

1 Einleitung

Die Energiewende führt zu fundamentalen Veränderungen auf dem deutschen Energiemarkt. Anstelle zentraler, regelbarer Großkraftwerke speisen vermehrt viele dezentrale Anlagen ihren Strom in das deutsche Stromnetz ein. Es entstehen neue Anforderungen auf der Angebots- und Nachfrageseite. Besonders im Einfamilienhausbereich wandelt sich durch Eigenerzeugung der Consumer zum Prosumer und das Standardlastprofil wird zunehmend durch individualisierte Nachfrageprofile abgelöst. Auf der Angebotsseite wird die Residuallast zur bestimmenden Größe für konventionelle Erzeuger. Als Folge der dezentralen Einspeisung wird das Stromnetz immer stärker ausgelastet und es kommt vermehrt zu Abregelungen regenerativer Energiequellen, um die Netzstabilität sicher zu stellen.

Die hohe Volatilität und Diversität der Stromerzeugung sowie die Auslastung der Stromnetze bedarf einer Flexibilisierung und Regionalisierung des Marktes und seiner Akteure. Mikro-KWK und Power-to-Heat Technologien im Verbund des Regionalen Virtuellen Kraftwerks (RVK) können ein sinnvoller Baustein zur Umsetzung der Energiewende werden und einen Beitrag zur Versorgungssicherheit und Vermeidung von Netzausbaukosten leisten. Dabei handelt es sich um die Umwandlung „überschüssiger“ elektrischer Energie in Wärme. Diese Flexibilitätsoption hilft die Anzahl der Eingriffe im Einspeisemanagement bei einer Überproduktion von Erneuerbaren Energien zu reduzieren. Des Weiteren können Mikro-KWK-Anlagen mit einem Power-to-Heat Modul an unterschiedlichen Vermarktungsoptionen (Regelenergiemarkt) teilnehmen und Zusatzerlöse generieren. Die Wirtschaftlichkeit eines Regionalen Virtuellen Kraftwerks ist sensibel und abhängig von einer dynamischen Angebots- und Preisstrategie an den unterschiedlichen Märkten, der Dimensionierung der Anlage und dem betrachteten Anwendungsfall.

1.1 Vorgehensweise

Virtuelle Kraftwerke werden seit mehreren Jahren intensiv ausgebaut und erfahren eine hohe Durchdringung am Markt. Bisher lag der Fokus auf Erzeugern, Verbrauchern und Speichern, die durch Forschungseinrichtungen bzw. innovative Unternehmen analysiert und weiterentwickelt wurden¹. Dieser thematische Ansatz ist neu, da er besonders auf kleine dezentrale Einheiten ausgerichtet ist und speziell Ein- und Zweifamilienhäuser berücksichtigt, die mit Mikro-KWK Anlagen versorgt werden. Zusätzlich wird durch den regionalen Ansatz die Berücksichtigung von Restriktionen in den elektrischen Versorgungsnetzen ermöglicht. Im Projekt „Regionales Virtuelles Kraftwerk auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie - Intelligente Vernetzung von thermischen und elektrischen Verbrauchersystemen“ [1] wurden theoretische Grundlagen bereitgestellt und das Konzept des „Regionalen Virtuellen Kraftwerks“ im Labormaßstab analysiert. Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens ist die Praxisumsetzung der in [1] gewonnenen Erkenntnisse. Als Partner steht hierfür die EWE AG zur Verfügung. Dies ist von besonderer Bedeutung, da im Versorgungsgebiet der EWE AG ein hoher Anteil an erneuerbaren Energien vorliegt, der vorteilhaft in das Verteil- und Übertragungsnetz integriert werden muss (vgl. Abb. 1.1).

Im aktuellen Forschungsvorhaben dient das Regionale Virtuelle Kraftwerk (RVK) zur Generierung und Evaluierung von Anwendungsfällen durch das Zusammenführen regionaler Erzeugungs-, Speicher- und Verbrauchskapazitäten. Die dafür erforderliche Poolbildung erfolgt nicht statisch, sondern dynamisch anhand einer Vielzahl weiterer Informationen und

¹Der besondere Fokus der Arbeiten an der TU Dresden lag dabei auf der Abbildung eines „Regionalen Virtuellen Kraftwerks“ (RVK).

Kategorien wie z.B. geografische Ortsinformation, Bilanzkreiszuordnung oder technische Verteilnetzposition.

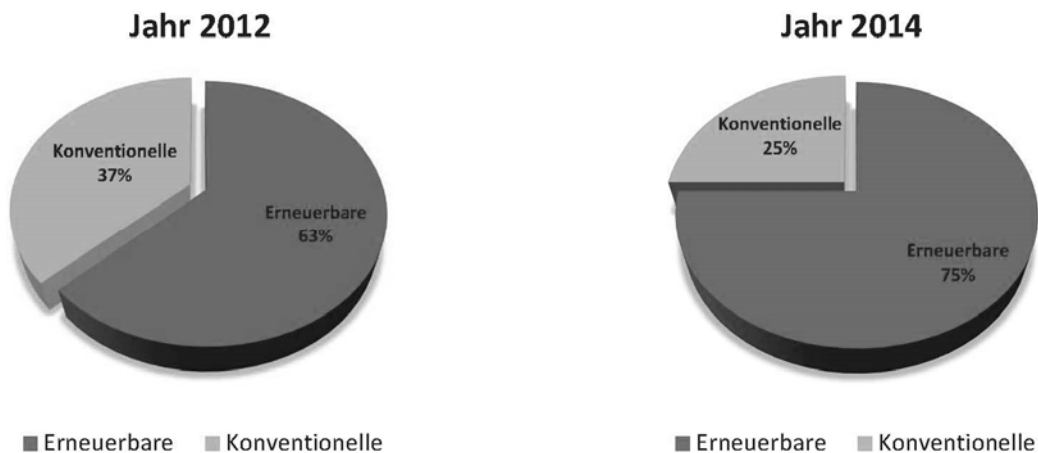


Abb. 1.1: Anteil der Erneuerbaren Energien bei der EWE AG Oldenburg für die ausgewählten Jahre 2012/2014

Dabei muss zu jeder Zeit sichergestellt sein, dass der lokale Wärmebedarf zuverlässig gedeckt werden kann. Neben der technischen Umsetzung im Feldtest steht auch die Wirtschaftlichkeit der zugrundeliegenden Werkzeuge im Fokus. Es werden damit neue Optionen für die Vermarktung von Energie und netzdienliche Systemdienstleistungen erschlossen, die unter dem Anspruch qualitativ hochwertiger Netze auch einen Beitrag zur Senkung der Netzausbaukosten liefern können. Es ist das gemeinsame Ziel von TUD und EWE, mittels der im Förderprojekt geschaffenen und untersuchten Funktionalitäten sowie der bereits existierenden Infrastrukturen praxisnahe Ansätze zu untersuchen und zu bewerten, die eine potentielle Verwertung erlauben. Die TU Dresden bringt dabei einen weitreichenden Erfahrungsschatz durch die in dem Vorprojekt gesammelten theoretischen Betrachtungen eines Regionalen Virtuellen Kraftwerks mit ein. Somit ist sichergestellt, dass neueste wissenschaftliche Erkenntnisse eingebunden werden. Ausgangspunkt für die Implementierung ist das bereits vorhandene Virtuelle Kraftwerk von EWE, das auf Softwaremodulen der BTC AG basiert. Als dezentrale Erzeugungsanlagen kommen 15 KWK-Anlagen sowie 2 Brennstoffzellen im Feldtest zum Einsatz. Zusätzlich installierte Heizstäbe bieten an den Anlagenstandorten die Möglichkeit, überschüssige Energie zur Aufladung von thermischen Speichern zu nutzen. Durch den verfolgten generischen Ansatz lassen sich perspektivisch weitere dezentrale Erzeugungs-, Speicher- und Verbrauchsanlagen integrieren. Strukturiert wurde das Forschungsvorhaben wie folgt:

Im Rahmen des Projektes wurden durch EWE die vier Anwendungsfelder Eigenverbrauchs-optimierung, Nutzung aktueller Marktstrukturen, netzdienliche Systemdienstleistungen sowie regionale Stromprodukte erarbeitet und mit der TU Dresden (TUD) abgestimmt. Diesen Themengebieten wurden relevante Anwendungsfälle zugeordnet. Mithilfe dieser beiden Schritte konnte eine Eingrenzung der zu beschreitenden Entwicklungspfade erfolgen und sichergestellt werden, dass jene Algorithmen implementiert werden, deren Erprobung im Verlauf des Projektes zum Erreichen der definierten Ziele führt.

Im zweiten Teil des Forschungsvorhabens wurden die entsprechenden Feldtestgebäude ausgewählt und dokumentiert. Ziel dieser Arbeiten war es, die Gebäude zu bestimmen, die thermische und elektrische Versorgungssituation zu klären und die Vorbereitung für den Anschluss an das RVK zu analysieren. Das Aufgabengebiet umfasste im ersten Teil ebenfalls die hydraulische Analyse der Wärmeversorgung sowie thermische Speichermöglichkeiten. Parallel zur Analyse der Gebäude erfolgte die Erstellung des messtechnischen Konzeptes. Hierzu wur-

de ein Messplan erarbeitet und alle relevanten Messeinrichtungen hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit sowie deren Zuverlässigkeit und Kommunikationsfähigkeit getestet. Technische Möglichkeiten zur einfachen Integration in die Gebäude der Feldtestteilnehmer wurden erarbeitet, um die Kundenzufriedenheit sicherzustellen.

Ein weiterer wesentlicher Punkt war die Konstruktion und anschließend die Herstellung eines RVK-Gateways, welches die Kommunikation zur übergeordneten Steuerebene respektive RVK-Zentrale übernimmt. Bezüglich der kommunikationstechnischen Anbindung der RVK-Gateways an das Virtuelle Kraftwerk von EWE wurde in enger Abstimmung ein Systemkonzept entwickelt. Das Systemkonzept beschreibt den Aufbau der einzelnen RVK-Komponenten sowie die informationstechnischen Beziehungen zwischen den Komponenten. Ziel des Systemkonzeptes war es, die ausgearbeiteten und priorisierten Anwendungsfälle möglichst gut bedienen zu können. Hierzu wurden grundlegende Voraussetzungen zu Betrieb und Entwicklung der Funktionen im RVK sowie verschiedene Testszenarien erarbeitet. Zwei der Testszenarien wurden für die praktische Umsetzung ausgewählt, die Anderen wurden konzeptionell betrachtet. Zusätzlich waren grundlegende Fragestellung zu IT-Sicherheit, Kommunikation (z. B. eventbasiert oder zyklisch), Einsatzplanung, Fahrplansteuerung, Prognoseverfahren, Datenpunkte aber auch Anmeldeverfahren (z. B. zertifikatsbasiert) zu untersuchen. Parallel zu den genannten Arbeiten erfolgte die Umrüstung bzw. Ergänzung der Feldtestgebäude mit der KWK-Technologie. Als KWK-Einheiten wurden hierbei motorische BHKW-Systeme sowie Brennstoffzellen verwendet.

Im dritten Hauptteil des Projektes stand das Monitoring der Feldtestteilnehmer und der Nachweis der stabilen Informationsvernetzung im Fokus der Betrachtungen. Die Bearbeitung dieses Hauptaufgabengebiets erstreckte sich zeitlich über mehrere Monate. Erst in einem weiteren Schritt erfolgte die Steuerung des RVK-Systems. Der Betrieb wurde stets überwacht, Verbesserungspotentiale unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten wurden detektiert und Updates der Software sowohl in der RVK-Zentrale als auch im RVK-Gateway vorgenommen.

Der letzte Arbeitsschwerpunkt stellte die Auswertung der Feldtestdaten für die unterschiedlichen Testszenarien dar. Hierbei wurden die Ergebnisse im Vergleich zu konventionellen Betriebsstrategien bewertet. Zusätzlich wurde eine Befragung der Nutzer in Hinblick auf deren technische und wirtschaftliche Zufriedenheit mit dem umgesetzten RVK-System vorgenommen.

1.2 Virtuelle Kraftwerke

Vor den eigentlichen inhaltlichen Fragestellungen zum Projekt soll nochmals eine Literaturrecherche zu Virtuellen Kraftwerken erfolgen, die derzeit schon betrieben werden. Grundsätzlich werden Virtuelle Kraftwerke eher für Erzeugungsanlagen im großen Leistungsbereich eingesetzt, um eine Vermarktung (Direktvermarktung / Regelleistung) von z. B. erneuerbaren Energien, Biogas- und KWK-Anlagen oder Notstromaggregaten zu ermöglichen. Zu nennen sind u.a. folgende bekannten Betreiber / Anbieter von Virtuellen Kraftwerken:

- Virtuelles Kraftwerk von RWE,
- Lichtblick-ZuhauseKraftwerk,
- Vattenfall Kraftwerk,
- EWE Virtuelles Kraftwerk (Intelligenter Lastmanager),
- NEXT Kraftwerke sowie
- Kiwigrd.

In Kooperation mit Siemens begann RWE im Jahr 2008 im Rahmen eines Pilotprojekts mit dem Betrieb eines Virtuellen Kraftwerkes [2]. Bestandteil des Virtuellen Kraftwerkes sind

dabei u. a. KWK-Anlagen, die eine Mindestleistung von $P_{\text{el}} = 300 \text{ kW}$ je Einheit besitzen. Die Aufgabe der Kooperationspartner RWE und Siemens ist es hierbei, die einzelnen elektrischen Leistungen zu bündeln und eine Vermarktung an der EEX (Strombörse) bzw. am Regelenenergiemarkt zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden zunehmend auch elektrische Verbrauchersysteme wie Wärmepumpen in das Virtuelle Kraftwerk integriert. Bisher wurde das Konzept dieses Virtuellen Kraftwerkes seitens der Betreiber auf Großanlagen ausgerichtet. Zukünftig sollen die entwickelten Vermarktungsstrategien jedoch auch für kleinere KWK-Anlagen genutzt werden. Erfahrungsberichte zum Virtuellen Kraftwerk von RWE und Siemens sind derzeit nicht öffentlich zugänglich.

Die Firma Lichtblick [3] betrieb unter dem Namen ZuhauseKraftwerk ein Virtuelles Kraftwerk. Kennzeichnend für das System war es, dass die in den privaten Liegenschaften erzeugte Elektroenergie, welche bislang vollständig ins öffentliche Netz eingespeist wurde, zielgerichtet vermarktet werden sollte. Im Rahmen eines Contracting-Modells stellte der Gebäudebetreiber einen Raum zur Verfügung, in dem Lichtblick ein gasmotorisches KWK von Volkswagen inklusive eines Pufferspeichers und einer Regeleinrichtung installierte. Die Vernetzung der Liegenschaften untereinander wurde von Lichtblick übernommen. Zielgruppe für die Anlagen waren Gebäude mit einem thermischen Mindestbedarf von $Q_{\text{th}} = 45\,000 \text{ kWh/a}$. Die verbauten Geräte waren gekennzeichnet durch eine thermische Leistung von $\dot{Q}_{\text{th}} = 36 \text{ kW}$ sowie eine elektrische Leistung von $P_{\text{el}} = 19 \text{ kW}$. Bis zum Jahr 2014 wurden über 1000 Anlagen installiert. Im Jahr 2014 wurde das ZuhauseKraftwerk beendet. Detaillierte Berichte über die Betriebsweise sowie die wirtschaftlichen Aussichten des ZuhauseKraftwerks existieren jedoch nicht. Weiterhin anzumerken ist, dass in dem genannten Projekt die Anlagen örtlich über die gesamte Bundesrepublik verstreut waren und somit kein regionaler Bezug vorhanden war. Aktuell betreibt die Firma Lichtblick ein Virtuelles Kraftwerk unter dem Titel SchwarmEnergie. Ziel ist die Vermarktung von erneuerbaren Energien.

Auch von der Firma Vattenfall existiert, vergleichbar mit dem Konzept von RWE, ein Virtuelles Kraftwerk [4]. Das System ist dadurch charakterisiert, dass hier ebenfalls unterschiedliche Erzeugungs- und Verbrauchersysteme kombiniert betrieben werden, um eine optimale Auslastung des elektrischen Übertragungs- und Verteilnetzes zu gewährleisten (größtmögliche Integration der regenerativen Energien). Zu diesem Zwecke hat Vattenfall eine eigene Wärmeleitwarte in Berlin installiert. Alle am Virtuellen Kraftwerk beteiligten Systeme müssen einen u.a. von Vattenfall entwickelten VHP-Ready Standard² erfüllen, über den die Kommunikation zur Leitwarte abgewickelt wird. Hinsichtlich der Anlagengröße nimmt Vattenfall keine Beschränkungen vor. Größere Einheiten im Megawatt-Bereich (Elektroenergieerzeugung) können ebenso in die Struktur integriert werden wie kleine Blockheizkraftwerke und Wärmepumpensysteme im Ein- und Mehrfamilienhaus. Ziel von Vattenfall war es, im Wärmemarkt bis Ende 2013 mindestens 200.000 Haushalte (meist in großen Mehrfamilienhäusern) über das Virtuelle Kraftwerk zu versorgen. Angaben über die Anzahl der integrierten Anlagen liegen nicht vor.

Die EWE AG entwickelte den intelligenten Lastmanager im Rahmen eines Virtuellen Kraftwerks als Lösung in der Situation schwankender Preise am Strommarkt, denen bisher weitgehend unelastische Stromnachfrage gegenüber stand. Mit dem Intelligenten Lastmanager lässt sich der Strombedarf bei den Nachfragern jeweils mit wirtschaftlich günstigem Stromangebot synchronisieren. Wann immer Energie nachgefragt wird, kann man sich stets auf die Bereitstellung verlassen. Das wird auch zukünftig der Fall sein, der Preis dafür wird sich jedoch zunehmend an der Einspeisung erneuerbarer Energien orientieren. Deren schwankende Verfügbarkeit ist mit Preissignalen an den Energiemärkten verbunden. Steht viel Energie zur Verfügung, sinkt der Preis. Speisen die Erneuerbaren wenig Strom in die Netze, steigt tendenziell der Preis. Mit dem intelligenten Lastmanager gelingt es, energieintensive Prozesse mit den Preissignalen zu verknüpfen und diese genau dann zu initiieren, wenn die

²VHP-Ready = Virtual Heat and Power Ready

Preise an den Energiemärkten gering sind. Dies schafft nicht nur eine betriebswirtschaftliche Optimierung der jeweiligen Anlage, sondern auch eine verbesserte Integration von erneuerbaren Energien. Der intelligente Lastmanager koordiniert Energieerzeugungsanlagen und Stromverbraucher unter Berücksichtigung von Prozessabläufen sowie Produktionsplanungen und ermöglicht Industrie- und Geschäftskunden, ihre Flexibilität am Regelleistungsmarkt und am Spotmarkt anzubieten. Eine Marktbeteiligung sieht neben einer Direktvermarktung auch die Bereitstellung von Minutenreserveleistung vor. Die Direktvermarktung verspricht dem Anlagenbetreiber eine gesicherte Vergütung in Höhe der üblichen EEG-Vergütung sowie Mehrerlöse aus Handelsprämien und Verkaufserlösen. Zusätzlich erfolgt die Teilnahme am Minutenreservemarkt über die Einbindung der Anlage in das Virtuelle Kraftwerk. Die Kombination der beiden Optionen eröffnet dem Anlagenbetreiber deutliche Mehrerlöse. Der intelligente Lastmanager ist zurzeit nur für Großanlagen ausgelegt und kann regional verteilte Flexibilität nicht handhaben. Die Vorarbeiten können jedoch genutzt werden, um Funktionalitäten für die Ansteuerung regional verteilter Mikro-KWK-Anlagen zu adaptieren.

Neben den hier dargestellten Virtuellen Kraftwerken sind als zusätzliche Anbieter / Betreiber noch NEXT-Kraftwerke sowie Kiwigrid zu nennen. Ziel ist es auch hier, Erzeuger und Verbraucher zu vernetzen und einer Vermarktung zu zuführen. NEXT-Kraftwerke gibt hierbei an, dass aktuell KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung ab $P_{el} > 100 \text{ kW}$ wirtschaftlich eingebunden werden können. Erfahrungsberichte zum Betrieb der Lösungen liegen jedoch nicht vor.

Ein ergänzendes Projekt, das ebenfalls die Verknüpfung von unterschiedlichen Erzeugungsstrukturen zum Ziel hatte, ist z. B. das Projekt „Regenerative Modellregion Harz – Das virtuelle Kombikraftwerk“ [5], welches die Verknüpfung von regenerativ erzeugter Elektroenergie auf Basis von Wasser, Wind, Sonne und Biogas zum Inhalt hatte. Kennzeichnend für dieses Projekt war, dass die besonderen topologischen Gegebenheiten der Harzregion mit im Projekt berücksichtigt und eine Speicherung über Pumpspeicherwerke realisiert wurde. Nicht adressiert wurde in diesem Projekt der Wärmemarkt.