

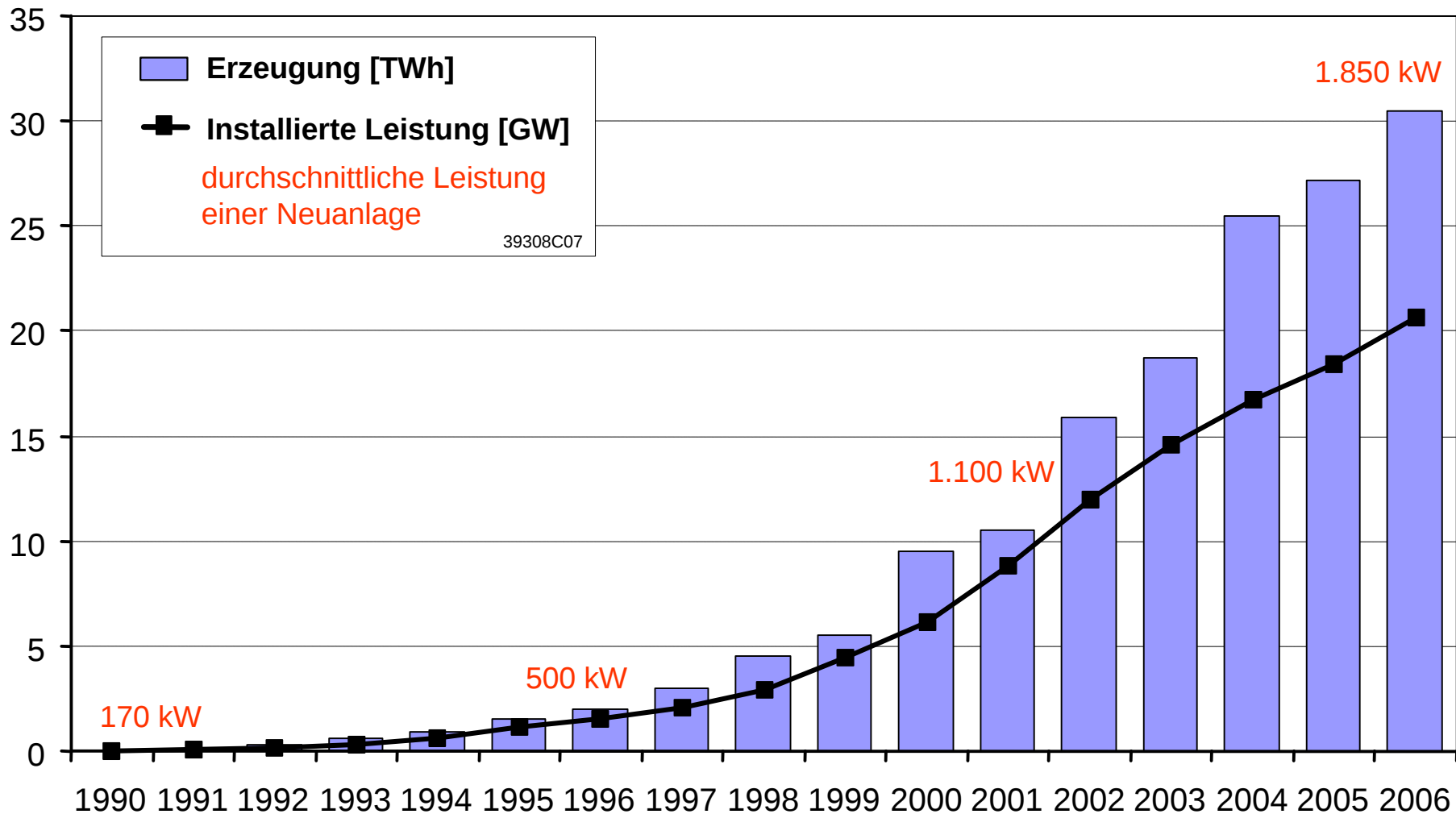
Stromerzeugung aus Windkraft in Deutschland

**Vortragsreihe Erneuerbare Energien
Straubing 9. Juli 2007**

**Dr.-Ing. Peter Tzscheutschler
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
Technische Universität München**

- **Einleitung**
- **Technik**
- **Offshoreausbau**
- **Integration in die Stromversorgung**
- **Fazit**

Entwicklung der Stromerzeugung aus Windenergie



Quellen: DEWI 07, AG-Energiebilanzen 07

Geschichte der Windenergienutzung

Bockwindmühle
11. Jahrhundert



Holländerwindmühle
15. Jahrhundert



Westernrad
USA, 19. Jahrhundert



Moderne
Windkraftanlage



39-A-350-07

Bauformen von Windkraftanlagen

Horizontalachsensysteme

Westernrotor



Holländer-Windmühle



Vertikalachsensysteme

Savonius-Rotor



Zweiblattrotor



Dreiblattrotor



Heidelberg-Rotor



Darrieus-Rotor

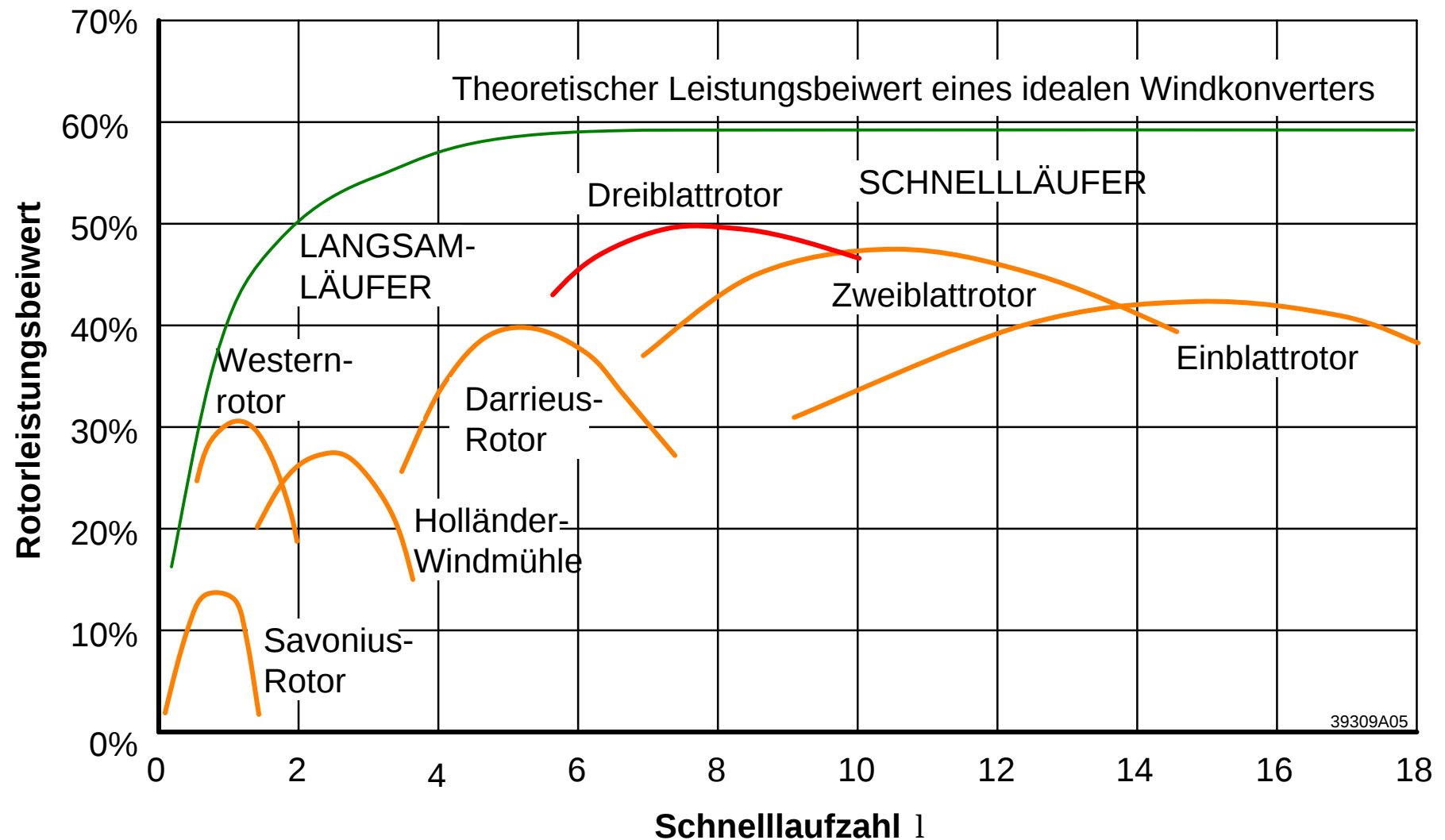


Widerstands-
prinzip

Auftriebs-
prinzip

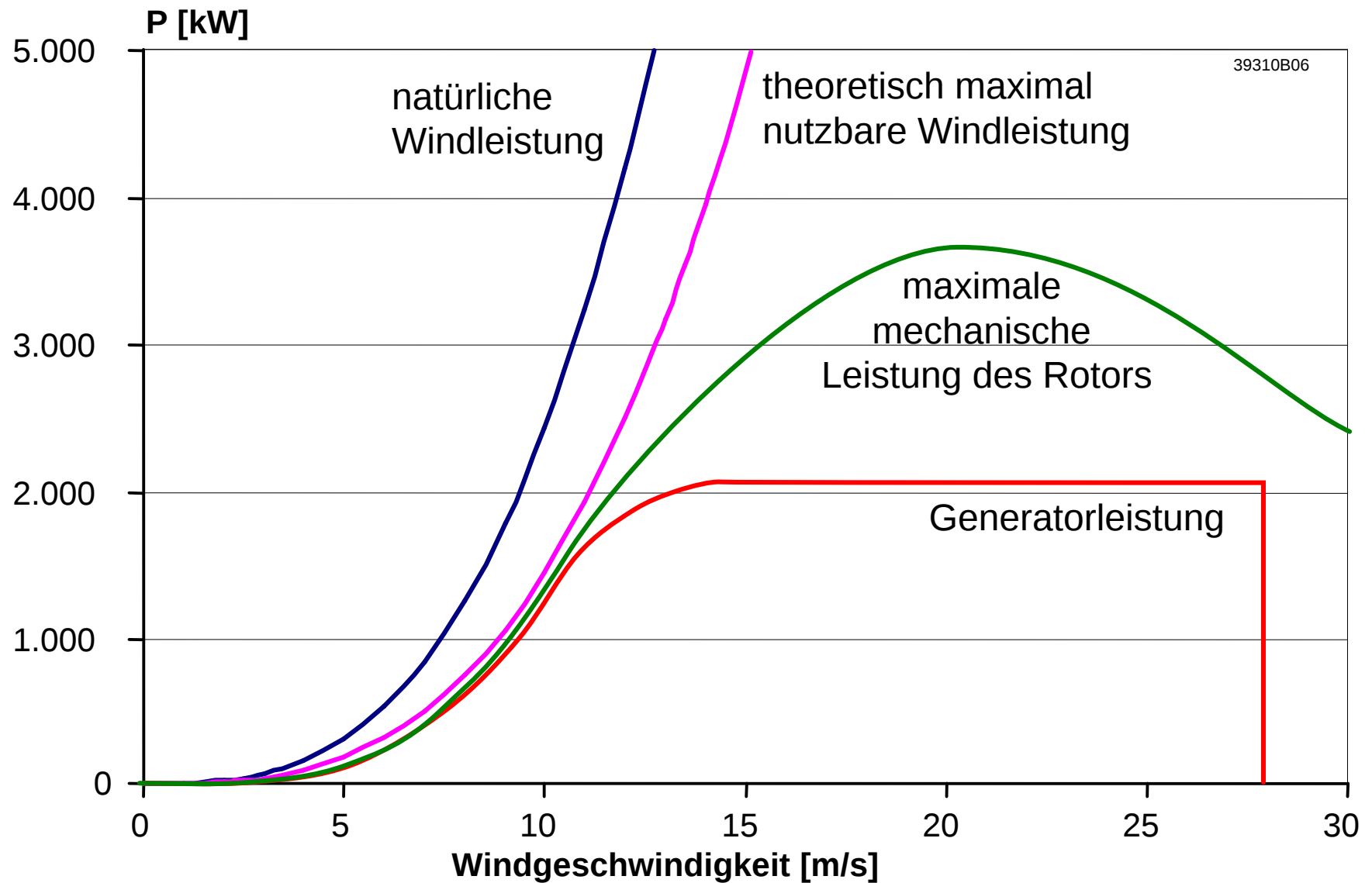
Quelle: www.energiwelten.de

Windausnutzung verschiedener Typen von Windkraftanlagen



Quelle: WAGN99

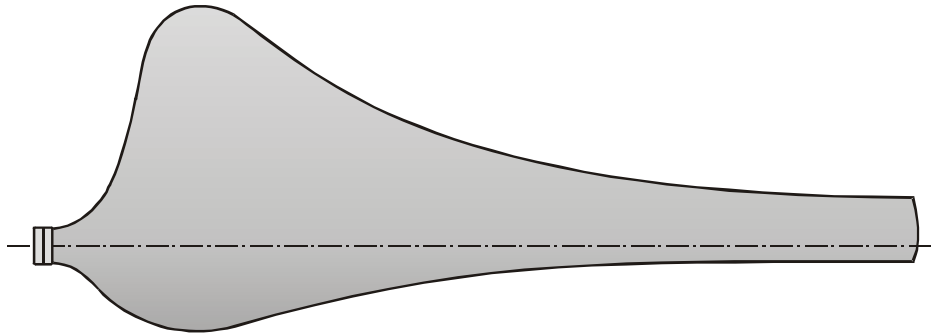
Leistungskennlinien



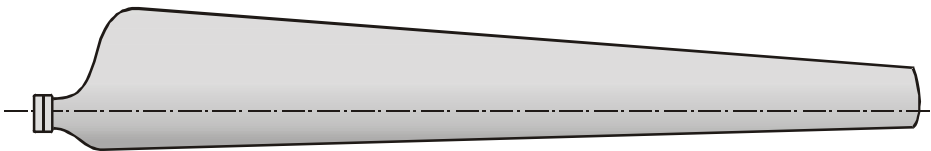
Rotorblattprofile für Windkraftanlagen

• Rotorblattgeometrie

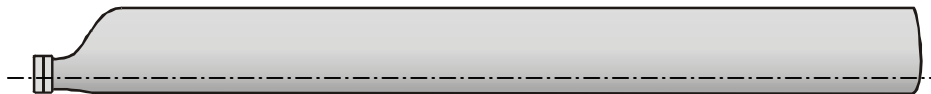
a) Idealform $c_p \rightarrow 100\%$; fertigungstechnisch aufwendig



b) Trapezform $\Delta c_p \approx -1\%$; gute Kompromisslösung

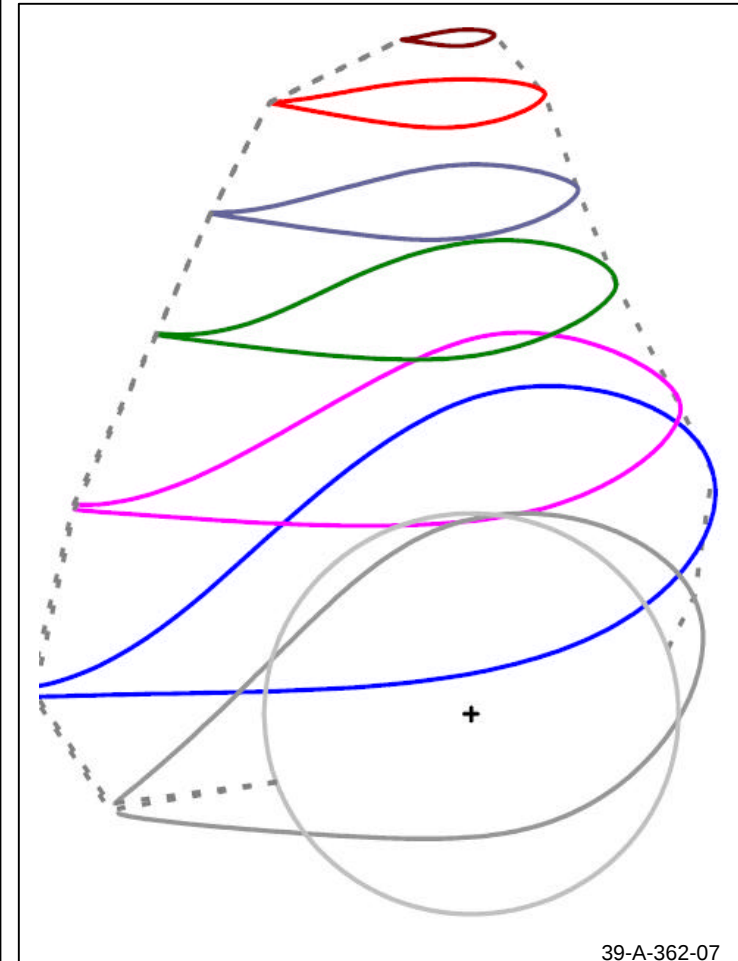


c) Rechteckform $\Delta c_p \approx -7\%$; relativ schlechter Wirkungsgrad



Quelle: WAGN07 1827B06

• Rotorblattprofile

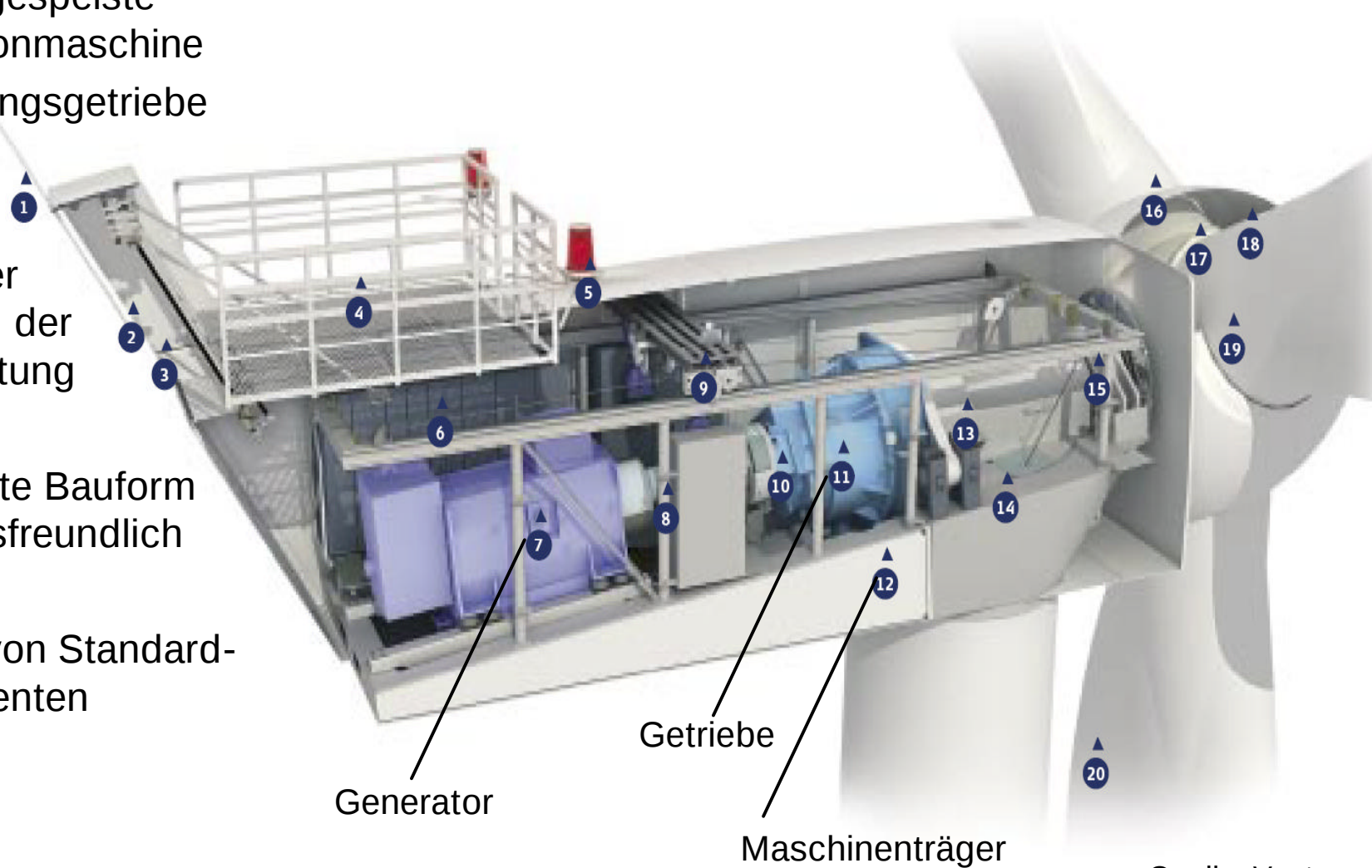


39-A-362-07

Quelle: TU Delft

Bauform mit Asynchrongenerator und Getriebe

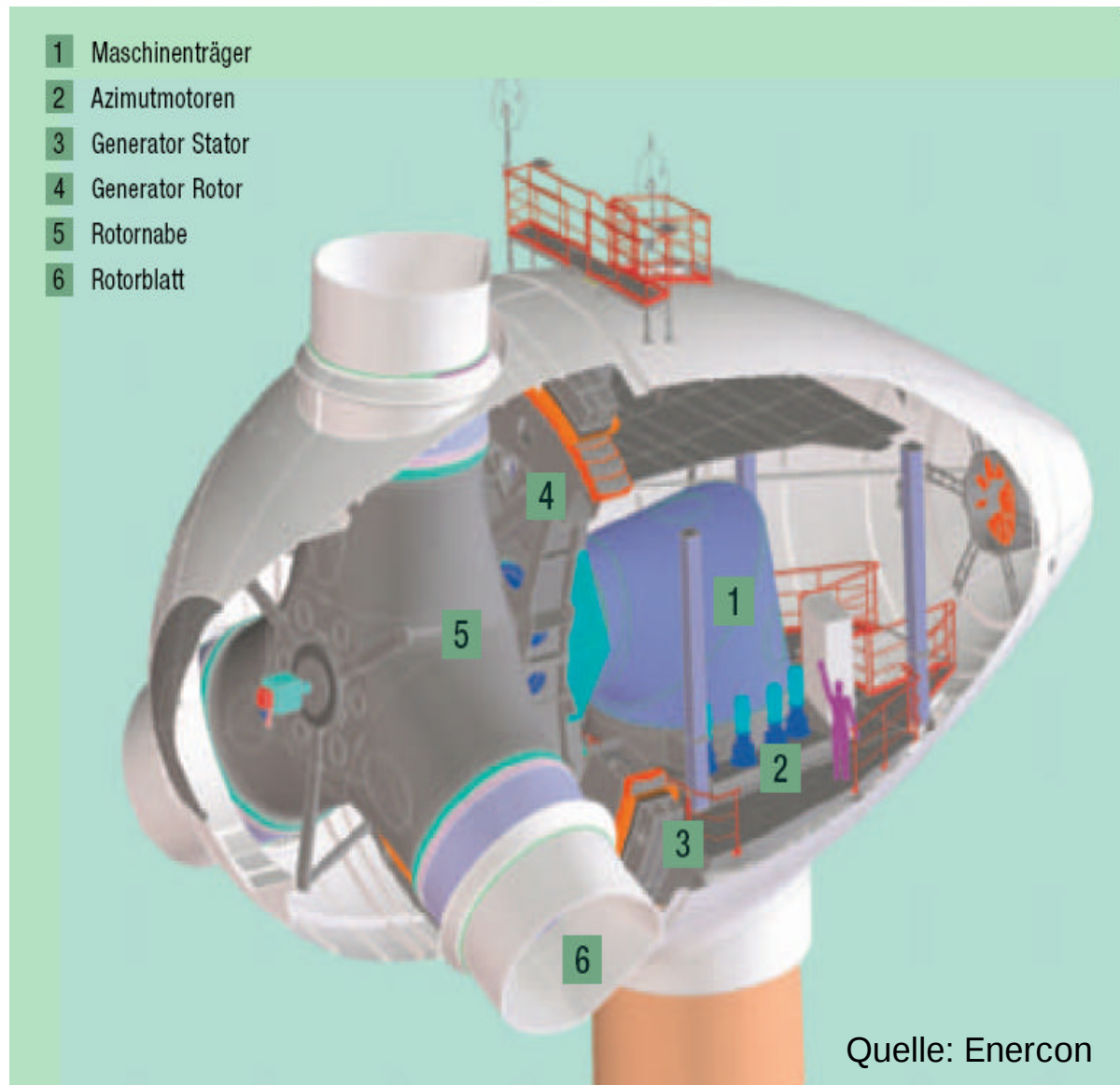
- Doppeltgespeiste Asynchronmaschine
- Anpassungsgetriebe
- Umrichter ca. 3 0% der Nennleistung
- Aufgelöste Bauform wartungsfreundlich
- Einsatz von Standardkomponenten



Quelle: Vestas

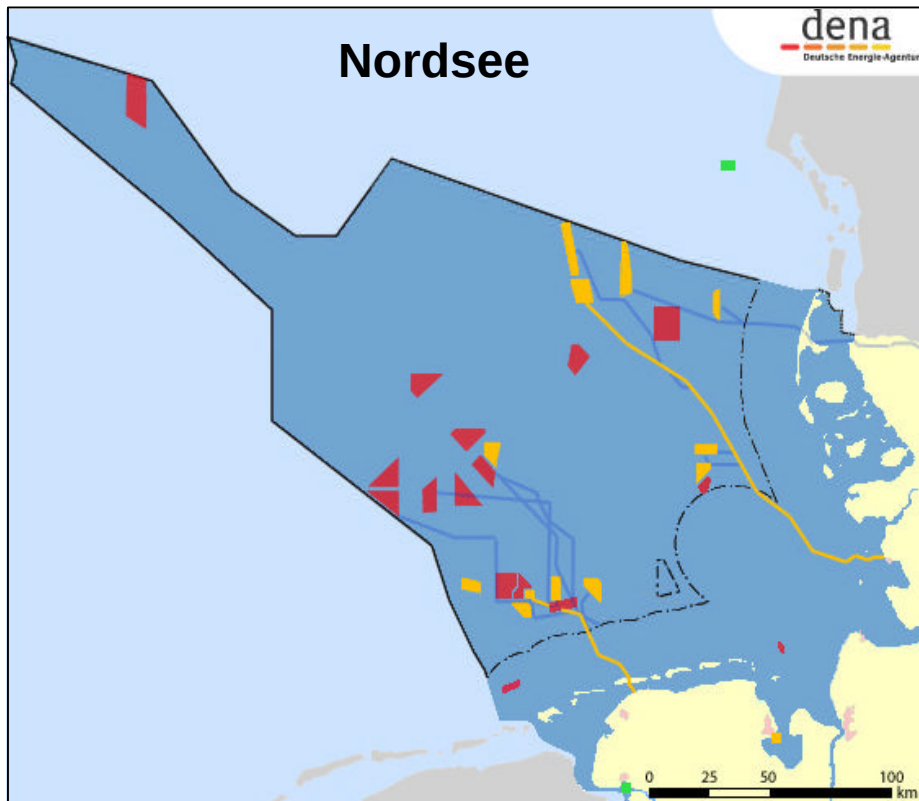
Bauform mit Synchrongenerator ohne Getriebe

- Umrichter gespeiste
vielpolige
Synchronmaschine
- Umrichter auf volle
Leistung ausgelegt
- Geringerer Verschleiß
durch niedrige Drehzahl
- Hohes Gondelgewicht
- Besserer Ausgleich von
Windböen
- Einsatz von eigens
entwickelten
Komponenten

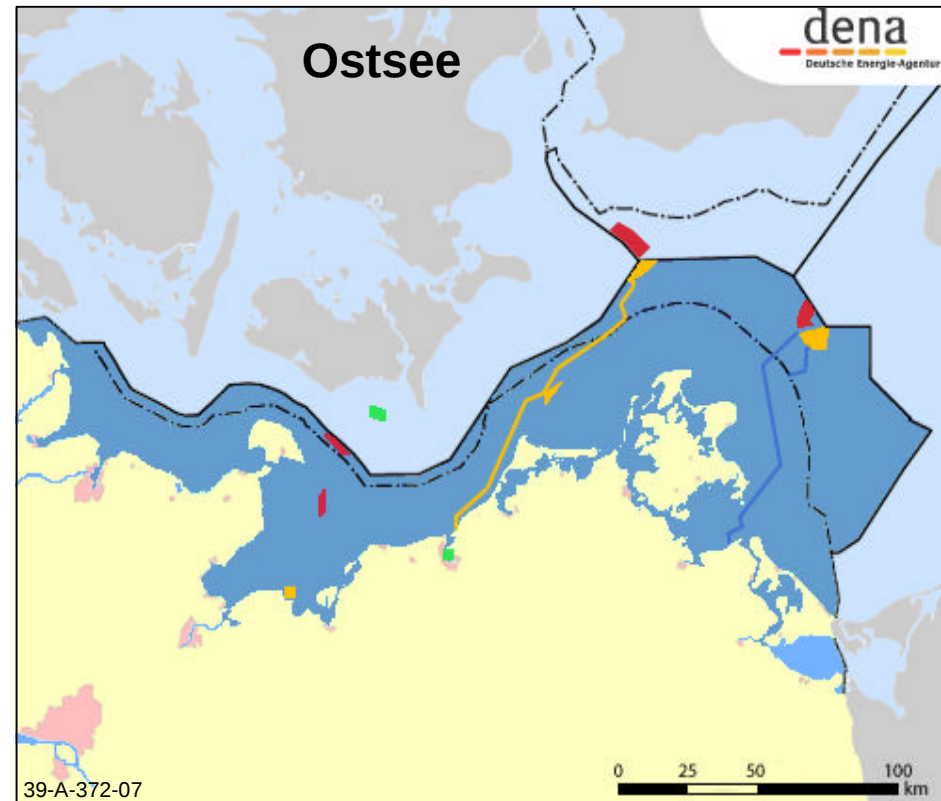


- Genehmigungsbehörde: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
 - Zuständig für AWZ in Nord- und Ostsee
 - Genehmigung muss erteilt werden, wenn Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt nicht beeinträchtigt und die Meeresumwelt nicht gefährdet wird.
 - Genehmigung gilt 25 Jahre, innerhalb von 2,5 Jahren muss mit dem Aufbau begonnen werden
 - Bereits 15 genehmigte Parks in der Nordsee und 3 in der Ostsee
 - Standards für Umwelt-, Baugrunduntersuchung, konstruktive Ausführung, Risikoeinschätzung
- Anforderungen an Offshore Windenergieanlagen
 - Robuste Komponentenauslegung
 - Fernüberwachung, Fernbeeinflussung
 - Hohe Zuverlässigkeit
 - Korrosionsschutz
 - Kransysteme
 - Hubschrauberplattform
 - Gründung (Senkkasten, Monopile, Tripod)
- Netzanbindung über Kabeltrassen
 - Platzbedarf
 - Kompensation bzw. HGÜ

Geplante Offshore-Windparks in Deutschland



22 Windparks mit bis zu 4.700 MW,
insgesamt bis zu 22.800 MW geplant



11 Windparks mit bis zu 1.000 MW,
insgesamt bis zu 4.400 MW geplant

Quelle: dena, BSH

Integration fluktuierender Einspeisung in den liberalisierten Strommarkt



• **Bevorzuge Abnahme von Stromerzeugung nach EEG**

- Netzbetreiber muss die Einspeisung von Windenergieanlagen zu jeder Zeit und in voller Höhe abnehmen
- Und dafür gesetzlich vorgeschriebene Vergütung zahlen

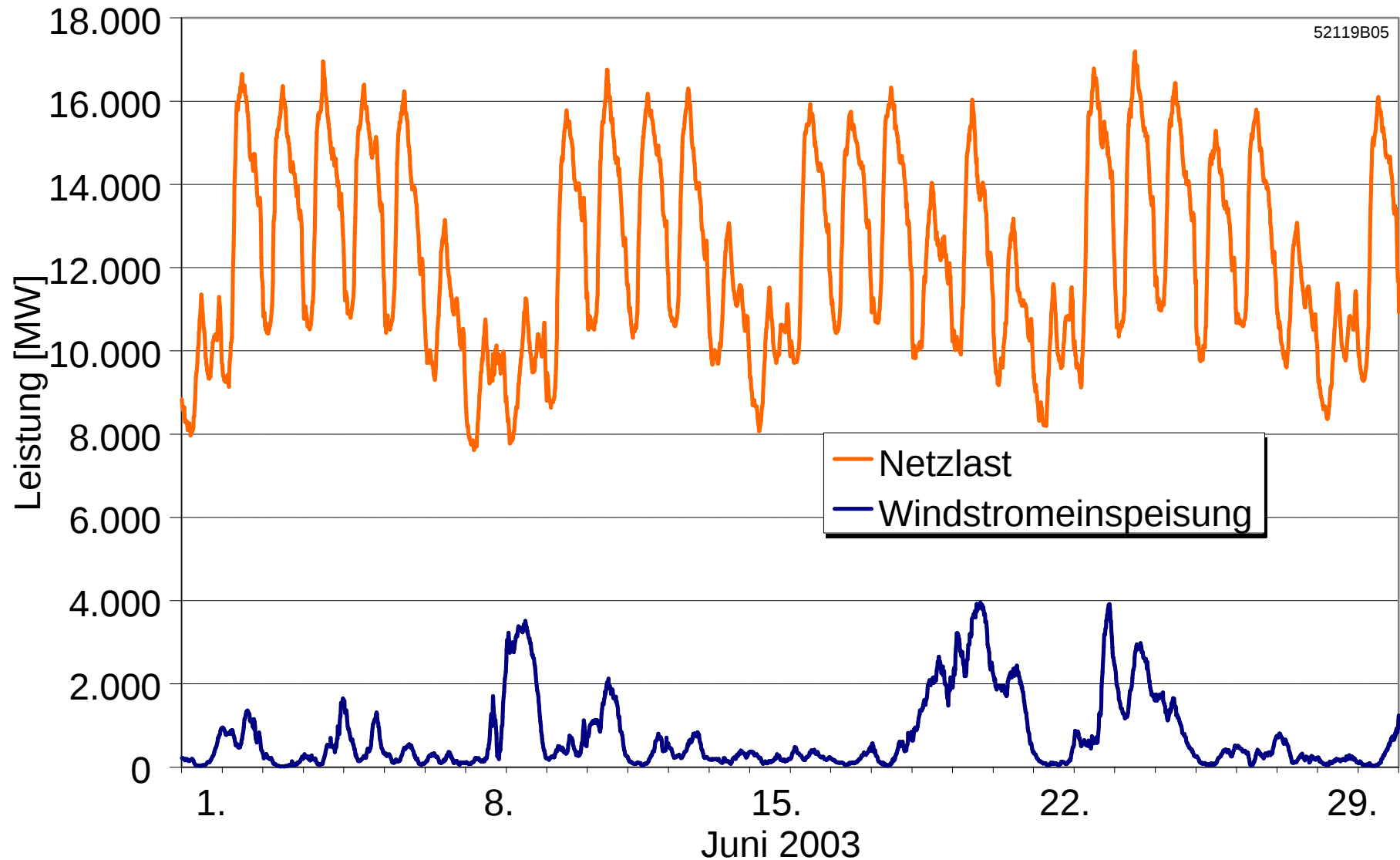
• **Kennzeichen der liberalisierten Stromversorgung**

- Abbildung von prognostiziertem Bedarf und geplanter Erzeugung anhand von Fahrplänen
- Verursachergerechte Abrechnung der Kosten für Netznutzung und Systemdienstleistungen (inkl. Inanspruchnahme von Regel-/Reserveleistung)

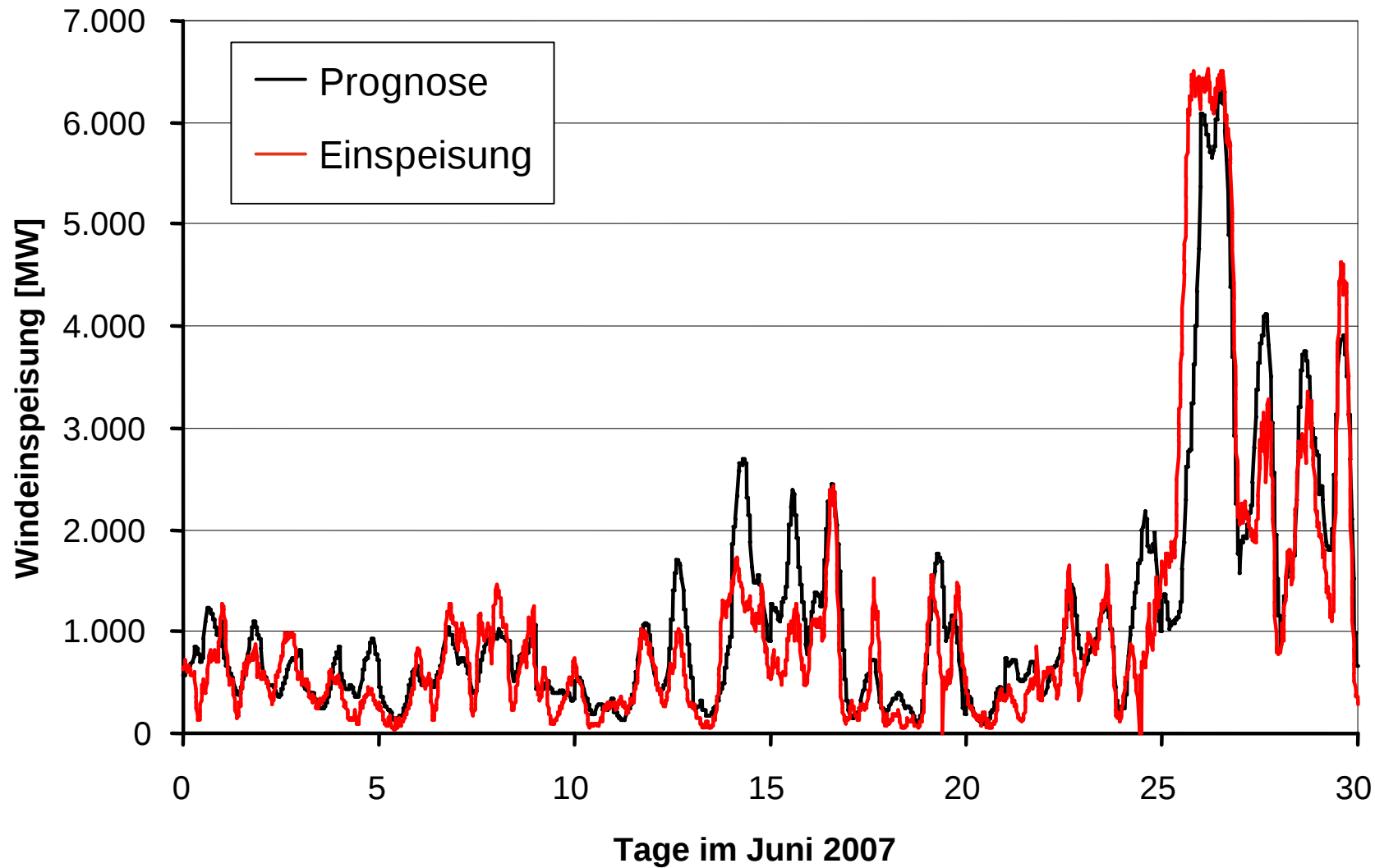
• **Einbindung fluktuierender Erzeugung (Windenergie)**

- Sozialisierung durch Kostenwälzung an die Lieferanten der Letztverbraucher
- Sammeln des Windstroms im EEG-Bilanzkreis
- Abrechnung der Windstromeinspeisung als Bandlieferung (Durchschnittsleistung)
- Prognose der Einspeisung anhand der Windvorhersage (DWD)
- Netzbetreiber kauft Differenzlastgang am Spotmarkt ein (Day-Ahead-Ausgleich)
- Abweichung von der Windprognose wird als Regelenergie in Anspruch genommen

Netzlast und Windstromeinspeisung Eon-Regelzone



Windstromprognose und -einspeisung - Beispiel Eon Regelzone



Quelle: EON07

● **Einspeisevergütung mindestens 5,5 €/kWh für onshore Anlagen**

- ab Inbetriebnahme erhöht sich die Vergütung um 3,2 €/kWh
 - in den ersten fünf Jahre, wenn in der Zeit 150% des Referenzertrages erzielt werden
 - für zusätzlich zwei Monate je 0,75% des Referenzertrages, der unter 150% erzielt wurde

● **Referenzertrag**

- Ertrag, den eine bestimmte Windkraftanlage rechnerisch an einem Referenzstandort in fünf Betriebsjahren nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erzeugen würde
- Der Referenzstandort wird durch eine Rayleigh-Verteilung mit einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von 5,5 m/s in 30 m über Grund, bei logarithmischem Höhenprofil und Rauigkeitslänge von 0,1 m

● **Einspeisevergütung mindestens 6,19 €/kWh für offshore Anlagen**

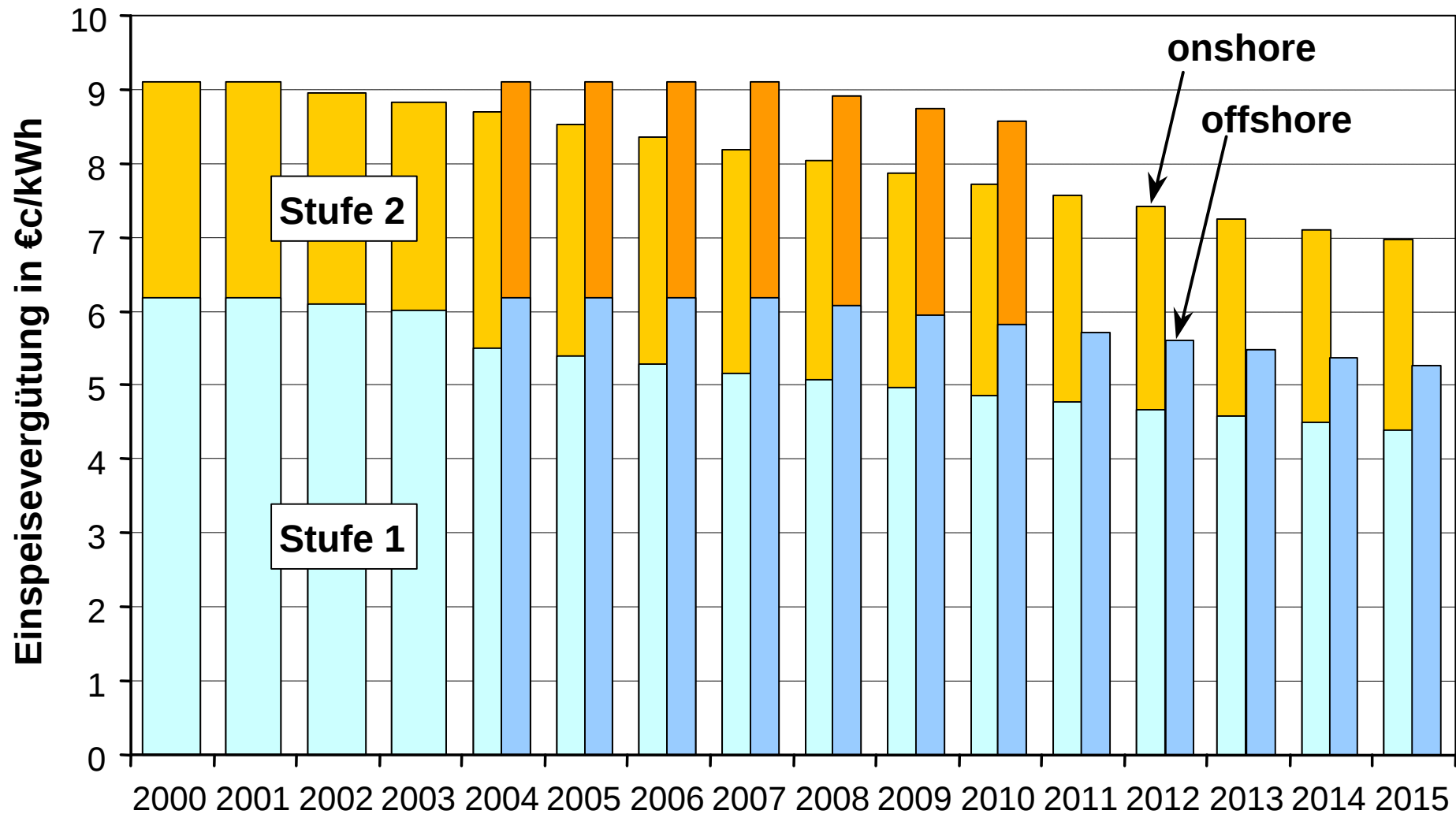
- Bei Inbetriebnahme bis 31.12.2010 erhöht sich die Vergütung um 2,91 €/kWh für 12 Jahre
- Diese Frist verlängert sich ab 12 Seemeilen und 20 m Wassertiefe um 0,5 Monate je Seemeile und 1,7 Monate je Meter Wassertiefe
- offshore d.h. mindestens 3 Seemeilen vor der Küstenlinie

● **Vergütungssätze sinken für neu in Betrieb genommene Anlagen**

- onshore am dem 1.01.2005 um jährlich 2%
- offshore ab dem 1.01.2008 um jährlich 2%

Quelle: EEG05

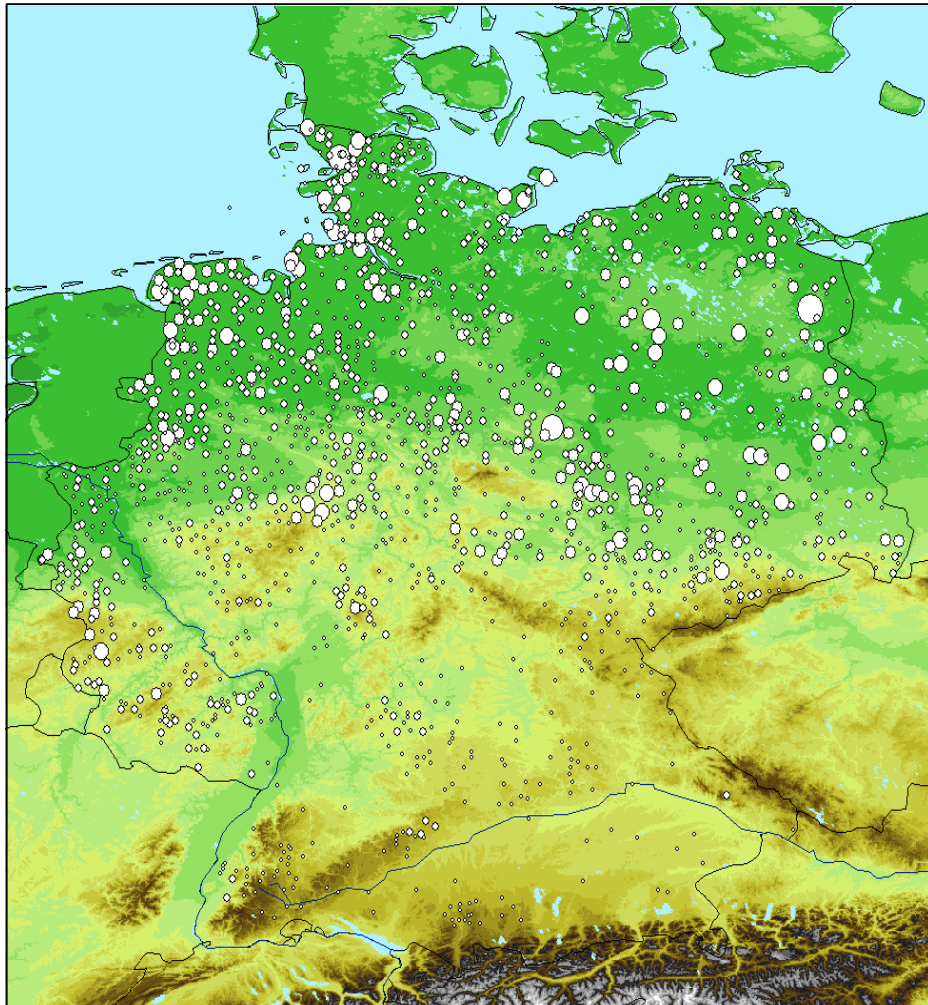
Einspeisevergütung für Windstrom



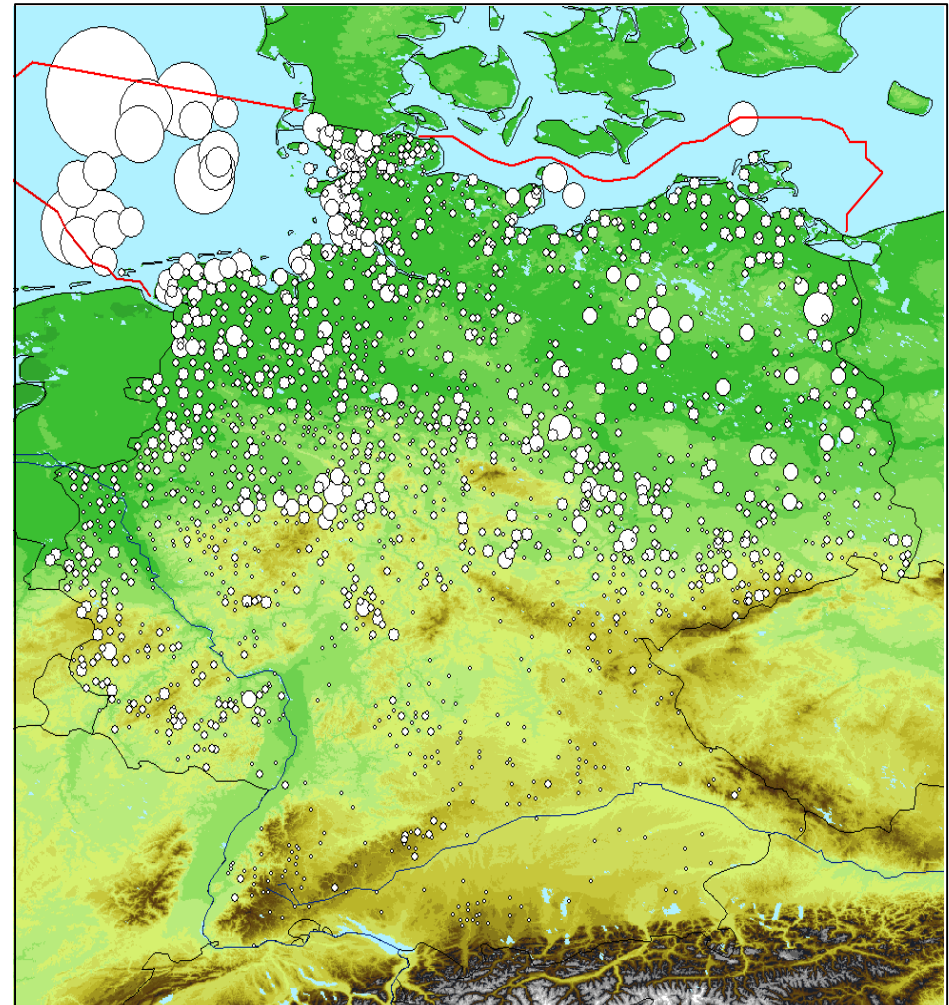
Quelle: EEG 2000, EEG 2005, VDN06

Zukünftiger Ausbau der Windenergie

heute



2020



Quelle: ROTH05

Erforderlicher Netzausbau im 380 kV Netz

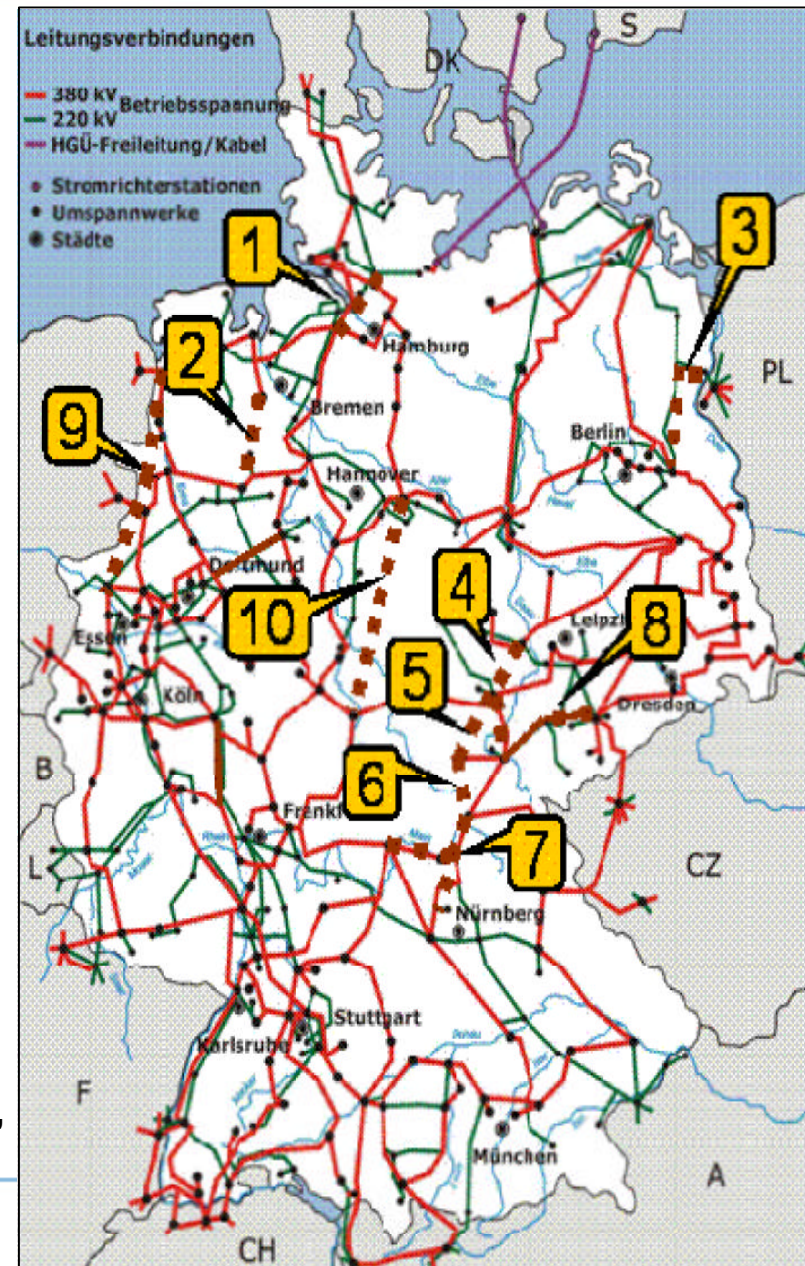
bis zum Jahr 2010: 460 km

- | | |
|------------------------------------|--------|
| 1) Hamburg/Nord – Dollern | 45 km |
| 2) Ganderkesee – Wehrendorf | 80 km |
| 3) Neuenhagen – Bertikow/Vierraden | 110 km |
| 4) Lauchstädt – Vieselbach | 80 km |
| 5) Vieselbach – Altenfeld | 80 km |
| 6) Altenfeld – Redwitz | 60 km |
| 7) Netzverstärkung Franken | |
| 8) Netzverstärkung Thüringen | |

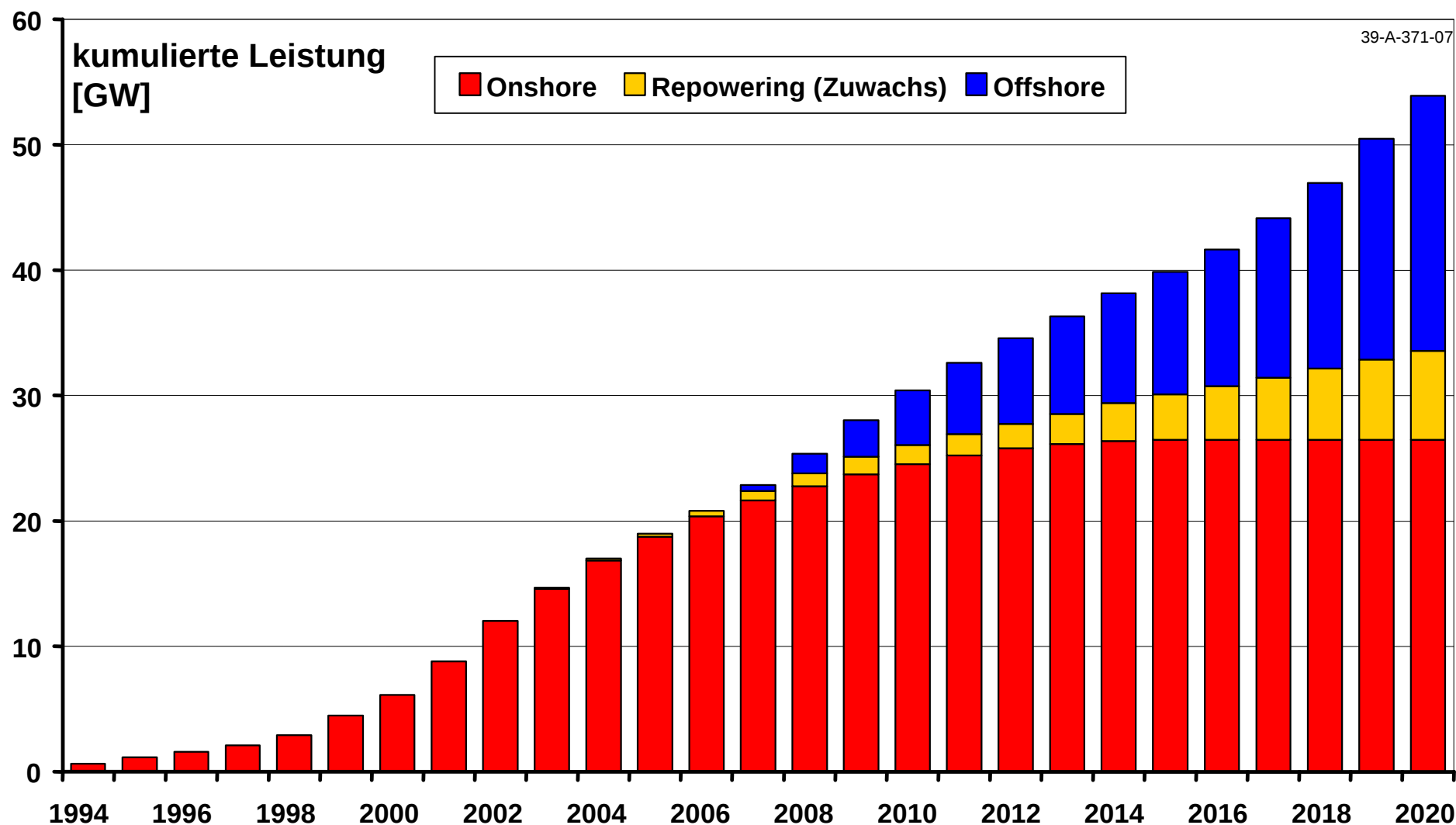
bis zum Jahr 2015: zusätzlich 390 km

- | | |
|------------------------|--------|
| 9) Diele – Niederrhein | 200 km |
| 10) Wahle – Mecklar | 190 km |

Quelle: DEWI, E.ON Netz, EWI, RWE Transportnetz Strom, VE Transmission, dena



Weiterer Ausbau der Windstromerzeugung



Quelle DEWI

- Windenergie hat sich in den vergangenen Jahren sehr dynamisch entwickelt
- An Land ist in den nächsten Jahren eine Sättigung erreicht
- Große Ausbaupotenziale bestehen auf See, diese werden in den nächsten Jahren erschlossen
- Das Ausbauziel der Bundesregierung bis 2020 kann voraussichtlich schon 2013 übertroffen werden
- Der steigenden Anteil fluktuierender Erzeugung erfordert eine Anpassung der Kraftwerksstrukturen und den Ausbau der Übertragungsnetze
- Die Suche nach effizienten, kostengünstigen Energiespeichern ist notwendig

- BSH07 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. www.bsh.de
- VDN07 N.N.: Daten zum erneuerbare Energie Gesetz. Verband der Netzbetreiber – VDN - e.V.; www.vdn-berlin.de/global/downloads/Netz-Themen/eeg/EEG-Ist-Daten-2007-04.xls; Berlin 2007
- ROTH05 Roth, H., Brückl, O., Held, A.: Windenergiebedingte CO₂-Emissionen konventioneller Kraftwerke. In: IfE-Schriftenreihe, Heft 50, E&M Energie und Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching 2005
- VDN06 N.N.: EEG-Mittelfristprognose bis 2012. Verband der Netzbetreiber – VDN – e.V.; www.vdn-berlin.de/global/downloads/Netz-Themen/eeg/EEG-Mifri-2012.pdf; Berlin 2006
- N.N.: Global Wind Report 2006. Global Wind Energy Council, Belgium 2006
- DEWI07 Ender, C.: Übersicht über in Deutschland installierte Windenergieanlagen. Deutsches Windenergieinstitut GmbH; Anlage zur VDMA, BWE Presseinformation, Berlin 16.01.2007
- AGEB07 N.N.: Bruttostromerzeugung in Deutschland 1990 bis 2006. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen; Stand 25.01.2007, www.ag-energiebilanzen.de, Berlin 2007
- WAGN99 Wagner, U., Rouvel, L., Schaefer, H.: Nutzung regenerativer Energien, IfE Schriftenreihe Heft 1, ISBN 3-98051179-3-4, München 1999
- Vestas N.N.: Vestas Datenblatt zur V120-4,5 MW. www.vestas.de
- Enercon N.N.: Enercon Datenblatt zur E112. www.enercon.de