



Georg Seifert (links) und Michael Patzelt vor dem „Windkanal“.

GenTest

Nach fast 10 Jahren (PALSTEK 6/2006) ist es wieder Zeit für eine Marktübersicht der gängigen Windgeneratoren für Fahrtenyachten. Nicht nur weil es neue Modelle gibt, auch sehen wir in den letzten Jahren mehr und mehr mit diesen kleinen Windkraftwerken ausgerüstete Yachten. Georg Seifert hat gemessen wie der Wind mit ihnen arbeitet.

Strom kommt halt nicht aus der Steckdose wenn man gerne ankert oder Ziele ohne Marinas ansteuern will, und nicht nur hier im Norden ist ein Windgenerator immer noch die ökologisch und ökonomisch sinnvollste Möglichkeit zur Energieerzeugung.

Die Verwirrung resultierend aus Hafenschnack und markigen Werbesprüchen aufzulösen haben wir uns wiederum aufgemacht und zehn Windgeneratoren zwischen 40 bis 450 Watt einer eingehenden Betrachtung unterzogen sowie deren tatsächliche Leistungsfähigkeit gemessen.

Seit der Insolvenz von Ampair ist dieser Pionier der kleinen Windgeneratoren nach mehr als 30 Jahren vom Markt verschwunden. Ebenso hat Xylem (ITT) beschlossen zum Jahresende 2016 die Produktion der seit über 25 Jahren gebauten LVM AeroGen-Serie einzustellen. Schade drum, gerade diese Geräte waren für ihre lange Lebensdauer und geräuscharmen Lauf bekannt – jedoch in Leistung und Design wohl nicht mehr marktfähig.

So haben wir neben bekannten Geräten, wie dem D.400 von Electric Energy (GB), die Rutland von Marlec (GB), den Air X nebst Air Breeze aus der Air – Serie (USA), den Superwind aus Deutschland, neu die Horizontalgeneratoren von Leading

Edge (GB), sowie den Silentwind, einen aus deutsch-portugiesischer Kooperation entstandenen Windgenerator somit die in Deutschland bekanntesten Geräte einer genauen Betrachtung unterzogen.

Etwas Theorie vorab

Zum besseren Verständnis der theoretischen Leistungsfähigkeit ein wenig Theorie: Die von einem horizontal angeströmten Windgenerator zu er-

zielende Leistung pro m² Rotorfläche in Watt ist

$$0.5 * 1.225 * v^3,$$

wobei v die Windgeschwindigkeit in m/s ist.

Einfacher ausgedrückt bewirkt eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit von zum Beispiel 5m/s auf 10m/s somit eine Verachtfachung der wirkenden Kraft, eine kaum spürbare Steigerung der Windgeschwindigkeit von 10m/s auf 11m/s bedeutet mithin 33 Prozent Energiezunahme. ►



Mitteilungsfreudig: Der Regler des Silentwind sendet seine Leistungsdaten per Bluetooth auf Smartphones mit Android oder IOS.



Leistungsfreudig: Der D.400 ist bei hinreichend Wind der stärkste Generator in unserer Runde.



Interessant: Der neue Rutland 1200 auf einer Cat-geta-kelten Yacht am Bug montiert.

Weiter ist die dem Wind zu entnehmende Energie proportional dem Quadrat des Rotordurchmessers, ein Windgenerator mit einem Rotordurchmesser von 100 Zentimeter hat daher eine vierfach höhere potentielle Leistungsfähigkeit als einer mit 50 Zentimeter.

Soweit waren wir 2006 bereits, mittlerweile gibt es (wieder) Vertikalgeneratoren mit senkrechten Luftleit-Blechen: Diese laufen nahezu geräuschlos – da aber die vertikalen Flächen nicht durch die Aerodynamik über die Windgeschwindigkeit hinaus beschleunigt werden können wie bei den horizontalen bleibt deren Leistung nach Rotorfläche weit hinter letzteren zurück – für die Versorgung einer Yacht daher ungeeignet, für die Ladeerhaltung der Batterien über längere Liegezeiten

jedoch sinnvoll. Ebenso hat sich viel bei den Rotorblättern der Horizontalläufer getan: Wahrnehmbar sind sie alle, aber wirklich störend nicht mehr.

Erwartung und Realität

Wünschenswert ist sicher eine Vollversorgung. Je nach Yachtgröße sind wir da schnell über 1.200Wh/24h – und da kommt uns die Physik in die Quere: Leistung kann nun einmal überwiegend nur durch Fläche erzielt werden.

Ein kleiner Windgenerator von 50 Zentimeter Rotordurchmesser wird nicht hinreichen, wir selbst haben einen Verbrauch von rund 1.000W/24h und benötigen dafür an Nord- und Ostsee einen solchen mit 120 Zentimeter Durchmesser.

Neben der Spitzenleistung, die von uns gemessen in Abhängigkeit von Zustand der Batterien, Regelungstechnik und auch Temperatur einen Laborwert darstellt, haben wir auf der vorletzten Seite dieses Artikels einmal über den Daumen die als realistisch einzuschätzende Energieausbeute in eher stark- und eher schwachwindigen Gebieten in einer Grafik veranschaulicht.

An dieser Stelle ein Hinweis: Wenn sich bei mehreren Generatoren im Sichtkreis einer dreht und der andere nicht oder unterschiedlich schnell, so kann das neben dem am Ort der Montage unterschiedlichen Wind auch volle Batterien oder einen aktivierten Stoppschalter als Ursache haben und sagt nichts über die Qualität des Windgenerators aus. Ebenso ist anzumerken, dass



Farbenfreudig: Der Silentwind mit den charakteristischen blauen Rotorblättern.

die Windgeschwindigkeit die ich im Masttop messe rund 1 Beaufort über der am Montageort des Generators liegt und bei Interpretationen irritieren kann.

Regelung

Da selbst ein kleiner Windgenerator bei tagelangem Starkwind und gleichzeitig geringem Strombedarf die Bordbatterien überladen kann, sollten alle Geräte über einen Regler an die Bordakkus angeschlossen werden. Im Gegensatz zu Lichtmaschinen sind kleine Windgeneratoren nicht fremd- sondern selbsterregt und verfügen über Permanentmagneten und Spulen auf der anderen Seite – und genau wie Lichtmaschinen dürfen sie niemals ohne Last laufen, weil zum einen ansonsten

die Rotorgeschwindigkeit über jedes für die Stabilität angemessene Maß ansteigen würde und zum anderen die Leerlaufspannung weit über die Spezifikationen ansteigt, was zumindest das Durchbrennen der Gleichrichterioden zur Folge hat. Wir haben, da die Hersteller unterschiedliche Methoden zur Überladungssicherung anwenden, diese bei den jeweiligen Modellen mit zugehörigem Laderegler erläutert.

Batteriearten

Wichtig ist zudem ist die zulässige Erhaltungsspannung nicht zu überschreiten, will heißen der Regler muss auf den angeschlossenen Batterietyp eingestellt werden (können). Schreibt beispielsweise der Batteriehersteller vor, dass die Erhaltungslade- ►



Das Expeditionsschiff PAGAN mit zwei Superwind-Anlagen: Alle drei nahezu unzerstörbar.



Montage im Regen: Wer für den PALSTEK testen will muss leidensfähig sein.

spannung nicht mehr als 13,5 Volt betragen darf (beispielsweise AGM-Akkus von Mastervolt), so muss der Regler eben bereits bei 13.5V die Ladung unterbrechen, ansonsten besteht akute Gefahr die teuren Stromspeicher zu kochen und somit zu zerstören. Also unbedingt in die Datenblätter der Batteriehersteller schauen! Entweder stellt der Lieferant des Windgeneratorreglers diesen vor Lieferung entsprechend ein oder aber der Regler ist selbst justierbar. Hier empfiehlt es sich bei nahezu vollen Batterien und hinreichend Wind (5 Bft oder mehr) und einem Meßgerät direkt an den Batterien die Spannung zu messen: Meist ist der Wind etwas böig und nun kann man schön am Messgerät sehen bei welcher Spannung der Regler ‚zumacht‘ und entsprechend nachjustieren. Dies dient nicht nur der Vermeidung von Überladung sondern auch der Kompensation etwaiger

Übergangswiderstände auf dem Weg vom Generatorausgang über den Regler bis zu den Batterien.

Mehrere Batterien

Zur Ladung mehrerer Batterien oder Batteriebänke werden an Bord häufig Diodenverteiler eingesetzt. Hier kann es je nach Regler zu Problemen kommen, die Dioden verhindern nämlich die Messung der Batteriespannung. Zudem ist der Spannungsabfall an den Diodenbrücken zu kompensieren, was nur bei einstellbaren Reglern möglich ist. Müssen mehrere Akkumulatorenätze getrennt geladen werden und verfügt der Laderegler nicht über mehrere Ausgänge, empfiehlt sich der Einsatz eines relais- oder thyristorgeschalteten Ladestromverteilers. Da aber die Motorbatterie eigentlich nicht nachgeladen werden muss, sie ist nach wenigen Minuten Motorlauf bereits wieder über die Lichtma-

schine voll geladen, empfehlen wir die ausschließliche Ladung nur der Verbraucherbatte(r)ie(bank).

Mehrere Energielieferanten?

Wir haben bei uns an Bord einen Windgenerator und zwei Solarmodule installiert, die Lichtmaschine am Motor sowie ein Landstromladegerät. So kann es vorkommen das alle 4 laden wollen – technisch kein Problem. Solange ein entsprechendes Spannungsgefälle besteht und die Batterien die Ladeströme aufnehmen können funktioniert das, bis der Ladestrom durch voll werdende Batterien sinkt: Ab da wird der Lader mit der höchsten Spannung gewinnen, andere Versorger abschalten, denn alle diese Laderegler sind spannungsgesteuert.

Unserer Erfahrung nach wird bei Solar- und Wind bei nahezu vollen Batterien der Windregler abschalten, während der MPP-Solarregler noch weiter bis zur vollständigen Ladung nachliefert.

Dies kann durch Regler mit paralleler Zuführung von solarer und Windenergie umgangen werden, hieran stört zum einen der Umstand das wenn dieser Regler ausfällt keine alternative Ladung mehr möglich ist, weiter sind die modernen MPPT-Regler der Solarmodule in der Lage Bordbatterien nahezu vollständig zu laden: Sie können in Grenzen Strom und Spannung variieren und verfügen über eine I_oU-Kennlinie, was die meisten Windgeneratorregler nicht können. Folglich unsere Empfehlung für Wind und Solar getrennte Regler einzusetzen.

Arbeitsprinzip

Windgeneratoren bis hin zu 500 Zentimeter Rotordurchmesser sind durchweg permanentmagneterregte mehrpolige Wechselstromgeneratoren und benötigen daher keine Fremdspannung zur Felderregung wie eine Lichtmaschine. Der erzeugte Strom wird über Diodenblöcke gleichgerichtet und kann dann zur Ladung der Bordakkumulatoren dienen. Um keine Schleifkontakte zu benötigen sitzen die Magnete ►



Unser Kleinstes: Der Rutland WG504 dient vornehmlich der Ladungserhaltung.

auf dem Rotor, der feststehende Sator bildet die stromerzeugenden Kupferspulen. Zur Verringerung der zum Anlaufen benötigten Kraft werden bis zu 20 Magnete teilweise schräg zur Laufachse montiert. Die Magnete bestehen vornehmlich aus

exotisch klingenden Materialien: Neodymium-Eisen-Boron-Magnete sind vierfach wirkungsvoller als herkömmliche Weicheisenmagnete, leider auch rund dreißigmal teurer, was in Grenzen den Preis dieser kleinen Windkraftwerke erklärt.

Der Strom wird im Generatorkopf erzeugt und von dort über Schleifringe und Abnehmer an die innerhalb des Montagerohres geführten Leitungen weitergereicht, da sich die Generatorköpfe ja mit dem Wind drehen sollen.

Weil nun Windgeneratoren im Vergleich zur Rotorachse relativ wenig Drehungen um die Vertikalachse machen, liegt die Haltbarkeit der auswechselbaren Schleifkontakte bei rund 10 Jahren. Neben dem ebenfalls alle 7 bis 10 Jahre fälligen Austausches der Rotorlager sind das die einzigen Servicearbeiten – und zudem nicht einmal teuer.



Der Rutland 1200 auf dem Messmast.

Sturm Stärke 10

...hieß ein Buch über das Fastnet-Race 1979, hier spreche ich über das Überleben der Windgeneratoren bei Sturm: Alle Hersteller gewährleiten das ihr Produkt bis 12 Beaufort „aushält“, besondere Bedingungen wie extrem böige Gebiete (zum Beispiel auf Messplattformen in der Nordsee) ausgenommen. Tatsächlich

ist mir in 20 Jahren noch nicht ein Windgenerator untergekommen der durch Sturm zerstört wurde, Schäden vornehmlich an den Rotorblättern kommen durch den Einsatz von Bootshaken bei Anlegemanövern vor oder – allerdings recht selten durch unachtsame Seevögel oder Äste, die in Landnähe verweht werden.

Im übrigen empfiehlt sich auch bei längeren Abwesenheiten den Windgenerator nicht über den zumeist vorhandenen oder optionalen Stoppschalter stillzusetzen sondern ihn weiter laufen zu lassen: So machen wir das seit Jahren, hatten bereits 130 km/h Orkan an der Nordsee und immer volle Batterien wenn wir zum Schiff kommen. Will man aus Sicherheitsgründen oder weil es im Hafen nicht gestattet ist den Generator außer Betrieb setzen empfiehlt sich das herunterbremsen per Stoppschalter, dann manuell mit einem Stropp zu sichern.

Kurz zum Stoppschalter: Der hält den Rotor nicht an wie zu vermuten wäre, sondern bremst die Drehbewegung durch Kurzschluss der Spulen und mithin elektromagnetischer Bremse erheblich ab – natürlich lädt er dann auch nicht mehr.

Ein weiterer Aspekt ist das aufgrund der Konstruktion der kleinen Kraftwerke eine Überdrehzahl unbedingt vermieden werden muss: Wie bereits oben besprochen kommt es ansonsten zu Überspannung und mechanischer Überbelastung; wie der Hersteller dies bewältigt wird bei den aufgeführten Geräten erläutert.

Montage und Integration

Und damit sind wir auch schon bei der Aufstellung: Die will vorab geplant werden. Die Rotorunterseite muss so hoch gesetzt werden das man auch nicht versehentlich in den Drehkreis gerät, bei entsprechendem Wind kann das zu Verletzungen führen, also in circa 250 Zentimeter Höhe, was einen Mast von 300 Zentimeter erfordert. Gern werden die Generatoren auch auf einen Geräteträger gesetzt, bei Zweimastern auch an den Besan in rund 4 bis 6 Meter Höhe ►



Hab' den Wagen voll geladen mit Windgeratoren ...



... Klappe zu und los gehts.

an einer entsprechenden Halterung. Die Montage muss belastbar sein: Ein Windgenerator von rund einem Meter Rotordurchmesser macht rund 50 Kilogramm Druck, schlimmer aber die im Seegang entstehenden Lastwechsel die ein simples Verschrauben verbieten. Eine schlechte Idee, zumindest bei Yachten aus GFK oder Holz, ist die Montage unter Einbeziehung des Heckkorbes oder der Seereling: Durch die wechselnden Lasten werden sich diese losarbeiten, GFK delaminieren. Wir empfehlen einen Generatormast immer durchzubolzen, eine Besan-

halterung mittels Monelnieten zu montieren – bei sehr massiv gebauten Booten (Stahlschiff) kann das anders aussehen.

Haben Sie keine Angst vor einer Verschandelung Ihrer Yacht: Spätestens wenn in der Ankerbucht der Windgenerator Ihre Batterien lädt ist der Schmerz schnell verwunden, zudem nach wenigen Wochen der Anblick ein vertrauter.

Laut oder leise?

Außer den besprochenen recht leistungsarmen Vertikalgeneratoren

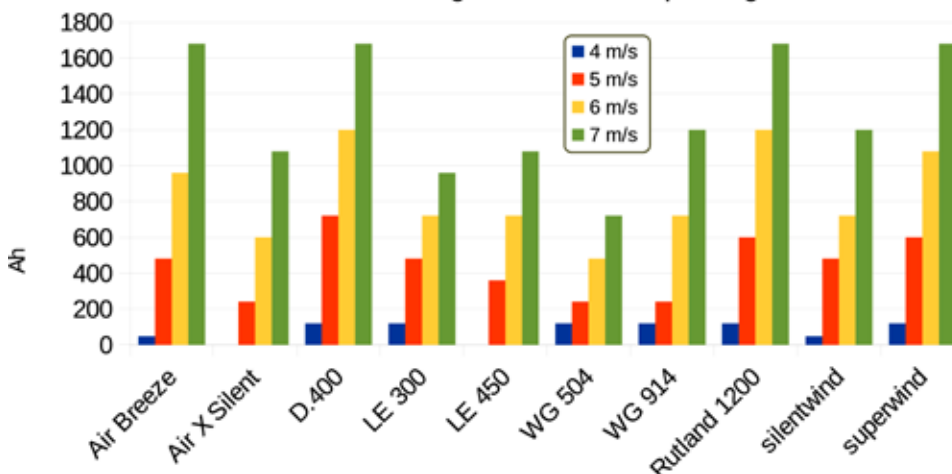
ist kein Windgenerator unhörbar, wirklich störend sind sie allerdings nicht mehr.

In den letzten Jahren kamen neue Rotorblätter zum Einsatz die über feine Erhebungen am Profil das gefürchtete Helikoptergeräusch flatternder Rotorblattspitzen gar nicht erst entstehen lassen, fünf- oder sechsblättrige Windgeneratoren haben dies Problem interessanterweise nicht. Keiner unserer Kandidaten fiel in dieser Hinsicht negativ auf. Zudem ist die eigene Yacht im Wind meist lauter, Windgeräusche im Rigg oder das klappernde Fall beim Nachbarn ist deutlich entnervender vor allem weil auf- und abschwellend.

Gegen mögliche Störungen durch eingeleitete Schwingungen helfen Dämmeinheiten die entweder auf den Montagemast oder besser direkt durch eine Schallentkoppelung der ganzen Konstruktion gemildert werden.

Ein guter Windgenerator schwingt allerdings nicht – meist ist es die Montagekonstruktion die unter bestimmten Umständen zum brummen neigt.

Zu erwartende Leistung im Mittel
Messwerte gerechnet auf Ah pro Tag




Wie haben wir getestet?

Im letzten PALSTEK-Vergleichstest 2006 haben wir uns auf untere Windgeschwindigkeiten konzentriert, diesmal sind wir fast doppelt so schnell unterwegs gewesen und haben auch das Verhalten bei Volllast gemessen.

Analog zu der Wp-Leistung bei Solarmodulen ist auch die Leistungsangabe bei Windgeneratoren häufig eine theoretische: Habe ich Sturm hatte ich vorher bereits Starkwind, also sind die Batterien relativ voll, der Windgenerator kann gar nicht seine volle Kraft ausspielen. Interessiert hat uns was die einzelnen Geräte über ihre Regelung noch erzielen. Wie vor zehn Jahren haben wir schlicht aus Kostengründen per Fahrzeug „Wind“ gemacht und auf den montierten Mast die jeweiligen Modelle mit den dazu gehörigen Reglern bestückt.

Im Auto installiert ist die Meßelektronik die recht präzise die Windgeschwindigkeit in Generatorkopfhöhe, Strom und Spannung misst und per Datenlogger auf den Laptop schreibt. Die Auswertung dieses Zahlenwustes ist fast mehr Arbeit als die eigentlichen Meßfahrten und führte zu den im folgenden dargestellten Ergebnissen.

Uns ist klar das die Messung mit einem Fahrzeug einer solchen in einem Windkanal oder langfristigen Feldversuchen unterlegen ist, aber dafür wäre der Aufwand einfach zu hoch. Da alle Windgeneratoren in gleicher Art gemessen wurden sind die gemessenen Werte in Relation zu den anderen Generatoren dennoch aussagekräftig.

Eine Messung der Lautstärke der einzelnen Windgeneratoren ist leider nahezu unmöglich: Weder am Fahrzeug noch in einem Windkanal. Ich empfehle daher an einem windreichen Tag ein paar Marinas aufzusuchen und sich selbst ein Bild über die Lautstärke der einzelnen Typen zu machen. Ist der Eigner an Bord um so besser: Fragen Sie ihn nach seinen Erfahrungen, nach Geräuschaufkommen und Qualität – das ist fast aufschlussreicher als unser Test! 



Primus Air X Silent und Air Breeze

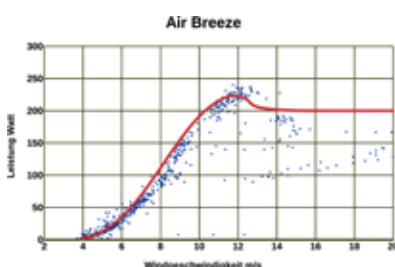
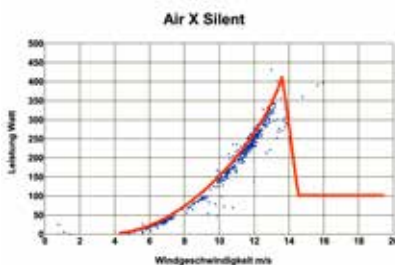
Diese Modelle gibt es im Ursprung schon seit mehr als 20 Jahren: Vorgänger war der Air X Marine von Southwest Windpower USA, der damals aufgrund seiner Lautstärke im Betrieb durch flatternde Rotorblätter den Ruf von Windgeneratoren als Krachmacher begründete. Mehr als 135.000 dieser Geräte in verschiedenen Ausführungen wurden verkauft, ein Welterfolg, denn damals gab es noch keinen echten Wettbewerb für den relativ starken, leichten und formschönen Air X.

Mittlerweile unter Primuswindpower mit vier verschiedenen Modellen am Markt hat Primus die beiden hier getesteten Marinegeneratoren modifiziert: Ist der Air Breeze als besonders früh anlaufender Windgenerator für schwachwindige Gebiete konzipiert und wird daher bei rund 200 Watt abgeregelt, so kann der Air X Silent bis zu +400 Watt leisten – wird aber bei mehr als 14m/sec-1 (ca. 7 Beaufort) auf 100 Watt heruntergeregelt um Überdrehzahl und/oder -spannung zu vermeiden.

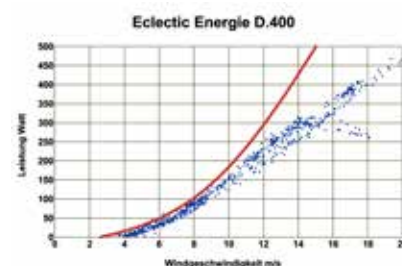
Beide werden durch den im Gehäuse integrierten Regler gesteuert, der bei Erreichen der von außen einstellbaren Ladeschlussspannung oder im Falle des Breeze auch bei Überschreiten der maximalen Leistung den Generator abremst und die Ladung einstellt. Dies geschieht nicht mehr so abrupt und häufig wie früher, die Elektronik braucht dann ein paar Minuten um sich auf die neuen Lastanforderungen einzustellen.

Bei dem Air Breeze sieht man an der Kurve, dass er bei höheren Windgeschwindigkeiten immer wieder punktuell nachlädt, der Air X Silent arbeitet ähnlich. Auch hier sind die Grafiken mehr als punktuelle Beobachtung zur Veranschaulichung der Leistungsfähigkeit zu verstehen, die komplexe Ladeelektronik verlangt eigentlich einen mehrwöchigen Dauertest. Der Aufbau der Generatoren aus ihren ordentlichen Verpackungen heraus stellt keine besonderen Anforderungen, die Anleitung ist in deutscher Sprache. Die Air werden mit den normalen schwarzen Rotorblättern ausgeliefert, optional sind die blauen des silent-wind gegen Aufpreis erhältlich.

Beide wiegen rund 7,7 Kilogramm und werden auf ein Mastrohr mit 48,3 Millimeter Außendurchmesser mit beigelegtem Einsatzgummi aufgeklemmt, der Drehkreis beträgt 610, der Rotordurchmesser 1.156 Millimeter.



Die Regler des D.400 können warm werden und sind gut im Maschinenraum aufgehoben.



D.400 Eclectic Energy

Der D.400 des englischen Herstellers ist der optisch Wuchtigste in unserer Reihe: Bei 17 Kilogramm Gewicht, einem Rotordurchmesser mit 110 Zentimeter und einem Drehkreis von 70 Zentimeter fällt vor allem das große Rotorgehäuse auf. Er hat fünf Rotorblätter mit großer Oberfläche die ihn bereits bei schwachen Winden meßbare Leistung produzieren lassen. Da er sehr laufruhig ist wird er häufig von Langzeitseglern in eher windarmen Gebieten, wie geschützten Ankerbuchten, eingesetzt. Die Regelung erfolgt über zweipolige Umschaltung bei Erreichen der am Regler einstellbaren Ladeschlussspannung auf zwei Lastwiderstände, wo dann die Energie in Wärme umgesetzt wird. Die Lastwiderstände können bei Sturm und vollen Batterien recht warm werden, das bedingt eine Installation an einem trockenen gut belüfteten Ort – will man die Abwärme nicht unter Deck haben bietet sich der (hinreichend große) Maschinenraum an, so ist es auch meist nicht weit zu den zu ladenden Batterien. Gleiches gilt allerdings für alle derartigen Shunt-Regler.

Der D.400 hat und benötigt keine Sturmsicherung gegen Überdrehzahlen: Er ist zum einen halt sehr massiv gebaut und zum anderen folgen die fünf Rotorblätter im Drehkreis so dicht aufeinander, das die entstehende Wirbelschlepe ab einer gewissen Drehzahl ein weiteres Ansteigen verhindert.

Der D.400 ist in der Lage bis zu 700 Watt zu liefern wie Tests im Windkanal der TU Delft ergeben haben, dies ist aber eher ein in der Praxis nicht erzielbarer Wert.

Die bebilderte Montageanleitung ist hilfreich: Die Rotorflügel werden zusammengesteckt, mit zwei Blechen verschraubt und der Rotor dann auf der Achse fixiert. Bei Bestellung ist das Innenmaß des Mastrohres anzugeben, es wird dann ein passender Adapter für den 20 Millimeter starken Generatorschaft mitgeliefert.



Marlec Rutland WG504, WG914i

Der englische Hersteller Marlec Industries ist ein alter Bekannter, begonnen hat er mit dem WG910 im Blechgehäuse. Mittlerweile baut Marlec Windgeneratoren von 48 bis 800 Watt Leistung, zwischen 51 und 180cm Rotordurchmesser.

Wir haben die für die Yacht geeigneten Modelle WG504 mit 48 Watt und 51 Zentimeter-, WG914i mit 200 Watt und 91 Zentimeter- und den neuen 1200 mit 480 Watt und 122 Zentimeter-Rotor in diesen Vergleich aufgenommen.

Den beiden kleineren Modellen gemeinsam ist die Ausführung in Kunststoff-Spritzguss, der WG504 hat die Rotorblätter in einem Ring als Einheit zusammengefasst. Beide kommen nicht in die Gefahr zu hoher Rotationsgeschwindigkeit, weil die sechs im Drehkreis dicht aufeinanderfolgenden Rotorblätter über entstehende Wirbelschleppen selbst aerodynamisch ausgebremst werden.

Der 914i zeichnet sich nach Angaben des Herstellers durch eine integrierte MPPT (Maximum Power Point Tracking) -Steuerung aus welche die effektive Leistung gerade im unteren Bereich deutlich erhöhen soll. Als Regler zur Batterie(bank) stehen der HRSi mit einem Ausgang und der HRDi mit zwei Ausgängen zur Verfügung, beide temperaturkompensiert und mit Anschlussmöglichkeit für 160 Watt solare Energie. Es handelt sich um pulsweitenmodulierte (PWM) Regler welche den Generator über Kurzschluss der Spulen bremsen, dies in Intervallen je nach Ladezustand.

Bei allen Marlec-Modellen fällt sofort die Streuung der Messwerte ins Auge (blaue Punkte): Dies ist der Regelungstechnik der Windgenerator-Regler geschuldet, beim kleinen WG504 fällt das besonders stark auf. Die rote Kurve spiegelt die unter normalen Bedingungen zu erwartende Leistung wieder.

Ebenso der WG914i: Wir haben beobachtet das im unteren Windgeschwindigkeitsbereich der Generator periodisch belastet und gebremst wird, die Ladeleistung steigt derweil kurz an, und vermuten die Ursache in der internen MPPT-Steuerung. Die angegebene Ladekurve (rot) ist plausibel, unsere Meßwerte bestätigen das in den Grenzen die uns meßtechnisch gesetzt sind.

Der WG504 ist sehr einfach zu montieren, der WG914i ebenso wenn man einmal das Prinzip des Verriegelns der Rotorblätter verstanden

hat. Der WG504 benötigt eine Mastaufnahme mit 31 Millimetern Innendurchmesser, der WG914i eine solche von 41 Millimeter.

Marlec Rutland 1200

Der neue Rutland 1200, verfügbar seit Mitte 2016, hat drei Rotorblätter und moderne Flügel mit kleinen Erhebungen zur Verhinderung von störendem Flattern. Er wiegt 7,8 Kilogramm, hat einen Rotor von 1.220 Millimeter und benötigt einen Drehradius von 620 Millimeter.

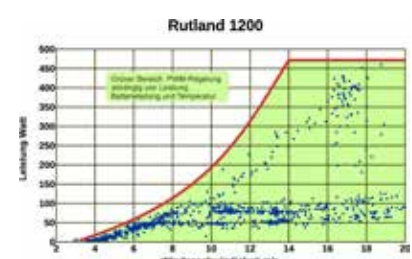
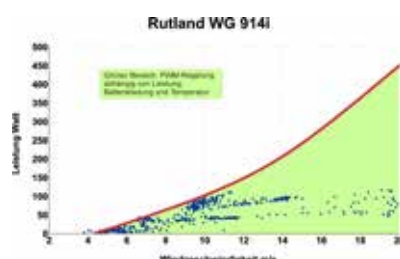
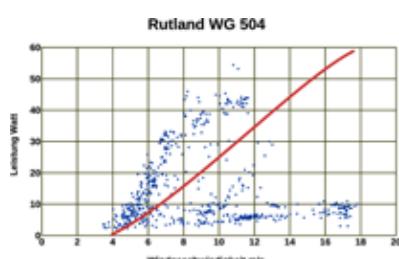
Der Regler mit zwei Ausgängen ist im Lieferumfang enthalten und als sogenannter Hybridregler auch für den Anschluss von bis zu 20 Ampere Solarleistung geeignet. Er beinhaltet eine Kombination aus MPPT- und PWM-Regelung, verfügt

über eine MPPT-Steuerung der Ladung auf beiden Kanälen, Wind und Solar. Die PWM-Funktion, in Intervallen-Kurzschluss der Feldwicklungen um den Generator abzubremsen wenn die Leistung nicht benötigt wird oder bei Starkwind zur Vermeidung von Überlast, steuert im Bereich von 13.8 bis 14.2 Volt den Windgenerator und hält ihn auf Ladung vor allem im oberen Leistungsbereich.

Wir können das anhand unserer Meßwerte (die blauen Punkte), welche in der Regelung begründet sind und dafür sorgen soll das maximale Leistung an den Batterien ankommt, nachvollziehen. Die Ladekurve des Herstellers ist gut abgebildet, die weiteren Messwerte weisen auf das Arbeitsverhalten des Reglers hin.

Die Einstellung der Ladeschlussspannung muss im Herstellerwerk erfolgen, ist somit bei der Bestellung aufzugeben. Eine Fernbedienanzeige, die auch eine Stoppmöglichkeit bietet, ist als Zubehör erhältlich und zeigt neben der Leistung des Windgenerators auch die Leistung vom angeschlossenen Solarpanel an.

Ein Mastrohr von 41 Millimeter Innendurchmesser benötigt der 1200er, die Montage anhand der englischen Anleitung stellt keine besonderen Anforderungen.





LE-300 & LE-450 Leading Edge Turbines (GB)

Seit 2005 am Markt ist LE Turbines im britischen Herefordshire, welche in kurzer Zeit ein großes Portfolio aufgebaut haben. Wir beschränken uns im Vergleich auf die beiden für Yachten besonders geeigneten Modelle LE-300 und LE-450.

Beide Windgeneratoren zeichnen sich durch geringes Gewicht (6,5 und 8 Kilogramm) und eine ungewöhnliche Rotorblattform aus, die aus eigener Anschauung erstaunlich leise nahezu ohne Windgeräusche laufen. Der Drehradius bei beiden beträgt 43,1, der Rotordurchmesser 100 Zentimeter. Die recht offene Abdeckung der Magnete und Spulen mittels einer Kunststoffkappe macht in der Marineversion laut Hersteller keine Probleme da mit Schutzlack versehen, der jahrelange Betrieb auf seegehenden Yachten bestätigt dies. Auch die Aufnahme am Montagerohr sieht auf den ersten Blick filigran aus, macht aber vermutlich auch aufgrund des geringen Generatorgewichts ihren Job einwandfrei.

Die LE-300 und LE-400 benötigen einen Regler, LE liefert dazu einen Morningstar-Regler mit zugehörigen Lastwiderständen. Die Aufnahme beider Generatoren ist für einen Mast mit 50 Millimeter Außendurchmesser vorgesehen, der Regler ist einstellbar.



Es handelt sich um einen sogenannten „Diversion Load“ - Regler mit angehängten Lastwiderständen: Jegliche Ladespannung oberhalb des einzustellenden Wertes (V) wird in Wärme umgesetzt. Das gilt leider auch für weitere Ladegeräte und Solarpaneele nebst deren Reglern: Ich empfehle daher für den kleineren LE-300 den Regler von LVM 4TB12 und für den LE-450 den 6TB12 oder den des Superwind, weil diese nur den Windgenerator beeinflussen. Die (englische) Montageanleitung stellt vor keine Probleme, lediglich das Montagemastrohr muss für die Befestigungsbolzen des Generatorfußes durchbohrt werden.



Silentwind 400+

Der aus deutsch-portugiesischer Koproduktion stammende silentwind (Rotorblätter und Generatorgehäuse sowie Montage in Portugal, Elektronik nebst Spulen und Laderegler aus China) zählt auch aufgrund seiner gefälligen Form zu den meistverkauften Geräten im deutschsprachigen Raum.

Mit einem Gewicht von 6,8 Kilogramm gehört er zu den Leichtgewichten, der Drehradius beträgt 585, der Rotor hat 1.156 Millimeter Durchmesser. Der abgesetzte Regler verfügt über eine Vielzahl von einstellbaren Parametern

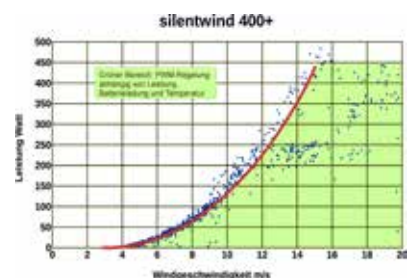
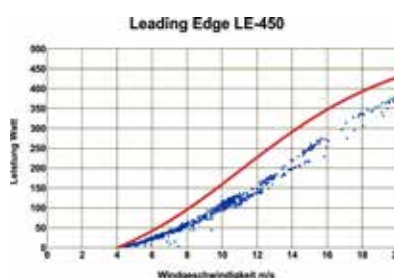
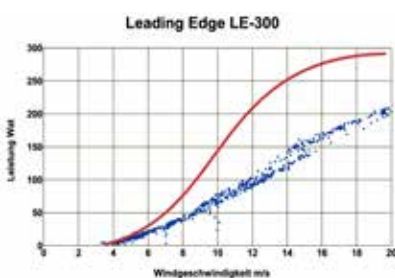
zur Ladekontrollsteuerung welche per App mittels Bluetooth einstellbar sind, nicht direkt am Regler.

Vorteil der App ist, dass man den Generator im Betrieb, „beobachten“ und die Leistungsdaten einsehen kann: Spannung und Strom sowohl am Windgenerator als auch an den Batterien, Solarstrom und -spannung. Überdies lassen sich weiter die Ladeparameter wie auch die sogenannte „Boost“-Funktion einstellen, dies hat erheblichen Einfluss auf die Arbeitsweise des Reglers der am ehesten mit einem MPPT-Regler zu vergleichen ist: Er ist in der Lage Strom und Spannung anzupassen und so die laut Hersteller maximal mögliche Ladeleistung zu erzielen.

Diese Einstellmöglichkeit beinhaltet aber auch ein gewisses Gefahrpotential: Stelle ich die Ladeschlussspannung höher bringt der Generator auch mehr Leistung an die Batterien, mit der Gefahr diese zu überladen. Man sollte wissen was man macht!

Die blauen Messpunktdaten auf der Leistungsgrafik sind das Ergebnis dieser Art Regelung, die rote Linie die Normal-Ladekurve. Zusätzlich sind bis zu 300 Watt Solarleistung anschließbar, weiter gibt es zwei bis 10 Ampere belastbare Ausgänge die nur bei Betrieb des Windgenerators aktiv sind.

Sauber und aufgeräumt wie die Verpackung geht die Montage vonstatten, keine Probleme oder Unsicherheiten, die Installationsanleitung ist vollständig. Der Silentwind wird auf ein Mastrohr 48.3 Millimeter Außendurchmesser mit beigelegtem Einsatzgummi geklemmt. Übrigens: Die Ähnlichkeit des Silentwind mit den Air-Modellen ist nicht zufällig, begonnen hat Silentwind 2008 mit der Produktion von leiseren Rotorblättern für den damaligen Air X von Southwest Windpower, seit 2010 gibt es die Eigenentwicklung

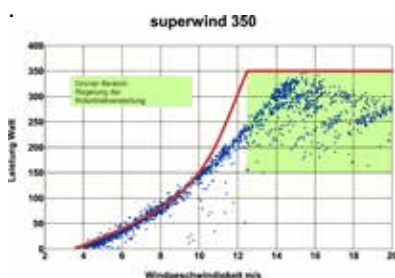




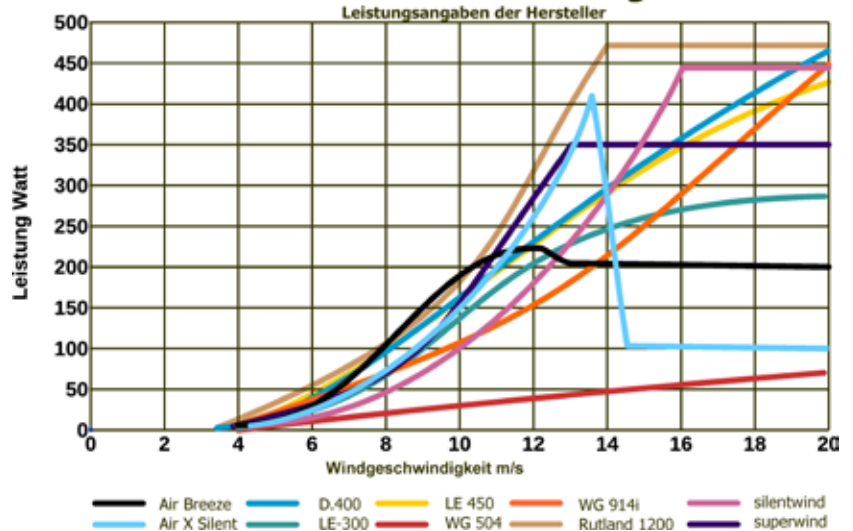
Superwind 350

Aus Deutschland stammt der Superwind, von zwei segelnden Ingenieuren welche aus dem professionellen Windgenerator-Umfeld kommen. Das sieht man auch: So ist der Generator der einzige mit drehzahlgesteuerter Rotorblattverstellung über Fliehkraft, sehr solide gebaut und hochpräzise. Auch der Regler wurde im Hause entwickelt und in Deutschland gebaut, er verfügt über eine Temperaturkompensation (sinkende Ladespannung bei steigenden Temperaturen). Der Regler muss im Werk eingestellt werden, also ist vor Bestellung das Datenblatt der Batterien zu lesen.

Mit 11 Kilogramm ist er etwas schwerer als die meisten Mitbewerber, dies ist jedoch der soliden Bauweise geschuldet und auf einer seegehenden Yacht sicher kein Ausschlusskriterium. Durch die doppelte Regelung (Rotorblattverstellung und Shunt-Type – Regler auf Lastwiderstand, pulsweitenmoduliert) lässt sich eine bemerkenswert stetige Ladekurve erzielen, wie unsere Messwerte auch zeigen. Auch gut zu sehen der Punkt wo die Rotorflügel angestellt werden, ungefähr bei 14 bis 15 m/s. Die Ladung bricht dann nicht ein, sondern wird über den Regler auf recht hohem Niveau gehalten. Verpackung und Manual sind einwandfrei, die Montage gestaltet sich einfach. Der Superwind wird in Mastrohre mit 44.3 oder 56.3 Millimeter-Innendurchmesser (48er- oder 60er-Industrierohr) gesteckt und mit Madenschrauben gesichert. Er hat einen Rotordurchmesser von 1.220 bei einem Drehradius von 556 Millimetern. Mit der soliden Bauweise empfiehlt sich der Superwind für die Nordwestpassage, Kap Hoorn und was es sonst noch an anspruchsvollen Seegebieten gibt.



Alle Generatoren im Vergleich



Mess- und Regeltechnik

Dieses Mal gab es im Vergleich zu 2006 etliche Klippen zu umschiffen, was uns mehr oder minder auch geglückt ist: Die modernen Regler der Rutland und des Silentwind lassen eine Messung der Leistung des Windgenerators nicht so einfach zu wie damals. Wir haben diesmal die Leistung der Windgeneratoren mit dem jeweils dazugehörigen Regler nach demselben, vor den Batterien, abgegriffen, um auch das Verhalten des Reglers besonders bei höheren Windgeschwindigkeiten zu ermitteln. 2006 war die Leistungsmessung vor dem Regler und ergab die volle Leistung des Windgenerators als Ergebnis. Da nun aber intelligente MPP-ähnliche Regler ja nach Ladezustand der Batterien, Temperatur und Leistung den Generator selbst beeinflussen ist es diesmal nicht so einfach und in der Aussagekraft zu interpretieren. Wir haben oft keine einfachen, stetigen Messkurven als Ergebnis erhalten, sondern Punktwolken – eben je nach Leistung und Ladung.

Macht ein einfacher Regler wie zum Beispiel der Shunt-Regler von LVM bei Erreichen der Ladeschlussspannung zu, steuert also pulsweitenmoduliert einen mehr oder weniger großen Anteil des Ladestromes auf die Lastwiderstände um die Batterien nicht zu überladen, begrenzen die Regler der Rutland, Silentwind und der Air-Modelle die Leistung und auch die Drehzahl. Das ist zum einem dem Umstand geschuldet das sie bei hohen Drehzahlen nicht in den Überlastbereich gelangen, zum anderen soll eine bessere













Die Leistungen der Windgeneratoren wurden vor den Batterien abgegriffen. Die Werte sind als blaue Punktwolken sichtbar.

Füllung der Batterien erreicht werden. Der Regler des Silentwind arbeitet gar mit einem integrierten DC-DC-Wandler der in Grenzen Strom und Spannung variieren kann, der des neuen Rutland 1200 hat gar eine Kombination aus MPPT- und PWM-Regler verbaut. Dies abzufangen würde für fast jeden Generator einen eigenen angepassten Meßaufbau erfordern und den Rahmen dieser Marktübersicht sprengen.

Aus diesem Grund zeigen wir in den Leistungsgrafiken unsere Messergebnisse als blaue Punkte, die Werksangaben der Hersteller als rote Linie – welche auch nachvollziehbar der tatsächlichen Leistung entsprechen. Abweichungen sind ursächlich dem Umstand zuzuschreiben das wir nicht mit konstantem Batteriefüllgrad und somit gleichbleibender Last arbeiten konnten, zudem eben andersartige Regler unterschiedlich arbeiten. Jeder Generator wurde rund eine Stunde mit wechselnder Geschwindigkeit über den Messparkour gefahren.

Windgeneratorentest: Vergleichstabelle

				
	Eclectic Energy	Leading Edge Turbines	Leading Edge Turbines	Marlec / Rutland
Modell	D.400	LE-V300 Marine	LE-V450 Marine	WG 504
Gebaut seit	2005	2005	2014	2008
Leistung maximal in Watt	700	300	450	80
bei Drehzahl	1.400	3.500	2.500	keine Angabe
Anzahl Magnete	12	8	8	2
Magnetart	Hi energy ferrite	Neodymium	Neodymium	Ferrite
Anzahl Feldwicklungen	9	9	9	2
Wechselstrom AC oder Gleichstromgenerator DC	AC	AC	AC	AC
Phasen / Phases	3	3	3	3
Gehäusematerial	Aluminiumguss, pulverbeschichtet	Kunststoff- und pulverbeschichtete Aluminiumbleche	Kunststoff- und pulverbeschichtete Aluminiumbleche	Kunststoff
Material Rotorblatt	Spritzguss Nylon mit 30% Glasfibranteil	Glasfaserverstärktes Nylon	Glasfaserverstärktes Nylon	Glasfaserverstärktes Nylon
Rotorlager Größe mm	35 x 17 x 10	32 x 12 x 10	32 x 12 x 10	32 x 15 x 9
Lager gekapselt	ja	ja	ja	ja
Gewicht kompletter Generator in kg	17	6,5	8	3,5
Durchmesser Rotor mm	1.100	1.000	1.000	510
Drehkreis-Radius horizontal mm	700	431	431	304
Mastaufnahme innen / außen	über Adapter an jeden Innendurchmesser anpassbar	außen 48,30 oder 50,00 mm	außen 48,30 oder 50,00 mm	innen 31 mm
Maximaler Mastdurchmesser mm	75	60	60	38,8
Anzahl Rotorblätter	5	3	5	6
Rotorblätter Gewicht angeglichen	ja	ja	ja	ja
Werksgarantie Jahre	2	5	2	2
Regler Modell / Art	LVM 6TB, shunt type	LVM 4TB, shunt type	TriStar 45, Parallel zu Batterien, Dump Load	HRS/HRSi/HRDi PWM
Regler Ladeschlussspannung einstellbar	ja	ja	ja	Bei HRDi-Regler
Besonderheiten				
Verfügbare Spannung V	12, 24, 48	12, 24, 48	12, 24, 48	12 und 24
Preis Basismodell UVP Euro	1.799,00	999,00	1.349,00	469,00
Preis Regler ab UVP Euro	399,00	279,00	579,00	129,00

					
Marlec / Rutland	Marlec / Rutland	Primus Windpower	Primus Windpower	Silentwind	Superwind
WG914i	WG1200	Air X Silent	Air Breeze	Silentwind	Superwind 350
2011	2015	2001	2008	2010	2004
350	500	400	160	420/450	350
keine Angabe	keine Angabe	1.100	1.100	1.800	1.300
2	20	12	12	12	6
Ferrite	Neodymium	Neodymium	Neodymium	Neodymium	Neodymium
keine Angabe	keine Angabe	je nach Spannung	je nach Spannung	12	18
AC	AC	AC	AC	AC	AC
3	3	3	3	3	3
Kunststoff	Eloxiertes Aluminium	Aluminiumguss, Lackierung mit Luftfahrtlack	Aluminiumguss, Lackierung mit Luftfahrtlack	Aluminiumguss, zweifach pulverbeschichtet	Aluminiumguss seewasserbeständig AlMg5 Si, pulverbeschichtet
Glasfaserverstärktes Nylon	Glasfaserverstärktes Nylon	Spritzguss faserverstärkt	Spritzguss faserverstärkt	handlamiert aus High-Tensil Kohlefasermatten	Polyester Kohlefaserverstärkt
32 x 15 x 9	42 x 20 x 12	keine Angabe	keine Angabe	40 x 17 x 12	47 x 20 x 14
ja	ja	ja	ja	ja	ja
11,6	7,8	7,7	7,7	6,8	11,5
910	1.220	1.156	1.150	1.156	1.220
567	620	610	610	585	556
innen 41 mm	innen 41 mm	außen 48,3 mm	außen 48,3 mm	außen 48,2 mm minimum innen 45,2 mm	innen 55,7/56,3 55,0/44,3 mm
48,5	48,5	50	50	50	70
6	3	3	3	3	3
ja	ja	ja	ja	ja	ja
2	2	5	5	3	3
HRS/HRSi/HRDi	MPPT temperaturkompensiert	integrierte Ladesteuerung mit Drehzahlbegrenzer	integrierte Ladesteuerung mit Drehzahlbegrenzer	externe Ladesteuerung mit Drehzahlbegrenzer im Lieferumfang	Superwind, shunt type, temperaturkompensiert
Bei HRDi-Regler	Werkseinstellung anpassbar	ja	ja	ja	Werkseinstellung anpassbar
Arctic/Antarctic Version	Eingang für Solar bis 240 Watt	Optional mit den blauen leiseren Rotorblättern lieferbar	Optimiert auf niedrige Windgeschwindigkeiten	Eingang für Solarpaneele bis 300 W, Bluetooth-Schnittstelle	Leistungsregelung und Drehzahlbegrenzung über Rotorblätterverstellung
12 und 24	12 und 24	12, 24, 48	12, 24, 48	12, 24, 48	12, 24, 48
999,00	1.690,00	1.720,00	1.720,00	1.584,00	1.675,00
129,00	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten	410,00