

HydrogREenBoost: Wasserstoff für die Sicherstellung des Stromnetzbetriebs

Chris Schewe und Dietmar Graeber

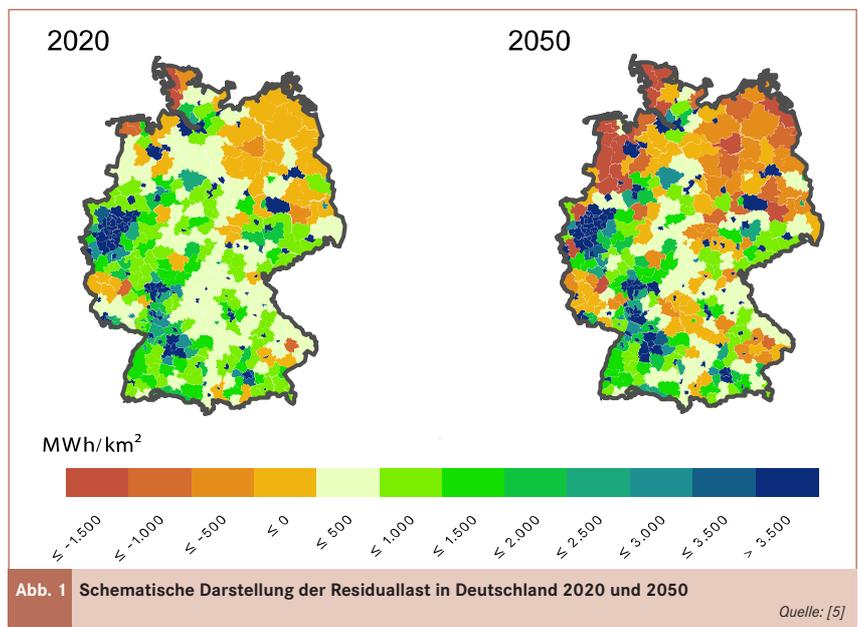
Die Energiewende führt durch den Ausbau erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung neuer Verbraucher zu komplexen Lastflüssen im Übertragungsnetz und beansprucht die Netzstabilität erheblich. Netzengpässe und hohe Redispatch-Kosten unterstreichen den Bedarf an effizienten Technologien zur weiter verbesserten Netzauslastung. Der Artikel untersucht die aktuelle Situation im Übertragungsnetz sowie das Konzept des (hybriden) Netzboosters, einer Kombination aus Batterie- und Wasserstofftechnologie, zur Erhöhung der Netzkapazität.

Die aktuelle Situation der stark steigenden Auslastung der Übertragungskapazität im deutschen Höchstspannungsnetz im Rahmen des Fortschreitens der Energiewende führt durch ein zunehmendes Redispatchvolumen zu hohen Kosten. So entstanden im Jahr 2023 beispielsweise Kosten in Höhe von 3,2 Mrd. € bei einem Redispatchvolumen von ca. 34,3 TWh [1]. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen ist zukünftig eine weitere Steigerung des Volumens und der Kosten zu erwarten [2].

Der Übergang des Stromnetzes von der historisch zentralen, aber „lastnahen Erzeugung“ hin zu dem aus überwiegend erneuerbaren Energien gespeisten Zielnetz ist ebenso eine Transformation hin zu einer „lastfernen Erzeugung“. Nach der Abschaltung der thermischen Kraftwerke (Kernkraftwerke und perspektivisch auch Kohlekraftwerke) bei zeitgleichem Ausbau der erneuerbaren Energiequellen entsteht eine massive regionale Diskrepanz aus Last und Erzeugung. Abb. 1 stellt das beschriebene Szenario anhand der Residuallast dar. Die rötlich gefärbten, energieinflationären Bereiche vergrößern und zentralisieren sich bis ins Jahr 2050 deutlich. Dadurch entsteht ein hoher Energietransportbedarf von Nord nach Süd/West. Der mittlere Energietransportweg – ein Indikator für den Transportkapazitätsbedarf – wird sich von bisher ca. 60 km auf ein Vielfaches von 300 km erhöhen [3], [4].

Hintergrund: Die präventive Netzführung und das (N-1)-Kriterium

Die Netzführung hat die Aufgabe, die vorhandenen Betriebsmittel so einzusetzen, dass alle Verbraucher jederzeit mit ausreichender und qualitativ genügender (Spannung, Frequenz) elektrischer Ener-



gie versorgt werden. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass die einzelnen Betriebsmittel und das Energieversorgungssystem vor Beschädigung, beispielsweise durch Überlastung, geschützt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass sowohl im Normalbetrieb als auch bei Störungen das statische und dynamische Verhalten der Betriebsmittel in den Netzen durch die Netzführung überwacht und ggf. steuernd eingegriffen werden muss [6].

Der Systemzustand des Übertragungsnetzes (bzw. des elektrischen Energieversorgungnetzes allgemein) gilt als sicher, falls im Normalbetrieb die zulässigen betrieblichen Grenzwerte für Strom und Spannung eingehalten werden und gleichzeitig die (N-1)-Sicherheit gewährleistet ist [6]. Reichen die vorhandenen Übertragungskapazitäten des Netzes nicht mehr aus, spricht man von einem „Netzengpass“. Angesichts der oben beschriebenen

Veränderungen bereitet die Gewährleistung eines sicheren Betriebszustands zunehmend Schwierigkeiten, was zum häufigen Einsatz von Steuermaßnahmen, beispielsweise in Form von Redispatch durch die Übertragungsnetzbetreiber, führt.

Bei der Berücksichtigung des (N-1)-Kriteriums im Netzbetrieb steht „N“ für die zum sicheren Betrieb notwendige Anzahl an Netzbetriebsmitteln (z. B. Leitungen, Trafos etc.). (N-1) beschreibt dementsprechend den Fall des Ausfalls eines zum Netzbetrieb erforderlichen Netzbetriebsmittels. Spricht man nun von einem sicheren Netzbetriebszustand, so ist dieses Kriterium jederzeit erfüllt: Der Ausfall einzelner Netzbetriebsmittel hat keine negativen Auswirkungen auf den sicheren Netzbetrieb für einen bestimmten Lastflusszustand. Es handelt sich beim herkömmlichen (N-1)-Kriterium um eine präventive Schutzmaßnahme, folglich be-

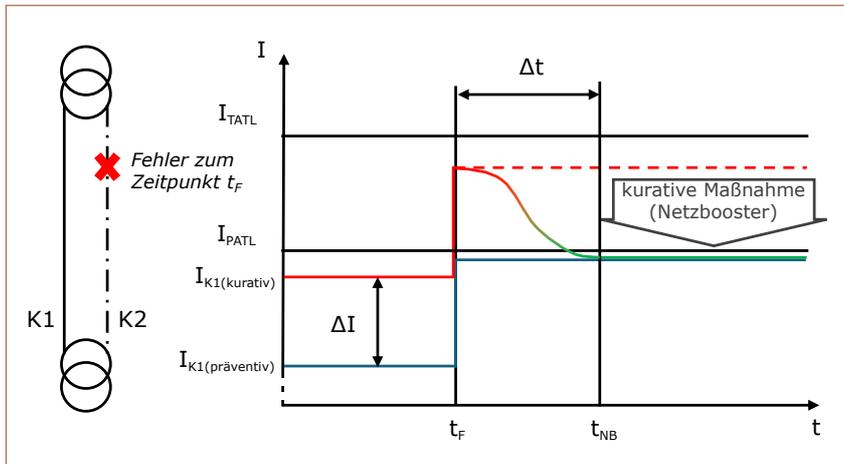


Abb. 2 Wirkungsweise kurativer Maßnahmen

Quelle: angelehnt an [8]

darf es für die Umsetzung dieses Konzepts einer großen Redundanz an zum Netzbetrieb notwendiger Komponenten bzw. Übertragungsleitungen, da ein entsprechender Ausfall nicht mit hinreichender Sicherheit vorhergesagt werden kann und somit eine vollständige Auslastung der Komponenten prinzipbedingt nicht möglich ist. Eine Auslastung im Bereich von 70 % gilt heutzutage als üblich [7]. Steigt die Auslastung weiter an, wird das (N-1)-Kriterium gefährdet (Netzengpass) und es müssen durch die System- bzw. Netzführung adäquate Maßnahmen gemäß § 13 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) eingeleitet werden.

Die kurative Netzführung als Teil der Lösung?

Um die Engpassproblematik zu entschärfen, muss die Übertragungskapazität des Netzes erhöht werden. Dabei wird nach dem NOVA-Prinzip (Netz-Optimierung

vor Verstärkung vor Ausbau) vorgegangen [2]. Der Ausbau, z.B. in Form von Neubau von Übertragungsleitungen oder dem HGÜ-Overlaynetz, findet gemäß des NOVA-Prinzips aufgrund von Kosten- sowie der Zeitschienenproblematik als letztmögliche Maßnahme statt. Folglich ergibt sich die Frage nach weiteren Möglichkeiten der Erhöhung der Übertragungsnetzkapazität. Eine vielversprechende Option ist die kurative Netzführung als Teilaspekt der innovativen Systemführung. Dabei steht kurativ (heilend), im Gegensatz zu präventiv, für ein zeitlich nachgelagertes Eingreifen, also erst nach dem Eintritt des Fehlers. Prinzipbedingt muss hierfür eine kurzfristige Überlast der dauerhaft zugelassenen Betriebsmittelgrenzen gestattet sein [2].

Ein zentraler Vorteil der kurativen Systemführung ist die Möglichkeit der Sicherstellung des Netzbetriebs mithilfe des „kurativen (N-1)-Prinzips“. Dabei können

die bestehenden Netzbetriebsmittel und Leitungen dauerhaft näher an ihrer Kapazitätsgrenze betrieben werden, was zu einer Erhöhung der Übertragungskapazität von bis zu 20 % ($\approx \Delta I$) führt [6]. Kommt es aufgrund eines Ausfalls tatsächlich zum Netzengpass, so werden entsprechende Maßnahmen erst im folglich vorliegenden Fehlerfall aktiviert. Der Unterschied der kurativen zu der präventiven Netzführung wird in Abb. 2 dargestellt. Im Fall der präventiven Netzführung wird die Leitung K1 für den potenziell eintretenden Fehler zum Zeitpunkt t_F um den Faktor ΔI geringer ausgelastet. Im Fall der kurativen Netzführung führt der Fehlerfall zur Überschreitung der TATL (Temporary Admissible Transmission Loading). Allerdings sind kurzfristige Lastspitzen bis I_{TATL} zulässig. Die für einen Dauerbetrieb überlastete Leitung wird anschließend innerhalb der Aktivierungsdauer der kurativen Maßnahme Δt auf eine zulässige Übertragungskapazität unterhalb des PATL-Werts entlastet.

Die Netzboostertechnologie als kurative Maßnahme

Als konkrete kurative Maßnahme zur Netzentlastung kann ein sogenannter Netzbooster eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um einen großdimensionierten Batteriespeicher, der im Fehlerfall schnell als Last oder Erzeuger agieren kann, um eine überlastete Leitung bzw. ganze Netzgebiete zu entlasten [2]. Das Netzbooster-Konzept beschreibt den Einsatz dieser Großbatterie im Sinne der Netzdienlichkeit.

In Abb. 3 wird das entsprechende Wirkprinzip anhand eines Auslastungsverlaufs der Leitung I_{K1} dargestellt. Zum Zeitpunkt t_F tritt ein Fehlerfall ein und der Netzbooster stellt die für einen zulässigen Dauerbetrieb notwendige Leistungsdifferenz I_{NB} bereit, indem er beispielsweise als Verbraucher entgegen der Lastflussrichtung der Leitung agiert und somit die Leitung I_{K1} bis unter den zulässigen PATL-Wert entlastet. Innerhalb des Zeitraums von t_{NB} und t_{Abi} (ca. 1 h) muss der Netzbooster von anderen Maßnahmen abgelöst werden. In der Regel ist diese Zeitdauer ausreichend, um entsprechende Topologie- und / oder Redispatchmaßnahmen durchzuführen. Der Netzbooster stellt somit ein betriebliches Mittel dar, um

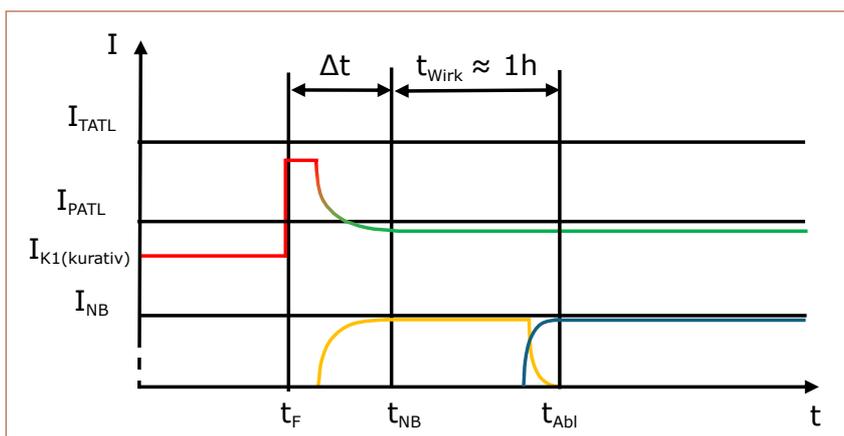


Abb. 3 Auswirkung eines Netzboostereinsatzes

Quelle: angelehnt an [9]

die starre präventive N-1-Reserve teilweise durch eine flexible Reaktion im Ernstfall zu ersetzen.

HydrogREenBoost – Innovatives Netzboosterkonzept

Im Rahmen des „Zukunftsprogramms Wasserstoff Baden-Württemberg“ wurde das Forschungsprojekt „Entwicklung großtechnischer Optionen zum Einsatz von grünem Wasserstoff auf Basis des Netzboosterkonzepts zur Erhöhung der Netzstabilität“, kurz „HydrogREenBoost“ (H2REB), initiiert. In diesem hybriden Netzboosterkonzept, welches in den Jahren 2020 und 2021 von der Technischen Hochschule Ulm und der TransnetBW entwickelt wurde, wird der Batteriespeicher um eine zusätzliche Hauptkomponente in Form einer Wasserstoffturbine inklusive Gasnetzanschluss erweitert.

Eine Kombination des hybriden Netzboosters mit einer Power-To-X-Anlage bzw. einer „Wasserstoffinfrastruktur“, im Wesentlichen bestehend aus einem Wasserstoffspeicher, einem Elektrolyseur und der entsprechenden Balance of Plant-Technologie bietet weitere Einsatzpotentiale und erhöht zusätzlich die Resilienz der Anlage. Ziel dieser Erweiterung ist die Reduktion der tatsächlich benötigten Batteriekapazität sowie die Systemoptimierung durch einen Multi-Use-Ansatz der Einzelkomponenten. Hohe spezifische Speicherkosten der elektrochemischen Energiespeicherung, ein großer Platzbedarf sowie der Einsatz an „knappen Ressourcen“ sprechen prinzipiell gegen den großflächigen Einsatz von Großbatterien, wie sie beim herkömmlichen Netzboosterkonzept vorgesehen sind, wohingegen geringere spezifische Speicherkosten chemischer Energieträger (z.B. Wasserstoff) sowie die getrennte Skalierbarkeit der Energie und Leistung für einen Turbineneinsatz sprechen.

Im hybriden Netzbooster-Konzept übernimmt die Batterie, aufgrund der vorhandenen Dynamik, folglich primär die Überbrückung der Hochlaufzeit der Turbine und kann somit deutlich kleiner dimensioniert werden. Die Wasserstoff-Gasturbine deckt im Minuten- bis Stundenbereich den Leistungsbedarf und stellt sicher, dass das System auch für längere Netzengpässe

gerüstet ist. Durch diese Kopplung von Batterie- und Wasserstofftechnologie kann die bestehende Netzkapazität effizienter genutzt und gleichzeitig ein Beitrag zur Integration von Wasserstoff in das Energiesystem geleistet werden.

Während des H2REB Forschungsprojekts wurden die technischen Komponenten des Konzepts unter realistischen Bedingungen in einem kleinskaligen Netzlabor erprobt, um das Zusammenspiel der Technologien zu optimieren und praktische Erfahrungen zu sammeln. Weiterhin wurden die technischen Eigenschaften der Komponenten detailliert modelliert und es fand eine Studie zur Netzdienlichkeit des Konzepts statt, bei der Stromlastflüsse in verschiedenen zukünftigen Szenarien analysiert und die Effizienz sowie Effektivität des Konzepts bewertet wurden. Zudem wurden konkrete Umsetzungskonzepte für einen großtechnischen Einsatz entwickelt und auf ihre Wirtschaftlichkeit hin evaluiert.

Das Netzlabor an der Technischen Hochschule Ulm

Zur praktischen Erprobung des hybriden Netzbooster-Konzepts wurde an der THU ein Netzlabor im Demonstrationsmaßstab aufgebaut. Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Integration der systematischen Einzelkomponenten sowie die Entwicklung der integrierten Steuerung für das komplexe Zusammenspiel aller Komponenten gelegt. Das Netzlabor um-

fasst neben den in Abb. 4 gezeigten Komponenten auch eine umfassende Simulationsumgebung sowie eine speziell hierfür entwickelte Steuer- und Visualisierungssoftware. Auf dessen Grundlage wurden Entwicklungen und Validierungen von Steuerungsalgorithmen durchgeführt, mit der Zielsetzung der Optimierung der Dynamik, der Identifikation potenzieller Fehlerquellen und der Analyse der Energieflüsse unter realen Bedingungen.

Mittels der Forschungsinfrastruktur des Netzlabor konnten die entwickelten Test-szenarien zur Leistungsfähigkeit und Effizienz eines hybriden Netzboosters umfangreich evaluiert werden. Neben den isolierten Versuchsreihen der Einzelkomponenten konnten nach erfolgreicher Systemintegration Erkenntnisse zu dem Realeinsatz der hybriden Netzbooster-technologie generiert werden (Abb. 5). So wurde eine zuverlässige Leistungsbereitstellung des Systems nach spätestens 2,4 Sekunden erreicht (entspricht der Reaktionszeit Δt in Abb. 2 und 3) sowie die vollständige Lastablösung des Batteriespeichersystems durch die Wasserstoffturbine nach 25 Minuten.

Ausblick

Der Erfolg des Projekts zeigt das Potenzial innovativer Systemführung, bei den Herausforderungen der Energiewende einen signifikanten Beitrag zu leisten. Insbesondere die Ergebnisse der künftigen Netzboosteranlage in Kupferzell, einem



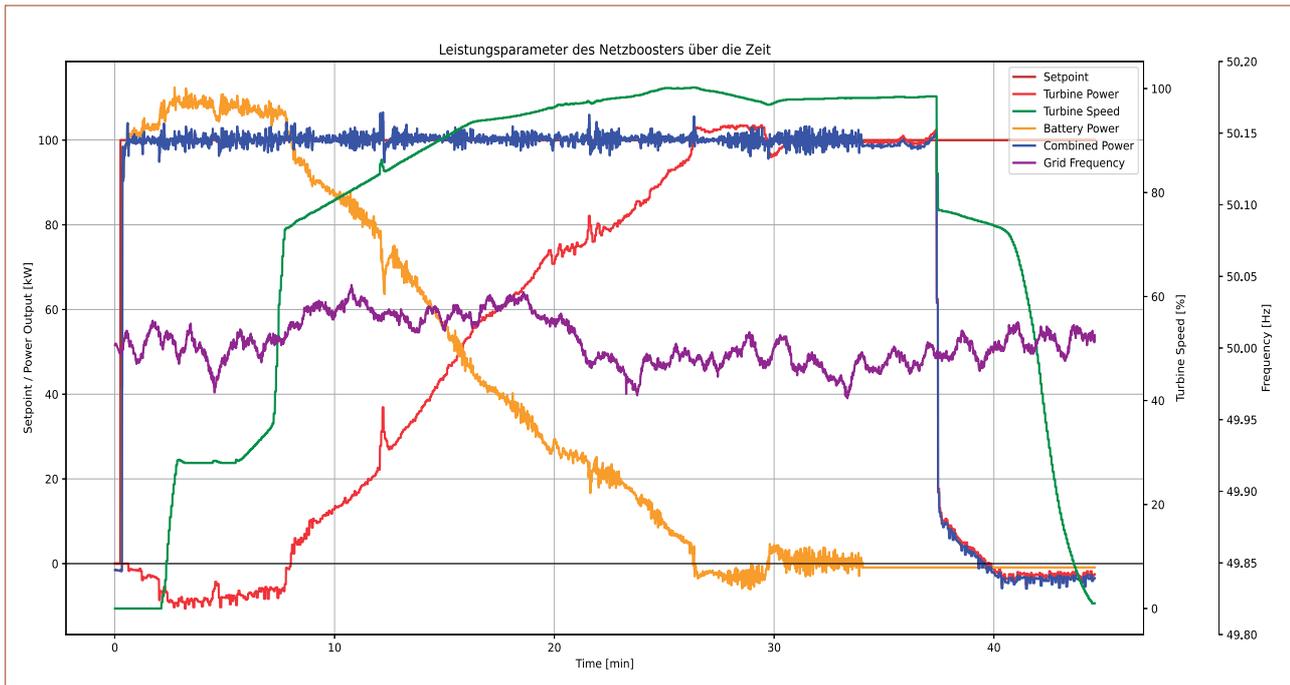


Abb. 5 Leistungskennlinie der hybriden Netzboosteranlage der Technischen Hochschule Ulm

Quelle: eigene Darstellung

250 MW Batterie Netzbooster, sowie die wirtschaftliche Entwicklung der Wasserstoffindustrie werden den langfristigen Erfolg der Technologie bestimmen. Im Nachgang des Forschungsprojekts gilt es nun die mittels des hybriden Netzboosters entstehenden Erlöspotentiale beim Handel am Strommarkt und mit Wasserstoff mit weiteren Analysen zu untersuchen. Zudem ist der netzdienliche Einsatz von Elektrolyseuren sowie die Integration dieser in das bestehende Energiesystem detailliert zu erforschen. Zukünftige Arbeiten sollten auch die Integration des entwickelten Modellierungsframeworks des hybriden Netzboosters in Übertragungsnetzmodelle unter Verwendung von Echtzeitsimulatoren umfassen.

Aber auch mit dem Netzlabor in Ulm wird es künftig weitergehen. Als Teil des Energieparks der THU, einer einzigartigen Forschungslandschaft verteilter Energiesysteme, wird die entstandene Infrastruktur im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsprojekte weiter eingesetzt, um Erkenntnisse rund um die Themen Sektorenkopplung, Energiewirtschaft und vor allem Energieflexibilität zu gewinnen. Das Netzlabor leistet damit einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung der Energiewende, indem es die Brücke zwischen technologischer

Innovation und praktischer Anwendung schlägt.

Literatur

- [1] Bundesnetzagentur, „Monitoringbericht 2024,“ 2025.
- [2] Übertragungsnetzbetreiber CC-BY-4.0, „Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, zweiter Entwurf,“ 2023.
- [3] J. Vanzetta, Interviewee, 90 Jahre Systemführung – Immer in Balance! [Interview]. 2019.
- [4] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, „Stromausfall,“ Wissenschaftsforum, Bd. 12, 2019.
- [5] J. Lotze et al., „Energy System 2050 – Towards a decarbonised Europe: Full study report,“ TransnetBW GmbH, Stuttgart, 2022.
- [6] K. Schäfer, Systemführung, Wiesbaden: Springer, 2022.
- [7] B. Fuchs et al., „Studie zu Aspekten der elektrischen Systemstabilität im deutschen Übertragungsnetz bis 2023,“ Aachen, 2015.
- [8] Gesamtverband InnoSys 2030, „InnoSys 2030 – Innovationen in der Systemführung bis 2030,“ 2022. [Online]. Available: https://www.innosys2030.de/wp-content/uploads/InnoSys-Projektabschlussbericht_Kurzbericht.pdf. [Zugriff am 11 März 2025].
- [9] T. Van Leeuwen, A.-K. Meinerzhagen, S. Raths und A. Roehder, „Integration kurativer Maßnahmen in das Engpassmanagement im deutschen Übertragungsnetz,“ 16. Symposium Energieinnovation, Graz, 2020.

Grundlage des Artikels ist das vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderte Projekt HydrogREenBoost von Technischer Hochschule Ulm, TransnetBW GmbH, Karlsruher Institut für Technologie und Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg.

C. Schewe und Prof. Dr. D. Graeber, Institut für Energietechnik und Energiewirtschaft, Technische Hochschule Ulm
Kontakt: dietmar.graeber@thu.de

> PRINT
> ONLINE
> DIGITAL



Weitere Informationen unter:
www.et-magazin.de