

## 10. off-shore Wind

*The London Array offshore wind farm will make a crucial contribution to the UK's renewable energy targets.*

James Smith, chairman of Shell UK

*Electric power is too vital a commodity to be used as a job-creation programme for the wind turbine industry.*

David J. White

Auf dem Meer sind die Winde stärker und stetiger als an Land, deshalb liefern off-shore Windfarmen höhere Leistung pro Flächeneinheit als on-shore. Die Kentish Flats Windfarm in der Themsemündung, etwa 8,5 km vor der Küste von Whitstable und Herne Bay, wurde 2005 in Betrieb genommen. Die Planungsvorhersage beinhaltete eine mittlere Leistung von 3,2 W/m<sup>2</sup>, die tatsächliche Leistung im Jahre 2006 lag bei 2,6 W/m<sup>2</sup>.



Fig.10.1: (links) Kentish Flats – eine off-shore Windfarm in seichtem Wasser. Jeder Rotor hat einen Durchmesser von 90 m, Achshöhe 70 m. Jede „3 MW“-Turbine wiegt 500 Tonnen, die Hälfte davon das Fundament. Foto mit freundlicher Genehmigung © Elsam (elsam.com)

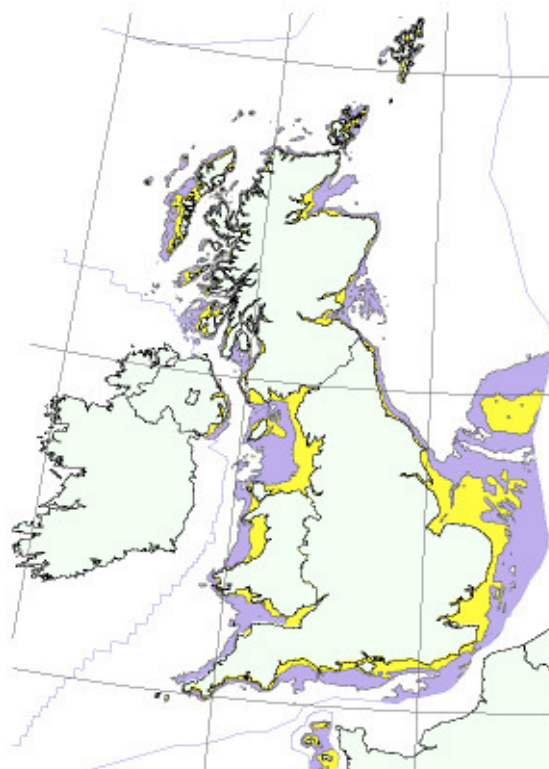


Fig.10.2: britische Gewässer mit Wassertiefen unter 25 m (gelb) und Tiefen zwischen 25 und 50 Metern (lila). Data von DTI Atlas of Renewable Marine Sources © Crown copyright.

Ich werde annehmen, dass eine Leistung pro Flächeneinheit von  $3 \text{ W/m}^2$  (50% über unserer on-shore Schätzung) in Windfarmen off-shore um ganz England herum erzielbar ist.

Nun brauchen wir noch eine Abschätzung, wie viel Fläche auf See realistisch mit Windturbinen bedeckt werden kann. Üblicherweise unterscheidet man zwischen Anlagen im seichten Wasser und auf hoher See (vgl. Fig.10.2). Allgemeiner Tenor scheint derzeit zu sein, dass Windparks im seichten Wasser (Tiefe weniger als 25-30 m), die etwa das doppelte von on-shore Windparks kosten, mit moderater Förderung ökonomisch machbar sind, Windparks auf hoher See jedoch nicht. Aktuell (2008) gibt es nur eine Hochsee-Windfarm in englischen Gewässern, einen experimentellen Prototypen, der all seine Energie an eine nahegelegene Ölplattform namens Beatrice sendet.



### Off-shore im seichten Wasser

In britischen Gewässern liegen rund  $40.000 \text{ km}^2$  seichte Gebiete, zumeist vor England und Wales. Die Fläche entspricht zweimal dem Gebiet von Wales.

Die mittlere verfügbare Leistung von Windfarmen, die das gesamte Gebiet belegen, wäre 120 GW oder 48 kWh/d pro Person. Doch es ist nicht zu erwarten, dass eine solche Anordnung für die Schifffahrt akzeptabel wäre. Nennenswerte Anteile des Gebietes würden sicherlich nicht in Frage kommen, weil auf die Anforderungen von Schifffahrt und Fischerei Rücksicht zu nehmen wäre. Ich schlage vor, die tatsächlich verfügbare Fläche auf ein Drittel zu schätzen (siehe die Anmerkungen dieses Kapitels für einen noch pessimistischeren Ansatz). Damit erhalten wir für die maximal mögliche Ausbeute von off-shore Windparks (in seichtem Wasser) **16 kWh/d pro Person**.

Bevor es weitergeht, möchte ich nochmals auf die immense Fläche hinweisen - zwei Drittel von Wales - die erforderlich ist, um diese 16 kWh/d/p zu erzeugen. Wenn wir die gesamte britische Küstenlinie (Länge 3.000 km) nehmen und einen Gürtel von 4 km Breite mit Turbinen füllen, hätte dieser Gürtel eine Fläche von  $13.000 \text{ km}^2$ . Damit kann man die 16 kWh/d pro Person erzeugen. Oder andersherum, betrachten wir die Anzahl der benötigten Turbinen: 16 kWh/d pro Person werden erzeugt durch 44.000 „3MW“-Turbinen, was 15 Stück pro Kilometer Küstenlinie entspricht.

Off-shore Windkraft ist schwer zu realisieren wegen der korrosiven Wirkung des Meerwassers. In der großen dänischen Windfarm Horns Reef mussten deswegen bereits nach 18 Monaten alle 80 Turbinen ausgebaut und repariert werden. Die Turbinen in Kentish Flats scheinen ähnliche Probleme mit ihren Getriebegehäusen zu haben, ein Drittel war innerhalb der ersten 18 Monate defekt.

### Off-shore auf hoher See

Die Fläche mit Wassertiefen zwischen 25 m und 50 m beträgt etwa  $80.000 \text{ km}^2$  - die Größe von Schottland. Geht man wieder von  $3 \text{ W/m}^2$  aus, könnten Windfarmen dort weitere 240 GW oder 96 kWh/d pro Person liefern, wenn die gesamte Fläche genutzt würde. Wieder machen wir Korridore für Schiffe und beschränken uns auf ein Drittel der Fläche, das ist etwa 30% mehr als Wales, und ein großer Teil davon ist weiter als 50 km

vom Land entfernt. Ergebnis: Wenn die Fläche eines 9 km breiten Streifens rings um die Küstenlinie mit Windturbinen gefüllt ist, könnte man damit 32 kWh/d pro Person erzeugen. Eine Menge Leistung, zugegeben, aber noch kein Vergleich mit unserem riesigen Verbrauch. Und wir haben das Problem der Intermittenz des Windes noch nicht angesprochen. Darauf werden wir in Kapitel 26 zurückkommen.

Ich möchte dieses Potenzial als Beitrag der Windkraft auf hoher See in unseren Stapel mit aufnehmen, mit der Einschränkung, dass Wind-Experten diesen Beitrag aus Kostengründen als zum Scheitern verurteilt betrachten.

## Einige Vergleiche und Kosten

Wie steht es nun in unserem Rennen zwischen Aufwand und Ertrag? Addieren wir off-shore Windkraft im seichten Wasser und auf hoher See zu unserem Produktionsstapel, so geht dieser in Führung. Was ich noch zu diesem Rennen sagen wollte: Wie leicht ist es doch, ein größeres Scheit auf das Feuer des Verbrauchs zu werfen, und wie schwierig, den Produktionsstapel wachsen zu lassen. Während ich so schreibe, ist mir etwas kalt und ich gehe hinüber zum Thermostaten, um diesen etwas höher zu drehen. So einfach ist es, 30 kWh pro Tag extra zu verbrauchen. Aber 30 kWh pro Tag pro Person aus erneuerbaren Ressourcen zu quetschen, erfordert eine Industrialisierung der Umwelt, die in ihrem Umfang kaum vorstellbar ist.

Die genannten 48 kWh/d/p off-shore Windleistung um England zu bauen, erfordert **60 Millionen Tonnen Beton und Stahl** – eine Tonne pro Person. Die Weltproduktion an Stahl liegt bei 1200 Millionen Tonnen jährlich, das sind 0,2 Tonnen pro Person weltweit. Während des zweiten Weltkrieges bauten die Amerikaner 2751 Liberty-Frachter mit je 7000 Tonnen Stahl, das waren 0,2 Tonnen pro Amerikaner. Also sind 60 Millionen Tonnen Windturbinen nicht technisch unerreichbar; doch machen Sie sich nicht vor, es wäre einfach. So viele Windmühlen zu bauen ist ein genauso großes Unternehmen wie die Liberty-Frachter.

Zum Vergleich: Um die Leistung von 48 kWh/d pro Person an Atomkraftwerken zu installieren, würde England lediglich **8 Millionen Tonnen Stahl** und **0,14 Millionen Tonnen Beton**<sup>13</sup> benötigen. Wir können die 60 Millionen Tonnen off-shore Wind-Hardware auch mit den bereits existierenden Plattformen und Anlagen des Fossilbrennstoff-Sektors in und um die Nordsee vergleichen (Fig.10.4): Um 1997 enthielten die 200 Anlagen und 7000 km Pipeline in englischen Gewässern **8 Millionen Tonnen Stahl und Beton**. Die neue Langeded Gaspipeline von Norwegen nach England, die Gas für eine Leistung von 25 GW (10 kWh/d/p) transportiert, benötigte weitere **1 Million Tonnen Stahl** und **1 Million Tonnen Beton** (Fig.10.5).

Am 10.12.2007 gab die englische Regierung bekannt, dass sie den Bau eines 33 GW off-shore Windparks genehmigt hätte (der im Mittel 10 GW oder 4,4 kWh/d/p nach England liefern würde), ein Plan, der von einigen aus der Windindustrie als „Luftschloss“ bezeichnet wurde. Rechnen wir mit 4 kWh/d/p, das ist ein Viertel meines Ansatzes von 16 kWh/d/p für seichte Gewässer. Um diese mittlere Leistung zu realisieren, braucht man etwa 10.000 „3MW“-Turbinen wie die aus Fig.10.1. (Sie haben eine Kapazität von „3MW“ Spitze, aber liefern im Durchschnitt 1 MW, zur Kennzeichnung setze ich hier und im folgenden Spitzenleistungs-Angaben in Anführungszeichen.)

---

<sup>13</sup> Diese Zahl ist nach Angabe des Autors falsch, in seinen Errata gibt es als korrekten Wert 140 Millionen Tonnen an, der m.E. jedoch auch nicht plausibel ist.

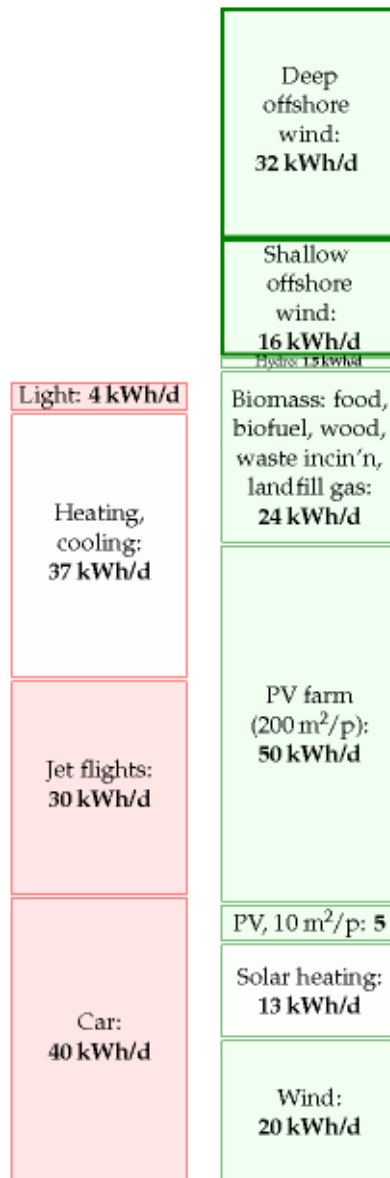


Fig.10.3: off-shore Wind

Was würden diese „33GW“ in der Herstellung kosten? Die „90MW“ Kentish Flat Farm kostete 105 Millionen Euro<sup>14</sup>, also kosten „33GW“ um die 33 Milliarden Euro. Um sich diese 33 Milliarden Kosten der 4 kWh/d/p besser vorstellen zu können, kann man sie auf die Bevölkerung verteilen: 550 Euro pro Person. Das ist, nebenbei gesagt, ein erheblich besseres Geschäft als Kleinwindanlagen. Solche Kleinanlagen zur Dachmontage kosten derzeit um die 1.500 € und liefern auch bei optimistisch angenommenen 6 m/s Windgeschwindigkeit nur 1,6 kWh/d. In Wirklichkeit liefern existierende kleine Windturbinen in typischen englischen Stadtlagen 0,2 kWh pro Tag.

Eine andere Engstelle beim Aufbau dieser off-shore Windturbinen ist die Erfordernis von Spezialschiffen. Um 10.000 Turbinen („33GW“) innerhalb von 10 Jahren zu errichten, bräuchte man etwa 50 große Jackup-Bargen (hydraulische Pontons). Diese kosten je 60 Mio €, was ein zusätzliches Investment von 3 Milliarden € erforderlich macht. Sicher ist

<sup>14</sup> Die Originalangaben sind in englischen Pfund, die ich mit 1:1 umgerechnet habe (beim derzeitigen Wechselkurs von 1:1,098 kein großer Genauigkeitsverlust).

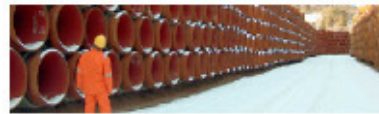
das kein K.O.-Kriterium im Vergleich zu den Gesamtkosten von 33 Milliarden €, doch ist es schon ein Detail, das besondere Planung erfordert.



Fig.10.4: Die Magnus-Plattform im nördlichen englischen Sektor der Nordsee enthält 71.000 Tonnen Stahl. Im Jahr 2000 lieferte diese Plattform 3,8 Millionen Tonnen Öl und Gas – eine Leistung von 5 GW. Kosten der Plattform: 1,1 Milliarden €. Foto von Terry Cavner.



Fig.10.5: Pipeline-Rohre für Langeled. Von Bredero-Shaw [brederoshaw.com]



## Verluste bei Vögeln

Töten Windräder „riesige Mengen“ von Vögeln? Windfarmen gerieten jüngst in die norwegischen Schlagzeilen, weil Turbinen auf Smola, einer Inselgruppe vor der Nordwestküste, neun Weißschwanz-Adler in 10 Monaten getötet hatten. Ich teile die Besorgnis von BirdLife International um das Wohlergehen seltener Vögel. Doch denke ich, wie immer, sollte man die Zahlen ansehen. Es wurde abgeschätzt, dass an die 30.000 Vögel jährlich durch Windturbinen in Dänemark sterben, wo Windmühlen 9% des Strombedarfs decken. Horror! Ächtet die Windmühlen! Wir erfahren darüber hinaus, dass der Straßenverkehr eine Million Vögel in Dänemark jährlich tötet. Dreißigmal-größerer-Horror! Dreißigmal mehr Veranlassung, Autos zu ächten! Und in England werden 55 Millionen Vögel jährlich durch Katzen getötet (Fig.10.6)<sup>15</sup>.

Rein gefühlsmäßig würde ich am liebsten in einem Land leben, wo es virtuell keine Autos und keine Windmühlen gibt und mit vielen, vielen Katzen und Vögeln (wo die Katzen die Vögel jagen und vielleicht von Weißschwanz-Adlern gejagt werden, um das natürliche Gleichgewicht zu erhalten). Doch was ich wirklich hoffe ist, dass Entscheidungen über Autos und Windmühlen nach sorgfältigem rationalem Nachdenken getroffen werden, nicht rein gefühlsmäßig. Möglicherweise brauchen wir die Windmühlen!

<sup>15</sup> Dieser Vergleich ist nicht allzu ernst zu nehmen, insbesondere da die Datenbasis (Dänemark einerseits England andererseits) nicht dieselbe ist.



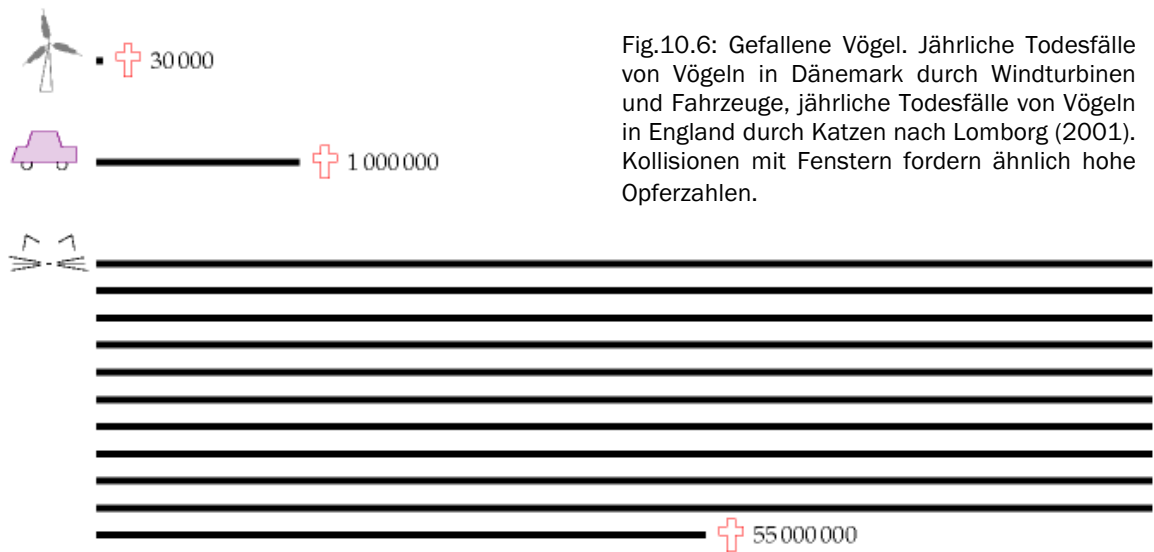


Fig.10.6: Gefallene Vögel. Jährliche Todesfälle von Vögeln in Dänemark durch Windturbinen und Fahrzeuge, jährliche Todesfälle von Vögeln in England durch Katzen nach Lomborg (2001). Kollisionen mit Fenstern fordern ähnlich hohe Opferzahlen.

## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 68 **Kentish Flats Windfarm:** Siehe [www.kentishflats.co.uk](http://www.kentishflats.co.uk). Die 30 Vestas V90 Windturbinen haben insgesamt einen Spitzen-Output von 90 MW, die vorhergesagte mittlere Leistung ist 32 MW (bei Load Faktor 36 %). Die mittlere Windgeschwindigkeit in Achshöhe ist 8.7 m/s. Die Turbinen stehen in 5 m tiefem Wasser, voneinander 700 m entfernt, verteilt über eine Fläche von 10 km<sup>2</sup>. Die Leistungsdichte war mit 3,2 W/m<sup>2</sup> vorhergesagt. Tatsächlich war der Output 26 MW, der Load-Faktor im Jahr 2006 also 29% [wbd80]. Daraus ergibt sich eine Leistungsdichte von 2,6 W/m<sup>2</sup>. Die North Hoyle Windfarm vor Prestatyn, North Wales, hatte 2006 einen höheren Load-Faktor von 36%. Ihre dreißig 2MW Turbinen belegen 8,2 km<sup>2</sup>. Also hatten sie eine Leistungsdichte von 2,6 W/m<sup>2</sup>.
- 68 **dass Windparks im seichten Wasser (Tiefe weniger als 25-30 m), die etwa das doppelte von on-shore Windparks kosten, mit moderater Förderung ökonomisch machbar sind:** Quelle: Danish wind association windpower.org. „Windparks auf hoher See jedoch nicht“ Quelle: British Wind Energy Association briefing document, September 2005, [www.bwea.com](http://www.bwea.com). Trotzdem wurden für ein Demonstrationsprojekt in tiefen Gewässern 2007 zwei Turbinen nahe dem Ölfeld Beatrice 22 km vor der Küste Schottlands aufgestellt (Fig.10.8). Jede Turbine hat eine „Kapazität“ von 5MW und sitzt in 45 m tiefem Wasser. Achshöhe: 107m; Durchmesser 126m. Alle erzeugte Elektrizität wird auf den Ölplattformen verwendet. Ist das nicht witzig? Das 10MW Projekt kostet 30 Millionen, diese Preisklasse von 3€ pro Watt(peak) kann mit Kentish Flats verglichen werden, dort sind es 1,2 € pro Watt (105 Millionen für 90 MW). [www.beatricewind.co.uk](http://www.beatricewind.co.uk)  
Es ist möglich, dass schwimmende Turbinen die Ökonomie der Windkraft in tiefen Gewässern verändern werden.

Region	Tiefe 5-30 m		Tiefe 30-50 m	
	Fläche (km <sup>2</sup> )	Potenzial (kWh/d/p)	Fläche (km <sup>2</sup> )	Potenzial (kWh/d/p)
Nord-West	3.300	6	2.000	4
Greater Wash	7.400	14	950	2
Themsemündung	2.100	4	850	2
Sonstige	14.000	28	45.000	87
Summe	27.000	52	49.000	94

Tabelle 10.7: Potenzielle off-shore Windressourcen in den dargestellten strategischen Regionen, wenn diese Regionen vollständig mit Turbinen gefüllt würden. Dept. Of Trade and Industry (2002b)

69 **Die verfügbare Fläche für off-shore Windkraft:** Das Dokument „Future Offshore“ des DTI (2002) gibt eine detaillierte Aufstellung über Flächen, die für off-shore Windkraft nutzbar sind. Tabelle 10.7. zeigt die abgeschätzten Ressourcen in 76.000 km<sup>2</sup> seichtem Wasser. Die vom DTI geschätzte Leistung, wenn die ganze Fläche mit Windmühlen gefüllt würde, beträgt 146 kWh/d pro Person (davon 52 kWh/d/p im seichten, 94 kWh/d/p im tiefen Wasser erzeugt). Die realistische Abschätzung des DTI für potenzielle off-shore Windkraft nennt aber lediglich 4,6 kWh/d/p. Interessant ist der Weg, auf dem das DTI von 146 kWh auf 4,6 kWh pro Tag und Person herunterrechnet. Wieso liegen die letztendlichen DTI-Schätzungen so weit unter unseren? Zuerst schränken sie ein: bis 30 km Küstenabstand, Wassertiefe maximal 40 m, der Meeresgrund darf nicht steiler als 5° abschüssig sein. Militärische Sperrzonen, Pipelines, Fischfanggründe, und Naturreservate wurden ausgeschlossen. Zweitens nahmen sie an, nur 5% der potenziellen Plätze würden entwickelt werden (wegen der Beschaffenheit des Meeresbodens oder aus planerischen Randbedingungen), sie reduzierten die Kapazität im küstennahen Bereich bis 10 Meilen um 50% aus Gründen der öffentlichen Akzeptanz. Sie reduzierten weiter die Kapazität um 95% für Gebiete, in denen die Windgeschwindigkeit über 9 m/s liegt, und um 5% für Gegenden mit Windgeschwindigkeiten von 8 - 9 m/s, wegen „Entwicklungsbarrieren durch eine feindselige Umwelt“.

69 **Wenn wir die gesamte britische Küstenlinie (Länge 3.000 km) nehmen und einen Gürtel von 4 km Breite:** Pedanten mögen sagen, dass die Küstenlinie keine wohldefinierte Länge hat, da sie fraktal ist. Ja sie ist fraktal, aber, lieber Pedant, nehmen Sie eine Karte und einen Streifen von Turbinen 4 km breit um die britische Hauptinsel, und sehen Sie ob der nicht doch 3.000 km lang ist.



Fig.10.8: Errichtung der Beatrice Demonstrations-off-shore-Windfarm in tiefem Wasser. Foto mit freundlicher Unterstützung von Talisman Energy (UK) Limited.

- 69 **Horns Reef** (Horns Rev). Die Probleme dieser dänischen “160MW” Windfarm vor Jütland [www.hornsrev.dk] wurden beschrieben von Halkema (2006).
- 70 **Liberty ships** –www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html
- 70 **200 Anlagen und 7000 km Pipeline in englischen Gewässern 8 Millionen Tonnen Stahl und Beton** – Rice and Owen (1999).
- 70 **gab die englische Regierung bekannt, dass sie den Bau eines 33 GW off-shore Windparks genehmigt hätte** [25e59w].
- 70 **„Luftschloss“** Quelle: Guardian [2t2vjq].
- 71 **Was würden diese „33GW“ in der Herstellung kosten?** Nach Veröffentlichungen des DTI vom November 2002 kostet Strom von off-shore Windfarmen an die 50€ pro MWh (5 ct/kWh) (Dept. of Trade and Industry, 2002b, p21). Ökonomische Fakten ändern sich jedoch, und im April 2007 lagen die geschätzten Kosten bei bis zu 92 € pro MWh (Dept. of Trade and Industry, 2007, p7). Im April 2008 kletterte der Preis für off-shore Windenergie noch höher: Shell zog seine Zusage zum Bau des London Array zurück. Weil off-shore Windkraft so teuer ist, musste die Regierung die Anzahl der ROCs (renewable obligation certificates) pro Einheit off-shore Windenergie erhöhen. Das ROC ist die Einheit der Förderung, die für bestimmte Formen erneuerbarer Energieproduktion ausgegeben wird. Der übliche Wert eines ROC ist £45, mit 1 ROC pro MWh; mit dem Verkaufspreis von etwa £40/MWh werden Erneuerbare Generatoren also mit £85 pro MWh bezahlt. Also ist 1 ROC pro MWh nicht genug Subvention um die Kosten von £92 pro MWh zu decken. In demselben Dokument werden für andere Erneuerbare folgende Kosten genannt (mittlere Kosten für 2010). On-shore Wind: £65–89/MWh; Kraftwärmekopplung von Biomasse: £53/MWh; große Wasserkraftwerke: £63/MWh; Deponiegas: £38/MWh; Solar PV: £571/MWh; Wellenkraft: £196/MWh; Gezeitenkraft: £177/MWh. “Dale Vince, Chief Executive des grünen Energieversorgers Ecotricity, der sich im Aufbau von Windfarmen engagiert, sagte dass er die off-shore Wind-Pläne der Regierung unterstütze, doch nur wenn sie nicht auf Kosten der on-shore Windkraft gingen. „Es ist gefährlich, die fantastischen Ressourcen zu übersehen, die wir in diesem Lande haben ... Nach unserer Schätzung wird es etwa in der Gegend von 40 Milliarden € kosten, die 33 GW die Hutton propagiert, off-shore zu bauen. Wir könnten dasselbe on-shore für 20 Milliarden € leisten.“ [57984r]

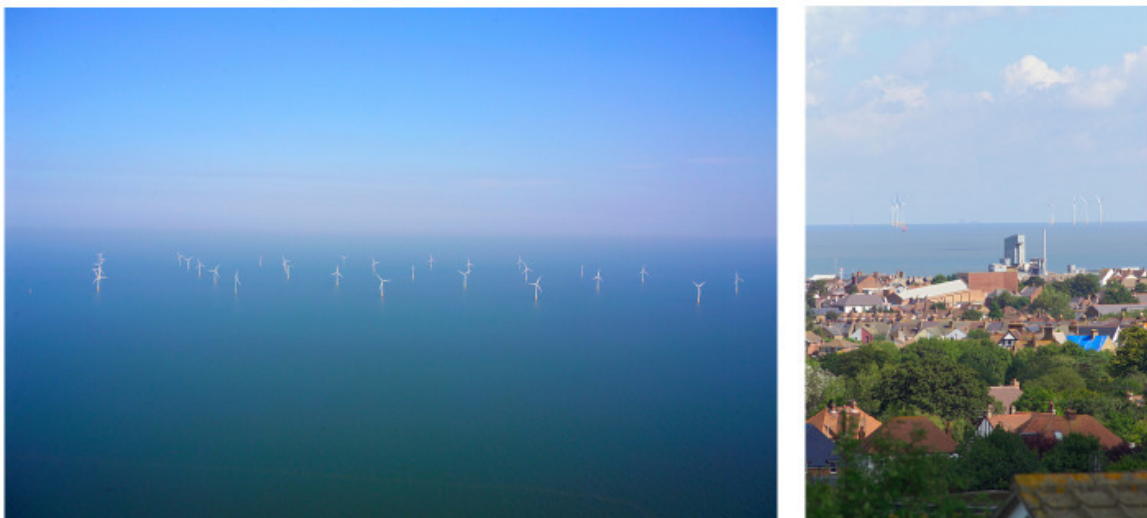


Fig.10.9: Kentish Flats, Fotos mit freundlicher Genehmigung © Elsam (elsam.com)



- 71 **kleine Windturbinen in typischen englischen Stadtlagen 0,2 kWh pro Tag:** Quelle: *Third Interim Report*, [www.warwickwindtrials.org.uk/2.html](http://www.warwickwindtrials.org.uk/2.html). Mit die besten Ergebnisse in der Warwick Wind Trials Studie liefert der Windsave WS1000 (eine 1-kW Maschine) in Daventry. Aufgestellt in einer Höhe von 15m über Grund leistet er 0.6 kWh/d im Mittel. Doch einige Mikroturbinen liefern nur 0.05 kWh pro Tag – Quelle: Donnachadh McCarthy: “My carbonfree year,” *The Independent*, Dezember 2007 [6oc3ja]. Die Windsave WS1000 Windturbine, in England in B&Q’s shops verkauft, gewann den Eco-Bollocks award des *Housebuilder’s Bible* Autors Mark Brinkley: “Come on, it’s time to admit that the roof-mounted wind turbine industry is a complete fiasco. Good money is being thrown at an invention that doesn’t work. This is the Sinclair C5 of the Noughties.” [5soql2]. The Met Office and Carbon Trust veröffentlichte im Juli 2008 einen Bericht [6g2jm5], der abschätzt, dass kleine Turbinen, wenn sie auf Hausdächern in UK installiert werden, wo dies ökonomisch ist, insgesamt etwa **0.7 kWh/d/p** liefern. Sie warnen, dass dachmontierte Turbinen in Städten gewöhnlich schlechter als nutzlos sind: „in vielen Stadtlagen können Dachturbinen nicht so viel CO<sub>2</sub> einsparen, wie ihr Herstellungsprozess verschlang“.
- 71 **Jackup-Bargen (hydraulische Pontons) kosten je 60 Mio €:** Quelle: [news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm](http://news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm). Ich schätzte, wir würden rund 50 davon benötigen unter der Annahme, dass jedes Jahr 60 arbeitsfreie Tage hätte und das Aufstellen einer Turbine 3 Tage benötigte.

Weiterführende Literatur: UK wind energy database [[www.bwea.com/ukwed/](http://www.bwea.com/ukwed/)].