

Energiemarkt mit Blockchain-Technologie: Ein Marktmodell unter Berücksichtigung bestehender Netzkomponenten und Marktakteure

Stefan Wunderlich¹, Arne Christian Loose¹, Nikolas Nachtigall¹, Alexander Sandau¹,
Klaus Bruns¹, Jorge Marx Gómez¹

¹Carl von Ossietzky Universität, Wirtschaftsinformatik / VLBA, Oldenburg, Deutschland
{stefan.wunderlich,arne.christian.loose,nikolas.nachtigall,
alexander.sandau,klaus.brun,jorge.marx.gomez}@uol.de

Abstract. Die Energiebranche befindet sich in einem signifikanten Veränderungsprozess. Angesichts des starken Wachstums dezentraler Energieressourcen experimentieren Regierungen, Versorger und weitere Stakeholder mit neuen Lösungen um Effizienz des Elektrizitätsnetzes zu optimieren und einen fortschreitenden Kapazitätsausbau erneuerbarer Energien zu ermöglichen. Nach Jahren, in denen die Energiewende vorrangig mit dem Aufbau erneuerbarer Energie assoziiert wurde, rücken zunehmend systemische Fragen in den Vordergrund, insbesondere zur Integration neuer Marktakteure. Die bestehenden Geschäftsmodelle unterliegen einem grundlegenden Wandlungsprozess, jedoch lassen aktuelle Forschungsarbeiten bestehende Netzkomponenten und Marktakteure unbetrachtet. Die breite Einsatzfähigkeit dieser Ansätze bleibt daher fraglich. Dieser Beitrag präsentiert eine Machbarkeitsstudie eines dezentralen Energiemarktes unter Berücksichtigung des State of the Art des Energieversorgungsnetzes.

Keywords: Blockchain, Energiemarkt, Netzkomponenten, Ethereum

1 Einleitung

Große Veränderungen auf dem Energiemarkt, politische Vorgaben und Ziele im Hinblick auf die Energiewende sowie neue, teilweise bereits ausgereifte Energietechnik führen zu einem Umschwung in der Energiewirtschaft. Die Akteure am Energiemarkt stehen vor der Herausforderung, sich auf die wandelnden dezentralen Erzeugerstrukturen einzustellen und Auswirkungen auf den Energiemarkt der Zukunft abzuschätzen [1]. Die Dezentralisierung des Energiemarktes von wenigen großen Stromerzeugern zu vielen kleinen- und mittelgroßen Erzeugern erfordert eine datenbasierte Umstrukturierung des Energiemanagements. Dies bietet eine Chance durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) effizientere Steuermechanismen zu etablieren und neue Geschäftsmodelle zu erschließen. Die Einführung intelligenter Stromzähler (Smart Meter) wird als Schlüsselfaktor für die Digitalisierung in der Energiewirtschaft angesehen und bietet durch die Lieferung von Echtzeitdaten eine Grundlage für datenbasierte Technologien und Mehrwertdienste. Der heutige Energiehandel erfolgt über

diverse Wertschöpfungsstufen, bei denen der Endkunde einen Energieversorger beauftragt, der wiederum verschiedene Dienstleister (z. B. Makler, Broker) beauftragt, Energie an der Strombörse (z. B. EEX) zu erwerben. Durch den Einsatz der Blockchain-Technologie als Energiehandelsplattform wird ein direkter Energiehandel zwischen den Energiekonsumenten und -produzenten ohne zusätzliche Intermediäre ermöglicht. Eine Disintermediation ist die direkte Folge.

Politisch fokussieren auf internationaler Ebene das Kyoto-Protokoll sowie das Pariser Klimaabkommen die Reduktion von schädlichen Emission und wirken somit als Treiber für die Energiewende [2], [3]. Auf nationaler Ebene legt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) einen richtungsweisenden Rahmen, der zu einer Umstrukturierung des Energiemarktes führt [4]. Neben politischen Regularien sowie dem gesellschaftlichen Drang nach „sauberem Strom“ tritt auch der ökonomische Aspekt stärker in den Vordergrund. Durch effizientere und kostengünstigere Technologien regenerativer Energieanlagen werden finanzielle Anreize geschaffen, in erneuerbare Energien zu investieren oder eigenständig als Marktakteur teilzunehmen.

Das heutige, auf fossil-nuklearer Erzeugung basierende Energiesystem ist ein Auslaufmodell und die Entwicklung des Energiemarktes im Bereich erneuerbarer Energie schreitet rasant voran [5]. In den vergangenen 15 Jahren hat sich der Anteil an erneuerbaren Energien bereits verfünffacht und liegt in Deutschland bei über 30% des gesamten Bruttostromverbrauchs [6].

Die Dezentralisierung des Energiemarktes von wenigen großen Stromerzeugern zu vielen kleinen- und mittelgroßen Erzeugern verlangt nach einer Umstrukturierung des Energiemanagements. Dies bietet eine Chance durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) effizientere Steuermechanismen und neue Geschäftsmodelle zu etablieren [7]. Die Einführung intelligenter Stromzähler (Smart Meter) wird als entscheidendes Kriterium für die Digitalisierung in der Energiewirtschaft angesehen und bietet durch die Lieferung von Echtzeitdaten eine Grundlage für zahlreiche darauf aufbauende Technologien [8-12].

In dem vorliegenden Paper wird erläutert, wie ein Blockchain-Ansatz im dezentralen Energiemarkt eingesetzt werden kann. Der Fokus liegt dabei auf realistischen Marktszenarien, indem aktuelle Marktakteure wie Energieversorger und Netzbetreiber berücksichtigt werden. Nachdem in Kapitel 2 die Ausgangssituation vorgestellt wurde, wird in Kapitel 3 das entwickelte Marktmodell des prognosebasierten Energiehandels erläutert. Dabei werden sowohl Aspekte des Energiemarktes als auch des Energienetzes berücksichtigt. In Kapitel 4 wird die prototypische Umsetzung beschrieben. Schließlich wird die vorliegende Arbeit mit einem Fazit sowie einem Ausblick geschlossen.

2 Ausgangssituation

Der in der Einleitung dargestellte Rahmen wirft relevante Fragestellungen auf und bietet den Forschungskontext zur Umsetzung verschiedener Szenarien auf Grundlage einer Blockchain-Anwendung. Die Verwendung der Blockchain-Technologie stößt im Finanzsektor bereits auf großes Interesse und auch im Energiesektor ergeben sich Potentiale und Einsatzmöglichkeiten [13].

Durch die fortschreitende Entwicklung dezentraler Erzeugerstrukturen und den Einsatz digitaler Messtechnik, ergeben sich für den Energiemarkt Chancen hinsichtlich der

Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. Eine Anpassung an die sich ändernden Umweltbedingungen ist netz- und marktseitig zwingend erforderlich, da elektrische Energie aus regenerativen Energiequellen nicht nach Bedarf gesteuert werden kann. Die zuvor nach Bedarf regelbaren konventionellen bspw. Kohle- oder Gaskraftwerke bieten die Möglichkeit, planbar Energie zu erzeugen und je nach Netzauslastung steuernd eingreifen zu können.

Erneuerbare Energien werden in Deutschland durch die EEG-Umlage weiter gefördert, sodass erneuerbare Energieanlagen weiter ausgebaut werden und die Herausforderungen in der Planungsunsicherheit sowie die Einhaltung der Netzstabilität in Zukunft weiter zunehmen werden [4]. Die Planungsunsicherheit ist auf die erhöhte Anzahl dezentraler Erzeuger zurückzuführen. Die unbekannte Menge an Strom, die in das Netz eingespeist wird, erschwert die Erhaltung der Netzstabilität. Dem Endverbraucher wird kaum die Möglichkeit gegeben, auf die Volatilität erneuerbarer Energien zu reagieren. Durch über Monate und Jahre statisch festgesetzte Preise ist es nicht möglich die Netzauslastung an dynamisch schwankende Energieerzeugung anzupassen. Die sich ändernden Angebots- und Nachfragemengen an elektrischer Energie werden im Energiemarkt demnach unzureichend an die Endverbraucher herangetragen. Dieses Informationsdefizit gilt es zu beseitigen.

Das heutige Energiesystem ist auf zentrale Erzeugungsanlagen ausgerichtet und wird, abgesehen von Großverbrauchern (>100.000 kWh/a) mithilfe von Standardlastprofilen gesteuert. Standardlastprofile sind standardisierte Prognosen über den zukünftigen Lastgang eines Energieverbrauchers [18]. Die prognostizierte Energie wird am Terminmarkt bereits Wochen oder Jahre im Voraus gehandelt. Dazu werden feste Verträge mit Energielieferanten bzw. Aggregatoren vereinbart, die den Energiehandel übernehmen. An Energiebörsen kann weiterhin anhand von Verbrauchsprognosen auf dem Spotmarkt ein Tag sowie auf einem Intraday-Markt bis zu 45 Minuten vor der Energiebereitstellung gehandelt werden [19]. Erneuerbare Energien können auf dem Spotmarkt am vorherigen Tag prognostiziert und entsprechend gehandelt werden.

Der Wandel zu einem dezentralen Energiemarkt bietet Potential für eine Umsetzung durch Blockchain-Technologie, da diese Technologie dezentrale Strukturen und transaktionsbasierte Erlösmodelle abbilden kann. Zahlreiche Start-Ups befassen sich daher mit der Entwicklung von Geschäftsmodellen im Energiesektor in Verbindung mit Blockchain-Technologien [13]. Das *Brooklyn Microgrid* ist ein Beispiel für die isolierte Umsetzung einer Peer-to-Peer Handelsplattform mit dezentral erzeugtem Strom. Das *PowerLedger-Projekt* verfolgt den Vertrieb und die Dokumentation von erneuerbaren Energien in einem offenen Stromnetz [14]. Die Analyse bestehender Projekte in Forschung und Industrie ergab jedoch die Notwendigkeit der Berücksichtigung sowohl der Netzkomponenten, als auch aktueller Marktakteure [15].

Dezentrale Erzeugerstrukturen führen im Rahmen der Energiewende zu neuen Anforderungen und erfordern Anpassungen des markt- und netzseitigen Energiesystems. Fehlende Informationen über exakt prognostizierte Lasten und Energieerzeugung erschweren die Einhaltung der Netzstabilität. Der Blockchain wird Lösungspotential hinsichtlich der neuen Anforderungen im Energiemarkt prophezeit. Die vorliegende Arbeit untersucht folglich, ob dezentraler Energiehandel mithilfe einer Blockchain-Implementierung realisiert werden kann. Dabei steht die Frage im Mittelpunkt, ob die markt- und

netzseitigen Komponenten des Energiemarktes innerhalb einer Blockchain-Anwendung berücksichtigt werden können. Zur Untersuchung der Frage wurde zunächst ein theoretisches Marktmodell entwickelt. Anschließend wurde die technische Machbarkeit auf IKT-Ebene anhand eines Prototyps evaluiert.

3 Prognosebasierter, direkter Energiehandel

Dezentrale Erzeugungsstrukturen führen im Rahmen der Energiewende zu einer Umstrukturierung der Wertschöpfungskette. Die klassischen Marktakteure, insbesondere der Energieversorger, weichen den dezentralen Kleinerzeugern. Gleichzeitig können prognosebasierte Energiehandelsszenarien Indikatoren für die zukünftige Entwicklung des Energiemarktes darstellen. In diesem Abschnitt werden zunächst die Akteure vorgestellt sowie die Relevanz von individuellen Lastprognosen beschrieben. Anschließend wird ein hierauf basierendes Marktmodell vorgestellt. Bisherige blockchainbasierte Energiehandelsansätze betrachten den Energieversorger und Netzbetreiber (sowie deren Wertschöpfung) als Marktakteure bisher nicht.

3.1 Akteure

Die heutige Energiehandelssystematik erfolgt über diverse Intermediäre, bei denen der Endkunde einen Energielieferanten beauftragt, der wiederum verschiedene Dienstleister (z. B. Makler, Broker) beauftragt, Energie an der Strombörse zu erwerben. Durch den Einsatz einer Blockchain als dezentrale Energiehandelsplattform wird direkter Energiehandel zwischen Energiekonsumenten und -produzenten ermöglicht, da die Bilanzierung und Abrechnung der Transaktionen automatisiert werden können und durch dezentrale Sicherheitsmechanismen (insbesondere Proof of Work) auf einen klassischen vertriebsseitigen Energieversorger, der die jährliche Abrechnung für Energiekunden durchführt, verzichtet werden kann [13]. Im Folgenden werden die Marktakteure vorgestellt, die im Marktmodell berücksichtigt werden.

Energiekonsument: Der Marktakteur *Energiekonsument* entnimmt elektrische Energie aus dem Stromnetz. Durch entsprechende Verbrauchsquellen stellt der Energiekonsument eine Netzlast dar. Beispiele für diesen Marktakteur sind private Haushalte, Unternehmen, Energiespeicher oder E-Tankstellen.

Energieproduzent: Der Marktakteur *Energieproduzent* speist Strom in das Netz ein. Mittels Stromerzeugungsanlagen wie Windkraft-, Photovoltaikanlagen oder Biomassekraftwerken produziert der Energieproduzent elektrische Energie, um diese an Energiekonsumenten verkaufen zu können.

Prosumer: Der Marktakteur *Prosumer* ist sowohl Energiekonsument als auch Energieproduzent, der bspw. durch Solaranlagen auf Firmengebäuden oder Privathaushalten elektrische Energie in das Stromnetz einspeist.

Netzbetreiber: Unter dem Marktakteur *Netzbetreiber* werden die bestehenden Akteure Übertragungsnetzbetreiber und Verteilnetzbetreiber zusammengefasst. Der Netzbetreiber stellt mit dem Stromnetz die Infrastruktur bereit und ist zuständig für Frequenzstabilität, Spannungsstabilität und Versorgungszuverlässigkeit.

Versicherer: Der Marktakteur *Versicherer* tritt nach Bedarf als Energiekonsument oder Energieproduzent auf, um ein Gleichgewicht zwischen Einspeisungen und Entnahmen zu gewährleisten. Dieser muss flexible Reserven (Regelleistung, Sekundärleistung, Minutenreserve, etc.) elektrischer Energie vorhalten und auch als Netzlast (Energiekonsument) agieren können. Der Versicherer tritt nur im unperfekten Markt (Angebot und Nachfrage gleichen sich nicht exakt aus) auf, um Abweichungen der Prognosen oder unausgeglichenem Handel entgegenzuwirken.

3.2 Notwendigkeit von Energieverbrauchs- und Erzeugungsprognosen

Der heutige Energiemarkt basiert auf der Nutzung von aggregierten Standardlastprofilen für Privathaushalte. Sämtliche Verbraucher, die weniger als 100.000 kWh/a Strom verbrauchen, werden mittels dieser aggregierten Profile zusammengefasst [18]. Aus dieser Aggregation resultiert eine Planungsunsicherheit bezüglich der Netzauslastung und des Börsenhandels für Energieunternehmen. Höhere Planungssicherheit lässt sich nur durch eine feinere Granularität der Datengrundlage über den Konsum bzw. die Produktion der Energie erzielen. Infolge der fortschreitenden Verbreitung digitaler Stromzähler können detaillierte Verbrauchs- und Produktionsdaten einzelner Haushalte in Echtzeit erhoben werden. Mithilfe von Machine Learning-Ansätzen (v.a. Regressionsanalysen) lassen sich anhand dieser Datengrundlage individuelle Lastprofile für einzelne Haushalte und Unternehmen erstellen [16].

Das nachfolgend erläuterte Marktmodell setzt das Vorliegen von individuellen Lastprofilen voraus. Dies ist notwendig, da Strom basierend auf Verbrauchs- und Erzeugungsprognosen einzelner Marktakteure gehandelt wird. Neben höherer Planungssicherheit des Netzbetreibers können individuelle Lastprofile gehandelt werden. Das heißt, dass zu Konsum-Lastprofilen Produktionsprofile erworben werden können. Innerhalb dezentraler Erzeugerstrukturen können so einzelne Konsumenten und Erzeuger zusammengebracht werden und direkt untereinander handeln. Exakte Prognosen setzen hochwertige Datenbestände voraus. Aktuelle Forschungen zeigen, dass hinreichend granulare Datenbestände mit digitalen Stromzählern gewonnen werden können, digitale Zähler teilweise jedoch noch fehlerhafte Werte liefern [17]. Aus feingranularen, qualitativ hochwertigen Prognosen folgen für die Anwender niedrige Pönalzahlungen und für den Netzbetreiber eine effizientere Netzplanung, da die erforderliche Ausgleichsenergie minimiert wird. Ausgleichsenergie oder Regelenergie wird dann produziert, wenn weniger Strom verbraucht, als prognostiziert wurde [18]. Im Energiesektor wird ein Lastprofil eines Tages in 96 Gültigkeitszeiträumen à 15 Minuten unterteilt. Diese Zeitreihe bildet die Grundlage des blockchainbasierten Ansatzes. Die einzelnen 15-Minuten-Intervalle werden nachfolgend als *Pakete* bezeichnet und enthalten neben einer fortlaufenden Nummer für den jeweiligen Zeitpunkt (0-95) auch die Menge an Strom, die in diesem Zeitraum verbraucht, produziert, aber auch prognostiziert wurde, sowie die scharfe Zuordnung des jeweiligen Marktakteures. Beispielsweise entspricht das Paket mit der Nummer 0 dem Zeitraum 00:00-00:15 Uhr. Innerhalb des Marktmodells sind drei Gruppierungen der Prognosen relevant: der jeweilige Energieverbrauch, die Energieproduktion und die zugrundeliegende Netzauslastung.

Durch die Berücksichtigung der Netzauslastung in diesem Energiehandelsmodell werden Steuerungsmechanismen erzielt, die zur Vermeidung von möglichen Engpässen beitragen. Der Netzbetreiber veröffentlicht hierbei täglich die Auslastung der jeweiligen Trasse und kann unterschiedliche Preise für die Netznutzung bestimmen. Bei hoher Netzauslastung folgt ein dementsprechend höheres Netzentgelt. Ebenso können bspw. negative Netzkosten bei niedriger Netzauslastung veranlasst werden. Der Netzbetreiber „entlohnt“ den Konsumenten de facto für das Einschalten von elektronischen Geräten. Durch den Handelsmechanismus kann der Stromverkehr passiv kontrolliert werden, da neben dem Strompreis auch der Netzpreis Berücksichtigung findet.

3.3 Marktmodell des dezentralen, direkten Energiehandels

Neben der erläuterten Notwendigkeit von Prognosen sind sogenannte Pönalen von besonderer Relevanz. Pönalen sind Vertragsstrafen und wirken sich in diesem Modell durch Gebühren für falsch prognostizierte Verbrauchs- und Produktionsmengen aus. Der Energiehandel erfolgt *ex ante* und wird täglich abgerechnet. So wird eine feingranulare Strompreiskontrolle und hohe Transparenz erzielt. Der Ablauf des Handelsprozesses wird in Abbildung 1 dargestellt. Dabei werden die Aktionen der einzelnen Akteure auf einer Zeitachse abgebildet. Dieser Abschnitt befasst sich zunächst ausschließlich mit der marktseitigen Konzeption. Die technische Umsetzung wird in Kapitel 4 erläutert.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, unterteilt sich der prognosebasierte Energiehandel in drei logisch voneinander abgegrenzte Phasen. Die Phase *Prognose veröffentlichen* repräsentiert das Handelsfenster, welches vor dem Handelstag stattfindet. Hier werden Netzbetreiber, Konsumenten und Produzenten aktiv und veröffentlichen ihre Prognosen über Verbrauch und Produktion für die 96 Viertelstundenintervalle (insgesamt 24 Stunden). Der Zeitpunkt t bis $t+1$ beinhaltet die Erfassung der *Realdaten*. Hierbei wird über den digitalen Stromzähler die Menge an produziertem und konsumiertem Strom über eine Schnittstelle ausgelesen und in der Blockchain dokumentiert. Abschließend findet die Phase der *Abrechnung* statt. Diese Phase beginnt nach der Erfassung des 96. Strompaketes (23:45 – 00:00). Abschließend wird die Bilanzierung der Realwerte und der prognostizierten Werte durchgeführt.

Die Prognosen der jeweiligen Akteure werden in sogenannte Smart Contracts geschrieben. Dies sind kleine Programme, die eigenständig auf Programmierlogik basierende Transaktionen auf Blockchains durchführen können. Der Netzbetreiber veröffentlicht eine Prognose über die Netzauslastung des Handelstages. Das Netz wird hierbei in verschiedene Regionen (Minigrids) unterteilt. Die Prognose beinhaltet die Angabe des jeweiligen Minigrids und eine Angabe zur Netzauslastung des jeweiligen Zeitpunktes. Der Produzent veröffentlicht ebenfalls die prognostizierte Energieproduktion des Handelstages. Der Produzent definiert zudem die Höhe des Kaufpreises der produzierten Energie. Das Netz wird hierbei in verschiedene Regionen (Minigrids) unterteilt. Die Prognose beinhaltet die Angabe des jeweiligen Minigrids und eine Angabe zur Netzauslastung des jeweiligen Zeitpunktes. Der Produzent veröffentlicht ebenfalls die prognostizierte Energieproduktion des Handelstages. Der Konsument definiert seine Handelsstrategie und veröffentlicht seinen Strombedarf für den kommenden Handelstag in der Blockchain. Der implementierte Handelsmechanismus stellt sicher, dass der Bedarf gedeckt wird. Dabei werden Präferenzen des Konsumenten (Einschränkungen

wie z.B. Preis oder Herkunft) berücksichtigt. Der Einkaufspreis setzt sich aus dem Verkaufspreis der Produzenten und der konsumentspezifischen Netzkosten zusammen. Der Handel kann also zwischen einem Konsumenten und mehreren Produzenten stattfinden (1:n-Beziehung). So wird sichergestellt, dass der Bedarf auch durch verschiedene Produzenten parallel gedeckt werden kann. Um finanzielle Sicherheit zu gewährleisten, bezahlt der Konsument den benötigten Strom unmittelbar mit der zugehörigen Währung des verwendeten Blockchain-Ökosystems, im vorliegenden Beitrag wurde *Ethereum* eingesetzt, da Ethereum zum Zeitpunkt der Entwicklung des Prototyps, das am weitesten entwickelte Blockchain-Ökosystem mit Unterstützung intelligenter Verträge (Smart Contracts) war.

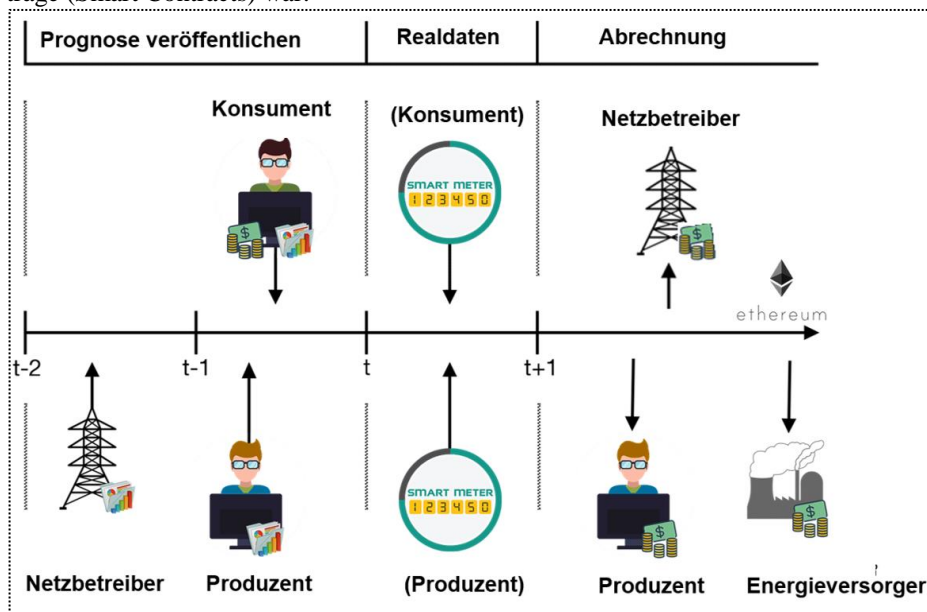


Abbildung 1: Prognosebasierter Energiehandel

Während der Phase *Realdaten* werden durch den digitalen Stromzähler die Daten über Produktion bzw. Verbrauch erhoben. Durch eine optische Schnittstelle werden diese ausgelesen und der Blockchain-Anwendung zur Verfügung gestellt. Nach dem letzten Zeitfenster (oder der Auslieferung des letzten Pakets) werden diese in der Blockchain dokumentiert, sodass die Abrechnung mithilfe eines Soll-Ist-Vergleichs (Bilanzierung) realisiert wird. Die Abrechnung wird vom Smart Contract nach Erfassung der Realdaten implementiert. Ergeben sich Differenzen, so kommt es zu Pönalzahlungen. Die Höhe der jeweiligen Zahlungen ist ein Marktmechanismus und kann an dieser Stelle noch nicht abgeschätzt werden. Ebenso wird durch den Smart Contract der Netzbetreiber gemäß seiner Leistung entlohnt. Die Besonderheit des Marktmodells stellt die Position des Energieversorgers als *Versicherer* dar. Eine exakte Übereinstimmung der Prognose und der Realdaten ist unmöglich zu erzielen, daher müssen Differenzen ausgeglichen werden. Weiterhin ist eine Umstellung zu einem Peer-to-Peer Handelsmarkt ein langfristiger Prozess und dementsprechend weiterhin auf den Energieversorger an-

gewiesen. Eine kurzfristige Umstellung erscheint aufgrund der aktuellen Marktdurchdringung der Energieversorger als sehr unrealistisch. Die Steuerungseffekte, die durch dieses Marktdesign erzielt werden, beziehen sich auf die Entlastung des Netzbetreibers durch die Minimierung von Netzengpässen. Ebenso werden durch die Angabe der Regionen der Akteure lange Transportstrecken vermieden, da diese mit hohen Netzkosten bepreist werden. Außerdem kann das Verbrauchsverhalten der Konsumenten beeinflusst werden, da eine Einhaltung der Prognose von wirtschaftlichem Interesse ist, weil Pönalzahlungen vermieden werden können.

4 Prototypische Implementierung

Die Möglichkeit, das dargestellte Marktmodell in der Blockchain abbilden zu können, ist für die irreversible Sicherung der dem Energiehandel zugrundeliegenden Daten (Prognosen, tatsächliche Verbrauchs/Erzeugungsdaten, Preise) essentiell. Für die prototypische Umsetzung wurde eine Ethereum-Blockchain verwendet. Diese basiert auf der zweiten Generation der Blockchain-Technologie, die neben reinen Währungstransaktionen auch das Bereitstellen von dezentralen Applikationen (Smart Contracts) ermöglicht [13].

Hardware: Um Energiehandel mit mehreren Marktakteuren über die Blockchain realitätsnah zu simulieren wurde als Test- und Entwicklungsumgebung auf fünf Raspberry Pi Einplatinencomputern (Pi) der dritten Modellreihe zurückgegriffen. Diese verfügen über ausreichend Rechen- und Speicherkapazität sowie notwendiger Schnittstellen für die prototypische Anwendung. Durch die geringen Kosten und gute Verfügbarkeit der Hardware ist zudem eine einfache Reproduktion der Ergebnisse sichergestellt. Die Pis wurden in einem abgeschlossenen, gemeinsamen Netzwerk als eigenständige Topologie konfiguriert, um die Kommunikation zwischen den einzelnen Geräten zu ermöglichen.

Software: Als Grundlage für die Softwarearchitektur kommen ausschließlich kostenfreie, frei verfügbare Komponenten zum Einsatz. So wird als Betriebssystem auf den einzelnen Pis raspbian verwendet. Zusätzlich wurde ganglia zur zentralen Überwachung wichtiger Systemparameter wie CPU-, RAM- und Netzwerkauslastung eingesetzt. Im Rahmen der Anwendungsentwicklung unter den fünf Pis wurde eine private Blockchain mit Hilfe des Parity-Ethereum-Clients aufgesetzt. Durch die Verwendung einer privaten Blockchain wurde die Grundlage für die Entwicklungsumgebung geschaffen, die im Vergleich zu einer öffentlichen Blockchain keine realen Kosten für Transaktionen verursacht. Ein Pi samt Parity-Client stellt hierbei eine sog. Node dar, sichert stetig eine Kopie der gesamten privaten Blockchain und ermöglicht die Interaktion mit dieser. Die prototypische Anwendung selbst (siehe Abbildung 2) wurde unter NodeJS realisiert.

Die prototypische Applikation lässt sich in zwei Teile unterteilen: Einer clientseitigen NodeJS-Anwendung, die auf den Pis installiert ist und einem Smart Contract, der in der Blockchain hinterlegt ist und somit gemeinsam von allen Teilnehmern genutzt wird. Dabei ermöglicht die clientseitig ausgeführte Applikation unterschiedliche Konfigurationen um die Handlungen eines Käufers, Verkäufers oder Netzbetreibers simulieren zu können. Das Architekturmodell ist in Abbildung 2 dargestellt.

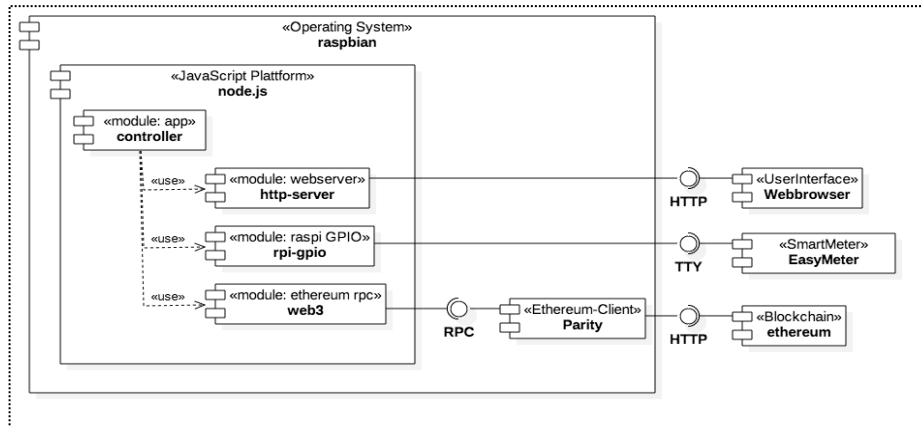


Abbildung 2: Architekturmodelle / Komponentendiagramm der Anwendung

Der Controller dient als Steuereinheit der einzelnen Module. Seine Aufgabe ist es, Daten automatisiert zu verarbeiten und so – je nach Anwendungsszenario – bspw. Prognosen in die Blockchain zu schreiben, automatisch eine Liste von präferierten Verkäufern zu erstellen um anschließend die notwendigen Transaktionen zu tätigen. Je nach Konfiguration kann er als Käufer, Verkäufer, Prosumer oder Netzbetreiber agieren. Der Energiehandel und die Interaktion mit der Blockchain wird also autonom, gemäß parametrisierter Constraints, durchgeführt.

Die Bereitstellung eines Webservice über das Standardmodul http-server ermöglicht dem Anwender mit dem Webbrowser auf die Applikation zuzugreifen. Über eine grafische Oberfläche werden alle relevanten Informationen wie Verbrauchs-, Produktions- und Handelsdaten angezeigt. Ferner lässt sich die Applikation über das Webinterface parametrisieren, um etwa Einschränkungen oder Prognosezahlen zum Energiehandel zu pflegen und so selbst aktiv in den Energiehandel einzugreifen. Über das Modul rpi-gpio wird auf die serielle Schnittstelle des Pi zugegriffen und so aktuelle Verbrauchs- und Erzeugungswerte vom Smart Meter in digitalisierter Form zur Verfügung gestellt. Diese werden in Folge automatisiert in die Blockchain geschrieben bzw. auf dem Web-Interface angezeigt.

Die Verbindung zur Blockchain wird über das Modul web3 realisiert – es kommuniziert über eine standardisierte JSON-RPC-Schnittstelle mit dem Parity-Client. Hierdurch ist es möglich, auch andere Ethereum-Clients als Parity anzubinden. Durch den modularen Aufbau der gesamten Applikation könnte an dieser Stelle auch ein Modul zum Zugriff auf andere/zukünftige Blockchain-Implementierungen eingesetzt werden.

Der in der Blockchain gespeicherte Smart Contract muss in der von Ethereum eigens entwickelten Sprache Solidity implementiert werden. Er umfasst alle für die prototypische Anwendung notwendigen Funktionen um die Daten, die von allen Teilnehmern des Marktes benötigt werden, zu verwalten. Der Smart Contract dient zusätzlich auch als Treuhänder – sämtliche Zahlungen werden zunächst hier hinterlegt und erst im Zuge der Abrechnung an die entsprechenden Parteien freigegeben.

Der Ablauf des Erstellens eines Insetrates auf der Blockchain ist wie folgt. So werden dem Smart Contract Daten zur eindeutigen Identifizierung des jeweiligen Verkäufers, der prognostizierten Menge und Preises pro Watt/h übermittelt. Zusätzlich wird

der 15-minütige Zeitraum, in dem die angegebene Menge produziert werden soll über das Tripel *VerkäuferID*, *Produktionsmenge* und *Viertelstundenwert* definiert und im dreidimensionalen Array hinterlegt. Entsprechende Funktionen sind auch für das Hinterlegen der Netzkosten, das Handeln und das Abrufen der genannten Daten implementiert. Ferner wurden Fallback-Mechanismen für den Fall der Abweichung von Prognose und Ist-Wert implementiert.

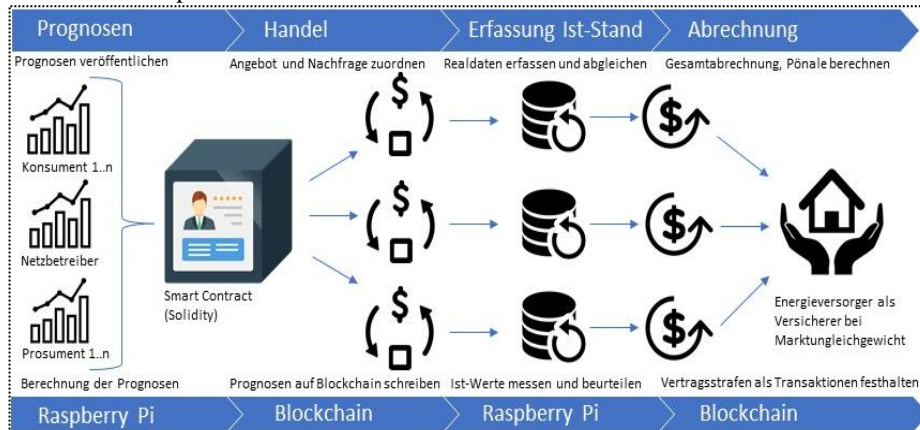


Abbildung 3: Phasen, Prozess und beteiligte Hardware eines Handelstages, die Berechnungsgrundlage für Prognosen liefert der Smart Meter (hier nicht mitmodelliert)

Eine bedeutende Einschränkung bei der Implementierung mittels Solidity ist, dass ausschließlich primitive Datentypen beim Aufruf von Funktionen im Smart Contract verwendet werden können. So muss ein Anbieter zum Abspeichern der Prognosen für einen Tag im dargestellten Fall 96 rechen-, zeit- und kostenintensive Transaktionen durchführen (um 96 Integer-Werte abzulegen). Gleiches gilt für die Käufer-Seite: Es ist nicht möglich, eine Liste oder ein Array aller Anbieter zu einem definierten Zeitraum (Tag/Paketnummer) abzufragen. Auf Clientseite muss hierzu erst über alle Transaktionen der Blockchain iteriert werden. In Solidity gibt es zwar sog. *Events*, die aufgerufen werden können, sobald eine bestimmte Funktion in einem Smart Contract ausgeführt wird. Auch lässt sich mit einer gefilterten Abfrage aller Events zur Funktion Ergebnismenge einschränken. Die genannten Vorgehensweisen stellen aber im Vergleich zur Arbeitsweise herkömmlicher Datenbanken allenfalls *Workarounds* dar. Es lässt sich somit feststellen, dass Möglichkeiten zur effizienten Datenverarbeitung in Solidity faktisch nicht gegeben sind. Der Prototyp zeigte somit eindeutig Performanzprobleme bei Hochskalierung der Teilnehmer. Folglich müssen Teile der Anwendung (insbesondere Zuordnung von Angebot und Nachfrage stellen ein sehr aufwändiges kombinatorisches Problem dar) künftig aus dem hier vorliegenden Prototyp ausgelagert werden.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Papers wurde ein dezentrales Marktmodell sowie eine prototypische Machbarkeitsstudie auf Basis einer Blockchain-Anwendung vorgestellt. Dezentraler Energiehandel kann mithilfe einer Blockchain-Implementierung realisiert

werden. Ebenso konnte die marktseitige Komponente durch den Handel zwischen Energieproduzenten und Energiekonsumenten abgebildet werden und die netzseitige Komponente durch Einbindung der Prognosen der Netzauslastung betrachtet werden.

Das Marktmodell basiert auf kurzfristigen Verbrauchs- und Konsumprognosen und ist bewusst an den bestehenden Energiemarkt angelehnt, da beide Energiesysteme mittelfristig parallel existieren müssen. Daher baut der dezentrale Energiehandel auf bestehenden Strukturen auf und einer Koexistenz mit dem derzeit praktizierten State of the Art steht grundsätzlich nichts im Wege. Aus diesem Modell erschließt sich jedoch der Wandel des klassischen Intermediäres vom Energieversorger zum Versicherer. Konsumenten, Produzenten und Prosumer nehmen aktiv am Energiehandel teil, ohne den klassischen Energieversorger damit zu beauftragen. Angebot und Nachfrage werden stark liberalisiert und deutlich transparenter, als im aktuellen Energiesystem.

Dezentraler Energiehandel über die Blockchain führt zu verschiedenen Vorteilen, so entstehen Steuerungseffekte durch die Berücksichtigung der Netzkosten während des Energiehandels. Hierbei kann das Konsumverhalten durch Preismechanismen beeinflusst werden. Das vorgestellte Marktdesign kann dazu beitragen, dass sich Konsumenten verstärkt netzdienlich verhalten. Die beschriebene Systemarchitektur ermöglicht zudem einen hohen Automatisierungsgrad, da der Energiehandel durch die individuell konfigurierbare Applikation abgewickelt wird, ohne dass tiefgreifende Eingriffe des Anwenders erforderlich werden. Weiterhin hat die Verwendung eines Blockchain-Ansatzes den positiven Effekt, dass Transaktionen prinzipbedingt manipulationssicher dokumentiert werden und gleichzeitig jederzeit transparent und nachprüfbar bleiben.

Durch die anschließende Konzeption und Anwendungsentwicklung wurden wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die zum vorgestellten Energiehandelssystem führten. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit auf IKT-Ebene wurde dabei gezeigt. Jedoch wurde festgestellt, dass ausschließlich auf Blockchain basierende Ansätze aus Performanzgründen in dieser Form zum jetzigen Zeitpunkt nicht in der Breite eingesetzt werden können. Dies liegt insbesondere an der Ineffizienz der Verifikationsprozesse (Proof of Work) und der Sicherheitsmechanismen der Blockchain-Datenstruktur, bei der Daten, seien dies nun Prognosen oder monetäre Transaktionen, lediglich immer nur an das Ende angehängt werden können (append only). Auch zeigte sich, dass die Möglichkeiten zur Datenverarbeitung stark limitiert bleiben. Somit ist es sehr unwahrscheinlich, dass Anwendungen, die ausschließlich auf Blockchain zur Datenhaltung und -verarbeitung basieren, den dezentralen Energiemarkt beflügeln werden. Vielmehr wird eine weitere Verarbeitungsschicht implementiert werden müssen, die die individuellen Prognosen miteinander verknüpft, also die Rolle eines Brokers einnimmt. Als Alternative kommen natürlich auch Weiterentwicklungen im Bereich der Blockchain-Technologie infrage, bei der die Datenverarbeitungsgeschwindigkeit und die Verifikationsmechanismen deutlich effizienter gestaltet werden müssen.

Um das tatsächliche Potential abschließend beurteilen zu können, muss die Blockchain-Technologie einen ausreichenden Reifegrad erlangen. Des Weiteren müssen wichtige Kriterien wie die Skalierbarkeit sowie weiterführende Sicherheitsaspekte hinsichtlich der Software als auch der Hardware erforscht werden. Hierbei sind u.a. Maßnahmen festzulegen, wie bei einem Hardwareausfall oder bei Verlust des Blockchain-Nutzerkontos (privater Schlüssel, öffentlicher Schlüssel) verfahren wird. Darüber hinaus sind viele (datenschutz-)rechtliche Fragen ungelöst, die insbesondere durch die ab 2018 geltende EU-Datenschutzgrundverordnung [20] nochmals verschärft werden.

References

1. Hecker, W.: Wandel antizipieren–Zukunft gestalten. In: Zukunftsorientierte Unternehmenssteuerung in der Energiewirtschaft. Springer Fachmedien Wiesbaden. 3-39 (2015)
2. Protocol, Kyoto. United Nations framework convention on climate change. Kyoto Protocol, Kyoto, 19. Jg. (1997)
3. Dröge, S.: Das Pariser Abkommen 2015: Weichenstellung für das Klimaregime. (2015)
4. Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S.1066), Berlin (2014)
5. Wirth, H., Schneider, K.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE (2012)
6. Energiebilanzen EV, Arbeitsgemeinschaft. Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Berlin (2015)
7. Aichele, C. und Dolseski, O. D. (Hg.). Smart Market: vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt. Springer-Verlag (2014)
8. Krickel, F.: Digitalisierung in der Energiewirtschaft. In: Zukunftsorientierte Unternehmenssteuerung in der Energiewirtschaft. Springer Fachmedien. 41-73. Wiesbaden (2015)
9. Brakhage, J., Hollerbach, K.: Die „smarte“ Revolution der Energiemärkte. In: Zukunftsorientierte Unternehmenssteuerung in der Energiewirtschaft. Springer Fachmedien. 75-96. Wiesbaden (2015)
10. Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2009/72/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009, Brüssel (2009)
11. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland. Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), Artikel 6 des Gesetzes vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258), Berlin (2016)
12. Ernst & Young. Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler. Technical report, Ernst & Young GmbH, London (2013)
13. PriceWaterhouseCoopers, Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.: Blockchain – Chance für Energieverbraucher? PWC, Frankfurt am Main (2016)
14. PowerLedger: PowerLedger Project, <https://powerledger.io> (Abgerufen am: 22.09.2017)
15. Hagström, L., Dahlquist, O.: Scaling blockchain for the energy sector, University of Uppsala, Uppsala (2017)
16. Martin, W.: Predictive Analytics –Von Big Data zu Smart Customer Data. In: isreport – Informationsplattform für Business Solutions –Business Guide CRM & ERP 2015, 8-11 (2015)
17. Brignal, M.: Smart meters: an energy-saving revolution or just plain dumb?, Guardian, <https://www.theguardian.com/money/2016/oct/01/smart-meter-energy-saving-revolution-cut-bills-gas-electricity> (2016) (Zugriff am 28.09.2017)
18. Müller-Kirchenbauer, J. und Zenke, I.: Wettbewerbsmarkt für Regel-und Ausgleichsenergie, In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 51(11), 696 -702, Essen (2001)
19. EPEXSPOT: Intraday-Markt mit Lieferung in einer der deutschen Regelzonen, <https://www.epexspot.com/de/produkte/intradaycontinuous/deutschland> (2017) (Abgerufen am 28.09.2017)
20. Bundesministerium des Innern: Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung des Datenschutzrechts an die Verordnung (EU) 2016/679 (Datenschutz-Grundverordnung) und zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2016/680 (Datenschutz-Anpassungs- und -Umsetzungsgesetz EU – DSAnpUG-EU). Berlin (2016)