

# Die zirkuläre Energiewirtschaft – Potenziale der Kreislaufwirtschaft für die Windkraft

Anika Regett und Nikolas Köppel

*Unter Kreislaufwirtschaft wird ein wirtschaftliches System mit geschlossenen Stoffkreisläufen verstanden. Bezogen auf die Energiewirtschaft bedeutet dies in erster Linie die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Ein erneuerbares Energiesystem geht jedoch wiederum mit einem Bedarf an möglicherweise kritischen Rohstoffen einher. Daher stellt sich weiterführend die Frage, inwiefern durch zirkuläre Ansätze der Kreislaufwirtschaft die Rohstoffkritikalität von Energietechnologien gesenkt werden kann. Neben Potenzialen zur Ressourcenschonung kann der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft zudem mit wirtschaftlichen Potenzialen, z. B. Kostensenkungen oder neuen Geschäftsmodellen, einhergehen. Zur Identifikation der Potenziale einer solchen „zirkulären Energiewirtschaft“ bedarf es daher einer systematischen Identifikation und Bewertung möglicher Synergien zwischen Kreislauf- und Energiewirtschaft. Die Seltene Erde Neodym (Nd), die in Permanentmagneten von Windenergieanlagen (WEA) eingesetzt wird, dient als Beispiel, um ein mögliches Vorgehen aufzuzeigen und potenzielle zirkuläre Ansätze zu diskutieren.*

## Methodischer Ansatz

In einer zirkulären Energiewirtschaft werden die Rohstoffe, die für die Infrastruktur eines erneuerbaren Energiesystems benötigt werden, in Kreisläufen geführt, mit dem Ziel, den Verbrauch von Ressourcen und deren Kritikalität zu senken. Voraussetzung, um ein solches Konzept zu realisieren, ist die Identifikation zirkulärer Potenziale. Die dazu entwickelte Methodik gliedert sich in die drei Phasen: Rohstoffkritikalität, Lebenszyklus und zirkuläre Ansätze. In der ersten Phase „Rohstoffkritikalität“ wurde Nd, das in den Permanentmagneten von Synchrongeneratoren in WEA enthalten ist, als ein potenziell kritischer Rohstoff identifiziert. Auf Basis von Markthochlaufszensarien für diesen Anlagentyp folgte eine Abschätzung der Entwicklung des Nd-Bedarfs. Darauf aufbauend konnten im Zuge eines Kritikalitätsscreenings die Ursachen für die Kritikalität von Neodym aufgezeigt werden.

In Phase 2 „Lebenszyklus“ wurde der Lebenszyklus (Herstellung, Betrieb und Entsorgung) eines Permanentmagneten in WEA hinsichtlich der Funktion des kritischen Rohstoffs sowie des Zustands des Rohstoffs über den Lebenszyklus hinweg untersucht. Zudem erfolgte eine Analyse des aktuellen Stands von Recycling und Entsorgung.

In der dritten Phase „Zirkuläre Ansätze“ wurden literaturbasiert zunächst mögliche Ansätze wie Second-Life, Remanufacturing



Dem Second-Life der Magnete in einer neuen Windanlagen-Generation stehen schnelle Innovationszyklen im Generator- und in der Magnetwerkstoffentwicklung entgegen

Foto: denisismagilov | Fotolia.com

und Recycling beschrieben. Anschließend wurden die technischen Anforderungen, die für eine Umsetzung dieser zirkulären Ansätze erforderlich sind, identifiziert und mit dem Lebenszyklus der Permanentmagneten in WEA aus Phase 2 abgeglichen. Hieraus ergibt sich ein theoretisches Potenzial für die Anwendbarkeit zirkulärer Ansätze auf diesen WEA-Anlagentyp. Zudem wurden Treiber und Hemmnisse diskutiert, die einer Hebung des theoretischen Potenzials zur Ressourcenschonung gegenüberstehen.

## Rohstoffkritikalität von Permanentmagneten

Rohstoffkritikalität ist nicht mit einer physikalischen Knappheit gleichzusetzen, vielmehr sind die Gründe für die Kritikalität von Rohstoffen vielfältig. Gemäß dem Matrixkonzept in [1] ergibt sich die Kritikalität aus der Kombination von Vulnerabilität und Versorgungsrisiko. Da diese beiden Dimensionen jedoch hauptsächlich ökonomische Risiken abbilden, wurde nach dem Vorbild

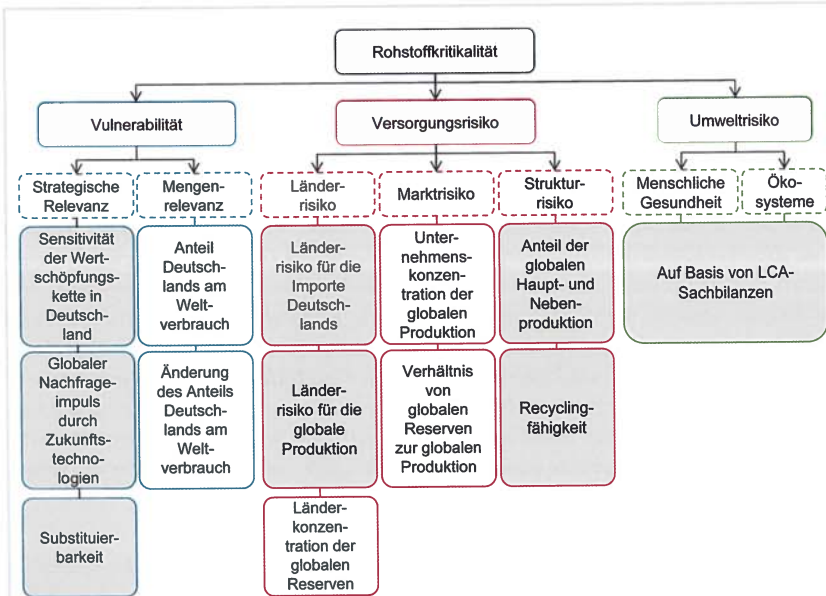


Abb. 1 Darstellung der Gründe (grau hinterlegt) für die Ressourcenkritikalität von Neodym anhand von drei Dimensionen nach [1] und [2]

von [2] eine Umweltdimension ergänzt. Abb. 1 zeigt die drei Dimensionen der Rohstoffkritikalität sowie die dazugehörigen Indikatoren. Hervorgehoben sind die Gründe für die Nd-Kritikalität, die aus dem Kritikalitätsscreening resultieren.

Es zeigt sich, dass für die Kritikalität von Nd nicht die geologische Verfügbarkeit verantwortlich ist [3]. Vielmehr besteht ein

Länderrisiko, in diesem Fall eine geopolitische Abhängigkeit von der chinesischen Produktion [1], sowie damit einhergehend die Verantwortung für lokale Umweltrisiken und Immissionsbelastungen [4]. Hervorzuheben sind an dieser Stelle die unsachgemäße Ausbringung von chemischen Löse- und Extraktionsmitteln [4] und thoriumhaltigen Stäuben [5]. Weiterhin besteht ein Strukturrisiko, da für Neodym keine großtechnisch

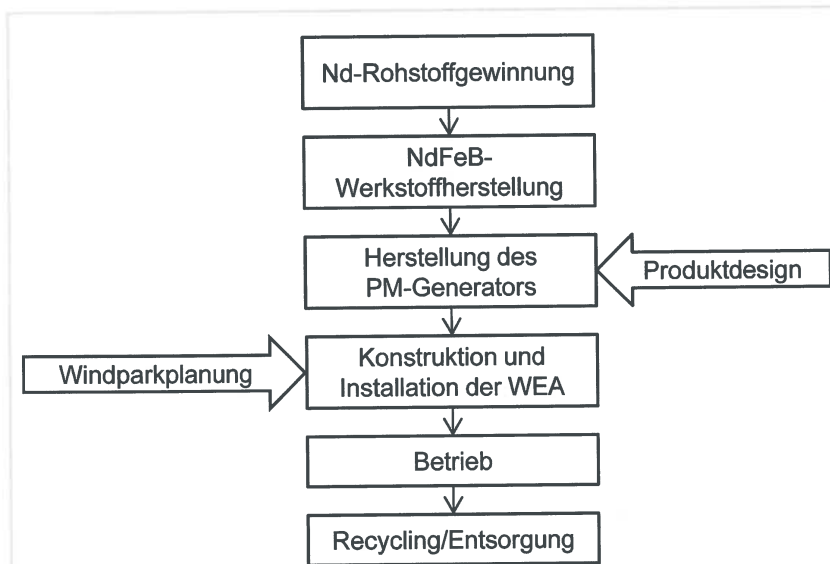


Abb. 2 Lebensphasen einer Windenergieanlage mit Permanentmagneten in Anlehnung an [8]

etablierten Recyclingverfahren existieren [6] und es ausschließlich als Nebenprodukt gewonnen wird [3]. Abschließend ist zudem das strategische Risiko zu nennen, denn Nd ist in Permanentmagneten mit höchster Energiedichte bisher nicht substituierbar, wie [5] und [7] feststellen. Aufgrund der Verfügbarkeit unterschiedlicher Generatortypen auch ohne Permanentmagneten ist eine Substituierbarkeit auf funktionaler Ebene jedoch gegeben [5]. Da seltenerdhaltige Magnete für die deutschen Leitmärkte Windenergie und Elektromobilität jedoch aktuell von Relevanz sind, kann von einer schnell anwachsenden Nachfrage ausgegangen werden [1].

### Lebenszyklusanalyse

In Abb. 2 sind die Lebensphasen einer WEA mit Permanentmagneten (PM) dargestellt. Die Rohstoffgewinnung und -aufbereitung, die mit erheblichen Umweltwirkungen einhergeht, besteht aus vier Schritten: Dem Abbau der seltenerdhaltigen Erze im Tagebau, die physikalische Veredelung, die chemische Behandlung mit Säuren und alkalischen Lösungen, um Oxide zu extrahieren, und schließlich die Auftrennung der Produkte in die individuellen Seltenen Erden [3]. Anschließend erfolgt in einem metallurgischen Produktionsprozess [7] die Herstellung des Magnetwerkstoffes, der vorwiegend aus Nd, Eisen und Bor (NdFeB) besteht. Bei der Herstellung des Generators bestehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Anordnung und Befestigung der Magnete: Sie können auf der Innenseite des Rotors oder auf dem Stator in oberflächenbefestigter, eingebetteter oder vergrabener Ausführung angeordnet werden [9]. Die Bauweise wirkt sich auf den Demontageaufwand und somit auf die Potenziale zirkulärer Ansätze aus.

Über etwaige Zustandsänderungen der Magnete über die in etwa zwanzigjährige Betriebsphase liegen bisher keine Erfahrungen vor. Aus dem geringen Verschleiß von Permanentmagneten aus Elektrofahrzeugen [6] leitet sich jedoch eine grundsätzliche Wiederverwendbarkeit von Magneten aus WEA ab. Da der Trend zu permanentmagnetbasierten Anlagen in Deutschland erst seit 2010 zu beobachten ist [10], stehen bisher keine Nd-Magnete aus Windenergiegeneratoren für ein Recycling zur Verfügung.

Die aktuelle Recyclingquote von Seltenen Erden aus WEA liegt damit bei 0 % [11].

Nach eigenen Hochrechnungen des zukünftigen Neodymbedarfs auf Basis von [10], [12] und [13] bewegt sich die Nachfrage nach Nd aus der deutschen Windenergiebranche derzeit in einer Größenordnung von 200 t/a. Bis zum Jahr 2030 kann mindestens von einer Verdopplung dieses Werts ausgegangen werden, so dass mittelfristig größere Rücklaufströme zu erwarten sind.

Mögliche Recyclingverfahren unterteilen sich in das rohstoffliche und das werkstoffliche Recycling. Bei einem von [14] entwickelten rohstofflichen Verfahren erfolgt nach einer Vorseparation des Magnetwerkstoffs ein hydrometallurgischer Aufschluss. Durch die physikalische Vorbehandlung lässt sich eine hohe Selektivität erreichen, sodass keine aufwändige Feintrennung der Seltenen Erden nötig wird. Währenddessen trennt das in [6] erarbeitete Verfahren leichte und schwere Seltene Erden durch Solventextraktion voneinander, wobei Reinheitsgrade von nahezu 100 % erreicht werden. Beim werkstofflichen Recycling hingegen werden die Magnete zunächst unter Wasserstoffeintrag versprödet. Das Grobpulver wird anschließend anteilig mit frischem Material feingemahlen, verpresst und gesintert. Dabei wird die Remanenz im Falle eines Sekundärmagneten aus 30 % Alt- und 70 % Neumaterial um etwa 3 % gesenkt [6].

## Potenziale zirkulärer Ansätze

In Abb. 3 sind potenzielle zirkuläre Ansätze dargestellt. Für WEA mit Permanentmagneten können diese auf der Ebene der Anlage, des Generators, des Magneten und des Rohstoffs ansetzen. Im Folgenden werden die wichtigsten Hemmnisse und Treiber einer Weiternutzung der WEA über die geplante Nutzungsdauer, eines Second-Life der Magnete in WEA, eines Second-Life der Magnete in anderen Anwendungen sowie eines Recyclings auf Werkstoff- und Rohstoffebene dargestellt.

Ein Weiterbetrieb von WEA nach der geplanten Nutzungsdauer von ca. 20 Jahren ist nach Einzelfallprüfung prinzipiell möglich [16]. Ein Anreiz hierfür ist in Deutschland

derzeit jedoch aufgrund vorteilhafter Repowering-Rahmenbedingungen nicht gegeben, sodass sich ein Rückbau oftmals vor Ablauf der Entwurfslebensdauer wirtschaftlich darstellen lässt [17]. In der Folge entwickeln sich Sekundärmärkte für Altanlagen, bspw. im osteuropäischen Ausland [6]. Diese Entwicklung stellt ein Hemmnis für zirkuläre Ansätze in Deutschland dar, da die Zugriffsmöglichkeit auf den Wertstoff durch den Export verloren geht.

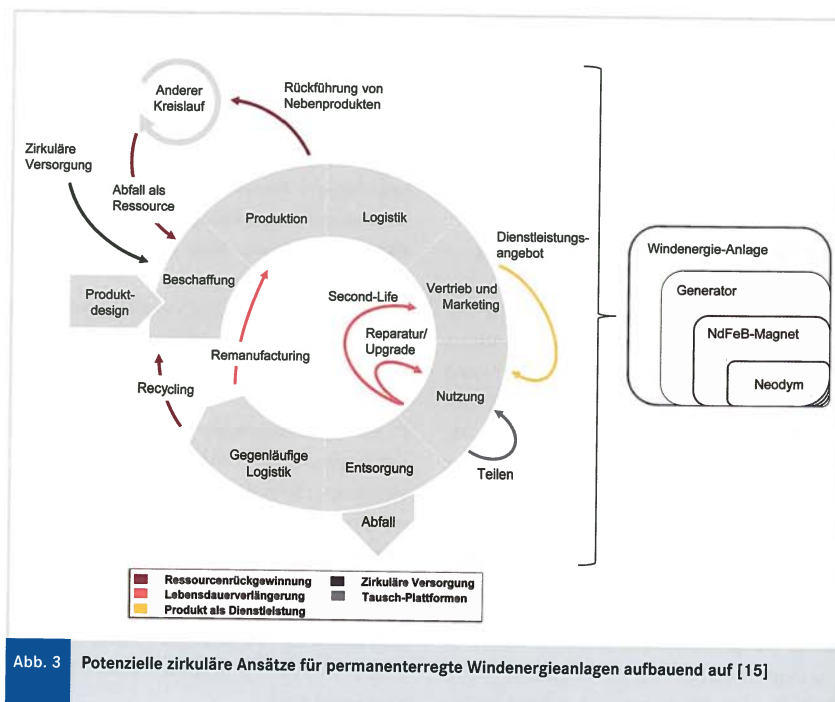
Neben der Zugriffsmöglichkeit auf die Magnete stellen die Separation, Reinigung und Entmagnetisierung zentrale Anforderungen für alle weiteren zirkulären Ansätze dar. Die zerstörungsfreie Separation ist bisher lediglich für Magnete aus Elektromotoren erprobt worden. Grundsätzlich ist die Anwendung eines solchen Verfahrens auch für WEA-Generatoren denkbar. Der bedeutendste Unterschied liegt jedoch in der Größendimension der Synchrongeneratoren. Hinsichtlich Entmagnetisierung und Reinigung kann von einer Übertragbarkeit der in [6] entwickelten Verfahren auf die Magnetwerkstoffe aus WEA ausgegangen werden.

Dem Second-Life der Magnete in einer neuen Generation WEA stehen die, im Vergleich zur Betriebsphase, schnellen Inno-

ventionszyklen im Generatordesign und in der Entwicklung neuer Magnetwerkstoffe entgegen. So wurden die magnetischen Eigenschaften von Seltenerdwerkstoffen über die vergangenen Jahrzehnte kontinuierlich und teils sprunghaft optimiert [3]. Es ist somit davon auszugehen, dass die Anforderungen einer neuen Generatorgeneration an den Magnetwerkstoff durch zwanzigjährige Altmagneten nicht erfüllt werden können.

Da eine Wiederverwendung der Magnete jedoch grundsätzlich möglich erscheint, stellt ein Second-Life der Magnete in anderen Anwendungen eine Option dar, solange die Altmagneten aus WEA deren Anforderungen genügen. Diese Applikationen umfassen bspw. Synchronmotoren als Hauptantrieb in Elektro- und Hybridfahrzeugen, Kernspintomographen, Lautsprecher, diverse Servo- und Linearantriebe sowie Gleichstrommotoren [7]. Die Größe der Magnete aus WEA ist für eine Wiederverwendung grundsätzlich ausreichend, jedoch wäre ein Abschleifprozess vonnöten, um den vielfältigen Anforderungen potenzieller Zweitanwendungen an die Magnetgeometrie gerecht zu werden.

Diesem Hemmnis kann bspw. durch Standardisierung der Magnetgeometrie entgegengewirkt werden. Eine weitere Bedingung für den Second-Life-Einsatz in anderen An-





wendungen ist die Eignung der chemischen Zusammensetzung und somit der spezifischen Eigenschaften des Magneten [6]. Im gegenläufigen Logistikprozess (vgl. Abb. 3) der WEA müssen folglich die benötigten Informationen zum Magnettyp zugänglich gemacht werden.

Im Forschungsprojekt „Motor Recycling“ [6] wurden mit einer ähnlichen Herangehensweise das Recycling und die Weiterverwendung von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben untersucht. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde das Recycling von NdFeB-Magneten bereits im Labormaßstab erprobt. Aufgrund geringer Rücklaufzahlen und folglich mangelnder Wirtschaftlichkeit werden die Verfahren derzeit jedoch noch nicht großskalig umgesetzt.

Da das Recycling des Magnetwerkstoffes mit einem leichten Qualitätsverlust insbesondere in Bezug auf die Remanenz einhergeht, sind die Möglichkeiten für einen Zweiteinsatz eingeschränkt. Beim rohstofflichen Recycling können hingegen sehr hohe Reinheitsgrade erreicht werden, so dass ein Einsatz des rezyklierten Nd auch in hochwertigen Anwendungen möglich ist. Aufgrund der verfahrenstechnischen Komplexität ist dieser Prozess jedoch mit einem höheren Aufwand als das werkstoffliche Recycling verbunden. Neben derzeit noch fehlenden Skaleneffekten stellen auch das Wissen um die chemische Zusammensetzung [6] und die Abtrennung von Verunreinigungen durch Samarium oder Oxide [14] Hemmnisse für Recyclingprozesse dar.

### Weitere Technologien im Blick

Für Permanentmagneten in WEA ist Nd aufgrund der Umweltwirkung, der strategischen Relevanz sowie des Struktur- und Länderrisikos ein kritischer Rohstoff. Mit der Weiterverwendung der Magnete in anderen Anwendungen und dem Recycling auf Werkstoff- und Rohstoffebene konnten zirkuläre Ansätze identifiziert werden, die mittel- bis langfristig ein Potenzial zur Minderung dieser Kritikalität besitzen können.

Da die identifizierten Hemmnisse, wie z. B. der exportbedingte Verlust der Zugriffsmöglichkeit und die Länge von Betriebsphase

und Innovationszyklen, nicht immer offensichtlich sind, stellte sich die systematische Untersuchung der zirkulären Ansätze als sinnvoll heraus. Die hier entwickelte Methodik, bestehend aus Bewertung der Rohstoffkritikalität, Analyse des Lebenszyklus und Identifikation von Potenzialen zirkulärer Ansätze, sollte insbesondere in Hinblick auf eine direkte Stakeholder-Einbindung sowie eine quantitative ökologische und wirtschaftliche Bewertung erweitert werden. Zudem gilt es die Anwendbarkeit des methodischen Vorgehens auf weitere Technologien zu prüfen. Hier sind bspw. Lithium-Ionen-Traktionsbatterien von Interesse, für die Potenziale und Hemmnisse von Second-Life-Konzepten derzeit bereits diskutiert werden [18].

### Anmerkungen

- [1] Erdmann, L.; Behrendt, S.: Kritische Rohstoffe für Deutschland – Abschlussbericht Langfassung. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), 2011.
- [2] Graedel, T. et al.: Criticality of metals and metalloids. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 112 (14) 2015.
- [3] Zepf, V.: Rare Earth Elements – A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. Doctoral Thesis. Augsburg: Springer-Verlag, 2013.
- [4] Schüler, D. et al.: Study on Rare Earths and Their Recycling – Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Darmstadt: Öko-Institut e. V., 2011.
- [5] Gandenberger, C. et al.: Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien – Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie, Berlin: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), 2012.
- [6] Bast, U. et al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben – MoRe (Motor Recycling). Berlin: Forschungszentrum Jülich, 2014.
- [7] Selten-Erd-Dauermagnete – Vacodym, Vacomax. Hainau: Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, 2014.
- [8] Kaiser, O.; Seitz, H.: Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen – Kurzanalyse Nr. 9. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE) Publikationen, 2014.
- [9] Madani, N.: Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine. Stockholm: Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, 2011.
- [10] Viebahn, P.; Sack, A.; Faulstich, S.: Windenergie Report Deutschland 2014. Kassel: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2015.
- [11] Zimmermann, T.; Rehberger, M.; Gößling-Reisemann, S.: Material Flows Resulting from Large Scale Deployment of Wind Energy in Germany. In: Resources 2/2013, S. 303-334.
- [12] Berkhout, V.: Windmonitor, 2014, abrufbar unter <https://www.windmonitor.de> (Stand: 30.3.2016).
- [13] Feix, O.; Wiede, T.; Strecker, M.; König, R.: Netzentwicklungsplan Strom 2025, Version 2015 – Erster Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Berlin: CB.e Clausecker Bingle AG, 2015.
- [14] Busse, M.; Mayer, B.: Jahresbericht 2013/2014. Dresden: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, 2014.
- [15] Circular Advantage – Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth. Dublin: Accenture, 2014.
- [16] Holzmüller, J.: Weiterbetrieb von Windenergieanlagen. Kassel: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2012.
- [17] Bundesverband WindEnergie e. V.: Rückbau, 2015, abrufbar unter: <https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/betrieb/rueckbau> (Stand: 30.3.2016).
- [18] Fischhaber, S.; Regett, A.; Schuster, S.; Hesse, H.: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen – Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen. Ergebnisrapport Nr. 18. Frankfurt am Main: Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), 2016.

*A. Regett, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin, N. Köppel B. Sc., Wissenschaftliche Hilfskraft, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FFE), München  
ARegett@ffe.de*

Diese Veröffentlichung wurde durch die Unterstützung der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg ermöglicht.