

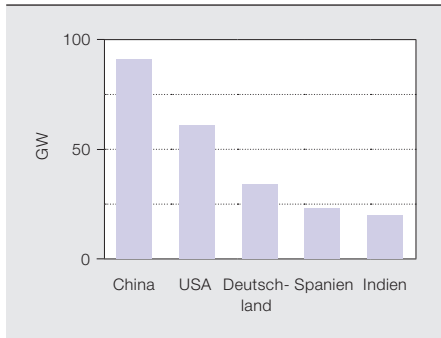


# Eine Frage der Integration

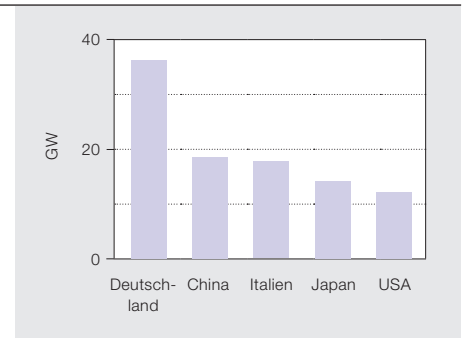
## Einbindung dezentraler erneuerbarer Energien in das Stromnetz

JOCHEN KREUSEL – Vor mehr als zehn Jahren haben die neuen erneuerbaren Quellen elektrischer Energie – Sonne und Wind – ihren Einzug in das elektrische Energieversorgungssystem begonnen. Damals galten sie vornehmlich als zwei weitere Primärenergiequellen, die ohne tiefgreifende Änderungen an die vorhandenen Systeme angeschlossen werden können. Heute sind die neuen erneuerbaren Energien in einigen Ländern der größte Erzeugungs-Teilsektor, und angesichts der starken Kostensenkungen der vergangenen Jahre muss mit einer weiteren Beschleunigung des Wachstums gerechnet

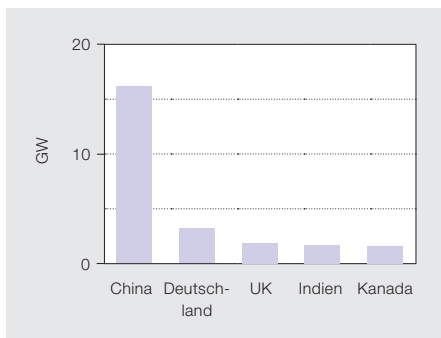
werden. Doch der Ansatz, erneuerbare Energien an die vorhandenen Systeme anzuschließen, greift zu kurz. Vielmehr müssen die elektrischen Energieversorgungssysteme so weiterentwickelt werden, dass sie die neuen Quellen in großem Stil einbinden können. Die Photovoltaik ist aufgrund ihrer sehr guten Skalierbarkeit der stärkste Treiber dieser Veränderung, die alle Bereiche der Wertschöpfungskette von Bereitstellung und Anwendung elektrischer Energie betrifft.



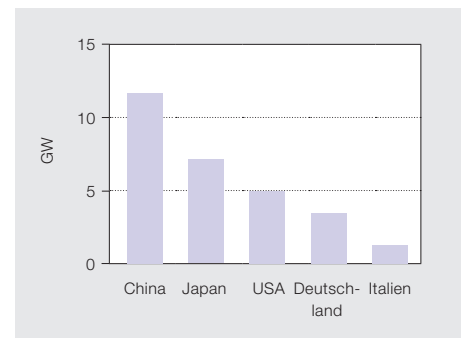
1a Wind: installierte Leistung 2013



1b Photovoltaik: installierte Leistung 2013



1c Wind: Zubau 2013



1d Photovoltaik: Zubau 2013

Quellen: Wind: Bundesverband Windenergie e.V., Deutschland; Photovoltaik: IEA-PVPS, IDAE, PV News, BSW, IWR

Seit dem Ende des 20. Jahrhunderts fördert eine zunehmende Zahl von Ländern die Nutzung von Wind- und Sonnenenergie. Einer der Pioniere ist Dänemark, das im Jahr 2011 bereits über 40 % seines elektrischen Energiebedarfs aus erneuerbaren Quellen deckte. Nahezu drei Viertel davon stammten aus Windenergie. Auch Deutschland wird als erstes großes Industrieland, das eine konsequent auf die neuen erneuerbaren Quellen ausgerichtete Transformation seiner Elektrizitätsversorgung beschlossen hat, international aufmerksam beobachtet.

→ 1 zeigt die jeweils fünf weltweit führenden Länder nach installierter Kapazität und Zubau in Wind- und Sonnenenergie im Jahr 2013. Zu erkennen ist, dass Länder aus allen Regionen aktiv sind, und dass einige der frühen Pioniere – erkennbar an hohen installierten Leistungen – inzwischen von anderen Ländern abgelöst worden sind. Die neuen erneuerbaren Energien sind heute eine globale Realität, die nicht mehr von Fördermechanismen einzelner Länder abhängt.

**Titelbild**

Der Umstieg auf erneuerbare Energiequellen macht die zuverlässige Energieversorgung zu einer noch größeren Herausforderung. Das umfangreiche Angebot von ABB für die Wind- und Solarenergie hilft dabei, diese Herausforderung zu bewältigen.

Der stärkste Treiber dieser Veränderung ist die Photovoltaik, die nach den starken Kostensenkungen am Ende des letzten Jahrzehnts in einer wachsenden Zahl von Ländern Netzparität erreicht oder bereits unterschritten hat, d.h. wettbewerbsfähig gegenüber den Endabnehmerpreisen in den Niederspannungsnetzen ist. → 2 zeigt die Entwicklung der Erzeugungskosten von Photovoltaikstrom im Vergleich zum Haushaltsstrompreis in Deutschland. Demnach ist die Photovoltaik unter der Voraussetzung eines überwiegend arbeitsbasierten Netznutzungsentgeltes für die Eigenbedarfsdeckung im Haushaltsbereich wirtschaftlich. Dies macht sie für einen großen Anwendungsbereich unabhängig von direkter Förderung, solange sie nur den Eigenbedarf ihrer Besitzer mindert.

**Neue erneuerbare Energiequellen und Systemintegration**

Die neuen erneuerbaren Energien besitzen im Wesentlichen drei Eigenschaften,

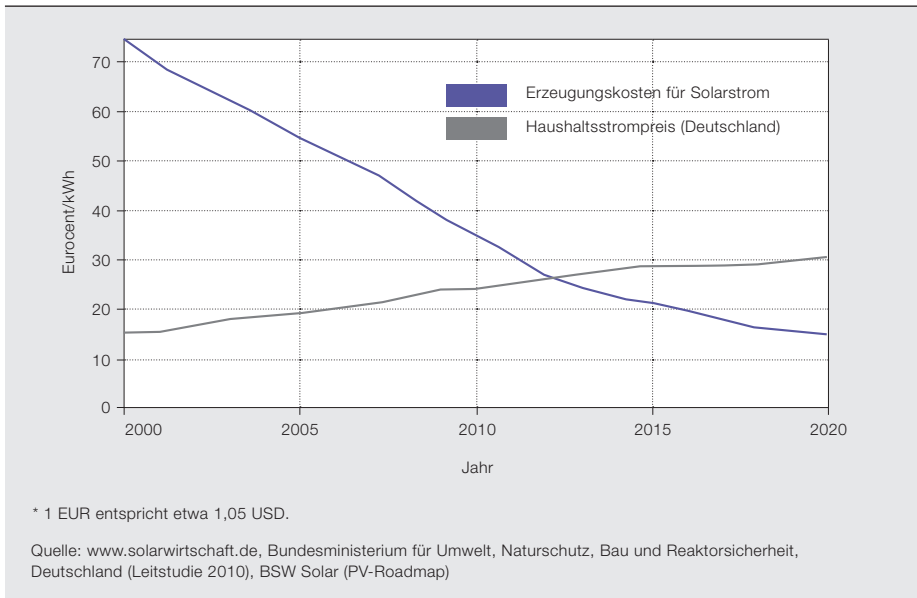
die die elektrischen Energieversorgungssysteme grundlegend verändern: verbrauchsferne Erzeugung, dezentrale Erzeugung und Volatilität.

**Verbrauchsferne Erzeugung**

Der Anteil verbrauchsferner Erzeugung steigt im Vergleich zu Kraftwerkssystemen

**Verbrauchsferne Erzeugung, dezentrale Erzeugung und Volatilität wirken sich auf alle Bereiche der elektrischen Energieversorgung und -anwendung aus.**

men, bei denen aus wirtschaftlichen wie aus technischen Gründen ein regionaler Ausgleich von Erzeugung und Bedarf bevorzugt wird. Diese Entwicklung wird vor allem durch die stark standortabhängigen Quellen Wind und Wasser getrieben und kann zu sehr großen Erzeugungseinheiten oder -clustern führen.



Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien hat auch Einfluss auf den Betrieb konventioneller Kraftwerke.

**Dezentrale Erzeugung**

Die Zunahme der dezentralen Erzeugung wird vor allem durch Photovoltaik und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) vorangetrieben. Bei der Photovoltaik liegt der Grund in den verhältnismäßig schwach ausgeprägten Skaleneffekten bei den Kosten in Verbindung mit der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den Endabnehmerpreisen im Niederspannungsnetz. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung liegt der Grund in der Notwendigkeit der verbrauchsnahe Bereitstellung der Wärme. Vor allem die sehr kleinen Photovoltaikanlagen werden dazu führen, dass ein nennenswerter Anteil der Erzeugung mit einer sehr großen Zahl kleiner Einheiten gedeckt wird, die Energie in die Verteilungsnetze einspeisen.

**Volatilität**

Volatilität kommt vor allem von der Wind- und Sonnenenergie, die beide zu schnelleren, größeren und – vor allem im Fall der Windenergie – nur begrenzt prognostizierbaren Schwankungen des Leistungsangebots führen als bisher. Verbrauchsferne Erzeugung, dezentrale Erzeugung und Volatilität haben Auswirkungen in allen Bereichen der elektrischen Energieversorgung und –anwendung. → 3 zeigt einen Überblick über diese Bereiche, ergänzt um den Einfluss neuer Verbraucher als Veränderungstreiber.

**Konventionelle Bereitstellung elektrischer Energie**

Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien hat auch Einfluss auf den Be-

trieb konventioneller Kraftwerke. Eine große technische Herausforderung ist der zunehmend häufige Betrieb von ursprünglich zur Deckung der Grundlast vorgesehen Kraftwerken im Lastfolgebetrieb mit starken Gradienten der Leistungsabgabe. Die Auswirkungen dieser Veränderung sind in [1] detailliert am Beispiel Deutschlands untersucht worden. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass bereits im Jahr 2015 mit Leistungsgradienten von bis zu 15 GW/h für den konventionellen Erzeugungspark gerechnet werden muss.

Ein weiterer Faktor, der den Betrieb von konventionellen Kraftwerken beeinflusst, ist die Tatsache, dass Wind- und Sonnenenergie keine variablen Kosten haben und somit in der Einsatzreihenfolge eines energiekostenbasierten Marktes immer am Anfang liegen. Damit verdrängen sie die konventionelle Erzeugung, wodurch die Auslastung dieser Anlagen sinkt und die Fixkostendeckung erschwert wird.

Diese wirtschaftlichen Effekte führen dazu, dass der Bau und der Betrieb konventioneller Kraftwerke im heutigen Marktumfeld nicht mehr attraktiv sind. Da konventionelle Erzeugungskapazität aber sowohl als Backup für Zeiten mit niedrigem erneuerbarem Leistungsangebot als auch zur Regelung des Systems unverzichtbar ist, werden geeignete Anpassungen des Marktdesigns diskutiert. ABB ist maßgeblich an diesen Diskussionen beteiligt und trägt zur Ge-

Die zunehmende Vielfalt an Betriebszuständen in den Verteilungsnetzen erhöht den Informationsbedarf.

### 3 Auswirkungen der wesentlichen Treiber für Veränderungen auf verschiedene Teile der Wertschöpfungskette der elektrischen Energieversorgung und -anwendung

Treiber	Betroffener Systembereich				
	Konventionelle Erzeugung	Übertragung	Verteilung	Systembetrieb	Anwendung
Verbrauchsferne Erzeugung		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ferntransport</li> <li>- FACTS<sup>1</sup></li> <li>- Overlay-Netz/HGÜ</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stabilisierung mit FACTS<sup>1</sup></li> </ul>	
Dezentrale Erzeugung			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Automatisierung</li> <li>- Spannungsregelung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kommunikation</li> <li>- Steuerung</li> <li>- Virtuelle Kraftwerke</li> </ul>	
Volatile Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teillastfähigkeit</li> <li>- Flexibilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überregionaler Ausgleich</li> <li>- Overlay-Netz/HGÜ</li> <li>- Großspeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dezentrale Speicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lastmanagement</li> <li>- Virtuelle Kraftwerke</li> <li>- PMU/WAMS<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Speicher (in Anwendungen)</li> <li>- Lastbeeinflussung</li> </ul>
Neue Verbraucher (z. B. Elektromobilität)			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ladeinfrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lastbeeinflussung</li> </ul>	

<sup>1</sup> FACTS: Flexible Alternating Current Transmission Systems (flexible Drehstrom-Übertragungssysteme)

<sup>2</sup> PMU/WAMS: Phasor Measurement Unit (Phasenmessgerät)/Wide-Area Monitoring System (Weitbereichsüberwachung)

staltung des modernen elektrischen Energieversorgungssystems bei.

#### Übertragungsebene

In den Übertragungsnetzen führt die verbrauchsferne Erzeugung zu erhöhtem Kapazitätsbedarf. Aber auch die Volatilität der Erzeugung – insbesondere in Verbindung mit den niedrigen Volllaststundenzahlen der erneuerbaren Energien – erhöht den Übertragungsbedarf, denn die Ausweitung des Verbundnetzes stellt die kostengünstigste Möglichkeit zur Abstimmung von volatiler Erzeugung und Verbrauch dar [2].

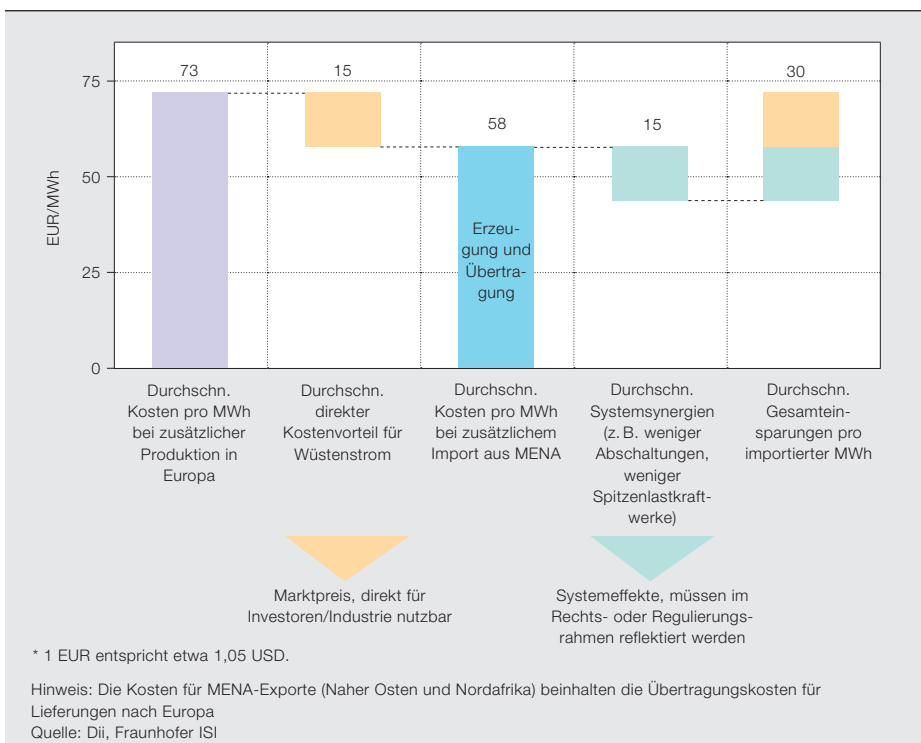
Der Nutzen der regionalen Ausweitung zur Integration eines sehr hohen Anteils erneuerbarer Energiequellen in die elektrische Energieversorgung ist in → 4 am Beispiel der Ausweitung des europäischen Verbunds auf den Norden Afrikas und den Nahen Osten dargestellt.

→ 4 zeigt die Kosten für eine zusätzliche, aus erneuerbaren Quellen in Europa erzeugte MWh bei Erreichen der energiepolitischen Ziele Europas und unter Voraussetzung weiterer Kostensenkungen bei den einzusetzenden Anlagen. Der Kostenvorteil ergibt sich aufgrund der im Vergleich zu Europa weitaus größeren Menge idealer Standorte in Nordafrika und dem Nahen Osten. Dabei sind die

Kosten für die zusätzlich benötigte Übertragungskapazität eingerechnet. Dieser Kostenvorteil kommt direkt den Betreibern der Anlagen zugute, und seine Erschließung erfordert außer verlässlichen Rahmenbedingungen keine besondere Unterstützung. Der andere in → 4 gezeigte Kostenvorteil basiert auf einer besseren Abstimmung vom Dargebot erneuerbarer Energien und dem Bedarf aufgrund der komplementären Jahresgänge von Wind und Verbrauch in Europa und den Regionen südlich des Mittelmeers. Diese Kostensenkung setzt eine geeignete Berücksichtigung im Marketdesign voraus.

Die unter den in → 4 beschriebenen Voraussetzungen benötigten Übertragungsnetze werden voraussichtlich andere sein als die der Vergangenheit. Angesichts der großen Übertragungsentfernungen in Verbindung mit den sich wegen der hohen Einspeisungsspitzen der erneuerbaren Quellen häufig grundlegend ändernden Lastflusssituationen erscheint eine überlagerte Übertragungsebene (Overlay-Netz) auf der Basis von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ) sinnvoll. Eine Schlüsselkomponente hierfür ist der von ABB entwickelte Hochspannungs-Gleichstrom-Leistungsschalter [4].

#### 4 Senkung der Kosten\* für erneuerbare Energie bei Integration der Stromversorgungssysteme Europas, Nordafrikas und des Nahen Ostens [3]



Die Ausweitung des Verbundnetzes stellt die kostengünstigste Möglichkeit zur Abstimmung von volatiler Erzeugung und Verbrauch dar.

#### Verteilungsebene

Die in den Verteilungsnetzen auftretenden Veränderungen sind vielfältig. In vielen Fällen erfordert der Ausbau dezentraler Erzeugung eine Verstärkung der Netze. Gerade in ländlichen Netzen mit verhältnismäßig langen Leitungen kommt es allerdings häufig vorher zu Problemen bei der Spannungshaltung. Da die Ursache nicht in der einen Belastungssituation liegt, für die das Netz ausgelegt wurde, sondern in der Vielzahl der Betriebszustände zwischen Einspeisung und Entnahme, ist die traditionelle Lösung der manuellen Anpassung der Übersetzung des Ortsnetztransformators nicht mehr ausreichend → 5. In solchen Fällen kann die häufig deutlich teurere Netzverstärkung durch Installation eines Spannungsreglers, z. B. eines regelbaren Ortsnetztransformators (siehe z. B. [5, 6]), hinausgezögert oder sogar ganz vermieden werden.

Die zunehmende Vielfalt an Betriebszuständen in den Verteilungsnetzen erhöht den Informationsbedarf. Dies wird zu einer zumindest teilweisen Automatisierung der bisher kaum fernüberwachten oder -gesteuerten Ortsnetzstationen führen. Sowohl die dezentrale Erzeugung als auch die Elektromobilität (aufgrund des mobilen Charakters der Verbraucher) werden dazu führen, dass die Kapazität der Verteilungsnetze künftig nicht mehr

für alle Situationen ausreicht. Damit werden Messung und Steuerung erforderlich – und weil grundsätzlich jedes technische System, also auch jede Messung, fehlerbehaftet sein kann, liegt die Lösung in der Übertragung bekannter Ansätze wie z. B. der Zustandsschätzung aus den Übertragungsnetzen auf die Verteilungsebene bis in die Sekundärverteilung hinein.

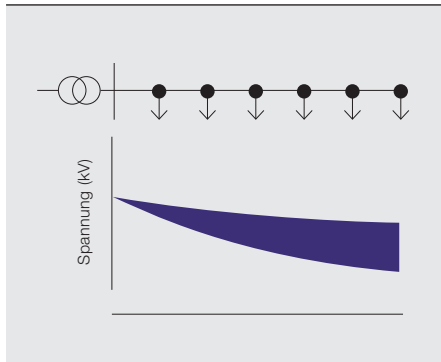
Wenn das Netz nicht mehr für jede Situation ausreichende Kapazität bietet, müssen Engpässe vorausschauend erkannt und aufgelöst werden. Diese Aufgabe ist in der elektrischen Energieversorgung prinzipiell nicht neu. Tatsächlich ist sie bei der Abstimmung zwischen (Groß-)Kraftwerken und Systembetreibern bewährte Praxis. Die Lösungen für die Verteilungsnetze müssen demgegenüber aber viel weitergehend standardisiert und automatisiert sein. Ein Beispiel für den vorausschauenden Verteilungsnetzbetrieb, der auch die Anforderungen des liberalisierten Marktes berücksichtigt, wurde in Deutschland im Rahmen des E-Energy-Projekts MeRegio entwickelt und erfolgreich zum Einsatz gebracht [7].

#### Verbrauch

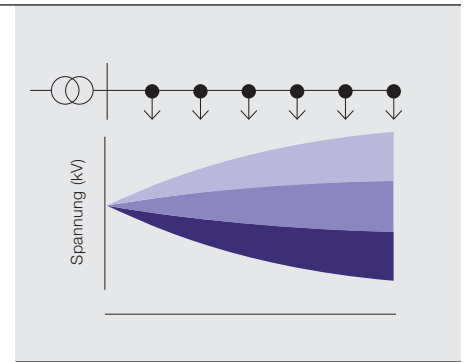
Aufgrund der Volatilität des Leistungsangebots erneuerbarer Energien gewinnt

Für die Nutzung von verbrauchsseitigen Flexibilitätsoptionen ist eine ganzheitliche Betrachtung der Bereitstellung von elektrischer Energie sowie von Wärme und Kälte unerlässlich.

## 5 Veränderung der Aufgabe der Spannungshaltung in Verteilungsnetzen bei Zunahme der dezentralen Erzeugung (schematisch)



5a Bisher: Verteilung; die Spannung sinkt entlang der NS-Leitungen, und das Spannungsband kann durch eine feste Einstellung des Ortsnetztransformators gewährleistet werden.



5b Heute und in Zukunft: Verteilung und Einspeisung; die Folge ist eine breitere Schwankung der Spannung am Ende der Leitung, was evtl. eine Spannungsreglung erfordert.

die kurzfristige Flexibilisierung des Verbrauchs an Bedeutung. Maßnahmen zur Lastbeeinflussung, insbesondere bei Verbrauchern mit funktionsbedingt integrierten Speichern, können dazu einen Beitrag leisten. Die Anforderungen an den Ausgleich von Last und Erzeugung für verschiedene Zeitbereiche sowie die heute üblichen und die zukünftig zu erwartenden Lösungen sind in → 6 dargestellt. Deutlich wird, dass die Lastbeeinflussung besonders in den ersten 15 min einen bedeutenden Beitrag leisten kann. Dieser Zeitbereich ist wichtig, weil er ausreicht, um schnellstartfähige Kraftwerke anzufahren, wenn plötzlich Erzeugungskapazität fehlt. Ob Lastbeeinflussung im sehr kurzfristigen Bereich, in dem heute die rotierende Masse der Kraftwerke systemstabilisierend wirkt, helfen kann, hängt davon ab, ob eine autonome Reaktion der Last auf Ungleichgewichte zwischen Erzeugung und Verbrauch erreicht werden kann. Oberhalb der 15 min ist die Nutzung von Lastbeeinflussung nur bei ausgewählten Anwendungen realistisch.

Die Lastbeeinflussung eignet sich besonders für Wärme- und Kälteanwendungen, da eine thermische Energiespeicherung meist kostengünstig realisierbar ist. Für die Nutzung von verbrauchssei-

gen Flexibilitätsoptionen ist deshalb eine ganzheitliche Betrachtung der Bereitstellung von elektrischer Energie sowie von Wärme und Kälte unerlässlich.

### Speichermöglichkeiten

Die Energiespeicherung ist ein weiterer wichtiger Baustein für die Integration erneuerbarer Energien. Aufgrund der Vielzahl von Anwendungen und verfügbaren Lösungen ist dies allerdings ein hochkomplexes Thema, das einer gesonderten Betrachtung bedarf. Der Artikel „Eine strahlende Zukunft“ auf Seite 27 dieses Hefts befasst sich genauer mit dem Thema Energiespeicherung.

## Der Übergang von einer auf thermischen Kraftwerken basierenden Stromversorgung zu einer Versorgung mit erneuerbaren Energien als Hauptquellen wird zu einer grundlegenden Neugestaltung der Systeme führen.

### Ausblick

Der Übergang von einer auf thermischen Kraftwerken basierenden Stromversorgung zu einer Versorgung mit neuen erneuerbaren Energien als Hauptquelle hat technische Auswirkungen in allen Bereichen der elektrischen Energieversorgung und -anwendung und wird zu einer grundlegenden Neugestaltung der Systeme führen.



## 6 Bedarf für den Ausgleich von Erzeugung und Last in unterschiedlichen Zeitbereichen und Lösungsoptionen heute und in Zukunft

Zeitbereich	Aufgabe	Traditionelle Lösungen	Zukünftige Lösungen
<30 s	Momentanreserve, Ausgleich kurzfristiger Schwankungen	– Rotierende Masse der Kraftwerke	– Batteriespeicher – Erneuerbare Energiere-sourcen, Lastmanagement kann ebenfalls beitragen
<15 min	Minutenreserve, Ausgleich kurzfristiger Schwankungen	– Wasserkraftwerke – Kraftwerke am Netz – Schnellstartfähige Kraftwerke	– Lastmanagement – Batteriespeicher
1-3 d	Ausgleich des Tagesgangs der Residuallast	– Pumpspeicher – Kraftwerke (Brennstofflager)	– Pumpspeicher – Lastmanagement (ausgewählte Anwendungen)
Wochen bis Monate	Ausgleich des Jahresgangs der Residuallast	– Kraftwerke (Brennstofflager) – Wasserspeicher (natürlicher Zufluss)	– Wasserspeicher (natürlicher Zufluss) – Verbundausweitung

In der konventionellen Erzeugung werden künftig Anlagen benötigt, die auch bei niedriger Auslastung und in häufig und schnell wechselnden Lastsituationen wirtschaftlich betrieben werden können. Die Übertragungsnetze werden wesentlich mehr Fernübertragungsaufgaben bei stark wechselnden Lastflusssituationen übernehmen müssen als in der Vergangenheit. Zum Ausgleich der starken Volatilität der neuen erneuerbaren Quellen sind großräumige Verbundsysteme, wie sie z. B. im Rahmen des Desertec-Konzepts für die Region Europa-Nordafrika-Naher Osten vorgeschlagen werden, eine Option.

Sowohl quantitativ als auch qualitativ sehr weitreichend sind vor allem die Folgen der dezentralen Einspeisung in den Verteilungsnetzen. Zunächst wird in vielen Fällen eine Erhöhung der Netzkapazität unvermeidbar sein. Da die Kombination von Entnahme und Einspeisung zu einer größeren Bandbreite an Betriebszuständen führt, wird häufig eine zusätzliche Spannungsüberwachung und -regelung erforderlich sein. Und zuletzt wird es – hauptsächlich wegen der niedrigen Vollaststundenzahlen der Solarenergie und wegen der Elektromobilität – nicht mehr sinnvoll sein, die Verteilungsnetze auf die seltenen Extremsituationen auszulegen. Dies führt zur Notwendigkeit von Überwachung und Steuerung bis in die Sekundärverteilung.

Der Ausgleich von Last und Erzeugung wird in Systemen mit stark schwankendem und nicht speicherbarem Primärenergiedargebot schwieriger. Neben den

bewährten, aber vom Landschaftsprofil abhängigen Pumpspeichern können Batteriespeicher im Kurzfristbereich, z. B. für die Frequenzstabilisierung und Spitzenreduktion, einen Beitrag leisten. Im längerfristigen Bereich, d. h. vor allem zum Ausgleich jahreszeitlicher Schwankungen, wird dagegen eher die Ausweitung der Systemgrenzen durch Vergrößerung der Verbundsysteme oder Vernetzung mit anderen Systemen wie der Wärme- und Gasversorgung zum Tragen kommen.

Die wesentlichen Änderungen in der Systembetriebsführung werden die Einbeziehung einer sehr großen Zahl dezentraler Einheiten, sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf der Verbrauchsseite, sowie die Frequenzregelung mit immer weniger stabilisierend wirkenden rotierenden Massen sein.

Die größten Herausforderungen bei der erforderlichen Weiterentwicklung der Systeme sind zum einen – mehr organisatorischer Natur – die Abstimmung der erforderlichen Maßnahmen in allen betroffenen Systembereichen und zum anderen – stärker auf der technischen Seite – die Entwicklung geeigneter Speicher, der Systembetrieb ohne rotierende Massen und die Integration sehr großer Zahlen dezentraler Einheiten in die Systembetriebsführung. Mit ihrem Innovationsvermögen treibt ABB das Wachstum der erneuerbaren Energien weiter voran und ebnet den Weg für die elektrischen Energieversorgungssysteme der Zukunft.

Eine der wesentlichen Änderungen in der Systembetriebsführung wird die Einbeziehung einer sehr großen Zahl dezentraler Einheiten auf der Erzeugungs- und der Verbrauchsseite sein.

### Jochen Kreusel

ABB, Konzernprogramm Smart Grids  
Mannheim, Deutschland  
jochen.kreusel@de.abb.com

### Literaturhinweise

- [1] VDE/ETG (2012): „Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke“. Analyse der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V. (VDE). VDE-Verlag, Frankfurt/Main
- [2] VDE/ETG (2008): „Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger“. Analyse der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V. (VDE), VDE-Verlag, Frankfurt/Main
- [3] F. Zickfeld, A. Wieland (2012): „Desert Power 2050“. Dii GmbH, München
- [4] J. Häfner, B. Jacobson (2011): „Proactive hybrid HVDC breakers – a key innovation for reliable HVDC grids“. Cigré International Symposium on the Electric Power System of the Future. Bologna, Italien
- [5] ABB Ltd. (2013): Smart-R-Trafo – Voltage Regulation Solution for Distribution Transformers“. Verfügbar unter [https://library.e.abb.com/public/c4fccc05930845de8a59a10286eb710c/Smart-R-Trafo\\_v3\\_clean.pdf?filename=Smart-R-Trafo\\_v3\\_clean.pdf](https://library.e.abb.com/public/c4fccc05930845de8a59a10286eb710c/Smart-R-Trafo_v3_clean.pdf?filename=Smart-R-Trafo_v3_clean.pdf)
- [6] T. Hammerschmidt et al. (2011): „Innovative concepts for efficient electrical distribution grids“. CIRED 2011, Paper 0447. Frankfurt/Main
- [7] Franke, C. et al. (2011): „On the necessary information exchange and coordination in distribution smart grids – experience from the MeRegio pilot“. Cigré International Symposium on the Electric Power System of the Future. Bologna, Italien