

Effiziente Lösungen für Photovoltaik- Energiemanagement basierend auf Blockchain-Technologie

SonnWende+

M. Stefan, R. Hemm, R. Graf,
P. Zehetbauer, T. Tötzer, R. Schmidt,
M. Niederkofler, T. Zeinzinger,
M. Holzleitner, A. Veseli

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

13/2022

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Effiziente Lösungen für Photovoltaik- Energiemanagement basierend auf Blockchain-Technologie

SonnWende+

DI Dr. Mark Stefan, DI Regina Hemm, Dr. Roman Graf,
Paul Zehetbauer MSc., DI Dr. Tanja Tötzer, Dr.-Ing. Ralf-Roman Schmidt
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DI Michael Niederkofler
Energie Kompass GmbH

DI Thomas Zeinzinger
lab10 collective eG

Mag. Marie-Theres Holzleitner, Mag. Argjenta Veseli
Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

Wien, Mai 2020

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Abstract	11
1 Ausgangslage	13
2 Projektinhalt	16
2.1. Automatisierte Lösungen für Energiemanagement-Services.....	16
2.1.1. Lending-based Crowdfunding.....	17
2.1.2. Energie-Konto für Teilnehmer:innen von Energiegemeinschaften.....	22
2.1.3. Interaktionsloses Laden von Elektrofahrzeugen	23
2.1.4. Peer-to-Peer-Energiehandel.....	24
2.1.5. Modellierung möglicher Blockchain-Anwendungen für Energiegemeinschaften	29
2.2. Co-Creation-Prozesse	35
3 Ergebnisse.....	37
3.1. Blockchain.....	37
3.1.1. Blockchain-Systeme im Energiesektor	38
3.1.2. Honey Badger – Ein effizienter BFT-Konsensus-Algorithmus.....	40
3.1.3. Honey Badger BFT – Performance Tests	43
3.1.4. Zusammenfassung.....	46
3.1.5. Rechtliche Analyse zur Blockchain-Technologie	46
3.2. Anwendungsfälle	47
3.2.1. Lending-based Crowdfunding.....	47
3.2.2. Energie-Konto für Teilnehmer:innen von Energiegemeinschaften.....	53
3.2.3. Interaktionsloses Laden von Elektrofahrzeugen	54
3.2.4. Peer-to-Peer-Energiehandel.....	55
3.2.5. Modellierung möglicher Blockchain-Anwendungen für Energiegemeinschaften	57
3.3. Co-Creation Workshops	58
3.4. Relevanz in Bezug auf die Ausschreibung	60
4 Schlussfolgerungen.....	61
5 Ausblick und Empfehlungen.....	63
6 Verzeichnisse.....	64
6.1. Abbildungsverzeichnis.....	64
6.2. Tabellenverzeichnis	65

6.3.	Literaturverzeichnis	66
7	Anhang.....	68
7.1.	Fragebogen (Stakeholder-Befragung)	68
7.2.	Rechtsanalyse.....	73

Kurzfassung

Motivation

Die Blockchain-Technologie wurde mit dem Bitcoin im Jahr 2008 erstmals in einem verteilten, offenen Servernetzwerk zum Werttransfer eingesetzt und viele Jahre nur von wenigen Insidern in ihrem Potential erkannt. Spätestens seitdem Ethereum (2013) als neue Blockchain-Plattform beschrieben wurde, ist in vielen Fachkreisen klar, dass diese neue Technologie nicht nur das Finanzsystem substanziell verändern, sondern für alle wirtschaftlichen und organisatorischen Strukturen gravierende Veränderungen bringen wird. Im Vergleich zum Stand der Technik im Bereich klassischer IT-Anwendungen ermöglicht die Blockchain-Technologie eine schnelle, sichere Verrechnung von bezogener und bereitgestellter Leistung zwischen Maschinen mit der Möglichkeit zur kompletten Automatisierung ohne weitere Schnittstellen. Damit ergibt sich ein riesiges Potenzial, Energiemanagement und -handel effizienter und dezentraler zu gestalten.

Ausgangssituation

Der Eigenverbrauch von Photovoltaik ist durch die in den letzten Jahren stark gesunkenen Systemkosten von Photovoltaik und entsprechenden Fördersystemen für viele Endkund:innen interessant geworden. Um den möglichen Eigenverbrauch zu steigern bzw. zu optimieren, ist ein Trend hin zur Installation von PV-Speichersystemen und der Nutzung flexibler Verbraucher erkennbar. Zu den flexiblen Verbrauchern mit dem höchsten Potenzial zählen Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Heizstäbe zur Warmwasseraufbereitung. Elektromobilität ist in zwei Bereichen ein wichtiger Baustein für die Energiewende: einerseits wird direkt der Verbrauch fossiler Energieträger reduziert, andererseits stellen die Batterien der Fahrzeuge die für ein auf erneuerbaren Energieträgern basierendes Stromnetz notwendigen Flexibilitäten zur Verfügung. Wärmepumpen in Kombination mit PV-Anlagen können positive Synergieeffekten auslösen, da lokal produzierter Strom direkt in der Wärmepumpe verbraucht werden kann. Ein maximaler Eigenverbrauch kann erreicht werden, wenn die Heizzeiten an das PV-Ertragsprofil mit Hilfe lokaler Flexibilitäten angepasst werden können. Die Nutzung der Energie aus gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen könnte durch private Verträge geregelt werden. Dies ist ein Anwendungsfeld für Blockchain-Technologie. Durch die Installation von Smart Metern können die notwendigen Daten vom Netzbetreiber ausgewertet und eine virtuelle Verrechnung der Gemeinschaftsanlage an mehrere Kund:innen mit fixen Anteilen durchgeführt werden.

Projektziel

Das Projekt *SonnWende+* analysierte die Blockchain-Technologie im Kontext erneuerbarer elektrischer Strom-Einspeisung und Flexibilität im Innovationslabor act4.energy im Südburgenland als Enabler für zukünftige innovative Service-Konzepte. Ziel war die Erforschung neuer und effizienter Service-Konzepte und zugrundeliegender Technologien für Energiemanagement und Energiehandel.

Methodische Vorgehensweise

Innovative Methoden für die Maximierung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs auf Gebäudeebene sowie innerhalb von Energiegemeinschaften, Blockchain-basierte Abrechnung von vollautomatischen Ladevorgängen für Elektrofahrzeuge sowie Lending-based Crowdfunding-Modelle wurden dabei konzipiert, entwickelt und validiert. Durch Co-Creation-Prozesse mit Stakeholdern und Anwender:innen wurden deren Anforderungen eingeholt und diese in der Entwicklung berücksichtigt. Das Innovationslabor act4.energy, auf dessen Infrastruktur Teile der Blockchain-Lösung getestet wurden, verfügt auf

elektrischer Seite über ein virtuelles Kraftwerk, an welches ein Speichercluster, PV-Anlagen, Ladestationen sowie andere flexible Lasten angebunden sind. Darüber hinaus entstand eine Kopplung zum Wärme- und Mobilitätsbereich. In diesem Kontext ergaben sich noch weitere Blockchain-Anwendungsmöglichkeiten, angefangen von einem Bonussystem in Form eines Energiekontos für energieträgerübergreifende, regional gewonnene Energie, über das interne Pooling des virtuellen Kraftwerks bis hin zur Frage der dynamischen Nutzung der Energie von mehreren PV-Anlagen durch die Bewohner:innen der Energiegemeinschaft.

Ergebnisse

Die im Projekt identifizierten und untersuchten Anwendungsfälle sowie der parallel dazu laufende Co-Creation Prozess haben gezeigt, dass es ein enormes Potential für Anwendungen auf Basis der Blockchain-Technologie im Energiebereich gibt, das betrifft sowohl spezialisierte Anwendungen für Expert:innen als auch Anwendungen auf Haushaltsebene. Im Blockchain-basierten Investitionsmodell für Photovoltaik-Anlagen von Privatkund:innen hängt die Dauer der Rückzahlung einerseits von einer optimalen Dimensionierung und andererseits vom Verbrauchsprofil des Haushalts ab. Über den Einsatz von privaten (lokal installierten) Energiemanagement-Systemen kann der Eigenverbrauch durch die optimale Steuerung von Verbrauchern und dem Einsatz von Heimspeichersystemen noch weiter erhöht werden. Weiteres Potential zur optimalen Nutzung der lokal erzeugten Energie bietet der Zusammenschluss zu Energiegemeinschaften, die den lokalen Eigenverbrauch durch Peer-to-Peer Energiehandel und den Einsatz von Gemeinschaftsanlagen erhöhen können. Die Sektorenkopplung ist eine vielversprechende Option, um den PV-Eigenverbrauch zu maximieren. Es wurde gezeigt, dass der Honey Badger BFT-Konsensalgorithmus im etablierten Parity-Client verwendet werden kann und eine vergleichsweise hohe Leistung und andere sehr wünschenswerte Eigenschaften liefert, die für verschiedene spezifische Anwendungen im Energiesektor benötigt werden. Die durchgeführten Tests zeigen gute Aussichten für die Anwendung des Honey Badger BFT-Konsensalgorithmus in realen Live-Blockchain-Anwendungen, die definitiv nicht nur auf den Energiesektor beschränkt sind, sondern auch Anwendungen vorantreiben können, die bisher als unmöglich galten. Die Blockchain bietet, wie die Anwendungsfälle zeigen, in diversen Konstellationen erhebliche Erleichterungen und Optimierungsmöglichkeiten für die Zukunft. Jedoch gehen mit den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten auch etliche rechtliche Vorgaben einher, die einzuhalten sind. Im Bereich der Energiegemeinschaften wird der Einsatz der Blockchain und die Einführung von Smart Contracts in größerem Ausmaß ermöglicht und können dementsprechend zu Optimierungen in Energiegemeinschaften beitragen.

Ausblick

Einige der im Projekt untersuchten Anwendungsfälle, wie das interaktionslose Laden von Elektrofahrzeugen, haben durchaus das Potential für eine breite kommerzielle Anwendung, jedoch ist vor allem im Bereich der Zuverlässigkeit und Bedienfreundlichkeit noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich. Die durchgeführten Simulationen konnten ein großes Potenzial zur Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs in Energiegemeinschaften aufzeigen. Zusätzlich konnten weitere Potentiale durch die Anwendung der Sektorkopplung in Bezug auf die Einbindung von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizwärme identifiziert werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf zur Optimierung dieser Potentiale. Dabei ist zu beachten, dass die gebäudeseitigen Heizsysteme eine hohe Effizienz und niedrige Systemtemperaturen aufweisen, so dass der Betrieb von Wärmepumpen bzw. ein Anschluss an ein mit Wärmepumpen versorgtes Niedertemperatur-Fernwärmenetz wirtschaftlich möglich ist. Mit dem Einsatz der Blockchain-Technologie werden speziell im Energiebereich aus verschiedensten Aspekten rechtliche Fragen aufgeworfen und Vorgaben tangiert, die es einzuhalten gilt. Eine große Herausforderung ist die Konfrontation mit einer Fülle an Rechtsvorschriften, sowie das stetige Abwägen von

verschiedenen Interessen (insbesondere Datenschutz). Eine großflächige Anwendung und somit einen Beitrag zur Energiewende kann die Blockchain-Technologie durch Einsatz in einer Energiegemeinschaft erfahren.

Abstract

Motivation

Blockchain technology was first used in a distributed, open server network for the transfer of value with Bitcoin in 2008 and for many years its potential was only recognized by a few insiders. At the latest since Ethereum (2013) was described as a new blockchain platform, it has become clear in many expert circles that this new technology will not only substantially change the financial system but will bring serious changes to all economic and organizational structures. Compared to the state of the art in the field of classic IT applications, blockchain technology enables fast, secure clearing of purchased and provided services between machines with the possibility of complete automation without further interfaces. This offers huge potential for making energy management and trading more efficient and decentralized.

Initial situation

Self-consumption of photovoltaics has become interesting for many end customers due to the sharp drop in the system costs of photovoltaics in recent years and the corresponding subsidy systems. In order to increase or optimize potential self-consumption, there is a discernible trend towards the installation of PV storage systems and the use of flexible consumer devices. The flexible consumers with the highest potential include electric vehicles, heat pumps, and heating rods for water heating. Electromobility is an important building block for the energy transition in two areas: on the one hand, it directly reduces the consumption of fossil fuels, and on the other hand, the vehicles' batteries provide the flexibility necessary for an electricity grid, based on renewable energy sources. Heat pumps in combination with PV systems can trigger positive synergy effects, as locally produced electricity can be consumed directly in the heat pump. Maximum self-consumption can be achieved if heating times can be adapted to the PV yield profile using local flexibilities. The use of energy from communal generation plants could be regulated by private contracts. This is an application area for blockchain technology. By installing smart meters, the necessary data can be evaluated by the grid operator and a virtual billing of the community plant to several customers with fixed shares can be carried out.

Project objective

The **SonnWende+** project analyzed blockchain technology in the context of renewable electric power feed-in and flexibility in the act4.energy innovation laboratory in southern Burgenland as an enabler for future innovative service concepts. The aim was to explore new and efficient service concepts and underlying technologies for energy management and energy trading.

Methodological approach

Innovative methods for maximizing photovoltaic self-consumption at building level and within energy communities, blockchain-based billing of fully automated charging processes for electric vehicles and lending-based crowdfunding models were designed, developed, and validated. Through co-creation processes with stakeholders and users, their requirements were obtained and considered in the development. The act4.energy innovation lab, on whose infrastructure parts of the blockchain solution were tested, has a virtual power plant on the electrical side, to which a storage cluster, PV systems, charging stations, and other flexible loads are connected. In addition, a coupling to the heat and mobility sector was created. In this context, further blockchain application possibilities emerged, ranging from a bonus system in the form of an energy account for regionally generated energy across energy

sources, to the internal pooling of the virtual power plant, to the question of the dynamic use of energy from several PV systems by the residents of the energy community.

Results

The use cases identified and investigated in the project, as well as the co-creation process running in parallel, have shown that there is enormous potential for applications based on blockchain technology in the energy sector, both for specialized applications for experts and applications at household level. In the blockchain-based investment model for photovoltaic systems of private customers, the duration of repayment depends on optimal dimensioning on the one hand and on the consumption profile of the household on the other. By using private (locally installed) energy management systems, self-consumption can be further increased through the optimal control of consumers and the use of home storage systems. Further potential for the optimal use of locally generated energy is offered by joining energy communities, which can increase local self-consumption through peer-to-peer energy trading and the use of community systems. Sector coupling is a promising option to maximize PV self-consumption. It has been shown that the Honey Badger BFT consensus algorithm can be used in the established parity client and delivers comparatively high performance and other highly desirable properties needed for various specific applications in the energy sector. The tests performed show good prospects for the application of the Honey Badger BFT consensus algorithm in real live Blockchain applications, which are not limited to the energy sector, but can also drive applications that were previously considered impossible. As the use cases show, the blockchain offers considerable facilitation and optimization possibilities for the future in diverse constellations. However, the various possible applications are also accompanied by several legal requirements that must be complied with. In the area of energy communities, the use of blockchain and the introduction of smart contracts will be made possible to a greater extent and can accordingly contribute to optimizations in energy communities.

Outlook

Some of the use cases investigated in the project, such as the interaction less charging of electric vehicles, have the potential for broad commercial application, but research and development work is still required, especially in reliability and ease of use. The simulations carried out were able to show great potential for increasing PV self-consumption in energy communities. In addition, further potentials could be identified through the application of sector coupling regarding the integration of heat pumps for the provision of heating energy; here, there is a need for further research to optimize these potentials. It should be noted that the building-side heating systems have a high efficiency and low system temperatures, so that the operation of heat pumps or a connection to a low-temperature district heating network supplied with heat pumps is economically possible. With the use of blockchain technology, legal questions are raised, and specifications are affected from a wide variety of aspects, especially in the energy sector, which must be complied with. A major challenge is a confrontation with an abundance of legal regulations, as well as the constant balancing of various interests (especially data protection). Blockchain technology can be applied on a large scale and thus contribute to the energy transition through its use in an energy community.

1 Ausgangslage

Der Eigenverbrauch von Photovoltaik ist durch die in den letzten Jahren stark gesunkenen Systemkosten von Photovoltaik und entsprechenden Fördersystemen für viele Endkund:innen interessant geworden. Um den möglichen Eigenverbrauch zu steigern bzw. zu optimieren, ist ein Trend hin zur Installation von PV-Speichersystemen und der Nutzung flexibler Verbraucher erkennbar. Zu den flexiblen Verbrauchern mit dem höchsten Potenzial zählen Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge und Heizstäbe zur Warmwasseraufbereitung. In Deutschland wurden in den letzten Jahren durch das KfW-Programm [1] rund 19.000 PV-Speichersysteme gefördert bzw. rund 33 % aller neu installierten PV-Systeme bei Einfamilienhäusern mit PV-Speichersystemen ausgestattet. Auch in Österreich wurde die Installation von PV-Speichersystemen in unterschiedlichen Landesförderungen unterstützt¹. Nach Schätzungen wurden in Österreich etwa 1.000 Speichersysteme mit und ohne Förderungen installiert.²

Elektromobilität ist in zwei Bereichen ein wichtiger Baustein für die Energiewende: einerseits wird direkt der Verbrauch fossiler Energieträger reduziert, andererseits stellen die Batterien der Fahrzeuge die für ein auf erneuerbaren Energieträgern basierendes Stromnetz notwendigen Flexibilitäten zur Verfügung. In Österreich waren mit 31.12.2016 insgesamt 9.326 Elektrofahrzeuge zugelassen³ (laut Statistik Austria mit 31.12.2019 insgesamt 29.523 Fahrzeuge). Die Entwicklung der Neuzulassungen hat sich dabei in den letzten Jahren beschleunigt – 2016 wurden 4.275 Elektrofahrzeuge zugelassen, im Vergleich waren es 2015 nur 1.796 Fahrzeuge⁴. Laut Statistik Austria waren es 2019 bereits 9.242 (2,8% aller Neuzulassungen). Durch die Einführung von Förderungen wird ein weiterer starker Anstieg von zugelassenen Elektrofahrzeugen erwartet. Eine standardisierte Schnittstelle zur Steuerung der Ladeinfrastruktur der Elektrofahrzeuge existiert nicht. Die Kommunikation zwischen Ladeinfrastruktur und Fahrzeugen ist hingegen bereits standardisiert und in Europa mit der IEC 61851 und der IEC 15118 gänzlich abgedeckt. Jedoch bieten einige Hersteller Wallboxen an, mit denen das Elektrofahrzeug in das lokale Energiemanagementsystem im Haushalt eingebunden werden kann.

Im Jahr 2018 konnten in Österreich insgesamt 25.888 Wärmepumpen aller Kategorien und Leistungsklassen abgesetzt werden. In Vergleich zu 2017 steigerten sich die Verkaufszahlen damit um 3,0 %. Damit waren im Jahr 2018 ca. 300.000 Wärmepumpen in Betrieb, der Großteil davon waren Heizungs-wärmepumpen (ca. 210.000), gefolgt von Brauchwasserwärmepumpen (ca. 85.000), Wohnraumlüftungswärmepumpen (ca. 5.000) und Industrierwärmepumpen (ca. 300) [2]. Insbesondere in Kombination mit PV-Anlagen können Synergieeffekten ausgelöst werden, da lokal produzierter Strom direkt in der Wärmepumpe verbraucht werden kann. Ein maximaler Eigenverbrauch kann erreicht werden, wenn die Heizzeiten an das PV-Ertragsprofil mit Hilfe lokaler Flexibilitäten angepasst werden können.

Die Nutzung der Energie aus gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen könnte durch private Verträge geregelt werden. Dies ist ein Anwendungsfeld für Blockchain-Technologie. Es werden mehrere mögliche Geschäftsmodelle anhand von Smart Meter Konfigurationen illustriert [3], keines aber ermöglicht

¹ Förderprogramme wurden in Salzburg, Oberösterreich, Wien, dem Burgenland, Kärnten, der Steiermark und Tirol initiiert.

² K. Leonhartsberger and L. Maul, "Energieversorger als Backup Provider? Erkenntnisse aus aktuellen internationalen Speicher-Studien." 11-May-2016.

³ European Alternative Fuels Observatory <http://www.eafo.eu/>

⁴ European Alternative Fuels Observatory <http://www.eafo.eu/>

es dem Betreiber einer PV-Anlage, den Strom in der Community zu verkaufen, oder dem Nutzer, einen PV-Stromanbieter auszuwählen. In der „kleinen Ökostromnovelle“ [4] wurde nun eine Möglichkeit zum Betrieb gemeinschaftlicher Erzeugungsanlagen in Mehrparteienhäusern geschaffen. Durch die Installation von Smart Metern können die notwendigen Daten vom Netzbetreiber ausgewertet und eine virtuelle Verrechnung der Gemeinschaftsanlage an mehrere Kund:innen mit fixen Anteilen durchgeführt werden.

Die Blockchain-Technologie wurde mit dem Bitcoin im Jahr 2008 erstmals in einem verteilten, offenen Servernetzwerk zum Werttransfer eingesetzt und viele Jahre nur von wenigen Insidern in ihrem Potential erkannt. Spätestens seitdem Ethereum (2013) als neue Blockchain-Plattform beschrieben wurde, ist in vielen Fachkreisen klar, dass diese neue Technologie nicht nur das Finanzsystem substantiell verändern, sondern für alle wirtschaftlichen und organisatorischen Strukturen gravierende Veränderungen bringen wird. Im Vergleich zum Stand der Technik im Bereich klassischer IT-Anwendungen ermöglicht die Blockchain-Technologie eine schnelle, sichere Verrechnung von bezogener und bereitgestellter Leistung zwischen Maschinen mit der Möglichkeit zur kompletten Automatisierung ohne weitere Schnittstellen. Damit ergibt sich ein riesiges Potenzial, Energiemanagement und -handel effizienter und dezentraler zu gestalten.

Die folgenden drei Projekte zeigen den aktuellen Stand der Technik (Antragsphase) für die hochgradig regulierte Energiebranche. Global arbeiten unzählige Startups daran, die noch junge Blockchain-Technologie für den umfangreichen und sicheren Produktiveinsatz fit zu machen. Generell kann festgehalten werden, dass Blockchain im Energiebereich in Österreich bereits eine hohe Aufmerksamkeit erlangt hat und mit diesem Projekt nahtlos auf den Erkenntnissen aus dem internationalen Umfeld aufgebaut werden kann.

Transactive Grid: Das Projekt TransActive Grid⁵ ist ein Joint Venture zwischen LO3 Energy und Consensus. TransActive Grid funktioniert mit einem Ethereum-basierten Token-System. Bei jedem Teilnehmer bzw. Teilnehmerin werden die Daten des Smart Meter erfasst und mit ERC-20-kompatiblen Token verrechnet. Erzeugte Energie generiert Token, verbrauchte Energie zerstört sie. Der Token hat also eher Gutschein- als Geld-Charakter. Die Daten der Smart Meter werden über einen als „Oracle“ bezeichneten Mechanismus den relevanten Smart Contracts zur Verfügung gestellt. Das System integriert auch eine auf Smart Contracts basierte P2P-Handelsplattform. Ein Beweggrund für das Projekt war die Kritik am bestehenden Markt für erneuerbare Energie. In den USA gibt es ein „Renewable energy credit“ (REC) genanntes System, das Verbrauchern über einen Marktmechanismus die Möglichkeit geben soll, ihre Präferenz für erneuerbare Energien auszudrücken. Die Macher von TransActive Grid kritisieren RECs als zu wenig effektiv und vertrauenswürdig, weil zum einen Verrechnung über weite Strecken hinweg aufgrund der Netzverluste die Realität unrealistisch abbilde und weil es angeblich vorkomme, dass RECs doppelt verrechnet werden. Mit TransActive Grid sollen Microgrids ermöglicht werden, in denen lokale Communities Energie untereinander verrechnen und auch die Möglichkeit haben, sich autark zu machen, etwa durch Abkopplung vom übergeordneten Netz in Ausnahmesituationen. In Brooklyn, New York, erfolgte eine erste Umsetzung des Konzepts, in Form von Brooklyn Microgrid⁶, einer Benefit Corporation. Man ist zum Schluss gekommen, dass Kosteneinsparungen in den meisten Fällen nicht die Hauptmotivation für die Teilnehmer:innen an einem Microgrid-System sind, weil diese auf individueller Ebene in der Regel nicht eine allzu relevante Größenordnung haben. Antrieb ist in der

⁵ <http://transactivegrid.net/>

⁶ <http://brooklynmicrogrid.com/>

Regel vielmehr die aufgrund der kleinen Struktur wiedergewonnene Sichtbarkeit des Zusammenhangs zwischen individuellen Entscheidungen und Auswirkungen.

Share & Charge⁷ (vormals Blockcharge) ist ein Projekt für Blockchain-basiertes Laden von Electric Vehicles (EVs), das in Zusammenarbeit zwischen Slock.it und dem Innovation Hub Innogy erfolgt. Zielsetzung ist der Aufbau einer Ladeinfrastruktur, in der auch Private einfach zu Anbietern werden können. Dazu werden die Ladesäulen der Teilnehmer:innen mit einem Smart Plug ausgerüstet, welcher über eine vom Teilnehmer bzw. der Teilnehmerin zur Verfügung zu stellender Internetverbindung mit der Ethereum-Blockchain synchronisiert wird. Abgerechnet wird mit System-eigenen Token, die in Euro denominiert sind. Solche Lade-Token können an einer Börse erworben und zum Laden an einer beliebigen teilnehmenden Säule eingesetzt werden. Anbieter von Ladesäulen sind in der Preisgestaltung frei. Es ist auch vorgesehen, dass für Freunde und Familie Sondertarife einstellbar sind. Angedacht ist auch eine Ausweitung des Systems auf die Vermietung von Stellflächen und automatische Abrechnung durch selbstfahrende Fahrzeuge.

NRGcoin⁸ wurde im Rahmen des EU-Projekts Scanergy entwickelt. Zielsetzung dieses Projekts war die Erforschung von intelligenten Multi-Agenten-Systemen, die neben dem Energiehandel zwischen Prosumern auch die Regelung des Netzes auf verschiedenen Ebenen ermöglichen und positive Effekte hinsichtlich Energie-Effizienz erzielen. NRGcoins werden proportional zur an einem Endpunkt generierten Energie erzeugt. Dafür werden eigene gateway devices eingesetzt, um Abhängigkeiten von bestehenden Smart Metern bzw. den Zugriffsmöglichkeiten darauf zu vermeiden. Diese Sensordaten werden außerdem über Heuristiken und Methoden der künstlichen Intelligenz auf ihre Plausibilität überprüft, etwa durch Quervergleich von Produktionsdaten von Wind- oder PV-Anlagen mit den zeitgleich vor Ort herrschenden Wetterbedingungen. Ein NRGcoin entspricht einer Kilowattstunde und versteht sich als virtueller Energiespeicher. Angesparte NRGcoins sind also dafür gedacht, später im gleichen Verhältnis in Energie zurückgetauscht zu werden. Im Falle von langfristigen Überschüssen ist auch ein Verkauf an einer System-externen Börse möglich. NRGcoin hat explizit nicht den Anspruch, kurzfristige Nachfrageschwankungen über Trading-Mechanismen und flexible Preise auszugleichen. Als Hauptmotivationen für NRGcoin werden genannt: i) Für Nutzer: Verminderung des Risikos, aufgrund von regulatorischen Änderungen ökonomische Verluste zu erleiden. ii) Für Betreiber: direkter, schnellerer Cash-Flow. iii) Für Regulierer: Einsparungspotential.

Das Projekt analysierte die Blockchain-Technologie im Kontext erneuerbarer elektrischer Einspeisung und Flexibilität im Innovationslabor act4.energy im Südburgenland. Konkrete Umsetzungsziele des Projektes waren:

- Die Erforschung neuer und automatisierter Lösungen für Energiemanagement-Services und Energiehandel auf Gebäude-, Quartier- und auf Regionaler Ebene.
- Die Unterstützung dieser Entwicklung durch einen Co-Creation-Prozess mit Stakeholdern, welche die entwickelten Lösungen gemeinsam mitdefinieren und austesten.
- Konkrete Lösungen werden im Projekt spezifiziert, die Umsetzbarkeit im geltenden Rahmen geprüft, das Design entsprechend angepasst und ein Blockchain-Demonstrator im Innovationslabor umgesetzt.
- Entwicklung einer adäquaten sicheren Lösung für die oben genannten Anwendungsbereiche.

⁷ <https://shareandcharge.com>

⁸ NRGcoin - Smart Contract for green energy, Artificial Intelligence Lab Vrije Universiteit Brussel: <https://nrgcoin.org/>

2 Projekinhalt

Das Projekt **SonnWende+** wurde in folgende Themenbereiche unterteilt, die im Folgenden im Detail beschrieben werden.

- Die Erforschung neuer und automatisierter Lösungen für Blockchain-basierte Anwendungen im Energiebereich auf Gebäude,- Quartier- und auf Regionaler Ebene.
- Die Unterstützung der Entwicklung durch Co-Creation-Prozesse mit Stakeholdern und Testusern, welche die entwickelten Lösungen gemeinsam mitdefinieren und austesten.
- Konkrete Lösungen werden im Projekt spezifiziert, die Umsetzbarkeit im geltenden Rahmen geprüft, das Design entsprechend angepasst und ein Blockchain-Demonstrator im Innovationslabor umgesetzt.

2.1. Automatisierte Lösungen für Energiemanagement-Services

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht vom Stand der Technik in Hinblick auf die Minimierung des Netzbezugs im Eigenheim und in Mehrparteienhäusern bis zu optimierten Quartieren und Regionen, die als Energiegemeinschaften agieren und neue Anwendungen und Dienstleistungen auf Basis der Blockchain-Technologie anbieten.

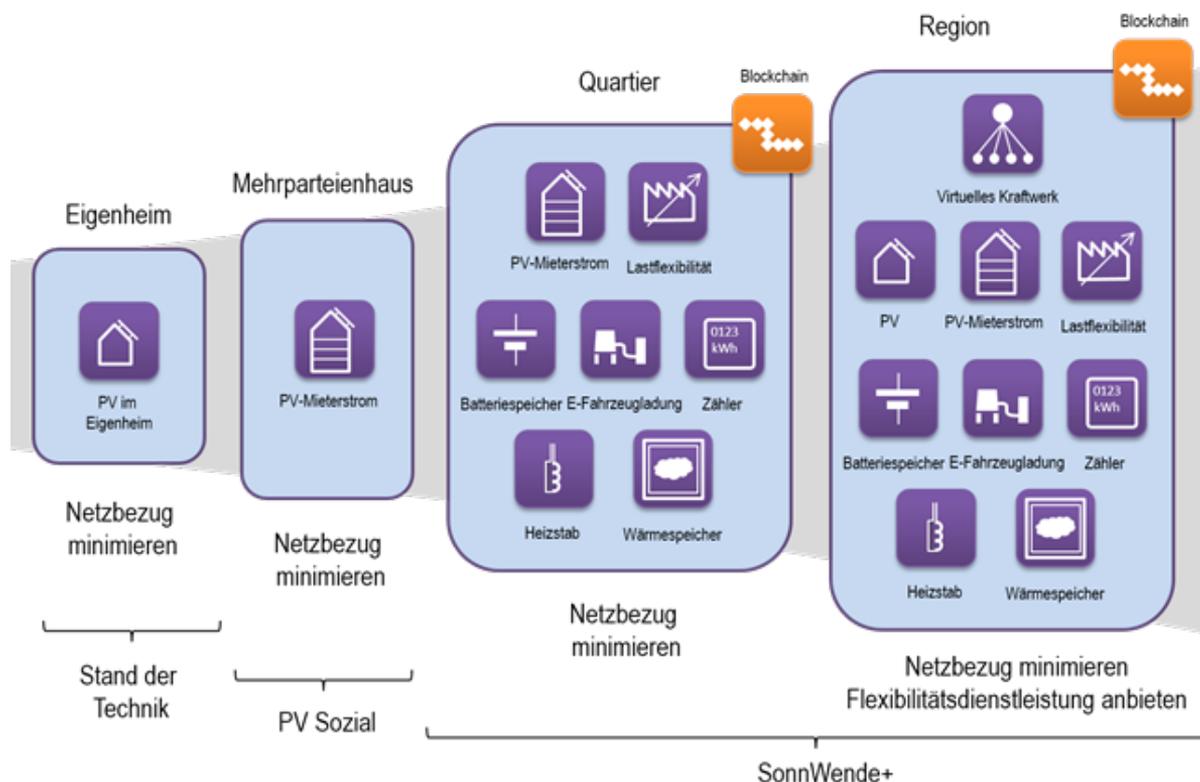


Abbildung 1: Die schrittweise Entwicklung von der Reduktion des Netzbezugs im Eigenheim bis zur optimierten, Systemdienstleistungen-bereitstellenden Region mit Blockchain-Technologie.

In Bezug auf innovative Anwendungen bzw. Dienstleistungen im Energiebereich sowie unter Berücksichtigung der Sektorkopplung wurden im Projekt die folgenden Anwendungsfälle definiert, diese in unterschiedlichen Ausprägungen umgesetzt und validiert sowie deren zukünftiger Einsatz unter dem geltenden rechtlichen Rahmen analysiert:

- Lending-based Crowdfunding,
- Energie-Konto für Teilnehmer:innen von Energiegemeinschaften,
- Interaktionsloses Laden von Elektrofahrzeugen und
- Peer-to-Peer-Energiehandel.

Zusätzlich zu den genannten Anwendungsfällen wurde eine Studie erstellt, die dem Thema virtueller Kraftwerke in Energiegemeinschaften zuzuordnen ist. [5]

2.1.1. Lending-based Crowdfunding

Dieser Anwendungsfall befasst sich mit einem Beteiligungsmodell zur Finanzierung von Anlagen (Photovoltaik, Wärmepumpen, etc.) durch Lending-based Crowdfunding. Gebäudeeigentümer stellen beispielsweise für die Installation von PV-Anlagen ihre Dachflächen zur Verfügung und Investoren stellen die finanziellen Mittel für die Anschaffung, Installation und Wartung bereit. Die Kosten werden durch den PV-Eigenverbrauch bzw. die Überschusseinspeisung refinanziert. Nach vollständiger Tilgung (inkl. Zinsen) des Investitionsbeitrags geht die Anlage in das Eigentum des Gebäudeeigentümers über.

Crowdfunding hat sich als eine innovative Form der externen Finanzierung zur Kapitalbeschaffung aus einer großen Menge von Kleinanlegern entwickelt, die Abwicklung erfolgt in der Regel über offene Ausschreibungen auf internetbasierten Plattformen [6], [7]. In der Literatur [8] werden folgende Modelle des Crowdfundings identifiziert:

- reward-based Crowdfunding (Finanziers bekommen Belohnungen wie z.B. ein gemeinsames Essen oder verbilligte Produkte),
- equity-based Crowdfunding (Investoren bekommen Anteile an einer Firma und damit auch potenzielle Gewinnbeteiligungen),
- donation-based Crowdfunding (Spender bekommen keine Belohnung oder anderwärtige Geschenke),
- lending-based Crowdfunding (Kapitalgeber leihen Geld und bekommen dafür Zinsen).

Im Rahmen des Projektes **SonnWende+** wird Lending-based Crowdfunding als Lösung für Investitionen in PV-Anlagen (und weitere Komponenten) vorgeschlagen. Die Blockchain dient hierbei dazu, Gebäudeeigentümer und Investoren einen genauen Überblick über die bezahlten und offenen Kosten sowie eine vollautomatisierte Rückzahlung zu ermöglichen. Hierbei können Smart Contracts eingesetzt werden, welche die Berechnung durchführen und die entsprechenden Transaktionen erzeugen. Das grundsätzliche Investitionsmodell wird bereits von Energie Kompass GmbH mit ihrer Tochterfirma solar.family⁹ betrieben – derzeit allerdings mittels der vom Energieversorgungsunternehmen einmal jährlich zur Verfügung gestellten Abrechnungsdaten. Ziel dieses Anwendungsfalls war die Nutzung der Vorteile der Blockchain-Technologie (Sicherheit und Transparenz) für die automatisierte Abrechnung bzw. die genaue Auflistung der bisherigen Tilgung sowie des ausstehenden Rückzahlungsbetrags.

⁹ <https://www.solar.family/>

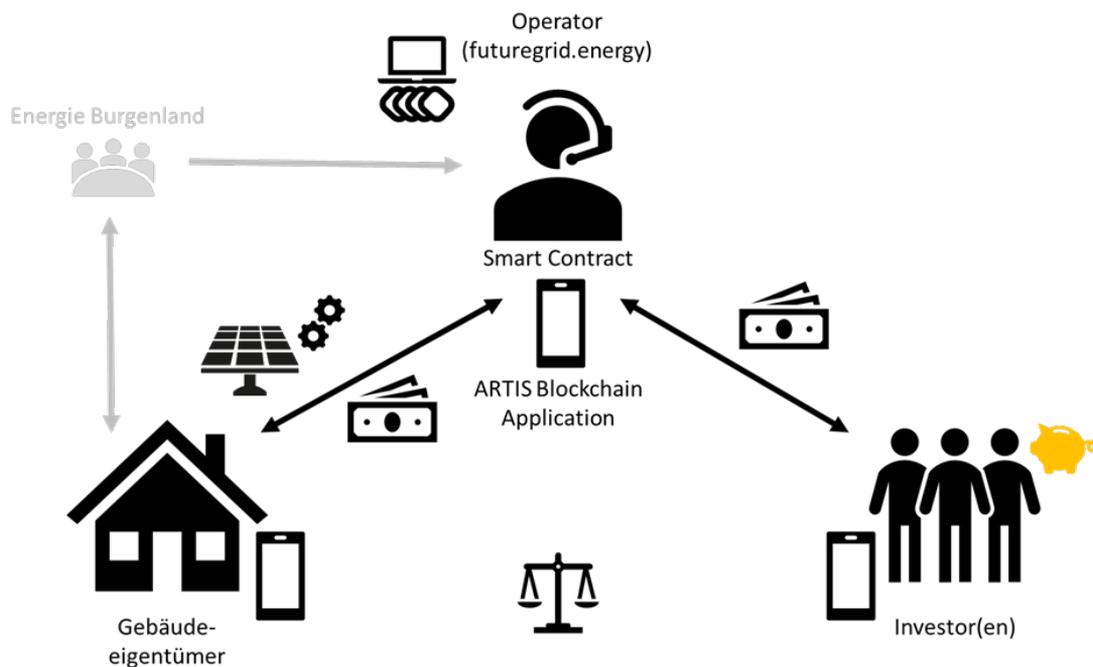


Abbildung 2: Übersicht Lending-based Crowdfunding

Abbildung 2 zeigt die beteiligten Akteure des Lending-based Crowdfunding-Modells sowie deren Beziehungen untereinander – dieser Anwendungsfall sowie dessen Akteure und Abläufe werden im Folgenden für ein Finanzierungsmodell von PV-Anlagen beschrieben, er kann jedoch auch für andere Investitionen (z.B. Wärmepumpen, Energie-Management-Systeme, etc.) eingesetzt werden.

- Gebäudeeigentümer stellen ihre Dachflächen für die Installation von PV-Anlagen zur Verfügung.
- Investoren stellen einem Operator die finanziellen Mittel für den Kauf, die Installation, sowie etwaigen Wartungsarbeiten der PV-Anlage zur Verfügung. Die Investoren geben ein Nachrangdarlehen.
- Ein Operator (z.B. futuregrid.energy¹⁰ im konkreten Fall innerhalb des Innovationslabors act4.energy) steht als Ebene zwischen Investor und Gebäudeeigentümer und ist für Kauf, Installation, Wartung und Abrechnung verantwortlich.
- Der Gebäudeeigentümer wird zum Betreiber der PV-Anlage.
- Die Anlagenkosten werden über den PV-Eigenverbrauch sowie Erzeugungsüberschüsse durch den Gebäudeeigentümer über den Operator an die Investoren refinanziert (inklusive Zinsen).
- Über die Stromrechnung wird der Eigenverbrauch ausgewiesen. Die Rückzahlung des noch ausstehenden Betrags erfolgt vom Gebäudeeigentümer an den Operator (futuregrid.energy).
- Die Gebäudeeigentümer weisen die Stromkosten der letzten 3 Jahre nach.
- Es erfolgt eine monatliche Abrechnung auf Basis des tatsächlichen Eigenverbrauchs und Überschusses.

¹⁰ Futuregrid.energy Service GmbH: <https://www.futuregrid.energy/de/home/>

- Die bereits erfolgte Rückzahlung sowie der noch ausstehende Betrag durch den Gebäudeeigentümer/Anlagenbetreiber wird in einer Blockchain abgebildet.
- Für die Errechnung der erfolgten/noch ausstehenden Rückzahlung ist erforderlich, dass der Operator die Stromverbrauchswerte des Gebäudeeigentümers/Anlagenbetreibers kennt.
- Sind die Anlagenkosten durch den Eigenverbrauch und Überschussproduktion gedeckt, geht die PV-Anlage in das Eigentum des Gebäudeeigentümers über (derzeitige Planung: nach ca. 12 Jahren).

Die Stromverbrauchswerte erhält der Operator auf Basis einer Vollmacht des Gebäudeeigentümers monatlich durch das Energieversorgungsunternehmen. Der Netzbetreiber übermittelt hingegen keine Daten an den Operator. Da im Zuge der Umsetzung dieses Anwendungsfalles jedoch eine kürzere Taktung erforderlich ist, wird beim Gebäudeeigentümer mit dessen Zustimmung zum Zwecke der Errechnung des zu zahlenden Restwertes ein zusätzlicher (nicht geeichter) Zähler installiert. Dieser weist die erforderlichen Daten (Erzeugung, Verbrauch und somit auch die Einspeisung) aus. Im Falle der Installation dieses zusätzlichen Zählers wird die monatliche Übermittlung der Stromverbrauchswerte durch die Energie Burgenland nicht mehr benötigt und die Berechnung der bisherigen Tilgung sowie des Restbetrags kann vollautomatisch erfolgen.

Abbildung 3 zeigt ein Konzept für die Umsetzung dieses Anwendungsfalles auf Basis der vom Projektpartner lab10 entwickelten ARTIS-Blockchain.

Crowd invest modell for PV - installation governed by smart-contracts on ARTIS Blockchain

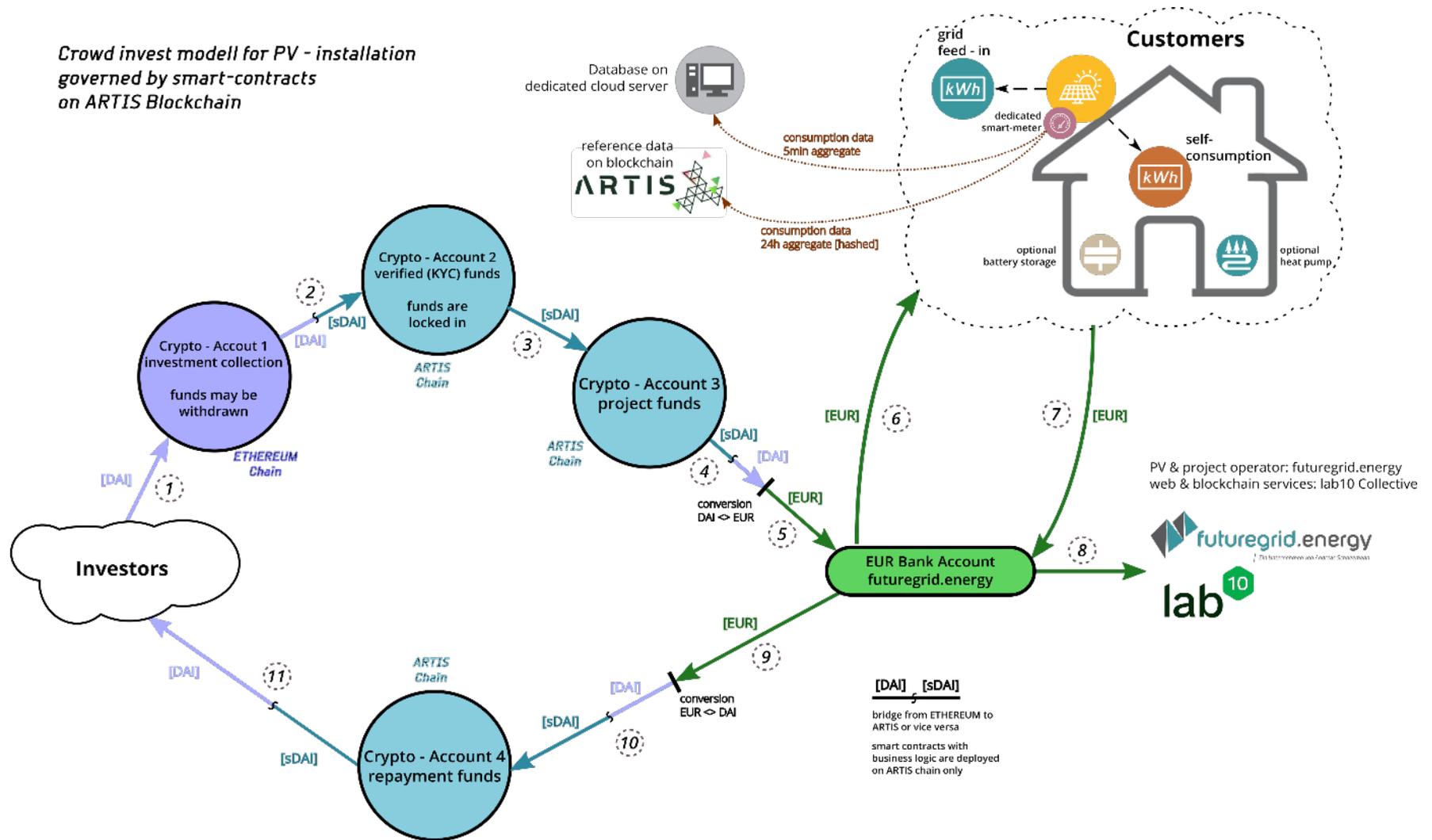


Abbildung 3: Lending-based Crowdfunding Modell für PV-Anlagen auf Basis der ARTIS-Blockchain.

Die Schritte des in Abbildung 3 illustrierten Prozesses sind wie folgt:

1. Investoren transferieren einen Dollar-stabilen Token (z.B. DAI¹¹) in einen Smart Contract auf dem Ethereum Netzwerk. Bis zur erfolgreichen Know-Your-Customer / Anti-Money-Laundering¹² Prüfung können die DAI Token jederzeit zurückgeholt werden.
2. Über eine Brücke werden die DAI auf das ARTIS Blockchain Netzwerk transferiert.
3. Die investierten DAI werden den jeweiligen Projekten zugeordnet.
4. (und 5): Nachdem das Projekt vollständig finanziert ist, werden die DAI in mehreren Schritten in Euro umgewandelt und dem Konto des Projekt-Operators gutgeschrieben.
6. Das Investitionskapital wird vom Projekt-Operator bestimmungsgemäß ausgegeben und die PV-Anlage wird entsprechend installiert.
7. Der Hauseigentümer zahlt über den Eigenverbrauch und die Einspeisevergütung das bereitgestellte Darlehen an den Projekt-Operator zurück.
8. Der Fonds-Operator und der Projekt-Operator bekommen die vereinbarte Servicezahlung.
9. Die Rückzahlung der Dachflächenbesitzer in Euro wird wieder in DAI Token umgetauscht.
10. Die Rückzahlung in DAI wird in den Pool für die Rückzahlung transferiert.
11. Jeder Investor bekommt monatlich die Rückzahlungsrate mit Zinsen auf das jeweilige Konto überwiesen.

Der beschriebene Ansatz für das Lending-based Crowdfunding mithilfe der Blockchain-Technologie hat folgende Vorteile:

Für den Prosumenten:

- Bereitstellung eines „Full-Service-Pakets“ ohne den Bedarf an Eigenmitteln zur Installation von PV-Anlagen (und ggf. anderen Komponenten).
- Keine zusätzlichen Kosten.
- Signifikante Einsparungen nach etwa 10-15 Jahren, je nach Eigenverbrauchsrate.

Für Investoren:

- Hohe rechtliche und finanzielle Sicherheit bezüglich der Rückzahlung des Betreibers.
- Angemessene Verzinsung des zur Verfügung gestellten Geldes für einen guten Zweck (Bekämpfung des Klimawandels).
- Volle Transparenz der Finanzströme in Echtzeit.

Für Betreiber:

- Erhöhte Einnahmen durch einen größeren Kund:innenstamm.
- Weniger Aufwand und Kosten für die Verwaltung von Finanzströmen.
- Höhere Investorenbasis und damit schnellere Finanzierung ohne Aufwände für das Marketing.

Für die Gemeinschaft:

- Eine beschleunigte Installation von Systemen für erneuerbare Energien mit entsprechender Reduzierung der CO₂-Emissionen.
- Bildung von Energiegemeinschaften mit transparenter erneuerbarer Energieproduktion.

¹¹ DAI, the world's first unbiased currency; <https://makerdao.com/en/>

¹² https://en.wikipedia.org/wiki/Know_your_customer

Als Nachteil wird das System technisch deutlich komplexer und deshalb ist bei einer konkreten Implementierung zu überprüfen, ob das vorgeschlagene Design noch weiter vereinfacht werden kann.

2.1.2. Energie-Konto für Teilnehmer:innen von Energiegemeinschaften

In diesem Anwendungsfall wurden die Möglichkeiten untersucht, das im Rahmen parallel-laufender Forschungsprojekte¹³ entwickelten innovativen Tarif- und Bürger:innen-Beteiligungsmodelle („Energiekonto“)¹⁴ mit Blockchain-Anwendungen zu erweitern. Das Energiekonto ist ein neues Geschäftsmodell, mit dem alle Energiekosten und Energiedienstleistungen eines Kund:innen in einer einzigen App integriert werden können.

Das Energiekonto ermöglicht es

- Kund:innen, alle Energiekosten (Strom, Mobilität, ...) und Energieeinspeisung in das Netz (PV, Batterie, bidirektionales EV) in einer einzigen App zu verfolgen. Die Energiebilanz des Kunden bzw. der Kundin zwischen verbrauchter und eingespeister Energie wird verfolgt und in leicht verständlicher Form in einer mobilen App angezeigt.
- Energiedienstleistern, sich in das System zu integrieren und Energie als „Währung“ für ihre Dienstleistungen von den Kund:innen zu akzeptieren. Ein Ladestationsbetreiber, der Partner des Systems ist, bucht beim Laden des Elektrofahrzeugs direkt Energie (in kWh) vom Energiekonto des Kunden bzw. der Kundin ab.

Der Anbieter des Energiekontodienstes fungiert als Stromhändler, der die Bilanzierung und die Abrechnung vornimmt und es den Benutzern ermöglicht, die öffentliche Ladeinfrastruktur (sofern diese Teil des Partnernetzwerks ist) zum Laden ihres Elektrofahrzeugs zu verwenden. Kund:innen können so die ihrem Energiekonto gutgeschriebene Energie aus der Erzeugung ihrer PV-Anlage nutzen, um ihr Elektrofahrzeug unterwegs aufzuladen.

Darüber hinaus fungiert das Energiekonto als Kundenbindungsprogramm, da Benutzer für eine Vielzahl von Dingen Energie auf ihr Konto buchen und zusätzlich Energie verbuchen können, wenn ihre PV-Anlage oder Speicherbatterie in das Netz einspeist.

Im Rahmen des Projektes wurden die Möglichkeiten untersucht, Energie zwischen den Konten mehrerer Kund:innen aber auch zu Serviceanbietern von Drittleistungen auszutauschen. Dies hat verschiedene Anwendungen, wie zum Beispiel ein Konto, das Energie an ein anderes Konto schenkt (z.B. Großeltern, die ihren Enkelkindern Energie schenken, um sie zu unterstützen). Ein anderes Beispiel der Nutzung besteht darin, dass ein Kunde mit zwei Wohnorten (einer davon mit PV-Anlage) mit dem Energiekonto die Energiekosten beider Wohnhäuser, die Einspeisung der PV-Anlage sowie den virtuellen Eigenverbrauch der PV-Anlage durch beide Häuser berücksichtigen kann. Auf diese Art wird auch die Nutzung von Services Dritter (wie die bereits angesprochene Ladeinfrastruktur) ermöglicht.

¹³ Urbane Speichercluster Südburgenland. Living Lab für sektorübergreifendes Energiemanagement: <https://www.energy-innovation-austria.at/article/urbane-speichercluster-suedburgenland/>

¹⁴ Smart Cities Initiative. Urbaner Speichercluster Südburgenland: <https://smartcities.at/projects/urbaner-speichercluster-suedburgenland/>

2.1.3. Interaktionsloses Laden von Elektrofahrzeugen

Die Elektrifizierung der Mobilität im Individualverkehr nimmt immer mehr Fahrt auf und so stieg die Gesamtzahl an neu zugelassenen, elektrisch ladbaren Personenfahrzeugen von 2018 auf 2019 um 46 % und der Markt an batterieelektrischen Fahrzeugen ist gar um 81 % gestiegen¹⁵. Diese Steigerungsraten führen zwangsläufig zu Diskussionen, ob die Belastung des Stromnetzes beim gleichzeitigen Laden zu groß werden und ob die Batterien der Fahrzeuge auch für die Netzstabilisierung eingesetzt werden könnten.

Neben den Schnellladesystemen, welche bald Ladungsleistungen von bis zu 350 kW bereitstellen werden können, muss aber auch festgehalten werden, dass heute in der Regel zu Hause geladen wird; dort reichen meistens 11 kW Ladeleistung (bei einem 3-phasigen Anschluss) aus, um die durchschnittlich täglichen gefahrenen 35 km wieder aufzuladen. Für die Bewohner einer Stadt ist das Laden (auf öffentlichen Parkflächen oder in der eigenen Garage) vielfach nicht möglich und deshalb sind sie auf öffentliche Ladestationen angewiesen.

Deshalb wurde im Rahmen des Projektes zusammen mit der Fa. Easelink¹⁶ an einem interaktionslosen Ladesystem mit Blockchain-basierender Bezahlung gearbeitet. Die angestrebte Lösung sollte ein hohes Maß an Bequemlichkeit bieten, wo sowohl der Ladevorgang als auch der Bezahlvorgang vollautomatisiert werden kann. Damit wird es erleichtert, auch bei kurzen Aufenthalten auf Parkplätzen das Fahrzeug immer wieder aufzuladen und im Idealfall zur Ladung nicht extra irgendwo hinfahren zu müssen. Der Bezahlvorgang sollte in den Prozess voll integriert werden und selbst für ein vollautomatisches System, wo direkt über das Fahrzeug bezahlt wird, geeignet sein.

¹⁵ <https://www.best-selling-cars.com/electric/latest-europe-electric-and-plug-in-hybrid-car-sales-per-eu-and-efta-country/>

¹⁶ <https://easelink.com>

Um die Simulations- bzw. Rechenzeit zu reduzieren, wurde hierbei jedoch nicht der vollständige Zeitraum, sondern lediglich jeweils eine zufällig gewählte Periode von 10 Tagen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter für vier Kunden berechnet:

- Kundin 1: „Alice“ mit einer 2.0 kWp PV-Anlage
- Kunde 2: „Bob“ mit einer 4.32 kWp PV-Anlage
- Kundin 3: „Sandra“ mit einer 3.03 kWp PV-Anlage
- Kunde 4: „John“ mit einer 4.04 kWp PV-Anlage

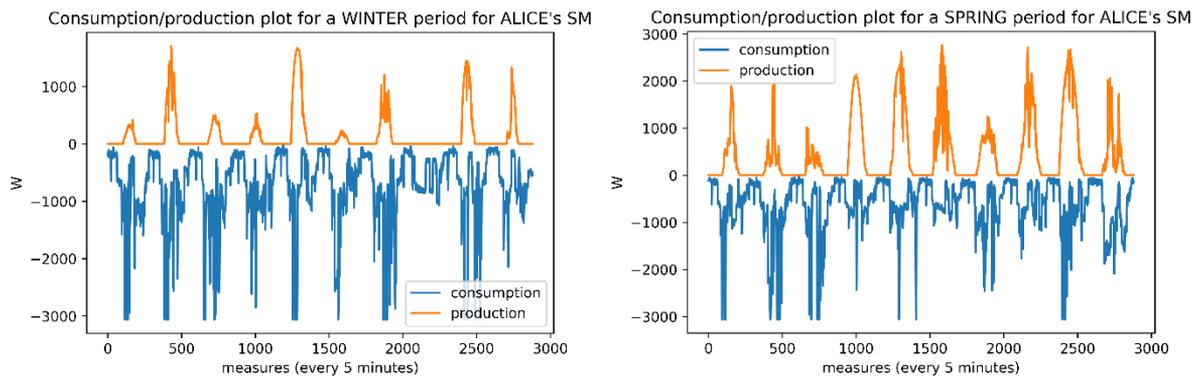


Abbildung 5: Verbrauch (blau, negativ) und Erzeugung (orange, positiv) in Watt von „Alice“ für jeweils 10 Tage im Winter (links) und 10 Tage im Frühling (rechts)

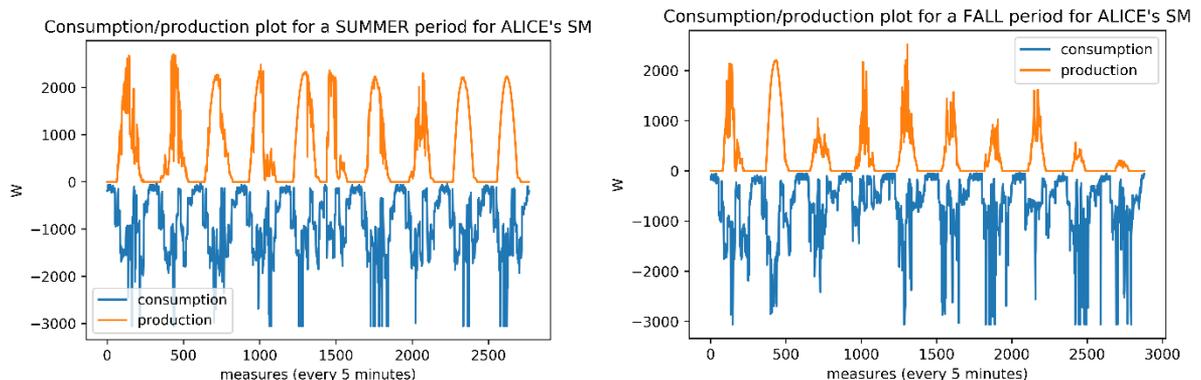


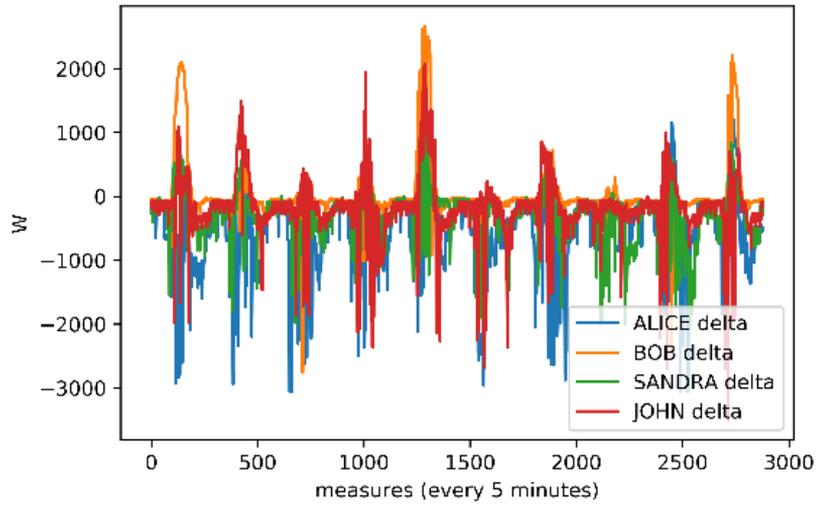
Abbildung 6: Verbrauch (blau, negativ) und Erzeugung (orange, positiv) in Watt von „Alice“ für jeweils 10 Tage im Sommer (links) und 10 Tage im Herbst (rechts)

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen den Verbrauch und die Erzeugung von Kunde 1 („Alice“) für jeweils 10 Tage im Winter, Frühling, Sommer und Herbst – die orange Linie zeigt den Verlauf der Erzeugung (positiv dargestellt), die blaue Kurve stellt den Verbrauch dar (negativ dargestellt). Für die Simulation wurde eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten verwendet.

Da in beiden Szenarien primär der Eigenverbrauch gedeckt und lediglich der Überschuss in der Community zur Verfügung gestellt wird, kann für alle Teilnehmer:innen der Community mit der Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch weitergerechnet werden.

Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die Differenz der vier Kund:innen für jeweils 10 Tage im Winter, Frühling, Sommer und Herbst. Nachfolgend ist der Algorithmus zur Berechnung der Energietransaktionen innerhalb der Community im Detail beschrieben.

Consumption/production delta plot for a WINTER period 2017 for all actors's SM



Consumption/production delta plot for a SPRING period 2017 for all actors's SM

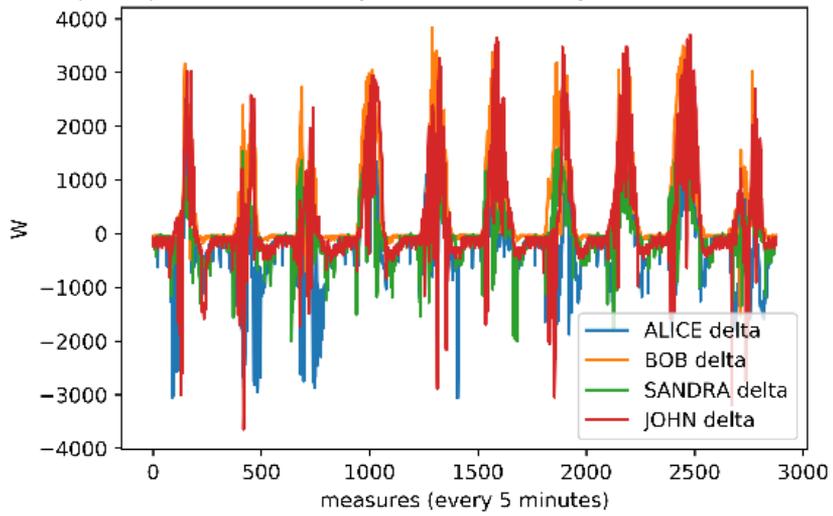
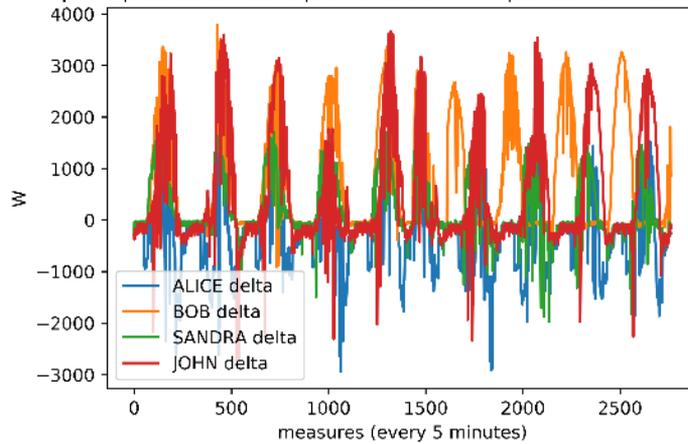


Abbildung 7: Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch für die vier Kund:innen in einem Zeitraum von jeweils 10 Tagen im Winter (oben) und im Frühling (unten).

Consumption/production delta plot for a SUMMER period 2017 for all actors's SM



Consumption/production delta plot for a FALL period 2017 for all actors's SM

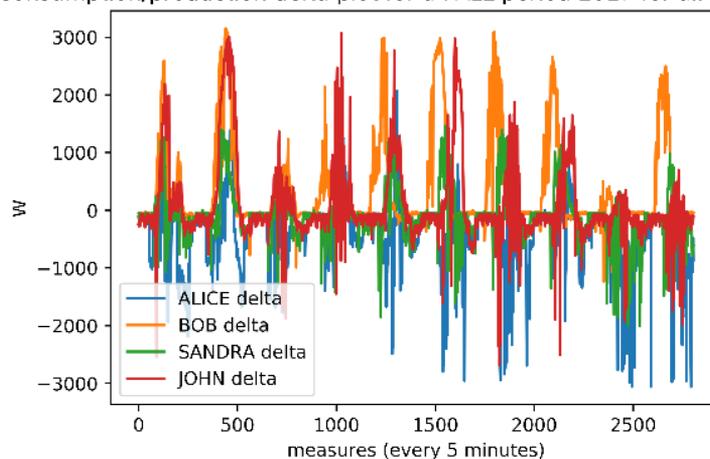


Abbildung 8: Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch für die vier Kund:innen in einem Zeitraum von jeweils 10 Tagen im Sommer (oben) und im Herbst (unten).

Das Simulationsmodell für Peer-to-Peer Energiehandel dient zur Kostenreduktion für die Teilnehmer:innen einer Energiegemeinschaft. In diesem Modell werden der gesamte Ein- und Verkauf, sowie die Gewinnanteile der Teilnehmer:innen berechnet. Um eine faire und optimale Ressourcenaufteilung zu sichern, wird das Verhältnis zwischen Verbrauch und Produktion für jeden Teilnehmer:innen berechnet und daraus abgeleitet, Listen von Produzenten und Konsumenten erstellt (Abbildung 9, links).

Abhängig von Energiebilanz der Community wird entweder die fehlende Energie vom Energieversorgungsunternehmen zugekauft oder die Überschüsse verkauft. Der Rest wird mit einem einheitlichen (günstigerem) Preis innerhalb der Community entsprechend dem Produktions-/Verbrauchsanteil jedes Teilnehmers bzw. jeder Teilnehmerin abgerechnet. Im Fall ausschließlicher Transaktionen mit dem Lieferanten rechnet jeder Teilnehmer bzw. jede Teilnehmerin direkt mit dem Lieferanten ab, ohne Transaktionen innerhalb der Community. Diese Vorgehensweise ist auf der rechten Seite in Abbildung 9 abgebildet.

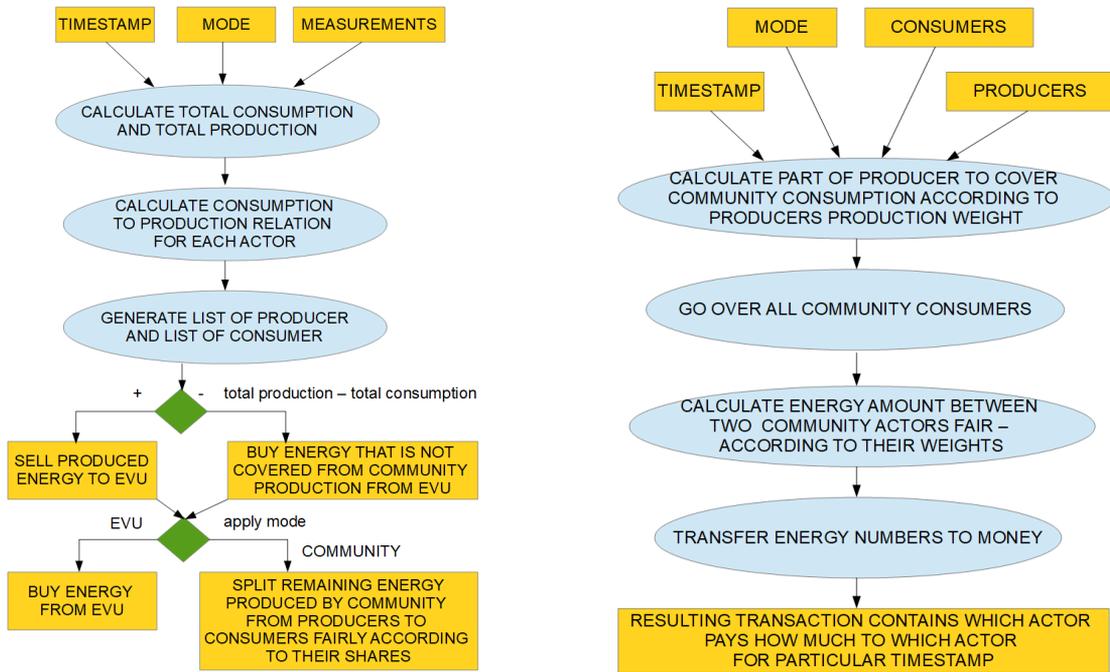


Abbildung 9: Arbeitsablauf, um Energieflüsse (links) und Geldflüsse zwischen Gemeinschaftsmitgliedern zu berechnen (rechts)

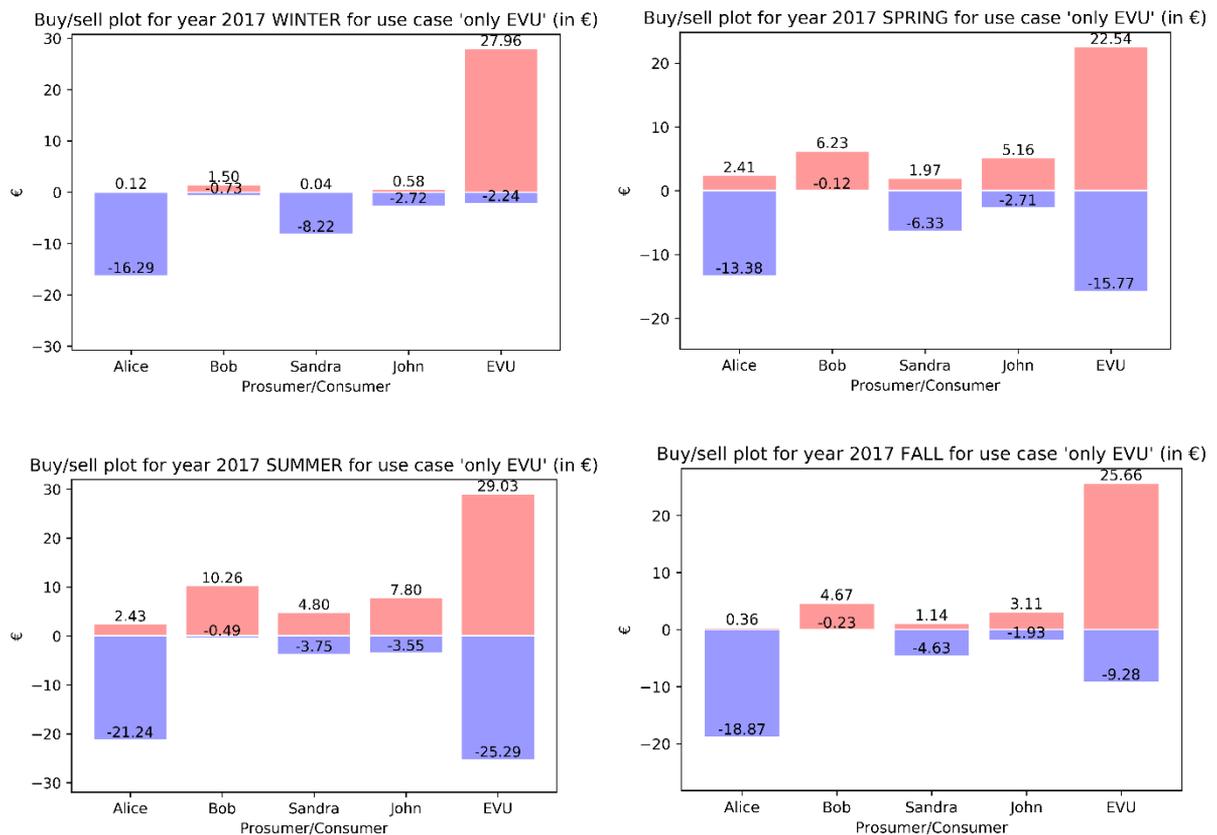


Abbildung 10: Ein- und Verkauf von Energie für das Jahr 2017, aufgeteilt auf die vier Jahreszeiten für alle Teilnehmer:innen der Energiegemeinschaft.

Der entwickelte Algorithmus für den Peer-to-Peer Energiehandel wurde auf realen Daten von vier Kund:innen mit PV-Anlagen (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6) angewendet. Für die Qualitätssicherung wurden entsprechende Unit-Tests entwickelt, die Ergebnisse können auf beliebige Art dargestellt werden: Ankauf/Verkauf pro Teilnehmer:in für verschiedene Zeitperioden (Jahr, Jahreszeit, Monat, Tag) in kWh oder €, wie beispielsweise in Abbildung 10 (Ein- und Verkauf von Energie für das Jahr 2017, aufgeteilt auf die Jahreszeiten) für jeden Teilnehmer bzw. jede Teilnehmerin der Gemeinschaft dargestellt.

2.1.5. Modellierung möglicher Blockchain-Anwendungen für Energiegemeinschaften

Auf der Simulationsebene wurde im Projekt ein MATLAB-Modell erstellt, das eine lokale Energiegemeinschaft (LEC) und ihre Teilnehmer:innen repräsentiert. Es werden verschiedene Haushalte mit jeweils einer PV-Anlage, einem lokalen privaten Batteriespeichersystem und dem klassischen Netzzugang simuliert. Diese Haushalte kooperieren innerhalb der Community, um den Eigenverbrauch des gesamten Haushaltsclusters mit Hilfe der Blockchain-Technologie zu maximieren. Es wurden mehrere Szenarien und verschiedene Optimierungsstrategien definiert, um sich als virtuelles Kraftwerk selbst zu organisieren und Flexibilitätsdienste anzubieten sowie vordefinierten Lastprofilen zu folgen. Ein ideales Szenario – auf Basis mathematischer Optimierung – mit minimalen aggregierten Energiekosten innerhalb der lokalen Energiegemeinschaft wird als Basis für Potentialanalysen anderer Szenarien verwendet. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Szenarien auf der Grundlage der Kosten jedes einzelnen Kunden bzw. jeder einzelnen Kundin wurde durchgeführt. Darüber hinaus wurde untersucht, welche Parameter notwendig sind, um verschiedene Algorithmen dezentral auf einem Blockchain-System auszuführen und welche technologischen Optionen zur Verfügung stehen.

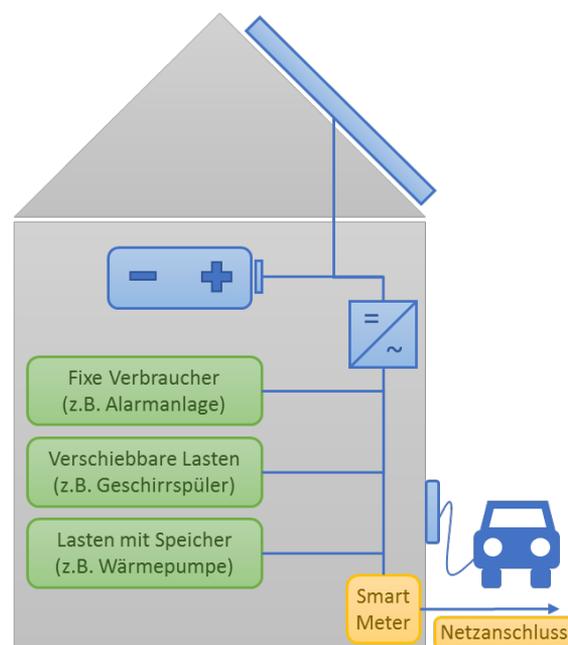


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Haushalts innerhalb der LEC mit unterschiedlichen Verbrauchstypen (fixer Verbrauch ohne Flexibilitätspotential, verschiebbare Lasten, Lasten mit Potential zur Speicherung), PV-Anlage, lokale Batterie, Wechselrichter, Smart Meter, Elektrofahrzeug und Netzanschlusspunkt.

Energiemanagement-Systeme (EMS) können eine PV-Anlage, ein Batteriespeichersystem, einen Wechselrichter, eine Ladestation für Elektrofahrzeuge, verschiedene Arten von Lasten, einen Smart Meter und eine zentrale Recheneinheit auf Haushaltsebene in Überwachung und Steuerung vereinen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 11 dargestellt. Das PV-Modul wird durch den Wechselrichter so gesteuert, dass es auf seinem Leistungsmaximum arbeitet und gleichzeitig die Sicherheitskriterien erfüllt sind. Die Energiespeicher ermöglichen den Ausgleich von Produktions- und Verbrauchsspitzen. Die Smart Meter messen Verbrauch und Erzeugung und stellen die Daten dem Netzbetreiber sowie der lokalen Recheneinheit zur Verfügung.

Basierend auf Messdaten und zur Verfügung stehenden Tarifinformationen kann ein lokaler Algorithmus entscheiden, ob die erzeugte Energie genutzt, gespeichert oder verkauft werden soll [9]. Darüber hinaus können vorgegebene Lastprofile zur Einhaltung auf Kundenebene vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt werden. Die Kapazitäten von Elektrofahrzeugen können genutzt werden, um in Zeiten hoher PV-Erzeugung den Ladevorgang auszuführen, dadurch Lastspitzen im Netz zu reduzieren und letztendlich die Netzstabilität zu erhöhen. Eine erneute Entladung der EV-Batterien in das Netz zu Flexibilitätszwecken (V2G) ist derzeit allerdings nicht rentabel [10]. Auch zeitlich verschiebbare Lasten (z.B. Waschmaschine, Geschirrspüler) oder speicherbare Lasten (z.B. Klimaanlage, Heizung, Kühlung) könnten zur Erhaltung der Netzstabilität genutzt werden.

Load and generation profiles for summer, winter, and transition time

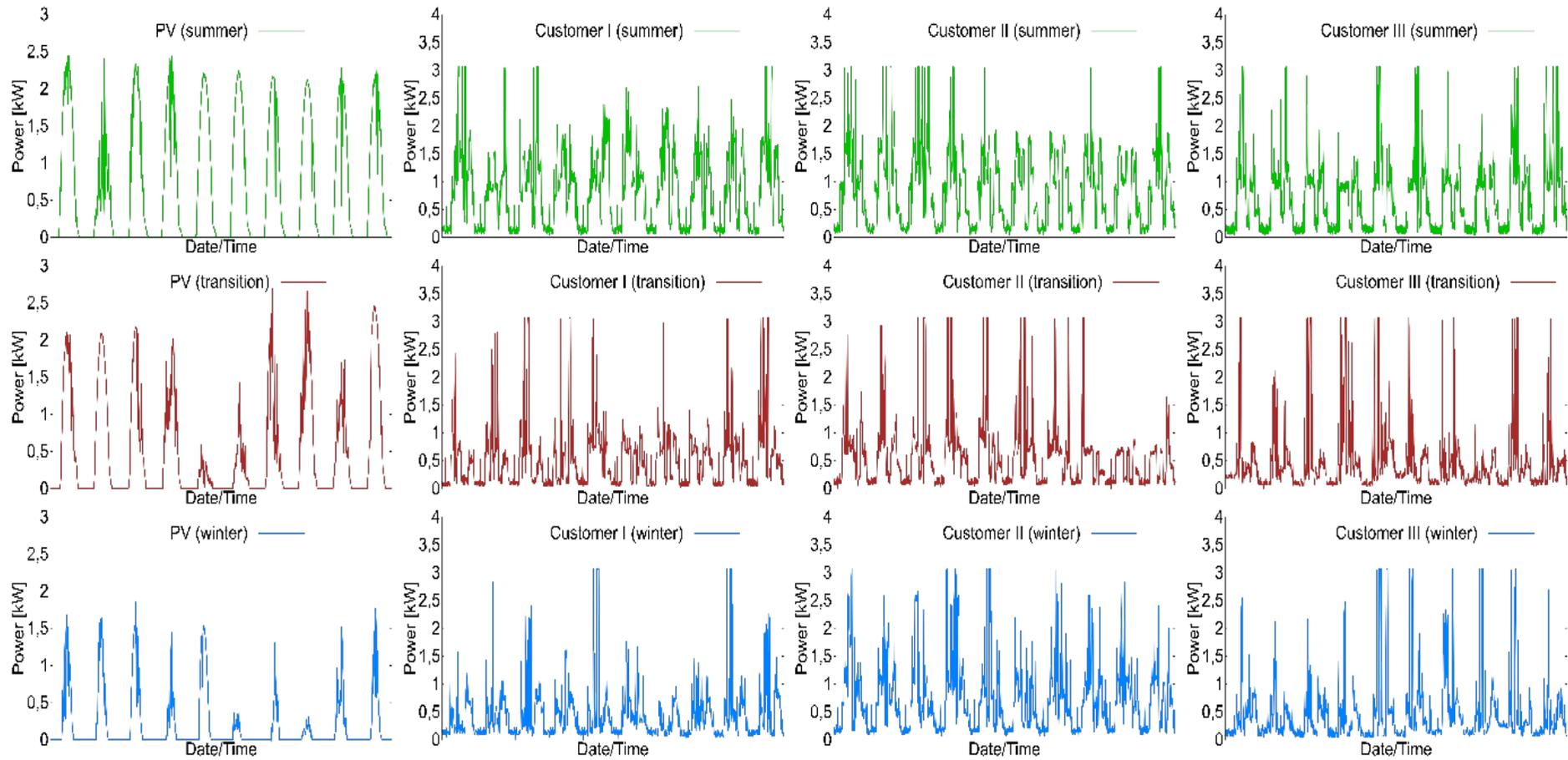


Abbildung 12: Erzeugungs- und Verbrauchsprofile verschiedener Kund:innen und Jahreszeiten (Sommer, Winter, Übergangszeit).

Nachfolgend wird ein MATLAB-Modell vorgestellt, das eine lokale Energiegemeinschaft repräsentiert, die eine ideale Verteilung der Energie innerhalb der Gemeinschaft anstrebt, wobei Spannungs- und Stromstärken nicht berücksichtigt werden – der Fokus liegt ausschließlich auf der Verteilung der Energie. Alle Komponenten (z.B. PV, Batteriespeicher) werden separat modelliert und können in den teilnehmenden Haushalten integriert oder in der Gemeinde selbst als gemeinsame Ressource genutzt werden. Ein globales Energiemanagementsystem (EMS) ist für die Verteilung der produzierten und benötigten Energie innerhalb der Gemeinschaft verantwortlich.

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, werden historische Erzeugungs- und Verbrauchsprofile aus dem Innovationslabor act4.energy verwendet. Abbildung 12 zeigt die Profile für drei Kund:innen. In der ersten Spalte ist das Erzeugungsprofil für Sommer (oben), Übergangszeit (Mitte) und Winter (unten), in den Spalten zwei bis vier die Lastprofile für drei verschiedene Kund:innen und Jahreszeiten dargestellt. Die Simulationen wurden für einen Zeitraum von jeweils zehn Tagen für Sommer, Winter und Übergangszeit durchgeführt, um saisonale Effekte zu berücksichtigen. Aufgrund der hohen Simulationszeit wurde auf eine vollständige Berechnung von 365 Tagen verzichtet.

Da die Blockchain als Schnittstelle für den Datenaustausch dienen, ein Abrechnungssystem bereitstellen und die vorgeschlagenen Algorithmen ausführen könnte, wird untersucht, welche Daten auf einer Blockchain bereitgestellt werden müssen, um die Anforderungen für diese Zwecke zu erfüllen. Auf der Grundlage der Ergebnisse werden Empfehlungen für die Realisierung eines Blockchain-basierten Systems abgeleitet.

Im Simulationsmodell wird davon ausgegangen, dass die Sonneneinstrahlung an jedem Standort der lokalen Energiegemeinschaft gleich ist und es keine Verschattung durch Bäume oder Gebäude gibt. Darüber hinaus wird für jeden Kunden bzw. jede Kundin die gleiche PV-Anlage angenommen, so dass für alle Haushalte das gleiche Erzeugungsprofil verwendet werden kann – ohne Beschränkung der Allgemeinheit. Aufgrund nicht vorhandener Informationen über die Eigenschaften der Lasten der Haushalte (Typ, verschiebbar, speicherbar) werden alle Lasten als Primärlasten modelliert, was bedeutet, dass sie sofort bedient werden müssen, entweder durch Nutzung der eigenen PV-Produktion, durch Entladung der Batterie oder durch Bezug von Energie aus dem öffentlichen Netz.

Die Daten aus den Erzeugungs- und Lastprofilen werden über 15 Minuten gemittelt. Als speicherbare Last wird für jeden Kunden bzw. jede Kundin ein Batteriespeichersystem angenommen (dies könnte aber auch ein Warmwasserspeicher oder eine Wärmepumpe sein). Es wird als Blackbox mit Lade- und Entladeleistung als Eingangsparameter modelliert. Auf der Grundlage dieser Werte sowie des Wirkungsgrads und der Selbstentladung wird für jeden Zeitschritt der Ladezustand der Batterie berechnet. Der Wechselrichter wird als Hybrid-Wechselrichter modelliert – die Batterie kann auf der DC-Seite über einen zusätzlichen Ausgang geladen werden, was zu drei verschiedenen Wirkungsgraden führt, einem von DC zu DC, AC zu DC und DC zu AC. Unterschiedliche Charakteristiken der Parameter für alle Komponenten sind auf die verschiedenen Haushalte innerhalb der Gemeinde verteilt, um unterschiedliche Bedingungen in der Simulation abzudecken.

In der Simulation werden drei Haushalte abgebildet und an ein globales Energiemanagement-System (EMS) angeschlossen. Darüber hinaus werden für einige Szenarien auch ein Gemeinschaftsspeicher sowie eine PV-Gemeinschaftsanlage angenommen und an das EMS angeschlossen.

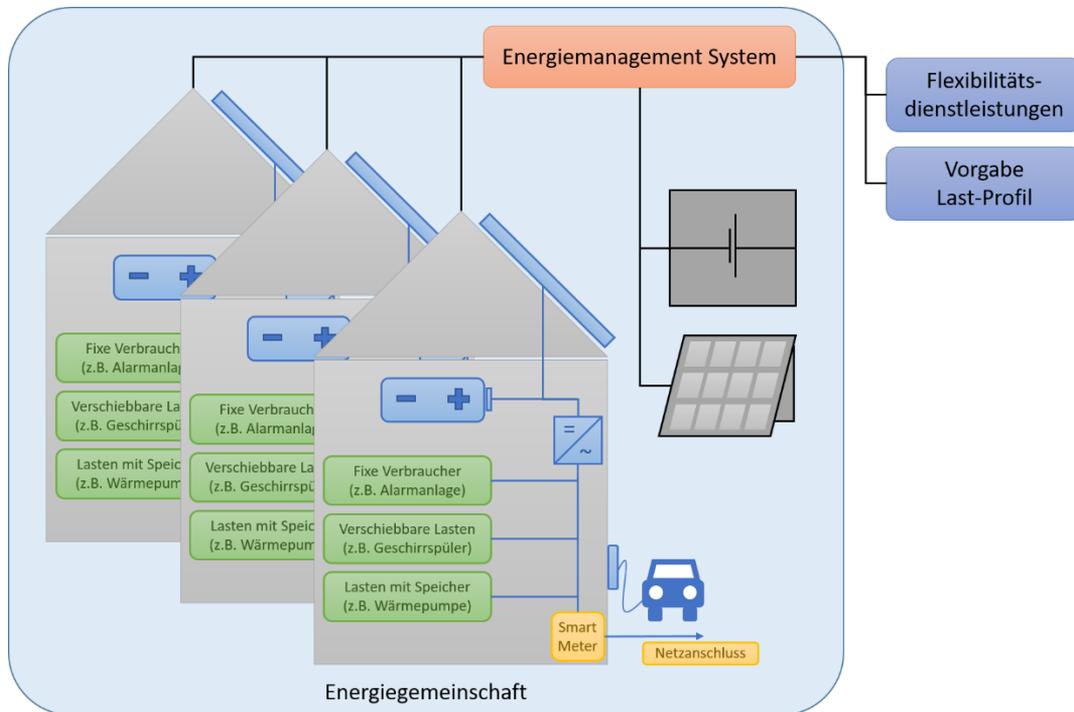


Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Energiegemeinschaft mit unterschiedlichen Haushalten, einem Gemeinschaftsspeicher und einer gemeinsamen PV-Anlage. Über ein Energiemanagement-System sind die Komponenten verbunden und können Flexibilitätsdienstleistungen bereitstellen sowie vorgegebenen Lastprofilen folgen.

Abbildung 13 zeigt das Modell des simulierten LEC mit verschiedenen an das EMS angeschlossenen Haushalten, einem Gemeinschaftsspeicher, einem Photovoltaikkraftwerk, einem globalen EMS sowie die Möglichkeit, Flexibilitätsdienste anzubieten und einem gegebenen Lastprofil zu folgen. Jeder Haushalt ist in der Lage, in zwei verschiedenen Modi zu arbeiten:

- Egozentrischer Modus: Zuerst wird der eigene Energiebedarf (vollständig) gedeckt, der Energieüberschuss wird in die eigene Batterie eingespeichert und schließlich in das Netz eingespeist.
- Minimalistischer Modus: Zuerst wird nur der Primärbedarf gedeckt, der Überschuss wird allerdings im Unterschied zum egozentrischen Modus nicht in die Batterie eingespeichert, sondern der Gemeinschaft zur Deckung ihres Bedarfs zur Verfügung gestellt, erst im letzten Schritt kommen die Batteriespeicher zum Einsatz.

Das globale EMS kommuniziert kontinuierlich mit allen Haushalten und ist in der Lage, Informationen über deren Energieüberschuss oder -bedarf, den Ladezustand usw. abzurufen. Es verfügt über einen vollständigen Überblick über den Zustand aller Haushalte in der Gemeinde und berechnet die Energiemenge, die von jedem Haushalt bereitgestellt oder konsumiert oder in die Batterie eingespeichert wird. Das EMS ist dafür verantwortlich, eine gerechte Verteilung des Energieüberschusses zu berechnen.

Simulationsszenarien

Im Projekt wurden sechs verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Anforderungen untersucht, die nach ihren Zielen kategorisiert werden:

- Optimierung auf Haushaltsebene (*HH_xxx*)
- Optimierung auf Gemeindeebene (*LEC_xxx*)

Im Folgenden werden die untersuchten Szenarien im Detail erläutert:

Basis-Szenario: Es wurde ein Szenario als Vergleichsbasis für die Analyse der Optimierungsszenarien erstellt. Hierbei ist jeder Haushalt mit einer PV-Anlage, aber ohne eigenem Batteriespeicher ausgestattet. Die erzeugte Energie kann somit sofort beim Kunden bzw. der Kundin verbraucht bzw. ins Netz eingespeist werden.

Szenario I (HH Opt): Im ersten Szenario (sowie auch in den folgenden) ist jeder Haushalt mit einer PV-Anlage und einem eigenen Batteriespeicher ausgestattet. Die Nutzung der Batterie wird durch ein mathematisches Optimierungsmodell berechnet. Verschiedene Arten von Prognosen (Preis, Erzeugung, Verbrauch) werden als Eingangsparameter verwendet. Im Allgemeinen hat die Qualität der verwendeten Prognosen einen großen Einfluss auf die Optimierung und damit auf die Energiekosten jedes Kunden bzw. jeder Kundin. Im Simulationsmodell werden optimale Prognosen (das reale Verhalten ist gleich der Prognose) für Erzeugung und Verbrauch angenommen, um letztendlich die Qualität der Szenarien bewerten zu können – ohne Einfluss der Prognosequalität.

Szenario II (HH Heu): Dieses Szenario basiert auf einem heuristischen Ansatz zur Optimierung des Verhaltens jedes einzelnen Haushalts. Jeder Kunde verwendet die von ihm selbst erzeugte Energie zur Deckung seines Verbrauchs. Der PV-Überschuss wird zunächst in der Batterie gespeichert und ins Netz eingespeist, wenn die Batterie bereits vollständig geladen ist. Ist andererseits der Bedarf höher als die Produktion, wird zuerst Energie aus der Batterie verwendet und dann aus dem Netz verbraucht.

Szenario III (LEC Opt): In diesem Szenario werden die aggregierten Energiekosten der Gemeinde durch die Verwendung eines Optimierungsalgorithmus minimiert. Aufgrund dieser übergeordneten Optimierung kann der PV-Überschuss an andere Kund:innen innerhalb der Gemeinde verteilt und somit der Energietransfer am Netz-Anschlusspunkt im Vergleich zu den Szenarien davor minimiert werden.

Szenario IV (LEC EMS): Im vierten Szenario wird ein Energiemanagementsystem auf Gemeinschaftsebene mit Zugang zu allen Kundendaten (Erzeugung, Verbrauch, Ladezustand der Batterie) eingesetzt. Das implementierte EMS verwendet keine Art von Prognosen.

Szenario V (LEC EMS Ext): Das vorherige Szenario (*LEC EMS*) wird um einen gemeinsamen Batteriespeicher und eine gemeinsame PV-Anlage erweitert. Beide Geräte werden in ihren Eigenschaften so gewählt, dass sie den Verbrauch im Sommer zu 100 Prozent decken.

Szenario VI (LEC VPP): Das letzte Szenario basiert auf dem vorherigen, erweitert um ein vorgegebenes Leistungsprofil, dem die Gemeinschaft auf aggregierter Lastebene folgen sollte.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der simulierten Szenarien sowie den Eigenschaften.

Tabelle 1: Eigenschaften der Szenarien

Szenario	Eigenschaften							
	Optimierung: Haushalt	Optimierung: Gemeinschaft	EMS vorhanden	Gemeinschafts-PV und Batterie	Lastprofil vorgegeben	Preise und Tarife	Prognose	Mathematische Optimierung
HH_Opt	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓
HH_Heu	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
LEC_Opt	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓
LEC_EMS	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
LEC_EMS_Ext	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
LEC_VPP	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

2.2. Co-Creation-Prozesse

Unser Energiesystem durchläuft derzeit einen fundamentalen Wandel. Mit dem Ziel, unseren Energiebedarf (bilanziell) zu 100 % aus nachhaltigen, erneuerbaren Quellen zu decken, ist ein weitgehender Umbau des gesamten Systems, von der Erzeugung bis zur Nutzung der Energie, erforderlich. Die dafür notwendigen neuen Technologien sind in den meisten Fällen digital und erfordern einen hohen Grad an Datenverfügbarkeit und Datenaustausch. Der Komplexitätsgrad wird dabei in den meisten Fällen sehr hoch, so dass Nutzerinnen und Nutzer oft nicht in der Lage sind, die Zusammenhänge zu überschauen und zu verstehen. Das gilt in besonderem Maße für Systeme, die auf Blockchain-Technologien aufbauen.

Damit sich neue, innovative Technologien auch in der Anwendung durchsetzen können, ist ein Mindestmaß an Vertrauen in diese Technologien von Seiten der Anwender:innen notwendig. Ziel des im Projekt **SonnWende+** durchgeführten Co-Creation Prozesses war es daher, mit verschiedenen Nutzergruppen die Einschätzungen zu Relevanz, Akzeptanz und Potential der Blockchain-Technologie für den Energiebereich zu erheben und daraus entsprechende Erkenntnisse für die zukünftige anwendernahe Entwicklung dieser Systeme zu gewinnen. Dafür wurde eine Umfrage und Workshops mit Stakeholdern sowie zwei Co-Creation Workshops mit Bürger:innen durchgeführt.

Bei den Co-Creation Workshops, die im Innovationslabor act4.energy mit Bürger:innen der Innovationslaborregion durchgeführt wurden, standen Fragen zu den Bereichen Usability, User Interfaces, Kund:innen-Nutzen und Kund:innen-Vertrauen im Vordergrund. Die beiden durchgeführten Workshops waren:

- Co-Creation Workshop „Blockchain-Technologie für E-Mobility Services“ mit dem Fokus auf Nutzer:innen-Feedback zu digitalen Zahlungsangeboten / Bezahlung über Kryptowährungen für E-Ladedienstleistungen durchgeführt am 25.10.2018 in Stegersbach.
- Co-Creation Workshop „Erneuerbare Energiegemeinschaften mitgestalten“ mit einem Fokus auf Nutzer:innen-Feedback zum Austausch und lokaler Nutzung von erneuerbarer Energie mit Hilfe von Blockchain-Technologie durchgeführt am 12.09.2019 in Ollersdorf.

Beide Workshops waren von jeweils rund zehn Interessent:innen besucht, die über das Netzwerk des Innovationslabors persönlich eingeladen wurden. Es handelte sich daher nicht um eine repräsentative Auswahl, sondern um bereits an den Themen Energiewende, erneuerbare Energien und regionale Energieversorgung interessierten Bürger:innen aus der Innovationslaborregion.

Da die Einstellung der Entscheidungsträger:innen in der Energiewirtschaft gegenüber der neuen Blockchain-Technologie ebenfalls eine große Rolle für weitere Implementierungen in dem Bereich spielt, wurde eine österreichweite Befragung durchgeführt. Die Interviews fanden im April 2018 mittels anonymer Telefonbefragung (CATI – Computer Assisted Telephone Interviews) statt. An der Befragung nahmen 27 Entscheidungsträger:innen aus dem Bereich Energiewirtschaft teil, die jeweils den vollständigen Fragenkatalog (siehe Anhang, 7.1 Fragebogen (Stakeholder-Befragung)) von zehn Fragen beantworteten. Die Interviewpartner umfassten EVUs und Verteilnetzbetreiber, spezialisierte Erzeuger von erneuerbaren Energien, Aggregatoren, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen sowie Consulting- und Softwareunternehmen.

Im Sinne eines kontinuierlichen Prozesses wurden gegen Projektende die Ergebnisse und Erkenntnisse aus **SonnWende+** an die Stakeholder zurückgespielt und in Form eines Workshops diskutiert und Feedback eingeholt.

3 Ergebnisse

3.1. Blockchain

Der Einsatz von Blockchain-Systemen im Energiesektor hat weltweit bereits viel Aufmerksamkeit erfahren und große und kleine Energieversorgungsunternehmen sowie Netzbetreiber dazu veranlasst, verschiedene Proof-of-Concept-Studien durchzuführen. Im Rahmen des Projekts **SonnWende+** ist das Konsortium zum Schluss gekommen, dass typische öffentliche Blockchain-Systeme für viele Anwendungen im Energiesektor erhebliche Einschränkungen in Bezug auf den Datendurchsatz, Latenzzeiten sowie Kosten aufweisen. Bei Berichten über die Leistung von Blockchain-Systemen müssen verschiedene Zahlen und Behauptungen vorsichtig interpretiert werden. Häufig wird TPS (Transaktionen pro Sekunde) als einzige relevante Leistungskennzahl dargestellt. Es gibt jedoch zwei wichtige Vorbehalte:

- TPS schlägt vor, eine einfache Metrik zu sein, die einen einfachen und aussagekräftigen Vergleich verschiedener Transaktionssysteme ermöglicht. Das ist jedoch nicht der Fall, denn die erreichbare TPS-Zahl hängt von einer Vielzahl von Faktoren und Parametern ab, wobei oft scheinbar kleine Änderungen große Unterschiede ausmachen.
- Obwohl TPS eine wichtige Metrik für viele Anwendungen ist, ist sie bei weitem nicht die einzige wichtige Metrik, wenn man ein belastbares Blockchain-Netzwerk betrachtet. Häufig werden hohe TPS-Werte erreicht, wenn das Netzwerk mit einer kleinen Anzahl von Teilnehmer:innen (Validator-/Miner nodes) betrieben wird, was jedoch keine große Herausforderung darstellt. Beispielsweise verarbeitet das globale Zahlungsnetzwerk von Visa durchschnittlich etwa 4.000 TPS [11] und kann bei hoher Nachfrage wahrscheinlich das 10-fache verarbeiten.

Um ein vollständigeres Bild zu erhalten, wurden im Projekt wichtige Kennzahlen analysiert, um ein geeignetes Blockchain-System für den Energiesektor zu finden und die entsprechenden Qualitäten zu verbessern.

Der von Vitalik Buterin (Mit-Begründer von Ethereum) geprägte Begriff „Blockchain Trilemma“ [12] beschreibt die Schwierigkeit, Dezentralisierung, Sicherheit und Skalierbarkeit miteinander in Einklang zu bringen. Dies ist ein äußerst schwieriges Problem, denn obwohl der Durchsatz eines Blockchain Netzwerks auf etwa 1.000 bis 1.500 TPS erhöht werden kann, gibt es bei der Dezentralisierung in der Regel Kompromisse. Das bedeutet auch, dass die Sicherheit nicht mehr im gleichen Maße gewährleistet ist, denn ein konzentrierter Angriff oder ein einfacher Stromausfall im zentralisierten Blockchain-System kann alles lahmlegen.

Die Eigenschaften eines Blockchain-Systems werden durch mehrere Faktoren bestimmt, vor allem aber durch das verwendete Konsensprotokoll. Bitcoin und viele andere Blockchains verwenden das Proof-of-Work-Konsensprotokoll [13], das für seinen enormen Energieverbrauch bekannt ist – Bitcoin verbraucht in etwa so viel Strom wie ganz Österreich (70 TWh/a [14]).

In Blockchain-Systemen, in denen jeder an der Block-Erzeugung teilnehmen kann, ist der Transaktionsdurchsatz eher gering. Um die Anforderungen an Rechenleistung und Netzwerk-Performance niedrig zu halten – mit dem Ziel, weltweit möglichst vielen Menschen die Teilnahme zu ermöglichen – sind diese Systeme sehr konservativ parametrisiert. Infolgedessen hat Bitcoin derzeit einen maximalen Durchsatz von etwa 4 TPS und Ethereum von etwa 15 TPS. Ethereum strebt eine Verbesserung des

bereits deutlich niedrigeren Energieverbrauchs pro Transaktion im Vergleich zu Bitcoin an, indem das gesamte Netzwerk auf den Proof-of-Stake-Konsens [15] umgestellt wird. Delegate Proof-of-Stake (dPoS) oder Proof-of-Authority (PoA) sind Lösungen, bei denen die Dezentralisierung reduziert wird, was zu einem deutlich niedrigeren spezifischen Energieverbrauch pro Transaktion, kürzeren Blockzeiten von etwa 4 bis 5 Sekunden und deutlich höheren TPS-Zahlen führt. Zensurreistenz – d.h. der Widerstand gegen die Zensur bestimmter Transaktionen – kann aber in solchen Systemen nicht mehr unbedingt gewährleistet werden.

Ein weiteres – oft unterschätztes – Problem ist die meist unvermeidliche Bildung von Gabelungen in der Blockchain. Dies tritt auf, wenn die Verteilung von Transaktionen und Blöcken nicht für jeden Validator gleich schnell erfolgt, was dazu führt, dass zwei oder mehr konkurrierende gültige Blöcke in einer bestimmten Blockhöhe entstehen. In solchen Situationen wird die so genannte Fork-Choice-Regel verwendet, um zu entscheiden, welches der richtige Fork („Ast“) ist. In Proof-of-Work-Systemen wird die Auswahl des „Leaders“ für die Blockerzeugung durch die Fork-Choice-Regel und die schnellste Lösung eines komplexen Puzzles bestimmt. In dPoS- und PoA-Systemen handelt es sich in der Regel um einen Round-Robin-Algorithmus, bei dem einer der Validatoren den Block produziert und die anderen Validatoren diesen überprüfen. Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass der Einsatz von dPoS- und PoA-Systemen zu einer signifikanten Steigerung der Energieeffizienz und damit zu geringeren Kosten führt; viele Skalierbarkeitsprobleme bleiben aber ungelöst. Ein weiteres Problem ist die oft hohe Hürde für neue Teilnehmer:innen, sich am Validatoren-Netzwerk zu beteiligen. Wenn diese Blockchain-Systeme nicht öffentlich verfügbar sind, sodass Benutzer:innen auf einer Whitelist geführt werden müssen, bevor sie Interaktionen zulassen, gehen viele Vorteile von Blockchain-Systemen verloren.

3.1.1. Blockchain-Systeme im Energiesektor

Eine der Grundvoraussetzungen für den Einsatz von Blockchain-Systemen im Energiesektor ist deren Programmierbarkeit (über sogenannte Smart Contracts). Das Blockchain-Ökosystem „Ethereum“ wurde bereits während der Konferenz ComForEn 2018 [16] als führendes System hervorgehoben, was auch ein Jahr später noch gültig ist. Ethereum selbst hat jedoch derzeit einen sehr begrenzten maximalen Durchsatz von ca. 15 TPS. Dies wird sich mit Ethereum 2.0 [17] zwar deutlich verbessern, aber es ist noch nicht klar, wann der mehrstufige Prozess des Übergangs zu Ethereum 2.0 abgeschlossen sein wird (Größenordnung: einige Jahre) und was genau die Leistungsmerkmale und Einschränkungen dieses Blockchain-Netzwerks mit 64 separaten Blockchains sein werden. Gegenwärtig entwickelt sich die Ethereum-Blockchain in Richtung eines dezentralisierten Finanzsystems. Wenn das Innovations- und Wachstumstempo in diesem Ökosystem auf dem derzeitigen Niveau bleibt oder sich weiter beschleunigt, ist es nicht unwahrscheinlich, dass selbst die Transaktionskapazität von Ethereum 2.0 schnell gesättigt sein wird, was die Transaktionskosten für Anwendungen aus dem Energiesektor schnell unwirtschaftlich werden lässt.

Es wird daher davon ausgegangen, dass, obwohl die Ethereum-Technologie in Energiesystemen eingesetzt wird, viele Anwendungen in anderen Netzen als Ethereum selbst betrieben werden. Wie groß und wie offen diese Netze sein werden, ist noch nicht absehbar und wird sicherlich von den jeweiligen Anwendungen abhängen. Im Allgemeinen ist die Sicherheit von Blockchain-Systemen sehr hoch, aber es gibt viele Einflussparameter, abhängig von den Anwendungsfällen. Wenn z.B. ein Blockchain-System zur Übermittlung von Sensorwerten zur Steuerung eines Energiesystems verwendet wird, würde dies

ein höheres Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit erfordern als ein Blockchain-System, das lediglich Daten für die öffentliche Rechnungsprüfung zeitstempelt.

Die im Projekt **SonnWende+** untersuchten Anwendungsfälle inklusive ihrer Bewertung in Hinblick auf die Anwendung in Blockchain-Systemen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Bewertung der **SonnWende+** Anwendungsfälle.

Anwendungsfall	Anforderungen				
	Transaktionen	TPS pro 100.000	Latenzzeit ¹⁷	Zensur-resistenz ¹⁸	Finalität ¹⁹
P2P-Handel	5 pro 15 Minuten pro Teilnehmer	~ 550 TPS	Wichtig (< 5 sec.)	Sehr wichtig	Sehr wichtig
Energiekonto	1 pro Tag pro Kunde	< 1 TPS	Wichtig (< 5 sec.)	Weniger wichtig	Weniger wichtig
Lending-based Crowdfunding	1 pro Tag pro Teilnehmer	< 1 TPS	Wichtig (< 5 sec.)	Nicht verfügbar	Weniger wichtig
Interaktions-loses Laden	5 pro Tag pro Kunde	~ 6 TPS	Wichtig (< 5 sec.)	Wichtig	Wichtig

Die Tabelle zeigt deutlich, dass der P2P-Handel einen sehr hohen Durchsatz erfordert und auch die höchsten Anforderungen in den Bereichen Latenz, Zensurresistenz und Finalität stellt. Aktuelle Knotensoftware und Konsensus-Algorithmen sind noch nicht geeignet, diese Anforderungen in realen Einsatzszenarien zu erfüllen. Daher wurden verschiedene Konsensalgorithmen sorgfältig untersucht, um die oben genannten Anforderungen möglichst gut zu lösen.

Der sogenannte „Honey Badger BFT-Konsens“ (HBBFT) ist - zumindest nach den Tests von A. Miller et al. [18] - geeignet, um genügend Leistung für Anwendungen wie den P2P-Handel auf einem Blockchain-System zu liefern. Um dies zu bestätigen, musste der HBBFT-Konsensalgorithmus in eine bestehende Knotensoftware eingebaut und in einer realen Umgebung getestet werden. Die Knoten-Software von Parity Technologies ("Parity Ethereum") ist bereits mit mehreren, auswählbaren Konsens-Algorithmen ausgestattet und zum Vergleich mit HBBFT bietet sich der AuRa (Authority Round) Konsensus an, der in vielen Netzen im Produktiveinsatz ist. Parity hat einen erheblichen Anteil unter den Knoten, die das Ethereum-Mainnet betreiben. Sie ist in der Programmiersprache „Rust“ implementiert, die dafür bekannt ist, dass sie hervorragende Sicherheitsgarantien bietet und gleichzeitig die Leistung der Programmiersprache C++ erreicht. Deshalb wurde beschlossen, HBBFT in Parity Ethereum zu integrieren, was den Vorteil hat, dass man eine Codebasis verwendet, die ausgereift ist und von der größeren Ethereum-Gemeinschaft ständig verbessert wird.

¹⁷ Zeit, bis eine Transaktion einem Block hinzugefügt wird

¹⁸ Fähigkeit von Validatoren, Blockerzeugern oder Poolbetreibern, Transaktionen zu zensieren

¹⁹ Zeit, bis eine Transaktion nicht mehr rückgängig gemacht werden kann oder höchst unwahrscheinlich rückgängig gemacht wird.

3.1.2. Honey Badger – Ein effizienter BFT-Konsensus-Algorithmus

Honey Badger BFT ist das erste praktische asynchrone BFT (Byzantinische fehlertolerante) Konsensprotokoll. Im Gegensatz zu den meisten Alternativen ist es auch ein führerloses Konsensprotokoll und bietet sofortige Finalität neuer Blöcke. Es verwendet eine Schwellenwertverschlüsselung, um die Beiträge zu einem neuen Block vor anderen Validatoren zu verbergen, bis der Block endgültig festgelegt ist, was eine hohe Zensurresistenz bietet.

Diese Eigenschaften führen zu einer einzigartigen Reihe von Vorteilen gegenüber konkurrierenden verfügbaren BFT-Konsensus-Algorithmen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

Latenzzeit

Die hohe Effizienz des Honey Badger BFT-Konsensus ergibt sich direkt aus seiner asynchronen Natur und sofortigen Finalität. Synchroner BFT-Protokolle stützen sich auf bestimmte Zeitparameter, um sicherzustellen, dass die Blockchain fortgesetzt wird, wenn ein bestimmter Validator nicht verfügbar ist oder sich böswillig verhält. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Blöcke in einem bestimmten Intervall zu erzeugen, unabhängig davon, ob Transaktionen zur Verarbeitung verfügbar sind oder nicht. Die Wahl dieser Timing-Parameter muss ein Gleichgewicht zwischen der Notwendigkeit einer Ausführung von Transaktionen mit geringer Latenz und der unnötigen Aufblähung der Blockchain mit einer hohen Häufigkeit von leeren Blöcken herstellen. Außerdem reagieren synchrone Protokolle empfindlich auf Verletzungen dieser Timing-Annahmen, da sie entweder lange Verzögerungen zwischen den Blöcken oder ausgeklügelte variable Blockzeit-Heuristiken zur Anpassung an sich ändernde Netzwerklatenzbedingungen erfordern.

Typische Auswahlmöglichkeiten für die Blockzeit in Ethereum-Protokoll Netzwerken sind 4 bis 15 Sekunden, wodurch ein minimaler Zeitabstand zwischen den Blöcken eingeführt wird und die Transaktionslatenz und der Durchsatz begrenzt werden (siehe Abbildung 14).

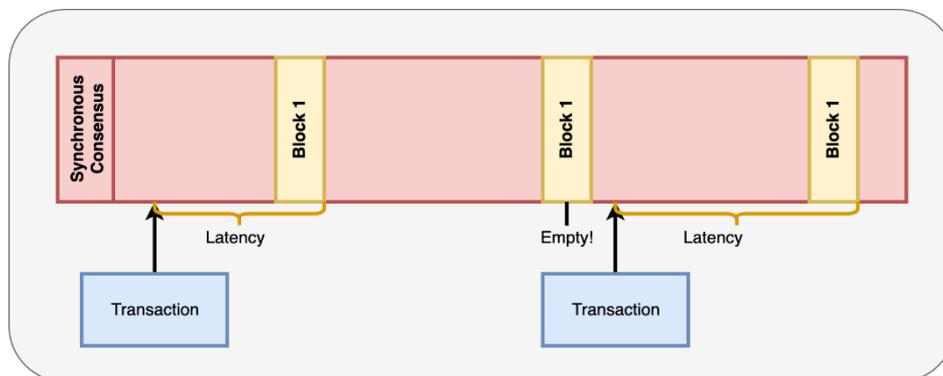


Abbildung 14: Darstellung der Transaktionslatenz bei synchronen Protokollen und deren Auswirkungen auf den Durchsatz.

Als asynchrones Protokoll benötigt Honey Badger BFT keine solchen Schranken und kann mit der Produktion neuer Blöcke in dem Moment beginnen, sobald neue Transaktionen zur Aufnahme verfügbar sind, während keine Blöcke produziert werden, wenn keine Transaktionen verfügbar sind. Der Konsensus-Algorithmus produziert genauso viele Blöcke, wie benötigt werden, wenn sie tatsächlich benötigt werden - nicht mehr und nicht weniger (siehe Abbildung 15).

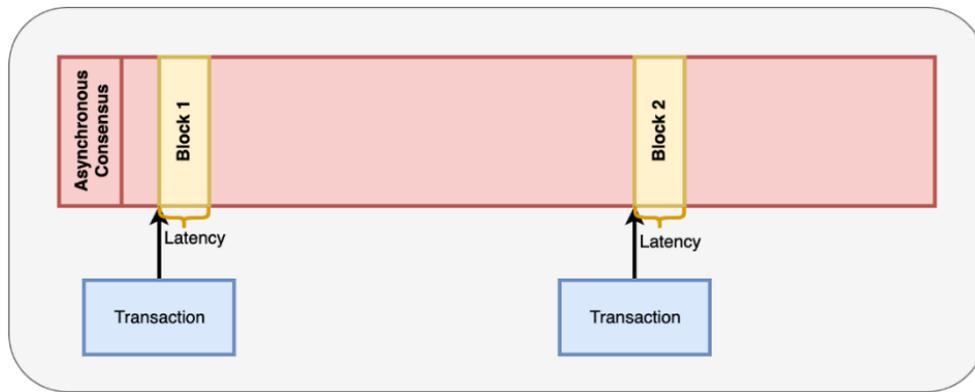


Abbildung 15: Neue Blöcke werden bei asynchronen Protokollen nur dann erzeugt, wenn Transaktionen vorhanden sind.

Es ist zu beachten, dass, wenn die Transaktionen nicht in einen einzigen Block passen, ein asynchrones Protokoll sofort mit der Erzeugung weiterer Blöcke beginnen kann, bis die Transaktionswarteschlange leer ist ("Bursts", siehe Abbildung 16).

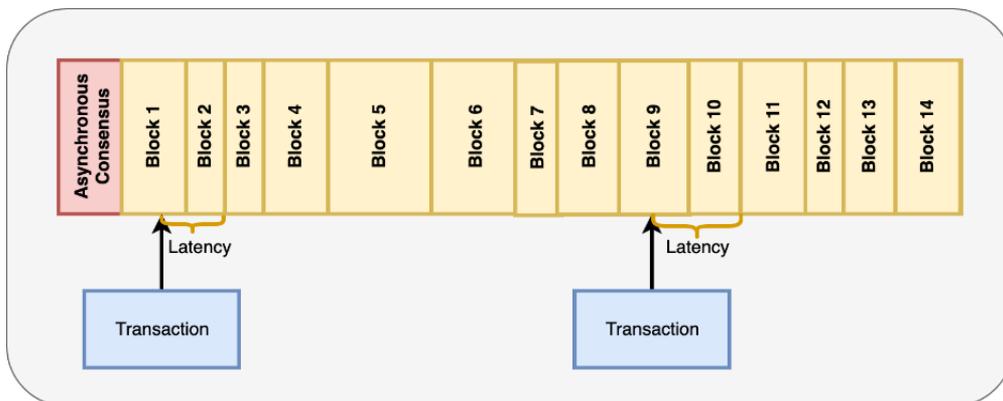


Abbildung 16: Es werden sofort neue Blöcke in asynchronen Protokollen erzeugt, wenn Transaktionen nicht mehr in einen einzigen Block passen.

Weiters ist zu beachten, dass die Zeit, die für die Erstellung eines Blocks benötigt wird, je nach schwankenden Netzwerk-Latenzen im Internet sehr unterschiedlich sein kann. Honey Badger BFT ist darauf ausgelegt, um sich an diese, sich ändernden Bedingungen, anzupassen, indem die Transaktionsverarbeitung so schnell oder langsam fortschreitet, wie es das Netzwerk erlaubt. Dieses widerstandsfähige Verhalten steht in krassem Gegensatz zu den meisten anderen Protokollen, die entweder vollständig blockieren oder massive Verlangsamungen erfahren, wenn sich die Netzwerkbedingungen über einen bestimmten Schwellenwert hinaus verschlechtern. Die Latenz ist in diesem Fall die Zeit bis zur Aufnahme einer Transaktion im nächsten Block.

Honey Badger BFT ist sehr effizient in Bezug auf:

- **Transaktions-Latenzzeit:** Transaktionen werden ohne künstliche Verzögerung verarbeitet.
- **Transaktions-Durchsatz:**
 - Die Häufigkeit der Blöcke wird nicht künstlich durch einen Blockzeitparameter eingeschränkt
 - Erstellt neue Blöcke auf Anforderung, keine obligatorische Wartezeit zwischen den Blöcken.
- **Speicherbedarf:** Es werden keine leeren Blöcke erzeugt, wenn es keine Transaktionen gibt.
- **Energiebedarf:** Es werden nur dann neue Blöcke erzeugt, wenn es Transaktionen zu verarbeiten gibt, ansonsten befindet sich das Netzwerk im Leerlauf.
- **Durchsatz:** Es kann immer der maximale Durchsatz erreicht werden, der bei den aktuellen Netzwerkbedingungen möglich ist.

Sofortige absolute Finalität

Bei anderen Konsensprotokollen, die heute in der Praxis verwendet werden, garantiert die Aufnahme einer Transaktion in einen Block in der Regel nicht ihre weitere Präsenz in der Blockchain, da der Block nicht sofort abgeschlossen wird. Dies führt zu weiteren Verzögerungen, bis die Endgültigkeit des Blocks mit einer vernünftigen Wahrscheinlichkeit gesichert ist (so genannte *confirmations/Bestätigungen*). Als Konsensalgorithmus ohne einen ausgewählten Block-Autor mit der Anforderung, dass mindestens 2/3 der Knoten jeden Block unterzeichnen müssen, garantiert das Honey Badger BFT die sofortige absolute Finalität [19] der neu produzierten Blöcke. Das bedeutet, dass zusätzlich zu den im vorigen Abschnitt erwähnten Effizienzvorteilen Transaktionen als endgültig betrachtet werden können, sobald sie in einen neuen Block aufgenommen werden.

Widerstand gegen Zensur

Die meisten anderen verfügbaren byzantinisch fehlertoleranten Konsensus-Algorithmen müssen pro Block einen Autor (engl. Leader) wählen, der die volle Kontrolle über den Inhalt des Blocks hat. Dieser Leiter kann die Menge der Transaktionen (falls vorhanden), die in den nächsten Block aufgenommen werden sollen, und die Reihenfolge dieser Transaktionen frei wählen, solange die Transaktionen gemäß dem Protokoll gültig sind. Als Algorithmus ohne Autor verhindert das Honey Badger BFT wirksam das Zurückhalten/Zensieren von Transaktionen, da jeder teilnehmende Validator einen Satz von Transaktionen zu jedem Block beitragen kann. Um zu verhindern, dass jeder teilnehmende Validator die Beiträge anderer kennt, wird ein Schwellwert-Kryptosystem verwendet. Der Schwellwert für die Entschlüsselung ist genau auf die Anzahl der Beiträge festgelegt, die zur Fertigstellung eines Blocks erforderlich sind. Das bedeutet, dass Validatoren, die zu einem Block beitragen, den Inhalt der einzelnen Beiträge erst dann lesen können, wenn der Block bereits abgeschlossen ist, wodurch Zensurangriffe auf bestimmte Transaktionen wirksam verhindert werden. Diese Verheimlichungstechnik bildet die Grundlage für weitere vorteilhafte Eigenschaften, die im Folgenden beschrieben werden.

Zufälligkeit

Für viele Algorithmen in der Informatik ist eine sichere Zufallsquelle von wesentlicher Bedeutung. Ein Beispiel dafür ist der Konsensus-Algorithmus selbst. Wie viele andere PoS-Protokolle stützt sich die Honey Badger BFT auf eine zufällige Auswahl von Validatoren für jede Blockerstellungperiode („Epoche“). In Ethereum wird dieses Problem in der Regel mit RANDAO [20] gelöst, einem Commit-Reveal-Schema zur Generierung von Zufälligkeiten. Eine solche generische Quelle der Zufälligkeit ist auch als Random Beacon bekannt. Es ist wichtig, dass solche Zahlen unvorhersehbar sind, bevor ein neuer Block

von Transaktionen endgültig ist. Die von der Honey Badger BFT verwendete Schwellwert-Kryptographie bietet eine solche Garantie. Kombiniert mit sofortiger Endgültigkeit führt dies zu einer sehr robusten Umgebung für den Aufbau von Geschäftslogiken, die eine sichere Zufälligkeit erfordert. Jeder Validator sendet eine Zufallszahl als Teil seines verschlüsselten Beitrags. Als solche ist sie erst entschlüsselbar, wenn der Block bereits endgültig ist, wodurch verhindert wird, dass ein einzelner Validator die Zufallszahl im Voraus kennt. Die Zufallszahlen werden mit Hilfe der "XOR"-Operation kombiniert, wodurch sichergestellt wird, dass die Zahl nicht vorhersehbar ist, solange ein einzelner Validator ehrlich ist.

Frontrunning

Der Begriff "Frontrunning" bezieht sich auf einen Angriff, wo sich jemand in Anwendungen einen persönlichen Vorteil verschaffen kann. Ein Angreifer kann das Zeitfenster zwischen der Bereitstellung und der Verarbeitung (durch Blockeinschluss) einer Transaktion ausnutzen, indem er der abgefangenen Transaktion sofort eine konkurrierende Transaktion voranstellt. Diese Frontrunning-Transaktion kann den Zustand eines bestimmten Vertrags beeinflussen, so dass sie die erwarteten Aktionen der abgefangenen Transaktion zum Vorteil des Angreifers ausnutzt. In den meisten öffentlichen Blockketten neigen die Validatoren dazu, Transaktionen nach der ihnen angebotenen Gebühr zu verarbeiten, so dass es ausreicht, wenn der Angreifer höhere Transaktionsgebühren anbietet als die angegriffene Transaktion. Der Angreifer kann auch selbst ein Blockproduzent sein, was ihm fast völlige Freiheit bei der Auswahl und dem Einbau von Transaktionen gibt.

Die strengen Anforderungen, die der Honey Badger BFT an die Reihenfolge der Transaktionen stellt, in Verbindung mit der Verfügbarkeit einer sicheren Zufallsquelle, erschweren das Frontrunning erheblich. Der Zufallsgenerator kann verwendet werden, um Transaktionen zu dem Zeitpunkt zu mischen, zu dem die Sammlung der einzubeziehenden Transaktionen abgeschlossen ist. Keine Partei kann die Position einer Transaktion in der Warteschlange vorhersagen oder manipulieren, wodurch Frontrunning-Angriffe wirksam verhindert werden. Ein Angreifer kann immer noch probabilistische Angriffe durchführen, indem er viele Frontrunning-Transaktionen überträgt, in der Hoffnung, dass mindestens eine von ihnen erfolgreich weiter vorne gereiht wird. Aber selbst diese Strategie könnte abgeschwächt werden, indem Transaktionen, die für das Frontrunning empfindlich sind, nur an Validatoren weitergeleitet werden, denen der Autor der Transaktion vertraut, dass sie selbst nicht am Frontrunning teilnehmen. In diesem Fall würde ein Angreifer die Transaktion erst dann sehen, wenn sie bereits Teil eines Blocks ist.

3.1.3. Honey Badger BFT – Performance Tests

Um die Annahmen zu testen, wurde eine Honey Badger Blockchain mit sieben Validator-Knoten und einer damit einhergehenden Toleranz von drei fehlerhaften Knoten aufgesetzt. Die Knoten wurden auf Server in Deutschland und Finnland verteilt, um eine reale Umgebung für ein dezentrales Netzwerk zu simulieren. Die verwendete Client-Software war, wie bereits erwähnt, der Parity Ethereum-Client mit Modifikationen zur Ausführung des Honey Badger-BFT-Protokolls als Konsens-Engine.

Testumgebung

Das Testnetz wurde auf sieben virtuellen Servern betrieben, von denen zwei in Finnland bei hetzner.de und fünf in Deutschland bei netcup.de eingerichtet wurden. Die Spezifikationen dieser Server waren: 2 vCPUs, 8 GB RAM, 10 GB SSD-Speicher.

Latenzzeit

Wie in Abbildung 17 dargestellt, ist die Latenzzeit sehr gering, was in etwa die Zeit widerspiegelt, die für die Erstellung eines Blocks benötigt wird. Honey Badger BFT hat – wie bereits beschrieben - eine sofortige Finalität, d.h. die Zahlen spiegeln die Zeit vom Senden der Transaktion bis zum endgültigen Abschluss der Transaktion auf der Blockchain wider; ein Wert, der typischerweise in Minuten statt in Millisekunden gemessen wird [21].

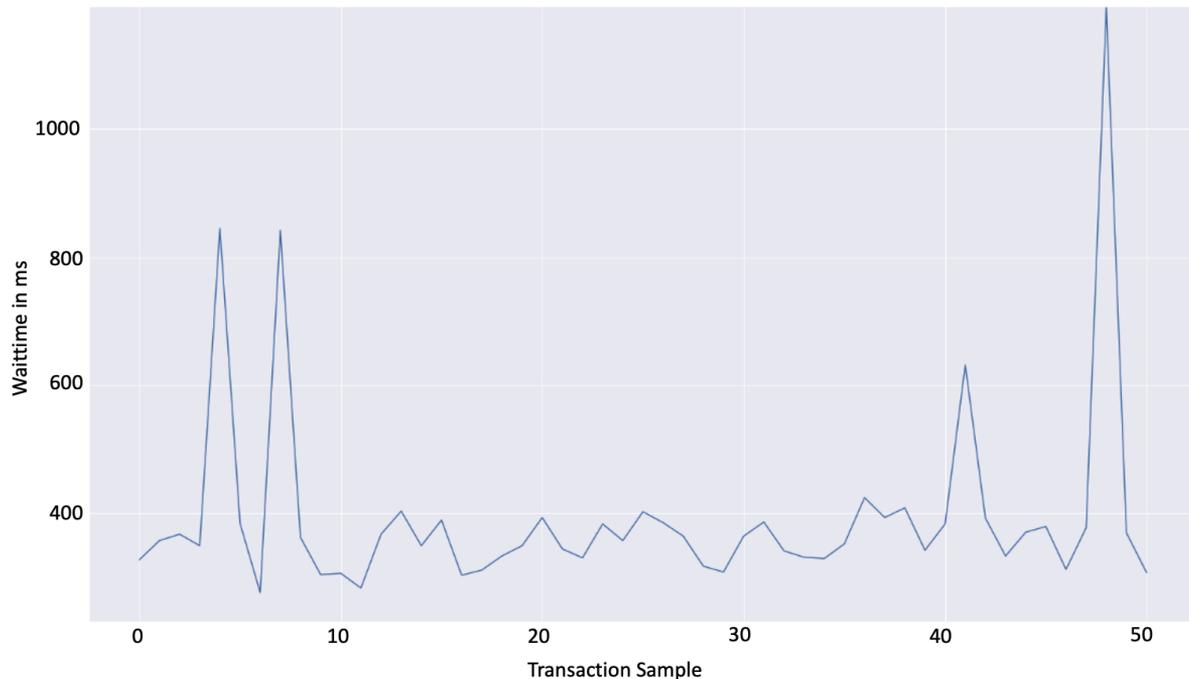


Abbildung 17: Verarbeitung von Transaktionen, um sie in einen Block aufzunehmen.

Zum Vergleich wurde eine weitere Blockchain mit derselben Testinfrastruktur eingerichtet, auf der das AuRa-Konsensusprotokoll [22] (das auch im Parity Ethereum-Client verfügbar ist) läuft. Diese ist auf eine Blockzeit von vier Sekunden konfiguriert – ein sehr niedriger Wert für dieses Protokoll.

Abbildung 18 zeigt den Vergleich der Latenzzeit bei Honey Badger BFT und AuRa. Die orangefarbene Linie steht für AuRa, die blaue Linie für Honey Badger BFT. Die Testergebnisse spiegeln die hervorragende Leistung des Honey Badger BFT wider, wobei die Aura im Durchschnitt bei zwei Sekunden liegt, während der Honey Badger BFT im Durchschnitt konstant unter einer Sekunde bleibt. Weiter ist zu beachten, dass die Zahlen für AuRa – obwohl sie erheblich höher sind – noch nicht die Zeit bis zur Finalität angeben, sondern nur die Zeit, um die Transaktion in einen Block zu verarbeiten.

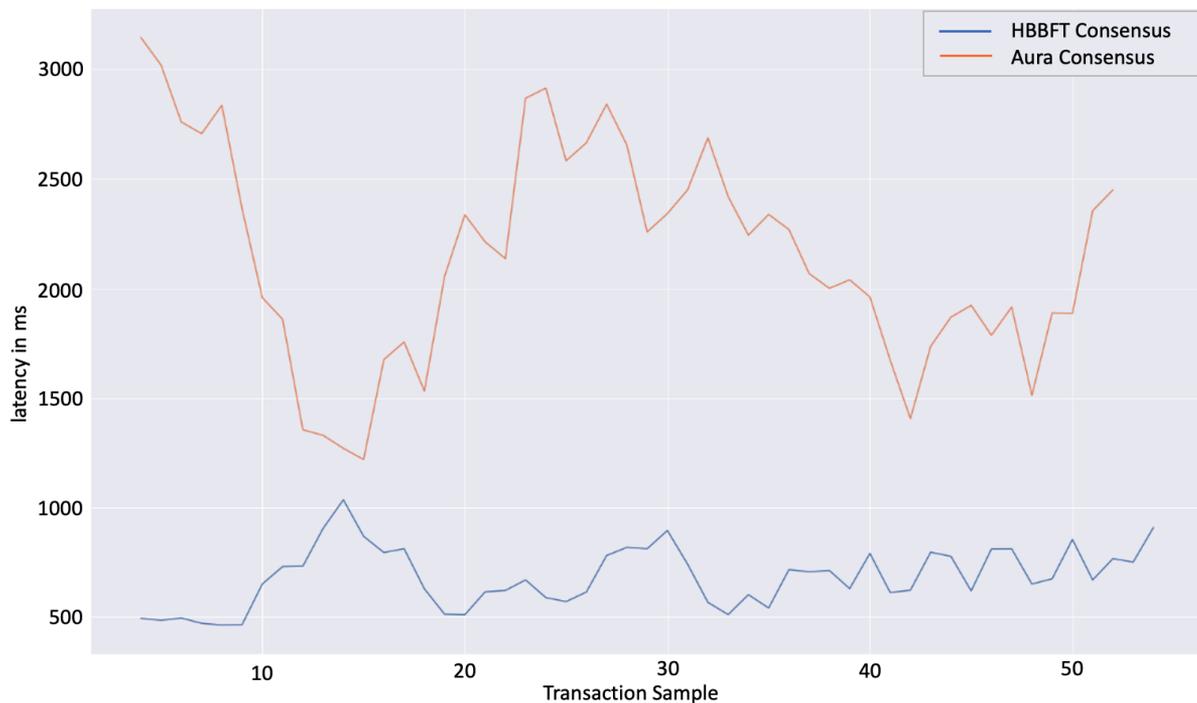


Abbildung 18: Latenzvergleich HBBFT vs. AuRa-Konsens mit Parity-Client-Software

Durchsatz

Die Eigenschaft der sofortigen Finalität erfordert einen höheren Kommunikationsaufwand im Vergleich zu einfachen Protokollen wie AuRa. Dies spiegelt sich in einem geringeren theoretischen Durchsatz wider, der besonders bei neu gestarteten, leeren Blockchains ausgeprägt ist. Bei Blockchains realistischer Länge ist das Konsensprotokoll selten der begrenzende Faktor – dennoch liegen die in Abbildung 19 gezeigten Werte von etwa 450 tx/s im Bereich der oben skizzierten P2P-Handelsszenarien.

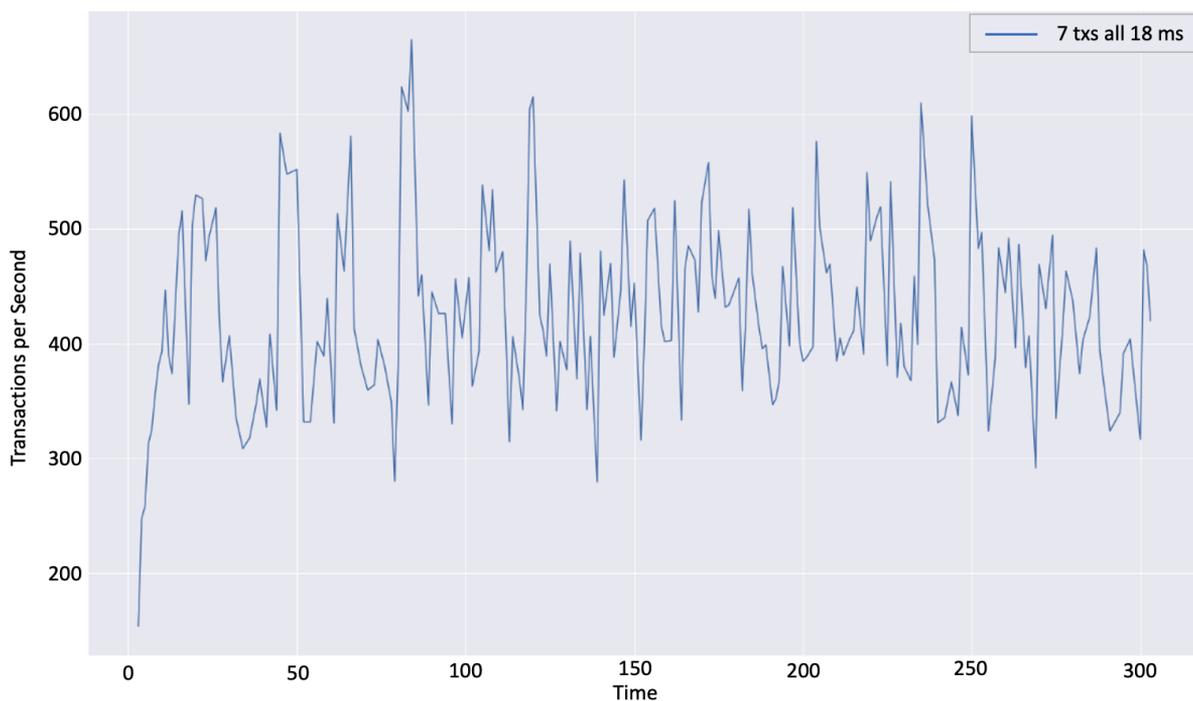


Abbildung 19: Durchsatz in TPS im Zeitverlauf für Honigdachs-Konsens mit Parity-Client-Software

Eine Reihe potenzieller Optimierungsziele sowohl im Parity-Client als auch in der Honey Badger BFT-Engine-Implementierung wurden identifiziert und werden Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein, einige davon sind:

- Effizientere Transaktions-Kommunikations-Strategien
- Bessere Komprimierung von Nachrichten
- Verbesserungen bei der Auswahl von Transaktionen für die Blöcke

3.1.4. Zusammenfassung

Anhand detaillierter Analysen im Zuge des Projekts *SonnWende+* wurde gezeigt, dass der HBBFT-Konsensalgorithmus im etablierten Parity-Client verwendet werden kann. Dieser liefert eine vergleichsweise hohe Leistung und andere sehr wünschenswerte Eigenschaften, die für verschiedene Anwendungen im Energiebereich benötigt werden. Aufgrund der niedrigen Latenzzeit und der sofortigen absoluten Finalität in Kombination mit der hohen Leistung ist zu erwarten, dass dieser Client nach weiteren Verbesserungen eine sehr gute Wahl sowohl für private als auch für öffentliche Netzwerke sein wird. In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung [23] wurde der HBBFT-Konsens auch im Hinblick auf Dezentralisierung und Durchsatz als hoch eingestuft, aber im Gegensatz zur angegebenen Beschränkung auf geschlossene Netzwerke ist bereits jetzt ersichtlich, wie der HBBFT-Konsens über das POSDAO-Protokoll [24] auch für offene Netzwerke mit einem definierten Validatorset zur Verfügung gestellt werden kann. Die durchgeführten Tests zeigen gute Aussichten für die Anwendung des HBBFT-Konsensalgorithmus in realen Live-Blockchain-Anwendungen, die definitiv nicht nur auf den Energiesektor beschränkt sind, sondern auch Anwendungen erlauben, die bisher als unmöglich galten.

3.1.5. Rechtliche Analyse zur Blockchain-Technologie

Die Blockchain-Technologie steht im Spannungsverhältnis mit dem Datenschutz. Generell ist im Zusammenhang mit der Problematik des Rechts auf Löschung die Tatsache interessant, dass in der DSGVO zwischen der Löschung und der Vernichtung unterschieden wird. Eine Definition der Löschung ist der DSGVO jedoch nicht zu entnehmen. Es kann somit argumentiert werden, dass nicht allzu hohe Anforderungen an die Löschung gestellt werden. Es wird insbesondere vertreten, dass es ausreicht, wenn die Daten für den Verantwortlichen unkenntlich sind, d.h. unlesbar werden bzw. ihm nicht mehr zur Verfügung stehen dürfen. Da eine Löschung nicht möglich ist, und ein Unkenntlich machen ausreichen soll, um der Pflicht nach Art. 17 DSGVO gerecht zu werden, ist es bei einer öffentlichen Blockchain erforderlich, dass dieses Unlesbar machen/Sperren so weit geht, dass das Einsehen der Daten für niemanden mehr möglich ist. Die Löschung von Daten in der Blockchain widerspricht nicht nur dem System der Blockchain, da sie aufgrund der Unveränderlichkeit und Einsehbarkeit zu einer enormen Vertrauensbildung beiträgt, sie würde rein technisch auch zum Zusammenbrechen des Systems führen. Daher ist die oben genannte Auslegung der Löschung sinnvoll und zielführend. Personenbezogene Daten könnten gesperrt werden, ohne die einzelnen Datensätze vernichten zu müssen. Nähere rechtliche Ausführungen dazu finden sich im Anhang.

3.2. Anwendungsfälle

3.2.1. Lending-based Crowdfunding

Umsetzung und Simulation

Dieser Anwendungsfall wurde in unterschiedlichen Szenarien auf Basis von Realdaten des Innovationslabors act4.energy simuliert. Hierbei wurde ein Framework implementiert, welche auf Basis der folgenden Eingangsdaten die Rückzahlung in jedem Zeitschritt in einer Auflösung von 5 Minuten berechnet und die Ergebnisse visualisiert:

- Prognostizierte Energieverbrauchsdaten bzw. Lastgang der Bewohner:innen. Da keine Prognose für einen mehrjährigen Zeitraum zur Verfügung steht und diese Daten von vielen Faktoren beeinflusst werden, wurden die historischen Daten als Prognosedaten verwendet (Annahme: Erzeugung und Verbrauch verhalten sich zukünftig ähnlich, Trends können berücksichtigt werden).
- Prognostizierte Erzeugungsdaten und maximale Erzeugungsleistung der geplanten PV-Anlage. Auf Basis dieser Daten kann der Eigenverbrauch sowie der Bezug vom und die Abnahme durch den Lieferanten entsprechend berechnet werden (ohne Berücksichtigung eines Energie-Management-Systems zur Steuerung flexibler Teilnehmer:innen innerhalb der Kunden-Domäne).
- Investitionskosten, Zinsen, Förderung, Steuern und Abgaben, Bezugs- und Einspeisepreise, Netztarife, etc.

Es wurden vier unterschiedliche Privatkund:innen mit unterschiedlichen Lastverhalten sowie unterschiedlichen Maximalleistungen der PV-Anlagen analysiert und die Rückzahlungsdauer berechnet. Im Folgenden sind sowohl die Eingangsdaten als auch die jeweiligen Ergebnisse visualisiert.

Kunde A

Der Kunde/die Kundin installiert eine PV-Anlage mit einer Leistung von 3.0 kWp. Die Gesamtinvestitionskosten betragen € 5.145. Der durchschnittliche Verbrauch beträgt 4.898 kWh pro Jahr, die Erzeugung beläuft sich auf 3.297 pro Jahr. Auf Basis der Erzeugungs- und Verbrauchsdaten beträgt die durchschnittliche Einspeisung 1.408 kWh, der Eigenverbrauch 1.889 kWh und der Bezug 3.008 kWh pro Jahr.

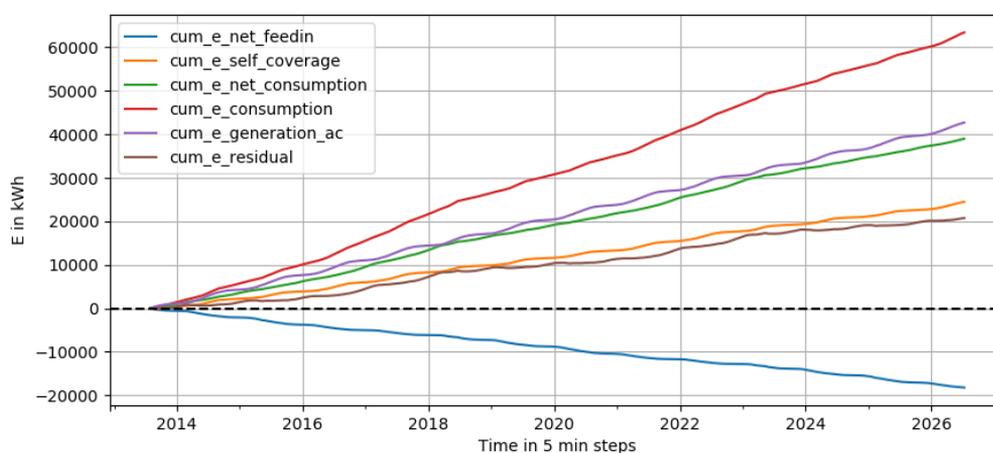


Abbildung 20: Kunde A (3.0 kWp): Überblick über den Verlauf der Energiemengen [kWh] im Zeitraum 2013 bis 2027 (Einspeisung - blau, Eigenverbrauch - orange, Netzbezug - grün, Gesamtverbrauch - rot, Erzeugung - violett, Residuallast - braun).

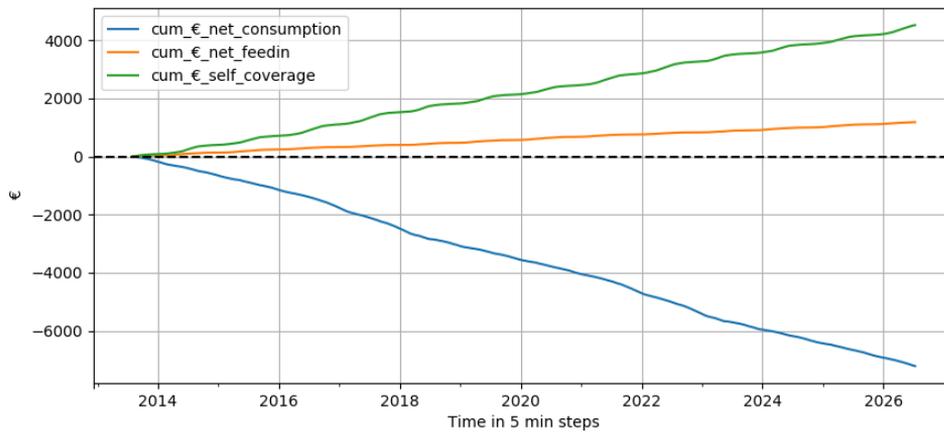


Abbildung 21: Kunde A (3.0 kWp): Überblick über den Verlauf der Kosten- und Erlösdaten [€] im Zeitraum 2013 bis 2027 (Netzbezug - blau, Einspeisung - orange, Eigenverbrauch - grün).

Abbildung 20 zeigt den berechneten Verlauf der Energiemengen (in kWh) im Zeitraum 2013 bis 2027, Abbildung 21 den Verlauf der Kosten und Erlöse in diesem Zeitraum.

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen den Überblick über den Verlauf der Rückzahlung. Für den Kund:innen A (Abbildung 22) startet die blaue Rückzahlungskurve bei den Investitionskosten von € 5.145. Im Verlauf sind deutliche Schwankungen aufgrund der Jahreszeiten und der damit verbundenen, unterschiedlichen hohen Rückzahlungen ersichtlich. Weiters zeigt die Abbildung, dass die Gesamtkosten im Jahr 2025 vollständig getilgt sind (Schnitt der 0-Linie).

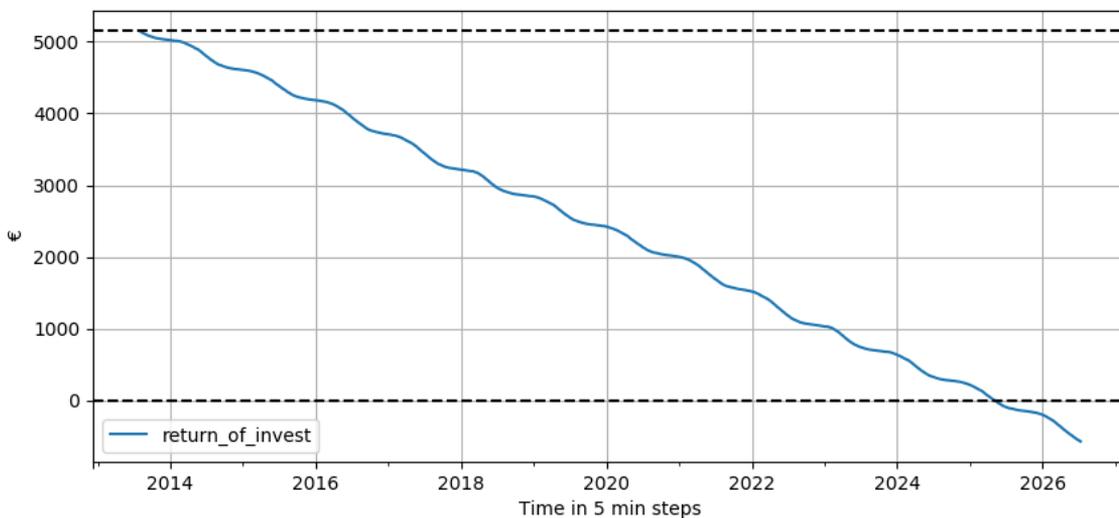


Abbildung 22: Überblick über den Verlauf der Rückzahlung [€] für Kunde A (3.0 kWp)

Kunde B

Dieser Kunde investiert in eine 2.0 kWp PV-Anlage mit Gesamtinvestitionskosten von € 3.430. Der Verlauf der Rückzahlung auf Basis der verwendeten Erzeugungs- und Verbrauchprofile dieses Kunden bzw. dieser Kundin ist in Abbildung 23 dargestellt. Im Vergleich zur Abbildung 22 kann hier eine deutlich längere Rückzahlung beobachtet werden (Ende 2029).

Die Unterschiede ergeben sich einerseits aus dem Verhältnis zwischen selbst erzeugter Energie und dem Verbrauch und andererseits aus der zeitlichen Überlagerung zwischen Erzeugung und Verbrauch.

Die zeitliche Überlagerung spielt eine wesentliche Rolle, da die unmittelbare Nutzung der lokal erzeugten Energie eine wesentlich bessere Wirtschaftlichkeit (aus Sicht der Kund:innen) aufweist als eine Kombination aus Einspeisung in bzw. Bezug aus dem öffentlichen Netz. Dies ergibt sich aus den angenommenen Preisen (Einspeisung: 6.5 ct/kWh; Bezug: 18.5 ct/kWh – Delta von 12.0 ct/kWh im Vergleich zu 0.0 ct/kWh bei unmittelbarer Nutzung der lokal erzeugten Energie) im Berechnungsmodell.

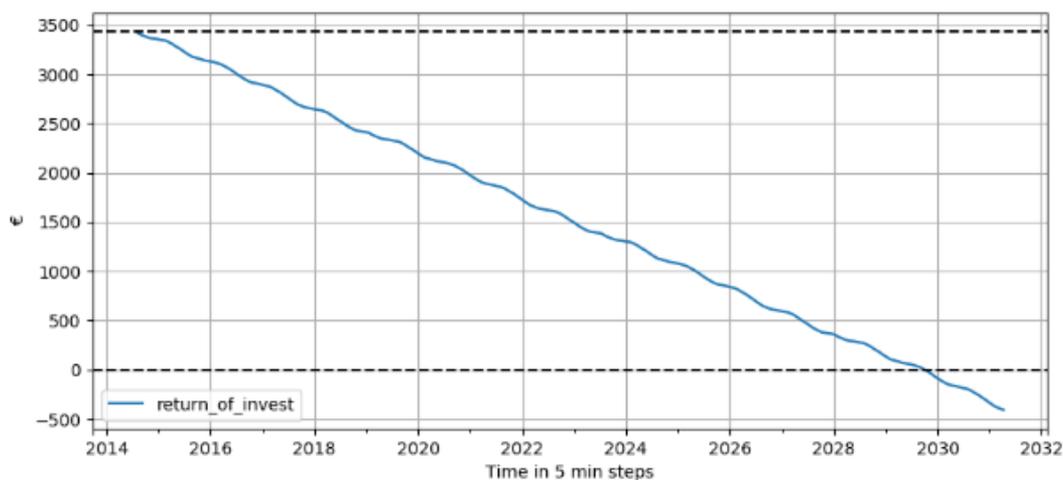


Abbildung 23: Überblick über den Verlauf der Rückzahlung [€] für Kunde B (2.0 kWp).

Im Zuge der Analyse wurden zwei weitere Kund:innen auf Basis der realen Verbrauchs- und Erzeugungswerte sowie den jeweiligen Investitionskosten berechnet. Tabelle 3 enthält eine Übersicht aller analysierten Kund:innen inklusive deren Investitionskosten, den jeweiligen Verbrauchs- und Erzeugungsdaten sowie den berechneten Jahresdaten für Einspeisung, Eigenverbrauch, Netzbezug, Bilanz, Kosten, Erlöse, Einsparung durch den Eigenverbrauch und letztendlich der berechneten Rückzahlungsdauer.

Es kann festgehalten werden, dass die Rückzahlungsdauer sowohl von den Investitionskosten als auch vom Eigenverbrauchsanteil abhängt: Kunde A tilgt seine Schulden trotz hoher Investitionskosten bereits nach 11,78 Jahren, wohingegen Kunde B die Tilgung für eine wesentlich günstigere Anlage erst nach mehr als 15 Jahren abschließen kann.

Tabelle 3: Überblick über die errechnete Rückzahlungsdauer.

Kunde	A	B	C	D
PV [kWp]	3,0	2,0	4,32	4,04
Investition gesamt	€ 5.145	€ 3.430	€ 7.409	€ 6.929
Verbrauch [kWh p.a.]	4.898	2.541	3.245	1.152
Erzeugung [kWh p.a.]	3.297	2.102	4.248	4.667
Einspeisung [kWh p.a.]	1.408	1.328	2.960	3.964
Eigenverbrauch [kWh p.a.]	1.889	775	1.288	702
Netzbezug [kWh p.a.]	3.009	1.766	1.957	450
Bilanz [kWh p.a.]	1.601	439	-1.003	-3.514
Kosten [€ p.a.]	557	327	362	83
Erlöse [€ p.a.]	92	86	192	258
Einsparung Eigenverbrauch [€ p.a.]	349	143	238	130
Rückzahlung [Jahre]	11,78	15,19	17,18	17,86

Erweiterung: Anwendung in der Power2Heat-Domäne

Der vorgestellte Anwendungsfall wurde um die Anwendung in der Power2Heat-Domäne erweitert. Dabei wird die Anschaffung einer PV-Anlage und einer Wärmepumpe inklusive der technischen und wirtschaftlichen Parameter in der Berechnung über die Rückzahlungsdauer berücksichtigt.

In diesem Beispiel wird die Anschaffung einer PV-Anlage in Höhe von € 3.600 (Leistung: 3.0 kWp) und einer Wärmepumpe in Höhe von € 10.000 (COP: 3. Wohnfläche: 150 m². Spezifischer Wärmebedarf: 100 kWh_{th}/m²a) angenommen. Zur Verfügung stehen die realen Temperatur-, Erzeugungs- und Verbrauchsdaten aus dem Innovationslabor im Südburgenland. Als Preise wurden 18,5 ct/kWh für den Strombezug, 6,5 ct/kWh für die Einspeisung sowie 11,0 ct/kWh für den thermischen Energiepreis angenommen. Für die Simulation wird ein Ölheizsystem der Wärmepumpe gegenübergestellt (0,8 €/Liter, 9,8 kWh/Liter, Effizienz = 75 %).

Basierend auf der gegebenen Außentemperatur (Tagesmittelwert) wurde ein Lastprofil für einen Zeitraum von 365 Tagen erstellt (siehe Abbildung 24) – sowohl für den thermischen Energieverbrauch als auch für den elektrischen Energiebedarf für den Betrieb der Wärmepumpe (und wird dem vorhandenen Lastprofil aufgeschlagen).

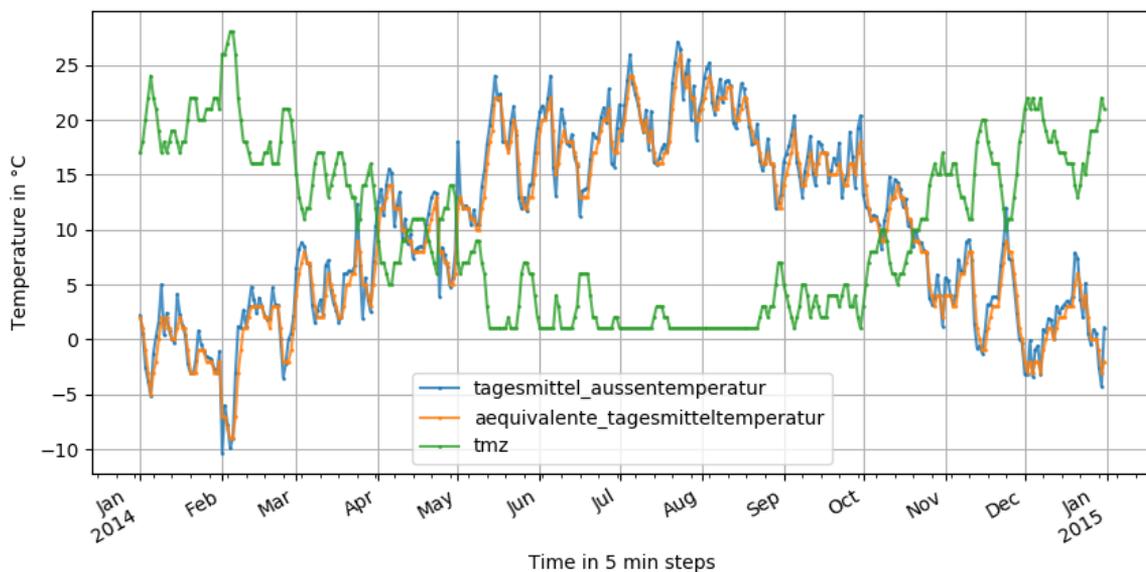


Abbildung 24: Verlauf der verwendeten Tagesmitteltemperaturen über einen Zeitraum von 365 Tagen.

Im Zuge des Projekts wurden mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen berechnet, die in Tabelle 4 dargestellt sind. Die elektrischen Energiekosten wurden in allen Fällen berücksichtigt; die Anschaffung einer Wärmepumpe, die Anschaffung einer PV-Anlage sowie die Berücksichtigung der thermischen Energiekosten wurden in allen Kombinationen untersucht.

Tabelle 4: Lending-based Crowdfunding Szenarien (Sektorkopplung)

Szenario	Wärmepumpe vorhanden	PV-Anlage vorhanden	Thermische Energiekosten berücksichtigt	Elektrische Energiekosten berücksichtigt
I	✗	✗	✗	✓
II	✗	✗	✓	✓
III	✗	✓	✗	✓
IV	✗	✓	✓	✓
V	✓	✗	✗	✓
VI	✓	✗	✓	✓
VII	✓	✓	✗	✓
VIII	✓	✓	✓	✓

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen den Verlauf der Kosten bzw. der Rückzahlung. In Abbildung 25 ist das Basis-Szenario (Szenario I) dargestellt, welches über keine PV-Anlage verfügt und daher lediglich die elektrischen Energiekosten über einen Zeitraum von ca. 21 Jahren enthält. Abbildung 26 zeigt Szenario VIII, in dem von einer Anschaffung von Wärmepumpe und PV-Anlage ausgegangen wird und die thermischen und elektrischen Kosten berücksichtigt werden. Aufgrund der verwendeten Temperatur-, Erzeugungs- und Verbrauchprofile sowie der eingestellten Preise ergibt sich eine Rückzahlungsdauer von 18,59 Jahren.

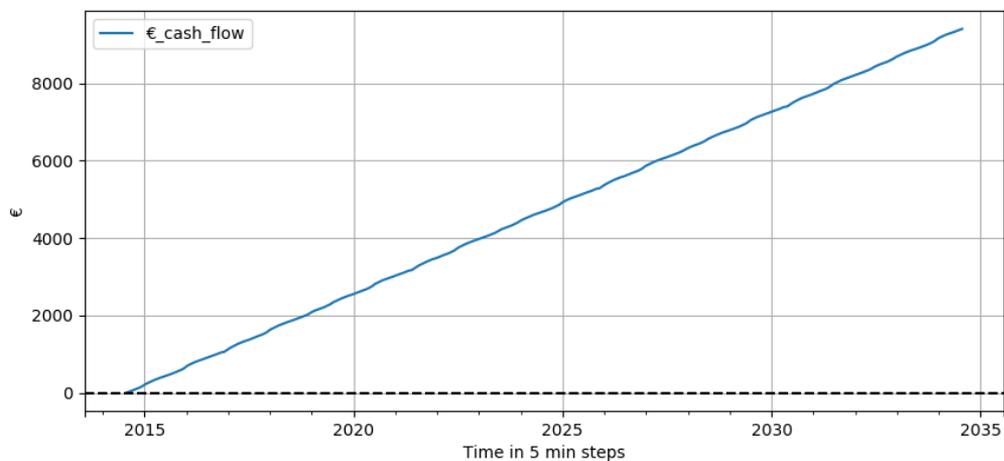


Abbildung 25: Aggregierte Energiekosten des Szenario I über mehrere Jahre.

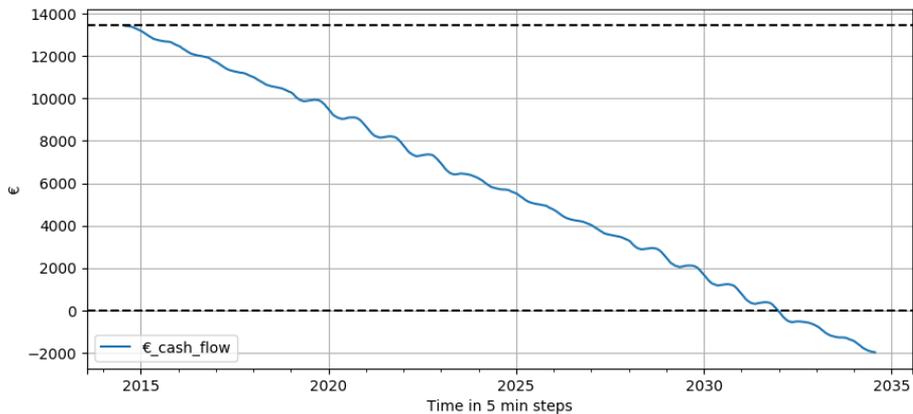


Abbildung 26: Verlauf der Rückzahlung der Investitionskosten des Szenario VIII.

Während das Referenzszenario (Szenario III – nur Berücksichtigung der Gewinne des PV-Systems durch direkte Einspeisung und Eigenverbrauch) eine Amortisationszeit von ca. 8 Jahren aufweist, weist das Szenario mit der Integration der Wärmepumpe eine Amortisationszeit von 18,59 Jahren auf. Hierbei führt die Wärmepumpe im Vergleich zu einem teuren konventionellen Heizsystem auf Brennstoffbasis zu eingesparten Kosten für thermische Energie, aber zu erhöhten Kosten für elektrische Energie zum Betrieb der Wärmepumpe. In Kombination mit einer PV-Anlage führt dies zu höherem Eigenverbrauch und wirtschaftlichen Vorteilen. Aufgrund der hohen Investitionskosten in die Wärmepumpe (einschließlich der Integrationskosten) ist die Amortisationszeit jedoch relativ hoch. Diese liegt nahe an der typischen technischen Lebensdauer der Komponenten und ist deshalb nicht sehr attraktiv.

Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Kombination des elektrischen und thermischen Bereichs über eine Wärmepumpe das Gesamtsystem optimiert werden muss, um die Amortisationszeit deutlich zu senken. Dazu gehört zum einen die detaillierte Bewertung der Investitionskosten der Wärmepumpe, da diese sehr stark von dem gewählten System (Luft/Wasser, Luft/Luft, Wasser/Wasser) und dem Gebäudetyp, in dem sie installiert ist, abhängen. Weiters sind Möglichkeiten zur Verlagerung flexibler Wärmelasten (z.B. thermische Masse des Gebäudes, Warmwasserspeicher) zu berücksichtigen, um somit den Eigenverbrauch des PV-Stroms zu erhöhen. Darüber hinaus werden Neubauten geringere Amortisationszeiten aufweisen, da keine Kosten für die Investition in ein alternatives Heizsystem berücksichtigt werden müssen.

Rechtliche Analyse

In diesem Anwendungsfall soll künftig zum Zwecke des besseren Überblicks bezüglich der bereits gezahlten sowie der noch zu leistenden Beträge durch die teilnehmenden Berechtigten der jeweilige Restwert durch die futuregrid.energy in eine öffentliche Blockchain eingetragen werden. Sie verwaltet sodann auch als dezentrale verantwortliche Stelle den privaten Schlüssel der Teilnehmer:innen, der für die Zuordnung zu den Blockchain-Adressen notwendig ist. Die anderen relevanten Daten der Teilnehmer:innen bleiben weiterhin auf dem Server der futuregrid.energy gespeichert.

Die futuregrid.energy hat anhand der von der Blockchain getrennten, am Server liegenden Informationen und mittels der vergebenen Kennung eine Zuordnungsmöglichkeit des Restwertes zur jeweiligen, den Betrag schuldenden Person. Daher ist von einer Identifizierbarkeit auszugehen. Sie weiß daher, welcher Betrag von welchem Teilnehmer bzw. welcher Teilnehmerin noch zu leisten ist und welche Person somit hinter welchem Restwert steht. Somit sind die jeweiligen natürlichen Personen über die bestimmte Kennung (und den Daten auf dem Server) in Verbindung mit dem Restwert zu identifizieren.

Der Anwendungsbereich der DSGVO ist daher auch im Rahmen der Nutzung der öffentlichen Blockchain eröffnet. Der Verantwortliche – die futuregrid.energy – ist somit zur Einhaltung der Datenschutzpflichten angehalten.

Im Rahmen des gegenständlichen Projekts ist jedoch angedacht, dass die Blockchain-Adresse der jeweiligen Person von den Servern der futuregrid.energy gelöscht wird und somit kein Personenbezug mehr herstellbar ist. Ein solcher ist allein über die Restwerte nicht herstellbar. Nach der Vernichtung des Schlüssels bleiben nur datenschutzrechtlich unbedenkliche Informationen in der Blockchain bestehen. Nähere rechtliche Ausführungen dazu finden sich im Anhang.

3.2.2. Energie-Konto für Teilnehmer:innen von Energiegemeinschaften

In diesem Anwendungsfall wurde die Nutzung des Energiekontos innerhalb einer Energiegemeinschaft untersucht, wobei die Teilnehmer:innen an der Energiegemeinschaft gegenseitig Energie verschenken können; diese wird von einem individuellen Energiekonto auf das eines/r anderen Teilnehmer:in übertragen.



Abbildung 27: schematische Darstellung des Übertrags von e-kWh Token über die ARTIS Blockchain.

Der Austausch von Energie-Token soll dabei weitgehend in die Energiekonto-APP integriert werden und der technologische Aspekt der Blockchain-Nutzung vom User weitgehend unbemerkt bleiben. Dies war auch ein wesentliches Ergebnis aus den Co-Creation Workshops, bei dem eine Mehrzahl der potentiellen Nutzer:innen angeben haben, dass der unterliegende technologische Aspekt eines Services im Vergleich zu einfacher Bedienung, Stabilität und generellem Nutzen einer Anwendung nicht zu den wesentlichen Entscheidungsfaktoren gehört.

Rechtliche Analyse

Die rechtliche Einordnung der „Energiesparpunkte“ stellt sich zusammengefasst folgendermaßen dar:

- Eine Konzession im Sinne des Zahlungsdienstegesetz (ZaDiG) ist auch bei Einordnung als E-Geld nicht notwendig.
- „Energiesparpunkte“ sind keine Währung oder gesetzlich festgelegtes Zahlungsmittel, aber digitales Gut (vgl. mit einem Gutschein mit einem gewissen Wert) und eine unkörperliche Sache.
- Das Einlösen der Energiesparpunkte stellt ein Tauschgeschäft dar.

Ein Vergleich mit den AGBs von Miles & More lässt schließen, dass ähnliche Regelungen für Energiesparpunkte in den jeweiligen AGBs getroffen werden und dies würde bei entsprechender Übernahme der Bestimmungen bedeuten, dass:

- eine Weitergabe der Punkte an Dritte grundsätzlich ausgeschlossen ist und
- Energiesparpunkte nicht auf anderes Energie-Konto übertragbar sind.
- Aber nachdem ein Teilnehmer bzw. eine Teilnehmerin seine Punkte eingelöst hat, könnte er den eingelösten Gutschein an jemand anderen weitergeben und somit die Leistung von jmd. Anderem bezogen werden.
- Regelungen für negative Punkte (ev. Ab einem gewissen Nutzerstatus) können getroffen werden. Scheidet der Nutzer vor dem Ausgleich des Kundenkontos aus, können die negativen Energiespar-Punkte verrechnet werden.

Diese Punkte sind individuell in den AGBs zu regeln. Demnach ist per Gesetz nicht ausgeschlossen, die AGBs derart zu formulieren, dass eine Übertragbarkeit der Energiesparpunkte auf ein anderes Kundenkonto möglich ist. Eine mögliche Übertragbarkeit und Weitergabe der Punkte kann in den AGBs ohne Weiteres geregelt werden. Nähere rechtliche Ausführungen dazu finden sich im Anhang.

3.2.3. Interaktionsloses Laden von Elektrofahrzeugen

Im Rahmen der Demonstration des Systems bei der Mission Innovation Austria Week 2019²⁰ wurde DAI²¹ – eine stabile Kryptowährung auf der Ethereum Blockchain – über eine Brücke²² auf die ARTIS Blockchain bewegt und gemäß dem ERC2100 Standard²³ in einen „streambaren“ Token verwandelt. Das Ladesystem von Easelink wurde mit der Minerva App²⁴ gekoppelt und über Push-Notifications konnte nun die Zahlung gestartet werden. Der Ladestellenbetreiber hat die Möglichkeit, den Zahlungseingang auf dem eigenen Blockchain-Konto zu verfolgen und dementsprechend den Strom am Ladepad zur Verfügung zu stellen.

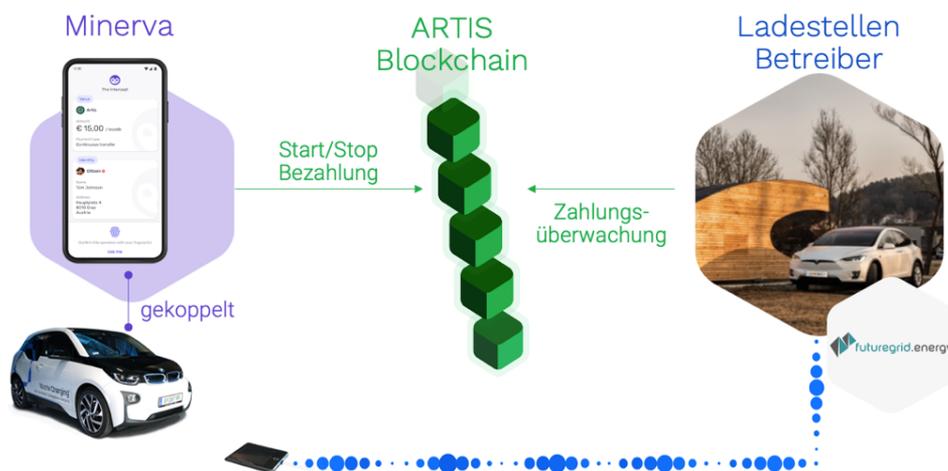


Abbildung 28: Schematische Darstellung des interaktionslosen Ladens mit Blockchain-basierender Bezahlung.

Das demonstrierte System kann weiter automatisiert werden, sodass jede Bezahlung vom Fahrzeug geleistet wird und der Fahrer nicht aktiv bezahlen muss. Diese Anwendung ist gut für Mietwagen oder

²⁰ <https://youtu.be/Er9ifHvKPBM>

²¹ <https://coinmarketcap.com/currencies/single-collateral-dai/>

²² <https://github.com/poanetwork/tokenbridge>

²³ <https://github.com/ethereum/EIPs/issues/2100>

²⁴ <https://minerva.digital>

auch vollautomatische Robotaxis geeignet, bei denen die Ladekosten auf den Miet- oder die Fahrpreise umgelegt werden und möglichst hohe Bequemlichkeit und Verfügbarkeit gefragt sind. Damit kann gezeigt werden, was mit Blockchain-Systemen schon heute umgesetzt werden kann und wie die Zukunft einer emissionsfreien E-Mobilität bestmöglich unterstützt werden könnte.

Rechtliche Analyse

Der Betreiber einer automatisierten Ladeinfrastruktur hat in seiner Funktion als Endverbraucher sämtliche anfallenden Kosten (im Ausmaß der Nutzung des öffentlichen Netzes) zu tragen. Dies sind neben dem Systemnutzungsentgelt und dem reinen Strompreis, die Umlagen zur Förderung des Ökostroms, die KWK-Pauschale, die Elektrizitätsabgabe sowie evtl. die Gebrauchsabgabe und die Umsatzsteuer. Nähere rechtliche Ausführungen dazu finden sich im Anhang.

3.2.4. Peer-to-Peer-Energiehandel

Die Simulation des Peer-to-Peer Energiehandels innerhalb einer Community mit vier Teilnehmer:innen zeigte im Vergleich zum State-of-the-Art Szenario ein enormes Einsparungspotential bei den Energiekosten der Kund:innen. Aufgrund der Zusammensetzung der Community (alle Teilnehmer:innen sind mit einer PV-Anlage ausgestattet) kann davon ausgegangen werden, dass in anderen bzw. heterogeneren Communities ein noch höheres Potential besteht und die Interaktion mit dem EVU weiter reduziert werden kann. Zusätzlich kann der Einsatz eines Speichers den Anteil des lokalen Eigenverbrauchs noch weiter erhöhen.

Es wurden zwei Anwendungsfälle für den Peer-to-Peer-Energiehandel berechnet: „Sharing in Smart Grid Community“ und „EVU only“. In erstem Fall werden Transaktionen vor allem innerhalb der Community durchgeführt und der Rest mit dem Lieferanten. In zweitem Fall wird ausschließlich mit dem Lieferanten abgerechnet (keine Transaktionen innerhalb der Gemeinschaft). Anhand des zuvor beschriebenen Algorithmus (Kapitel 2.1.4, Abbildung 9) werden Ein- und Verkauf der Energie und die daraus resultierende Energieflüsse in der Gemeinschaft berechnet und die Geldflüsse zwischen Gemeinschaftsmitgliedern gerecht verteilt. Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse in Euro dieser beiden Szenarien.

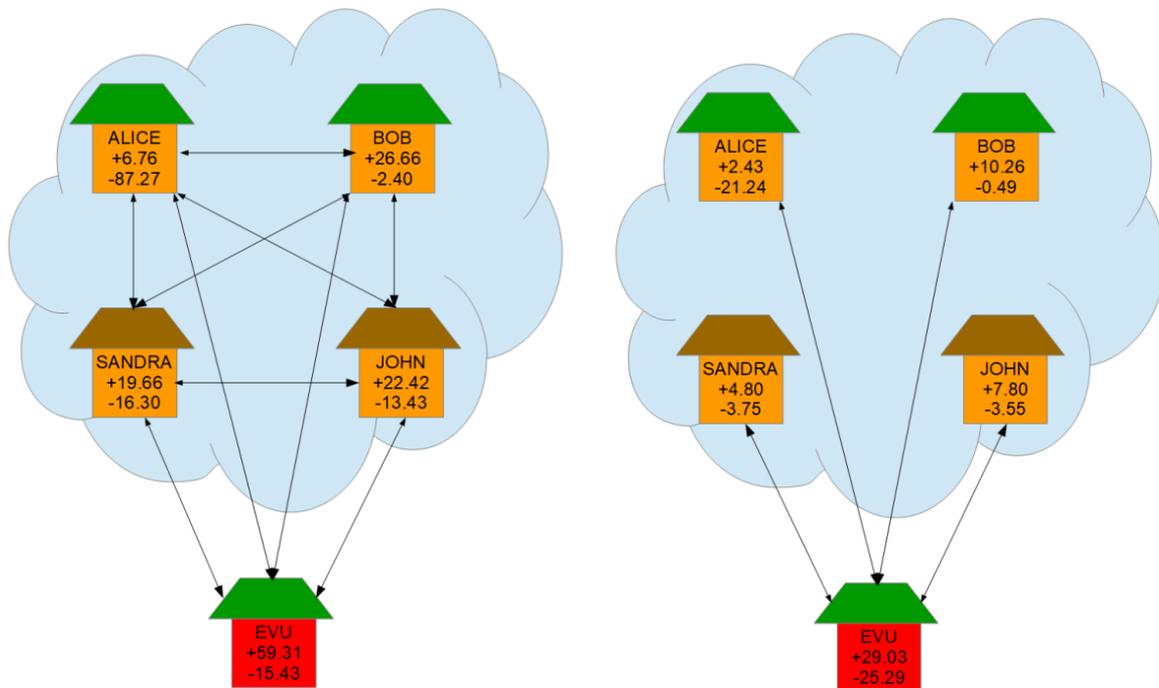


Abbildung 29: Visualisierung des Peer-to-Peer Energy Tradings für zwei Szenarien: „Sharing in Smart Grid Community“ (links) und „EVU only“ (rechts).

Es wurden Daten des Zeitraums 28.07.2014 bis 28.06.2018 verwendet und die jeweiligen Transaktionen berechnet sowie die Ergebnisse beider Anwendungsfälle verglichen. Die Hypothese wurde bestätigt, dass für den Fall „Sharing in Smart Grid Community“ der Energiehandel für Community-Teilnehmer:innen wesentlich günstiger ist als im Fall „EVU only“.

Folgende Preise wurden im Projekt für den Energiehandel verwendet (Netznutzungsentgelte, Steuern, etc. wurden in den Szenarien nicht berücksichtigt):

- Verkauf (Lieferant): 0,13 €/kWh
- Einkauf (Lieferant): 0,06 €/kWh
- Community-Preis: 0,12 €/kWh (für Ein- und Verkauf)

Für die vier Community-Teilnehmer:innen ergibt sich folgendes jährliches Einsparungspotential an Energiekosten:

- **Alice: € 54,78**
- **Bob: € 15,59**
- **Sandra: € 19,35**
- **John: € 17,19**

Durch die lokale Nutzung der Energie reduzieren sich die Einnahmen des Energielieferanten (EVU) um insgesamt € 106,91 pro Jahr.

Rechtliche Analyse

Seit Ende 2016 wurden im Rahmen des sog. Winterpakets („Clean Energy for all Europeans“) diverse Richtlinien und Verordnungen auf Unionsebene überarbeitet bzw. neu gefasst. Allerdings wird in weiterer Folge lediglich auf die neue „Erneuerbare Energien Richtlinie 2018“ (EE-RL 2018) sowie auf die neue „Elektrizitätsbinnenmarkt-Richtlinie 2018“ (EltRL 2019) eingegangen. Es ist darauf hinzuweisen,

dass sich die Richtlinien an die Mitgliedsstaaten richten und von diesen in nationales Recht umzusetzen sind. Beide Richtlinien beinhalten je ein neues Modell einer Energiegemeinschaft (Erneuerbare-Energie-Gemeinschaft (EEG) und Bürger-Energie-Gemeinschaft (BEG)).

Beide dargestellten Modelle der Energie-Gemeinschaften haben viele Gemeinsamkeiten (gemeinsame Nutzung von Energie, Erforderlichkeit einer Rechtsperson, kein finanzieller Gewinn als treibendes Kriterium etc.). Es gibt jedoch auch einiger Unterschiede – siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Unterschiede der beiden Modelle der Energiegemeinschaften.

Erneuerbare-Energie-Gemeinschaft	Bürgerenergie-Gemeinschaft
Räumliche Nähe zum Projekt erforderlich	Keine räumliche Nähe zum Projekt erforderlich
Energie (Strom, Wärme, Kälte) aus erneuerbaren Quellen	Elektrizität (sowohl erneuerbare als auch fossile)
Keine Dienst- und Ladeleistungen vorgesehen	Möglichkeit der Erbringung von Dienst- und Ladeleistungen
Kein Netzbetrieb vorgesehen	Mitgliedstaaten können Errichtung und Betrieb von Verteilernetzen ermöglichen

Nähere rechtliche Ausführungen zum aktuellen nationalen Rahmen bzw. weitere Spezifizierungen des neuen EU-Rahmens finden sich im Anhang.

3.2.5. Modellierung möglicher Blockchain-Anwendungen für Energiegemeinschaften

Wie bereits in Kapitel 2.1.5 beschrieben, wurde die Simulation der unterschiedlichen Szenarien für eine Dauer von jeweils zehn Tagen im Sommer, Winter und in der Übergangszeit auf Basis realer Erzeugungs- und Verbrauchsdaten sowie mit realistischen Annahmen über (dynamische) Tarife durchgeführt. Anschließend wurden die Kosten für jeden Haushalt und jedes Szenario evaluiert. Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse in Gesamtkosten (Energie und Netznutzung) pro Kunde und Tag (in Euro) für das Basis-Szenario sowie die ersten vier Szenarien.

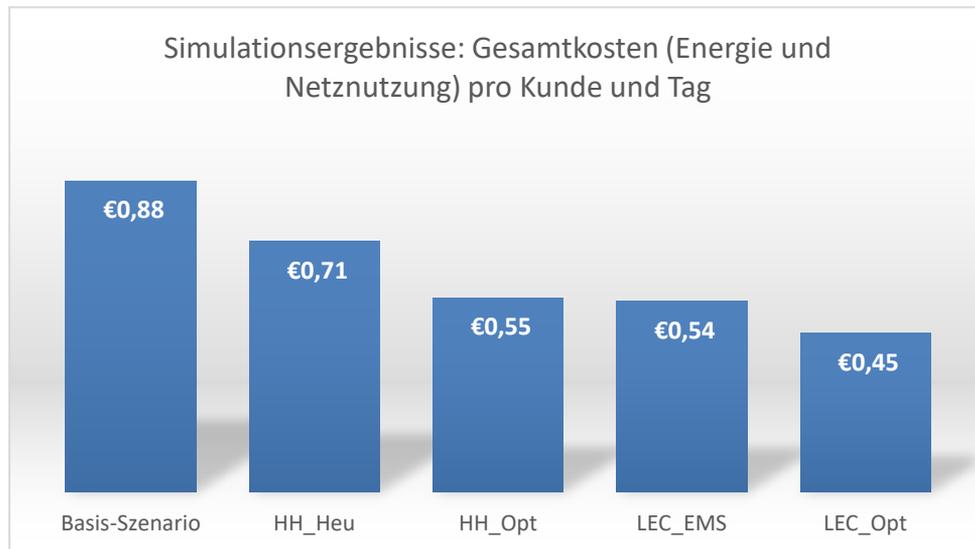


Abbildung 30: Gesamtkosten (Energie und Netznutzung) pro Kunde und Tag.

Im Basis-Szenario entstehen für die Kund:innen die höchsten Kosten, da kein Batteriespeicher zur Verfügung steht und die Energie somit sofort verbraucht oder ins Netz eingespeist werden muss. In den Szenarien mit Fokus auf Haushaltsebene (*HH_Heu* und *HH_Opt*) können die Energiekosten pro Tag aufgrund der Nutzung des Batteriespeichers reduziert werden, wobei bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn ein mathematisches Optimierungsmodell anstelle einer einfachen Heuristik eingesetzt wird.

Die geringsten Energiekosten für jeden Kunden bzw. jede Kundin entstehen bei der Optimierung der Kosten auf Gemeinschaftsebene (*LEC_EMS* und *LEC_Opt*). Aufgrund der Kenntnis des Bedarfs und Überschusses aller Haushalte führt eine globale Optimierung zur optimalen Aufteilung der Energieflüsse innerhalb der Gemeinschaft. Darüber hinaus erfolgt der Bezug aus dem öffentlichen Netz (mit den höchsten Bezugspreisen) nur dann, wenn keine Überschüsse anderer Haushalte genutzt werden können. Unter diesen idealen Bedingungen und bei Verwendung idealer Prognosen ist der Preis deutlich geringer als in anderen Szenarien. Das Szenario *LEC_EMS* stellt eine praktikable Alternative zu *LEC_Opt*, da es weder ein detailliertes mathematisches Optimierungsmodell noch präzise Prognosen benötigt. Dadurch besteht ein Potential zum großflächigen Einsatz, während die Leistung eines Optimierungswerkzeugs mit der Anzahl der Kund:innen dramatisch abnehmen kann. Die Szenarien mit einem Gemeinschaftsspeicher sowie einer gemeinsam genutzten PV-Anlage werden in Abbildung 30 nicht bewertet, da die Anschaffungskosten der Anlagen nicht richtig berücksichtigt wurden.

3.3. Co-Creation Workshops

Die beiden durchgeführten Co-Creation Workshops lieferten das grundsätzliche Ergebnis, dass die einem Service zugrundeliegende Technologie (in diesem Fall die Blockchain-Technologie) für die Anwender:innen als unwesentlich eingestuft wurde. Als zentrale Faktoren für die Akzeptanz von neuen Services wurden Verständlichkeit und Transparenz des Angebots an sich genannt, d.h. klare Kommunikation von Kosten und Leistungsangebot, Übersichtlichkeit und einfache Bedienung spielen eine wesentlich wichtigere Rolle als die den Services zugrundeliegenden Technologien.

Die Befragungsergebnisse der durchgeführten Stakeholder-Befragungen zeigten, dass sich die Energiewirtschaftsunternehmen bereits mit dem Thema Blockchain befassen und erste Anwendungen und Projekte durchführen. Es werden jedoch auch durchaus noch Gefahren und Hürden gesehen, zum Beispiel in technischer Hinsicht, durch rechtliche und regulatorische Unklarheiten aber auch in Bezug auf fehlendes Knowhow und Kundenakzeptanz. Die größten Blockchain-Potenziale wurden beim E-Lademanagement und bei neuen Formen des Energiehandels identifiziert [25]. Die Ergebnisse der Befragung wurden bei der *ComForEn 2018 - 9. Symposium Communications for Energy Systems* in Puch/Salzburg präsentiert und mit den Teilnehmer:innen diskutiert [26].

Im Sinne eines kontinuierlichen Prozesses wurden gegen Projektende die Ergebnisse und Erkenntnisse aus **SonnWende+** an die Stakeholder zurückgespielt und in Form eines Workshops diskutiert und Feedback eingeholt. Der Workshop fand am 15.10.2019 im Rahmen der *ComForEn 2019 „Neue Werkzeuge für die digitale Netzplanung“* statt und hatte das zentrale Thema „Energy Communities - Technische Lösungen versus rechtliche/regulatorische Rahmenbedingungen“. In zwei Arbeitskreisen wurde einerseits aus der Perspektive der Energieakteure und andererseits aus der Sicht der Nutzer:innen das Thema Energiegemeinschaften beleuchtet. Es wurden dabei Fragen zu Organisation & Management der Energiegemeinschaft, Größe & Zusammensetzung, Rollen, Datenverfügbarkeit und -sicherheit, technologische Lösungen & Blockchain, Mehrwert/Nutzen, Rechtsformen, Geschäftsmodelle und Netzebenen diskutiert. Dabei wurde folgendes Bild (Abbildung 31) erarbeitet, das die Schlüsselemente einer lokalen Energiegemeinschaft darstellt:

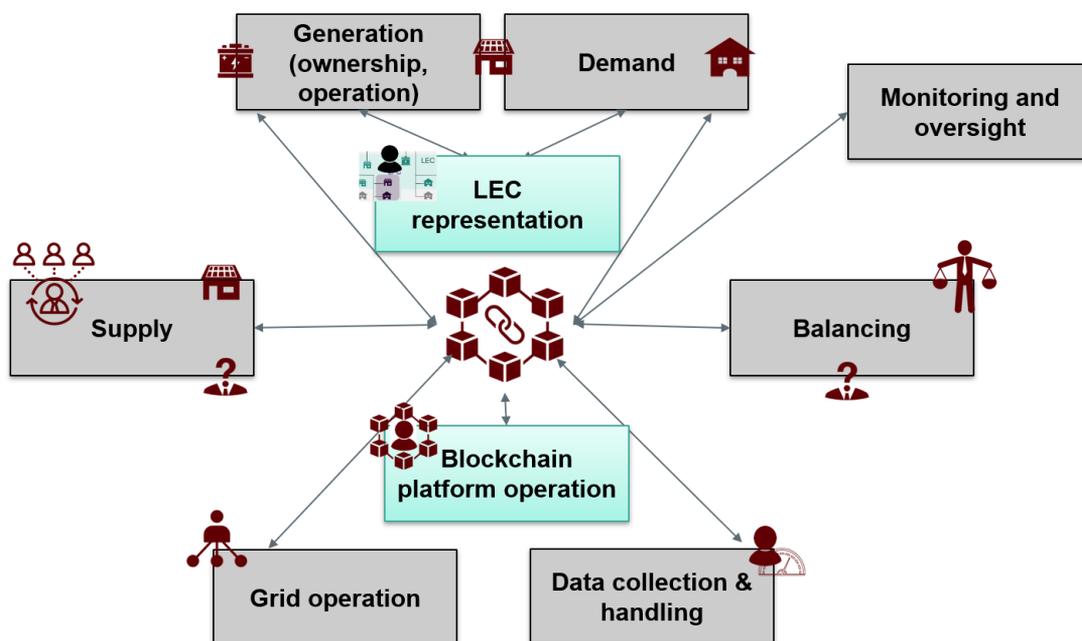


Abbildung 31: Schlüsselemente einer lokalen Energiegemeinschaft; erarbeitet im Workshop „Energy Communities - Technische Lösungen versus rechtliche/regulatorische Rahmenbedingungen“.

3.4. Relevanz in Bezug auf die Ausschreibung

Das Programm „Stadt der Zukunft“ beschreibt im Ausschreibungsleitfaden der 4. Ausschreibung folgende Programmzielsetzungen:

Ziel 1: Beitrag zur Entwicklung resilienter Städte und Stadtteile mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie hoher Lebensqualität

Die Blockchain-basierten Finanzierungsmodelle unterstützen die Integration erneuerbarer Erzeugungsanlagen sowie den lokalen Eigenverbrauch von Energiegemeinschaften. Die wird durch Algorithmen zur effizienten Verteilung, Speicherung und Nutzung der verfügbaren Energie unterstützt. Das Energiekonto unterstützt den Gedanken der Regionalität und kann weiters die Lebensqualität der Nutzer erhöhen.

Ziel 2: Beitrag zur Optimierung und Anpassung der städtischen Infrastruktur und zur Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots vor dem Hintergrund fortschreitender Urbanisierung und erforderlicher Ressourcen- und Energieeffizienz

Neue Blockchain-basierte Services wurde im Projekt entwickelt, welche den Ausbau der Energie-Infrastruktur (z.B. Erzeugungsanlagen, Wärmepumpen) unterstützen, die regionale Wertschöpfung steigern (Energiekonto) und neue Möglichkeiten für die Einwohner bieten (kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen)

Ziel 3: Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet intelligenter Energielösungen für Gebäude und Städte.

Im Projekt wurden neue Geschäftsmodelle entwickelt (z.B. Blockchain-basiertes Crowd-Funding), welche die regionale Wertschöpfung verbessern und neue Möglichkeiten für die Unternehmenspartner ermöglichen. Als Projekt mit innovativen Lösungen konnte ein enormer Wissensaufbau für die Forschungsinstitute geschaffen werden und basierend darauf wissenschaftliche Artikel erstellt und veröffentlicht werden. Weiters fließen die Erkenntnisse in weitere Forschungsprojekte ein (z.B. Projekt CLUE²⁵).

²⁵ Concepts, Planning, Demonstration and Replication of Local User-friendly Energy Communities, <https://project-clue.eu/https://project-clue.eu/>. FFG #878640

4 Schlussfolgerungen

Die im Projekt identifizierten und untersuchten Anwendungsfälle sowie der parallel dazu laufende Co-Creation Prozess haben gezeigt, dass es ein enormes Potential für Anwendungen auf Basis der Blockchain-Technologie im Energiebereich gibt, die sich auch in vermarktbar Services weiter entwickeln lassen. Das betrifft sowohl spezialisierte Anwendungen für Expert:innen als auch Anwendungen auf Haushaltsebene. Bei den im Projekt untersuchten Anwendungen wird seitens der Projektpartner unter anderem am interaktionslosen Laden und dem Ausbau des Energiekontos weitergearbeitet. Durch die gute interdisziplinäre Arbeit und die wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse in **SonnWende+** konnten weitere Projektideen und -anträge entwickelt und Folgeprojekte erfolgreich eingeworben werden (z.B. ERA-Net RegSys Projekt CLUE²⁶).

Im Blockchain-basierten Investitionsmodell für Photovoltaik-Anlagen von Privatkund:innen hängt die Dauer der Rückzahlung einerseits von einer optimalen Dimensionierung und andererseits vom Verbrauchsprofil des Haushalts ab (Deckung des Bedarfs durch die eigene Erzeugung). Über den Einsatz von privaten (lokal installierten) Energiemanagement-Systemen kann der Eigenverbrauch durch die optimale Steuerung von Verbrauchern und dem Einsatz von Heimspeichersystemen noch weiter erhöht werden. Weiteres Potential zur optimalen Nutzung der lokal erzeugten Energie bietet der Zusammenschluss zu Energiegemeinschaften, die den lokalen Eigenverbrauch durch Peer-to-Peer Energiehandel und den Einsatz von Gemeinschaftsanlagen (z.B. gemeinsame Erzeugungsanlagen, gemeinsame Batteriespeicher) erhöhen können. Die Sektorenkopplung über Power-to-Heat, also den Einsatz von Wärmepumpen, um den PV-Eigenverbrauch zu maximieren, ist eine vielversprechende Option. Jedoch ist zu beachten, dass hierbei eine Optimierung des Gesamtsystems PV-Anlage, Wärmepumpe und Gebäude wichtig ist, um attraktive Amortisationszeiten zu erreichen, insbesondere bei der Installation in Bestandsbauten. Weiters sind Möglichkeiten zur Verlagerung flexibler Wärmelasten (z.B. thermische Masse des Gebäudes, Warmwasserspeicher) zu berücksichtigen, um den Eigenverbrauch des PV-Stroms weiter zu erhöhen.

Es wurde gezeigt, dass der Honey Badger BFT-Konsensalgorithmus im etablierten Parity-Client verwendet werden kann und eine vergleichsweise hohe Leistung und andere sehr wünschenswerte Eigenschaften liefert, die für verschiedene spezifische Anwendungen im Energiesektor benötigt werden. Aufgrund der niedrigen Latenzzeit und der sofortigen absoluten Finalität in Kombination mit der hohen Leistung wird erwartet, dass dieser Client nach weiteren Verbesserungen eine sehr gute Wahl sowohl für private als auch für öffentliche Netzwerke sein wird. In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung [23] wurde der Honey Badger BFT-Konsens auch im Hinblick auf Dezentralisierung und Durchsatz als hoch eingestuft. Im Gegensatz zu der skizzierten Beschränkung auf "zulässige" Netzwerke ist aber bereits ersichtlich, wie er über das POSDAO-Protokoll [24] auch für "zulassungsfreie" Netzwerke mit einem definierten Validatorsatz zur Verfügung gestellt werden kann. Die durchgeführten Tests zeigen gute Aussichten für die Anwendung des Honey Badger BFT-Konsensalgorithmus in realen Live-Blockchain-Anwendungen, die definitiv nicht nur auf den Energiesektor beschränkt sind, sondern auch Anwendungen vorantreiben können, die bisher als unmöglich galten.

²⁶ CLUE, Concepts, Demonstration and Replication for Local User-friendly Energy Communities (#878640). <https://www.energieforschung.at/projekte/1065/concepts-demonstration-and-replication-for-local-user-friendly-energy-communities>

Die Blockchain bietet, wie die Anwendungsfälle zeigen, in diversen Konstellationen erhebliche Erleichterungen und Optimierungsmöglichkeiten für die Zukunft. Jedoch gehen mit den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten auch etliche rechtliche Vorgaben einher, die einzuhalten sind. Dies stellt häufig eine Hürde dar, da für viele neue Anwendungsfälle die Rechtsordnung noch nicht vollständig adaptiert und entwickelt ist. Zudem gilt es bei jedem noch so innovativen Vorhaben, möglicherweise bestehende gegensätzliche Interessen zu beachten und zu wahren. Im Bereich der Blockchain ist beispielsweise der Datenschutz ein essenzieller Bestandteil, welcher nicht außer Acht gelassen werden darf. Auch wenn es hier auf den ersten Blick einige Probleme gibt (speziell mit dem Recht auf Löschung des Endkund:innen), wurden im Rahmen des Projektes einige Lösungsansätze gefunden. Im Bereich der Local Energy Communities wird der Einsatz der Blockchain und die Einführung von Smart Contracts in größerem Ausmaß ermöglicht und können dementsprechend zu Optimierungen in Energiegemeinschaften beitragen. Die konkrete Ausgestaltung von LEC wird sich jedoch erst mit der Umsetzung des Winterpaktes auf nationaler Ebene herauskristallisieren.

Wesentliche Fragen wurden während der Projektlaufzeit gemeinsam mit Stakeholdern aus dem Energiebereich adressiert, die Projektergebnisse wurden zurückgespielt und diskutiert. Weiters wurden die Ergebnisse bei der Fachkonferenz „*Communcations for Energy Systems (ComForEn)*“ in den Jahren 2018 und 2019 einer breiteren Community präsentiert und im Zuge eines Workshops diskutiert, sowie für ein Fachpublikum in Form von Publikationen veröffentlicht [5] [25] [26] [16].

5 Ausblick und Empfehlungen

Der im Projekt durchgeführte Co-Creation Prozess hat gezeigt, dass für Nutzerinnen und Nutzer die einem Service zugrundeliegende Technologie nicht von entscheidender Bedeutung ist – solange wesentliche Kriterien wie Sicherheit, Zuverlässigkeit oder Bedienbarkeit erfüllt sind. Einige der untersuchten Anwendungsfälle, wie das interaktionslose Laden von Elektrofahrzeugen, haben durchaus das Potential für eine breite kommerzielle Anwendung, jedoch ist vor allem im Bereich der Zuverlässigkeit und Bedienfreundlichkeit noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich. Vor allem der Wechsel zwischen Kryptowährungen und realen Währungen stellt derzeit für private Anwender:innen eine Hürde dar, weiterführende Entwicklungsarbeiten in dieser Richtung werden daher empfohlen und im Zuge weiterer Kooperationen (z.B. im Projekt CLUE²⁷) durchgeführt.

Die durchgeführten Simulationen konnten ein großes Potenzial zur Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs in Energiegemeinschaften aufzeigen. Zusätzlich konnten weitere Potentiale durch die Anwendung der Sektorkopplung in Bezug auf die Einbindung von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizwärme identifiziert werden, hier besteht weiterer Forschungsbedarf zur Optimierung dieser Potentiale. Dabei ist zu beachten, dass die gebäudeseitigen Heizsysteme eine hohe Effizienz und niedrige Systemtemperaturen aufweisen, so dass der Betrieb von Wärmepumpen bzw. ein Anschluss an ein mit Wärmepumpen versorgtes Niedertemperatur-Fernwärmenetz wirtschaftlich möglich ist. Die Erweiterung des Lending-based Crowdfunding Ansatzes unterstützt Investitionen in andere Effizienz- oder Erzeugungsanlagen beim Verbraucher, wie z.B. Solarthermieanlagen, BHKWs oder Elektroheizstab. Die erzeugte Wärme kann einerseits für den Eigenverbrauch verwendet werden (zur Warmwasser-Bereitung und/oder Heizungsunterstützung), andererseits können ggf. vorhandene Überschüsse in das Wärmenetz eingespeist werden (Prosumer im Wärmenetz). Ebenso kommen Investitionen in (Strom-)Speicher zur Reduktion der Spitzenlasten des Gebäudes und damit einer reduzierten Anschlussleistung oder Langzeit(-wärme)speicher in Frage. Bei Letzteren kann ggf. vorhandene Überschusswärme im Sommer (z.B. aus Solarthermie oder Wärmepumpen) in den Speicher eingespeist werden und im Winter zur Wärmeversorgung genutzt werden.

Mit dem Einsatz der Blockchain-Technologie werden speziell im Energiebereich aus verschiedensten Aspekten rechtliche Fragen aufgeworfen und Vorgaben tangiert, die es einzuhalten gilt. Eine große Herausforderung ist die Konfrontation mit einer Fülle an Rechtsvorschriften, sowie das stetige Abwägen von verschiedenen Interessen (insbesondere Datenschutz). Eine großflächige Anwendung und somit einen Beitrag zur Energiewende kann die Blockchain-Technologie durch Einsatz in einer Energiegemeinschaft erfahren. Die Umsetzung des Winterpakets wird diesbezüglich in vielerlei Hinsicht Klarheit schaffen und konkrete Vorgaben bezüglich Rechte und Pflichten der Teilnehmer:innen von Local Energy Communities beinhalten.

²⁷ Concepts, Planning, Demonstration and Replication of Local User-friendly Energy Communities, <https://project-clue.eu/https://project-clue.eu/>. FFG #878640.

6 Verzeichnisse

6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die schrittweise Entwicklung von der Reduktion des Netzbezugs im Eigenheim bis zur optimierten, Systemdienstleitungen-bereitstellenden Region mit Blockchain-Technologie.	16
Abbildung 2: Übersicht Lending-based Crowdfunding.....	18
Abbildung 3: Lending-based Crowdfunding Modell für PV-Anlagen auf Basis der ARTIS-Blockchain. .	20
Abbildung 4: Technisches Schaubild der Demonstrations-Installation für Interaktionsloses Laden. ...	24
Abbildung 5: Verbrauch (blau, negativ) und Erzeugung (orange, positiv) in Watt von „Alice“ für jeweils 10 Tage im Winter (links) und 10 Tage im Frühling (rechts)	25
Abbildung 6: Verbrauch (blau, negativ) und Erzeugung (orange, positiv) in Watt von „Alice“ für jeweils 10 Tage im Sommer (links) und 10 Tage im Herbst (rechts)	25
Abbildung 7: Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch für die vier Kund:innen in einem Zeitraum von jeweils 10 Tagen im Winter (oben) und im Frühling (unten).	26
Abbildung 8: Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch für die vier Kund:innen in einem Zeitraum von jeweils 10 Tagen im Sommer (oben) und im Herbst (unten).	27
Abbildung 9: Arbeitsablauf, um Energieflüsse (links) und Geldflüsse zwischen Gemeinschaftsmitglieder zu berechnen (rechts).....	28
Abbildung 10: Ein- und Verkauf von Energie für das Jahr 2017, aufgeteilt auf die vier Jahreszeiten für alle Teilnehmer:innen der Energiegemeinschaft.	28
Abbildung 11: Schematische Darstellung eines Haushalts innerhalb der LEC mit unterschiedlichen Verbrauchstypen (fixer Verbrauch ohne Flexibilitätspotential, verschiebbare Lasten, Lasten mit Potential zur Speicherung), PV-Anlage, lokale Batterie, Wechselrichter, Smart Meter, Elektrofahrzeug und Netzanschlusspunkt.	29
Abbildung 12: Erzeugungs- und Verbrauchsprofile verschiedener Kund:innen und Jahreszeiten (Sommer, Winter, Übergangszeit).....	31
Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Energiegemeinschaft mit unterschiedlichen Haushalten, einem Gemeinschaftsspeicher und einer gemeinsamen PV-Anlage. Über ein Energiemanagement-System sind die Komponenten verbunden und können Flexibilitätsdienstleistungen bereitstellen sowie vorgegebenen Lastprofilen folgen.....	33
Abbildung 14: Darstellung der Transaktionslatenz bei synchronen Protokollen und deren Auswirkungen auf den Durchsatz.....	40
Abbildung 15: Neue Blöcke werden bei asynchronen Protokollen nur dann erzeugt, wenn Transaktionen vorhanden sind.....	41
Abbildung 16: Es werden sofort neue Blöcke in asynchronen Protokollen erzeugt, wenn Transaktionen nicht mehr in einen einzigen Block passen.	41
Abbildung 17: Verarbeitung von Transaktionen, um sie in einen Block aufzunehmen.	44
Abbildung 18: Latenzvergleich HBBFT vs. AuRa-Konsens mit Parity-Client-Software	45
Abbildung 19: Durchsatz in TPS im Zeitverlauf für Honigdachs-Konsens mit Parity-Client-Software ..	45

Abbildung 20: Kunde A (3.0 kWp): Überblick über den Verlauf der Energiemengen [kWh] im Zeitraum 2013 bis 2027 (Einspeisung - blau, Eigenverbrauch - orange, Netzbezug - grün, Gesamtverbrauch - rot, Erzeugung - violett, Residuallast - braun).....	47
Abbildung 21: Kunde A (3.0 kWp): Überblick über den Verlauf der Kosten- und Erlösdaten [€] im Zeitraum 2013 bis 2027 (Netzbezug - blau, Einspeisung - orange, Eigenverbrauch - grün).	48
Abbildung 22: Überblick über den Verlauf der Rückzahlung [€] für Kunde A (3.0 kWp)	48
Abbildung 23: Überblick über den Verlauf der Rückzahlung [€] für Kunde B (2.0 kWp).	49
Abbildung 24: Verlauf der verwendeten Tagesmitteltemperaturen über einen Zeitraum von 365 Tagen.	50
Abbildung 25: Aggregierte Energiekosten des Szenario I über mehrere Jahre.....	51
Abbildung 26: Verlauf der Rückzahlung der Investitionskosten des Szenario VIII.	52
Abbildung 27: schematische Darstellung des Übertrags von e-kWh Token über die ARTIS Blockchain.	53
Abbildung 28: Schematische Darstellung des interaktionslosen Ladens mit Blockchain-basierender Bezahlung.	54
Abbildung 29: Visualisierung des Peer-to-Peer Energy Tradings für zwei Szenarien: „Sharing in Smart Grid Community“ (links) und „EVU only“ (rechts).....	56
Abbildung 30: Gesamtkosten (Energie und Netznutzung) pro Kunde und Tag.	58
Abbildung 31: Schlüsselemente einer lokalen Energiegemeinschaft; erarbeitet im Workshop „Energy Communities - Technische Lösungen versus rechtliche/regulatorische Rahmenbedingungen“.	59

6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Szenarien.....	35
Tabelle 2: Bewertung der SonnWende+ Anwendungsfälle.	39
Tabelle 3: Überblick über die errechnete Rückzahlungsdauer.	49
Tabelle 4: Lending-based Crowdfunding Szenarien (Sektorkopplung)	51
Tabelle 5: Unterschiede der beiden Modelle der Energiegemeinschaften.	57

6.3. Literaturverzeichnis

- [1] KfW Bankengruppe, „KfW Förderung für Solarstromspeicher: Förderprogramm 275,“ Frankfurt, 2016.
- [2] . P. Biermayr, C. Dißauer, M. Eberl, M. Enigl, H. Fechner, L. Fischer, B. Fürnsinn, K. Leonhartsberger, . S. Moidl, C. Schmidl, C. Strasser, W. Weiss, P. Wonisch und E. Wopienka , „Innovative Energietechnologien in Österreich: Marktentwicklung 2018. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft; Berichte aus Energie- und Umweltforschung 20/2019,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2019.
- [3] W. Amann, N. Komendantova, C. Fleissner, W. Tancsits, A. Mundt, H. Seitz, V. Engelbert, Z. Fialikova, M. Müllbacher, J. Paul, A. Prenner, J. Wagner, A. Kollmann, K. de Bruyn, M. Schwarz , F. Klocker, G. Batelka, S. Prerovsky und H. Prokschy, „STROMBIZ – Geschäftsmodelle dezentrale Stromerzeugung und Distribution,“ Wien, 2016.
- [4] Republik Österreich, „Kleine Ökostromnovelle (288/ME),“ 2017.
- [5] R. Hemm, „Modellierung möglicher Blockchain-Applikationen im Kontext erneuerbarer elektrischer Einspeisung,“ Wien, 2018.
- [6] G. Borello, V. De Crescenzo und F. Pichler, „Factors for success in European crowdfunding,“ *Journal of Economics and Business*, Nr. 106, p. 105845, 2019.
- [7] G. K. Ahlers, D. Cumming, C. Günter und D. Schweizer, „Signaling in equity crowdfunding,“ *Entrepreneurship theory and practice*, Bd. 39, Nr. 4, pp. 955-980, 2015.
- [8] T. Jovanovic, „Crowdfunding: What Do We Know so Far?,“ *International Journal of Innovation and Technology Management*, Bd. 16, Nr. 1, 2019.
- [9] B. Mahapatra und A. Nayyar, „Home energy management system (HEMS): concept, architecture, infrastructure, challenges and energy management schemes,“ *Energy Systems*, 28 11 2019.
- [10] C. Calvillo, K. Czechowski, L. Soder, A. Sanchez-Miralles und J. Villar, „Vehicle-to-grid profitability considering EV battery degradation,“ in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016.
- [11] Visa Inc., „Corporate Responsibility & Sustainability Report,“ 2018.
- [12] V. Buterin, „Blockchain Trilemma“.
- [13] „Proof of work,“ [Online]. Available: https://en.bitcoin.it/wiki/Proof_of_work. [Zugriff am 06 05 2020].

- [14] „Bitcoin Energy Consumption Index,“ [Online]. Available: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>. [Zugriff am 06 05 2020].
- [15] V. Buterin und V. Griffith, „Casper the Friendly Finality Gadget,“ 2017.
- [16] T. Zeinzinger, „Real-live energy use cases utilizing blockchain infrastructure,“ in *ComForEn2018 Tagungsband*, Salzburg, Austria, 2018.
- [17] „Ethereum 2.0 Phases,“ [Online]. Available: <https://docs.ethhub.io/ethereum-roadmap/ethereum-2.0/eth-2.0-phases/>. [Zugriff am 06 05 2020].
- [18] A. Miller, Y. Xia, K. Croman, E. Shi und D. Song, „The Honey Badger of BFT Protocols,“ in *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 2016.
- [19] A. Gauba, „Finality in Blockchain Consensus,“ 30 August 2018. [Online]. Available: <https://medium.com/mechanism-labs/finality-in-blockchain-consensus-d1f83c120a9a>. [Zugriff am 13 05 2020].
- [20] „RANDAO: A DAO working as RNG of Ethereum,“ [Online]. Available: <https://github.com/randao/randao>. [Zugriff am 13 05 2020].
- [21] S. Omidiora, „Blockchain Finality - Proof of Work and Proof of Stake,“ 2018.
- [22] „AuRa Consensus in Parity,“ 2020. [Online]. Available: <https://openethereum.github.io/wiki/Aura>. [Zugriff am 13 05 2020].
- [23] Y. Xiao, N. Zhang, W. Lou und T. Y. Hou, „A Survey of Distributed Consensus Protocols for Blockchain Networks,“ 2020.
- [24] I. Barinov, V. Arasev, A. Fackler, V. Komendantskiy, A. Gross, A. Kolotov und D. Isakova, „POSDAO: Proof of Stake Decentralized Autonomous Organization,“ *SSRN Electronic Journal*, 2019.
- [25] T. Tötzer, F. Kupzog, M. Niederkofler, A. Schneemann, M. Stefan und T. Zeinzinger, „Blockchain als Gamechanger in der Energiewirtschaft,“ *Elektronik & Informationstechnik (e&i)*, Nr. 136, pp. 255-262, 2019.
- [26] M. Stefan und T. Tötzer, „Blockchain-based solutions in energy communities and the significance for Austrian energy stakeholders,“ in *Tagungsband ComForEn 2018, 9. Symposium Communications for Energy Systems*, Salzburg, 2018.
- [27] Y. Xiao, N. Zhang, W. Lou und Y. Hou, „A Survey of Distributed Consensus Protocols for Blockchain Networks,“ 2019.

7 Anhang

7.1. Fragebogen (Stakeholder-Befragung)

Frage 1) Ist Ihnen die Blockchain-Technologie ein Begriff?

1: Nein → Ende

2: Ja → Weiter mit Frage 1a

Frage 1a) Welche der folgenden Aussagen über Blockchain-Technologie trifft am besten auf Ihr Unternehmen zu?

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen

1: Habe davon gehört

2: Unser Unternehmen hat sich bereits damit beschäftigt

3: Unser Unternehmen hat sich damit intensiver auseinandergesetzt (z.B. Schulung der Mitarbeiter oder in einem Projekt)

4: Wir haben die Anwendung in unserem eigenen Unternehmen überlegt

Frage 2) Sind von Ihrem Unternehmen Blockchain-Aktivitäten geplant?

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen

1: Nein, es sind keine Blockchain-Aktivitäten geplant → Weiter mit Frage 4

2: Ja, es sind Aktivitäten geplant → Weiter mit Frage 2a

3: Ja, es sind bereits Blockchain-Aktivitäten im Laufen → Weiter mit Frage 2a

4: Ja, es werden bereits Blockchain-Aktivitäten als Proof-of-Concept durchgeführt → Weiter mit Frage 2a

5: Ja, es werden bereits Blockchain-Aktivitäten für die Markteinführung durchgeführt → Weiter mit Frage 2a

Frage 2a) In welcher Größenordnung sind diese Aktivitäten?

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen

1: Weniger als 100.000,--

2: 100.000,-- bis 500.000,--

3: Mehr als 500.000,--

Frage 3) Welche Aktivitäten werden aktuell im Blockchain-Bereich von Ihnen bzw. Ihrem Unternehmen forciert?

Frage 4) Worin liegt Ihrer Meinung nach der Vorteil der Blockchain-Technologie?

Frage 5) Ich nenne Ihnen nun eine Reihe von Bereichen. Welche davon sind Ihrer Meinung nach die größten Hürden und Gefahren bei der Blockchain-Technologie? Sie können sich für bis zu drei Bereiche entscheiden.

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen – bis zu 3 Nennungen sind möglich

- 1: Datenschutz, Datenhoheit
- 2: Cyber Security
- 3: Vulnerabilität (Versorgungssicherheit, Schutz kritischer Infrastruktur)
- 4: Rechtskonformität, Haftungen
- 5: Akzeptanz durch die Anwender (EVUs)
- 6: Akzeptanz durch die Kunden (Endverbraucher)
- 7: Hoher Rechen- und Energieaufwand
- 8: Komplexität
- 9: Mangelndes Expertenwissen, mangelnde Erfahrungen damit

Frage 6) Welches Potenzial sehen Sie durch Blockchain-Technologie in den folgenden Anwendungsfeldern? Vergeben Sie bitte jeweils eine Note zwischen 1 und 4, wobei:

- 1= radikale Veränderungen
- 2= sukzessive Verbreitung
- 3= bleibt Nischenanwendung
- 4= wird sich nicht durchsetzen

Neue Formen des Energiehandels

z.B. Peer-to-Peer Handel (Photovoltaik-Erzeuger handelt direkt mit dem Strombezieher) oder Handelsplattformen am Regelenergiemarkt

1 2 3 4

Netzmanagement

z.B. Etablierung von Mikronetzen, Nutzung dezentral verteilter Flexibilitäten wie Batteriespeicher

1 2 3 4

Lademanagement für E-Mobilität

z.B. Erkennung der Fahrzeuge und Abrechnung bei E-Ladesäulen

1 2 3 4

Zertifikatehandel/ Herstellungsnachweis

z.B. für Ökostrom oder regional erzeugten Strom

1 2 3 4

Finanzierung von Energie-Infrastruktur (Crowdsourcing für Erzeugungsanlagen)

1 2 3 4

Frage 7) Welche praktischen Einsatzgebiete der Blockchain-Technologie werden Ihrer Meinung nach als Erstes im Energiesektor erschlossen? Bitte wählen Sie aus den Einsatzgebieten, die ich Ihnen vorlese, bis zu drei aus.

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen – bis zu 3 Nennungen sind möglich

- 1: Finanzierung von Energie-Infrastruktur (Crowdsourcing für Erzeugungsanlagen)
- 2: Peer-to-Peer Handel (dezentrales Transaktionssystem ohne Intermediäre)
- 3: Regulenergiemarkt von Übertragungsnetzbetreibern (TSO – transmission system operators)
- 4: Stromabrechnung
- 5: Prosumer und Bürgerenergie (Vermarktung kleiner Photovoltaik-Anlagen, regional erzeugter Strom)
- 6: Netzmanagement
- 7: Zertifikathandel-Herstellungsnachweis (Ökostrom)
- 8: Etablierung von Mikronetzen (Microgrids)
- 9: Lademanagement für E-Mobilität

Frage 8) Wie hochschätzen Sie die Gefahr der "Disruption" bestehender Player durch die Blockchain-Technologie in der Energiebranche ein? Vergeben Sie bitte jeweils eine Note zwischen 1 und 3, wobei:

- 1= niedrig
- 2= mittel
- 3= hoch

1: Für konventionelle EVU (Energieversorgungsunternehmen)	1	2	3
2: Für DSO (Verteilnetzbetreiber - distribution system operators)	1	2	3
3: Für TSO (Übertragungsnetzbetreiber - transmission system operators)	1	2	3
4: Für Aggregatoren	1	2	3
5: Für spezialisierte Erzeuger erneuerbarer Energie	1	2	3

Frage 9) Wünschen Sie sich Änderungen der Rahmenbedingungen (z.B. rechtliche) im Hinblick auf die Blockchain-Technologie? Und wenn „ja“, welche?

- 1: Nein, keine Änderungen gewünscht
- 2: Ja, Änderungen gewünscht

Und zwar: _____

Frage 10) In welchen der folgenden Branchen sehen Sie das größte Potenzial für die Blockchain-Technologie? Sie können bis zu drei Branchen auswählen.

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen – bis zu 3 Nennungen sind möglich

- 1: Finanzen
- 2: Energie
- 3: Versicherungen
- 4: Handel
- 5: Verwaltung
- 6: Mobilität
- 7: Sicherheit
- 8: Produktion

Frage 11) Sagen Sie mir bitte abschließend noch, in welcher Branche Ihr Unternehmen (vorwiegend) tätig ist.

Int.: Antwortmöglichkeiten vorlesen – nur 1 Nennungen möglich

- 1: Konventionelles Energieversorgungsunternehmen (EVU)
- 2: Verteilnetzbetreiber (DSO – distribution system operator)
- 3: Übertragungsnetzbetreiber (TSO – transmission system operator)
- 4: Aggregator
- 5: Spezialist für erneuerbare Energie

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

7.2. Rechtsanalyse

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)