

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
20. Mai 2010 (20.05.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2010/054844 A2**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
*F03D 9/00* (2006.01) *F03D 9/02* (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/008156
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
17. November 2009 (17.11.2009)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2008 057 776.6  
17. November 2008 (17.11.2008) DE
- (72) Erfinder; und
- (71) Anmelder : **BROCKS, Tim** [DE/DE]; Schirumer Weg  
4b, 26605 Aurich (DE).
- (74) Anwalt: **GROSSE, Wolf-Dietrich**; Valentin, Gihlske,  
Große, Klüppel, Hammerstraße 3, 57072 Siegen (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,  
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO,

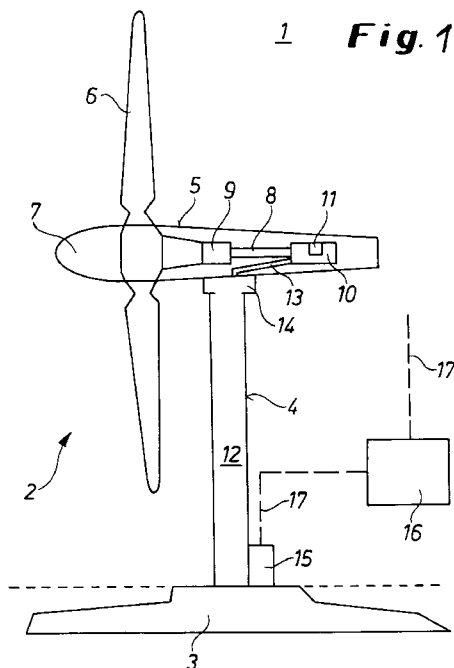
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,  
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,  
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,  
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,  
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,  
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT,  
TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,  
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,  
ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,  
TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,  
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,  
LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI,  
SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,  
GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:  
— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu  
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz  
2 Buchstabe g)

(54) Title: METHOD FOR OPERATING A WIND TURBINE AND WIND TURBINE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER WINDKRAFTANLAGE UND WINDKRAFTANLAGE



(57) Abstract: The invention relates to a method for operating a wind turbine and to a wind turbine (2) comprising a tower (4) that is secured in a foundation (3) and a nacelle (5) that is supported by the tower and is provided with a rotor (6), in addition to a compressor unit (10) that is situated in the nacelle and is connected to a compressed air accumulator, the compressed air accumulator supplying compressed air to an electric generator in order to convert the air into electrical energy and to homogenize the energy production on the output side. The invention provides a method of this type and a wind turbine of this type which permit a more efficient operation and a construction that is significantly simpler and independent of location, in particular for medium-term energy production intervals. To achieve this, the tower (4) is sealed and the compressed air generated by the compressor unit (10) is fed to said tower for intermediate storage. The tower is sealed off from the exterior and designed as a tower accumulator (12) and the compressor unit (10) that is connected to the rotor (6) by means of a drive shaft (8) and an interconnecting gearbox (9) has a pressure line (13) connected to the tower accumulator.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Windkraftanlage und eine Windkraftanlage  
[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/054844 A2



---

(2), die einen im Fundament (3) verankerten Turm (4) und eine von diesem getragene, mit einem Rotor (6) versehene Gondel (5) sowie eine in der Gondel angeordnete Kompressoreinheit (10), die an einen Druckluftspeicher angeschlossen ist, umfasst, wobei der Druckluftspeicher zur Vergleichmäßigung der ausgangseitigen Energieproduktion die Druckluft zur Umwandlung in elektrische Energie an einen elektrischen Generator abgibt. Es soll ein solches Verfahren und eine solche Windkraftanlage geschaffen werden, die insbesondere für mittelfristige Energieproduktionsintervalle eine effizientere Betriebsweise sowie eine deutlich einfachere und ortsunabhängige Bauweise ermöglichen. Dies wird dadurch erreicht, dass der Turm (4) abgedichtet und in diesen die von der Kompressoreinheit (10) erzeugte Druckluft zur Zwischenspeicherung eingespeist wird. Der Turm ist dazu nach außen abgedichtet als Turmspeicher (12) ausgebildet, wobei die über eine Antriebswelle (8) unter Zwischenschaltung eines Getriebes (9) mit dem Rotor (6) verbundene Kompressoreinheit (10) eine an den Turmspeicher (12) angeschlossene Druckleitung (13) aufweist.

## Verfahren zum Betreiben einer Windkraftanlage und Windkraftanlage

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Windkraftanlage und eine Windkraftanlage, die einen im Fundament verankerten Turm und eine von diesem getragene, mit einem Rotor versehene Gondel sowie eine in der Gondel angeordnete Kompressoreinheit, die an einen Druckluftspeicher angeschlossen ist, umfasst, wobei der Druckluftspeicher zur Vergleichmäßigung der ausgangsseitigen Energieproduktion die Druckluft zur Umwandlung in elektrische Energie an einen elektrischen Generator abgibt.

Der Entwicklungsstand der Technik bei den Windkraftanlagen ist sehr weit fortgeschritten und auf hohem Niveau. Allerdings sind die bekannten Standardanlagen, wie Megawatt- und Multimegawattklassen, technisch sehr aufwendig und kostenintensiv. Hinzu kommt die teure, komplexe und mitunter anfällige Leistungselektronik (Frequenzumrichtertechnologie), die zunehmend Anwendung findet.

Der Aufwand begründet sich darin, dass Wind eine intermittierende Energiequelle darstellt, mit dem Problem der diskontinuierlichen Stromproduktion, die sich am variierenden Windangebot orientiert. Solchermaßen erzeugter Strom steht selbst in Gegenden mit starken Windressourcen nicht regelmäßig und nach Bedarf zur Verfügung. Die Windkraftanlagen werden daher häufig gedrosselt, um auf Schwankungen der Windenergie zu reagieren. Bei zu schwacher Windkraft ist zudem Regelenergie erforderlich, für die häufig ein sehr großer Anteil der installierten Windkraftleistung vorgehalten werden muss. Außerdem sind die Übertragungsmöglichkeiten an vielen Standorten sehr eingeschränkt, und neue Leitungen sind teuer und nur schwer, wenn überhaupt, zu errichten.

Um diese Schwierigkeiten zu überwinden, wird Windenergie speicherbar gemacht, so dass sie auf Abruf verfügbar ist. Hierzu sind CAES (Compressed Air Energy Storage) – Kraftwerke, d.h. eine Druckluftspeicherung mit einer Speicherkapazität von Stunden bis zu Tagen bekanntgeworden (vgl. beispielsweise „Das Buch der Synergie – Teil C – Druckluft-Speicher (pneumatischer Speicher)“. Bei solchen Druckluftspeicherkraftwerken handelt es sich dem Grunde nach um ein Gasturbinenkraftwerk, das Spitzenlastenergie bereitstellt. Es wird die Energie genutzt, die in komprimierter Luft steckt. In Schwachlastzeiten wird mit einem elektrisch angetriebenen Verdichter Druckluft in einer unterirdischen Kaverne gespeichert. Bei Spitzenlast, d.h. in Zeiten einer hohen Energienachfrage, wird die Druckluft in eine Gasturbine geleitet, die wegen des fehlenden Verdichters ihre volle Leistung an den angekuppelten Generator abgibt. Da bei der Expansion der Luft wieder Wärme zugeführt werden muss, um eine Vereisung der Turbinen zu vermeiden, wird immer eine Kombination aus Druckluftspeicher und Gasturbinenkraftwerk verwendet. Der in solchen technisch aufwendigen Kraftwerken erzeugte Strom ist sehr teuer und wird daher nur zu bestimmten Zeiten zur Abdeckung von Spitzenlasten eingesetzt.

Um den Nutzwert der CAES-Windanlagen zu steigern und für einen verbreiteten Einsatz wirtschaftlich effizienter zu machen, ist durch die zuvor genannte Literaturstelle eine Weiterentwicklung bekannt geworden, nämlich die DWPS (Dispatchable Wind Power System)-Technologie. Diese sieht vor, wie gattungsgemäß angegeben, dass die Windkraftanlage anstatt der sonst in den Gondeln üblichen Generatoren mit windgetriebenen, proprietären Kompressoren ausgerüstet ist. Im Gegensatz zu den bisherigen Konzepten produzieren die Windräder somit keinen Strom, sondern gewinnen direkt mit dem in der Gondel angeordneten Druckluft-Kompressor Druckluft. Die Turbinen der DWPS-Windkraftanlage wandeln die kinetische Energie des Windes somit ohne Hilfe von Generatoren in den Gondeln direkt in potentielle Energie aus Druckluft um. Die Druckluft wird in unterirdischen Rohrleitungen, in geologischen Speichermedien wie Salzstöcken, leeren Gas- und

Ölfeldern oder in geeigneten Höhlensystemen gespeichert. Die Verlustbetrachtungen für derart offene Systeme und Konzepte gestalten sich allerdings schwierig und riskant.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Windkraftanlage der eingangs genannten Art zu schaffen, die insbesondere für mittelfristige Energieproduktionsintervalle (in Stundenbereichen) eine effizientere Betriebsweise sowie eine deutlich einfachere und ortsunabhängige Bauweise ermöglichen.

Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass der Turm abgedichtet und in diesen die von der Kompressoreinheit erzeugte Druckluft zur Zwischenspeicherung eingespeist wird. Es wird somit erfindungsgemäß die mittels des Kompressors, z.B. ein Schraubenkompressor, statt elektrischem Strom primärseitig erzeugte Druckluft direkt am Ort des Geschehens, nämlich in dem ohnehin bereits vorhandenen Turm gespeichert. Hierbei liegt es im Rahmen der Erfindung, dass nicht der gesamte Turm abgedichtet und unter Druck gesetzt wird, beispielsweise 10 % bis 20 % des Turmvolumens drucklos bleiben, z. B. um dort eine elektrische Schaltanlage unter zu bringen. Indem zur Energiespeicherung keine weiteren, zusätzlichen Elemente erforderlich sind, insbesondere keine Abhängigkeit zu geologischen Speichermedien besteht, lässt sich in einfacher Weise die im abgedichteten Turm zwischengespeicherte Energie zur Vergleichmäßigung der Energieeinspeisung nutzbar machen. Die Fluktuation und Diskontinuität des Windes kann bis hin zu mehreren Stunden vergleichmäßig, d.h. ausgeglichen werden. Der baulich unabdingbare Turm bekommt somit eine weitere Nutzung, und zwar erfindungsgemäß als Speicher bzw. Druckluftspeicher. Der Turm kann gleichzeitig in einfacher Weise isoliert werden, womit er auch wärmetechnisch, d. h. gegen Wärmeverlust, effizienter wird.

Zur weiteren Verbesserung des Wärmehaushalts im Turmspeicher ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass die Druckluftspeicherung zum Betrieb mit einem Wärmespeicher kombiniert wird. Dazu ist der Wärmespeicher in dem zur Zwischenspeicherung der Druckluft vorhandenen Turminnenraum integriert. Der Turm der Windkraftanlage erfüllt somit eine Doppelfunktion, nämlich zum einen die Aufnahme von Luft unter Überdruck und zum anderen die Aufnahme des Wärmespeichers, so dass für diesen kein separater Druckbehälter benötigt wird.

Der vorteilhaft aus wärmebeständigen und luftdurchlässigen Elementen bestehende Wärmespeicher wird von der Druckluft bei der Einleitung in den und bei der Ausleitung aus dem Turmspeicher im Gegenstrom durchströmt, wobei zwischen der als Druckbehälterwandung fungierenden Turminnenwand und den Wärmespeicherelementen ein Zwischenraum vorgesehen ist, der mit wärmedämmenden Materialien ausgefüllt ist.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass dem Wärmespeicher heiße Druckluft aus der Kompressoreinheit zugeleitet wird. Der Wärmespeicher nimmt dabei Wärme aus der heißen Druckluft auf, wodurch die Luftdichte der Druckluft ansteigt und somit eine größere Druckluftmasse im Turm gespeichert werden kann.

Eine bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass die aus dem Wärmespeicher ausströmende Druckluft über eine Expansionsmaschine geleitet wird. Die Expansionsmaschine, welche direkt einen Generator zur Stromerzeugung antreiben kann, wird durch Expansion der Druckluft angetrieben. Beim Ausleiten der Druckluft aus dem Turmspeicher und Zuleiten in die Expansionsmaschine durchströmt die Druckluft den Wärmespeicher und nimmt dabei Wärme auf, wodurch sich die für die Expansion zur Verfügung stehende Energie der Druckluft vergrößert und vorteilhaft eine Eisbildung in der Expansionsmaschine vermieden wird.

Optional kann in der Gondel eine Maschine vorgesehen werden, die als Kompressor wie auch zur Expansion dient.

Weiterhin ist zur Temperaturregelung der im Turm gespeicherten Druckluft erfindungsgemäß vorgesehen, dass die aus dem Wärmespeicher austretende, heiße Druckluft mit direkt aus dem Turmspeicher entnommener, kalter Druckluft gemischt wird. Diese Maßnahme empfiehlt sich insbesondere bei zusätzlich elektrisch nachgeheizter Wärmespeichermasse.

Eine vorteilhafte Ausführung der Erfindung sieht vor, dass alle oder zumindest mehrere Windkraftanlagen eines Windparks die in den Türmen zwischengespeicherte Druckluft auf einen zentralen Druckluftmotor mit gekoppeltem drehzahlkonstantem Asynchrongenerator speisen. Es ist somit ein einfacher, drehzahlvariabler Betrieb der Windkraftanlage mit Entkopplung zur konstanten Drehzahl (Frequenz) des nachgeschalteten, die in der Druckluft enthaltene Energie in elektrische Energie umwandelnden, elektrischen Generators möglich. Alle oder mehrere Windenergieanlagen eines Windparks können ihre Druckluft ohne Verminderung von elektrischen Verlusten und unter Erhöhung der Effizienz auf den zentralen Druckluftmotor mit gekoppeltem Asynchrongenerator speisen.

Hierbei wird vorteilhaft mittels Ventilen ein immer gleicher Druck am Asynchrongenerator gewährleistet, der somit im Betrieb fluktuationsfrei mit immer konstanter elektrischer Leistung einspeist. Im Vergleich zu den komplexen Generatoren der bekannten Windenergieanlagen sind Asynchrongeneratoren sehr einfache, robuste und wartungsarme Generatoren und produzieren einen qualitativ höherwertigen elektrischen Strom mit deutlich niedrigeren Kosten.

Die Erfindung eröffnet ein Speicher- und Energiemanagement im Verbund von mehreren Windkraftanlagen im Windpark oder im Verbund von mehreren Windparkprojekten mit einer Vielzahl neuer Möglichkeiten und eine Betriebsweise in

diversen Modi. So beispielsweise die Energiezwischen­speicherung im Turm bei paralleler Erzeugung von elektrischer Energie am Asynchrongenerator, die Zwischen­speicherung von Energie im Turm, im Bypass die Produktion von elektrischer Energie am Asynchrongenerator oder Sonderbetriebsformen, z.B. Teillastbetrieb, Spitzenlastbetrieb (Überlastbetrieb), Betrieb bei Kurzschluss (Netzfehlern), Betrieb zur Unterstützung des Versorgungsnetzes oder zur Windparkregelung und –optimierung.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird mit einer Vorrichtung erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass der Turm nach außen abgedichtet als Turmspeicher ausgebildet ist und die über eine Antriebswelle unter Zwischenschaltung eines Getriebes mit dem Rotor verbundene Kompressoreinheit eine an den Turmspeicher angeschlossene Druckleitung aufweist, wobei der Turmspeicher nach einer bevorzugten Ausführung der Erfindung an eine Einheit aus einem Druckluftmotor mit gekoppeltem drehzahlkonstantem Asynchrongenerator angeschlossen ist. Abgesehen davon, dass keine ortsabhängigen Speichermedien mit den dafür erforderlichen Leitungen erforderlich sind, entfallen anlagenseits durch den Einsatz von Druckleitungen sowie seitens der Anbindung einzelner Windkraftanlagen an die Einheit aus Druckluftmotor und elektrischem Asynchrongenerator sämtliche teureren Kabelverbindungen, wie Kupfer- oder Aluminiumkabel.

Nach einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist eine am oberen Ende des Turms vorgesehene Windrichtungsnachführung mit integrierter Druckluftübergabe von der Kompressoreinheit zum Turmspeicher ausgebildet. Da im Energieteil keine anzusteu­ernde Leistungselektronik existiert, können aufwendige und kostenintensive Blattverstellungssysteme entfallen. Vielmehr reichen einfache Stallregelungen (passive Blattregelungen) aus, weil auf aufwendige Regelein­griffe seitens der Rotorblätter verzichtet werden kann.

Die Windrichtungsnachführung weist einen oberhalb des abgedichteten Turmsegmentes aufgesetzten Drehkranz auf, der wahlweise mit aktiver (motorischer) oder passiver Windrichtungsnachführungseinheit ausgerüstet wird. Weiter befindet sich in diesem oberen Turm-Gondel-Verbindungselement die Drucklufteinleitung mit Ventil (Rückschlagventil) zusammen mit einer Wärmerückgewinnungseinheit. Die Wärmerückgewinnungseinheit dient zur Effizienzerhöhung und der Vorwärmung der Druckluft im Turm für den Expansionsprozess im Druckluftmotor. Die Wärmerückgewinnung arbeitet nach dem Wärmetauscherprinzip in Wärmepumpentechnologie unter Ableitung der Wärme des Kompressors durch das Turm-Gondel-Verbindungselement hin zur Druckluft im Turmspeicher. Auch eine Verdichterstufe kann hier im Turm-Gondel-Verbindungselement eingebaut werden. Die Druckluftleitungen werden in Verdrilltechnik im Segment Windrichtungsnachführung mit integrierter Druckluftübergabe (Turm-Gondel-Verbindungselement) eingebaut. Dies erlaubt bis zu dreieinhalb Umdrehungen der Gondel, jeweils in beiden Drehrichtungen der Gondel.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass im Turmspeicher ein aus einem wärmebeständigen und durchströmbaren Material bestehender Wärmespeicher integriert ist. Der Wärmespeicher besteht zum Beispiel aus aufgestapelten Lochziegeln, die von der Druckluft bei der Einleitung in den und bei der Ausleitung aus dem Turmspeicher in jeweils entgegengesetzter Richtung durchströmt werden. Dadurch, dass der Wärmespeicher als integraler Bestandteil des Turmspeichers ausgebildet ist, entfällt die zusätzliche Anordnung eines externen Druckbehälters.

Zusätzlich zum Turmspeicher kann erfindungsgemäß ein unterirdisches Speicherreservoir vorgesehen werden, dass über Druckleitungen mit dem Turmspeicher verbunden ist. Dies bietet zum einen die Möglichkeit, das unterirdische Speicherreservoir mit gleichem Überdruck dem Turmspeicher parallel zu schalten, wobei

der Wärmespeicher trotz vergrößerter Speicherkapazität im Turmspeicher verbleibt.

Zum andern kann das unterirdische Speicherreservoir unter höherem Überdruck stehen als der Turmspeicher, wodurch eine zweistufige Kompression und Expansion der Druckluft erfolgt. Es lässt sich damit ein Betrieb der Windkraftanlage mit einer zwischen dem Turmspeicher und dem unterirdischen Speicherreservoir angeordneten Verdichter- und Expansionsstation erreichen, die vorteilhaft einen zweiten Wärmespeicher und/oder einen Kühler für die Kompression sowie eine Feuerungseinrichtung für die Expansion der Luft aufweisen kann.

Damit ist es beispielsweise möglich, die Luft im Turmspeicher mit 8 bis 13 bar Überdruck zu speichern, wohingegen die Luft im unterirdischen Speicherreservoir mit 50 bis 120 bar Überdruck gespeichert werden kann. Sowohl im Wärmespeicher des Turmspeichers als auch im Wärmespeicher der Verdichter- und Expansionsstation reicht dabei eine Speicherwärme von maximal 350°C aus, so dass ohne weiteren Entwicklungsaufwand mit den Werkstoffen und Bauweisen herkömmlicher Kompressoren und Dampfturbinen gearbeitet werden kann.

Auch können hier die einzelnen Windkraftanlagen eines Windparks mit einem gemeinsam nutzbaren, unterirdischen Speicherreservoir verbunden werden, wobei dann eine zentrale Verdichter- und Expansionsstation vorgesehen ist, die mit elektrischer Energie, beispielsweise von den Generatoren der Windkraftanlagen, versorgt wird.

Bei den Windkraftanlagen der vorstehend beschriebenen Ausführungsform ist es somit möglich, über die Druckluftmenge im Turmspeicher kurzfristige Windenergie- und Bedarfsschwankungen im Minutenbereich und mittels der größeren Druckluftmenge im unterirdischen Speicherreservoir Windenergie- und Bedarfsschwankungen im Stundenbereich auszugleichen.

Eine alternative Ausführungsform der Windkraftanlage sieht dazu erfindungsgemäß vor, dass in der Gondel eine zusätzlich zu der Rotorachse mit dem Getriebe verbundene, zuschaltbare Expansionsmaschine angeordnet ist und das Getriebe ausgangsseitig mit einem Generator sowie diesem nachgeschalteten, ebenfalls zuschaltbaren Kompressor verbunden ist. Durch die Windenergie wird über den Rotor der Generator angetrieben und elektrische Energie in ein Stromnetz eingespeist. In Zeiten von Windenergieüberschuss wird über den zuschaltbaren Kompressor zusätzlich Druckluft in den Turmspeicher geleitet. Bei kurzen Perioden mangelnder Windenergie wird die gespeicherte und beim Durchströmen des Wärmespeichers erwärmte Druckluft der Expansionsmaschine zugeführt. Die in der Folge durch Expansion der Druckluft in Rotation versetzte Expansionsmaschine treibt dann den Generator zur Erzeugung elektrischer Energie an.

Zur Einleitung der Druckluft in den Turmspeicher und den Wärmespeicher sowie zur Ableitung der Druckluft aus dem Wärmespeicher und gleichzeitiger Beaufschlagung der Expansionsmaschine, ist sowohl der zuschaltbare Kompressor als auch die zuschaltbare Expansionsmaschine mit dem Turmspeicher über Druckleitungen verbunden.

Weitere Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus den Patentansprüchen und der nachfolgenden Beschreibung, in der Ausführungsbeispiele des Gegenstandes der Erfindung näher erläutert sind. Es zeigen:

Fig. 1 eine Prinzipdarstellung einer Windkraftanlage in der Bauweise mit horizontaler Rotationsachse (Horizontalläufer). Als optionale Bauform kann gleichermaßen ein Turm mit vertikaler Rotationsachse (Vertikalläufer) zum Einsatz kommen;

Fig. 2 eine Prinzipdarstellung einer Windkraftanlage in der Bauweise mit horizontaler Rotationsachse (Horizontalläufer), bei der ein Wärmespeicher integriert ist; und

Fig. 3 eine Prinzipdarstellung der Windkraftanlage gemäß Fig. 2, die demgegenüber zusätzlich mit einem unterirdischen Druckluftspeicher verbunden ist.

Von einem mit Windkraft betriebenen Kraftwerk zeigt die Figur 1 in einer schematischen Prinzipdarstellung als Einzelheit eines Windparks 1 eine Windkraftanlage 2 als Windenergieanlage. Diese besitzt einen bodenseitig im Fundament 3 verankerten Turm 4, auf dem oben eine Gondel 5 angeordnet ist. Ein Rotorblatt 6 bzw. Rotor der Windenergieanlage 2 ist in einer Rotornabe 7 der Gondel 5 gelagert.

Das Rotorblatt 6 ist über eine Antriebswelle 8 mit Bremseinheit unter Zwischenschaltung eines Getriebes 9 mit einer Kompressoreinheit 10 verbunden. Dieser ist eine Steuer- und Überwachungseinheit 11 zugeordnet.

Zur Druckluftspeicherung ist die Windenergieanlage 2 unabhängig von geologischen Voraussetzungen, wie Kavernen oder dergleichen unterirdischen Hohlräumen, denn der Turm 4 selbst ist nach außen völlig abgedichtet und in seinem Inneren als Turmspeicher 12 zur Einspeisung von mit der Kompressoreinheit 10 erzeugter Druckluft ausgebildet. Von der Kompressoreinheit 10 führt dazu eine Druckleitung 13 in den Turmspeicher 12, wobei die Druckluftübergabe in einer die Gondel 5 am oberen Turmende tragenden Windrichtungsnachführung 14 ausgebildet ist.

Die Windenergieanlage 2 oder alle bzw. mehrere Windenergieanlagen eines Windparks 1 speisen die vor Ort im Turmspeicher 12 gepufferte Druckluft über eine Druckventil-Verteilerelement Anbindungseinheit 15 zu einer aus einem Druckluftmotor mit gekoppeltem drehzahlkonstantem Asynchrongenerator bestehenden

Einheit 16. Die Einheit 16 kann, wie in der Zeichnung als Black-Box angedeutet, separat im Parkareal vorgesehen werden. Sie ist örtlich unabhängig und planungsspezifisch am effektivsten Ort im Windpark 1 zu platzieren und erfüllt die Aufgaben der Bündelung der Druckenergie aller Windkraftanlagen, der Energieumwandlung, der Transformation (Umspannwerk) und als elektrischer Übergabepunkt, um den erzeugten elektrischen Strom mittels Leitungen in das Energieversorgungsnetz zu leiten. In diesem eigenständigen Generatorteil des Windparks 1 werden die Druckleitungen 17 der einzelnen Windenergie- bzw. Windkraftanlagen gebündelt und die Druckluft behandelt (veredelt). Neben der Implementierung des Druckluftmotors (Pneumatikmotor) mit Kupplung zum Asynchronmotor, sind dort weiterhin die herkömmlichen elektrischen Übergabestationen, die Schaltanlagen und ein Transformator integriert.

Die Anbindungseinheit 15 aus Druckübergabe vom abgedichteten Turm 4 an den Verteiler schließt zudem alle erforderliche Mess- und Sicherheitstechnik ein. Die Ventile und eine Überwachungseinheit sorgen für die Abgabe des Luftdrucks in korrekter Höhe an den Verteiler, der die betreffende Windkraft-/Windenergieanlage 2 mit dem Druckleitungsnetz 17, wie schematisch durch Strichelung angedeutet, mit der Einheit 16 aus Druckluftmotor und Asynchronmotor verbindet. Auch die elektrische Anschlussversorgung zu Steuerzwecken der Windkraft-/Windenergieanlage 2 ist hier untergebracht.

Es lassen sich somit stark vereinfachte (verschlankte) Windenergieanlagen mit direkter Speicherbarkeit der Druckluft vor Ort im Turmspeicher des vorhandenen Turms und Vergleichmäßigung der Energie erreichen. Abgesehen davon, dass die Windenergieanlage bzw. der Windpark unabhängig von natürlichen Speichermöglichkeiten ist, kann auf teure Kupfer- oder Aluminiumkabel verzichtet werden und kommen umweltfreundliche, ölfreie Kompressoren und Druckluftmotoren zum Einsatz.

Eine alternative Ausführungsform einer Windkraftanlage 200 ist in Fig. 2 dargestellt. Diese besitzt einen bodenseitig im Fundament 300 verankerten Turm 400, auf dem oben eine Gondel 500 angeordnet ist. Ein Rotorblatt 600 bzw. Rotor der Windkraftanlage 200 ist in einer Rotornabe 700 der Gondel 600 gelagert.

Das Rotorblatt 600 ist über eine Antriebswelle 800 mit einem Getriebe 900 verbunden. Weiterhin steht das Getriebe 900 in einer Wirkverbindung mit einem stromerzeugenden Generator 18 sowie einem zuschaltbaren Kompressor 19. Zusätzlich ist das Getriebe 900 über eine Antriebswelle 20 mit einer zuschaltbaren Expansionsmaschine 21 verbunden.

Der Turm 400 selbst ist nach außen hin völlig abgedichtet und in seinem Inneren als Turmspeicher 22 zur Einspeisung von mit dem zuschaltbaren Kompressor 19 erzeugter Druckluft ausgebildet. Des weiteren ist im Turmspeicher 22 ein Wärmespeicher 23 integriert. Sowohl der Turmspeicher 22 als auch der Wärmespeicher 23 sind über Druckleitungen 24a, 24b, 25 mit dem Kompressor 19 und der Expansionsmaschine 21 verbunden.

Mittels der Windenergie wird das Rotorblatt 600 in Rotation versetzt und einhergehend damit über das Getriebe 900 der Generator 18 angetrieben, wodurch elektrische Energie in ein angeschlossenes Stromnetz, beispielsweise ein Inselstromnetz, eingespeist wird.

In Zeiten von Windenergieüberschuss wird zusätzlich zum Generator 18 der Kompressor 19 angetrieben, der daraufhin den Turmspeicher 22 mit Druckluft füllt. In kurzen Perioden mangelnder Windenergie wird über die Druckleitungen 24a, 25 und eine zwischengeschaltete Ventileinheit 26 die Expansionsmaschine 21 mit Druckluft beaufschlagt und aufgrund der Expansion der Druckluft in ihrem Inneren die Welle 20 in Rotation versetzt. Über die Welle 20 wird das Getriebe 900 und in der Folge der Generator 18 zur kurzfristigen Einspeisung elektrischer Energie in

das Stromnetz angetrieben. Die Expansionsmaschine 21 dreht hierbei schneller als der Generator 18.

Bevor die Druckluft der Expansionsmaschine 21 zugeführt wird, durchströmt diese den Wärmespeicher 23. Der Wärmespeicher 23 besteht aus wärmebeständigem, preiswerten und durchströmbarem Material, beispielsweise aus aufgestapelten Lochziegeln, die von der aus dem Kompressor 19 eingeleiteten und zur Expansionsmaschine 21 ausgeleiteten Druckluft in jeweils entgegengesetzter Richtung durchströmt werden. Beim Ausleiten der Druckluft zur Expansionsmaschine 21 nimmt die Druckluft beim Durchströmen des Wärmespeichers 23 Wärme auf, wodurch die bei der Expansion zur Verfügung stehende Energie erhöht und eine Eisbildung innerhalb der Expansionsmaschine 21 vermieden wird.

Des weiteren nimmt der Wärmespeicher 23 beim Einleiten heißer Druckluft aus dem Kompressor 19 in den Turmspeicher 22 Wärme aus der Druckluft auf, womit deren Luftdichte steigt und eine größere Druckluftmasse gespeichert werden kann.

Die in Fig. 3 dargestellte Windkraftanlage 220 ist gegenüber der Ausführung nach Fig. 2 dadurch erweitert, dass zusätzlich zum Turmspeicher 22 ein unterirdisches Speicherreservoir 27 zur Speicherung der Druckluft vorgesehen ist. Dies eröffnet einerseits die Möglichkeit, das unterirdische Speicherreservoir 27 mit dem Turmspeicher 22 parallel zu schalten. Das heißt sowohl im Turmspeicher 22 als auch im unterirdischen Speicherreservoir 27 herrscht der gleiche Luftdruck, wobei der zu durchströmende Wärmespeicher 23 trotz der größeren, gespeicherten Druckluftmenge im Turmspeicher 22 verbleibt.

Andererseits kann das unterirdische Speicherreservoir 27 unter höherem Luftdruck stehen als der Turmspeicher 22, wodurch die Windkraftanlage 220 mit einer zweistufigen Kompression und Expansion der Druckluft betrieben werden kann.

Bei dieser Ausführungsform wird dann zwischen Turmspeicher 22 und unterirdischem Speicherreservoir 27 eine Verdichter- und Expansionsstation 28 installiert.

Die Verdichter- und Expansionsstation 28 ist über Druckleitungen 29, 30 einerseits mit dem Turmspeicher 22 und andererseits mit dem Speicherreservoir 27 verbunden. Weiterhin kann die Verdichter- und Expansionsstation 28 mit einem hier nicht dargestellten, zusätzlichen Wärmespeicher und/oder einer Kühlung für die Kompression der Luft sowie einer Feuerung für die Expansion der Luft ausgestattet sein.

Mit der in Fig. 2 dargestellten Windkraftanlage 200 können kurzfristige Windenergie-Bedarfsschwankungen im Minutenbereich ausgeglichen werden, während die Windkraftanlage 220 nach Fig. 3 durch das zusätzliche, unterirdische Speicherreservoir 27 Windenergie- und Bedarfsschwankungen im Stundenbereich ausgleichen kann.

Desweiteren besteht die Möglichkeit, die Druckluft unterseeisch in einem Speicherreservoir zu speichern, so dass die Windkraftanlage 220 in Offshore-Windparks eingesetzt werden kann.

## Bezugszeichenliste:

- 1 Windpark
- 2 Windkraftanlage / Windenergieanlage
- 3 Fundament
- 4 Turm
- 5 Gondel
- 6 Rotorblatt / Rotor
- 7 Rotornabe
- 8 Antriebswelle
- 9 Getriebe
- 10 Kompressoreinheit
- 11 Steuer- und Überwachungseinheit
- 12 Turmspeicher
- 13 Druckleitung
- 14 Windrichtungsnachführung
- 15 Anbindungseinheit / Druckventil – Verteilerelement
- 16 Einheit aus Druckluftmotor und Asynchrongenerator
- 17 Druckleitungsnetz / Druckleitungen
- 18 Generator
- 19 Kompressor
- 20 Antriebswelle
- 21 Expansionsmaschine
- 22 Turmspeicher
- 23 Wärmespeicher
- 24a,b Druckleitungen
- 25 Druckleitung
- 26 Ventileinheit
- 27 Unterirdisches Speicherreservoir
- 28 Verdichter- und Expansionsstation

29	Druckleitung
30	Druckleitung
200	Windkraftanlage
220	Windkraftanlage
300	Fundament
400	Turm
500	Gondel
600	Rotorblatt
700	Rotornabe
800	Antriebswelle
900	Getriebe

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer Windkraftanlage (2), die einen im Fundament (3) verankerten Turm (4) und eine von diesem getragene, mit einem Rotor (6) versehene Gondel (7) sowie eine in der Gondel angeordnete Kompressoreinheit (10), die an einen Druckluftspeicher angeschlossen ist, umfasst, wobei der Druckluftspeicher zur Vergleichmäßigung der ausgangsseitigen Energieproduktion die Druckluft zur Umwandlung in elektrische Energie an einen elektrischen Generator abgibt, dadurch gekennzeichnet, dass der Turm (4) abgedichtet und in diesen die von der Kompressoreinheit (10) erzeugte Druckluft zur Zwischenspeicherung eingespeist wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Druckluftspeicherung zum Betrieb mit einem Wärmespeicher (23) kombiniert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Wärmespeicher (23) von der Druckluft bei der Ein- und Ausleitung im Gegenstrom durchströmt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass dem Wärmespeicher (23) heiße Druckluft aus der Kompressoreinheit (10, 19) zugeleitet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass die aus dem Wärmespeicher (23) ausströmende Druckluft über eine Expansionsmaschine (21) geleitet wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur Temperaturregelung der Druckluft die aus dem Wärmespeicher (23) austretende, heiße Druckluft mit direkt aus dem Turmspeicher (12, 22) entnommener, kalter Druckluft gemischt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass alle oder zumindest mehrere Windkraftanlagen (2) eines Windparks die in den Türmen (4) zwischengespeicherte Druckluft auf einen zentralen Druckluftmotor mit gekoppeltem drehzahlkonstantem Asynchrongenerator (16) speisen.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass mittels Ventilregelung am Asynchrongenerator (16) ein immer gleicher Druck eingehalten wird.
9. Windkraftanlage (2), die einen im Fundament verankerten Turm (4) und eine von diesem getragene, mit einem Rotor (6) versehene Gondel (7) sowie eine in der Gondel angeordnete Kompressoreinheit (10), die an einen Druckluftspeicher angeschlossen ist, umfasst, wobei der Druckluftspeicher zur Vergleichmäßigung der ausgangsseitigen Energieproduktion die Druckluft zur Umwandlung in elektrische Energie an einen elektrischen Generator abgibt, insbesondere zum Durchführen des Verfahrens nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,  
dass der Turm (4) nach außen abgedichtet als Turmspeicher (12) ausgebildet ist und die über eine Antriebswelle (8) unter Zwischenschaltung eines Getriebes (9) mit dem Rotor (6) verbundene Kompressoreinheit (10) eine an den Turmspeicher (12) angeschlossene Druckleitung (13) aufweist.

10. Windkraftanlage nach Anspruch 9,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass eine am oberen Ende des Turms (4) vorgesehene Windrichtungsnachführung (14) mit integrierter Druckluftübergabe von der Kompressoreinheit (10) zum Turmspeicher (12) ausgebildet ist.
11. Windkraftanlage nach Anspruch 9 oder 10,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der Turmspeicher (12) an eine Einheit (16) aus einem Druckluftmotor mit gekoppeltem drehzahlkonstantem Asynchrongenerator angeschlossen ist.
12. Windkraftanlage nach Anspruch 6,  
gekennzeichnet durch  
ein Druckventil-Verteilerelement als Anbindungseinheit (15) zum Druckluftmotor mit Asynchrongenerator.
13. Windkraftanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 12,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass im Turmspeicher (22) ein aus einem wärmebeständigen und durchströmbaren Material bestehender Wärmespeicher (23) integriert ist.
14. Windkraftanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 13,  
dadurch gekennzeichnet,

dass der Turmspeicher (22) mit einem unterirdischen Speicherreservoir (27) verbunden ist.

15. Windkraftanlage nach Anspruch 14,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass zwischen dem Turmspeicher (22) und dem Speicherreservoir (27) eine Verdichter- und Expansionsstation (28) angeordnet ist.
16. Windkraftanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 15,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass in der Gondel (500) eine zusätzlich zu der Rotorachse (800) mit dem Getriebe (900) verbundene, zuschaltbare Expansionsmaschine (21) angeordnet ist und das Getriebe (900) ausgangsseitig mit einem Generator (18) sowie diesem nachgeschalteten, ebenfalls zuschaltbaren Kompressor (19) verbunden ist.
17. Windkraftanlage nach Anspruch 16,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass sowohl die zuschaltbare Expansionsmaschine (21) als auch der zuschaltbare Kompressor (19) jeweils über Druckleitungen (24a, 24b, 25) mit dem Turmspeicher und dem Wärmespeicher (23) verbunden sind.

**Fig. 1**

