



## Stabiles Netz mit 100 Prozent Ökostrom

Die Stromversorgung allein mit erneuerbaren Energien ist in Zukunft keine Utopie – aber auch kein Selbstläufer



*In einem Stromnetz muss die bereitgestellte Energie zu jedem Zeitpunkt gleich der nachgefragten sein. Nur so bleiben Frequenz und Spannung stabil. Das zu gewährleisten ist Aufgabe der Netzbetreiber. Doch wenn volatile – also nicht beliebig regelbare – Energien die Hauptquelle für elektrische Energie sind, stellt das die Netzbetreiber vor Herausforderungen. Im Projekt Kombikraftwerk 2 haben Forscher ein Stromversorgungssystem aus 100 Prozent erneuerbaren Energien modelliert und gezeigt: Auch mit viel Photovoltaik und Windenergie kann das Netz jederzeit zuverlässig funktionieren.*

Um Verbrauch und Erzeugung im Gleichgewicht zu halten, benötigen die Übertragungsnetzbetreiber sogenannte Systemdienstleistungen. Eine wichtige Frage auf dem Weg zu einer Energieversorgung mit einem überwiegenden Anteil aus Ökostrom ist daher: In welchem Ausmaß können erneuerbare Energien das Netz stützen und zuverlässig Regelleistung bereitstellen? Projektleiter Kaspar Knorr vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES erklärt: „Im Projekt Kombikraftwerk 1 haben wir bereits nachgewiesen, dass Erneuerbare im Zusammenspiel mit Speichern den Strombedarf in Deutschland jederzeit decken können. Das Projekt Kombikraftwerk 2 zeigt: Sie können auch Systemdienstleistungen übernehmen. So ist ein Szenario mit einhundert Prozent erneuerbaren Energien vorstellbar.“

Systemdienstleistungen erbringen derzeit nahezu ausschließlich konventionelle Kraftwerke. Denn die Energieerzeugung von Kohle- und Gaskraftwerken ist wetterunabhängig planbar und die Bedingungen zur Teilnahme etwa am Regelleistungsmarkt wurden in der Vergangenheit auf diese zugeschnitten. Außerdem wirken die

Dieses Forschungsprojekt wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

rotierenden Massen der großen Synchrongeneratoren in den ersten Sekundenbruchteilen nach einem plötzlichen Lastanstieg beziehungsweise -abfall dank ihrer Trägheit als wichtige Stütze für das Netz. Denn auch schnell zuschaltbare Regelleistung braucht eine gewisse Zeit, um vollständig hochgefahren zu sein.

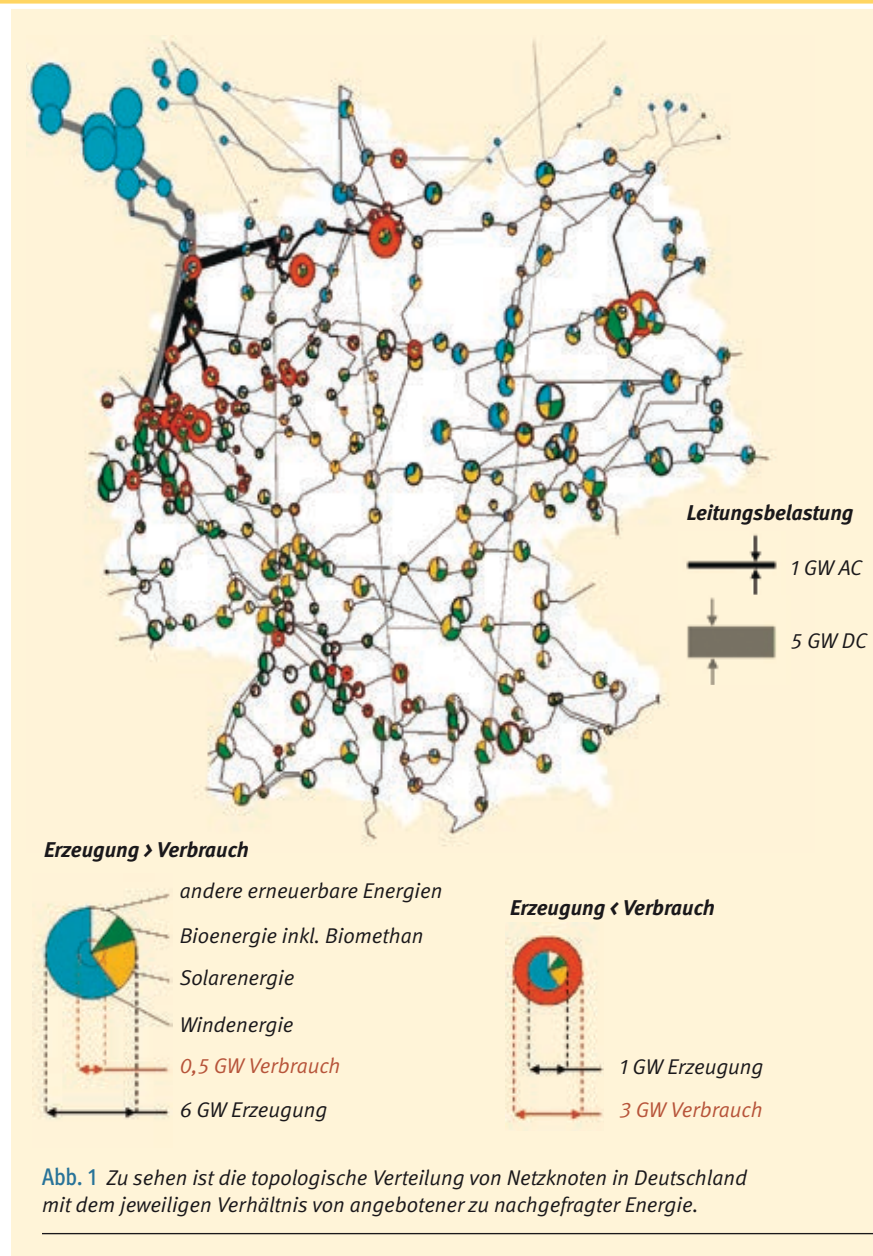
### Systemdienstleistungen vor dem Umbruch

Damit erneuerbare Energien zur Frequenzhaltung beitragen können, sind neue Rahmenbedingungen notwendig: Wind- und Sonnenenergie haben keine oder nur geringe rotierende Massen, das Netz verliert damit einen Teil seiner Trägheit. Dafür reagieren sie wesentlich schneller auf veränderte Bedingungen. Es gilt daher, den Markt so anzupassen, dass er den neuen Anforderungen gerecht wird. Derzeit muss Primärregelleistung nach 30 Sekunden vollständig zur Verfügung stehen. Doch was bedeutet das? Steigt die Last im Netz sprunghaft an, muss die Frequenz zunächst stabil bleiben, ehe die Primärregelleistung es vollständig stützen kann. Das übernehmen derzeit die rotierenden Massen. Fielen diese weg, würde das System einbrechen. „In unserem Szenario brauchen wir neue Anforderungen an die Primärregelleistung. Die Leistungselektronik von Photovoltaik kann Primärregelleistung in einigen Millisekunden bereitstellen. Windenergieanlagen benötigen nur rund fünf Sekunden“, erklärt Kaspar Knorr. „Im Szenario gibt es mit den Biomassekraftwerken noch rotierende Massen, die das Netz bis zum Einsetzen der PV-Anlagen stabilisieren. Technisch sind Erneuerbare so schnell, dass sie die geringere Trägheit ausgleichen können.“

Derzeit müssen Kraftwerksbetreiber ihre Primärregelleistung eine Woche im Voraus anbieten. Der Projektleiter dazu: „Dieses System wird sich auf Dauer nicht halten. Wenn erneuerbare Energien Systemleistung bereitstellen sollen, ist eine tägliche Ausschreibung notwendig.“ Das bedeutet: Jeden Tag können die Betreiber von Wind- und Solaranlagen auf aktuelle Wetterbedingungen eingehen und daraufhin festlegen, welchen netzdienlichen Beitrag sie für den Folgetag leisten können.

### Exakte Modellierung der Energieerzeuger

Nach Ansicht der Forscher gibt das Szenario des Forschungsvorhabens Kombikraftwerk 2 einen realistischen Ausblick auf das Jahr 2050. Die Annahmen beruhen auf detaillierten Wetterdaten, heutigen Anlagenstandorten und Planungen zum Netzausbau. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über unterschiedliche Netzknoten und ihre Leistungsbilanz an einem Mittag im Februar. Im Strommix macht Windenergie mit 60 Prozent den größten Anteil aus (Abb. 2). Dabei gehen die Forscher davon aus, dass die ausgewiesenen Offshore-Flächen komplett ausgenutzt und im Netz integriert sind sowie zusätzliches Potenzial an Land genutzt wird. Bei der Photovoltaik rechnen sie insgesamt mit dem vierfachen der derzeit installierten Leistung. Grob gesagt befinden sich im Norden und auf dem Meer vor allem Windenergieanlagen, während im sonnenreicheren Süden zunehmend Photovoltaik zum Einsatz kommt. Eine größere Anzahl von dezentralen unflexiblen und regelbaren Einzelanlagen lässt sich zu einem virtuellen Kraftwerk zusammenfassen und als eine Einheit betrachten. Das hat für Netzbetreiber den Vorteil, dass sie – ähnlich wie beim Betrieb mit Großkraftwerken – mit wenigen Erzeugern arbeiten können. In virtuellen Kraftwerken ergänzen sich die einzelnen Erzeuger und gleichen damit Schwankungen aus.

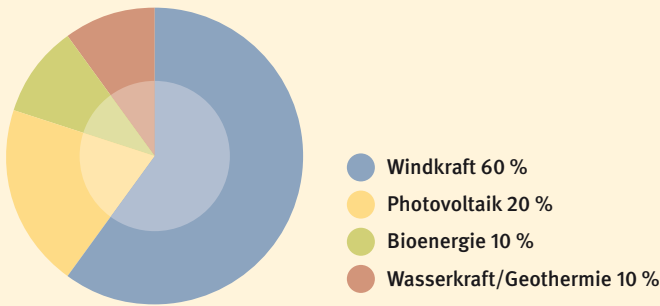


### Lokale Spannungshaltung sorgt für stabiles Netz

In einer Netzebene darf die Spannung um maximal zehn Prozent schwanken. Liegt sie darüber, können Schäden an Isolatoren oder Bauteilen entstehen. Zudem steigt die Gefahr eines Kurzschlusses. Fällt die Spannung zu weit ab, kann das System instabil werden und zusammenbrechen. Eine wesentliche Aufgabe der Netzbetreiber ist daher, das Spannungsniveau aufrecht zu halten. Im Gegensatz zur Frequenzhaltung erfolgt die Spannungshaltung lokal. Dazu ist sogenannte Blindleistung notwendig. Diese erzeugt zwar einen Stromfluss, der jedoch keine Arbeit verrichten kann. Durch gezieltes Hinzufügen von positiver oder negativer Blindleistung können Netzbetreiber so die Spannung beeinflussen.

Die Spannungen der einzelnen Netzknoten beeinflussen sich zudem gegenseitig. Das bedeutet: Bei allen Verfahren zur Spannungshaltung müssen auch die benachbarten Knoten in die Berechnungen mit aufgenommen werden. Im Projekt haben die Entwickler eine Proportionalregelung entworfen, mit deren Hilfe es möglich ist, die Spannung immer innerhalb des vorgegebenen Spannungsbandes zu halten. Lediglich an einigen Einspeiseknoten lag die Spannung etwas ober- beziehungsweise unterhalb der Toleranz. Insgesamt attestieren die Forscher dem Szenario, dass es auch beim Einsatz von erneuerbaren Energien die Spannung dank der neuen Regelung unabhängig von der Jahreszeit im vorgegebenen Band halten kann. Die geplanten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Trassen können zudem dabei helfen, hohe Blindleistungen beim Leistungstransport zu verringern.





Erzeugung	Jahresenergieertrag [TWh]	Installierte Leistung [GW]	Jahresvolllaststunden [h]	Anteil an der Stromerzeugung [%]	Verbrauch	Jahresenergieverbrauch [TWh]	Installierte Leistung [GW]	Jahresvolllaststunden [h]	Anteil am Stromverbrauch [%]
<b>Import</b>	11,5	20,0	325		<b>Export</b>	11,5	36,6	314	
<b>Überschuss</b>	58,5								
<b>Onshore-Windenergie</b>	213,9	87,0	2.584	35,58					
<b>Offshore-Windenergie</b>	108,7	40,0	3.862	18,08					
<b>Photovoltaik</b>	119,7	133,7	909	19,91					
<b>Bioenergie vor Ort</b>	34,5	17,3	2.000	5,74					
<b>Biomethan</b>	26,0			4,33					
<b>Geothermie</b>	41,0	4,7	8.760	6,82	<b>alte &amp; neue Verbraucher</b>	523,6			87,09
<b>Wasserkraft</b>	25,0	4,8	5.253	4,16	<b>Netzverluste</b>	8,7			1,45
<b>Pumpspeicher</b>	11,1	12,6	883	1,85	<b>Pumpspeicher</b>	14,8	11,2	1.318	2,46
<b>Batterien</b>	2,7	55,0	49	0,45	<b>Batterien</b>	3,2	55,0	58	0,53
<b>Methankraftwerke</b>	18,5	53,8	828	3,08	<b>Power-to-Gas</b>	50,9	13,1	3.869	8,47
	Σ601,2			Σ100		Σ601,2			Σ100

Abb. 2 Verteilung der Energieerzeugung, Jahresenergieerträge sowie installierte Leistungen und Volllaststunden im Überblick

### Versorgungswiederaufbau von unten nach oben

Derzeit bauen die Netzbetreiber nach einem Stromausfall die Spannung von der Höchstspannung abwärts zur Niederspannung wieder auf. Das bedeutet: Zunächst sorgen große Kraftwerke für ein stabiles Netz auf der 400-kV-Ebene, ehe darunterliegende Netzbereiche zugeschaltet werden. Dieses Verfahren wird bei einer Versorgung mit vielen Erzeugern in der Nieder- und Mittelspannungsebene nicht funktionieren. Daher haben die Ingenieure einen Versorgungswiederaufbau von unten nach oben untersucht. Das funktioniert so: Nach einem Stromausfall bilden sich mehrere Inselnetze, ohne dass die Höchstspannungsebene unter Spannung steht. Wenn die Inseln stabil laufen, können sie verbunden werden. Danach schalten sie sich auf das Übertragungsnetz. Um das zu testen, haben die Entwickler einen Versuchsaufbau realisiert. Dieser bildete ein typisches Verteilnetz aus Biogasanlage, Windenergieanlage, regelbaren und nichtregelbaren Lasten nach. Zum Testbeginn war die Anlage vom Verbundnetz getrennt, nach und nach konnten die Ingenieure die einzelnen Teile aktivieren – bis das Netz am Schluss stabil lief und sich mit dem Verbundnetz synchronisieren konnte. Die Schlussfolgerung: Ein Versorgungswiederaufbau von unten und eine Spannungshaltung mit erneuerbaren Energien ist möglich.

### Speichertechniken für Zeiten ohne Sonnenschein und Wind

Doch was ist, wenn der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint? Dafür sind Speichertechnologien notwendig. Zudem springen dauerhaft verfügbare

## Virtuelles Kraftwerk

Das Ziel virtueller Kraftwerke ist, die Energieerzeugung kleiner Anlagen so zu koppeln, dass Netzbetreiber sie als ein großes Kraftwerk behandeln können. Meistens bestehen sie aus einer Mischung von Photovoltaik- und Windenergieanlagen, die um Biomasse- und Wasserkraftwerke ergänzt werden. Aber auch Geothermieanlagen und Blockheizkraftwerke können ihre Leistung einbringen und so Teile von virtuellen Kraftwerken sein.

Die Leitwarte kommuniziert mit den einzelnen Anlagen und ermittelt, welche Energiemenge vom Netz benötigt wird. Zudem prüft sie, wie viel Leistung die volatilen Erzeuger zum gegenwärtigen Zeitpunkt liefern können. Für Vorhersagen nutzt sie unter anderem hoch aufgelöste Wetterdaten und kombiniert sie mit den Standorten der Erzeuger. Mit diesen Informationen und den Preisprognosen der Strommärkte kann ein virtuelles Kraftwerk daraufhin Strom einspeisen.

Nachteilig ist der Kommunikationsaufwand. Dieser verlangt einerseits eine hohe Rechenleistung und verursacht auf der anderen Seite zusätzliche Kosten. Dennoch könnten virtuelle Kraftwerke in Zukunft eine sichere Energieversorgung aufrecht erhalten.

bare Anlagen wie zum Beispiel Biomasse-Kraftwerke im Notfall ein. Damit auch bei anhaltend schlechtem Wetter eine sichere Versorgung gewährleistet ist, muss überschüssige Energie gespeichert werden. Die Forscher setzen dabei hauptsächlich auf das sogenannte Power-to-Gas-Verfahren. Die überschüssige Energie spaltet Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Der Wasserstoff lässt sich in einer chemischen Reaktion methanisieren und in das Erdgasnetz einspeisen. Über Gaskraftwerke kann dann bei schlechtem Wetter eine Rückverstromung erfolgen. Ein effektiver Netzausbau kann dabei helfen, Erneuerbare Energien zu unterstützen. Im Zusammenspiel mit neuen Stromspeichern lässt sich so das notwendige Grundgerüst schaffen. Die Forscher gehen davon aus, dass Großspeicher bis zum Jahr 2050 technisch ausgereift und wirtschaftlich sind. Weiterhin besitzt in der Simulation jede dritte Photovoltaikanlage auf Gebäuden eine Batterie. Die schon jetzt erfolgreich im Einsatz befindlichen Pumpspeicher-Kraftwerke unterstützen die neuen Energiespeicher.

### Bis 2050 sind neue Innovationen notwendig

Weiteren Entwicklungsbedarf sehen die Forscher unter anderem beim Anteil netzbildender Umrichter, der Spannungshaltung aus unterlagerten Netzebenen im Zusammenspiel mit dem Übertragungsnetz, bei Untersuchungen zum Kurzschlussstrom und bei weiteren Simulationen zur Netzstabilität. Außerdem sehen sie die weitere Kopplung zwischen Stromversorgung, Verkehr und Wärmenetzen als einen Schlüssel zur Energieversorgung der Zukunft. Darüber hinaus muss das bestehende Stromnetz ausgebaut und optimiert werden. Aktuelle Forschungsprojekte zu diesen Themen laufen unter anderem innerhalb der Forschungsinitiativen Energiespeicher und Zukunftsfähige Stromnetze.



## Forschung für moderne Stromnetze

Eine erfolgreiche Energiewende geht nur über den effektiven Ausbau von Stromnetzen. Dazu unterstützen die Bundesministerien für Wirtschaft und Energie sowie Bildung und Forschung die Forschungsinitiative Zukunftsfähige Stromnetze mit mindestens 150 Millionen Euro. Die geförderten Projekte reichen von Grundlagenforschung bis hin zu konkreten Anwendungen und Produkten – in Verteilnetzen, Übertragungsnetzen und bei der Offshore-Netzanbindung. Einige Vorhaben der Initiative im Überblick:

**Offshore-Netze an das Stromnetz anbinden** – Eine große Herausforderung einer zukünftigen Energieversorgung ist unter anderem die Netzanbindung von Offshore-Windparks. Zwar speisen die ersten bereits ins Netz ein, doch weitere Forschung kann den Anschluss verbessern und eine Vernetzung der Windparks untereinander ermöglichen. Im Projekt NSON analysieren Wissenschaftler unterschiedliche Netzanbindungsvarianten eines möglichen Offshore-Stromnetzes inklusive der Auswirkungen auf das deutsche und europäische Verbundnetz.

**Mehr Leistung mit einem Leitungssystem transportieren** – Die Projektbeteiligten des Forschungsvorhabens DCCTL überprüfen, ob sich bestehende Stromtrassen so nutzen lassen, dass eine größere Leistungsübertragung möglich wird. Bestehende Drehstromsysteme sollen dann statt 2.000 MVA bis zu 3.000 MVA übertragen. In hybriden Gleichspannungs-Freileitungs-Systemen soll an einem Strommast sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom übertragen werden. Die Gleichstrom-Systeme sollen dabei bis zu fünf Gigawatt übertragen. Ein weiteres Forschungsziel ist die Verlegung von Kabeln unter der Erde – denn Deutschland ist dicht besiedelt und Freileitungen können nicht überall verlegt werden.

**Europas Stromnetz auf erneuerbare Energien vorbereiten** – Als das heutige Stromnetz entstand, waren dezentrale Erzeugung und erneuerbare Energien noch kein Thema. Darum ist das Netz auch für andere Bedingungen optimiert. Im Projekt GENESYS2 untersuchen Forscher, was für einen effizienten Netzausbau notwendig ist und wie sich Erweiterungen realisieren lassen. Die Randbedingungen gibt dabei das bestehende Netz vor. Denn vorhandene Leitungen, Umspannstationen und Netzspannungen lassen sich nicht ohne weiteres verändern. Die Ergebnisse werden unterschiedliche Entwicklungskorridore aufzeigen und untereinander vergleichbar machen. Die Wissenschaftler können dann nicht nur technisch, sondern auch ökonomisch sinnvolle Szenarien empfehlen.

Weitere Forschungsvorhaben und Informationen zu Projektfortschritten gibt es auf <http://forschung-stromnetze.info>

## Projektbeteiligte

- » **Projektleitung:** Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel, Kaspar Knorr, [Kaspar.Knorr@iwes.fraunhofer.de](mailto:Kaspar.Knorr@iwes.fraunhofer.de); Britta Zimmermann, [Britta.Zimmermann@iwes.fraunhofer.de](mailto:Britta.Zimmermann@iwes.fraunhofer.de)
- » **Wissenschaftliche Begleitung:** CUBE Engineering GmbH, Kassel | Leibniz Universität Hannover, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEH)
- » **Industriepartner:** Enercon GmbH, Aurich | Ökobit GmbH, Föhren | SMA Solar Technology AG, Niestetal | Siemens AG, München | SolarWorld AG, Bonn
- » **Öffentlichkeitsarbeit:** Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin
- » **Wetterdaten:** Deutscher Wetterdienst, Offenbach

## Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Mit Windstrom das Netz stabilisieren. BINE-Projektinfo 08/2014
- » Landkreis Harz erprobt Stromversorgung der Zukunft. BINE-Projektinfo 13/2012
- » Ländliches Stromnetz smart geregelt. BINE-Projektinfo 12/2012
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter [www.bine.info/Projektinfo\\_06\\_2015](http://www.bine.info/Projektinfo_06_2015)

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter [www.bine.info/abo](http://www.bine.info/abo)

## Impressum

**Projektorganisation**  
Bundesministerium  
für Wirtschaft und Energie (BMWi)  
11019 Berlin

Projekträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Aleksandar Rakić  
52425 Jülich

**Förderkennzeichen**  
0325248A-D

**ISSN**  
0937 - 8367

**Herausgeber**  
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut  
für Informationsinfrastruktur GmbH  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Autor**  
Andreas Michels

**Urheberrecht**  
Titelbild und alle weiteren Abbildungen:  
Fraunhofer-Institut für Windenergie und  
Energiesystemtechnik IWES, Kassel

Eine Verwendung von Text und  
Abbildungen aus dieser Publikation ist  
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion  
gestattet. Sprechen Sie uns an.

## Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**0228 92379-44**  
**[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)**

**BINE Informationsdienst**  
Energieforschung für die Praxis  
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197  
53113 Bonn  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages