Die Industriedampfturbine als Stellglied im Energienetz der Zukunft

Kristin Abel Günther und Christian Scharfetter

Abstract

The industrial steam turbine as an actuator in the future energy grid

The increasing share of fluctuating renewable energies in the electrical grit requires measures for stabilization. The installation of steam turbines in combined cycle heat and power plants with waste or biomass as fuel or use in concentrated solar power plants contribute to a necessary change in the energy market.

The combination of diesel or gas engines, gas and steam turbines as well as energy storage systems in combination with wind and solar power plants form micro grids and hybrid systems enabling the desired supply reliability in an environmentally friendly way.

Based on this current requirement in the electricity and heat market, it is necessary for manufacturers and operators to design systems able to follow the required flexible load profiles. The planned life cycle and efficiency of the plants should lead to economic success.

For these applications, MAN offers steam turbines out of a modular system that, equipped with state-of-the-art control technology, an intelligent condition monitoring and maintenance concept, able to provide electrical control power in 1 to 150 MW power plants combined with economically optimized heat extraction.

The construction of the steam turbines has to be adapted to the desired operating profiles to achive the required quality even with fast load changes and different load points. Decisive for the long-term success of such plants is the planning on the basis of a realistic operational profile and an optimal coordination of the power plant components.

MAN has repeatedly realized the construction of combined cycle power plants and is in a position to offer all generator drive machines from its own product portfolio. The plants are then accompanied with service over the entire life cycle of MAN.

Autoren

Dr.–Ing. Kristin Abel Günther
MAN Energy Solutions SE
Head of Sales Power Generation Steam Turbines

Dr.- Ing. Christian Scharfetter
MAN Energy Solutions SE, Primeserv
Hamburg, Deutschland

Einfluss der Energiewende auf die Stromerzeugung

Um den Klimawandel aufzuhalten haben sich zahlreiche Länder weltweit verpflichtet, die CO_2-Emissionen drastisch zu senken. Für die Stromerzeugung bedeutet dies, dass der Einsatz von Kohle und Öl reduziert und die Erzeugung mit regenerativen Energien stark zugenommen hat und weiter zunehmen wird. In Deutschland hatten die Regenerativen Energieträger nach Angaben des BMWi im Jahr 2017 bereits 33,3 % Anteil an der Bruttostromerzeugung, wobei Windenergie mit 16,3 % den höchsten Anteil hatte, gefolgt von Biomassekraftwerken (6,9 %) und Photovaltaik (6,1 %).

Bis 2040 erwartet die IEA einen wachsenden Strombedarf, weltweit um 2,1 % pro Jahr und in der EU um 0,6 % pro Jahr. In der EU soll der Zuwachs fast ausschließlich durch erneuerbare Energien gedeckt werden. In Deutschland soll 2040 50 % der Bruttostromerzeugung mit regenerativen Kraftwerken erfolgen.

Photovoltaik und Windstrom sind tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen und insbesondere die Prognose von Strom aus Windkraft ist mit sehr großen Unsicherheiten behaftet, so dass der eingespeiste Windstrom häufig den prognostizierten Wert stark über- oder unterschreitet. Der steigende Anteil von volatilen Einspeisungen aus Wind und Sonne führt zu Netzengpässen und -schwankungen. Um die Versorgungssicherheit rund um die Uhr sicher zu stellen, müssen konventionelle Kraftwerke, meistens mit Dampfturbosätzen, schnell Reserveleistung bereitstellen. Diese neue Fahrweise stellt hohe Anforderungen an die Auslegung, Konstruktion und Wartung von Dampfturbinen. MAN Energy Solutions stellt Dampfturbinen im Leistungsbereich von 1 bis 180 MW_{el} her und hat auf die geänderten Anforderungen durch konstruktive Maßnahmen und die Entwicklung innovativer Wartungssysteme reagiert (Bild 1).

Kraftwerke für die Energiewende

Durch die Energiewende werden in Zukunft andere Kraftwerkstypen für die Strombereitstellung zum Einsatz kommen. Die Anzahl großer zentraler Grundlastkraftwerke wird abnehmen und die Anzahl von dezentralen Kraftwerken zunehmen. Innerhalb der Kraftwerke wird eine Kombination aus verschiedenen Primärenergieträgern genutzt werden. Die Bedeutung von elektrischen und thermischen Speichern, sowie die Verwendung von Strom für Power to X Technologien oder zu Heizzwecken wird zunehmen. Die Kopplung der Sektoren Energieerzeugung, Industrie und Verkehr und die sich daraus ergebende komplexe

Bild 1. Dampfturbinenportfolio von MAN-ES.

VGB PowerTech - All rights reserved - Alle Rechte vorbehalten - © 2018

Regulierung der Netze ist in diesem neuen Konzept von zentraler Bedeutung.

Kraftwerkstypen für flexible Fahrweise

Es gibt verschiedene Möglichkeiten durch eine optimierte Kraftwerksarchitektur und Energieversorgungsstruktur, Netzschwankungen zu vermindern oder auszugleichen. Die Kombination aus Windkraftanlagen, Photovoltaik und einem kleinen Biomassekraftwerk mit Wärmeauskopplung vermindert die Schwankungen bei der Einspeisung in das übergeordnete Netzwerk und stellt eine ideale Kombination dar. In der Winterperiode mit starkem Wind und hohem Windstromanfall wird aus der Biomasseanlage Fernwärme ausgekoppelt und die Stromproduktion ist verringert. Im Sommer arbeitet der Turbosatz der Biomasseanlage als Kondensationsmaschine und gleicht mit der erhöhten Stromproduktion die Sommerflauten aus (Bild 2).

Für das Biomassekraftwerk als ausgleichende Komponente bedeutet dies allerdings eine Fahrweise mit schnellen Lastwechseln und weniger Vollastbetriebsstunden. Sogar regelmässige Stillstandszeiten von einigen Stunden bis Tagen können erforderlich sein. Neben der erhöhten Belastung der Maschine ist ein wirtschaftlicher Betrieb unter diesen Randbedingungen schwierig. Der Betrieb einer solchen Anlage kann optimiert werden, wenn noch elektrische und/ oder thermische Speicher ergänzt werden.

Die notwendige Reduzierung der CO_2-Emissionen bedingt einen Ausstieg aus der Kohle und die Stilllegung großer Kohlekraftwerke. Um das prognostizierte Wachstum der Stromerzeugungskapazitäten dennoch umweltfreundlich zu bewältigen, geht man von einer Übergangsphase mit erhöhtem Gaseinsatz aus. Die besten Anlagenwirkungsgrade können mit Kombikraftwerken aus Gasmotor und Dampfturbine oder Gas- und Dampfturbine erreicht werden. Die Herausforderung für den Dampfturbosatz liegt hier darin, den kurzen Anfahrzeiten und schnellen Lastwechseln der Gasmotoren und –turbinen zu folgen. MAN Energy Solutions liefert solche kombinierten Kraftwerke und setzt dabei bewährte Maschinen aus dem eigenen Produktportfolio (Motoren, Gasturbinen, Dampfturbinen) ein.

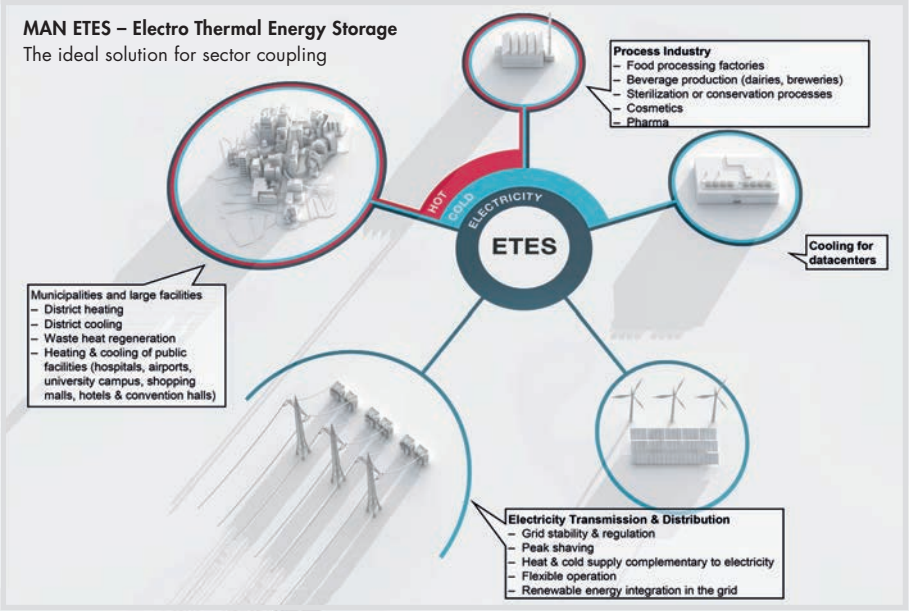


Bild 3. MAN ETES – Elektro-thermische Speichertechnologie.

Speichertechnologien

Die Ergänzung von Speicherkapazitäten in den regenerativen Kraftwerken kann helfen, Strom-Erzeugungslücken durch Entladung der Speicher zu schließen und Überkapazitäten an elektrischem Strom in andere Energieformen zu wandeln und zu speichern. Die Einspeisung von Strom aus regenerativen Kraftwerken könnte so vergleichmäßigt, Netzschwankungen vermindert und die Vorhaltung von Reservestrom aus konventionellen Kraftwerken vermindert werden. Technologisch verfügbare Speicher sind z.B. Batterien, die allerdings hochpreisig sind, oder thermische Speicher. MAN-ES hat einen kombinierten Elektro-Thermischen Speicher ETES entwickelt, in dem sowohl Strom in Kälte und/ oder Wärme gewandelt werden kann, als auch elektrische Energie aus der gespeicherten Kälte und Wärme wieder zurückgewonnen werden kann (Bild 3).

Der Speicher wird aufgeladen, indem mit der überschüssigen elektrischen Energie im ersten Schritt ein Kompressor angetrieben wird, der CO_2 verdichtet und auf 120 °C aufheizt. Das CO_2 strömt danach durch einen Wärmetauscher und erhitzt Wasser. Das heiße Wasser wird in isolierten Tanks gespeichert, die unterschiedliche Temperaturlevel haben. Das noch unter Druck stehende CO_2 wird anschließend in einem Expander verflüssigt und kühlt dabei ab. Das flüssige CO_2 fließt anschließend durch einen Wärmetauscher, in dem es Wasser Wärme entzieht. Das entstehende Eis wird einem Eisspeicher zugeführt.

Aus dem Heißwasserspeicher kann ein Fernwärmenetz gespeist werden, aus dem Eisspeicher Kühlungsbedarf gedeckt werden.

Bei der Entladung des Speichers wird gasförmiges CO_2 durch die Kälte aus dem Eisspeicher in dem Wärmetauscher kondensiert. Dabei schmilzt das Eis und der Eisspeicher wird entladen. Eine Pumpe erhöht den Druck des CO_2 Kondensates. Dieses fließt dann durch den zweiten Wärmetauscher, nimmt Wärme aus dem Heißwasserspeicher auf und verdampft. In einem Turbosatz expandiert das CO_2 und die erzeugte elektrische Energie wird ins Netz eingespeist.

ETES basiert auf erprobten Maschinen und Technologien und kann in Zukunft ein wichtiger Baustein eines regenerativen oder Hybridkraftwerkes sein, der eine effiziente und bedarfsgerechte Energienutzung ermöglicht und die Wirtschaftlichkeit der Anlage wesentlich erhöht. ETES ist ebenso ein zentraler Baustein der innovativen Microgrid-Technologie von MAN-ES (Windkraftanlage, Photovoltaik, Gasmoto-

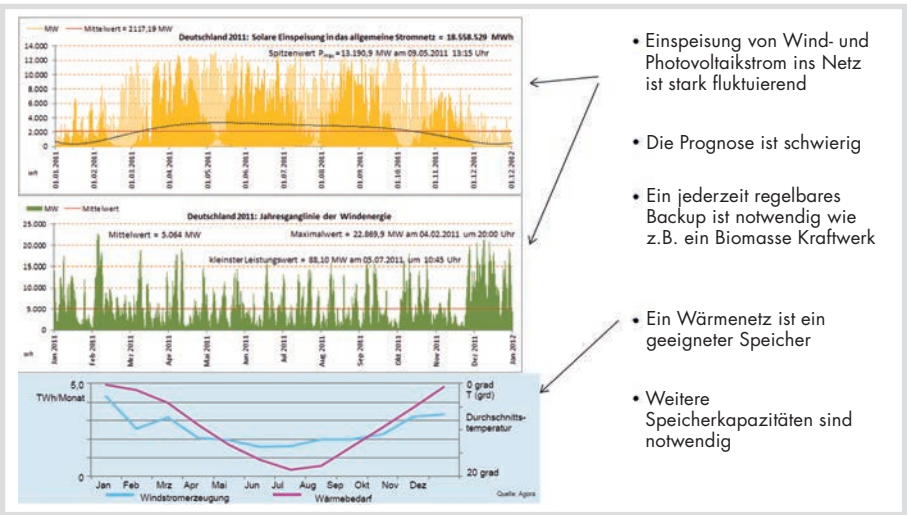


Bild 2. Ausgleich von Netzschwankungen durch Hybridkraftwerk.

VGB PowerTech - All rights reserved - Alle Rechte vorbehalten - © 2018

renanlage und ETES), das vorrangig in Gebieten mit schwachen Netzen zum Einsatz kommen soll.

Neue Anforderungen an Dampfturbosätze

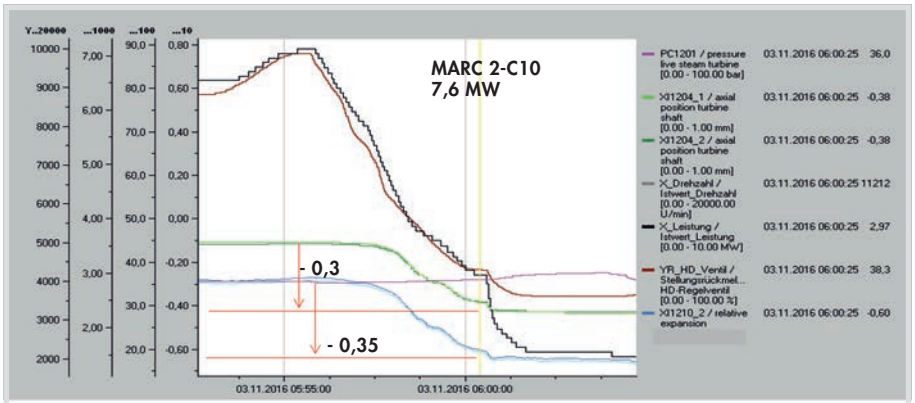
Stand der Technik heute sind allerdings Kraftwerke ohne wesentliche Speicher und dies hat zur Folge, dass die Fahrweise von Dampfturbosätzen von häufigen Starts mit kurzen Anfahrzeiten, schnellen Lastwechseln und häufigen Stillständen geprägt ist.

Dampfturbinen bestehen aus komplexen Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien, die sich bei Temperaturänderungen unterschiedlich verhalten. Die geforderten hohen Wirkungsgrade erfordern beispielsweise, dass die Spalte zwischen den Schaufeln und den Leitschaufelträgern bzw. dem Rotor so gering wie möglich gehalten werden und auch die Abdichtungssysteme immer weiter optimiert werden. Schnelles Anfahren oder schnelle Lastwechsel bedingen unterschiedlich starke Temperaturänderungen und somit relative Verlagerungen von Bauteilen gegeneinander.

In Bild 4 ist das Verhalten einer Turbine mit ca. 8 MW Leistung bei einem Lastwechsel von 7 auf 1,5 MW innerhalb von 5 Min dargestellt. Man erkennt, dass es eine Verlagerung des Läufers von 3 mm und eine relative Ausdehnung von -3,5 mm erfolgt. Solche axialen Bewegungen der Läufer gegenüber dem Gehäuse (Relativdehnung) müssen bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Auch hier stehen technische und wirtschaftliche Aspekte im Konflikt, da rotordynamisch robuste Läufer mit einem großen Durchmesser /Längenverhältnis in dickwandigen Gehäusen thermisch stabiler sind aber teurer als schlanke Läufer in dünnwandigen Gehäusen, die sich schneller verformen.

Wellenabdichtungen (Bild 5) müssen ein relativ großes Spiel haben, ebenfalls sollte man eine erhöhte radiale Bewegung einkalkulieren. Somit benötigt man für die gleiche Abdichtung mehr Dichtspitzen, was die axiale Baulänge vergrößert und ebenfalls Mehrkosten verursacht. Der Einsatz von Wirkungsgrad optimierenden Dichtungstypen wie Waben- oder Bürstendichtungen ist kritisch bei großen axialen Bewegungen des Turbinenrotors. Bei Berührungen kann es zu starken Beschädigungen kommen.

Schnelles An-/Abfahren von Dampfturbinen ist nur begrenzt möglich, insbesondere nach längeren Stillständen, in denen die Turbine sich weitgehend abgekühlt hat. Das Warmhalten der Turbine mit Heizeinrichtungen beschleunigt das Anfahren signifikant. Der Anfahrvorgang kann durch dynamische Temperaturüberwachung und Einsatz von dynamischen Rampen (Kaltstart, Warmstart, Heizstart) mit angepassten Steigungen optimiert werden. Ein durchgehender Betrieb auf Minimallast ermöglicht ebenfalls eine schnelle Lastaufnahme bis zu Volllast.



Änderung der Relativdehnung bei Leistungsabwurf 7 MW auf 1,5 MW in 5 min

Bild 4. Flexible Fahrweise der Dampfturbine – Schnelle Lastwechsel – häufiges An-/Abfahren.

Zusammenfassend muss man festhalten, dass die flexible Fahrweise der Dampfturbine im Zielkonflikt zu höchster Effizienz und niedrigen Herstellungskosten steht. Die oben genannte detaillierte Betrachtung des Wärmehaushaltes bei Lastwechseln und die Abdichtungsthematik sind nur Beispiele. Alle Schnittstellen zur Anlage und alle Systeme der Dampfturbine sind betroffen und die individuellen (materialspezifischen) Anforderungen der unterschiedlichen Komponenten sind zu berücksichtigen. Beim Einsatz von Chemikalien, beispielsweise zur Konservierung der Anlage, sind mögliche Auswirkungen auf den späteren Betrieb zu beachten (Bild 6).

Nicht nur schnelle Lastwechsel, sondern auch längere Stillstände gehören heute zum Normalbetrieb von Dampfturbinen. Deshalb ist eine sachkundige Konservierung von großer Bedeutung, um den Lebensdauerverbrauch der Maschine in den Stillstandsphasen zu minimieren. Die wesentlichen Maßnahmen zielen darauf, Korrosion zu unterbinden und Stillstandsverschleiß zu minimieren und so eine Wirkungsgradverschlechterung zu verhindern. Beim Wiederanfahren müssen Partikel- und Tropfenschlag verhindert werden.

Konkrete Empfehlungen für die Stillstands-Konservierung sind die Warmhaltung der Turbine und Messung der Feuchte bei allen Stillständen <2 Tagen. Nach 2 Tagen muss ein Trockner für Trockenkonservierung angeschlossen werden, bei Gefahr von Schwadendampf über die Schnittstellen muss die Feuchte gemessen und überwacht werden.

Es sollte ein Trockner in Form eines Warmluftgebläses verwendet werden, der mit seinem Volumenstrom auf die Größe der Turbine abgestimmt ist. Der warme Luftvolumenstrom sollte die Dampfturbine komplett durchströmen. Die Leitung zum Kondensator muss mit der Abdampfklappe geschlossen werden oder – bei langen Stillständen – der Kondensator entleert

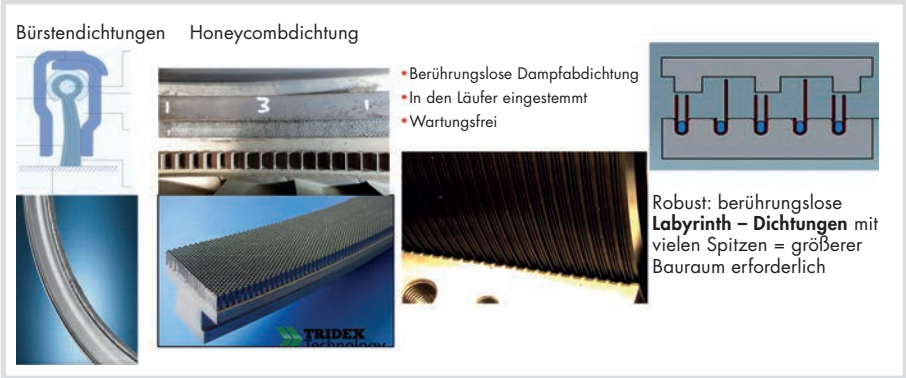


Bild 5. Flexible Fahrweise der Dampfturbine – Wellenabdichtungen.

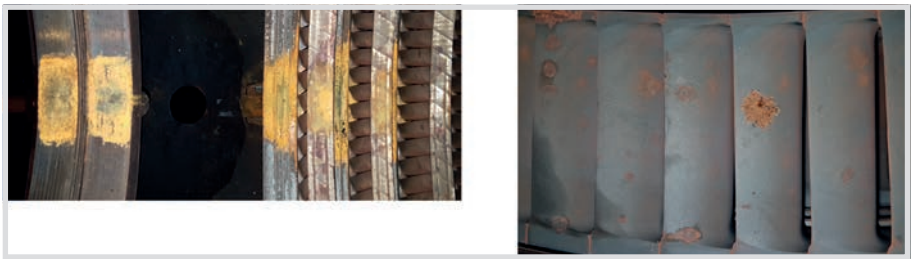


Bild 6. Flexible Fahrweise der Dampfturbine – Stillstandskonservierung.

VGB PowerTech - All rights reserved - Alle Rechte vorbehalten - © 2018

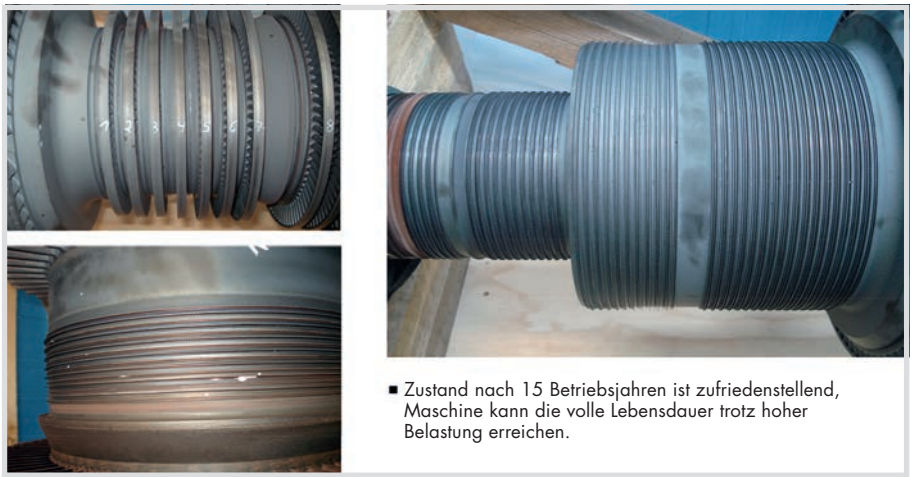


Bild 7. Referenzmaschine MAN-ES nach 15 Jahren Betrieb.

werden. Ziel der Trockenkonservierung ist es, vorhandene Elektrolyte von den Oberflächen fernzuhalten und die relative Feuchte bei < 40 % zu halten. Grundlage für die Konservierung einer Anlage sollten die Empfehlungen der VGB nach VGB-S-116 und für die Konservierung von Turbosätzen nach VGB-S-0-36 sein .

Ist es zu Korrosionsanfall gekommen, kann Trockeneisstrahlen der Komponenten vor Ort eine sinnvolle Maßnahme sein.

Durch eine gute Wartung und Instandhaltung kann der Zustand der Dampfturbine über viele Jahre zufriedenstellend erhalten werden (Bild 7). Die Wartungsempfehlungen des VGB nach VGB-S-115 sind grundsätzlich auch zukünftig relevant, müssen aber auf die aktuellen Betriebsprofile der Anlagen angepasst werden. Die Ergänzung der vorbeugenden Instandhaltung durch Maßnahmen, die zustandsorientiert ausgelöst werden, ist eine notwendige Entwicklung um die Lebensdauerkosten derartiger Systeme zu optimieren.

Eine Alternative zu den konventionellen Konzepten mit festen Intervallen und statischen Überwachungseinrichtungen sind intelligente Systeme, die den aktuellen Zustand der Anlage bewerten und daraus Empfehlungen für entsprechende Maßnahmen ableiten. Die Intelligenz dieser Systeme liegt in der Berechnung von dynamischen Erwartungswerten, die von dem aktuellen Betriebszustand abhängen. Die zuverlässige Messung und Speicherung von Daten ist ein wichtiger Baustein solcher Diagnosesysteme. Modelle für die Errechnung der Erwartungswerte werden unter Einsatz von künstlicher Intelligenz und kompetenter Nachjustierung entwickelt (Bild 8).

Die Empfehlung und die aus Erfahrung bekannte Notwendigkeit nach 25.000 äquivalenten Betriebsstunden eine Wartungsmaßname auszuführen wird dabei nicht in Frage gestellt. Es wird lediglich der Zeitpunkt der Ausführung in Abhängigkeit der realen Belastungen gewählt. Es erfolgt eine Verschiebung von der präventiven zur zustandsabhängigen Maßnahme. Es kommt so zu einer Ausweitung der möglichen Wartungsintervalle über die Zeit, was eine erhöhte Ausnutzung der Materialreserven mit sich bringt. Eine Berücksichtigung der Kosten/Nutzenrelation der Instandhaltungs-Maßnahmen gehört zu einem guten Wartungskonzept ebenso wie ein entsprechendes Ersatzteilmanagement. Bei der Konzepterstellung für die Ersatzteilbevorratung sind die spezifischen Anforderungen an die Anlage wie z.B. hohe Verfügbarkeit oder schnelle Wiederinbetriebnahme zu beachten. Bei der Bevorratung und Beschaffung von Ersatzteilen ist ein entscheidendes Kriterium neben den Investitionskosten das Verfügbarkeitsrisiko der Anlage, dieses Risiko kann nur in Zusammenarbeit von Betreiber und Hersteller analysiert werden. Die finale Risikobewertung obliegt dabei immer dem Betreiber der Anlage, wenn Kosten und Beschaffungszeiten der relevanten und als strategisch identifizierten Bauteile vom Hersteller benannt wurden.

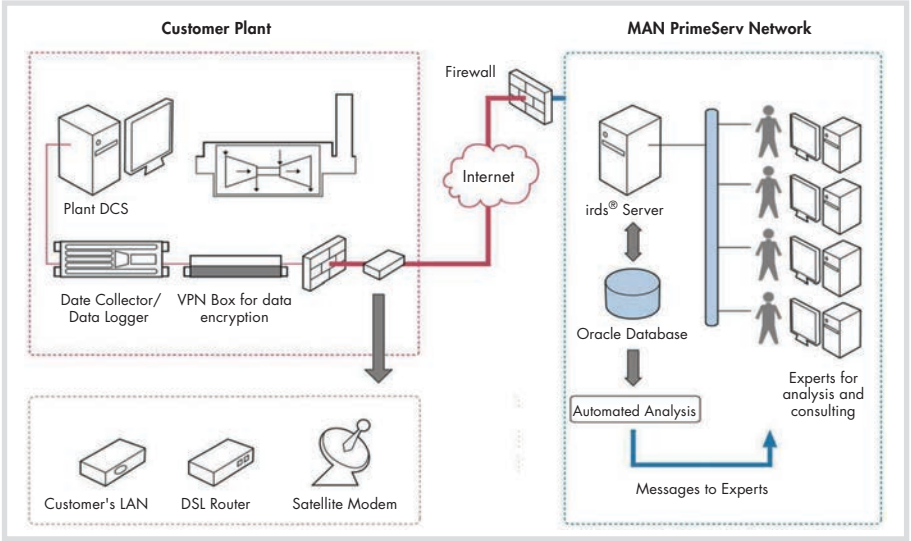


Bild 8. irds® intelligent remote diagnostics.

Zusammenfassung

Strom aus regenerativen Energien schont die Ressourcen an fossilen Energieträgern und verringert die CO_2 Emissionen der Stromerzeugung. Das ist eine nachhaltige Verbesserung für unsere Umwelt und wirkt dem Klimawandel entgegen.

Wind- und Solarstrom sind abhängig von der Jahreszeit und vom Wetter, bieten somit keine ausreichende Versorgungssicherheit und führen zu Erzeugungsschwankungen im Stromnetz. Biomassekraftwerke und konventionelle Kraftwerke stehen damit heute vor der neuen Aufgabenstellung schnell Reservestrom zur Verfügung zu stellen und leisten einen unverzichtbaren Beitrag zur Netzstabilität.

Die veränderte Fahrweise der konventionellen Kraftwerke mit schnellen Lastwechseln, kurzen Anfahrzeiten und ggf. Stillständen stellen eine hohe Beanspruchung für die Kraftwerke und insbesondere für die Dampfturbinen dar. Deshalb kommt der richtigen, auf den Anforderungen der Anlage basierten Auslegung und konstruktiven Ausführung und der sorgfältigen Instandhaltung große Bedeutung zu. Intelligente zustandsorientierte Wartungskonzepte können die Betreiber hier optimal unterstützen. MAN-ES als Hersteller von Motoren und Turbinen hat auf diese neuen Anforderungen u.a. mit einem neuen Diagnostik-System zur Unterstützung einer zustandsorientierten Wartung reagiert.

Strom-Speicher und thermische Speicher sowie Power to X Technologien werden zukünftig eine zentrale Rolle beim Ausgleich von Schwankungen einnehmen, stehen aber noch nicht in genügendem Maß zur Verfügung. MAN-ES hat entsprechende Technologien entwickelt und das Ziel, diese in Hybridkraftwerken und Microgrids einzusetzen. MAN-ES bietet Lösungen für die Transformation vorhandener Technologien in das digitale Zeitalter und den Anwendungen in den Energienetzten der Zukunft, um so die Energiewende erfolgreich zu gestalten.

VGB PowerTech - All rights reserved - Alle Rechte vorbehalten - © 2018

VGB | POWERTECH

International Journal for Electricity and Heat Generation

Please copy >>> fill in and return by mail or fax

☐ Yes, I would like order a subscription of VGB PowerTech.

The current price is Euro 275.– plus postage and VAT.

Unless terminated with a notice period of one month to the end of the year, this subscription will be extended for a further year in each case.

Name, First Name

Street

Postal Code City Country

Phone/Fax

Date 1st Signature

Cancellation: This order may be cancelled within 14 days. A notice must be sent to to VGB PowerTech Service GmbH within this period. The deadline will be observed by due mailing. I agree to the terms with my 2nd signature.

Date 2nd Signature

Return by fax to

VGB PowerTech Service GmbH
Fax No. +49 201 8128-302

or access our on-line shop at www.vgb.org | MEDIA | SHOP.

VGB | POWERTECH

VGB POWERTECH as printed edition, monthly published, 11 issues a year

Annual edition 2017 as CD or DVD with alle issues from 1990 to 2017: Profount knowledge about electricity and heat generation and storage.

Order now at www.vgb.org > shop > Journal

© Sergey Nivens - Fotolia

VGB PowerTech

Contact: Gregor Scharpey
Tel: +49 201 8128-200
mark@vgb.org | www.vgb.org

The international journal for electricity and heat generation and storage.
Facts, competence and data = VGB POWERTECH

www.vgb.org > shop > Journal