

Botschaft über die Auswirkungen der Erkundungsaktivitäten auf die Bevölkerung und ihre Umwelt basieren. Das Erkundungsprojekt muss eine positive Bilanz aufweisen. Auch wenn sich die Mehrheit der Bürger des Bedarfs an kritischen Metallen bewusst ist, sollte die Lokalbevölkerung nicht die einzige sein, die unter diesen nationalen und internationalen Zwängen leidet. Es muss also einen Ausgleichsmechanismus geben.

Ein nachhaltiges Projekt basiert auf Selbstbestimmung. Alle Beteiligten müssen in der Lage sein, die Kontrolle über die Entscheidungen zu haben, die ihre Zukunft beeinflussen, auch wenn es sich nur um eine kleine Gruppe handelt. Dies gilt für die Anwohner, die ein Explorationsprojekt um so mehr akzeptieren werden,

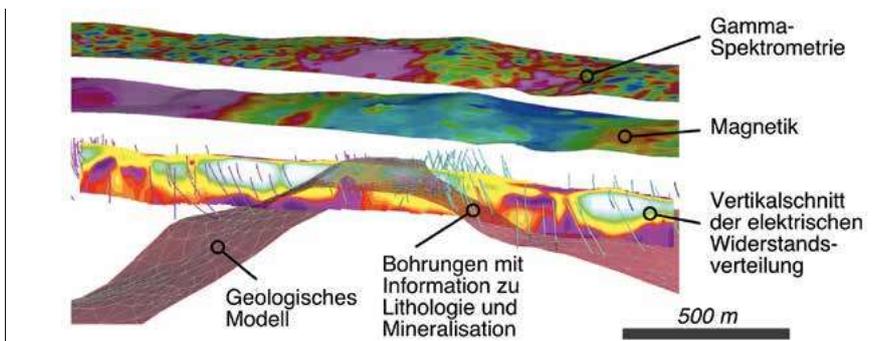


Abb. 2: Beispiel von verfügbaren geologischen und geophysikalischen Datensätzen eines Referenzgebiets; Daten, die als Referenz dienen, um die Wirksamkeit nicht-invasiver Technologien zu messen

wenn ihre Meinung berücksichtigt wird (beispielsweise über den Zeitraum, in dem Geländearbeiten oder Befliegungen durchgeführt werden). Schließlich ist ein Explorationsprojekt nur dann

wirklich nachhaltig, wenn emotionale Eigenverantwortung erworben wurde: Die Lokalbevölkerung muss vom Nutzen des Projekts überzeugt sein und es daher verteidigen können.

Regenerative Energiegewinnung aus Grubenwasser

Lukas Oppelt¹, Sebastian Pose¹, Thomas Grab¹, Tobias Fieback¹

Das Erzgebirge und insbesondere auch Freiberg wurden jahrhundertlang durch den Bergbau geprägt. Inzwischen sind die meisten Gruben stillgelegt und geflutet, doch sie haben weiterhin Potenzial: Energie. Da sie ganzjährig ein nahezu konstantes Temperaturniveau aufweisen, sind sie optimal zur regenerativen Wärme- und Kälteversorgung geeignet.

Das grundlegende Prinzip der energetischen Nutzung von Grubenwasser ist dabei stets ähnlich, das Wasser wird entnommen und über einen Wärmeübertrager mit angeschlossener Wärmepumpe zum Heizen verwendet oder ohne Wärmepumpe als Wärmesenke zum Kühlen eingesetzt (Abbildung 1). Die Bergwerke unterscheiden sich jedoch in ihrem generellen Aufbau abhängig vom abgebauten Rohstoff bzw. der Lagerstätte. Als mögliche Entnahmestellen werden dabei unter anderem Wasserlösestellen, wassergefüllte Abbaue oder aufsteigende Tiefenwässer, die oft höhere Temperaturen haben, genutzt.

In den meisten Fällen wird das Grubenwasser zunächst zu einem Wärmeübertrager gepumpt und Wärme an einen Zwischenkreislauf abgegeben. Dadurch werden Ablagerungen und Beschädigungen durch Korrosion, aufgrund von Bestandteilen im Grubenwasser, im übrigen

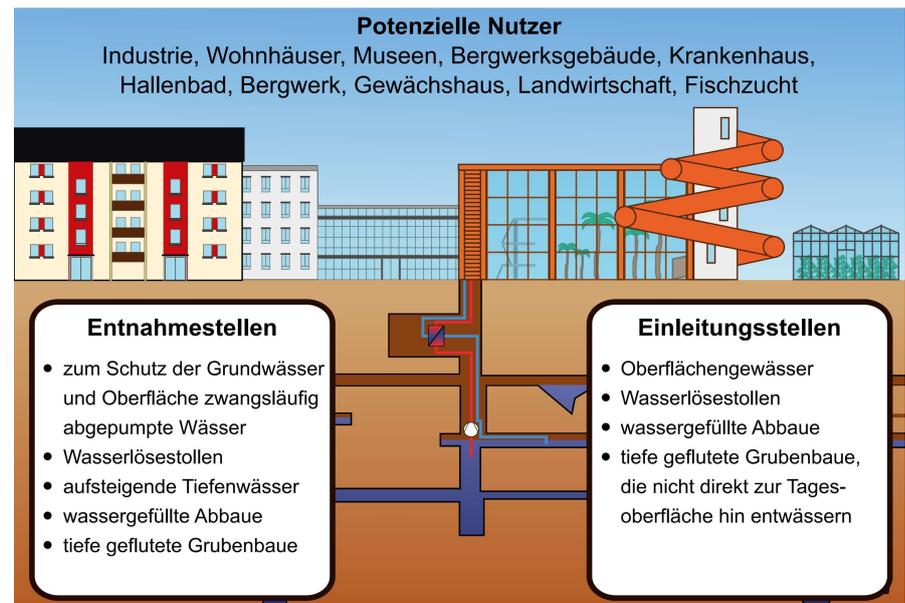


Abb. 1: Schematische Darstellung der Nutzung von Grubenwässern

System der Anlage (z. B. Wärmepumpe) verhindert. Nach dem Passieren des Wärmeübertragers wird das Grubenwasser z. B. zurück in Wasserlösestellen oder in Oberflächengewässer abgegeben.

Ein Temperaturniveau, welches ohne Wärmepumpe direkt zum Heizen geeignet ist, ist nur an wenigen Standorten vorhanden. Durch die Kombination der Grubenwassergeothermie mit Wärme- und Kältespeichern bieten sich weitere Möglichkeiten der Effizienzsteigerung. Anwendung findet Grubenwassergeothermie, je nach Temperaturniveau, beispielsweise zur Beheizung von Wohnhäusern,

Krankenhäusern (z. B. Kreiskrankenhaus Freiberg), Gewächshäusern oder auch Hallenbädern. Im Freiburger Revier befinden sich drei Anlagen, die der Beheizung und teilweise der Kühlung des Schlosses Freudenstein, des Kreiskrankenhauses und der Gebäude der Reichen Zeche dienen.

Im Projekt VODAMIN II², gefördert durch die Europäische Union im Rahmen des Kooperationsprogramms des Freistaates Sachsen und der Tschechischen Republik, wird der Betrieb von insgesamt

¹ Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Oppelt, M.Sc. Sebastian Pose, Dr.-Ing. Thomas Grab, Prof. Dr.-Ing. Tobias Fieback
Kontakt: Professur für Technische Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg
Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg

² SAB-Antragsnummer: 100304269, Laufzeit: 2016-2020

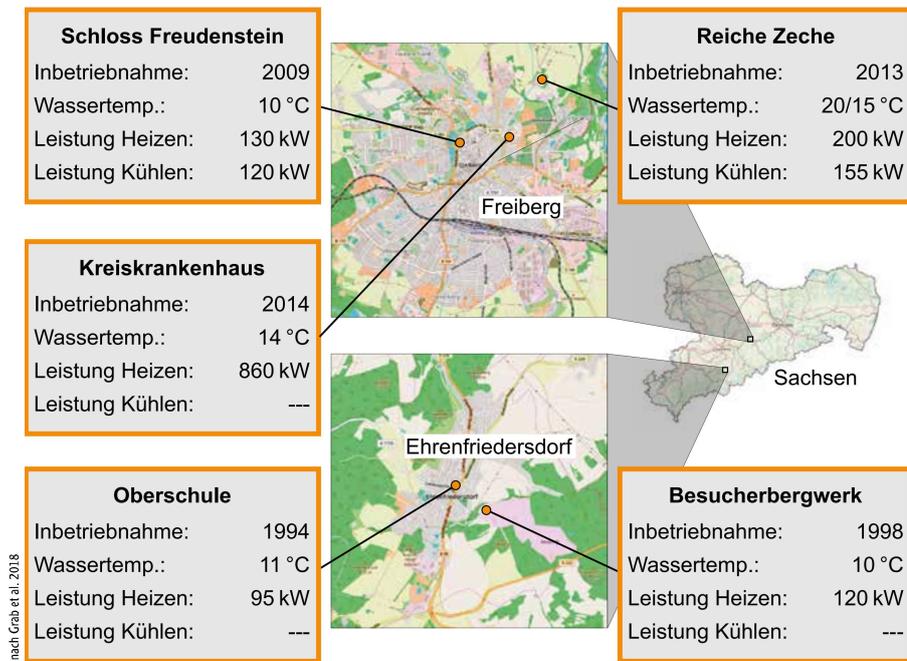


Abb. 2: Standorte und Kennwerte der Grubenwassergeothermieanlagen im Monitoring

fünf bestehenden Grubenwassergeothermieanlagen im Erzgebirge durch ein Monitoring begleitet. Neben den drei Freiburger Anlagen gehören zwei Anlagen in Ehrenfriedersdorf dazu. Die Standorte und Kennwerte der fünf Anlagen sind in *Abbildung 2* dargestellt.

Monitoringergebnisse einzelner Anlagen

Bei der seit 1994 betriebenen Anlage der Oberschule Ehrenfriedersdorf werden sowohl die Schule, als auch ein angrenzender Kindergarten anteilig mit

Grubenwassergeothermie versorgt. Zur Erschließung des Reservoirs wurden ein Förder- und ein Schluckbrunnen abgeteuft. Da der Wasserspiegel oberhalb der Entnahmestelle liegt ist keine aktive Wasserhebung notwendig. Um eine Regeneration des Wasserreservoirs zu ermöglichen, wird das Wasser auf der 5. Sohle entnommen und auf der 2. Sohle wieder zugeführt (*Abbildung 3*).

Das Grubenwasser hat an der Entnahmestelle eine Temperatur von etwa 10 °C. Das zum Heizen der Schule und des Kindergartens notwendige Temperaturniveau

wird durch den Betrieb von drei Gaswärmepumpen erzielt. Wie in *Abbildung 3* erkennbar, erreicht die Anlage im Winter Arbeitszahlen von etwa 1,3 (vergleichbar mit der Arbeitszahl einer elektrischen Wärmepumpe von $\approx 3,2-4$). Das bedeutet, dass im Vergleich zu einer Bereitstellung der Heizwärme ausschließlich durch Gas die CO₂-Emissionen und die Arbeitskosten um etwa 23 Prozent reduziert werden können. Der bei Gaswärmepumpen geringe Strombedarf für den Anlagenbetrieb ist in der betrachteten Arbeitszahl bereits berücksichtigt.

In den kühleren Monaten von November bis März wurden die höchsten Wärmemengen nachgefragt und auch die besten Arbeitszahlen berechnet. Da die Anlage nur zum Heizen ausgelegt ist, ist ein Betrieb in den Sommermonaten ineffektiv, da nur vereinzelt ein Wärmebedarf vorliegt, dessen Deckung mit entsprechend hohem Aufwand verbunden ist. Der Wärmebedarf, der nicht durch die Grubenwassergeothermie gedeckt werden kann, wird durch den Betrieb eines Gaskessels bereitgestellt. Wie ersichtlich ist, kann die Grubenwassergeothermieanlage zu etwa einem Drittel den Wärmebedarf decken. Im Winter laufen die Wärmepumpen dabei bereits zu 99 Prozent der Zeit. Mit der vorhandenen Anlage ist also keine weitere Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie möglich.

Mit einem pH-Wert im Bereich von 7 und einer elektrischen Leitfähigkeit von rund 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erfüllt das Grubenwasser theoretisch auch die Anforderungen

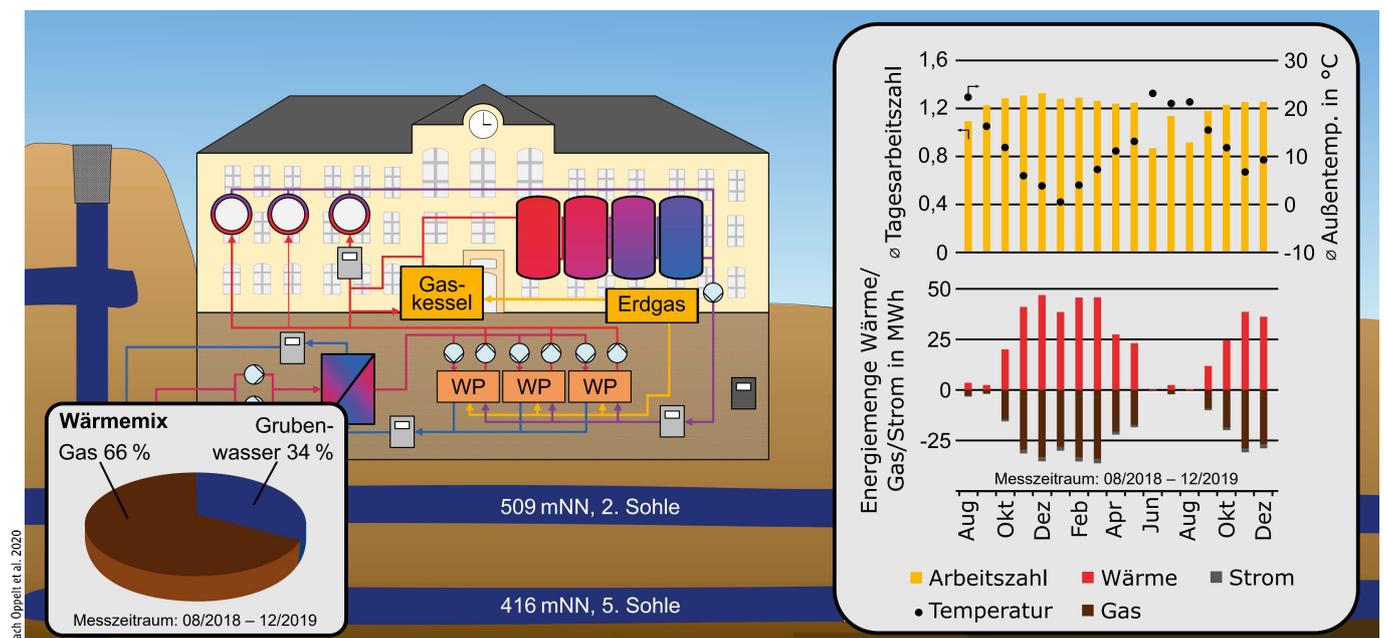


Abb. 3: Schematischer Aufbau und Messergebnisse der Grubenwassergeothermieanlage der Oberschule Ehrenfriedersdorf

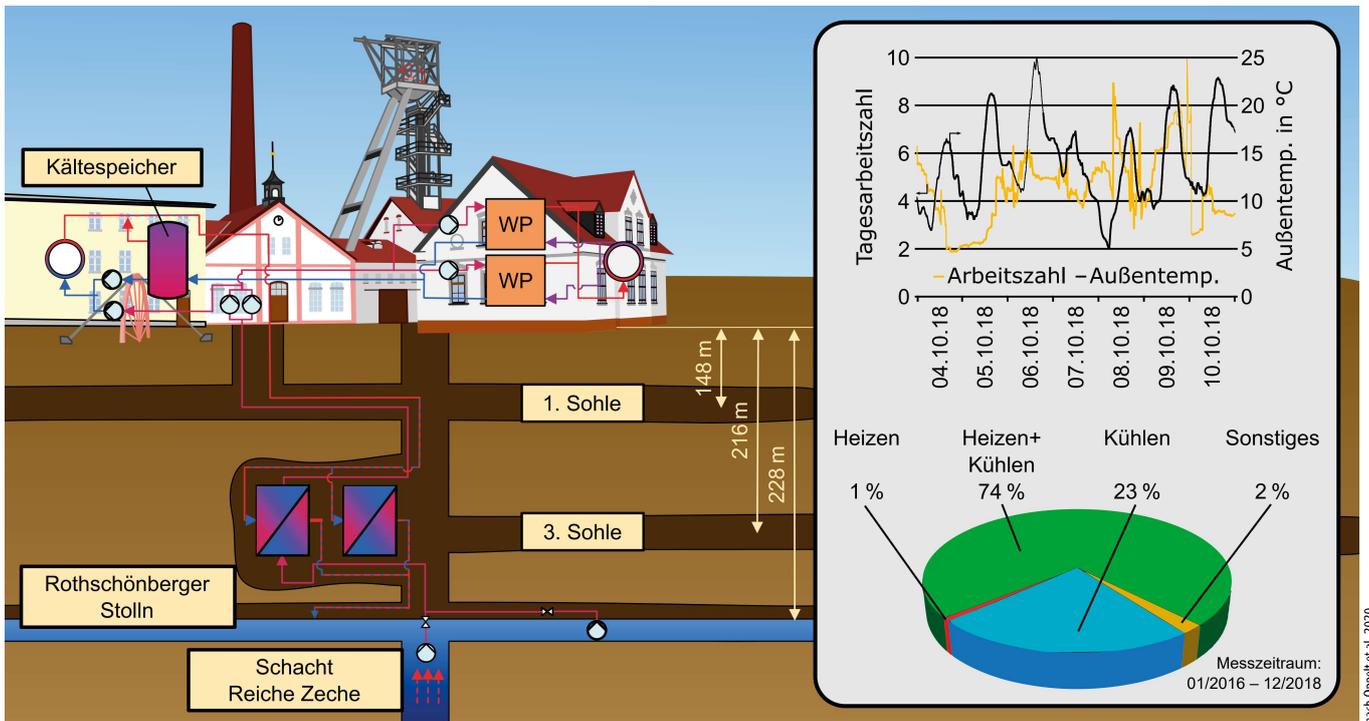


Abb. 4: Anlagenschema und Messergebnisse der Grubenwassergeothermieanlage Reiche Zeche in Freiberg

an Trinkwasser. Dennoch kommt es zu Verschmutzungen im Wärmeübertrager, worauf später näher eingegangen wird.

Die komplexeste, im Rahmen des Monitorings, untersuchte Anlage befindet sich in der Reichen Zeche in Freiberg. Sie dient zur Wärme- und Kälteversorgung eines Universitätsgebäudes inklusive Server- und Laborräumen. Dabei besteht die Möglichkeit, an zwei unterschiedlichen Stellen Grubenwasser zu entnehmen (*Abbildung 4*): zum einen aus dem Rothschnöberger Stolln ($\approx 15\text{ }^{\circ}\text{C}$), zum anderen aus aufsteigenden Tiefenwässern im Schacht Reiche Zeche ($\approx 18\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Darüber hinaus ist es möglich, nur das Fluid im Zwischenkreislauf zirkulieren zu lassen (bis zu den Wärmeübertragern in 216 m Tiefe). Bei vergleichsweise geringem Bedarf ist damit die Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme des umliegenden Gesteins zum Heizen bzw. Kühlen ausreichend.

Die Stelle, an der Wasser entnommen wird, richtet sich nach dem aktuellen Bedarf: Bei überwiegendem Kältebedarf wird das kühlere Wasser aus dem Rothschnöberger Stolln genutzt, bei überwiegendem Heizbedarf das wärmere Wasser aus dem Schacht Reiche Zeche. Das im Heizkreislauf abgekühlte Fluid wird anschließend noch für zukünftige Kühlanwendungen im Kältespeicher gespeichert. In *Abbildung 4* ist der Verlauf von Außentemperatur und Tagesarbeitszahl für eine Woche im Herbst 2018 dargestellt. Da in der herbstlichen

Jahreszeit sowohl Heizbedarf vorliegt, als auch die Serverräume gekühlt werden müssen, ergeben sich Arbeitszahlen des Gesamtsystems (inklusive Aufwand für Grubenwasserpumpen und Zwischenpumpen) von über 5. Insgesamt arbeitet die Anlage in Zeiträumen, in denen sowohl geheizt als auch gekühlt wird, mit der höchsten Effektivität. Durch die Kühlung wird im Vergleich zum ausschließlichen Heizen nur etwas mehr Strom für die Pumpen benötigt, bei gleichzeitig höherem Nutzen. Die Nutzung des Rücklaufs durch den Kältespeicher sorgt für einen weiteren Benefit und ermöglicht temporär auch Arbeitszahlen des Gesamtsystems von über 7.

Die Betrachtung der nachgefragten Energiemengen zeigt, dass zu etwa Dreiviertel des betrachteten Zeitraums (01/2016–12/2018) geheizt und gekühlt wird. Zu 23 Prozent der Zeit wird nur gekühlt, eine reine Nutzung der Anlage zum Heizen liegt nur zu einem Prozent der Zeit vor. Durch die notwendige Kühlung der Serverräume über nahezu den ganzen Winter ist quasi durchgehend ein Grundbedarf an Kälte vorhanden.

Der pH-Wert am Schacht Reiche Zeche liegt bei etwa 6 und die elektrische Leitfähigkeit bei rund $1500\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$. Das aus dem Rothschnöberger Stolln entnommene Grubenwasser hat einen pH-Wert von rund 7,4 und die elektrische Leitfähigkeit liegt bei knapp $900\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$.

Verminderte Anlageneffizienz durch Fouling

Wie einleitend beschrieben, wird bei den meisten Anlagen zwischen Wärmepumpen- und Grubenwasserkreislauf ein Zwischenkreislauf mit Wärmeübertrager installiert. In den Untersuchungen im Rahmen der Projekte VODAMIN II und GeoMAP³ wurden Ablagerungen im Wärmeübertrager als ein wesentliches Problem identifiziert, das zu einem Sinken der übertragenen Wärmemenge und Erhöhung des Druckverlusts im System führt.

Die zumeist bei der Grubenwassergeothermie verwendeten Plattenwärmeübertrager sind bei großer wärmeübertragender Fläche vergleichsweise kompakt. An den einzelnen Wärmeübertragerplatten, die vom Grubenwasser überströmt werden, kommt es jedoch zu Ausfällungen und Ablagerungen aufgrund von Verschmutzungen im Grubenwasser (Fouling). Es bilden sich zudem Eisen-Mangan-Verbindungen mit Biofilmen aus. Diese Biofilme können eine Dicke von bis zu $1000\text{ }\mu\text{m}$ erreichen.⁴ Bereits bei einem Biofilm von $250\text{ }\mu\text{m}$ wird die übertragene Wärmemenge aber schon um 50 Prozent reduziert⁵.

³ SAB-Antragsnummer: 100348899, gefördert durch die Europäische Union im Rahmen des Kooperationsprogramms des Freistaates Sachsen und der Tschechischen Republik, Laufzeit: 2019–2020

⁴ Nandakumar et. al 2003

⁵ Goodman 1987

Da sich die Wärmeübertrager demontieren lassen, ist eine mechanische und/oder chemische Reinigung möglich, wodurch die Wärmeübertragung wieder verbessert wird. Eine solche Wartung der Wärmeübertrager in einem Bergwerk ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden. So befinden sich am Standort Reiche Zeche in Freiberg diese Wärmeübertrager in einer Teufe von 216 m und sind nur zu Fuß erreichbar. Auch durch eine Reinigung kann der Ursprungszustand nicht wiederhergestellt werden (Abbildung 5).

Die Bildung von Ablagerungen folgt einem charakteristischen zeitlichen Verlauf. Während der Induktionszeit zu Beginn der Verschmutzung tritt keine nennenswerte Verschmutzung auf. In diesem Zeitraum werden auf der sauberen Oberfläche erste Nukleationskeime gebildet, bzw. erfolgt die erste Besiedlung mit Bakterien, wobei glatte Oberflächen und eine hohe Oberflächenenergie eine besonders hohe Inkubationszeit aufweisen. Anschließend wächst der Foulingwiderstand durch eine kontinuierliche Verschmutzung an, wobei gleichzeitig ein Abtragungsprozess durch auftretende Scherkräfte bzw. Erosion der Strömung vorstatten geht. Bei den meisten Anlagen kommt es zu einer asymptotischen Annäherung an eine maximale Verschmutzung. Das sich damit eingestellte Gleichgewicht ist mit einem Performanceverlust der Anlage hinsichtlich Druckverlust und Wärmeübergang verbunden. Somit ist die Anlage nicht mehr wirtschaftlich und effektiv zu betreiben, was eine Wartung und Reinigung der betroffenen Komponenten bzw. den Austausch ganzer Baugruppen notwendig macht.⁶

Eine Verringerung der Ablagerungen kann potenziell durch eine optimale Materialauswahl und Beschichtung der einzelnen Wärmeübertragerplatten erreicht werden. Die Verschmutzung ist jedoch von vielen Parametern, wie Wasserwerten, Betriebsparametern oder Mikroorganismen abhängig, eine exakte Vorhersage der entstehenden Ablagerungen ist nicht möglich. Somit ist auch eine experimentelle Untersuchung im Labor nur wenig aussagekräftig, um den Gesamtprozess der Wärmeübertragerverschmutzung zu verstehen. Eine Möglichkeit, ein besseres Verständnis zu erzielen, bieten Kooperationen mit Betreibern bereits bestehender Grubenwassergeothermieanlagen. Doch auch hier treten Schwierigkeiten auf, da die Anlagen nicht für ein intensives



Abb. 5: Gegenüberstellung einer neuen (links), verschmutzten (mittig) und gereinigten (rechts) Wärmeübertragerplatte

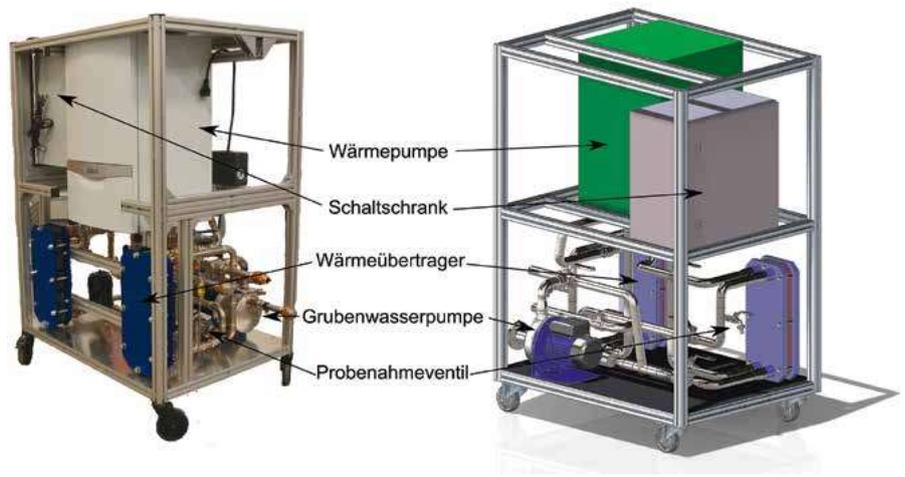


Abb. 6: Aufbau der Versuchsanlage zur Untersuchung der Wärmeübertragerverschmutzung bei der geothermischen Grubenwassernutzung (Foto links und 3D-Modell rechts)

Monitoring ausgerüstet sind und eine regelmäßige Untersuchung der Wärmeübertrager für den Anlagenbetreiber mit erhöhtem Aufwand und temporärerem Anlagenstillstand verbunden ist.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen besteht für eine unabhängige Untersuchung von potenziellen Grubenwasserstandorten unter realen Bedingungen die Notwendigkeit eines eigens dafür entwickelten Versuchsstands, der eine repräsentative Beprobung des Wassers und der Ablagerungen sowie den Test unterschiedlicher Materialien und Beschichtungen ermöglicht. Für die Konstruktion des Versuchsstands ergeben sich folgende Anforderungen:

- Mobiler Einsatz der Anlage mit Zugang zum Bergwerk und einfache Anschlussbedingungen,
- Einfacher Zugang zu den Wärmeübertragern mit der Möglichkeit der Demontage und der Probenahme von Wasser und Ablagerungen,
- Einsatz von korrosionsfesten Materialien bei allen das Grubenwasser berührenden Teilen,
- Schutz der Anlagenkomponenten

- gegen äußere Einflüsse (Feuchtigkeit, Blitzschutz, Überspannung, ...),
- Aufnahme und Speicherung der Messwerte über den Messzeitraum, sowie umgebungsunabhängige Übertragung der Daten.

Aufgrund dieser Anforderungen wurde ein Versuchsstand entworfen und gebaut (Abbildung 6), der lediglich einen 230V Anschluss benötigt und damit autonom mit der Möglichkeit eines Fernzugriffs betrieben werden kann. Der Versuchsstand stellt eine Grubenwassergeothermieanlage in verkleinertem Maßstab dar und verfügt ebenfalls über eine Wärmepumpe, Wärmeübertrager, Kältemittelkreislauf und alle weiteren betriebsnotwendigen Installationen.

Die Betriebsparameter werden durch Temperatur-, Druckdifferenz- und Volumenstromsensoren erfasst. Besonders ist hierbei der leicht zugängliche und demontierbare Plattenwärmeübertrager, mit dem sich unterschiedliche Beschichtungen und Plattenmaterialien für den realen Einsatz mit Grubenwasser in kleinem Maßstab testen lassen. Aktuell sind acht unterschiedliche Plattenpaare verbaut, die aus verschiedenen Edelstählen, Titan oder

⁶ Wilde et al. 2019

Nickelbasislegierungen bestehen, ein Paar weist eine antibakterielle Beschichtung auf. Mit dieser Versuchsanlage kann das Verschmutzungsverhalten an unterschiedlichen Standorten und Grubenwasserchemismen untersucht werden. Das oberflächen- und materialabhängige Foulingverhalten kann damit in Zusammenhang mit verschiedenen Oberflächenkennwerten gebracht werden (z. B. Kontaktwinkel, Oberflächenenergie), die im Vorfeld der Versuche gemessen wurden. In Ergänzung dazu sollen unterschiedliche Konzepte der Wasservorbehandlung auf ihre Wirksamkeit zur Foulingverringereung getestet werden.

Zusammenfassung

Die Analyse des Anlagenbetriebs zeigt, dass Grubenwassergeothermie eine sinn-

volle Möglichkeit zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Wärme- und Kältebereitstellung bietet. Bei normalem Anlagenbetrieb sind bei der Anlage Reiche Zeche regelmäßig Arbeitszahlen des Gesamtsystems von über 5 möglich.

Eine Beeinträchtigung der Anlageneffizienz stellen die an den Wärmeübertragern zwischen Grubenwasser und Zwischenkreislauf entstehenden Ablagerungen dar. Um beispielsweise mit Gas wirtschaftlich konkurrieren zu können sind an dieser Stelle Verbesserungen nötig.

Der Einsatz eines an der TU Bergakademie Freiberg entwickelten mobilen Versuchsstands ermöglicht die Durchführung von In-situ-Versuchen zur Effizienzsteigerung, die unabhängig von Anlagenbetreibern und Anlagenlaufzeiten stattfinden können.

Literatur

- Goodman, P. D.: Effect of chlorination on material for seawater cooling system: a review of chemical reactions. *Bra. Corr. J.* 22, S. 56-62 (1987).
- Grab, T.; Storch, T.; Groß, U.: Energetische Nutzung von Grubenwasser aus gefluteten Bergwerken, Erschienen in: Bauer, M. et al (Hrsg.): *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*, Kapitel 17, Springer Spektrum, 2018, ISBN: 978-3-662-50306-5.
- Nandakumar, K; Yano, T.: Biofouling and Its Prevention: A Comprehensive Overview. In: *Biocontrol Science Vol. 8*. Nr. 4, S. 133-144. (2003).
- Oppelt, L.; Pose, S.; Grab, T.; Fieback, T.: Geothermische Nutzung von Grubenwasser zur regenerativen Energieversorgung, *Geothermische Energie*, Jg.29, Nr.95, S.24-27, 2020.
- Wilde, L.-M.; Pose, S.; Fieback, T.; Grab, T.: Untersuchung ausgewählter Oberflächenparameter zur Foulingvermeidung in Wärmeübertragern bei der geothermischen Grubenwassernutzung, *Thermodynamik-Kolloquium 2019*, 30.09.-02.10. 2019, Duisburg.

Spillover-Effekte in Energiemärkten – eine empirische Analyse am Beispiel des australischen Strommarkts¹

Benjamin Aust²

Einleitung

Der australische Strommarkt NEM (National Electricity Market) besitzt eines der weltweit längsten zusammenhängenden Stromnetzwerke (vgl. AEMO, 2018). Der physische (Groß-)Handel von Energie wird vollständig über eine Spotbörse abgewickelt. Das zugehörige Marktgebiet dieses börsengestützten Energiegroßhandels erstreckt sich über die östlichen und südlichen Bundesstaaten New South Wales (NSW) samt Australian Capital Territory, Victoria (VIC), Queensland (QLD), Southern Australia (SA) und Tasmanien (TAS), für die jeweils ein separater Handelsplatz (auch als Gebotszone bezeichnet) mit einem regionalen Spotmarktpreis³ für eine bestimmte Strommenge an der Spotbörse existiert. Hierbei ist aufgrund von geografischen Gegebenheiten und Kostenaspekten nicht jeder Handelsplatz mit jedem über ein separates Stromnetz verbunden.⁴

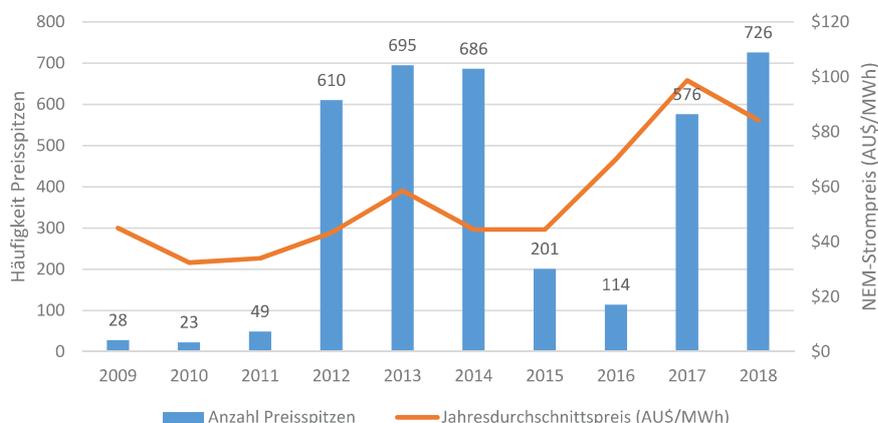


Abb. 1: Entwicklung des Preisniveaus am NEM

Bei Betrachtung der Preisentwicklung auf dem NEM unter Einbeziehung aller fünf Gebotszonen sind neben einem generellen Anstieg des durchschnittlichen Preisniveaus auch übermäßig häufig Preisextrema⁵ (auch als Preisspitzen bezeichnet) in den Jahren 2012 bis 2014 (Abbildung 1) sowie 2017 und 2018 zu beobachten, die wertmäßig einem Vielfachen des mittleren Preisniveaus entsprechen.

Diese preislichen Ausreißer können verschiedene ökonomische und technische Ursachen haben: zweifelsohne beeinträchtigen etwa unerwartete technische Ausfälle bei Kraftwerken oder Stromnetzen das Gleichgewicht⁶ zwischen Stromangebot und -nachfrage.⁷ Die dadurch entstehenden negativen Angebotschocks können die Marktpreisbildung bei gleichgebliebener Nachfrage an der Spotbörse in außergewöhnlichem Maße beeinflussen⁸, so dass in der Folge etwaige

1 Ein Vortrag zu diesem Thema wurde auf der 7. IAEF Asia-Oceania Conference 2020 in Auckland präsentiert. Der Autor dankt den Teilnehmern für die wertvollen Kommentare und Anregungen.

2 Dr. rer. pol. Benjamin Aust, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Investition und Finanzierung der TU Bergakademie Freiberg, E-Mail: benjamin.aust@bwl.tu-freiberg.de

3 Vgl. Mayer/Trück, 2018

4 Vgl. hierzu und weiteren Besonderheiten des

australischen Energiemarkts Byrnes et al., 2013

5 Als Preisspitzen werden hier sämtliche wertmäßig positiven und negativen Preise bezeichnet, die einen Betrag über- oder unterhalb des dreifachen Jahresdurchschnittspreises aufweisen.

6 Vgl. Simshauser, 2018

7 Vgl. Higgs/Worthington, 2008

8 Vgl. einflührend zu Schocks Blanchard/Illing, 2017

Extrempreisszenarien, auch bundesstaat- bzw. handelsplatzübergreifend⁹, entstehen können.

Dahingehend untersucht dieser Beitrag, welche Übertragungseffekte technische Ausfälle als Angebotsschocks auf Spotmarktpreise innerhalb des NEM-Gebiets auslösen. Dabei werden insbesondere Preisvolatilitätseffekte zwischen den Bundesstaaten bzw. ihren regionalen Handelsplätzen analysiert und verglichen.

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird zunächst eine geeignete Datenbasis ausgewählt, auf die ein VAR-Modell (Vektorautoregressionsmodell) aufsetzt. Im nächsten Schritt wird die Verbundenheit (auch als *Connectedness* bezeichnet) zwischen den einzelnen Handelsplätzen auf Basis ihrer Spotmarktpreise berechnet, um wiederum mögliche Übertragungseffekte – sog. Volatilitätsspillovers – auf die Bildung der regionalen Spotpreise im Zusammenhang mit unerwarteten technischen Vorfällen identifizieren zu können. Zeigen sich etwa hohe Spillover-Effekte zwischen den Spotmärkten bei einer hohen Verbundenheit, bedeutet dies allgemein für die Marktteilnehmer, dass sich kurzfristig auftretende extreme (positive oder negative) Preise in mehreren Bundesstaaten einstellen können, obwohl der ausgelöste Nachfrageüberhang nur in einem Bundesstaat auftrat. Damit würde ein Stromhandel über mehrere Handelsplätze vergleichsweise geringere ökonomische Vorteile in Form von regionaler Arbitrage bieten¹⁰, auch wenn sich demgegenüber nur geringe Übertragungseffekte zwischen den Handelsplätzen beobachten lassen. Die Resultate der hier durchgeführten Analyse werden anschließend diskutiert, bevor der Beitrag mit einer Zusammenfassung endet.

Daten und Untersuchungsmethodik

Da Strommarktpreise gewöhnlich saisonalen Schwankungen unterliegen und das Preisniveau gemäß *Abbildung 1* im Vergleich zwischen den einzelnen Jahren teilweise sehr unterschiedlich ausfällt, wird auf einen mehrjährigen Datensatz aus dem Zeitraum von Januar 2014 bis März 2019 zurückgegriffen. Seit 2014 werden unerwartete und erhebliche großtechnische Störungen durch den *Australian Energy Market Operator* (AEMO) erfasst, ausgewertet sowie deren Ursachen und Auswirkungen in Marktberichten

veröffentlicht, die für alle Marktteilnehmer im Nachgang der Vorfälle zugänglich sind. Für die vorliegende Analyse wird auf die dokumentierten technischen Ausfälle, die sich innerhalb des zugrundeliegenden Untersuchungszeitraums pro Bundesstaat gemäß diesen Berichten ereigneten, zurückgegriffen, sowie diesen auch deren Häufigkeit und Ereignistag entnommen.

Des Weiteren werden die Spotmarktpreise der Gebotszonen NSW, VIC, TAS, SA, QLD ins Kalkül gezogen. Im Einklang mit dem aktuellen Forschungsstand¹¹ werden dabei die Daten auf Tagesniveau (p_d) verwendet und einer Transformation (hier zu P_d) unterzogen, so dass die vergleichsweise häufig zu findenden Preisspitzen (*laut Abbildung 1*) den Modellansatz nicht unnötig verzerren. Dabei finden sich im Datensample neben positiven Preisen auch negative Preise¹², die ein vielfach in der Forschung genutztes Logarithmieren zur Transformation der originalen Preisdaten verhindern. Eine Alternative stellt der *asinh*-Ansatz dar¹³, der sowohl eine Anwendung auf positive als auch auf negative Werte uneingeschränkt ermöglicht und sich dabei wie folgt mathematisch beschreiben lässt:

$$P_d = \operatorname{asinh}(p_d) = \log \left(p_d + \sqrt{p_d^2 + 1} \right).$$

Die *Connectedness* bzw. Verbundenheit zwischen den einzelnen Gebotszonen ermöglicht eine Aussage darüber, wie sich Schocks auf die fünf Bundesstaaten, etwa hervorgerufen durch technische Vorfälle, auswirken, was sich schließlich in den jeweiligen Spotpreisen bzw. deren Volatilitätsmustern niederschlagen sollte. Dafür muss der statistisch signifikante Anteil der prognostizierten Fehlerabweichungen (generalisierte Varianzzerlegung, kurz GVD) der einzelnen Handelsplätze des NEM mithilfe eines einfachen Cholesky-Faktor-VAR-Modells nach Diebold/Yilmaz (2014) berechnet werden. Wird die generalisierte Varianzzerlegung für die einzelnen Bundesstaaten über denselben Prognosezeitraum H kalkuliert, können mögliche Spillover-Effekte zwischen zwei Handelsplätzen durch paarweise Vergleiche

der *Connectedness* C_{ij}^H abgeleitet werden, was mathematisch auf folgende Weise beschrieben werden kann:

$$C_{i,j}^H = C_{i \leftarrow j}(H) - C_{j \leftarrow i}(H),$$

wobei $C_{i \leftarrow j}(H)$ den Spillover von Bundesstaat j zu i symbolisiert und wiederum $C_{i \leftarrow j}(H)$ die Übertragungseffekte von i zu j infolge einer gegebenen Verbundenheit zwischen den Gebotszonen zeigt. Werden schließlich alle Gebotszonen ($N = 5$) in die Berechnung einbezogen und deren *Connectedness* über den gesamten Prognosezeitraum mittels des zugrundeliegenden VAR-GVD-Modells ermittelt, ergibt sich nachstehend die gesamte Marktverbundenheit (Total *Connectedness*) C^H :

$$C^H = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N C_{i,j}^H$$

mit C_{ij}^H als einzelne Varianzzerlegungskomponenten des GVD über den Beobachtungszeitraum H . Die vorliegende Studie legt ein Vorhersagezeitfenster (H) von zehn Tagen, ein rollierendes Schätzfenster von 100 Tagen¹⁴ sowie eine Zeitverzögerung (*lag*) von drei Tagen für das verwendete VAR-Modell zugrunde.

Mit der Konzipierung des Datensatzes sowie des Modellansatzes können nun Spillover-Effekte über den gesamten Untersuchungszeitraum analysiert werden. Mit Blick auf die technischen Vorfälle – als unerwartete Ereignisse – werden insbesondere deren Zeitpunkte betrachtet.

Laut *Abbildung 2* treten selbige Ereignisse im gesamten Untersuchungszeitraum am häufigsten (49) im Bundesstaat Victoria auf, während für Tasmanien mit neun Vorfällen die geringste Anzahl festzustellen ist. Darüber hinaus zeigt sich anhand ihrer relativen Häufigkeit¹⁵ (blauer Linienverlauf), dass zwischen den Kalenderjahren keine wesentlichen Abweichungen hinsichtlich der Gesamtanzahl großtechnischer Ausfälle, zu denen Berichte vom AEMO veröffentlicht wurden, bestehen.

11 Vgl. etwa Diebold/Yilmaz, 2014; Apergis et al., 2017 und Antonakakis et al., 2018

12 Vgl. dazu grundlegend Fanone et al., 2013 sowie im Zusammenhang mit dem deutschen Strommarkt Aust/Horsch, 2020

13 Vgl. stellvertretend Uniejewski et al., 2018, die hierbei die Verwendung des natürlichen Logarithmus empfehlen

14 Vgl. etwa Singh et al., 2019

15 Die relative Häufigkeit beschreibt hier das Verhältnis der Anzahl der Tage mit einem unerwarteten technischen Ausfall zur Gesamtanzahl von Tagen im selben Kalenderjahr.

9 Vgl. Ignatieva/Trück, 2016

10 Vgl. einleitend Yoon et al., 2019 und Meus, 2011

Diskussion der Ergebnisse

Für den Untersuchungszeitraum wurde ein mittlerer Marktverbundenheitsindex (Total Connectedness Index) in Höhe von 50,76 ermittelt, so dass im Durchschnitt das Preisniveau in einem Bundesstaat etwa zur Hälfte durch das Preisniveau der anderen Spotmärkte (etwa durch Schocks) beeinflusst wird – und anders herum. Dazu stellt *Abbildung 3* den Indexverlauf dar. Insgesamt ist ein leichter Zuwachs der Marktverbundenheit über den gesamten Zeitraum zu erkennen. Mit Ausnahme von 2018 zeigt sich zudem in jedem Kalenderjahr jeweils ungefähr bis zur Jahresmitte ein Anstieg der Connectedness, worauf ein teilweise starker Rückgang folgt. Darüber hinaus können innerhalb des besagten Zeitraums ein Maximum von 79,90 sowie ein Minimum von 34,27 beobachtet werden.

Die Entwicklung der indexierten Spillover-Effekte für die einzelnen Bundesstaaten wird in *Abbildung 4* dargestellt. Grundsätzlich zeigt sich hierbei ein asymmetrisches Verteilungsmuster über den gesamten NEM: Bestimmte regionale Handelsplätze senden vergleichsweise mehr Volatilitätsschocks (positive Netto-Spillovers) aus, als dass sie welche empfangen; bei anderen Gebotszonen überwiegt die Zahl der empfangenen Schocks (negative Netto-Spillovers) gegenüber der der gesendeten. VIC ist als ein solcher „Netto-Sender“ von Preisschocks einzustufen, da die Kurve überwiegend oberhalb von null verläuft. Zwar weist auch VIC einen insgesamt positiven Wert auf, aber er unterscheidet sich kaum von null (0,125), so dass die Gebotszone als „neutral“ einzustufen ist.¹⁶

Alle anderen Bundesstaaten sind Netto-Empfänger von Preisvolatilitätsschocks, wobei dies in Tasmanien (TAS) und Queensland (QLD) am stärksten ausgeprägt ist. Treten hiernach außergewöhnliche Preisvolatilitäten in VIC auf, werden diese Angebotsschocks im Mittel an die Netto-Empfänger weitergegeben, aber nicht im umgekehrten Fall. Dennoch lässt sich konstatieren, dass die absolute Höhe der Netto-Spillovers von TAS, QLD und SA über den Zeitverlauf gesehen laut *Tabelle 1* insgesamt abnimmt.

Abb. 2: Häufigkeit unerwarteter groß-technischer Ausfälle

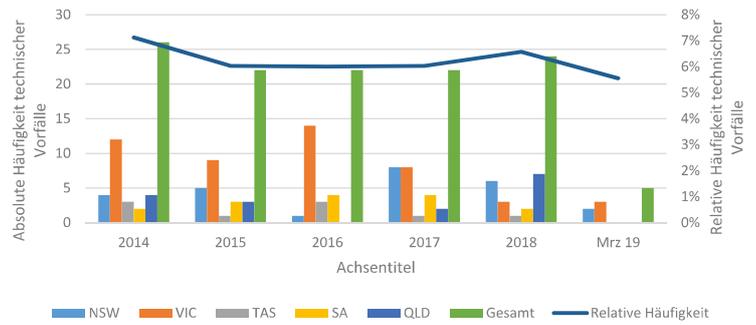


Abb. 3: Marktverbundenheit im NEM

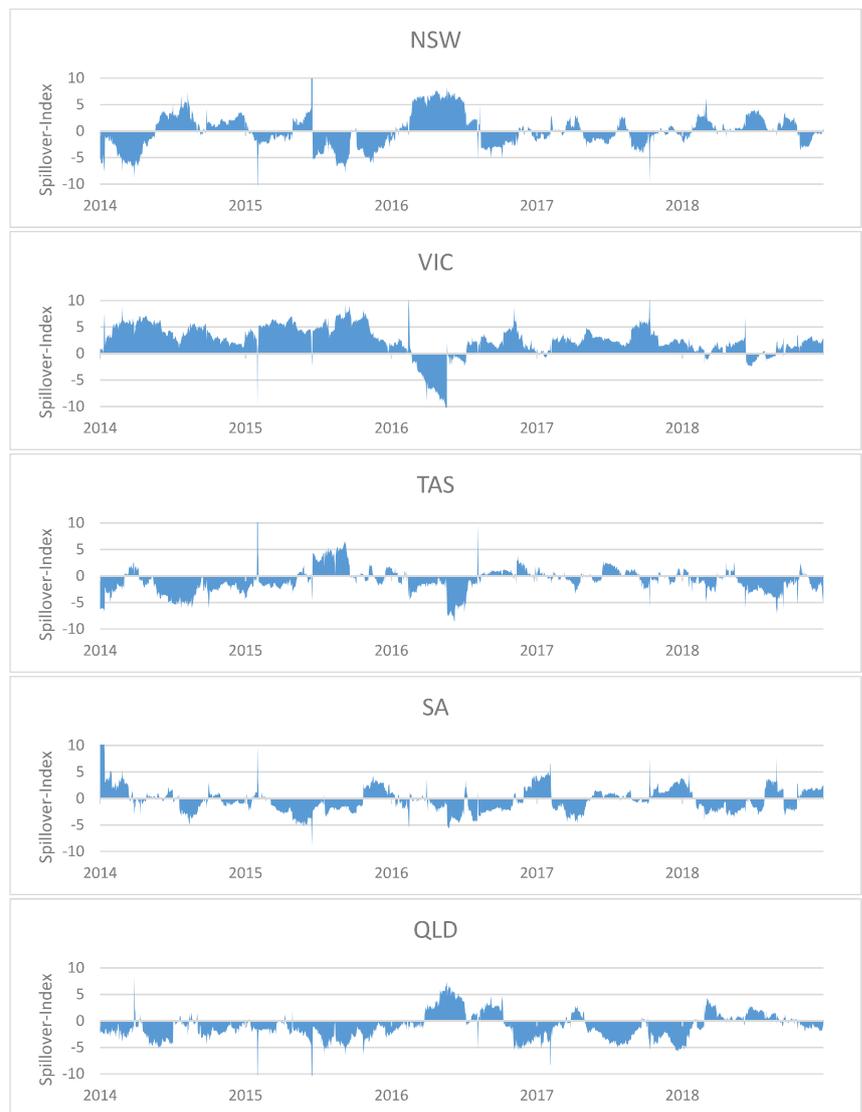
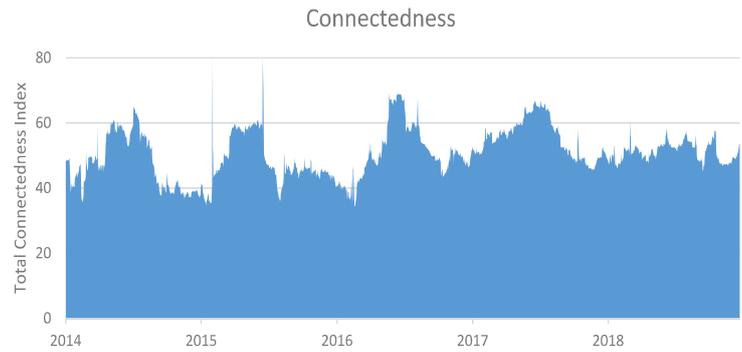


Abb. 4: Gesamtheitliche Netto-Spillover-Effekte

¹⁶ Vgl. ausführlich zur Interpretation der Spillover-Werte Yoon et al., 2019

Tab. 1: Spillover-Effekte infolge von technischen Ausfällen

	NSW	VIC	TAS	SA	QLD
Anzahl technischer Ausfälle	25	43	9	15	14
Spillover-Index (Mittelwert)	0,125	2,477	-0,804	-0,520	-1,277
Spillover-Index bei technischen Ausfällen (Mittelwert)	-0,408	2,946	-0,902	-1,622	-1,693

Nachdem Spillover-Effekte in der Gesamtschau (*Abbildung 4*) betrachtet wurden, geht es nun um die Zeitpunkte, an denen technische Ausfälle auftraten. *Tabelle 1* fasst dazu die Resultate zusammen. Erwartungsgemäß zeigen sich höhere Spillover-Effekte bei unerwarteten technischen Vorfällen als im Mittel über den ganzen Zeitraum. Hierbei lassen sich erneut (arithmetisch gemittelte) positive Spillover-Werte (2,946) für VIC identifizieren. Demnach werden außergewöhnlichen Preisvolatilitäten (infolge technischer Vorfälle) in noch höherem Maße an die anderen Spotmärkte abgegeben. Weiterhin zeigen sich wiederholt negative Spillover-Werte für TAS, SA und QLD, obwohl nicht davon auszugehen war. Zudem sind die negativen Werte für NSW unerwartet, so dass dieser Bundesstaat, gemessen an diesen Ereignissen, von einem „neutralen“ Handelsplatz zu einem Volatilitätsschockempfänger wechselt.

Die geringste Differenz zwischen den Spillovers im gesamten Betrachtungszeitraum und denen während der technischen Vorfälle weist die Gebotszone TAS auf. Insgesamt erfahren Händler in den Gebotszonen SA und QLD die größten Volatilitätsschocks im Rahmen von unerwarteten technischen Ausfällen (durch VIC), so dass sie, sofern möglich, besonders ihre Verkaufstransaktionen im Falle solcher Ereignisse auf den Handelsplatz von VIC verlagern sollten.

Bestehen dagegen keine Ausweichalternativen in andere Gebotszonen oder sehen sich generell (risikoaverse) Stromhändler mit derartigen Unsicherheiten – insbesondere mit Blick auf Extrempreisszenarien – im erhöhten Maße konfrontiert, eröffnen Terminkontrakte in Form von Futures und Optionen an der Australian Securities Exchange (ASX) Möglichkeiten¹⁷ zur Risikotransferierung.

Fazit

Obwohl die Anzahl unerwarteter groß-technischer Ausfälle in den letzten Jahren im Marktgebiet des NEM nahezu gleichgeblieben ist, wurden mit Ausnahme der Jahre 2014 und 2015 vergleichsweise viele Preisspitzen beobachtet. Im Rahmen der Analyse hat sich zunächst gezeigt, dass eine gewisse Marktverbundenheit zwischen den fünf regionalen Spotmärkten des NEM nachgewiesen werden kann und sich zum einen das Niveau der Connectedness auch insgesamt erhöht hat und zum anderen die Marktverbundenheit zumeist über den Jahresverlauf hinweg zu- und abnimmt.

Des Weiteren verdeutlicht die Untersuchung, dass die fünf Gebotszonen zwar stärker als zuvor angenommen miteinander verbunden sind, aber die Übertragungseffekte im gleichen Zeitraum tendenziell gesunken sind. Mit Blick auf die etwa gleichbleibende Häufigkeit unerwarteter technischer Ausfälle bedeutet dies für die Marktakteure, dass sich der Einfluss etwaiger unvorhergesehener Ereignisse vergleichsweise reduzierte.

Des Weiteren zeigt sich, dass ausschließlich dann positive Netto-Spillover-Effekte (im Mittel) identifiziert werden können, wenn sich die technischen Vorfälle in Victoria ereignen. In allen anderen regionalen Spotmärkten führten die untersuchten Ereignisse unerwartet zu negativen Netto-Spillovers. Indes bleibt abzuwarten, ob womöglich eine künftige Zunahme der Marktverbundenheit (erneut) zu höheren Übertragungseffekten zwischen den Gebotszonen führt und schließlich auch die Häufigkeit von Preisspitzen (weiter) zunimmt.

Unabhängig davon bietet die Strombörse für Marktakteure immer beides – Chancen und Risiken.

Literatur

AEMO (2018): Fact Sheet: The National Electricity Market, Melbourne.
 Antonakakis, Nikolaos/Cunado, Juncal/Filis, George/Gabauer, David/Gracia, Fernando P.de (2018): Oil volatility, oil and gas firms and portfolio diversification, in: *Energy Economics* 70, o. Nr., S. 499–515.

Apergis, Nicholas/Barunik, Jozef/Keung Lau, Marco C. (2017): Good volatility, bad volatility: What drives the asymmetric connectedness of Australian electricity markets?, in: *Energy Economics* 66, o. Nr., S. 108–115.
 Aust, Benjamin/Horsch, Andreas (2020): Negative market prices on power exchanges: Evidence and policy implications from Germany, in: *The Electricity Journal* 33, Nr. 3, Artikel 106716.
 Blanchard, Olivier/illing, Gerhard (2017): *Makroökonomie*, 7. Aufl., München.
 Byrnes, Liam/Brown, Colin/Foster, John/Wagner, Liam D. (2013): Australian renewable energy policy: Barriers and challenges, in: *Renewable Energy* 60, o. Nr., S. 711–721.
 Diebold, Francis X./Yilmaz, Kamil (2014): On the network topology of variance decompositions: Measuring the connectedness of financial firms, in: *Journal of Econometrics* 182, Nr. 1, S. 119–134.
 Fanone, Enzo/Gamba, Andrea/Prokopcuk, Marcel (2013): The case of negative day-ahead electricity prices, in: *Energy Economics* 35, o. Nr., S. 22–34.
 Higgs, Helen/Worthington, Andrew (2008): Stochastic price modeling of high volatility, mean-reverting, spike-prone commodities: The Australian wholesale spot electricity market, in: *Energy Economics* 30, o. Nr., S. 3172–3185.
 Ignatieva, Katja/Trück, Stefan (2016): Modeling spot price dependence in Australian electricity markets with applications to risk management, in: *Computers & Operations Research* 66, o. Nr., S. 415–433.
 Mayer, Klaus/Trück, Stefan (2018): Electricity markets around the world, in: *Journal of Commodity Markets* 9, o. Nr., S. 77–100.
 Meeus, Leonardo (2011): Why (and how) to regulate power exchanges in the EU market integration context?, in: *Energy Policy* 39, Nr. 3, S. 1470–1475.
 Ramiah, Vikash/Thomas, Stuart/Heaney, Richard/Mitchell, Heather (2015): Seasonal Aspects of Australian Electricity Market, in: Cheng F. Lee/John C. Lee (Hrsg.) *Handbook of Financial Econometrics and Statistics*, 2. Aufl., New York (NY), S. 935–956.
 Simshauser, Paul (2018): On intermittent renewable generation & the stability of Australia's National Electricity Market, in: *Energy Economics* 72, o. Nr., S. 1–19.
 Singh, Vipul K./Kumar, Pawan/Nishant, Shreyank (2019): Global connectedness of MSCI energy equity indices: A system-wide network approach, in: *Energy Economics* 84, o. Nr., Artikel 104477.
 Tulloch, Daniel J./Diaz-Rainey, Ivan/Premachandra, I. M. (2017): The Impact of Liberalization and Environmental Policy on the Financial Returns of European Energy Utilities, in: *Energy Journal* 38, Nr. 2, S. 77–106.
 Uniejewski, Bartosz/Weron, Rafal/Ziel, Florian (2018): Variance Stabilizing Transformations for Electricity Spot Price Forecasting, in: *IEEE Transactions on Power Systems* 33, Nr. 2, S. 2219–2229.
 Yoon, Seong-Min/Mamun, Md A./Uddin, Gazi S./Kang, Sang H. (2019): Network connectedness and net spillover between financial and commodity markets, in: *The North American Journal of Economics and Finance* 48, o. Nr., S. 801–818.

¹⁷ Einzig für die Gebotszone TAS existieren keine Derivate an der ASX.