

Geschäftsmodelle zur Einbindung dezentraler Anlagen auf Haushaltsebene in Virtuelle Kraftwerke

Georg Holtz, Samir Jeddi, Johannes Fleer, Sascha Birk, Max Schönfisch, Dietmar Lindenberger und Thorsten Schneiders

Virtuelle Kraftwerke (VKW) bieten die Möglichkeit, den steigenden Flexibilitätsbedarf des Stromsystems durch die Bündelung dezentraler Erzeugungsanlagen, Speicher und steuerbarer Verbraucher zu decken. Insbesondere die Hebung noch unerschlossener dezentraler Flexibilitätspotenziale auf Haushaltsebene, die durch die Digitalisierung und die Verfügbarkeit smarter Technologien ermöglicht wird, eröffnet voraussichtlich zukünftige Geschäftsfelder. In diesem Artikel werden die zu erwartenden technologischen und ökonomischen Entwicklungen skizziert und darauf aufbauend ein Analyserahmen für Geschäftsmodelle Virtueller Kraftwerke vorgestellt.

Virtuelle Kraftwerke – Definition

Als Virtuelles Kraftwerk wird der Zusammenschluss mehrerer dezentraler Anlagen im Stromnetz bezeichnet, die über ein zentrales Leitsystem gesteuert werden. Die dezentralen Anlagen bilden die Komponenten des VKW. Das Leitsystem koordiniert mithilfe der entsprechenden Infrastruktur von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) den Einsatz der Komponenten. Die Komponenten eines VKW lassen sich in die vier Kategorien 1) vollständig regelbare Erzeugungsanlagen, 2) wetterabhängig einspeisende Erzeugungsanlagen, 3) Speicher und 4) regelbare Lasten unterteilen. Jede dieser Technologiegruppen hat spezifische Charakteristika, die bei der Erstellung eines Geschäftsmodells für ein VKW berücksichtigt werden müssen:

- **Vollständig regelbare Erzeugungsanlagen** basieren in der Regel auf einem Verbrennungsprozess, durch den ein Motor oder eine Turbine betrieben und schließlich über einen Generator elektrischer Strom erzeugt wird. Diese Anlagen können üblicherweise über einen weiten Leistungsbereich stufenlos geregelt werden, zumeist verringert sich jedoch der Wirkungsgrad im Teillastbereich.
- **Wetterabhängig einspeisende Erzeugungsanlagen**, d.h. Windenergie- und Photovoltaikanlagen, erzeugen Strom abhängig von der Windgeschwindigkeit bzw. der solaren Einstrahlung. Jede dieser Erzeugungsanlagen hat eine konstruktiv bedingte Nennleistung, ihre tatsächliche Einspeiseleistung lässt sich jedoch nur bis zu einer bestimmten Genauigkeit prognostizieren. Eine Drosselung bzw. vollständige Abschaltung dieser Anlagen ist möglich.

- **Speicher** bieten die Möglichkeit, Stromerzeugung und -verbrauch zeitlich voneinander zu entkoppeln. Stromspeicher gibt es in einer Vielzahl von Formen; auf Haushaltsebene kommen Batteriespeicher zum Einsatz. Da jeder Speichervorgang Energieverluste verursacht, ist eine direkte Nutzung erzeugter Energie, sofern möglich, einer Speicherung in der Regel vorzuziehen.

- **Regelbare Lasten** erlauben die zeitliche Verschiebung von Stromverbrauch. Die verschiebbare Energiemenge und der zeitliche Horizont der Verschiebung hängen jeweils von der Art der Last ab.

Entwicklung des Flexibilitätsbedarfs und Auswirkungen auf Erlösmöglichkeiten

Der Begriff „Flexibilität“ wird in der Literatur nicht einheitlich genutzt. In Anlehnung an die Definition von Eurelectric [1] definieren wir die Flexibilität einer Anlage bzw. eines VKW als die zielgerichtete Veränderung von Stromeinspeisung oder Stromentnahme in Reaktion auf ein äußeres Preis- oder Steuerungssignal. Der Bedarf an Flexibilität hat verschiedene Ursachen, deren Differenzierung bei der Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Flexibilitätsbedarfs hilft. Es lassen sich drei Ursachen unterscheiden.

Volatilität der Residuallast

Flexibilitätsbedarf entsteht zum einen aus der Volatilität der Residuallast, d.h. der Gesamtlast abzüglich der Einspeisung erneuerbarer Energien (EE). Durch den steigenden EE-Anteil im Strom-Mix erhöht sich die untertägige Volatilität der Residuallast, d.h. sie weist häufigere Schwankungen und steilere Rampen auf. Dem Anstieg der Volatilität wurde bereits durch die im Dezember 2014 auf den Strommärkten eingeführten 15-Minuten-Kontrakte begegnet. Da diese Kontrakte die Volatilität jedoch noch immer nicht ausreichend am Markt abbilden, könnten die kurzfristigen Abweichungen vom 15-minütigen Mittelwert zukünftig vermehrt in den Regelleistungsmarkt überführt werden. Ein anhaltender Anstieg der Volatilität der Residuallast legt daher eine weitere Verkürzung der Produktzeitscheiben auf dem Spot- und/oder Intraday-Markt nahe.

Abweichungen vom Leistungsgleichgewicht

Weiterhin erwächst Flexibilitätsbedarf aus stochastischen Abweichungen vom Leistungsgleichgewicht im Stromsystem aufgrund von Prognosefehlern. Prognoseunsicherheiten resultieren aus dem schwankenden Dargebot von EE, stochastischen Schwankungen der Nachfrage sowie der Zuverlässigkeit des Kraftwerksparks [2]. Ein steigender Anteil wetterabhängiger EE erhöht tendenziell die

Prognosefehler. Obwohl dies durch andere Entwicklungen, insbesondere durch verbesserte Prognoseverfahren, kompensiert werden kann, ist aufgrund eines unsystematischen stochastischen Rests langfristig ein Anstieg stochastischer Abweichungen vom Leistungsgleichgewicht zu erwarten [3]. Der Prognosefehler nimmt mit sinkender Vorlaufzeit zum Lieferzeitpunkt ab.

Der kontinuierliche Intraday-Handel ermöglicht Marktakteuren, auf die sich ändernde Informationslage zu reagieren. Eine Zunahme der Prognoseunsicherheit führt daher zu einer höheren Aktivität auf dem Intraday-Markt [4]. Der im Dezember 2014 eingeführte Handel mit 15-Minuten-Kontrakten ermöglicht dabei eine flexiblere Anpassung an kurzfristig auftretende Fahrplanabweichungen als dies vorher möglich war. Falls der erwartete Anstieg der Prognosefehler zukünftig nicht gänzlich auf dem Intraday-Markt ausgeglichen werden kann, könnte der Bedarf nach Regelleistung steigen. Faktisch ist der Bedarf an Regelleistung in Deutschland zwischen 2008 und 2014 - bei gleichzeitiger Steigerung der Kapazitäten an Windenergie- und PV-Anlagen von 200 % - jedoch um 20 % gesunken, und seit 2014 auf einem relativ konstanten Niveau verblieben [5]. Neben verbesserten Prognoseverfahren und geänderten Produktzeitscheiben am Intraday-Markt hat der 2010 geschlossene Netzregelverbund dazu geführt, dass der Regelleistungsbedarf gesunken ist [6].

Lokale Netzengpässe

Lokale Netzengpässe können zu einem Anstieg des Flexibilitätsbedarfs an den betroffenen Netzknoten führen. Tritt ein Netzengpass auf, müssen die Ein- bzw. Ausspeisung vor und hinter dem Engpass angepasst werden. Die Kosten für das Engpassmanagement stiegen von 2014 bis 2017 um ca. 240 % [7]. Bei einer Verzögerung des Netzausbaus wird eine weitere Zunahme dieser Engpassmanagement-Maßnahmen prognostiziert. Darüber hinaus könnte die Elektrifizierung des Transport- und Wärmesektors zu häufigeren Netzengpässen auch im Verteilnetz führen [8].

Die Bereitstellung von Flexibilität zur Vermeidung lokaler Netzengpässe (Redispatch und Einspeisemanagement) ist nach § 13a Abs. 1 EnWG für alle Erzeugungsanlagen und Speichereinheiten mit einer Leistung größer 10 MW verpflichtend und wird kostenbasiert kompensiert. Demnach ist die Vergütung dieser „lokalen Flexibilität“ administrativ geregelt, und der aktuelle Regelungsrahmen setzt hierfür keine wirtschaftlichen Anreize. Insbesondere vor dem Hintergrund des steigenden Bedarfs an lokaler Flexibilität wird eine Anpassung des Koordinationsmechanismus zur Engpassbewirtschaftung immer häufiger diskutiert. Eine Alternative könnte die Einführung eines marktbasiereten Engpassmanagements sein. Dabei wird die benötigte lokale Leistung über eine Ausschreibung durch die Netzbetreiber akquiriert.

Flexibilitätsoptionen auf Haushaltsebene

Für die Einbindung in ein VKW stehen derzeit bzw. potenziell verschiedene Technologien auf Haushaltsebene zur Verfügung:

■ *Li-Ionen-Speichersysteme* werden zu meist für die Erhöhung des Eigenverbrauchs von Energie aus PV-Anlagen genutzt. Solche Heimspeicher sind derzeit nur unter bestimmten Bedingungen für die Betreiber wirtschaftlich. Durch fallende Batteriepreise wird jedoch von einer zukünftig verbesserten Wirtschaftlichkeit und einer deutlichen Ausweitung des Marktvolumens an Heimspeichern ausgegangen [9].

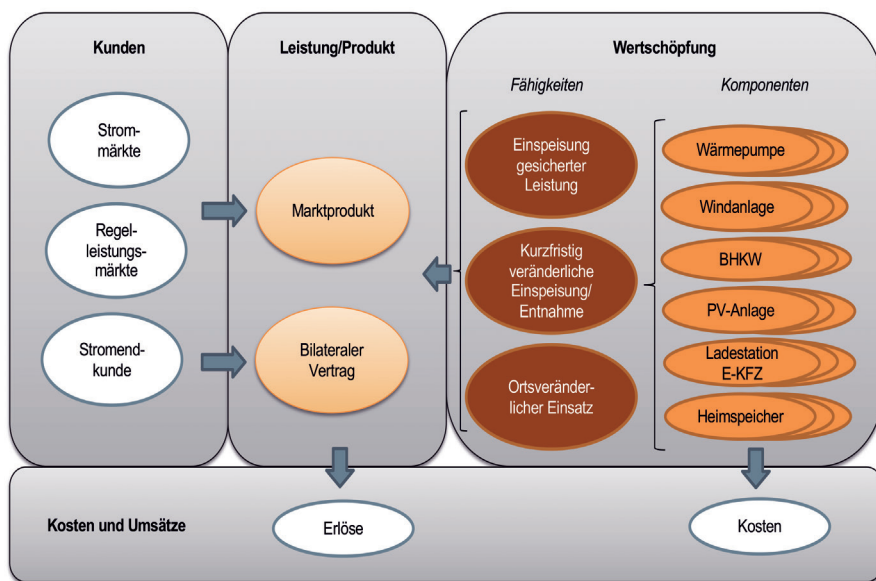


Abb.: Analyserahmen

■ *Wärmepumpen* können nach § 14a Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) als steuerbare Verbrauchseinrichtung über einen gesonderten Zähler abgerechnet, und im Gegenzug für vergünstigte Netzentgelte eine netzdienliche Steuerung der Anlage vereinbart werden. Am Markt sind „Smart-Grid Ready“-Wärmepumpen verfügbar, deren Regelungstechnik die Einbindung in ein intelligentes Stromnetz ermöglicht. Die Einbindung von Wärmepumpen in ein VKW ist daher bereits heute denkbar. Es wird mit einer wachsenden Zahl an Wärmepumpen von derzeit 800.000 auf mindestens 6,5 Mio. bis 2050 gerechnet [8].

■ Auch die technischen Voraussetzungen für die Nutzung von *Ladestationen von Elektrofahrzeugen* für Lastmanagement sind heute bereits gegeben. Zudem werden in § 14a des EnWG (s.o.) explizit Elektrofahrzeuge adressiert. Bis 2050 wird mit einem Volumen von 12,1 Mio. vollelektrischen Fahrzeugen gerechnet [8].

■ Auf Haushaltsebene sind *Blockheizkraftwerke (BHKW)* die am weitesten verbreitete vollständig regelbare Erzeugungsanlagen. Als Richtgröße für den Betrieb gilt in den meisten Fällen jedoch nicht der Strom-, sondern der Wärmebedarf des zu versorgenden Objektes. Bei dieser wärmegeführten Betriebsweise ist zur Flexibilisierung der Stromerzeugung ein thermischer Speicher nötig. Da für den wirtschaftlichen Betrieb ein ausreichend großer Wärmebedarf nötig ist, werden BHKW vor allem für größere Objekte bzw. für Quartierslösungen eingesetzt [10].

Zur Vernetzung von Anlagen im Niederspannungsnetz wird von den Netzbetreibern die Rundsteuertechnik verwendet. Diese unidirektionale Kommunikation bietet keinen Raum für eine intelligente, auf ein Feedback der Anlage reagierende Steuerung. Betreiber von überregionalen VKW setzen auf eine bidirektionale Kommunikationslösung mittels Global System for Mobile Communications (GSM). Auf der lokalen, kleinteiligen Kommunikationsebene (z.B. in Haushalten) stehen am Markt viele unterschiedliche Kommunikationslösungen zur Verfügung, die von leitungsgebundenen Lösungen über spezielle Kommunikationsleitungen bis hin zu unterschiedlichen funkbasierten Ansätzen reichen. Die Anwendbarkeit der verschie-

denen Kommunikationslösungen für die Einbindung einer Vielzahl kleiner dezentraler Anlagen in VKWs müssen noch weiter untersucht werden.

Geschäftsmodelle für Virtuelle Kraftwerke

Unter Rückgriff auf das Konzept des Geschäftsmodells wird im Folgenden ein Analyserahmen entwickelt. Mittels dieses Analyserahmens kann untersucht werden, welche Möglichkeiten sich durch den oben skizzierten steigenden Flexibilitätsbedarf sowie durch in Zukunft erschließbare Flexibilitätsoptionen potenziell für VKW ergeben. Die Technologien und ökonomischen Rahmenbedingungen befinden sich in ständiger Weiterentwicklung. Daher sind Aussagen über zukünftige Erlösmöglichkeiten für spezifische Anlagenkonfigurationen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Um mit Blick auf die mittlere und lange Frist mögliche Geschäftsmodelle zu identifizieren, abstrahiert der entwickelte Analyserahmen daher von spezifischen Details von Märkten sowie Technologien und arbeitet die grundlegenden Fähigkeiten von VKWs heraus, die nach derzeitigem Wissensstand (auch) zukünftig für das Generieren von Erlösen mit VKWs zentral sein werden.

Für den Begriff des Geschäftsmodells (engl. business model) findet sich weder in der deutsch- noch in der englischsprachigen Literatur eine einheitliche Definition [11]. Basierend auf [12] und [13] legen wir vier Analysekatoren fest, die in ihrem Zusammenspiel ein Geschäftsmodell definieren (siehe Abb.). Dazu gehören die Kategorie Kunden und Partner, die Kategorie Leistungen und Nutzen, die Kategorie Wertschöpfung und die Kategorie Kosten und Umsätze. In der folgenden Diskussion wird der Fokus auf die Kategorien Leistungen und Nutzen und Wertschöpfung gelegt.

Leistungen und Nutzen

Leistungen und Nutzen umfassen die Produkte und Dienstleistungen, die zwischen dem Bedarf der Kunden und dem Nutzen, den das VKW stiftet, vermitteln. Der Flexibilitätsbedarf des Stromsystems wird dem VKW gegenüber letztendlich über ver-

schiedene Koordinationsmechanismen und Akteure artikuliert (s.o.), die als potenzielle Kunden des VKW aufgefasst werden können. Die Eigenschaften der dabei gehandelten Produkte sind zumeist durch die Regularien des Marktes festgelegt, auf dem das Produkt gehandelt wird. Zusätzlich können bilaterale Verträge abgeschlossen werden, in denen Produkte oder Dienstleistungen definiert werden. Dadurch ergibt sich ein großes Spektrum unterschiedlicher Produkte und Dienstleistungen.

Wertschöpfung

Die Kategorie Wertschöpfung beschreibt, wie aus Ressourcen und Fähigkeiten des VKW ein Nutzen mit höherem Geldwert generiert wird. Die Ressourcen des VKW sind seine einzelnen Komponenten. Je nach Geschäftsmodell sind diese entweder in Besitz des VKW-Betreibers oder werden von Partnern zur Verfügung gestellt. Die Fähigkeiten eines VKW resultieren aus der spezifischen Zusammenstellung (und der geographischen Verteilung) seiner Komponenten. Die Vielfalt der technischen Anlagen und ihrer Kombinationsmöglichkeiten eröffnet dabei ein weites Spektrum an möglichen Konfigurationen. Um dieses Spektrum für die Analyse zugänglich zu machen, werden im Folgenden generische Fähigkeiten Virtueller Kraftwerke dargestellt:

■ *Kurzfristige veränderliche Einspeisung/Entnahme von Leistung:* Das VKW kann mit kurzer Vorlaufzeit und bei hoher Leistungsänderungsgeschwindigkeit in Abweichung vom geplanten Fahrplan zielgerichtet ein (vorab definiertes) verändertes Leistungsprofil abfahren. Das VKW kann also eine (aus Sicht des VKW externe) stochastische Abweichung vom Leistungs-gleichgewicht ausgleichen. Im heutigen Marktdesign entspricht dies insbesondere der Bereitstellung von Regelleistung.

■ *Einspeisung gesicherter Leistung über einen bestimmten Zeitraum:* Ein vorab mit dem Kunden vereinbarter Fahrplan wird möglichst genau eingehalten. Das erfordert, dass die Höhe der vorgehaltenen Leistung einige Zeit im Voraus zur Bereitstellung festgelegt und über den Zeitraum der Leistungsvorhaltung zugesichert werden kann. Dies stellt insbesondere dann eine

Herausforderung dar, falls wetterabhängige EE in das VKW eingebunden sind. Das VKW verarbeitet die Volatilität der Residuallast sowie Prognosefehler in diesem Fall intern, und gibt sie nicht an das Gesamtsystem weiter. Im heutigen Marktdesign ist diese Fähigkeit insbesondere für den Handel am Spotmarkt relevant, da bei Abweichungen vom Fahrplan die Gefahr besteht, dass im Bilanzkreis des VKW Kosten für Ausgleichsenergie entstehen. Ein möglicher zukünftiger Vermarktungsweg, für den diese Fähigkeit relevant ist, sind Power Purchase Agreements [14].

■ **Ortsveränderlicher Einsatz von Erzeugung/Last:** Die Einspeisung (eines Teils) der eingespeisten Energie des VKW kann an einem bestimmten Netzknoten mit geringer Vorlaufzeit angepasst werden. Dabei kann die Gesamteinspeisung des VKW bei Bedarf konstant gehalten werden, indem die Einspeisung an einem anderen Netzknoten gegenläufig mit verändert wird. Mittels dieser Fähigkeit könnten in Zukunft ggf. Erlöse generiert werden, falls entsprechende Vergütungsmöglichkeiten für die Vermeidung von Netzengpässen eingeführt werden. Des Weiteren ermöglicht diese Fähigkeit die Bereitstellung von Blindleistung, was die Generierung von Erlösen ermöglichen könnte, falls diese Systemdienstleistung in Zukunft vergütet wird.

Diese generischen Fähigkeiten bilden eine analytische Brücke zwischen den oben skizzierten (zukünftigen) Technologien und Märkten und erlauben, diese beiden Welten in Bezug zu setzen, auch wenn sich sowohl Technologien als auch ökonomische Rahmenbedingungen kontinuierlich und teils rapide weiterentwickeln.

Ausblick

Dieser Artikel skizziert die Definitionen und den Analyserahmen, die den Grundstein für die weiteren Arbeiten im Projekt VISE-VKW [15] bilden. Ziel des bis 2020 laufenden Forschungsprojektes ist es, innovative digitale Geschäftsmodelle für VKW durch Einbindung von Anlagen und Verbrauchern, die an ein Verteilnetz angeschlossen sind, zu identifizieren und zu analysieren.

Unter Einsatz diverser Simulations- und Optimierungsmodelle der einzelnen Partnerinstitute werden Erlösmöglichkeiten verschiedener VKW-Konfigurationen unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger Veränderungen des regulatorischen Rahmens und des Marktdesigns untersucht, und deren Auswirkungen auf das Verteilnetz analysiert.

Anmerkungen

- [1] Eurelectric: Flexibility and Aggregation Requirements for their interaction in the market. A Eurelectric Paper, 2014.
- [2] Borggreffe, F. und Neuhoff, K.: Balancing and intraday market design: Options for wind integration. DIW Discussion Papers, No. 1162, 2011.
- [3] Fraunhofer IWES: Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem. Endbericht, 2010. http://www.fvee.de/fileadmin/politik/IWES_Gutachten-Pumpspeicher.pdf
- [4] Braun, S. M. und Brunner, C.: Price Sensitivity of Hourly Day-ahead and Quarter-hourly Intraday Auctions in Germany. Zeitschrift für Energiewirtschaft, Bd. 42, 2018, S. 257-270.
- [5] Hirth, L. und Ziegenhagen, I.: Balancing Power and Variable Renewables: Three Links. Renewable & Sustainable Energy Reviews 50, 2015, S. 1035-1051.
- [6] Ocker, F. und Ehrhart, K.-M.: The "German Paradox" in the balancing power markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 67, 2017, S. 892-898.
- [7] Bundesnetzagentur: Monitoringbericht 2018. www.bundesnetzagentur.de
- [8] Deutsche Energie-Agentur GmbH: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin, 2018. www.dena.de
- [9] VDI: Regenerative Energien: VDI-Statusreport März 2018.
- [10] Zahoransky, R.: Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. Springer-Verlag, 2009.
- [11] Zott, C., Amit, R. und Massa, L.: The Business Model: Recent Developments and Future Research. Journal of Management, Bd. 37, Nr. 4, 2011, S. 1019-1042.
- [12] Stähler, P.: Geschäftsmodelle in der digitalen Ökonomie. Merkmale, Strategien und Auswirkungen. Josef Eul Verlag, 2002.
- [13] Schallmo, D. R. A.: Geschäftsmodelle erfolgreich entwickeln und implementieren. Springer, 2013.
- [14] Energy Brainpool: Power Purchase Agreements: Finanzierungsmodell von Erneuerbaren Energien. Energy Brainpool, 2018.

[15] Virtuelles Institut Smart Energy – Teilprojekt „Regionale Virtuelle Kraftwerke“.
www.smart-energy.nrw

*Dr. G. Holtz, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal; S. Jeddi, Research Associate, ewi ER&S, Köln; J. Flier, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE), Forschungszentrum Jülich; S. Birk, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE), Technische Hochschule Köln; M. Schönfisch, Research Associate, ewi ER&S, Köln; PD Dr. D. Lindenberger, Senior Advisor ewi ER&S, und Universität zu Köln; Prof. Dr. T. Schneiders, Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE), Technische Hochschule Köln
Georg.holtz@wupperinst.org*