

## Optimale Auslastung von Seekabeln

# Offshore-Netzplanungswerkzeug mit TCM-Simulation

Strom aus Offshore-Windenergie erfordert hohe Investitionen für die Errichtung der Windparks und deren Netzanschlussysteme. Durch Kappung selten auftretender Belastungsspitzen besteht jedoch die Möglichkeit, die im Meeresboden verlegten Seekabel nicht auf die höchste, jemals zu erwartende Strombelastung auszulegen. Für den Betrieb von Seekabeln wurde dazu das Verfahren Transmission Capacity Management (TCM) entwickelt. Mit einem Simulationstool lässt sich die Wirkung von TCM schon bei der Planung und Genehmigung von Seekabeln bewerten.

Die auf See aus Windenergie erzeugte elektrische Energie wird von den Offshore-Windparks (OWP) über Seekabel angelandet und an Land weiter zu den Verbrauchern transportiert. Um negative Auswirkungen einer Erwärmung des Sediments durch die Verlustwärme im Umfeld der Kabel auf die im Meeresboden lebenden Organismen zu verhindern, müssen die Kabel hinreichend ausgelegt und ausreichend tief im Boden verlegt werden. Zur Minimierung der Belastungen aus der Nutzung der Windenergie auf See soll sich gemäß Vorgabe des Bundesamts für Naturschutz zum Beispiel im Hochseebereich der ausschließlichen Wirtschaftszone Deutschlands (AWZ) die Temperatur der obersten 20 cm des Meeresbodens durch die Verlustwärme der Seekabel um maximal 2 K erhöhen. Daher ist bei der Genehmigung von Seekabeln in Deutschland die Einhaltung des 2-K-Kriteriums als Vorsorgewert zwingend zu beachten.

### Maritime Planung

Um die thermische Belastbarkeit der Seekabel unter Einhaltung des 2-K-Kriteriums maximal nutzen zu können, wurde ein unter der Bezeichnung Transmission Capacity Management (TCM) bekannt gewordenes Optimierungsverfahren entwickelt. Der aktuelle Entwicklungsstand des TCM-Verfahrens ermöglicht eine automatische zeitvariable Begrenzung der OWP-Einspeiseleistung auf ein Seekabel basierend auf einem dynamischen thermischen Modell. Dieses prüft kontinuierlich und vorausschauend die Einhaltung des 2-K-Kriteriums.

Angewendet werden kann dieses Verfahren beispielsweise bei Einzelausfällen paralleler Seekabelverbindungen, bei Teilausfällen oder wartungsbedingten

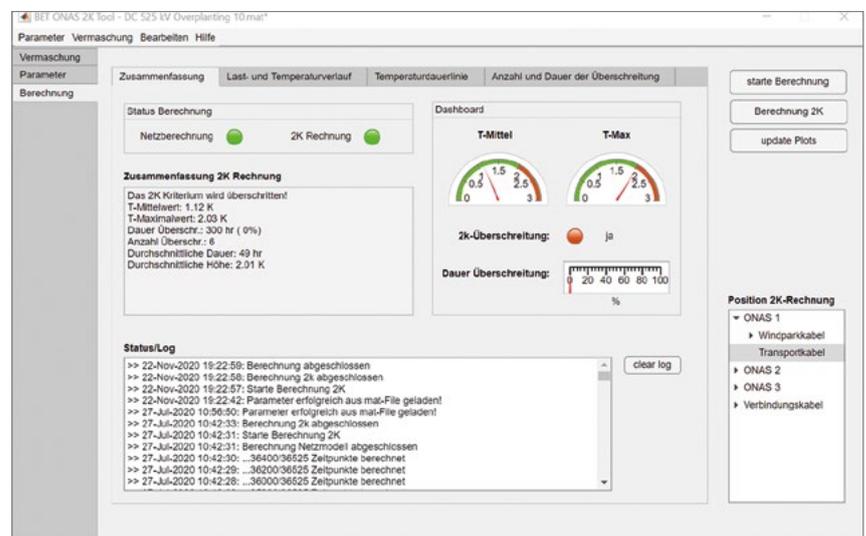


Bild 1. Bedienoberfläche des Simulationstools mit Ergebnisdarstellung der  $\Delta T$ -Berechnung

Leistungseinschränkungen von Offshore-Netzanschlussystemen (ONAS) per Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Es kann jedoch auch bei der Auslegung neuer Systeme zur Dimensionierung der Leiterquerschnitte und der Verlegetiefe von Seekabeln genutzt werden. Ein weiterer Anwendungsfall ist das Overplanting von OWP. Dabei wird die Leistung des Windparks höher ausgelegt als die Übertragungskapazität des Netzanschlussystems, um eine bessere Ausnutzung der Seekabel in wesentlichen Zeitfenstern zu erreichen.

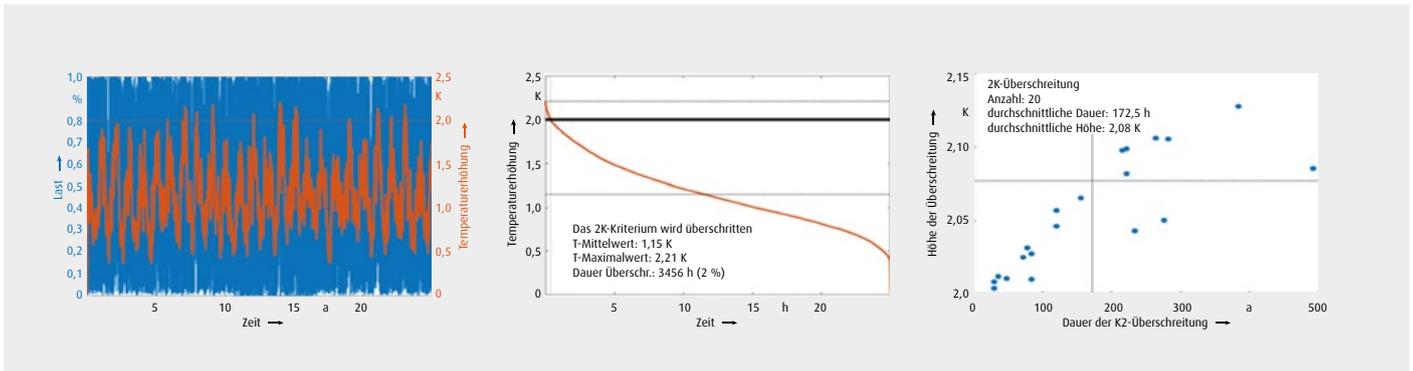
### Planungswerkzeug

Die maritime Flächenentwicklungsplanung (FEP) und die Genehmigungsverfahren von Offshore-Windenergieanlagen und Seekabeln obliegen dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Im Rahmen der vom

BSH beauftragten wissenschaftlichen Studie »Zukünftige Rahmenbedingungen für die Auslegung von Offshore-Windparks und deren Netzanbindungssystemen« zur Unterstützung der Aufstellung und Fortschreibung des FEP wurde von der BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH (BET) eine als Offshore-Netztool bezeichnete interaktive Software entwickelt.

Zweck der Anwendung ist die Simulation der Auslastung von Seekabeln in Kombination mit Umgebungseinflüssen, um den Einfluss dieser Parameter im Hinblick auf die Erfüllung des 2-K-Kriteriums ermitteln zu können. **Bild 1** gibt einen Eindruck von der grafischen Bedienoberfläche der Anwendung.

Mit der Anwendung wird das BSH in die Lage versetzt, mit behördeneigenen Ressourcen, das heißt unabhängig von Berechnungen der OWP-Betreiber

Bild 2. Grafische Ergebnisdarstellungen von  $\Delta T$ -Berechnungen

und der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), verschiedene Möglichkeiten zur effizienteren Nutzung bestehender und künftiger Offshore-Netzanschlusssysteme evaluieren zu können. Die grafischen Ausgabemöglichkeiten der Anwendung illustriert **Bild 2**.

Die von BET entwickelte Anwendung ermöglicht in der Basisversion zunächst ausschließlich die unveränderte Verwendung extern vorgegebener Zeitreihen für die auf Seekabelverbindungen wirkenden Einspeiseleistungen. Im Laufe der rund 30 Monate umfassenden Projektlaufzeit stellte sich heraus, dass die Möglichkeit einer Simulation des TCM-Verfahrens von grundlegender Bedeutung für den dauerhaften Nutzen des Offshore-Netztools für das BSH erscheint. BET wurde daher mit einer Weiterentwicklung, das heißt einer Erweiterung des BSH-Offshore-Netztools um eine TCM-Simulation, beauftragt.

### TCM-Simulation

Das TCM-Verfahren wurde von der als Offshore-Windparkbetreiberin aktiven RWE Innogy GmbH (heute RWE Renewables GmbH) entwickelt und im Jahr 2013 als »Verfahren zur Stromregelung« beim europäischen Patentamt angemeldet [1]. Es wurde von RWE und Tennet TSO für den Einsatz im Cluster HelWin weiterentwickelt, wo es als TCM2 in den Jahren 2017 und 2018 gemeinsam mit allen Anschlussnehmern in diesem Cluster erfolgreich implementiert und getestet wurde [2]. Im Nachgang wurde das Verfahren auf alle geeigneten Netzanschlüsse in der deutschen Nordsee ausgerollt und ist seitdem flächendeckend im Einsatz.

Für die Berechnung des thermischen Verhaltens des Meeresbodens in der Umgebung eines Verlustwärme abgebenden Seekabels wird im Rahmen des

TCM-Verfahrens der in **Bild 3** dargestellte vereinfachte Ansatz einer linienförmigen Wärmequelle gemäß der internationalen Norm IEC 60853 [3] verwendet. Untersuchungen an der Universität Duisburg haben gezeigt, dass dieser Ansatz bei homogenen Bodenverhältnissen im Vergleich zu komplexen Finite-Elemente-Verfahren ebenbürtige Ergebnisse mit erheblich geringerem Rechenaufwand liefert [4].

Im Rahmen der Entwicklung der TCM-Simulation für das BSH durch BET unterstützte die RWE Renewables GmbH das Projekt und stellte eine Black-Box-Software-Version des patentrechtlich geschützten TCM-Verfahrens unentgeltlich zur Verfügung. Diese Black-Box-Software wurde von BET zur Validierung und als Benchmark für die entwickelte TCM-Simulation verwendet.

Ohne zusätzliche Maßnahmen zur Begrenzung der Einspeiseleistung müssen Seekabel so dimensioniert werden, dass bei jedem möglichen, das heißt erwartbaren Belastungsfall das 2-K-Kriterium eingehalten wird. Dieses Kriterium muss dabei in jedem Fall eingehalten werden, unerheblich wie lange und wie oft die maximale Belastung des Seekabels auftritt. Durch die Möglichkeit zur Begrenzung der Leistung durch Kappung seltener Einspeisespitzenleistungen kann der maximale Belastungsfall reduziert werden und somit eine effizientere Dimensionierung der Seekabelverbindungen erfolgen. Die betriebliche Umsetzung einer solchen aktiven Leistungsregelung ist unter dem Begriff Transmission Capacity Management (TCM) eingeführt worden und wird seit mehreren Jahren genutzt.

Was muss ein TCM-System leisten und wo liegen die Herausforderungen? Der einem TCM-System zugrundeliegende Regelungsalgorithmus muss vor al-

lem in der Lage sein, durch intelligente Leistungsabregelung Belastungsfälle zu verhindern, die eine Verletzung des 2-K-Kriteriums zur Folge hätten. Die Herausforderung liegt dabei darin, vorausschauend zu agieren, das heißt, rechtzeitig mögliche kritische Belastungsfälle in der Zukunft zu erkennen und die erforderliche Leistungsabregelung vorausschauend zu bestimmen.

Aufgrund der thermischen Trägheit des Seebodens ist eine reaktive Abregelungsstrategie im Fall hoher Temperaturanstiege nicht ausreichend. Stattdessen wird beim TCM mit dem Berechnungsverfahren nach IEC 60853 kontinuierlich für den Fall eines plötzlichen, maximalen Leistungssprungs die Temperaturentwicklung in der Zukunft simuliert und die Einhaltung des 2-K-Kriteriums innerhalb eines definierten Kontroll-Zeitfensters überwacht. Dabei hängt die in die Zukunft projizierte Temperaturentwicklung zu jedem Berechnungszeitpunkt auch von den registrierten Änderungen der Verlustleistung zu jedem Zeitpunkt in der Vergangenheit ab. Ermittelt der TCM-Algorithmus am Ende des Kontroll-Zeitfensters eine Überschreitung des 2-K-Kriteriums, kommt es zur Abregelung. Dabei wird iterativ durch schrittweise Senkung der Leistung und Wiederholung der Berechnung die notwendige Absenkungshöhe bestimmt, die gerade ausreichend ist, um eine Überschreitung der Temperatur innerhalb des Kontroll-Zeitfensters zu vermeiden.

Dieser iterative Optimierungsansatz des TCM ist für den praktischen Einsatz unproblematisch, führt jedoch bei dem vom BSH spezifizierten, anders gearteten Anwendungsfall für Simulationsrechnungen über bis zu 20 Jahre und für verschiedene Konfigurationsvarianten zu hohen Anforderungen an die Rechnerleistung oder zu erheblichen Rechen-

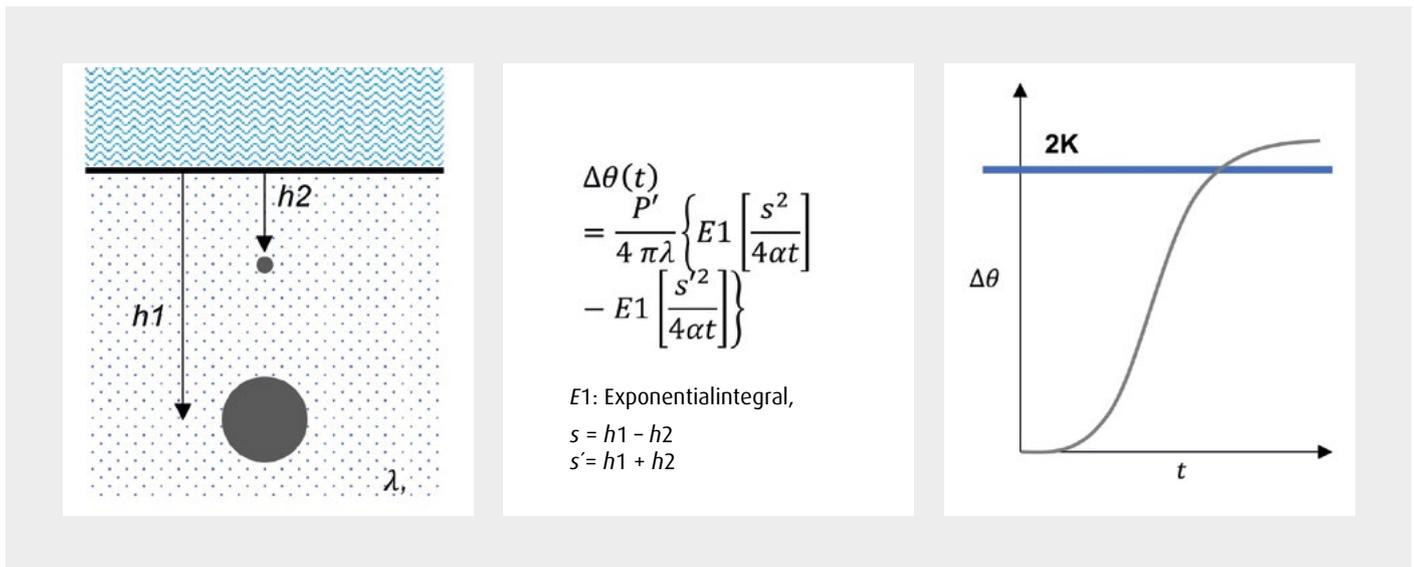


Bild 3. Vereinfachter Ansatz einer linienförmigen Wärmequelle gemäß IEC 60853

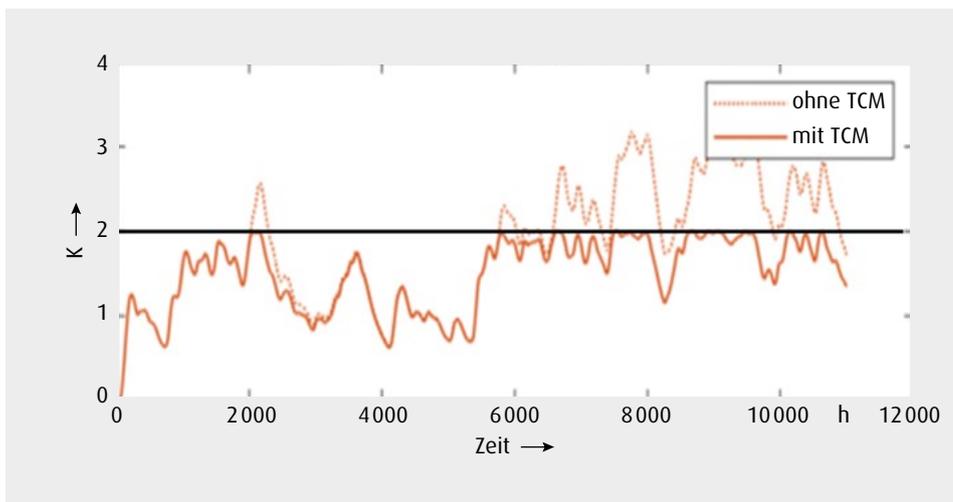


Bild 4. Gegenüberstellung der Ergebnisse zweier  $\Delta T$ -Berechnungen mit und ohne zugeschalteter TCM-Simulation

zeiten. Für umfangreiche Sensitivitätsberechnungen, wie sie im Zusammenhang der Ausgestaltung des FEP durch das BSH erforderlich waren, ist also eine Methodik gefordert, die bei ausreichender Genauigkeit eine performante Berechnung und somit auch die Bewertung verschiedener Szenarien und Testfälle ermöglicht.

Daher hat BET den TCM-Algorithmus auf Basis einer analytischen Lösung der Leistungsabregelung simuliert und diese Simulation in das Offshore-Netztool implementiert. In der BET-Simulation des TCM-Algorithmus wird in Abhängigkeit der berechneten 2-K-Überschreitung im unregulierten Betrieb innerhalb eines

Kontroll-Zeitfensters analytisch unmittelbar die notwendige Leistungsabregelung bestimmt. In **Bild 4** sind beispielhaft die Ergebnisse von zwei Berechnungen mit und ohne zugeschalteter TCM-Simulation dargestellt. Mit der von BET gewählten Modellierung des TCM-Algorithmus wurde eine hochperformante Simulation ohne Genauigkeitsverluste realisiert.

Den konkreten Nutzen von TCM und dessen Berücksichtigung auf Basis von Simulationsrechnungen schon in der Planungs- und Genehmigungsphase verdeutlicht auch das folgende Beispiel: Auslegungsrechnungen im Auftrag des BSH für  $\pm 525$ -kV/2-GW-HVDC-Offshore-

Netzanschlussysteme ergaben, dass im Bereich der offenen See HVDC-Seekabel unter Standardverlegebedingungen mit einem Leiterquerschnitt von 1800 mm<sup>2</sup> Kupfer ausreichend dimensioniert werden können, um das 2-K-Kriterium in diesem Meeresbereich in einer Aufpunkttiefe von 20 cm einhalten zu können.

Im ökologisch sensibleren Umfeld des Küstenmeers ist jedoch eine Aufpunkttiefe von 30 cm für die 2-K-Betrachtung im Sinne eines Vorsorgewerts einzuhalten. Selbst mit einer Dimensionierung des HVDC-Leiterquerschnitts von 2500 mm<sup>2</sup> Kupfer wurden in einer Simulationsrechnung über einen Zeitraum von 25 Jahren noch bei knapp 3 % aller untersuchten Zeitintervalle Überschreitungen des 2-K-Grenzwerts festgestellt [5].

Um diese seltenen Überschreitungen sicher vermeiden zu können, bieten sich drei technische Lösungen an:

- Einbettung der Kabel tiefer in den Seeboden
- Veränderung des Wärmewiderstands des Seebodens durch einen Bodenaustausch
- gezielte Abregelung von Einspeiseleistung mittels TCM.

Die beiden ersten Möglichkeiten erfordern einen stärkeren Eingriff in den Meeresboden und erhöhen die Kosten für die Kabelverlegung. Die Anwendung von TCM und dessen Berücksichtigung schon in der Planungs- und Genehmigungsphase stellt also eine sowohl ökologisch als auch ökonomisch vorteilhafte Lösung dar.

## Fazit und Ausblick

Mit dem Offshore-Netztool wurde ein einfach zu handhabendes Werkzeug entwickelt, mit dem das BSH in die Lage versetzt wurde, im Rahmen von maritimen Flächenentwicklungsplanungen und von Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen auf See und für Offshore-Netzanschlussysteme eigenständige Berechnungen und Analysen durchzuführen.

Durch die Erweiterung der Modellierung um eine TCM-Simulation ist es möglich, neben dem Einsatz fest vorgegebener Zeitreihen für die OWP-Einspeisungen auch die Untersuchung von Offshore-Netzanschlussystemen durchzuführen, die TCM-Regelungen als aktive Elemente zur Optimierung der Seekabelauslastung enthalten. Mit der TCM-Simulation lassen sich nun auch Untersuchungen zu den technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten und Grenzen einer dynamisch optimierten Seekabelauslastung durchführen.

Für die Nutzung der Anwendung zur Untersuchung von Seekabeln in künftigen Hybridprojekten als Kombination von Offshore-Netzanschlussystemen mit Interkonnektoren ist eine zusätzliche Erweiterung der Modellierung Voraussetzung. Als neues aktives Element sind in Hybridprojekten die Master Controller for Interconnector Operation (MIO) im Modell zu berücksichtigen. Diese koordinieren die vorrangigen Einspeisungen aus Offshore-Windenergieanlagen mit der Transportnachfrage aus dem grenzüberschreitenden Stromhandel unter Berücksichtigung der zulässigen Strombelastbarkeit der Seekabel und des 2-K-Kriteriums.

## Literatur

- [1] Feltes, C.; Runge, J.; Koch, F.: Verfahren zur Stromregelung. Europäische Patentanmeldung EP 2 680 390 A2, veröffentlicht im Patentblatt 2014/01 des Europäischen Patentamts, Brüssel, 2014.
- [2] Feltes, C.; Rathke, C.: Beschreibung TCM-II-Verfahren. Gemeinsame Präsentation Tenet und Innogy (heute RWE Renewables GmbH) am 30. Mai 2018.
- [3] IEC 60853-2:1989: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables. Part 2: Cyclic rating of cables greater than 17/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages. Genf, 1989.
- [4] Brakelmann, H.; Stammen, J.: Thermal analysis of submarine cable routes: LSM or FEM? 2006 IEEE International Power and Energy Conference (PECon 2006) Proceedings, S. 560–565, Putra Jaya/Malaysia, 2006.
- [5] BET, Deutsche WindGuard, WindPower & more, Prognos: Endbericht »Unterstützung zur Aufstellung und Fortschreibung des FEP«, Berlin, 2020, [www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Fortschreibung/\\_Anlagen/Downloads/Endbericht\\_Auftrag\\_Auslegung\\_Windenergie\\_Netzanbindungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bsh.de/DE/THEMEN/Offshore/Meeresfachplanung/Fortschreibung/_Anlagen/Downloads/Endbericht_Auftrag_Auslegung_Windenergie_Netzanbindungen.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

>> Dr.-Ing. **Jürgen Wilms**,  
BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen

**Peter Edel** M. Sc. M. Sc.,  
BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen

**Hendrik Berhalter** M. Sc.,  
BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen

Dr.-Ing. **Christian Feltes**,  
RWE Renewables GmbH, Hamburg

Dr.-Ing. **Jörn Runge**,  
RWE Renewables GmbH, Hamburg

>> [juergen.wilms@bet-energie.de](mailto:juergen.wilms@bet-energie.de)  
[peter.edel@bet-energie.de](mailto:peter.edel@bet-energie.de)  
[hendrik.berhalter@bet-energie.de](mailto:hendrik.berhalter@bet-energie.de)  
[christian.feltes@rwe.com](mailto:christian.feltes@rwe.com)  
[joern.runge@rwe.com](mailto:joern.runge@rwe.com)

>> [www.bet-energie.de](http://www.bet-energie.de)  
[www.rwe.com](http://www.rwe.com)