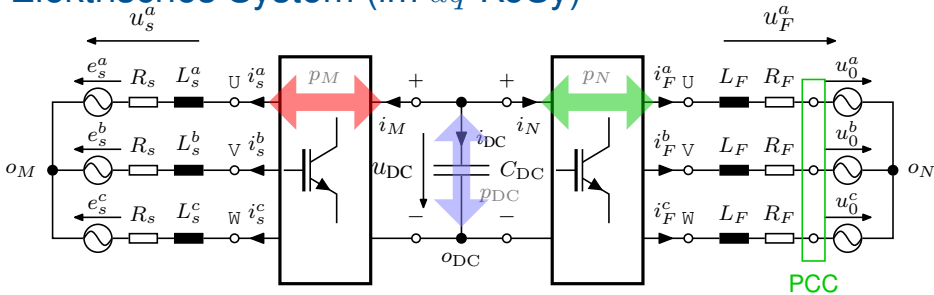
Raumzeigertheorie: Rotorflussorientierung (dq -KoSy, maschinenseitig)



Raumzeigertheorie: Spannungsorientierung (dq -KoSy, netzseitig)



Elektrisches System (im dq -KoSy)



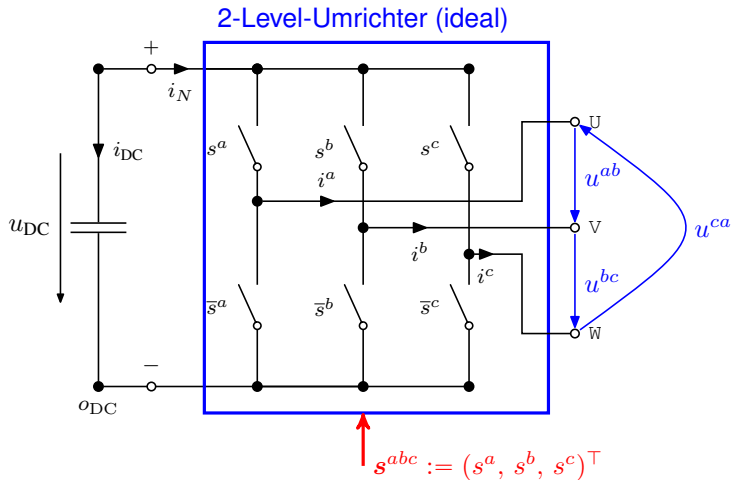
Generator in Spannungsorientierung

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_s^d &= \frac{1}{L_s^d} (u_s^d - R_s i_s^d + \omega_k L_s^q i_s^q) \\ \frac{d}{dt} i_s^q &= \frac{1}{L_s^q} (u_s^q - R_s i_s^q - \omega_k L_s^d i_s^d - \omega_k \psi_{PM}) \\ m_M &= \frac{3}{2} p (\psi_{PM} i_s^q + \underbrace{(L_s^d - L_s^q) i_s^d i_s^q}_{\approx 0}) \\ \frac{d}{dt} \omega_M &= \frac{1}{\Theta} (m_T(v_W, \beta, \omega_M)/g_r + m_M) \end{aligned}$$

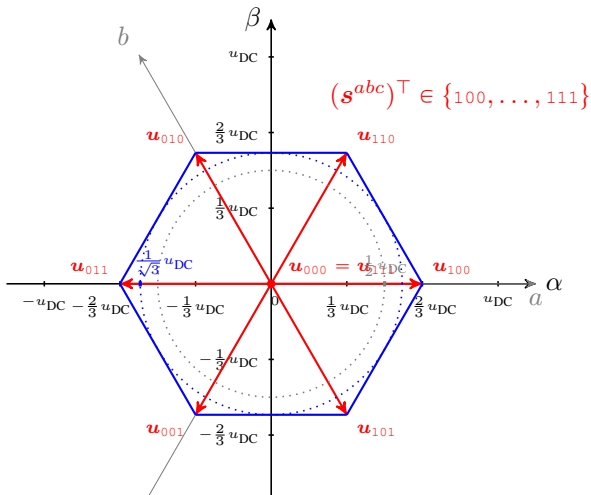
Netzseite in Spannungsorientierung

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_F^d &= \frac{1}{L_F} (u_F^d - R_F i_F^d + \omega_0 L_F i_F^q - \hat{u}_0) \\ \frac{d}{dt} i_F^q &= \frac{1}{L_F} (u_F^q - R_F i_F^q - \omega_0 L_F i_F^d) \\ P_{PCC} &= \frac{3}{2} \hat{u}_0 i_F^d \quad \& \quad Q_{PCC} = -\frac{3}{2} \hat{u}_0 i_F^q \end{aligned}$$

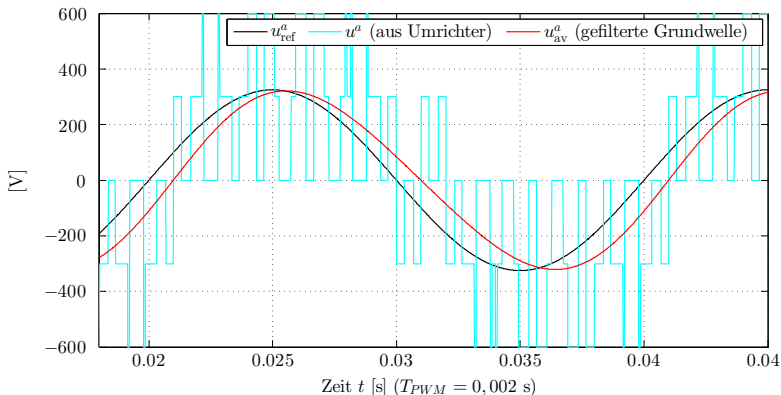
Spannungszwischenkreis-Umrichter



Schaltvektoren und "Spannungshexagon"

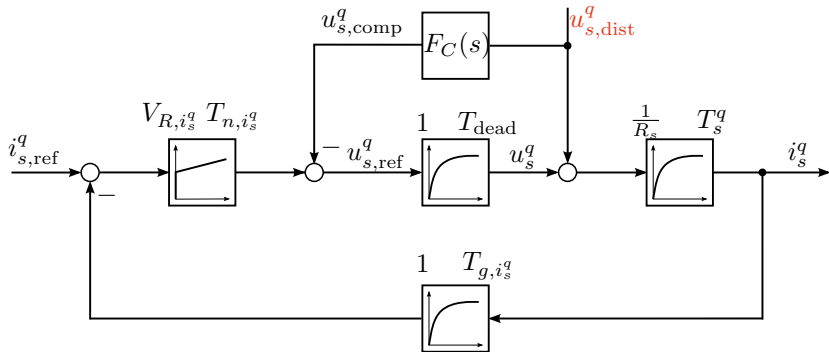


Verzögerte Spannungsgenerierung



$$T_{\text{dead}} = T_{\text{PWM}} \implies F_{\text{Inverter}}(s) := \frac{\mathbf{u}^{a,b,c}(s)}{\mathbf{u}_{\text{ref}}^{a,b,c}(s)} = e^{-sT_{\text{dead}}} \approx \frac{1}{1 + sT_{\text{dead}}}$$

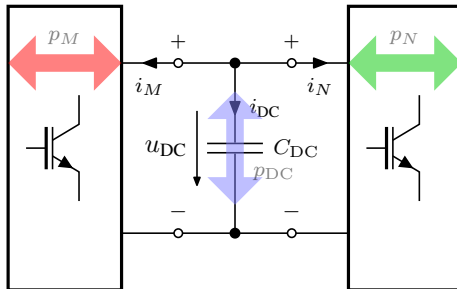
Stromregelkreis(e)



PI-Regler nach Betragsoptimum $\implies$ schnelle Festwertregelung garantiert

$$F_{R,i_s^q}(s) = V_{R,i_s^q} \frac{1 + sT_{n,i_s^q}}{sT_{n,i_s^q}} \quad \text{wobei} \quad V_{R,i_s^q} = \frac{T_s^q}{2 \cdot 1/R_s \cdot T_{\text{dead}}} \quad \text{und} \quad T_{n,i_s^q} = T_s^q$$

Regelung der Zwischenkreisspannung: Warum?



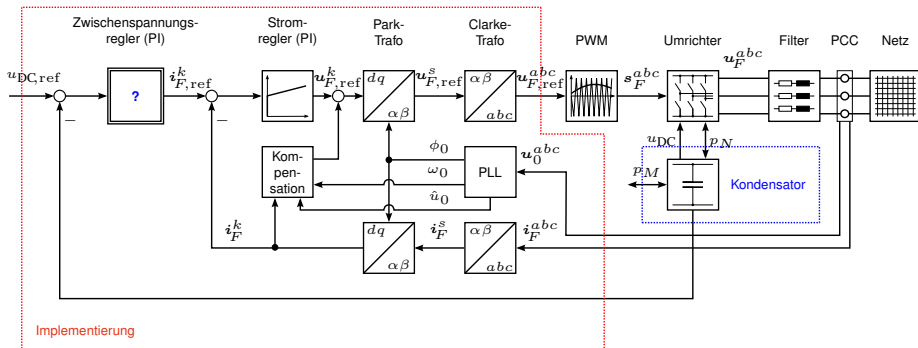
Leistungsgleichgewicht

$$p_{DC} = u_{DC} C_{DC} \frac{d}{dt} u_{DC} = -p_M - p_N \implies \boxed{\frac{d}{dt} u_{DC} = \frac{1}{u_{DC} C_{DC}} (-p_M - p_N)}$$

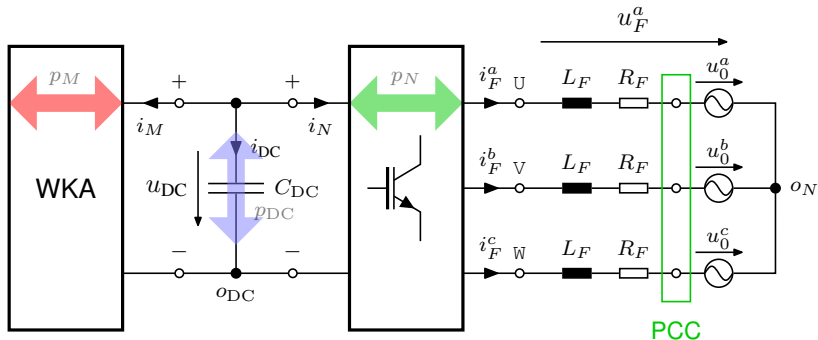
so dass

$$\boxed{u_{DC} = u_{DC,ref} > 0} \implies \frac{d}{dt} u_{DC} = 0$$

Zwischenkreis-Spannungsregelung



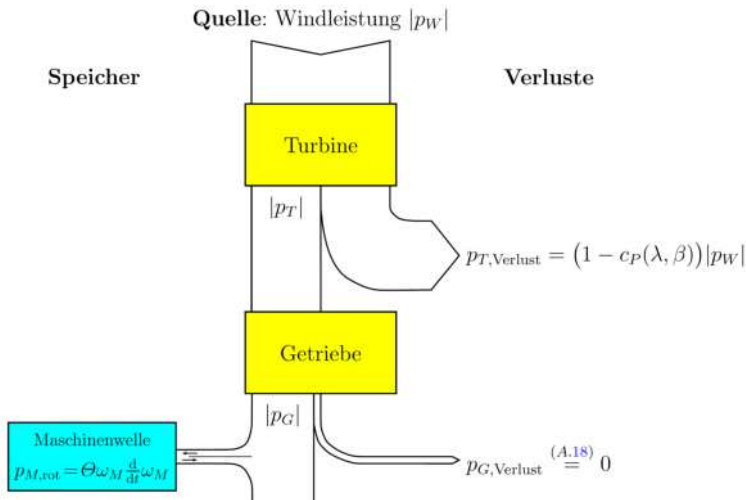
Wirk- und Blindleistungsabgabe ins Netz



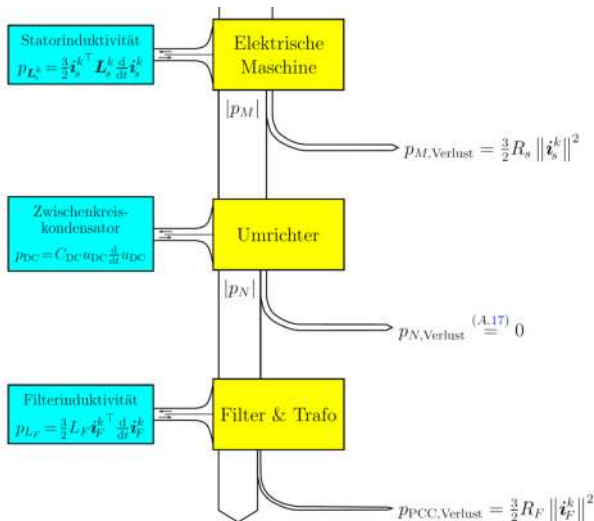
$$\mathbf{u}_F^k = R_F \mathbf{i}_F^k + L_F \frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k + \omega_0 L_F \begin{pmatrix} -i_F^q \\ i_F^d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{u}_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$p_N = \underbrace{\frac{3}{2} R_F \|\mathbf{i}_F^k\|^2}_{=: p_{V, R_F}} + \underbrace{\frac{3}{2} L_F \left(\frac{d}{dt} \mathbf{i}_F^k \right)^\top \mathbf{i}_F^k}_{=: p_{V, L_F}} + \underbrace{\frac{3}{2} \hat{u}_0 i_F^d}_{=: P_{PCC} \text{ Wirkleistung}} \quad \wedge \quad \underbrace{Q_{PCC} = -\frac{3}{2} \hat{u}_0 i_F^q}_{\text{Blindleistung}}$$

Gesamte Anlage: Leistungsfluss (Teil 1)



Gesamte Anlage: Leistungsfluss (Teil 2)



Zusammenfassung: Windkraft – Motor der Energiewende [2, 4]

- 2013: Installierte Nennleistung 34 179 MW
(in Bayern: 1 096 MW / Ausbauziel 2023: 4 300 MW)
 - Neu installierte Nennleistung: 3 091 MW
 - Onshore: 2 851 MW (Zuwachsrate: 9,2 %)
 - Offshore: 240 MW (Zuwachsrate: 85,7 %)
- 2013: Einspeisung von 47 400 GW h (in 2012: 50 700 GW h)
 - 8,0 % der gesamten Strombedarfsdeckung (in 2012: 8,4 %)
 - 34 % des erneuerbaren Strommixes
(Biomasse: 29 %, PV: 19 %, Wasserkraft: 14 %)
- Zentrale Forschungsaufgaben (u.a.)
 - Erhöhung der Lebensdauer und Verfügbarkeit
 - Repowering / Recyclen von Windkraftanlagen
 - Sichere Einbindung des Windstromes ins Versorgungsnetz
 - **Übergeordnetes Ziel: Reduktion der Stromgestehungskosten**

Literatur

- [1] dena-Verteilnetzstudie – Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030 / Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). 2012. – Forschungsbericht
- [2] Erneuerbare Energien – Motor der Energiewende / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). 2012. – Forschungsbericht
- [3] Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand: Juli 2014) / Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2014. – Forschungsbericht
- [4] BERKHOUT, Volker ; FAULSTICH, Stefan ; GÖRG, Philip ; HAHN, Berthold ; LINKE, Katrin ; NEUSCHÄFER, Moritz ; PFAFFEL, Sebastian ; RAFIK, Khalid ; ROHRIG, Kurt ; ROTHKEGEL, Renate ; ZIESSE, Mark: Windenergiereport Deutschland 2013 / Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). 2014. – Forschungsbericht
- [5] DIRSCHERL, Christian ; HACKL, Christoph ; SCHECHNER, Korbinian: *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. Kap. Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung, Springer-Verlag, 2014 (to be published in the 4. edition)
- [6] DUMONT, Ulrich ; KEUNEKE, Rita: Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß §65 EEG – Vorhaben Ild spartenspezifisches Vorhaben Wasserkraft / Ingenieurbüro Floecksmühle. 2011. – Endbericht
- [7] FAULSTICH, B.; Tabner P. J.: Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment. In: *Wind Energy* 14 (2011), S. 327–337
- [8] FICHAUX, N ; BEURSHENS, J ; JENSEN, PH ; WILKES, J u. a.: UpWind; Design Limits and Solutions for Very Large Wind Turbines, A 20 MW Turbine is Feasible. In: *European wind energy association. Report* (2011)
- [9] HACKL, Christoph M.: Funnel control for wind turbine systems. In: *to be published in Proceedings of the 2014 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 2014, S. xxxx–xxxx
- [10] HAHN, Berthold ; DURSTEWITZ, Michael ; ROHRIG, Kurt: Reliability of wind turbines, experiences of 15 years with 1500 WT's. In: PEINKE, Joachim (Hrsg.) ; SCHAUAMANN, Peter (Hrsg.) ; BARTH, Stephan (Hrsg.): *Wind Energy*. Berlin : Springer-Verlag, 2007 (Proceedings of the Euromech Colloquium), S. 329–332
- [11] KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; STREICHER, Wolfgang (Hrsg.) ; WIESE, Andreas (Hrsg.): *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 5. Berlin : Springer Vieweg, 2014
- [12] KOST, Christoph ; MAYER, Johannes N. ; THOMSEN, Jessica ; HARTMANN, Nikias ; SENKPIEL, Charlotte ; PHILIPPS, Simon ; NOLD, Sebastian ; LUDE, Simon ; SCHLEGL, Thomas: Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). 2013. – Forschungsbericht