

# Statistik spezifischer WKA Entwurfs- und Kostengrößen

Statistical WEC Design and Cost Trends

Molly, Jens Peter; Keuper, Armin; Veltrup, Martin

## Summary

*During the Glasgow EWEA Wind Energy Conference in 1989 a presentation by the author was given on statistical design and cost parameters of wind energy converters. Aim of that paper was to outline a possible development direction of certain design parameters with growing WEC sizes. The prognosis was that further energy cost reduction could be expected only if the design is modified with increasing WEC sizes. A simple upscaling of existing technology did not seem to be sufficient to keep WECs of growing sizes competitive with the most economic WECs in 1989 which had a rotor diameter of 25 m. Today WECs of up to almost 40 m are commercially available on the market and start to take over the leading market position. This means a doubling of the installed unit-power from about 250 kW to 500 kW within three years.*

*This paper compares the prognosis of 1989 with the real technical and economical development up to summer 1992 in order to show where design changes happened and which economic progress could be achieved. To make the results comparable the assumptions concerning operational costs were kept constant over the years and the investment costs are corrected to 1989 currency value (DMK).*

*Focussing on the specific tower head mass per rotor disc area unit a clear tendency to light weight machines can be stated. However there still exists a difference of roughly 100 % between the lightest and the heaviest WECs of same size. The rotor torque per unit mass of the tower head underlines this development. Three years ago the average maximum was about 5.3 Nm/kg. Today the leading machines reach values between 6 and 7 Nm/kg. Those technical advantages must be combined with the cost development per kg machined tower head material. The evaluated statistic shows cost variations between manufacturers from 22 DMK/kg to 60 DMK/kg for WECs with 25 m rotor diameter. The scatter diminishes with size to about 22 DMK/kg to 40 DMK/kg for rotor sizes from 35 to 40 m. In general the high mass costs are associated with low tower head mass and vice versa. Product lines of one manufacturer towards larger rotor diameters show a decrease in the specific machined material costs.*

*Finally the energy cost is calculated based on a reference site and the energy production of one year. The result shows that the trend predicted in 1989 still is correct, as well as the absolute value calculated for the energy production cost which diminishes with growing size. The future cost for machined material of large WECs could be at 25 to 30 DMK/kg. Together with possibly reached mass specific torque values of up to 10 Nm/kg cost competitive WECs of the one megawatt class could be expected within the next years.*

## 1. Einleitung

Vor drei Jahren wurde auf der EWEA Windenergiekonferenz in Glasgow vom Autor ein Vortrag präsentiert, in dem statistisch untermauerte Aussagen über die vermutete technische und ökonomische Entwicklung der Windkraftanlagen (WKA) mit wachsender Größe gemacht wurden. Das Ergebnis der damaligen Untersuchung zeigte, daß nur bei technologischen Fortschritten eine Chance der Kostenreduktion bei größeren Anlagen besteht. Ein einfaches Hochskalieren vorhandener Techniken erschien nicht erfolversprechend. In der Zwischenzeit sind die kommerziell angebotenen Windkraftanlagen von 25 m auf 40 m Rotordurchmesser bei einer gleichzeitigen Verdopplung der installierten Leistung angelangt. Es bietet sich deshalb an, die Trendvorhersagen von vor vier Jahren mit der Realität von heute zu vergleichen.

Seit dem Ende der siebziger Jahre wurden weltweit mehrere große Windkraftanlagen (WKA) im Megawattleistungsbereich gebaut und betrieben. Die erste Generation wies Rotordurchmesser von 75 bis 100 m und zwei bis drei Megawatt installierte Leistung auf. Alle WKAs konnten wegen verschiedener Ursachen nur einen mehr oder weniger stark eingeschränkten Betrieb durchführen. Nach diesem mutigen ersten Schritt zur Großanlage, der viele technische Innovationen enthielt, aber wenig erfolgreich war, versuchten die Ingenieure Ende der achtziger Jahre mit einer zweiten, kleineren

Generation bei ausgeprägt konservativer Auslegung zum Erfolg zu kommen. Mit auf 60 m reduziertem Rotordurchmesser, Dreiblattrotor und meist nur knapp über einem Megawatt Leistung sollte der Durchbruch zur konkurrenzfähigen Großanlage geschafft werden. Doch die Hoffnung, diese zweite Generation kostengünstiger bauen zu können als die erste, erfüllte sich nicht, obwohl in einigen Fällen Ingenieurteams mit der Erfahrung der ersten Großanlagen involviert waren.

Dieser Hintergrund war Ausgangspunkt für Studien über die zu erwartende Kostenentwicklung von Windkraftanlagen mit zunehmender Größe. Während Hau (1) für Anlagen mit Rotordurchmessern über 30 m bis maximal 100 m Stromerzeugungskosten prognostizierte, die unabhängig von der Rotorgröße nahezu konstant bleiben, kam Molly (2) zu dem Ergebnis, daß zunächst noch eine Abnahme der Stromerzeugungskosten bis etwa 60 m Rotordurchmesser möglich sein könnte, bevor die Kosten wieder ansteigen. Allerdings war das Kostenminimum so schwach ausgeprägt, daß für große WKAs bis 90 m Rotordurchmesser mit Stromerzeugungskosten gerechnet werden könnte, die konkurrenzfähig zu heute angebotenen WKAs sind. Insofern waren beide Abschätzungen im Ergebnis sehr ähnlich.

Zur Verdeutlichung der damaligen Prognose wurden in (2) auch statistische Aussagen herangezogen. Heute, drei bis vier Jahre danach, erschien es interessant, die Prognose und die Statistiken mit der in der Zwischenzeit erfolgten technischen Entwicklung zu vergleichen. Um den Einfluß der Inflation zu korrigieren, wurden alle Kosten auf das Basisjahr 1989 umgerechnet. Zur Verdeutlichung der Entwicklung wurden dann die 1992 erreichten Daten der Windkraftanlagen in die Diagramme des Berichts von 1989 (2) eingetragen.

## **2. Turmkopfmassen**

Bei der wichtigen Beurteilungsgröße Turmkopfmasse konnte eine klare Tendenz zu leichteren Maschinen festgestellt werden. Der sich abzeichnende Trend der spezifischen Massen (Turmkopfmasse bezogen auf Rotorkreisfläche) für kommerziell erhältliche WKAs zwischen 25 m und 40 m Rotordurchmesser liegt eher im Bereich der als "leicht" einzustufenden WKAs (Abb. 1).

Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Punkten zeigen jeweils die Massenzunahme einer WKA-Produktlinie innerhalb ein und der selben Firma. Werden diese Linien weiter extrapoliert, so dürften demnach die Turmkopfmassen künftiger großer WKAs (größer 45 m Rotordurchmesser) im Bereich der leichten WKAs zu erwarten sein.

Allerdings gibt es nach wie vor beinahe 100 % Unterschied zwischen der leichtesten und der schwersten WKA gleicher Größe. Dies deutet darauf hin, daß zumindest ein Teil der heute angebotenen Anlagen noch ein erhebliches Potential zur Massenreduktion besitzen, das dann auch zu Kostenminderungen führen müßte. Dieser Effekt kann natürlich nicht linear sein, da bei besserer Ausnutzung des Materials zwar die Wandstärken abnehmen und damit Materialkosten reduziert werden, der kostenintensive Bearbeitungsaufwand jedoch ähnlich hoch bleibt. Die bei 56 m und 80 m Rotordurchmesser eingetragenen Punkte für 1989 und 1992 für die MON 50 beziehungsweise AEOLUS II von MBB zeigen, daß die ursprünglichen rechnerischen Massenannahmen in der wirklich ausgeführten Maschine nicht zu halten waren. MON 50 nahm um über 30 % und AEOLUS II um über 60 % in der Turmkopfmasse zu. Ein Zeichen für die Unsicherheit der Ingenieure bezüglich der Lastannahmen, die dann zwangsläufig zur Überdimensionierung führt. Insgesamt könnte jedoch aus dem Trend abgeleitet werden, daß künftige Großanlagen im Bereich zwischen 20 und 30 kg/m<sup>2</sup> spezifischer Turmkopfmasse liegen müßten.

Eine Reduzierung der Masse bei gleicher Größe und Leistung der WKA ist durch bessere Ausnutzung des Materials möglich. Hierzu ist die genaue Kenntnis der Materialeigenschaften und der auftretenden Belastungen erforderlich. Beides ist heute noch nicht im ausreichenden Maß gegeben.

*Abb. 1: Rotordurchmesserabhängige spezifische Turmkopfmassen. Verbindungslinien zeigen die Entwicklung mit der Größe der WKA bei einzelnen Herstellern.*

*Fig. 1: Rotor diameter dependent development of the tower head masses. Connection lines show the in-house development of different manufacturers.*

*Abb. 2: Rotordurchmesserabhängige massenspezifische Rotordrehmomente. Verbindungslinien zeigen die Entwicklung mit der Größe der WKA bei einzelnen Herstellern.*

*Fig. 2: Rotor diameter dependent development of the rotor torque. Connection lines show the in-house development of different manufacturers.*

Ein Maß für die Ausnutzung des Materials ist das pro Kilogramm Turmkopfmasse übertragene Drehmoment des Rotors. Abb. 2 zeigt, wie sich die Entwicklung seit 1989 fortgesetzt hat. War damals von Serienanlagen die festgestellte Obergrenze von 5,2 Nm/kg nicht überschritten worden, so gibt es 1992 einige Anlagen, die deutlich darüber liegen und bis auf 7,1 Nm/kg kommen. Dies bedeutet eine Erhöhung der Obergrenze um 36 %. Die Produktlinien einzelner Hersteller wiederum belegen die in der Regel mit dem Größenwachstum einhergehende zunehmende Materialausnutzung. Der feststellbare Anstieg des massenspezifischen Drehmoments von der kleineren zur größeren WKA innerhalb einer Firma ist dabei meist flacher, als dies die statistische Entwicklung aller WKAs möglich erscheinen läßt. Werden also nicht die Produktlinien einzelner Hersteller betrachtet, so scheint aus dem Gesamtbild ein weiterer Anstieg des massenspezifischen Rotordrehmoments entlang der in Abb. 2 eingezeichneten Steigung über 40 m Rotordurchmesser hinaus möglich zu sein. WKAs mit 40 m Rotordurchmesser könnten dann mit einem massenspezifischen Drehmoment von durchschnittlich 7,5 Nm/kg und solche mit 60 m im Bereich von 10 Nm/kg erwartet werden. Ob dies bei gegebenen Belastungen realisierbar ist, bleibt abzuwarten.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, wie der aus der Projektierungsphase stammende hohe Wert von nahezu 15 Nm/kg des AEOLUS II durch die schon oben angesprochene starke Massenzunahme während der Entwicklungsphase auf 7,3 Nm/kg geschrumpft ist. Diese Größenordnung wird schon von den besten mittelgroßen WKAs erreicht, obwohl sie ausschließlich konventionelle Materialien und nicht wie AEOLUS II besonders leichte Kohlefaserstrukturen im Rotorblatt verwenden.

Unter der Annahme, AEOLUS II wäre bei besserer Kenntnis der Belastungen mit den einmal projektierten 15 Nm/kg machbar, läge sein übertragbares Drehmoment genau auf der Verlängerung der Gerade durch den Nullpunkt (Abb. 2). Die weiter oben genannte mögliche lineare Extrapolation des massenspezifischen Drehmoments über 40 m Rotordurchmesser hinaus erscheint daher durchaus realistisch.

Auf das Rotordrehmoment kann über die Drehzahl Einfluß genommen werden. Abb. 3 stellt die Entwicklung seit 1989 dar. Bemerkenswert ist, daß sich der erwartete Trend zu höheren Blatt-

spitzengeschwindigkeiten nicht einstellte. Ganz im Gegenteil scheinen neuere WKAs der Rotorgröße 35 bis 40 m eher mit niedrigeren Blattspitzengeschwindigkeiten ausgelegt zu werden als noch vor drei Jahren. Hintergrund dafür dürfte die mit steigender Blattspitzengeschwindigkeit überproportional zunehmende Geräuschemission der WKAs sein. Da die Untersuchungen zu Methoden der aerodynamischen Geräuscheminderung erst in den Anfängen stecken, wird diese konservative Haltung der Ingenieure verständlich, gehört doch die Geräuschbeeinflussung der Umgebung zu den wesentlichen Hindernissen bei der Erlangung einer Baugenehmigung für WKAs.

*Abb. 3: Rotordurchmesserabhängige Blattspitzengeschwindigkeiten bei WKAs mit verschiedener Blattzahl des Rotors.*

*Fig. 3: Rotor diameter dependent development of the blade tip velocity.*

Die Vorschriften der TA-Lärm zur Einhaltung bestimmter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft von WKAs begrenzen hier eindeutig die mögliche technische Entwicklung. Da die gesetzlichen Grenzen der zulässigen Geräuschemission nicht abgeschwächt werden können, muß hier die Forschung Wege finden, wie die sich heute abzeichnende Grenze der vertretbaren Blattspitzengeschwindigkeiten geräuschneutral nach oben verschoben werden kann. Da eine Zunahme der Blattspitzengeschwindigkeit das Drehmoment umgekehrt proportional senkt, ist hier ein lohnendes und wichtiges Feld künftiger Forschung zu sehen.

Ein Maß für die Wirtschaftlichkeit einer Windkraftanlage ist durch die pro Kilogramm und Jahr erzeugte Energiemenge gegeben. In (2) wurde für größer werdende Windkraftanlagen nachgewiesen, daß deren massenbezogener Energieertrag umgekehrt proportional mit dem Rotordurchmesser abnimmt. Die drei Linien in Abb. 4 geben diese Abhängigkeit für verschiedene Auslegungsvarianten wieder. In der Regel ist bei den Produktlinien einzelner Hersteller mit zunehmender Anlagengröße eine Abnahme des massenspezifischen Energieertrages festzustellen. Diese Abnahme liegt in der theoretisch ermittelten Trendrichtung der Kurven konstanter Auslegungsparameter. Größere Anlagen einer Produktlinie können demnach nur kostengünstiger Energie erzeugen, wenn die Kosten für das bearbeitete Kilogramm Masse im gleichen Maße abnehmen, also umgekehrt proportional zum Durchmesser sind. 1989 war bei WKAs mit 25 m Rotordurchmesser ein maximaler Wert von rund 58 kWh/kg zu verzeichnen. Heute gibt es WKAs, die auf knapp über 90 kWh/kg kommen. WKA-Produktlinien, die einen mehr horizontalen bzw. sogar steigenden Trend bei Vergrößerung aufweisen, haben offensichtlich gegenüber ihrem kleineren Vorläufer Technologieverbesserungen oder verbesserte Materialauslastung erfahren. Wie schon erwähnt, bedeutet dies alles nur dann eine Verringerung der Energieerzeugungskosten, wenn die Herstellkosten für das bearbeitete Kilogramm Masse nicht im gleichen Maße hierzu angestiegen sind.

*Abb. 4: Abhängigkeit des massenspezifischen Jahresenergieertrags von der theoretischen Vergrößerungsfunktion im Vergleich mit WKA-Daten. Verbindungslinien zeigen die Entwicklung mit der Größe der WKA bei einzelnen Herstellern.*

*Fig. 4: Mass specific yearly energy yield calculated by the up-scaling function. Dots represent real WEC data. Connection lines show the in-house development of different manufacturers.*

### **3. Kosten**

Die offensichtlichen Fortschritte bei der Ausnutzung des Materials können sich nur dann in der Wirtschaftlichkeit positiv bemerkbar machen, wenn die Kosten für das bearbeitete Kilogramm Material nicht im gleichen Maße teurer geworden sind.

Heutige Windkraftanlagen könnten in Deutschland durch die staatliche Förderung etwas "überteuert" sein. Abb. 5 zeigt die auf Kaufkraft 1989 korrigierten heutigen Preise ab Werk im Vergleich mit einer Statistik aus dem Jahr 1989 (3), die wesentlich auf dänischen Anlagenpreisen beruhte. Die Preise sind auf den Quadratmeter Rotorfläche bezogen. Auffällig sind die mit wachsender Rotorgröße zu höheren spezifischen Preisen tendierenden Produktlinien einzelner Hersteller. Zunächst bedeutet dies nur dann eine Zunahme der Energieerzeugungskosten, wenn der flächenspezifische Energiemehrertrag durch die proportional mit dem Rotordurchmesser steigende Nabenhöhe geringer ausfällt als die hier festgestellte spezifische Kostenzunahme.

*Abb. 5: Vergleich heutiger flächenspezifischer WKA-Preise mit denen von vor 4-6 Jahren. Verbindungslinien zeigen die Entwicklung mit der Größe der WKA bei einzelnen Herstellern.*

*Fig. 5: Rotor disc area related WEC-prices compared with those of 4 - 6 years ago. Connection lines show the in-house price development of different manufacturers.*

Heutige deutsche WKAs als "überteuert" zu bezeichnen, muß differenziert gesehen werden. Deutsche Hersteller haben noch nicht den Erfahrungsschatz dänischer Hersteller aufzuweisen und müssen in die Ausweitung der Produktionsanlagen Geld hineinstecken. Die dänische Konkurrenz hingegen kann wegen der großen Erfahrung aus einigen tausend hergestellten WKAs knapper kalkulieren und hat gegenüber den Boomjahren der zweiten Hälfte der achtziger Jahre eher ihre Kapazitäten zurückgefahren als ausgeweitet. Mehreinnahmen aus der "Überteuierung" sind daher in der deutschen Industrie zur Zeit notwendig, um den Wettbewerbsnachteil gegenüber der ausländischen Konkurrenz auszugleichen.

Bei 25 m Rotordurchmesser liegen heute die Kosten für das bearbeitete Kilogramm Material des Turmkopfes (Abb. 6) bei 23 DM/kg bis 62 DM/kg (die Turmkosten sind im Preis einbezogen, allerdings

nicht die Turmmasse!). Dieses breite Band reduziert sich oberhalb 35 m Rotordurchmesser auf 26 DM/kg bis 41 DM/kg. Ob sich die untere Grenze wirklich anhebt oder ob dieser Effekt nur auf mangelnde Daten zurückzuführen ist, sei dahingestellt. In der Regel sind hohe spezifische Materialkosten mit hohem massenspezifischen Drehmoment (geringer Materialeinsatz) bzw. geringe spezifische Materialkosten mit niedrigem massenspezifischen Drehmoment gekoppelt. Werden die Materialkosten entlang der Produktlinie eines Herstellers verfolgt, so ist in der Regel mit zunehmender Anlagengröße eine Abnahme der Kosten für das bearbeitete Material zu verzeichnen (Abb. 6). Insgesamt scheint für WKA größer 50 m Rotordurchmesser ein Kilogrammpreis von etwa 25 DM/kg bis 30 DM/kg (Turmkosten inklusive) erreichbar zu sein.

*Abb. 6: Auf die Turmkopfmasse bezogene WKA-Preis-Entwicklung mit der Größe. Verbindungslinien zeigen die Entwicklung mit der Größe der WKA bei einzelnen Herstellern.*

*Fig. 6: Development of the tower head mass related WEC-prices with size. Connection lines show the in-house price development of different manufacturers.*

*Abb. 7: Stromerzeugungskosten bezogen auf die pro Jahr gewinnbare Energiemenge. Verbindungslinien zeigen die Entwicklung mit der Größe der WKA bei einzelnen Herstellern.*

*Fig. 7: Rotor size dependent development of energy production cost (related to the possible energy yield per year). Connection lines show the in-house price development of different manufacturers.*

Zum schnellen Vergleich der Energieerzeugungskosten verschiedener WKAs eignet sich die Darstellung der spezifischen Energieerzeugungskosten. Dieser Wert ist gegeben durch die Investitionskosten einschließlich aller Infrastrukturnebenkosten dividiert durch die in einem Jahr erzeugte Energiemenge. Im vorliegenden Beispiel wird hierzu ein Standort mit einem Jahresmittel von 6 m/s in 10 m Höhe mit einer Rayleigh Häufigkeitsverteilung und einer Grenzschicht nach dem 1/7-Potenzgesetz angenommen. Es ergibt sich dann mit den Prospektleistungskurven der Hersteller die Abb. 7. Insgesamt gesehen bewegen sich die Punkte der einzelnen WKA im Bereich der Prognose. Bei einigen Herstellern ist innerhalb der Produktlinie zu größeren Anlagen ein steigender, bei anderen ein der Prognose entsprechender fallender Trend der spezifischen Energieerzeugungskosten festzustellen.

Welchem Trend - dem konservativen oder optimistischen - die Energieerzeugungskosten folgen werden, läßt sich noch nicht aus den statistischen Daten ableiten. Die Vermutung liegt jedoch nahe, daß zunächst bis 50 m Rotordurchmesser sehr wahrscheinlich eine weitere Kostenreduktion erwartet werden darf. Mit der Entwicklung der geplanten sechs WKAs der 1 MW-Klasse in den nächsten drei Jahren, initiiert und unterstützt durch die Kommission der Europäischen Gemeinschaften und durch die einzelnen europäischen Länder, wird der Durchmesserbereich 50 m bis 55 m erreicht werden. Aus der dargestellten statistischen Entwicklung wie aus der rechnerischen Prognose dürfen für diese Größen konkurrenzfähige Anlagen erwartet werden. Ihre Markteinführung könnte 1995/96 stattfinden, so daß sich innerhalb von 12 Jahren die installierte Leistung kommerzieller WKAs verzwanzigfach hätte.

#### **4. Literatur**

- (1) Hau, E., et al. Next Generation of Large Wind Turbines. Final Report, München, Mai 1991.
  - (2) Molly, J. P., Maximum Economic Size of Wind Energy Converters. EWEC'89, 10.-13. Juli 1989, Glasgow.
  - (3) Klein, H., EUROWIN, Report on Operational Data 1986/87.
-

