

gtz Umwelt und Infrastruktur



**Windenergie-Schulung
für
Kompetenzfeld 4413**

TERNA Wind Energy Programme Folie 1

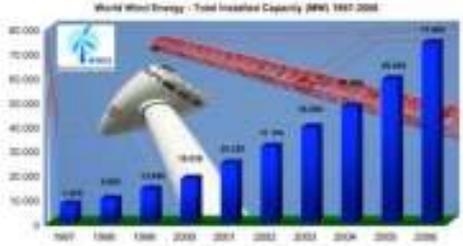
gtz Inhaltsverzeichnis

- Einführung (Entwicklung und Märkte)
- Woher kommt der Wind?
- Technologie
- Planung
- Bauphase
- Wirtschaftlichkeit
- Repowering / Offshore / Ausblick

TERNA Wind Energy Programme Folie 2

gtz Einführung – Entwicklung installierte Leistung weltweit

▪ Installierte Leistung weltweit: **73.904 MW** (Ende 2006)

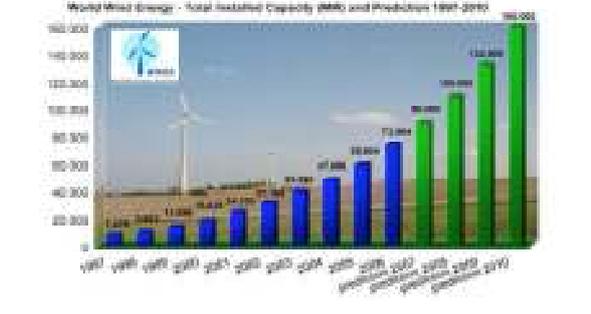


Zuwachs		
Jahr	MW	%
1997		
1998	2.206	30%
1999	4.033	42%
2000	4.343	32%
2001	6.281	35%
2002	6.844	28%
2003	8.126	28%
2004	8.596	23%
2005	11.118	23%
2006	14.900	25%

Quelle: WWEA(2007)

TERNA Wind Energy Programme Folie 3

gtz Einführung – Prognose installierte Leistung weltweit



Quelle: WWEA (2007)

TERNA Wind Energy Programme Folie 4

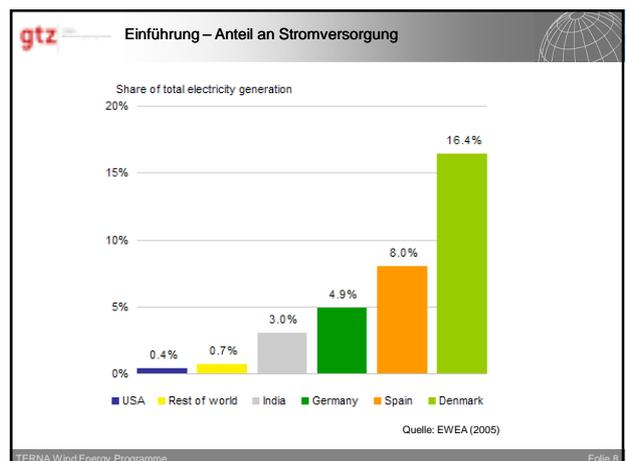
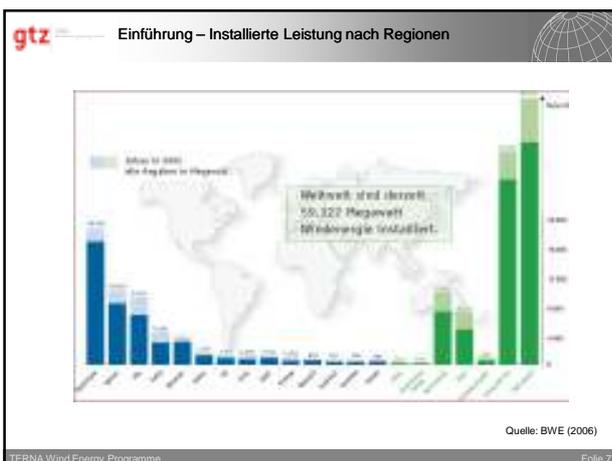


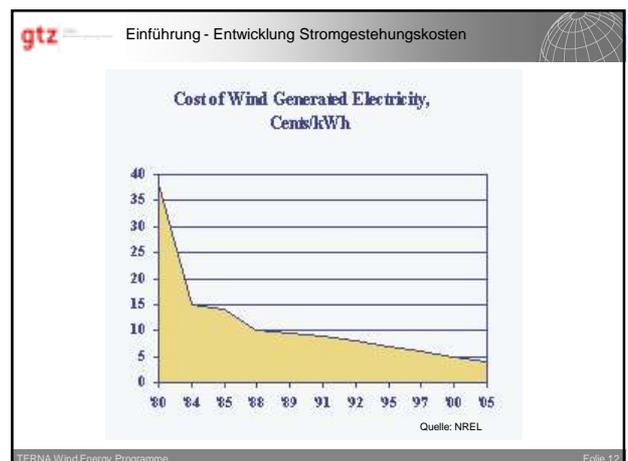
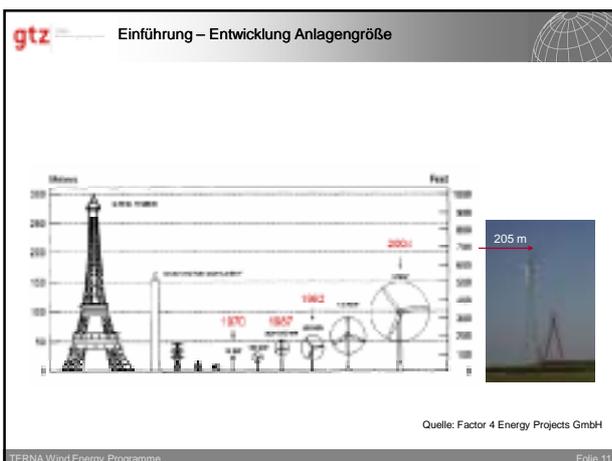
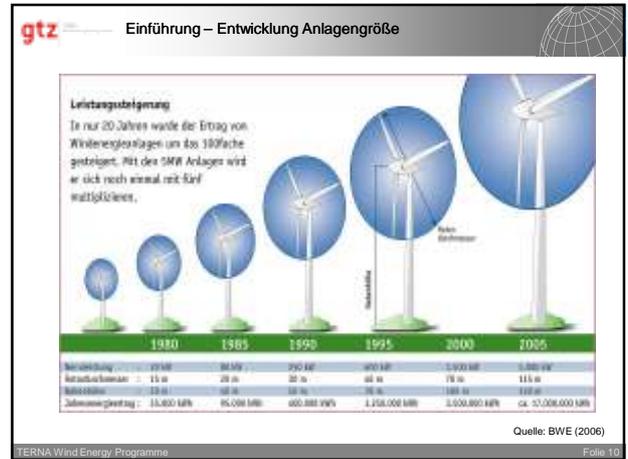
gtz Einführung – Installierte Leistung nach Ländern

Ranking total 2006	Country	Additional capacity 2006	Growth rate 2006	Total capacity end 2006	Total capacity end 2005	Ranking total 2005
		[MW]	%	[MW]	[MW]	
1	Germany	2.194	11,9	20.622	18.428	1
2	Spain	1.587	15,8	11.615	10.028	2
3	USA	2.454	26,8	11.603	9.149	3
4	India	1.840	41,5	6.270	4.430	4
5	Denmark	8	0,3	3.136	3.128	5
6	China	1.145	90,9	2.405	1.260	8
7	Italy	405	23,6	2.123	1.718	6
8	United Kingdom	610	45,1	1.983	1.353	7
9	Portugal	628	61,4	1.650	1.022	11
10	France	810	106,9	1.567	757	13
11	Netherlands	336	27,5	1.560	1.224	9
12	Canada	768	112,4	1.451	683	14
13	Japan	354	34,0	1.394	1.040	10
14	Austria	146	17,8	965	819	12
15	Australia	238	41,1	817	579	15
16	Greece	183	31,9	756	573	16
17	Ireland	147	29,6	643	496	18
18	Sweden	54	10,6	564	510	17
19	Norway	55	20,4	325	270	19
20	Brazil	208	739,6	237	29	34
	Rest	730	48,4	2.238	1.508	
TOTAL		14.900	25,3	73.904	59.004	

Quelle: WWEA (2007)

TERNIA Wind Energy Programme Folie 6







- gtz Einführung – Einsetzbarkeit
- **Derzeit leistungsstärkste Windenergieanlage** ist die E-112 von Enercon mit bis zu 6 MW installierter Leistung
 - Die **höchste Windenergieanlage** der Welt ist die Fuhrländer FL-2500 mit einer Gesamthöhe von 205 m in Laasow (Brandenburg). Die höchste Anlage in Serienfertigung ist die 5M von REpower mit 183 m.
 - Die **weltweit höchstgelegene Windenergieanlage** steht auf dem Gütsch nahe Andermatt in der Schweiz auf 2300 müM.
 - Die **nördlichsten Windenergieanlagen** der Welt (Stand August 2005) sind 16 Nordex N-80 mit jeweils 2,5 MW Nennleistung im Windpark Havøygavlen bei Hammerfest in Norwegen.
 - Die **südlichsten Windenergieanlagen** der Welt sind zwei Enercon E-30 (je 300 kW) in der Antarktis. Zusammen mit Dieselaggregaten (zuvor nur Dieselaggregate) versorgen sie seit 2003 die Station Mawson Bay der Australian Research Division.
 - Mit dem **Offshore**-Windpark Vindeby Offshore, der 1991 in Dänemark errichtet wurde, hat der dänische Hersteller Bonus (heute Siemens Windpower) den ersten Windpark der Welt auf See errichtet. Quelle: Wikipedia (2007)
- TERNIA Wind Energy Programme Folie 14

- gtz Inhaltsverzeichnis
- Einführung (Entwicklung und Märkte)
 - **Woher kommt der Wind?**
 - Technologie
 - Planung
 - Bauphase
 - Wirtschaftlichkeit
 - Repowering / Offshore / Ausblick
- TERNIA Wind Energy Programme Folie 15

gtz Der Wind, der Wind ...

- Windenergie ist Sonnenenergie!
- Ca. 1-2% der Solareinstrahlung werden in Windenergie umgesetzt.

www.WINDPOWER.de

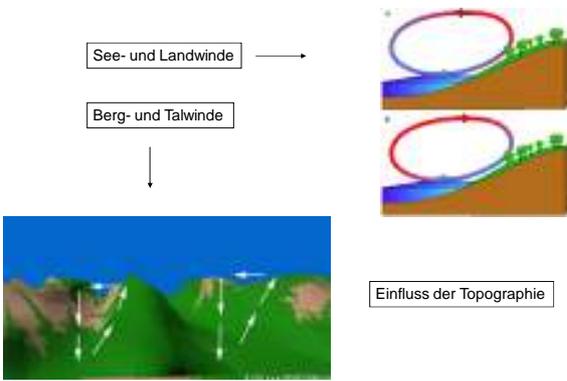
- Temperaturunterschiede führen zu Nord-Süd-Winden (Geostrophischer Wind).
- Die Corioliskraft lenkt den Wind seitlich ab

TERNIA Wind Energy Programme Folie 16

gtz Das himmlische Kind

See- und Landwinde →

Berg- und Talwinde ↓



Einfluss der Topographie

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 17

gtz Inhaltsverzeichnis

- Einführung (Entwicklung und Märkte)
- Woher kommt der Wind?
- **Technologie**
- Planung
- Bauphase
- Wirtschaftlichkeit
- Repowering / Offshore / Ausblick

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 18

gtz Technologie – Vertikalachse



Darrieus-Rotor

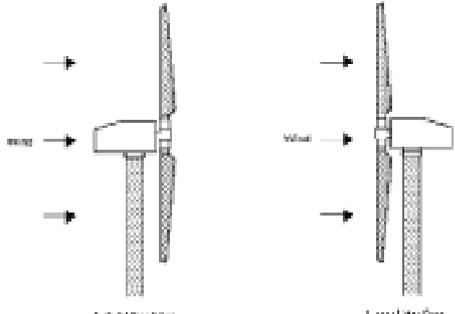


Anemometer

- ineffizientere Energieumwandlung
- Reparaturen am Maschinenhaus sehr aufwändig
- Höhenprofil der Windgeschwindigkeit

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 19

gtz Technologie – Lee und Luv

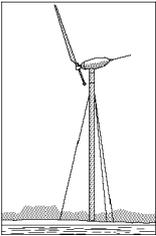


Leeblüter

Luvläufer

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 20

gtz Technologie – 1 Flügel



- Gegengewicht zur Vermeidung von Unwuchten
- Trotzdem hohe mechanische Belastung
- höhere Rotationsgeschwindigkeit für gleichen Energieertrag
- visuelle Belastung
- akustische Belastung

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 21

gtz Technologie – 2 Flügel



Vergnet GROWIAN

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 22

gtz Technologie – 3 Flügel



Quelle: Ökostrom

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 23

gtz Technologie – Türme



Stahl- oder Betonrohrtürme Gittermasten

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 24

gtz Technologie – mit Getriebe

Modell NEG Micon 52/900
- technische Daten -

Technik	
Leistung	300 kW
Nennwindgeschwindigkeit	14,0 m/s
Erschaltwindgeschw.	3,5 m/s
Rotorhubmesser	52,0 m
Überstrichene Fläche	2.148 m ²
Drehzahl	15-22 U/min
Generator	asynchron
Gewicht	
Gondel	26,5 t
Rotor (incl. Nabe)	18,5 t
Turm (inkl. Skellett)	97,0 t

Quelle: BWE (2006)

TERNIA Wind Energy Programme Folie 25

gtz Technologie – Getriebeles

Modell Enercon E-66
- technische Daten -

Technik	
Leistung	1,9 MW
Nennwindgeschwindigkeit	12,0 m/s
Erschaltwindgeschw.	2,5 m/s
Rotorhubmesser	70,0 m
Überstrichene Fläche	3.848 m ²
Drehzahl	10-22 U/min
Generator	synchron
Regenenerator	ohne
Gewicht	
Gondel	88,8 t
Rotor (incl. Nabe)	31,7 t
Turm (inkl. Beton)	88,1 t
Turm (inkl. Skellett)	239 t

Quelle: BWE (2006)

TERNIA Wind Energy Programme Folie 26

gtz Technologie – Auftrieb, Stall

© 1998 www.WINDPOWER.dk

- Die Rotordrehung wird durch das Auftriebsprinzip erzeugt
- gleiche Funktionsweise wie ein Flugzeugflügel
- ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit kommt es allmählich zum Strömungsabriss

→ Stall-Effekt zur Leistungsbegrenzung

© 1998 www.WINDPOWER.dk

TERNIA Wind Energy Programme Folie 27

gtz Technologie – Stall/Pitch

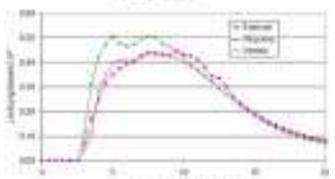
- Stallregelung**: Strömungsabriss am Rotorblatt über Nennwindgeschwindigkeit
- Aktiv-Stallregelung**: Zusätzliche geringe Veränderung des Rotorblattanstellwinkels möglich
- Pitchregelung**: Drehung des Rotorblattes ändert die Auftriebskraft und damit die Rotationsgeschwindigkeit
- Windrichtung**: Indicated by an arrow pointing right.

TERNIA Wind Energy Programme Folie 28

gtz Technologie – Betz'sche Gesetz

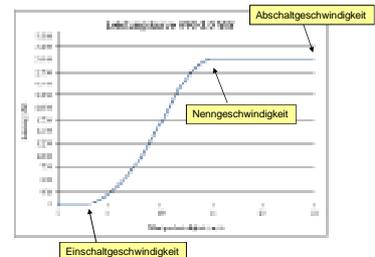
Das Betz'sche Gesetz (1919):

- Es ist physikalisch nicht möglich, dem Wind mit einer Windturbine mehr als 59 % seiner Energie zu entnehmen.
- Heutige Windenergieanlagen erreichen Leistungsbeiwerte (c_p) von bis zu 50 %.




TERNA Wind Energy Programme Folie 29

gtz Technologie – Leistungskurve

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot \underbrace{f^2 \pi}_{A} \cdot c_p$$


- Verdoppelung Rotorradius = Vervierfachung Leistung
- Verdoppelung Windgeschwindigkeit = Verachtfachung Leistung

TERNA Wind Energy Programme Folie 30

gtz Technologie – Windgeschwindigkeiten

Beaufort	m/s	km/h	Indikatoren	Bezeichnung	
0	0 - 0,5	0 - 2	Rauch steigt vertikal auf	Windstille	
1	0,6 - 1,4	2 - 5	Rauch wird leicht seitlich abgelenkt	Leiser Zug	
2	1,5 - 3,3	6 - 12	Wind wird auf der Haut wahrgenommen	Leichte Brise	
3	3,4 - 5,5	13 - 20	Leichte Flaggen und Fahnen werden bewegt	Schwache Brise	Einschalgeschwindigkeit
4	5,6 - 8,0	21 - 29	Staub und Papiere werden bewegt	Mäßige Brise	
5	8,1 - 10,8	30 - 39	Kleine Bäume beginnen sich im Wind zu wiegen	Frische Brise	
6	10,9 - 13,9	40 - 50	Regenschirme können nicht mehr benutzt werden	Starker Wind	
7	14,0 - 16,9	51 - 61	Alle Bäume bewegen sich stark/ es fällt schon schwer sich gegen die Windrichtung voran zu bewegen	Steller Wind	Nenngeschwindigkeit
8	17 - 20,5	62 - 74	Äste von Bäumen brechen ab	Stürmischer Wind	
9	20,6 - 24,2	75 - 87	Schwere Schäden an Gebäuden können eintreten	Sturm	
10	24,3 - 28,1	88 - 101	Schwerste Schäden an Gebäuden können eintreten	Schwerer Sturm	Abschalgeschwindigkeit
11	28,2 - 32,2	102 - 116	Schwerste Schäden an Gebäuden können eintreten	Orkanartiger Sturm	
12	32,3 - 32,5	117 >	Vernichtung starker Bauten/Isoliert Schutzräume aufsuchen	Orkan	

Die meisten Anlagen werden auf Überlebensgeschwindigkeiten von 52 bis 68 m/s typisiert (187,2 bis 244,8 km/h) und die Statik und Stabilität vom Hersteller garantiert. Derartige Windanlagen sind in Mitteleuropa äußerst selten. Die extremste Windböe an einem österreichischen Windpark Standort wurde in 1.900 Meter Seehöhe am Tauernwindpark gemessen. Eine zwei Sekunden lange Böe erreichte 67 m/s (241 km/h), den Anlagen ist nichts passiert.

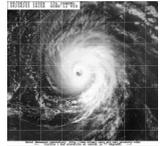
Die stärksten Böen des Orkans Kyrill im Januar 2007 erreichten in den Bayerischen Alpen 56 m/s (202 km/h) und im Binnenland ca. 42 m/s (150 km/h). Es sind keine nennenswerten Schäden an WEA in Deutschland bekannt.

TERNA Wind Energy Programme Folie 31

gtz Technologie – Wirbelstürme (Jamaika)

11. September 2004: Hurricane Ivan, Jamaika

- Wigton-Windfarm (23 x 900 kW) überlebt ohne nennenswerte Schäden
- Das Auge des Sturms war 66 km entfernt





TERNA Wind Energy Programme Folie 32

gtz Technologie – Wirbelstürme (Indien)

9. Juni 1998: Zyklon in West-Gujarat, Indien

- Windgeschwindigkeit von 45 m/s über einen Zeitraum von 4 bis 6 Stunden
- 350 WEA (200 – 600 kW) direkt vom Sturm getroffen
- 111 WEA entwurzelt
- 26 WEA Schäden nur an Rotorblättern
- die meisten beschädigten Anlagen waren stall-geregelt auf Gittermast



Tiering, J., Kapur, S. In: Wind Energy in India, 2004, pp. 100-104

TERNIA Wind Energy Programme Folie 33

gtz Technologie – Wirbelstürme (China)

10. August 2006: Taifun in Zhejiang Provinz, China

- stärksten Böen bis 78 m/s
- 28 WEA (250 – 750 kW)
- nur 8 WEA haben unbeschadet überstanden
- teilweise Konstruktionsfehler bei Fundamenten



TERNIA Wind Energy Programme Folie 34

gtz Technologie – Wirbelstürme (China)

- 14 % der stall-geregelten unbeschadet
- 71% der pitch-geregelten unbeschadet
- insgesamt haben nur die Anlagen überlebt, die frontal getroffen wurden, daher Notstromversorgung wichtig!



TERNIA Wind Energy Programme Folie 35

gtz Technologie – Wirbelstürme (Lösungen)

Lösungsansätze zur Schadensvermeidung bei Wirbelstürmen:

- Fundamente verstärken
- Stahlrohtürme (ggf. verstärkt) anstatt Gittermast
- Notstromversorgung für Windrichtungsnachführung
- Pitch-Mechanismus
- Steifere Rotorblätter (um Berührung des Turms zu vermeiden)
- WEA niederholen



TERNIA Wind Energy Programme Folie 36

gtz Technologie – Capacity Factor

Capacity Factor: $CF = \frac{\text{Jahresstromertrag}(kWh)}{\text{Nennleistung}(kW) * 8760h}$

Volllaststunden (Full Load Hours): $FLH = \frac{\text{Jahresstromertrag}(kWh)}{\text{Nennleistung}(kW)}$

TERNIA Wind Energy Programme Folie 37

gtz Technologie – Capacity Factor

	v	CF	FLH
Deutschland Inland	6 m/s	16%	1.400
Deutschland Küste	8 m/s	27%	2.400
Deutschland Offshore	> 9 m/s	40%	3.500
Nordmarokko	> 10 m/s	43%	3.800

TERNIA Wind Energy Programme Folie 38

gtz Technologie – Stromertrag und Emissionsminderung

	v	CF	FLH	kWh/a bei 1 MW
Deutschland Inland	6 m/s	16%	1.400	1.400.000 kWh
Deutschland Küste	8 m/s	27%	2.400	2.400.000 kWh
Deutschland Offshore	> 9 m/s	40%	3.500	3.500.000 kWh
Nordmarokko	> 10 m/s	43%	3.800	3.800.000 kWh

Stromertrag und Emissionsvermeidung einer WEA mit 1 MW Leistung in Deutschland:

- Durchschnittlicher Stromertrag: 2.000.000 kWh/a
- Durchschnittlicher Haushaltsverbrauch: 4.000 kWh/a (4 Personen)

→ Eine WEA mit 1 MW Leistung kann ca. **500 Haushalte** mit Strom versorgen.

- Vermiedene CO₂ – Emissionen: 0,8 kg/kWh → 1.600 t/a

→ Das entspricht den Emissionen von **500 Autos**.

TERNIA Wind Energy Programme Folie 39

gtz Technologie – Capacity Credit

Capacity Credit } Die „steuerbare“ Kraftwerksleistung, die durch „schwankende“ Kraftwerke ersetzt werden kann, ohne die Versorgungssicherheit zu reduzieren.

Firm Capacity }

Capacity Value }

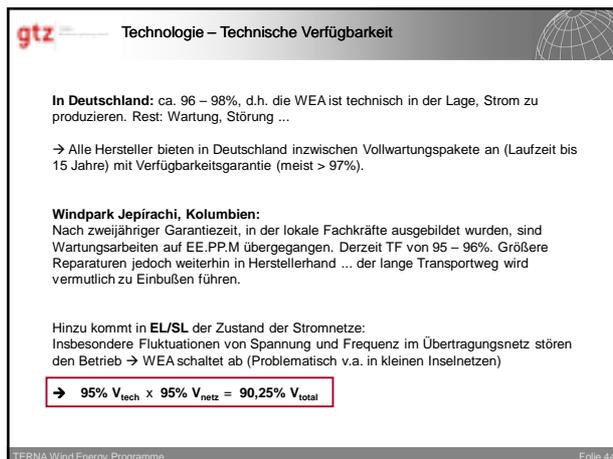
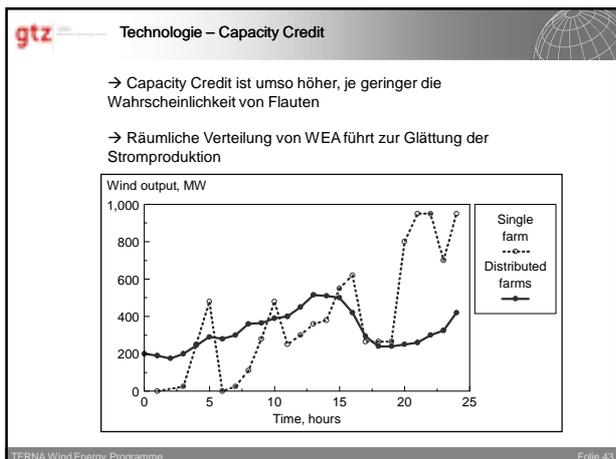
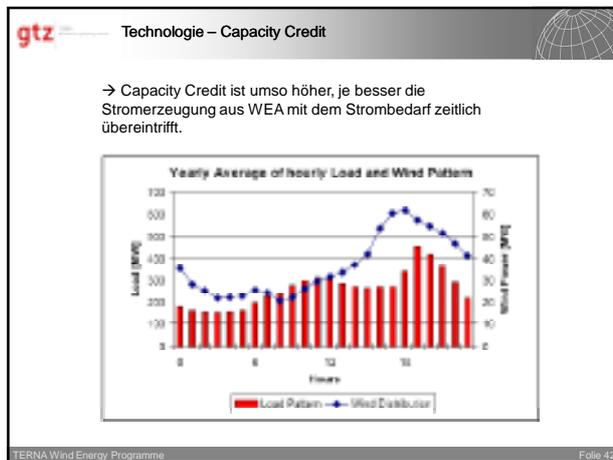
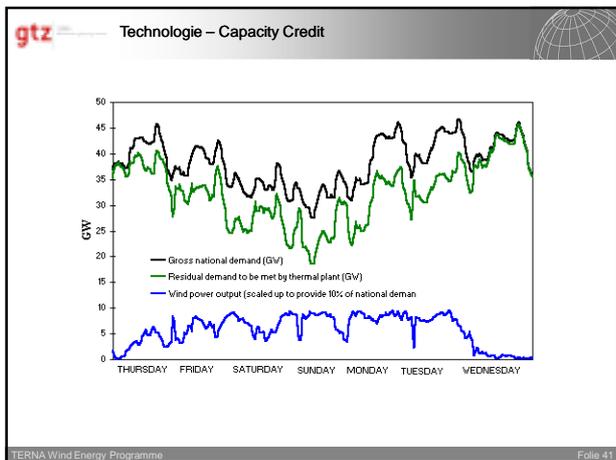
Beispiel:

In Äthiopien sind 1.000 MW Dieselkraftwerke installiert. Hinzu kommt ein Windpark von 100 MW Leistung mit einem CC von 25%

→ 25 MW Dieselgeneratoren können (bei gleichbleibender Stromnachfrage) vom Netz genommen werden, ohne dass die „loss of load probability“ gestiegen ist.

→ Dänemark: 20 – 25 % Capacity Credit = 750 MW

TERNIA Wind Energy Programme Folie 40



gtz Technologie – Netzanbindung

- Generatorspannung: 690 V
- Transformator (in oder neben WEA): 10 - 30 kV (Mittelspannung)

→ Einspeisung kleiner Windparks (bis ca. 20 MW) auf Mittelspannungsebene möglich.

→ größere Windparks müssen über ein Umspannwerk in Hochspannungs- (50 – 150 kV) oder Höchstspannungsleitungen (220 – 380 kV) einspeisen.



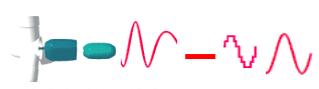
TERNIA Wind Energy Programme Folie 45

gtz Technologie – Netzanbindung



Direkte Netzanbindung

→ fixe Drehzahl (vom Netz vorgegeben)



Indirekte Netzanbindung

→ mit Umrichter, variable Drehzahl

TERNIA Wind Energy Programme Folie 46

gtz Technologie – Energetische Amortisation

Typ	Offshore	Küste	Küstennah	Binnenland
Windkraftanlage 200 kW, 25 m Rotordurchmesser Herstellung Anlage inkl. Fundament			4 Monate	
Windkraftanlage Enercon E-32 300 kW, 32 m Rotordurchmesser		2,1 Monate	2,5 Monate	4,3 Monate
Windenergieanlage Enercon E-66 1.500 kW, 66 m Rotordurchmesser Mischanalyse Herstellung, Auf- und Abbau, Wartung		3,7 Monate	4,7 Monate	6,1 Monate
Offshore-Windkraftanlage 5 MW auf Tripod-Fundament Erfassung gesamter Lebensweg, ohne Netzanbindung	4 Monate			
Offshore-Windpark 2010 200 MW (40 x 5 MW) Erfassung gesamter Lebensweg, inkl. Netzanbindung	5 Monate			

Quelle: Wikipedia (2006)

TERNIA Wind Energy Programme Folie 47

gtz Inhaltsverzeichnis

- Einführung (Entwicklung und Märkte)
- Woher kommt der Wind?
- Technologie
- Planung
- Bauphase
- Wirtschaftlichkeit
- Repowering / Offshore / Ausblick

TERNIA Wind Energy Programme Folie 48

gtz Planung – Überblick

- Suche potentieller Standorte
- Landsicherung (Pacht, Kauf)
- Windmessung
- Windpark-Layout unter Berücksichtigung verschiedener WEA-Typen:
 - Ziel: Maximaler Energieertrag
 - Beschränkungen (Schall, Schatten, Mindestabstände)
- Netzanbindung
- Umweltverträglichkeit

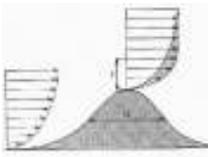
→ Genehmigungsverfahren

TERNIA Wind Energy Programme Folie 49

gtz Planung – Standortsuche

- In Deutschland: ausgewiesene Windeignungsgebiete. Nur hier ist die Errichtung von WEA erlaubt
- In „unbeplanten“ Ländern/Regionen:
 - Anzeichen von Wind in der Vegetation
 - Informationen vom Hörensagen
 - Winddaten von meteorologischen Stationen oder Flughäfen
 - ggf. grobe Windkarten aus Höhenwinddaten erstellt
 - Topographie
 - Nähe zu Stromleitungen





TERNIA Wind Energy Programme Folie 50

gtz Planung – Landsicherung

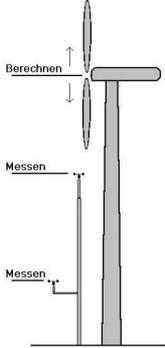
- In Deutschland:
 - ca. € 5.000 pro Jahr und MW auf Ackerland
 - Windparkplanung nur möglich, wenn Pachtvertrag (oder Kauf) abgeschlossen
- In Äthiopien:
 - ca. € 2.500 für gesamte Lebensdauer (20 Jahre) der Anlage
 - Gesetz schreibt Kompensation nur für 10 Jahre Ertragsausfall vor
 - Enteignung und Umsiedlung möglich

TERNIA Wind Energy Programme Folie 51

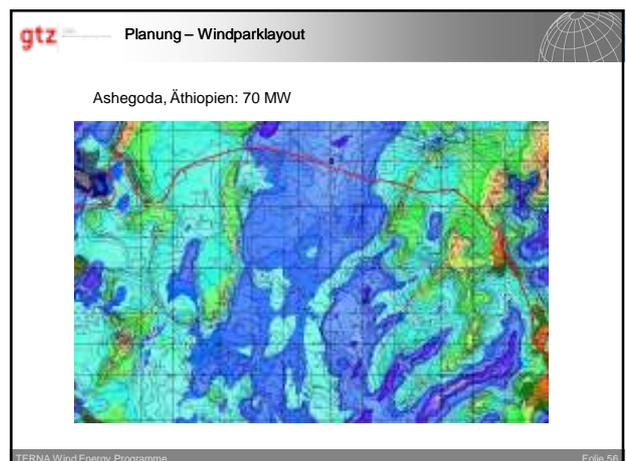
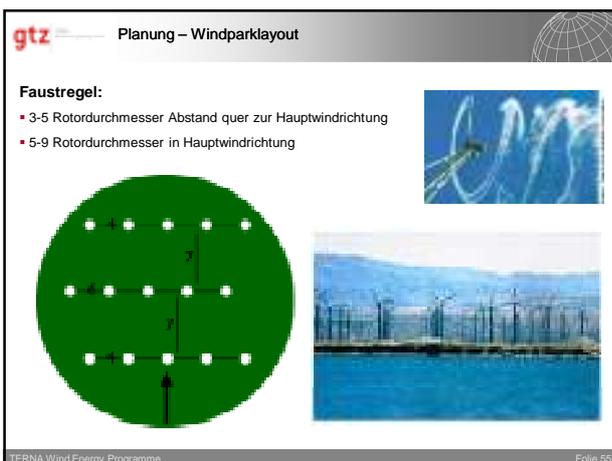
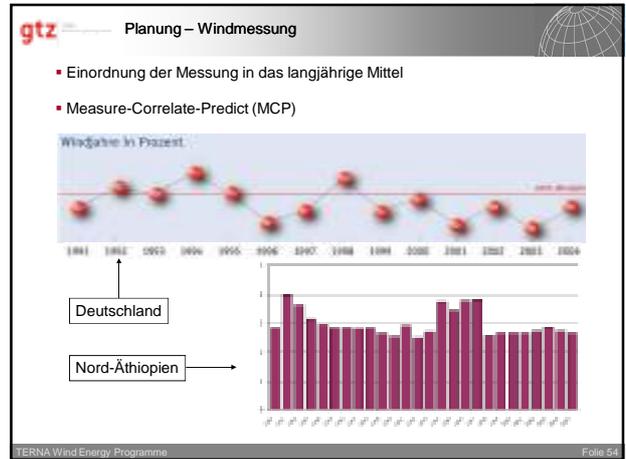
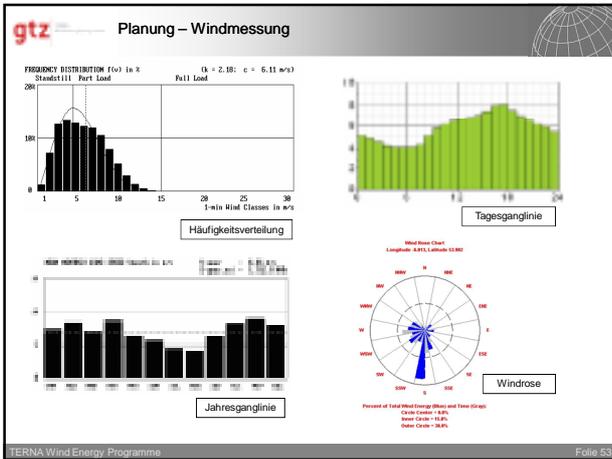
gtz Planung – Windmessung

→ Das „A und O“ der Projektplanung!





TERNIA Wind Energy Programme Folie 52



gtz Planung – Mindestabstände

Empfohlene Mindestabstände;
Windenergieerlass Mecklenburg-Vorpommern (1998)

Art der angrenzenden Bebauung	Mindestabstand	Untersuchungsbereich
Einzelhäuser + Splittersiedlungen im Außenbereich	300m	300-1200 m
Allgemeines Wohngebiet	500m	500-1200 m
Campingplätze, Ferienhausgebiete	600m	600-1500 m

TERNA Wind Energy Programme Folie 57

gtz Planung – Schall

Grenzwerte:

- allgemeines Wohngebiet 40 dB
- Dorf- und Mischgebiet 45 dB
- Gewerbegebiet 50 dB
- Industriegebiet 70 dB

→ Durchschnittliche Lärmbelastung in Städten und Durchgangsstraßen: 55-75 dBA (Tag und Nacht)

Quelle: BWE

TERNA Wind Energy Programme Folie 58

gtz Planung – Schall

Ashegoda, Äthiopien: 70 MW

TERNA Wind Energy Programme Folie 59

gtz Planung – Licht und Schatten

Als **Discoeffekt** wird das Auftreten von Lichtreflexen an den Rotorblättern bezeichnet

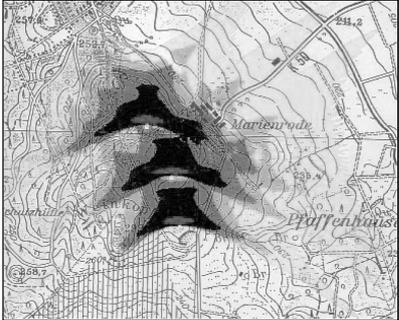
- Ursache dieses Effektes: spiegelnde Oberflächen
- wetterabhängig: kann nur an sonnigen Tagen im Nahbereich von WEA bemerkt werden
- nur zufällig und kurzzeitig wahrnehmbar
- mit Beeinträchtigungen an einem Ort über mehrere Stunden ist nicht zu rechnen

→ Aufgrund der Verwendung von matten Farben für die Oberflächen von WEA spielt der Diskoeffekt bei neueren Anlagen keine Rolle mehr

Quelle: BWE

TERNA Wind Energy Programme Folie 60

gtz Planung – Licht und Schatten



- Einwirkzeit soll 30 h im Jahr und 30 Minuten am Tag nicht überschreiten.
- Theoretische Maximalwerte und reale Werte weichen weit voneinander ab.

Quelle: BWE

TERNIA Wind Energy Programme Folie 61

gtz Planung – Umweltverträglichkeit (Avifauna)

- Der BUND rechnet bundesweit mit durchschnittlich 0,5 toten Vögeln pro Anlage und Jahr. → ca. 10.000 pro Jahr insgesamt in Deutschland
- Man geht davon aus, dass jeweils ca. 5 - 10 Millionen Vögel im Straßenverkehr und an Hochspannungsmasten pro Jahr in Deutschland sterben
- Gefahr für Fledermäuse noch unzureichend untersucht



- Der Nahbereich der WEA (ca. 100 m) wird von manchen Vogelarten gemieden

→ Verlust von Lebensraum

Quelle: BWE

TERNIA Wind Energy Programme Folie 62

gtz Planung – Umweltverträglichkeit (Flächenverbrauch)

Flächenverbrauch für 1,5 MW Windenergieanlage:

- Fundamente: ca. 200 m²
- Kranfläche: ca. 800 m²
- Zuwegung: ca. 4m breit

→ ca. 1.500 m² pro MW im deutschen Durchschnitt

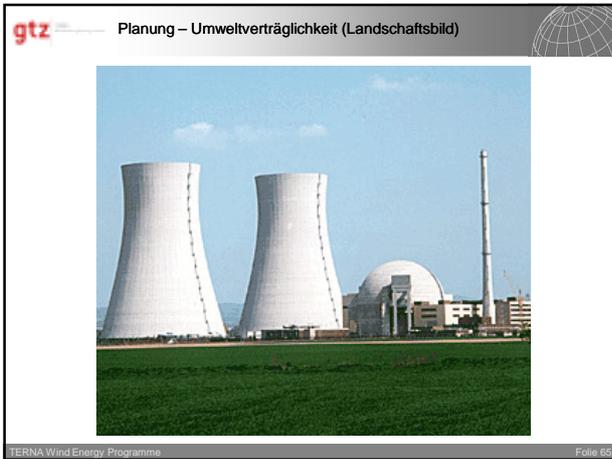
→ Um jährlich 150 Milliarden Kilowattstunden Strom zu erzeugen, würden Windkraft-Anlagen nicht einmal 15 % der Fläche, die durch den Abbau deutscher Braunkohle (rund 700 Quadratkilometer) derzeit für diese Strommenge vernichtet wird.

TERNIA Wind Energy Programme Folie 63

gtz Planung – Umweltverträglichkeit (Landschaftsbild)



TERNIA Wind Energy Programme Folie 64



gtz Technik Inhaltsverzeichnis

- Einführung (Entwicklung und Märkte)
- Woher kommt der Wind?
- Technologie
- Planung
- Bauphase
- Wirtschaftlichkeit
- Repowering / Offshore / Ausblick

TERNIA Wind Energy Programme Folie 67

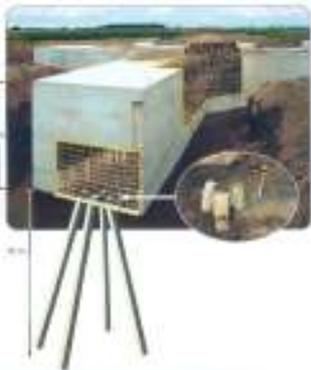
gtz Technik Bauphase – Transport

- Für den Transport einer großen Windkraftanlage sind sieben Schwerlasttransporter erforderlich.
- Der Transporter mit den Rotorblättern hat mit Zugmaschine eine Länge von über 40 Metern.
- Wegen der Überlänge der Fahrzeuge und ihres hohen Gewichts fahren die Transporte meistens in der Nacht und werden von Polizeifahrzeugen begleitet.

Quelle: BWE

TERNIA Wind Energy Programme Folie 68

gtz Bauphase – Fundamente



- Windkraftanlagen, die im morastigen Gelände aufgebaut werden, erhalten spezielle Pfahl-Fundamente. 16m lange Betonpfähle werden in den Boden gerammt und stützen das Fundament.
- Die Fundamente werden aus Bewehrungsseisen aufgebaut. Auf dem Fundamentkorb in der Mitte wird später die Windkraftanlage montiert.
- Die Fundamente werden verschalt und mit Beton ausgefüllt. Nach dem Aushärten des Betons wird die Schalung entfernt und die Baugrube wieder verfüllt.

Quelle: BWE

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 69

gtz Bauphase – Elektroinstallationen




- Die Windkraftanlagen werden untereinander verkabelt und speisen gemeinsam in das Stromnetz ein.
- Die Kabel werden 100-150cm tief in Kabelgräben verlegt.

Quelle: BWE

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 70

gtz Bauphase – Montage






- Der Turm einer großen Windkraftanlage besteht aus drei oder vier Teilen.
- Das untere Turmteil wird mit dem Fundamentkorb verschraubt.
- Die drei Rotorblätter werden am Boden an die Nabe montiert.
- Dann wird der Rotor hochgezogen.

Quelle: BWE

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 71

gtz Bauphase – Montage

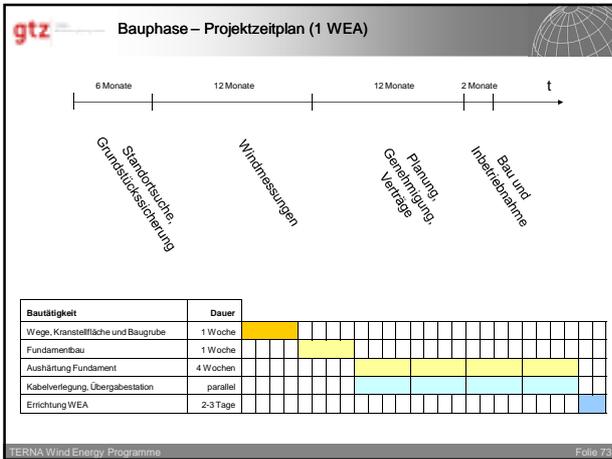
- Für die Montage der Windkraftanlage werden zwei Kräne benötigt.
- Der große Raupenkran hat zusammengesetzt ein Gewicht von 500 Tonnen. Er wird in Einzelteile zerlegt von neun Tiefladern transportiert und auf der Baustelle zusammengesetzt.

Quelle: BWE

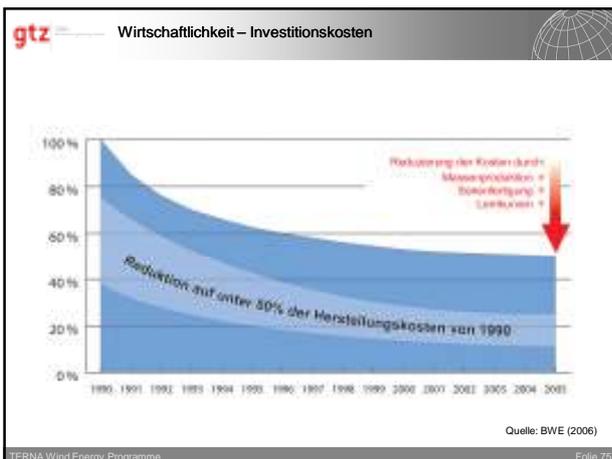




TERNÄ Wind Energy Programme Folie 72



- ### gtz Inhaltsverzeichnis
- Einführung (Entwicklung und Märkte)
 - Woher kommt der Wind?
 - Technologie
 - Planung
 - Bauphase
 - **Wirtschaftlichkeit**
 - Repowering / Offshore / Ausblick
- TERNA Wind Energy Programme Folie 74



gtz Wirtschaftlichkeit – Investitionskosten

Beispielrechnung Deutschland für 20 MW Windpark

	Preis	Anzahl	Gesamt	Prozent
WEA (inkl. Errichtung+Transport)	900.000 €/MW	20 MW	18.000.000 €	81,6%
Fundamente	40.000 €/MW	20 MW	800.000 €	3,6%
Wegebau und Kranflächen	15 €/m²	30.000 m²	450.000 €	2,0%
Kabel	50 €/m	10.000 m	500.000 €	2,3%
ggf. Umspannwerk			1.500.000 €	6,8%
Planung			400.000 €	1,8%
Ausgleichszahlungen	20.000 €/MW	20 MW	400.000 €	1,8%
Gesamt			22.050.000 €	
pro kW			1.103 €/kW	

→ Kosten in EL/SL: ca. 1.300 €/kW

→ Bei Herstellung vor Ort (z.B. Indien, China) oft preiswerter als in Deutschland

TERNA Wind Energy Programme Folie 76

gtz Wirtschaftlichkeit – Betriebskosten

DEWI-Studie 2002: Entwicklung der Betriebskosten

Gesamte Betriebskosten
 1. Dekade: 4,8% der WEA-Investition = 24% der Einspeiseerlöse → ca. **50.000 €/MW**
 2. Dekade: 6,6% der WEA-Investition = 33% der Einspeiseerlöse → ca. **70.000 €/MW**

Davon Instandhaltung, Wartung, Reparatur
 1. Dekade: 1,8% der WEA-Investition = 9% der Einspeiseerlöse → ca. **20.000 €/MW ... (40%)**
 2. Dekade: 3,6% der WEA-Investition = 18% der Einspeiseerlöse → ca. **40.000 €/MW ... (57%)**

Die restlichen Betriebskosten in Höhe von ca. 30.000 €/MW umfassen:

- Pachten
- Versicherung
- Geschäftsführung der Betreibergesellschaft
- Steuern
- Strombezug aus EVU-Netz
- Sonstige Kosten

Quelle: BWE

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 77

gtz Wirtschaftlichkeit – Stromgestehungskosten

Jahr	Investition	O&M	Barwert	Stromertrag	Barwert
1	2007	1.100.000 €	50.000 €	2.000.000 kWh	2.000.000 kWh
2	2008		50.000 €	2.000.000 kWh	1.886.792 kWh
3	2009		50.000 €	2.000.000 kWh	1.779.993 kWh
4	2010		50.000 €	2.000.000 kWh	1.679.239 kWh
5	2011		50.000 €	2.000.000 kWh	1.584.187 kWh
6	2012		50.000 €	2.000.000 kWh	1.494.516 kWh
7	2013		50.000 €	2.000.000 kWh	1.409.921 kWh
8	2014		50.000 €	2.000.000 kWh	1.330.114 kWh
9	2015		50.000 €	2.000.000 kWh	1.254.825 kWh
10	2016		50.000 €	2.000.000 kWh	1.183.797 kWh
11	2017		70.000 €	2.000.000 kWh	1.116.790 kWh
12	2018		70.000 €	2.000.000 kWh	1.053.575 kWh
13	2019		70.000 €	2.000.000 kWh	993.939 kWh
14	2020		70.000 €	2.000.000 kWh	937.678 kWh
15	2021		70.000 €	2.000.000 kWh	884.602 kWh
16	2022		70.000 €	2.000.000 kWh	834.530 kWh
17	2023		70.000 €	2.000.000 kWh	787.293 kWh
18	2024		70.000 €	2.000.000 kWh	742.729 kWh
19	2025		70.000 €	2.000.000 kWh	700.688 kWh
20	2026		70.000 €	2.000.000 kWh	661.026 kWh
Gesamtwert	1.100.000 €		695.034 €		24.316.233 kWh

Stromgestehungskosten:
€ 1.100.000 ÷ € 695.034 = 24.316.233 kWh
→ 0,074 €/kWh

Annahme: Zinssatz 6%

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 78

gtz Wirtschaftlichkeit – Stromgestehungskosten

	Turbine Size	Levelized electricity costs
Mini turbine	0,1 - 1 kW	20-40 cents/kWh
Small turbine	3 - 100 kW	15-30 cents/kWh
Onshore	1 - 3 MW	4-6 cents/kWh
Offshore	1,5 - 5 MW	6-10 cents/kWh

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 79

gtz Wirtschaftlichkeit – CDM

- Vorab-Kosten: € 70.000 – 230.000
- Davon Registrierungsgebühr:

Annual CO2-eq. reduction	Fee in US\$
≤ 15.000	5.000
> 15.000 and ≤ 50.000	10.000
> 50.000 and ≤ 100.000	15.000
> 100.000 and ≤ 200.000	20.000
> 200.000	30.000

- Jährliche Kosten:
 - Monitoring € 5.000 - 10.000
 - Verkauf von CERs ca. 10% des CER-Wertes

TERNÄ Wind Energy Programme Folie 80

gtz Wirtschaftlichkeit – CDM

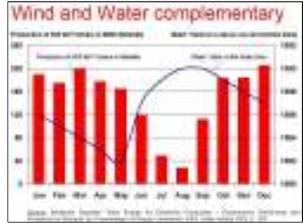


- Der 20 MW Windpark in Jepirachi, Kolumbien, vermeidet jährlich ca. 18.000 t CO₂.
- Durch den Verkauf der CERs (6 €/tCO₂) wird ein Zusatzeinkommen von ca. 0,4 €/c/kWh erzeugt.

TERNIA Wind Energy Programme Folie 81

gtz Wirtschaftlichkeit – Emissionen und CDM

- In Äthiopien würde ein Windpark mit 70 MW lediglich 3.500 t CO₂ pro Jahr vermeiden.
 - 21.000 €/a
 - 0,01 €/c/kWh
- Der große Nutzen der Windenergie besteht in Äthiopien vielmehr im „water-saving“ als im „fuel-saving“.



TERNIA Wind Energy Programme Folie 82

gtz Inhaltsverzeichnis

- Einführung (Entwicklung und Märkte)
- Woher kommt der Wind?
- Technologie
- Planung
- Bauphase
- Wirtschaftlichkeit
- Repowering / Offshore / Ausblick

TERNIA Wind Energy Programme Folie 83

gtz Repowering

Repowering: bezeichnet das Ersetzen alter Kraftwerke durch neue, moderne, häufig leistungsfähigere bzw. effizientere Anlagen.

Faustregel: Doppelter Energieertrag bei halber Anlagenzahl

→ Wegen schneller technologischer Entwicklung und wirtschaftlicher Anreize häufig bereits vor Ablauf der geplanten Laufzeit sinnvoll.

→ Gebrauchte Anlagen können in anderen Ländern zum Einsatz kommen.

Jedoch: Häufig juristische Hindernisse (z.B. Beschränkung der Anlagenhöhe oder andere genehmigungsrechtliche Fragen)

TERNIA Wind Energy Programme Folie 84

gtz Repowering

Vorher
Windpark Simonsberg
(Schleswig-Holstein)



Nachher



Quelle: BWE

TERNA Wind Energy Programme Folie 85

gtz Offshore

Vorteile:

- stärkerer, gleichmäßiger Wind
- geringerer Störfaktor für den Menschen

Nachteile:

- Erhöhte Kosten durch Fundament und Kabeltrasse
- Frage der Netzeinspeisung an Land

Strapaziöses Umfeld

- Horns Rev: Transformatoren und Generatoren an allen 80 WEA ausgetauscht
- Hoher Wartungsaufwand bei erhöhten Wartungskosten



TERNA Wind Energy Programme Folie 86

gtz Offshore

Offshore-Projekte in Europa

Land	Projekte gesamt		realisiert		genehmigt		geplant	
	Anzahl	Megawatt	Anzahl	Megawatt	Anzahl	Megawatt	Anzahl	Megawatt
Dänemark	9	809	7	409	--	--	2	400
Großbritannien	30	8.913	4	214	9	1.118	17	7.583
Schweden	14	2.521	3	23	2	134	9	2.364
Niederlande	4	239	2	19	1	120	1	100
Irland	8	1.280	1	25	1	50	6	1.205
Deutschland	48	70.682	1	4,5	10	2.036	37	68.642
Belgien	1	600	--	--	1	600	--	--
Spanien	6	2.563	--	--	--	--	6	2.563
Frankreich	2	60	--	--	--	--	2	60

Quelle: BWE

TERNA Wind Energy Programme Folie 87

gtz Offshore – Deutschland – Nordsee



Quelle: BWE

TERNA Wind Energy Programme Folie 88



- gtz **Ausblick**
- 25% Windstromanteil in Deutschland bis 2030
 - Weitere Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit (Stromertragsprognose)
 - Speicherung von Windstrom (Wasserstoff, Druckluft, etc.)
 - Stromtransport per HGÜ aus windreichen Regionen über lange Strecken
 - Weiteres Wachstum der Anlagengröße (10 MW?)
 - Gebäudeintegration?
 - Meerwasserentsalzung
 - Inselnetze
- 
- TERNIA Wind Energy Programme Folie 90



- gtz **Planung – Genehmigungsverfahren**
- Projektantrag wird auf die Vereinbarkeit mit den betreffenden gesetzlichen Regelungen auf Bundes- und Landesebene geprüft:
 - BauGB
 - BImSchG
 - UVPG
 - BNatSchG
 - etc.
 - Genehmigung beinhaltet Verpflichtung des Betreibers, die Anlagen nach Betriebsende abzubauen und dies mit einer Rückbaubürgschaft gegenüber dem Grundstückseigentümer zu sichern.
 - In EL/SL existieren meist keine klaren Regelungen:
 - Behördliche Zuständigkeit oft unklar
 - Genehmigungsverfahren langwierig, intransparent und teuer
- TERNIA Wind Energy Programme Folie 92

gtz Wirtschaftlichkeit – Vergütungen nach EEG

Vergütungszeitraum: 20 Jahre
 Maßgeblich ist die Vergütung im Jahr der Inbetriebnahme
 Seit dem 1.1.2005 jährliche Degression von 2 %

Jahr der Inbetriebnahme	Windenergieanlagen an Land		Offshore-Anlagen	
	Anfangsvergütung in ct/kWh	Degressionsrate in %/Jahr	Anfangsvergütung in ct/kWh	Degressionsrate in %/Jahr
2004	8,50	0,00	9,00	0,00
2005	8,32	2,00	8,78	2,00
2006	8,16	2,00	8,58	2,00
2007	8,00	2,00	8,38	2,00
2008	7,84	2,00	8,18	2,00
2009	7,68	2,00	7,98	2,00
2010	7,52	2,00	7,78	2,00
2011	7,36	2,00	7,58	2,00
2012	7,20	2,00	7,38	2,00
2013	7,04	2,00	7,18	2,00
2014	6,88	2,00	6,98	2,00
2015	6,72	2,00	6,78	2,00

Quelle: BWE (2006)

TERN Wind Energy Programme Folie 93

gtz Wirtschaftlichkeit – Vergütungen nach EEG

a) Windenergieanlage an einem Standort (in Küstennähe, die nach § 18 Absatz 1 innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme 10% der Nennleistungsgrenze gemäß Anlage 10 § 18 Absatz 1 erreicht, ab dem 1.1.2005 im Jahr 2007

Übertragung der öffentlichen Vergütung auf 17 Jahre ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme, wobei die Vergütung im ersten Jahr der Übertragung um 15% erhöht ist

Die öffentliche Nennleistungsgrenze ist $100 \text{ kWh} \cdot 10 \cdot 1,15 = 115 \text{ kWh}$

Quelle: BMU (2007)

TERN Wind Energy Programme Folie 94

gtz Wirtschaftlichkeit – Vergütungen nach EEG

b) Windenergieanlage an einem Standort in der Küstennähe (in Küstennähe, die nach § 18 Absatz 1 innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme 10% der Nennleistungsgrenze gemäß Anlage 10 § 18 Absatz 1 erreicht, ab dem 1.1.2005 im Jahr 2007

Übertragung der öffentlichen Vergütung auf 17 Jahre ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme, wobei die Vergütung im ersten Jahr der Übertragung um 15% erhöht ist

Die öffentliche Nennleistungsgrenze ist $100 \text{ kWh} \cdot 10 \cdot 1,15 = 115 \text{ kWh}$

Quelle: BMU (2007)

TERN Wind Energy Programme Folie 95

gtz Wirtschaftlichkeit – Vergütungen nach EEG

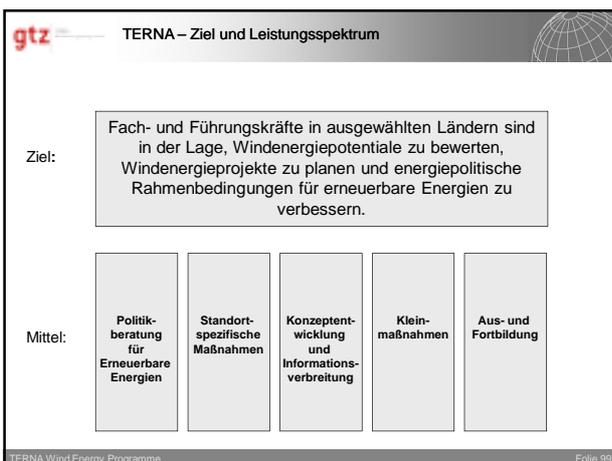
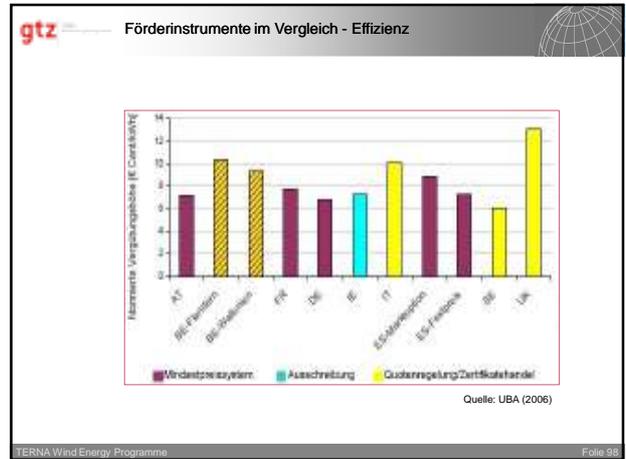
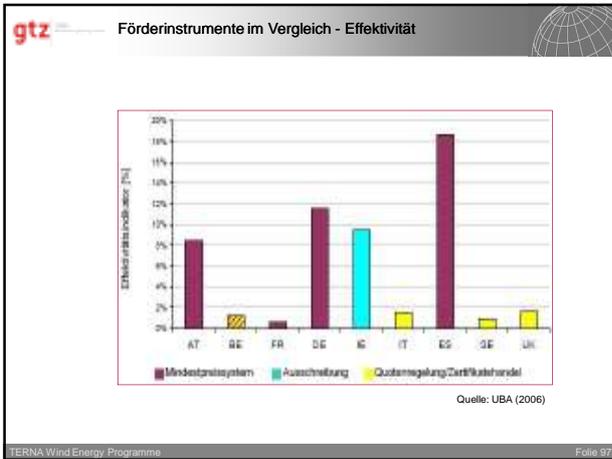
c) Fernleistungszugänge nach § 18 Absatz 2 in Küstennähe, die nach § 18 Absatz 1 innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme 10% der Nennleistungsgrenze gemäß Anlage 10 § 18 Absatz 1 erreicht, ab dem 1.1.2005 im Jahr 2007

Übertragung der öffentlichen Vergütung auf 17 Jahre ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme, wobei die Vergütung im ersten Jahr der Übertragung um 15% erhöht ist

Die öffentliche Nennleistungsgrenze ist $100 \text{ kWh} \cdot 10 \cdot 1,15 = 115 \text{ kWh}$

Quelle: BWE (2006)

TERN Wind Energy Programme Folie 96



TERNA – Neue Themen, Aufgaben

Enercon E-20

- Inselnetze, Wind-Diesel
- Trinkwasseraufbereitung
- Projektverfolgung auch über die Studien- oder Realisierungsphase hinaus (zur Sicherung der Nachhaltigkeit)
- Kontaktvermittlung zu Finanziers
- Fragen der Netzintegration

