

Agentenbasiertes Energiemanagement und blockchainbasierte Organisation für Energiegemeinschaften

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts
zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff
„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“



Agentenbasiertes Energiemanagement und blockchainbasierte Organisation für Energiegemeinschaften

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum
Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff:

„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern - Integrierte
Konzepte, innovative Technologien und sozialwissenschaftliche Forschung
im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere“

Teilvorhaben EnStadt:Pfaff: „Fraunhofer EnergieIKT“

Förderndes Ministerium: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Projektträger: Forschungszentrum Jülich GmbH

Förderkennzeichen: 03SBE112D

Projektlaufzeit: 01.10.2017 – 31.12.2024

Autor: Arne Surmann

Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2, 79100 Freiburg

Veröffentlicht: Juli 2025

Die Verantwortung der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Das Verbundprojekt EnStadt:Pfaff wurde von 8 Partnern durchgeführt und als Leuchtturmprojekt gemeinsam gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Titelbild: Visualisierung Quartiersenergiemanagement, Quelle: Erstellt mit Dall-E 3

Weitere Informationen zu EnStadt:Pfaff: <https://pfaffquartier-klimaneutral.de/>

Zusammenfassung

Dieses Dokument präsentiert ein agentenbasiertes, dezentrales Energiemanagementsystem für nachhaltige Quartiere, die auf erneuerbaren Energien basieren. Ein Agent hat die souveräne Kontrolle über ein flexibles Gerät und erfüllt individuelle Ziele, die von seinem Eigentümer festgelegt werden, während er die von der Gemeinschaft festgelegten Ziele verfolgt. Diese Globalen Ziele werden incentiviert durch PV-Asset-Token, die in einer Blockchain gespeichert sind. Dieses Setup ermöglicht die Entwicklung einer heterogenen Energiegemeinschaft. Wir demonstrieren den Betrieb eines beispielhaften Agenten für die bidirektionale Steuerung eines Elektrofahrzeugs und zeigen, wie die blockchainbasierten Anreize in einem Szenario implementiert werden könnten, in dem ein lokales Versorgungsunternehmen als Betreiber der Energiegemeinschaft fungiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die dezentrale Optimierung den PV-Selbstverbrauch innerhalb der Energiegemeinschaft erhöht und tokenisierte PV-Anteile eine praktikable Lösung für die aktive Teilnahme von Prosumenten bieten.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abkürzungen.....	5
Abbildungen.....	6
Tabellen	6
Disclaimer	6
1 Einführung	7
1.1 Ermöglichung der Bottom-Up-Teilnahme an Energiegemeinschaften.....	7
1.2 Management verteilter Energiesysteme	8
2 Agentenbasiertes Energiemanagement innerhalb von Energiegemeinschaften	8
2.1 Was ist das beste Steuerungsschema für ein Quartiers EMS?.....	9
2.2 Was ist ein EnStadt:Pfaff-Energieagent?	10
2.3 Beispielhafte Optimierung eines batterieelektrischen Fahrzeugs	12
3 Blockchainbasierte Organisation von Energiegemeinschaften	14
3.1 PV-Asset-Zuweisung über Smart-Contracts	14
3.2 Die Pfaff-Energiegemeinschafts-App	16
4 Diskussion und Ausblick	17
5 Veröffentlichungen	19
6 Literatur	20

Abkürzungen

BEV	Battery electric vehicles (Batterieelektrische Fahrzeuge)
EMS	Energiemanagementsystem
EPV	Externe PV (PV-Strom, der in einem anderen Gebäude innerhalb des Quartiers produziert wird)
GET	Green Energy Token
IPV	Interne PV (PV-Strom, der im selben Gebäude produziert und verbraucht wird)
PV	Photovoltaik
REC	Renewable Energy Community (Erneuerbare Energiegemeinschaft)
RED III	Renewable Energy Directive (Erneuerbare Energien-Richtlinie)
SOC	State-of-charge (Ladezustand einer Batterie)
WP	Wärmepumpe
μ-CHPs	Micro combined heat and power (Mikro-Blockheizkraftwerk)

Abbildungen

Abbildung 1: Komponenten eines einzelnen Agenten, Quelle: Fraunhofer ISE	10
Abbildung 2: Verbundenes Multi-Agenten-System, Quelle: Fraunhofer ISE.....	11
Abbildung 3: Intelligentes Laden eines E-Autos, Links: Inputparameter eines Agenten, Rechts: Schema der Internen Agentenlogik, Quelle: Fraunhofer ISE	13
Abbildung 4: Zweistufiger Optimierungsansatz, Links: EV-Planung , diese steht für die Steuerung „Lade volle Leistung bei Ankunft , „EV EMS“ steht für das agentenbasierte, teamspezifische EMS mit aktivierter Entladung, Rechts: schematische Übersicht der Kommunikationsebene, Quelle: Fraunhofer ISE	13
Abbildung 5: Struktur des Prosumer-Eigentumssystems. 1. Sammlung von Stromquellen und -senken, 2. Übertragung des Energiegleichgewichts an den GET-Vertrag, 3. Auszahlung von GET, 4. Austausch von GET gegen Assets.....	15
Abbildung 6: Screenshots der Gemeinschafts-App, die die aktuellen Statistiken über den Energieverbrauch zusammen mit den finanziellen und ökologischen Auswirkungen anzeigt.....	17
Abbildung 7: Agenten-Demonstrator-Board innerhalb des Labortests. Links: Sechs Raspberry Pis, die auf einem tragbaren Board installiert sind. Rechts: Schematische Übersicht des Boards, einschließlich des EMS-Moduls (Agenten), des Kommunikationsnetzwerks (lila), des Blockchain-Netzwerks (grau), der REST-Schnittstelle und der EMS-Testumgebung mit verschiedenen Energiesystemsimulationen	18

Tabellen

Tabelle 1: Vor- und Nachteile eines dezentralen Energiemanagements	9
--	---

Disclaimer

EnStadt:Pfaff wurde gemeinsam mit fünf weiteren klimaneutralen Quartiersprojekten als Leuchtturmprojekt im Rahmen der Ausschreibung „Solares Bauen / Energieeffiziente Stadt“ gefördert. In Zusammenarbeit mit den anderen Leuchtturmprojekten ist ein Sammelband mit Ergebnissen der einzelnen Vorhabens entstanden und veröffentlicht worden. Ein Überblick der Ergebnisse zu Agentenbasierten Energiemanagementsystemen und Blockchain basierter Organisation von Energiegemeinschaften wurde im Sammelband der Leuchttürme auf Englisch veröffentlicht. Der Beitrag ist als Kapitel 20 zu finden unter dem Titel „20 Technologies for Climate Neutral Districts: Agent Based Energy Management and Blockchain Based Organization for Energy Communities“ [1]. Teile dieses Themenberichts wurden aus der Veröffentlichung mit Hilfe von GPT 4o Mini aus dem Englischen übersetzt. Die Originaltexte wurden ohne Hilfe von KI verfasst.

1 Einführung

Das Energiesystem durchläuft einen umfassenden Umstrukturierungsprozess, weg von einem fossilen und zentralisierten System hin zu einer dezentralen Struktur, die auf erneuerbaren Energiequellen basiert. Dies ist mit verschiedenen Herausforderungen verbunden. Wie können wir genügend erneuerbare Elektrizität produzieren, um nicht nur die heutige Nachfrage zu decken, sondern auch die Elektrifizierung des Heizungs- und Mobilitätssektors zu fördern? Wie können wir den Verbrauch mit der volatilen Stromproduktion von Wind- und Solaranlagen räumlich und zeitlich besser in Einklang bringen? Und wie kann dies auf eine sozial akzeptable Weise geschehen, bei der die Bürger aktiv teilnehmen und von dem Strukturwandel profitieren können? Viele Forschungen versuchen, diese und andere Fragen zu beantworten und einen Weg in eine kohlenstoffneutrale Zukunft zu ebnen. In der Arbeit im Vorhaben EnStadt:Pfaff zu diesem Thema wurden einige mögliche Lösungen entwickelt, um diese Fragen aus der Perspektive des Quartiers bottom-up zu beantworten.

1.1 Ermöglichung der Bottom-Up-Teilnahme an Energiegemeinschaften

Innerhalb von Quartieren ist es eine große Herausforderung, das Potenzial ungenutzter Dachflächen zu nutzen und so viele Photovoltaik (PV)-Anlagen wie möglich zu installieren, um Elektrizität direkt dort zu produzieren, wo sie verbraucht wird. In Städten sind PV-Anlagen meist die einzige nennenswerte lokale Energiequelle für die klimaneutrale Produktion von Elektrizität, die aber heute insbesondere in Mehrfamilienhäusern kaum genutzt wird. Dies liegt hauptsächlich am komplexen regulatorischen Rahmen. Denn die einzelnen Parteien, die in den Gebäuden wohnen oder Geschäfte betreiben, haben kaum die Möglichkeit, gemeinsam PV-Anlagen auf den Dächern zu installieren. Um die Zahl der PV-Anlagen in deutschen Städten auf Mehrfamilienhäusern deutlich zu steigern, wurde das Mieterstrom-Konzept implementiert. Da dieses jedoch hohe organisatorische und regulatorische Hürden mit sich brachte und die Kosteneinsparungen für die Mieter:innen relativ gering sind, wurde das Konzept nur sehr begrenzt umgesetzt. Die Auswirkungen des Mieterstrom-Konzepts auf das optimale Systemdesign und die Rentabilität in Mehrfamilienhäusern wurden in [2] analysiert, wo die Autoren eine Rentabilität feststellten, aber auch die hohe Komplexität der Investitionsentscheidungen bemerkten.

Auch wenn das Mieterstrom-Konzept erfolgreich umgesetzt wäre, hätte es immer noch den Nachteil, dass ein externer Dienstleister Solarstrom an die passiven Verbraucher innerhalb des Gebäudes mit einem gegenüber dem Standardstrompreis leichten Preisnachlass. Eine aktive Teilnahme von Prosumenten ist somit nicht möglich. Auf EU-Ebene fordert die Neufassung der Richtlinie über erneuerbare Energien RED III [3] die Möglichkeit zur aktiven Teilnahme von Prosumenten an der Energiewende und formuliert die Idee von erneuerbaren Energiegemeinschaften (REC). In [4] kommen die Autoren zu dem Schluss, dass RECs unter RED II ein nützliches Instrument für zukünftige Energiesysteme sein können. Da RECs durch heterogene Akteure gekennzeichnet sind, die in einer verteilten Weise organisiert sind, sind Blockchain-Netzwerke eine vielversprechende Wahl für deren Organisation. In [5] unterteilen die Autoren die Blockchain-Anwendungen im Energiesektor in acht Kategorien, wobei der „dezentrale Energiehandel“ die größte Anzahl an Anwendungen aufweist. Dies ist ein besonders beliebter Anwendungsfall innerhalb von Energiegemeinschaften, wie in [6] für eine Gemeinschaft in London oder in [7] in einer Simulationsstudie zu Mikronetzen demonstriert wird. Während der Handel mit Energie bereits im Detail untersucht wurde, sind Studien zur Darstellung von Erneuerbaren Energien-Erzeugung wie PV-Anlagen noch spärlich. In diesem Zusammenhang haben wir ein auf Smart-Contracts basierendes System entwickelt, das PV-Eigentumsstrukturen einfach, schnell und überprüfbar organisieren kann. Mit diesem System können Verbraucher entweder gemeinsam in PV-Anlagen investieren und ein digitales Eigentumsrecht haben oder das System wird von einer Gemeinde installiert und betrieben, die in die PV-Anlage investiert und anschließend PV-Anteile für energiewirtschaftlich vorteilhaftes Verhalten belohnt. Mit der Blockchain sind weitere Dienstleistungen möglich, um das Energiesystem des Quartiers weiter zu organisieren und die finanziellen und energetischen Flüsse im Blick zu behalten. Besonders das Thema

Energy-sharing ist von hoher Bedeutung. Die Anpassung lokaler Verbrauchs- und Produktionsmuster könnte den Selbstverbrauch und die Eigenversorgung der Gemeinschaft mit Solarstrom weiter erhöhen. Diese beiden organisatorischen Aspekte – PV-Eigentum und Energy-sharing-Mechanismen – unter Verwendung von Blockchain-Technologie werden in Abschnitt 2.2 vorgestellt.

1.2 Management verteilter Energiesysteme

Bei einem Energiequartier, das eine Energiegemeinschaft bildet, handelt es sich um ein verteiltes Energiesystem mit einer heterogenen Eigentumsstruktur die sowohl individuelle als auch gemeinschaftliche Ziele aufweisen. Neben den PV-Anlagen kann es flexible Produktions- und Verbrauchseinheiten geben, z.B. batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Wärmepumpen (WP) oder stationäre Batterien. Ein solches dezentrales System mit mehreren Quellen und Senken von Elektrizität, die verschiedenen Akteuren gehören, kann am besten auf ähnliche dezentrale Weise verwaltet werden. In [8] entwickelten die Autoren zwei Optimierungsrahmen, um zu zeigen, wie lokale Energiemärkte und Energy-sharing am besten in einer Energiegemeinschaft verwaltet werden können. Während diese Studie vielversprechende Ergebnisse liefert, erfolgt das Steuerungsschema auf zentralisierte Weise mit perfektem Marktwissen, was für eine praktische Implementierung im Kontext heterogener RECs weniger geeignet ist. In diesem Zusammenhang schlagen [9] ein dezentrales wettbewerbsfähiges Peer-to-Peer-Steuerungsschema für die Fernwärme- und Kühlnutzung unter Verwendung der dezentralen Blockchain-Infrastruktur IOTA [10] vor, das einen Rahmen bietet, der auch auf den Stromhandel angewendet werden könnte. Allerdings ist der Peer-to-Peer-Handel im aktuellen deutschen regulatorischen Rahmen nicht umsetzbar.

Daher haben wir einen externen Abrechnungsmechanismus mit einem dezentralen Optimierungsansatz kombiniert, um eine Bottom-Up-Kontrolle mit rechtlichen Anreizen als Optimierungsziel zu setzen. Wir haben ein agentenbasiertes Energiemanagementsystem entwickelt, bei dem mehrere Agenten die Ziele ihrer einzelnen Eigentümer im Blick behalten und gemeinsam auf die Gemeinschaftsziele hinarbeiten, um den PV-Selbstverbrauch zu maximieren und gleichzeitig die Netzspitzen auf der Verteilungsebene zu minimieren. Das System wird im folgenden Abschnitt 3 vorgestellt.

2 Agentenbasiertes Energiemanagement innerhalb von Energiegemeinschaften

Ein typisches Quartier besteht aus verschiedenen unabhängigen Parteien mit unterschiedlichen Motivationen und verschiedenen Geräten, die im Energiesystem betrieben werden. Das Pfaff-Quartier in Kaiserslautern, für das im Rahmen von EnStadt:Pfaff Lösungen entwickelt wurden, soll ein Mischgebiet mit Gewerbe- und Wohneinheiten werden, in dem Büros, Restaurants und Geschäfte eine wichtige Rolle im zukünftigen Energiesystem spielen. Weiter sind die Wohneinheiten für verschiedene Nutzer mit unterschiedlichen sozioökonomischen Hintergründen vorgesehen. Das Energiemanagement für das Pfaff-Quartier konzentriert sich hauptsächlich auf den Elektrizitätssektor, da ein Nahwärmenetz umgesetzt wird, so dass eine dezentrale Wärmeerzeugung nicht vorhanden ist. Es gibt zwei Quellen für Elektrizität im Quartier: PV-Anlagen auf den Dächern und an den Fassaden der Gebäude sowie der Import von Strom aus dem öffentlichen Netz. Die wichtigsten flexiblen Geräte sind E-Mobil-Ladestationen und stationäre Batteriesysteme, gefolgt von Kühl- und Klimaanlage. Diesbezüglich sind Wärmepumpen ebenfalls in den Entwicklungsprozess einbezogen.

2.1 Was ist das beste Steuerungsschema für ein Quartiers EMS?

Wenn man über Energiemanagementsysteme spricht, sind grundsätzlich zwei verschiedene Designs möglich:

1. Bei einem zentralisierten Ansatz werden alle Daten über den aktuellen Zustand des Energiesystems an eine zentrale Recheneinheit gesendet, die ein Optimum berechnet und Steuersignale an die dezentralen Geräte zurücksendet.
2. Bei einem dezentralen Ansatz wird an vielen Stellen im System nur eine begrenzte Menge an Zustandsdaten von nur einem oder wenigen Geräten gesammelt. Die optimale Betriebsweise wird von einzelnen Einheiten in der Nähe der Geräte für den den begrenzten Gerätepools berechnet.

Beide Methoden können entweder in unmittelbarer Nähe zum Energiesystem verwendet werden oder es kann eine Cloud-Lösung gewählt werden, bei der im dezentralen Ansatz das Energiemanagement weiterhin in Teilsysteme unterteilt ist, die autonom agieren, aber die Recheneinheit ein Cloud-Server ist, der überall platziert werden kann. Darüber hinaus sind hybride Lösungen möglich, die nicht vollständig zentralisiert, aber auch nicht vollständig dezentralisiert sind. Die Vor- und Nachteile eines dezentralen Energiemanagements sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile eines dezentralen Energiemanagements

Vorteile dezentrales Energiemanagement	Nachteile dezentrales Energiemanagement
Hohe Resilienz, kein einzelner Ausfallpunkt	Schwieriger, ein Optimum zu finden
Einfach skalierbar/anpassbar	Gefahr von Oszillationen
Private Daten bleiben privat	Gefahr widersprüchlicher individueller Ziele
Individuelle Ziele/Konfiguration möglich	Höherer Kommunikationsbedarf
Steuerung nahe am Zielgerät	Mehr Steuerungshardware erforderlich

Ein dezentrales EMS hat den Vorteil, dass es keinen einzelnen Ausfallpunkt bietet. Wenn eine zentrale Recheneinheit ausfällt, fällt das gesamte EMS aus, während bei einem dezentralen Ansatz nur ein entsprechendes Teilsystem ausfällt und der Hauptteil des EMS weiterhin funktioniert. Darüber hinaus ist das System leicht anpassbar, indem einfach ein weiteres Steuergerät angeschlossen und mit seinen zugehörigen Energiedevices und dem EMS-Netzwerk verbunden wird. Ein weiteres Argument für die Dezentralisierung ist das private Verhalten des dezentralen Systems, private Daten bleiben innerhalb eines gekapselten Teilsystems, und individuelle Ziele können verfolgt werden, ohne dass ein zentrales System individuelle Steuerungsentscheidungen überstimmt.

Andererseits ist es schwieriger, ein systemweites Optimum zu finden, wenn verschiedene Teilziele vorhanden sind, die sogar widersprüchlich sein können. Daher ist die Definition der richtigen Anreize der Schlüssel zu einem dezentralen EMS, bei dem ein Konsens über ein gemeinsames Optimum gewünscht ist. Die Suche nach diesem Optimum kann mehrere Iterationen der Kommunikation zwischen den Teilsystemen erfordern, und im schlimmsten Fall kann eine Oszillation des Systems auftreten, wenn die Teilsysteme zwischen zwei Zuständen wechseln, um sich an die sich ebenfalls ändernden Informationen anderer Teilsysteme anzupassen. Schließlich, wenn das dezentrale EMS direkt an den zugehörigen Geräten installiert ist, müssen viele unabhängige Hardwarekomponenten installiert werden, was kostspielig ist und möglicherweise eine Verschwendung von Ressourcen darstellt, um die Resilienz gegen Kommunikationsausfälle zu erhöhen. Dieser letzte Punkt gilt nur, wenn physische Geräte vorhanden sind. In

einer cloubasierten Lösung wird die Anzahl der Hardwaregeräte reduziert, auf Kosten eines zusätzlichen Kommunikationsnetzwerks, um mit dem Energiesystem zu kommunizieren.

Für das Projekt EnStadt:Pfaff wurde ein hierarchischer dezentraler Ansatz mit zwei verschiedenen Aggregationsebenen gewählt, bei dem dezentrale Recheneinheiten weiter als Energieagenten oder einfach als Agenten bezeichnet werden. Diese Topologie eignet sich am besten für die heterogene Struktur einer Energiegemeinschaft.

2.2 Was ist ein EnStadt:Pfaff-Energieagent?

Laut der VDI/VDE-Richtlinie 2653 ist „ein technischer Agent eine abgrenzbare (Hard- und/oder Software-) Einheit mit definierten Zielen. Ein technischer Agent versucht, diese Ziele durch autonome Aktionen und durch Interaktion mit seiner Umgebung und anderen Agenten zu erreichen“ [11]. In diesem Kontext kann ein Agent verschiedene Grade von Autonomie, Kognitivität, Sozialität, Aktivität, Anpassungsfähigkeit und Robustheit aufweisen. Im Rahmen des Projekts EnStadt:Pfaff sind verschiedene Arten von Agenten für spezifische, steuerbare und nicht steuerbare Lasten und Generatoren vorhanden. Eine schematische Übersicht eines Agenten mit einem angeschlossenen steuerbaren Gerät ist in Abbildung 1 dargestellt.

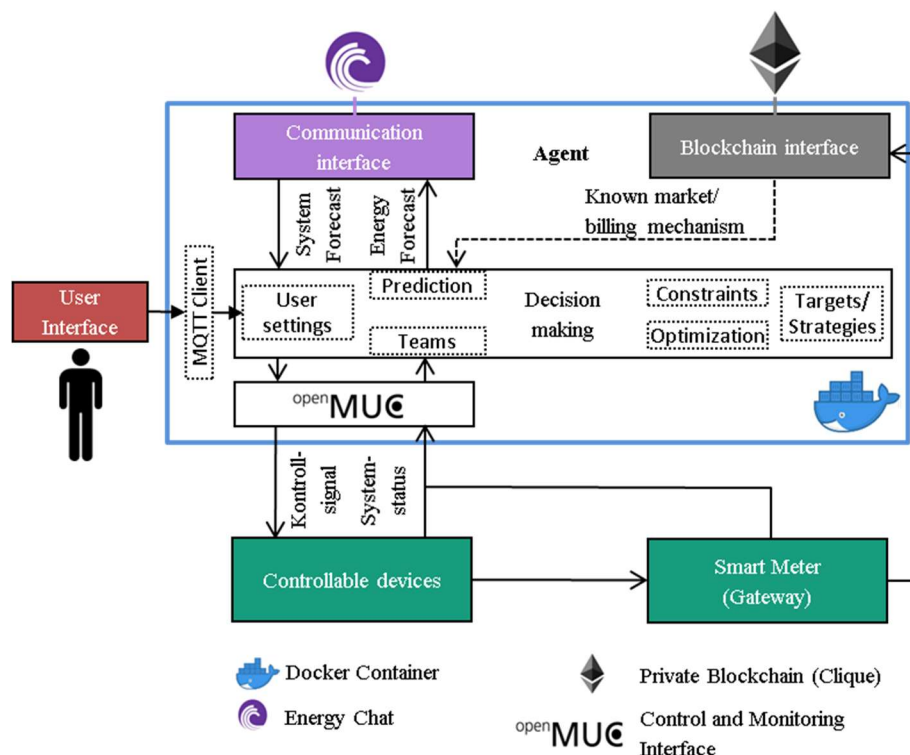


Abbildung 1: Komponenten eines einzelnen Agenten, Quelle: Fraunhofer ISE

Ein Agent mit einem angeschlossenen steuerbaren Gerät hat entsprechend Abbildung 1 vier Schnittstellen, um mit seiner Umgebung zu interagieren:

1. Die Kommunikationsschnittstelle wird unter Verwendung von zeronet (<https://zeronet.io/>) implementiert, einem Peer-to-Peer-Chat, der das BitTorrent-Protokoll verwendet, um den Agenten mit anderen Agenten zu verbinden. Im Pfaff-Projekt wird sie verwendet, um Energieprognosen oder -pläne zu kommunizieren.

2. Die Blockchain-Schnittstelle ist ein Ethereum-Vollknoten in einer privaten Blockchain, in der verschiedene Smart-Contracts angesprochen werden können, die Anreize bieten, um auf ein gemeinsames Ziel hinzuarbeiten. Ethereum wurde gewählt, da es das am weitesten verbreitete Smart Contract-basierte Blockchain-Protokoll ist, von dem viele andere Blockchains abgeleitet sind. Andere Smart Contract-basierte Protokolle sind ebenfalls möglich (z.B. eine Implementierung innerhalb des Energy Web Multi-Verse www.energyweb.org).
3. Die Benutzerschnittstelle bietet die Möglichkeit für einen Benutzer, spezifische Ziele festzulegen und Informationen über geplantes Verhalten für bessere Energiepläne hinzuzufügen. (Hinweis: Dies kann über die Smart Home-Schnittstelle und Daten von der ICT-Plattform erfolgen. Siehe dazu den Themenbericht Smart Home [12]).
4. Die Geräteschnittstelle wird als REST-Verbindung implementiert, die Nachrichten an und von dem openMUC (<https://www.openmuc.org/>) Übersetzer leitet, der verschiedene Kommunikationsprotokolle implementiert hat, um Nachrichten mit einem bestimmten energetischen Verbraucher auszutauschen.

Über diese vier Schnittstellen interagiert der Agent mit seiner Umgebung und sammelt Daten, um einen optimalen Betriebsplan für ein angeschlossenes steuerbares Gerät zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt innerhalb des zentralen „Entscheidungsmoduls“. Kurz gesagt, der Agent berechnet einen optimalen Betrieb des flexiblen Geräts, indem er zuerst die Benutzerziele erfüllt und zweitens den gemeinsamen Marktanreizen folgt. Diese Pläne werden mit anderen Agenten kommuniziert, die die Informationen in ihrer eigenen Optimierung verwenden. Ein kleines Multi-Agenten-System ist in Abbildung 2 dargestellt.

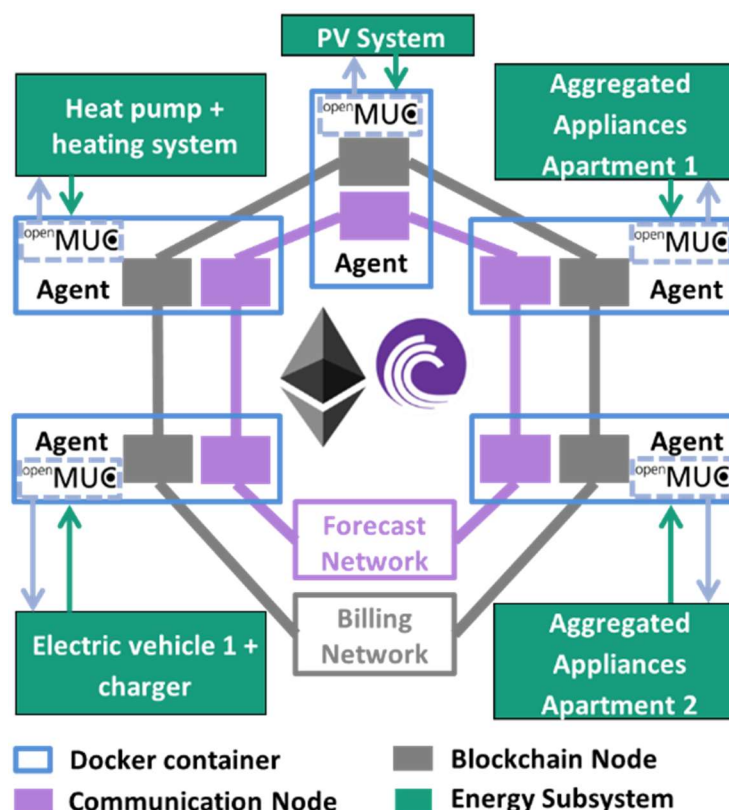


Abbildung 2: Verbundenes Multi-Agenten-System, Quelle: Fraunhofer ISE

2.3 Beispielhafte Optimierung eines batterieelektrischen Fahrzeugs

Im Kontext von EnStadt:Pfaff wurde festgestellt, dass die BEV-Optimierung die größte erwartete Auswirkung auf das Energiesystem hat. Die BEV-Optimierung ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein Preismechanismus wurde implementiert, um den lokalen PV-Verbrauch innerhalb der Gemeinschaft zu maximieren. Er unterscheidet zwischen drei Energiequellen (von der günstigsten bis zur teuersten):

1. Interne PV (IPV): PV-Strom, der im selben Gebäude produziert und verbraucht wird.
2. Externe PV (EPV): PV-Strom, der in einem anderen Gebäude innerhalb des Quartiers produziert wird.
3. Netz: Energie, die über das öffentliche Netz bereitgestellt wird.

Dieser Preismechanismus bietet den gemeinsamen Anreiz für Agenten, ihren Umsatz durch den Verbrauch von PV-Energie zu maximieren. Im Kontext der BEV bedeutet dies, den Ladevorgang neu zu planen, um die benutzerspezifischen Ziel-Ladezustand (SOC, State of Charge) zur benutzerspezifischen Abfahrtszeit unter Nutzung der maximalen PV-Erträge zu garantieren, während die kommunizierte Energienutzung anderer Lasten innerhalb des Systems berücksichtigt wird. Diese Zustandsvariablen sind im linken Teil von Abbildung 3 dargestellt. Die entsprechende Optimierung wird im rechten Teil von Abbildung 3 visualisiert. Das Schema ist in 4 verschiedene Spalten unterteilt. Links sind 4 verschiedene chronologische Phasen aufgeführt. In der Mitte zeigen Balkendiagramme die drei verschiedenen Energiequellen in einer Zeitreihe. Rechts wird ein Batteriespeicher visualisiert, in dem die geplanten Energiepakete, die innerhalb der geplanten Zeitintervalle verwendet werden, aggregiert werden, um den Ziel-SOC zu erreichen. Weiter werden die entsprechenden Energiekosten für den aktuellen Planungszeitraum angezeigt. In der ersten Phase „Shares“ werden die Verfügbarkeiten der verschiedenen Energiequellen innerhalb des Planungszeitraums (z.B. 24 Stunden in die Zukunft mit einer 15-minütigen Auflösung) von der Kommunikationsschnittstelle gesammelt, zusammen mit den Informationen über die Ankunfts-SOC, die vom Elektrofahrzeug über die Ladestation kommuniziert werden, und der Ziel-SOC als Benutzereingabe (Standard 80%). Im zweiten Schritt „IPV“ überprüft die Optimierung, ob der ihr zugewiesene interne PV-Anteil ausreicht, um die Ziel-SOC zu erreichen, was im Beispiel nicht der Fall ist. Der gleiche Prozess wird in der „EPV“-Phase mit der externen PV-Quelle verwendet, die zusätzlich zur bereits geplanten IPV-Nutzung, die durch die maximale Ladeleistung begrenzt ist, hinzugefügt wird. Im letzten Schritt wird die fehlende Strommenge geplant, die aus dem Netz bezogen werden muss. Solarstrom muss dabei immer prioritär genutzt werden, während der Bezug von Netzstrom geplant wird, um kurz vor der Abfahrtszeit den gewünschten SOC zu erreichen. So lässt sich der PV-Anteil erhöhen, falls sich die Prognosen oder Pläne anderer Agenten während der Parkzeit ändern.

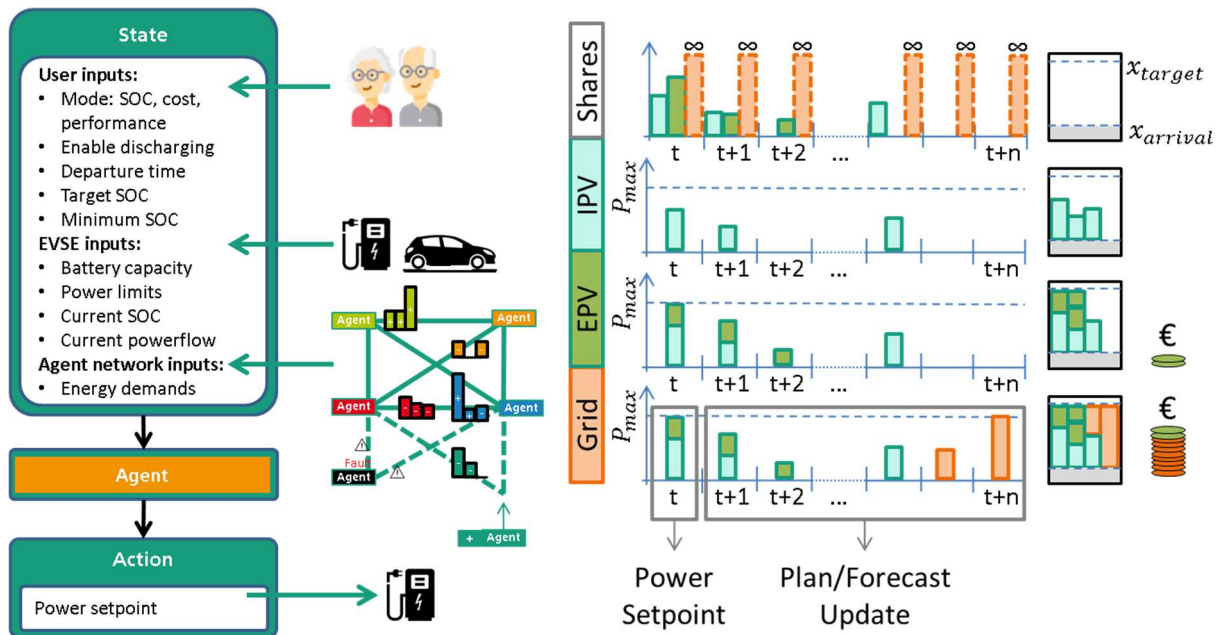


Abbildung 3: Intelligentes Laden eines E-Autos, Links: Inputparameter eines Agenten, Rechts: Schema der Internen Agentenlogik, Quelle: Fraunhofer ISE

Diese grundlegende Ladeoptimierung wird durch einen zweistufigen Optimierungsansatz erweitert, bei dem der ursprüngliche Agentenpool in mehrere Unterpools unterteilt wird, die als „Teams“ bezeichnet werden, und eine zweite Ebene, die die Teams verbindet und als „Gemeinschaftsebene“ bezeichnet wird. Ein Team könnte aus allen Agenten eines Benutzers gebildet werden (z.B. BEV-Agent, PV-Agent und Smart-Home-Agent) oder, wie im obigen Beispiel, aus allen Agenten innerhalb eines Gebäudes, die gemeinsam IPV konsumieren, wie in Abbildung 4 visualisiert. Dies bietet auch die Möglichkeit, bidirektionales Laden zu incentivieren. In diesem Fall optimiert der BEV-Agent nicht nur den Ladevorgang selbst, sondern behält auch die Zeitpläne anderer Teammitglieder im Auge. Er kann entscheiden, in das Gebäude zu entladen (linker Teil von Abbildung 4, 16:00–23:00), um Strom für nicht flexible Geräte bereitzustellen und später mit überschüssiger PV-Energie zu laden. So kann das Ziel-SOC weiterhin mit kostengünstiger erneuerbarer Energie erfüllt werden (linker Teil von Abbildung 4, 9:00–15:00). Der mehrstufige Ansatz bietet einen weiteren Vorteil gegenüber der einheitlichen Kommunikationsebene, nämlich eine Reduzierung der Kommunikationsnachrichten, da sich zuerst ein kleinerer Pool über eine optimale Energienutzung einigt, bevor das Team gemeinsam mit allen anderen Teams innerhalb der Gemeinschaft interagiert (rechter Teil von Abbildung 4 visualisiert die zweistufige Kommunikation).

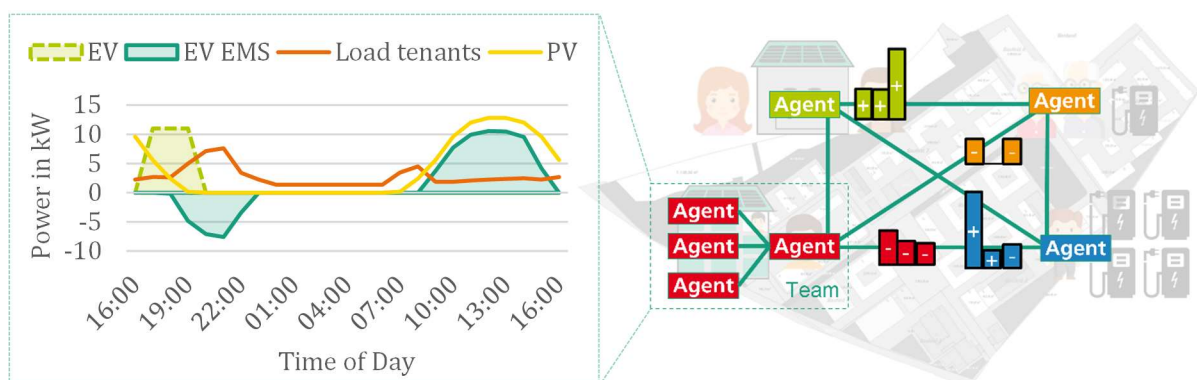


Abbildung 4: Zweistufiger Optimierungsansatz, Links: EV-Planung, diese steht für die Steuerung „Lade volle

Leistung bei Ankunft, „EV EMS“ steht für das agentenbasierte, teamspezifische EMS mit aktivierter Entladung, Rechts: schematische Übersicht der Kommunikationsebene, Quelle: Fraunhofer ISE

Dies ist nur eine spezifische BEV-Optimierungsstrategie, damit sollte jedoch die grundlegende Idee des Multi-Agenten-Ansatzes innerhalb des Quartiers und/oder der Energiegemeinschaft klar geworden sein. Andere flexible Agenten werden unterschiedliche gerätespezifische Einschränkungen und benutzerspezifische Ziele haben. Die Optimierung, die dem Marktmechanismus folgt, garantiert jedoch das gemeinsame Ziel einer maximalen PV-Nutzung.

3 Blockchainbasierte Organisation von Energiegemeinschaften

Für das Gesamtquartier stellt sich die Frage, wie ein Quartier organisiert werden kann, sodass alle beteiligten Parteien einen Konsens darüber finden, was der Zustand des Energiesystems ist und wie die intern produzierte Energie zwischen den verschiedenen Bewohnern und Unternehmen aufgeteilt werden soll. Eine Antwort könnte darin bestehen, eine dritte Partei damit zu beauftragen, z.B. die Kommune. Unabhängig von dieser Lösung wurde im Rahmen des Projekts EnStadt:Pfaff untersucht, ob die Nachbarschaft eine technische Lösung etablieren könnte, die das System selbst verwaltet, wenn sie sich als Energiegemeinschaft etabliert. In diesem Kontext kann eine Blockchain mit speziellen Smart-Contracts transparente Anreize für das zuvor präsentierte Agentensystem bieten, um gemeinsamen Zielen zu folgen. Transaktionen können in einem sicheren und vertrauenswürdigen Ledger (Digitale Datenbank der Blockchain, die Transaktionen aufzeichnet) gespeichert werden, und digitale Eigentumsrechte an verteilten PV-Assets können generiert und gehandelt werden.

3.1 PV-Asset-Zuweisung über Smart-Contracts

Während eine perfekte Energiegemeinschaft anstreben würde, dass mehrere Parteien im Pfaff-Quartier gemeinsam PV-Assets kaufen und ihr eigenes Energiesystem verwalten, ist dieses Szenario in der Realität unwahrscheinlich. Erstens, weil die Stakeholder – das sind Personen, die Wohnungen und Geschäftseinheiten besitzen, zusammen mit Personen, die dort leben und Unternehmen, die im Quartier tätig sind – noch nicht bekannt sind. Zweitens ist es ehrgeizig, den anfänglichen Schaffensprozess von unten nach oben ohne einen professionellen Akteur durchzuführen. Daher wurde eine Lösung entwickelt, bei der eine zentrale Einheit, die bereits im Quartier vorhanden ist in verschiedene PV-Anlagen investiert und Betreiber der Energiegemeinschaft wird. Dies könnte im Pfaff-Quartier beispielsweise das kommunale Versorgungsunternehmen sein. Dadurch wird eine langfristige Partnerschaft möglich, bei der das Versorgungsunternehmen jegliche fehlende Elektrizität liefert, die nicht innerhalb des Gebäudes oder des Pfaff-Quartiers produziert werden konnte. Darüber hinaus verkauft das Versorgungsunternehmen zu Beginn die PV zusammen mit der verbleibenden Netzenergie an die Gemeinschaft, um die anfängliche PV-Investition zurückzuzahlen. Allmählich, während die Investition zurückgezahlt wird, werden Anteile der PV-Anlagen an die Gemeinschaft verteilt, wodurch sich langsam die prosumerbasierte Energiegemeinschaft entfaltet. Dieses System zur Zuweisung von PV-Asset-Anteilen ist in zwei Schichten unterteilt: (1) Energiebilanzierungsschicht und (2) Token-Schicht (siehe Abbildung 5).

Das Kernelement der Energiebilanzierungsschicht ist der „Energie-Balancing-Vertrag“. Dieser Smart Contract enthält die Elektrizitätsmengen zu jedem Zeitpunkt, auf die jeder Akteur gemäß seinen vorherigen Anteilen an PV-Assets Anspruch hat, zusammen mit dem individuellen Verbrauch. Mehrere ineinandergreifende Funktionen des Balancing-Vertrags berechnen den Überschuss oder Mangel an Strom im Verhältnis zum Strombedarf des jeweiligen Teams aus der verfügbaren Menge an Strom. Nach Abschluss dieser Berechnung wird das Verhältnis zwischen IPV und EPV (siehe Kapitel 3.3) für jedes Team einzeln berechnet. Hier werden die Elektrizitätsmengen, die aus den eigenen PV-Anteilen stammen, mit

0 €/kWh angesetzt. Um die individuellen Rechnungen zu berechnen, ist ein Smart-Meter-System mit einer 15-minütigen Auflösung erforderlich, dass alle Energieflüsse für die verschiedenen Teams und den Netz-Austausch mit der Gemeinschaft misst.

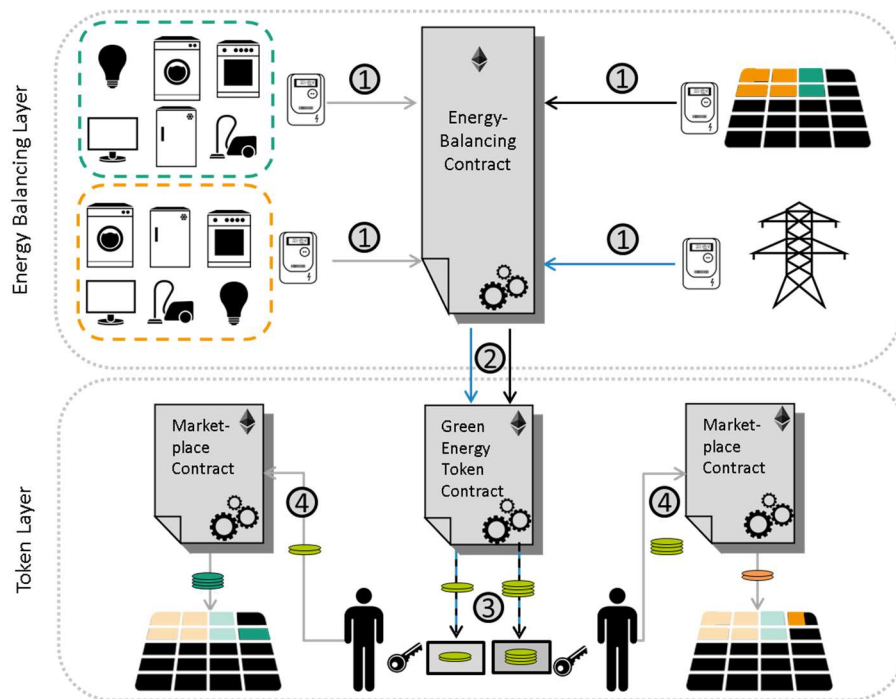


Abbildung 5: Struktur des Prosumer-Eigentumssystems. 1. Sammlung von Stromquellen und -senken, 2. Übertragung des Energiegleichgewichts an den GET-Vertrag, 3. Auszahlung von GET, 4. Austausch von GET gegen Assets

Die im Balancing-Vertrag berechneten Werte werden an den „Green Energy Token Contract“ in der Token-Schicht übertragen. Die Hauptaufgabe dieses Vertrags besteht darin, die „Green Energy Tokens“ (GET) zu berechnen, auf die die Teams Anspruch haben, und deren Verteilung auf die Teamkonten. Dies sind Blockchain-Wallets. Je größer die Menge an Elektrizität, die aus den EPV-Anteilen erzeugt wird (zu Beginn sind 100 % der PV EPV, da sie im Besitz des Versorgungsunternehmens ist), desto höher ist die Anzahl der GETs, die verteilt werden. Derzeit ist das Verhältnis auf 1:10 festgelegt. Das bedeutet, dass jede kWh aus EPV mit einem GET vergütet wird, während zehn kWh aus dem Netz erforderlich sind.

Im nächsten Schritt können die Eigentümer der Blockchain-Wallets die GETs, die sie erhalten, gegen tokenisierte PV-Anlagenanteile einlösen. Der dritte Smart Contract, der „Marktplatzvertrag“, wird zu diesem Zweck verwendet. Die gewünschte Anzahl an GETs wird an ihn übertragen, und PV-Asset-Token werden im Verhältnis 500:1 verteilt. Für die Einzahlung von 500 GETs wird 1 PV-Asset-Token verteilt, der 0,1 kW_p installierter PV-Leistung entspricht.

Durch den beschriebenen Mechanismus zur Erfassung von Verbrauchs- und Erzeugungsdaten über Smart Meter, durch die Berechnung der Anteile an eigener und fremder Elektrizität, auf die das jeweilige Team Anspruch hat, und durch die Verteilung von GET zur anschließenden Einlösung von GET gegen PV-Asset-Token verringern sich die PV-Anteilseigner der Versorgungsunternehmen ständig, während die der Teams/Haushalte ständig zunehmen. Dies ermöglicht das Wachstum einer prosumerbasierten Energiegemeinschaft, wie es die europäische Erneuerbare Energien-Richtlinie RED III vorsieht [3]. Der gesamte Prozess wird transparent und überprüfbar innerhalb des Blockchain-Systems gespeichert. Dadurch erhalten Energieagenten einen vertrauenswürdigen Anreiz, lokale PV-Energie zu nutzen. Der Verbrauch von Energie aus den eigenen Anteilen des Teams (IPV) bringt einen direkten Kostenvorteil,

der Verbrauch von EPV generiert zusätzliche GET, die gehandelt werden können, um den PV-Anteil weiter zu erhöhen.

Für die Implementierung des beschriebenen Systems haben wir eine auf Ethereum basierende private Blockchain mit einem Proof-of-Authority-Mechanismus gewählt, bei dem das Versorgungsunternehmen als Validator festgelegt wurde. Diese Einstellung mit einer regierenden Einheit ist auf den regulatorischen Rahmen in Deutschland zurückzuführen, in dem bislang keine echte gemeinschaftsbasierte Lösung möglich ist. Der gesamte Mechanismus mit PV-Assets, die durch Token dargestellt werden, und einer Belohnung in GET für energiewirtschaftlich vorteilhaftes Verhalten kann jedoch auf verschiedenen Smart Contract-basierten Blockchain-Protokollen implementiert werden und ist besonders nützlich für selbstverwaltete Energiegemeinschaft mit sich ändernden heterogenen Eigentumsstrukturen. Die Blockchain wurde als privat festgelegt, da alle Interaktionen mit der Chain auf Mitglieder der Gemeinschaft beschränkt sind. Bei Verwendung einer öffentlichen Chain könnten dieselben Smart-Contracts auf verschiedenen Knoten bereitgestellt werden, wobei der Zugang auf bestimmte Konten innerhalb der Gemeinschaft beschränkt werden müsste. Für eine Energiegemeinschaft glauben wir an eine private Chain, während für die Skalierung eines solchen Systems eine öffentliche Chain mit eingeschränktem Zugang die Eintrittsbarrieren für eine Gemeinschaft senken würde.

3.2 Die Pfaff-Energiegemeinschafts-App

Da die digitale Kompetenz der Haushalte innerhalb der heterogenen Pfaff-Nachbarschaft (siehe Kapitel 3) variiert, aber wichtig für das Verständnis und die Akzeptanz der blockchainbasierten Eigentumssysteme ist [13], wurde die „Pfaff-Energiegemeinschafts-App“ entwickelt (siehe Abbildung 6). Bei der Gestaltung des Prosumer-Eigentumsprogramms wurden vier Gestaltungsprinzipien als besonders relevant identifiziert. Das erste besteht darin, den Haushalten Spielraum zu geben. Zum Beispiel ist das Verhältnis von GET zu PV-Asset-Token festgelegt, jedoch können Haushalte wählen, ihre GET möglicherweise für andere Dienstleistungen innerhalb der Pfaff-Nachbarschaft einzulösen. Ein Beispiel dafür sind die Mobilitätsdienstleistungen, die mit GET bezahlt werden könnten. Das zweite Gestaltungsprinzip besteht darin, überprüfbare Informationen den Haushalten/Teams leicht zugänglich zu machen. Während der Stromverbrauch der Verbraucher automatisch über Smart Meter erfasst wird, zeigt die intuitive Energiegemeinschafts-App dies in einer hohen zeitlichen Auflösung in Bezug auf ihre eigene Erzeugungskapazität an. Das dritte Gestaltungsprinzip besteht darin, eine ausreichende Abstraktion zwischen technischer Komplexität und Benutzerfreundlichkeit zu schaffen. Die beschriebenen Prozesse und die Verknüpfung der einzelnen Smart Contract-Funktionen sind technisch komplex, aber das Ergebnis (d.h. die Verteilung von GET oder die Einlösung von GET für PV-Asset-Token) ist vergleichbar mit bekannten Bonusprogrammen. Das vierte und letzte Prinzip bei der Gestaltung des PV-Eigentumssystems besteht darin, Verbrauchs- und Zahlungsdaten auf eine leicht verständliche und zugängliche Weise darzustellen.

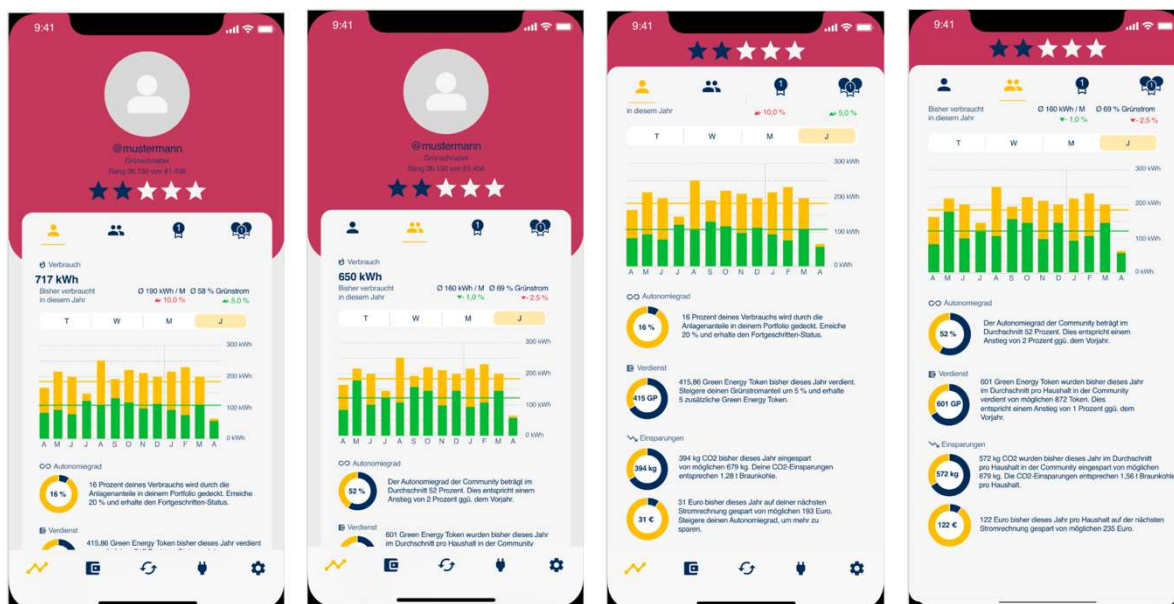


Abbildung 6: Screenshots der Gemeinschafts-App, die die aktuellen Statistiken über den Energieverbrauch zusammen mit den finanziellen und ökologischen Auswirkungen anzeigt

Abgeleitet von diesen Prinzipien werden den Haushalten in der Energiegemeinschafts-App die folgenden vier Schlüsselindikatoren angezeigt: (1) Selbstversorgung (für die individuelle Ansicht: zusammen mit dem nächsten Ziel, um einen höheren Rang zu erreichen) (2) Verdiente GET als Anteil an den maximal möglichen Token (wenn Verbrauch und Produktion perfekt übereinstimmen) (3) CO₂-Einsparungen im Vergleich zu den maximal möglichen Einsparungen bei 100 % des lokalen Solarprodukts und (4) Kosteneinsparungen bei der Stromrechnung.

4 Diskussion und Ausblick

Das Agentenbasierte EMS System und die blockchain basierte Organisation von Energiegemeinschaften wurde entwickelt, um im Rahmen des Projekts EnStadt:Pfaff implementiert und erprobt zu werden. Aufgrund der starken Bauverzögerungen begann die Nutzung des Quartiers erst am Ende des Vorhabens, so dass eine Implementierung in einem relevanten Maßstab unwahrscheinlich war. Dies führte zu einer spezifischen Entwicklung der Lösungen für das Pfaff-Quartier in der ersten Projektphase, gefolgt von einem allgemeineren Ansatz in der zweiten Phase. Die ursprüngliche Geräteschnittstelle wurde so modifiziert, dass anstelle eines REST-Calls, der von der openMUC-Bibliothek in gerätespezifische Befehle übersetzt wird, dieser direkt an eine EMS-Testumgebung innerhalb eines Simulationsrahmens gesendet wird, der in [14] erklärt wird. Mit diesem Setup konnte der Einsatz verschiedener elektrischer Geräte wie Ladestationen für Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen, PV-Batteriesysteme und μ -CHPs (Mikro-Blockheizkraftwerke) simuliert werden, um die verteilte Agentenoptimierung zu testen.

Darüber hinaus wurden verschiedene Blockchain-Anwendungen, verschiedene Marktmechanismen und Optimierungsziele untersucht, wobei der Fokus auf Labortests lag, als Ersatz für die Implementierung der spezifischen Gerätekommunikation innerhalb des Pfaff-Quartiers. Der Agenten-Demonstrator und die schematische Darstellung sind in Abbildung 7 dargestellt.

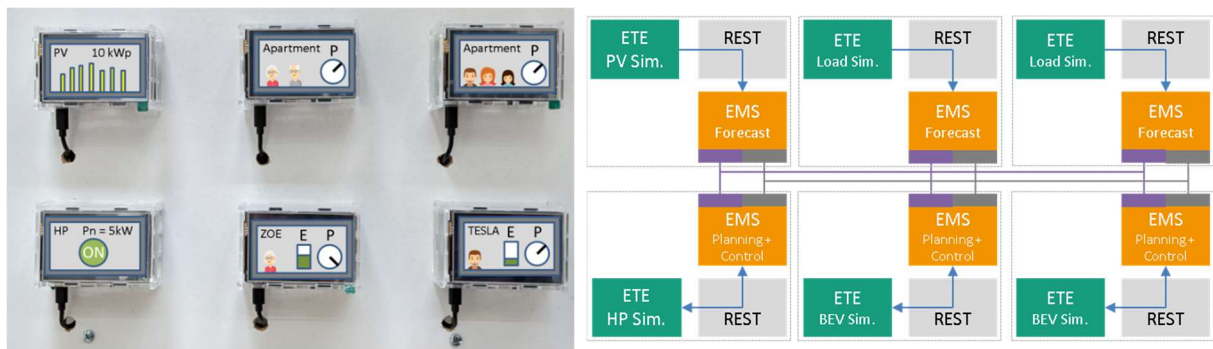


Abbildung 7: Agenten-Demonstrator-Board innerhalb des Labortests. Links: Sechs Raspberry Pis, die auf einem tragbaren Board installiert sind. Rechts: Schematische Übersicht des Boards, einschließlich des EMS-Moduls (Agenten), des Kommunikationsnetzwerks (lila), des Blockchain-Netzwerks (grau), der REST-Schnittstelle und der EMS-Testumgebung mit verschiedenen Energiesystemsimulationen

Eine große Herausforderung im Bereich der Energiegemeinschaften und der Optimierung von Energiedistrikten ist das Fehlen eines vorteilhaften regulatorischen Rahmens. Während es sinnvoll ist, ein Energiesystem gemeinsam zu optimieren, anstatt verschiedene individuelle Heim-EMS zu haben, fördert die aktuelle Gesetzgebung nur den Eigenverbrauch von Solarstrom innerhalb von Einfamilienhäusern und in begrenztem Umfang innerhalb von Mieterstromprojekten. Während die EU auch die Forderung nach Energiegemeinschaften, die über Gebäudegrenzen hinweg gemeinsam Strom erzeugen und verbrauchen, in Bezug auf eine aktive Beteiligung der Menschen erhebt, gibt es in der nationalen Gesetzgebung in Deutschland bislang keine Anreize, Solarstrom zwischen verschiedenen Häusern über ein öffentliches Netz zu teilen oder zu handeln. In dem beschriebenen Blockchain-Smart-Contract-Setup wurde versucht, diese Grenze zu überwinden, indem tokenisierte Anreize geschaffen wurden, die einen Eigenverbrauch und ein Energy-sharing virtuell ermöglichen. Tatsächlich bleibt dabei aber das Eigentum an der PV-Anlage beim Versorgungsunternehmen und ein Energiehandel über Gebäudegrenzen hinweg findet nicht statt. Ein kommunales Versorgungsunternehmen könnte jedoch das oben genannte System betreiben, was den Endverbrauchern direkt zugutekommt und energiewirtschaftlich vorteilhaftes Verhalten fördert, während es weiterhin von der Lieferung der verbleibenden Energie profitiert.

Die Nutzung von Blockchain als Infrastruktur wurde gewählt, um praktische Erfahrungen mit der Technologie zu sammeln. Während die Einrichtung komplexer Smart-Contracts möglich ist und eine On-Chain-Berechnung von Energieanteilen durchgeführt werden kann, ist fraglich, ob es vorteilhaft ist, jede kWh in der Blockchain zu verfolgen. Erstens aufgrund von Datenschutzproblemen und zweitens, da nach der Verarbeitung der Werte und der Abrechnung die Speicherung aller historischen Verbrauchsdaten nicht erforderlich ist. Zwar ist das Löschen von Daten aus der Blockchain möglich, z.B. indem einfach eine neue Chain eingerichtet wird, nachdem ein Abrechnungszeitraum abgeschlossen ist, allerdings ist dies nicht das Kernmerkmal von Blockchains, die auf Datenunveränderlichkeit aufbauen. Daher ist in einer zukünftigen Version des PV-Asset-Zuweisungssystems geplant, die Infrastruktur des Smart-Meter-Gateways zur Messung der Energieflüsse zu nutzen. Nachdem alle Daten eines 15-minütigen Intervalls erfasst wurden, kann ein automatisiertes Energiemanagement off-chain mit einem kleinen Python-Programm ausgelöst werden, das die Energiebilanzierungsschicht ersetzt (siehe Abbildung 5). Der resultierende GET-Anspruch wird dann an den GET-Vertrag weitergeleitet, um GET an die Mitgliedskonten zu übertragen. Der Marktplatzvertrag zusammen mit der tokenisierten Darstellung der PV-Assets bleibt on-chain.

Darüber hinaus ist in einem Szenario mit einem großen Akteur wie z.B. kommunale Versorgungsunternehmen, der die Energiegemeinschaft betreibt, der Vorteil dezentraler Steuerungsmechanismen innerhalb einer Blockchain fraglich. Daher kommen wir zu dem Schluss, dass für vollständig dezentrale Energiegemeinschaften mit heterogenen Akteuren, die versuchen, einen Konsens über den Zustand des

Energiesystems zu finden, eine Blockchain-Lösung ein hervorragendes Werkzeug ist, vorzugsweise mit einem energieeffizienten Konsensmechanismus. Beispielsweise könnte eine private Ethereum-basierte Blockchain mit einem Proof-of-Stake-Mechanismus eine solide Wahl sein. Für Szenarien mit einem zentralen Akteur, wie in diesem Papier dargestellt, wurde ein Proof-of-Authority-Konsensmechanismus verwendet, bei dem das Versorgungsunternehmen der einzige Validator ist. Das Vertrauen in diese Partei würde eine zentrale Datenbank als ausreichende Lösung darstellen und die Notwendigkeit eines Konsensmechanismus ersetzen. In jedem Fall ist eine detaillierte Messung der Energieflüsse mit Zeitaufösungen von mindestens 15 Minuten erforderlich, um das beschriebene agentenbasierte EMS zu betreiben, und sollte durch die Nutzung der Infrastruktur des Smart-Meter-Gateways möglich sein.

5 Veröffentlichungen

Im Rahmen von EnStadt:Pfaff sind in Bezug auf die Arbeiten am agentenbasierten EMS folgende Veröffentlichungen erfolgt:

- Stochastic bottom-up framework for load and flexibility for agent based controls of energy communities [14]
- Electric vehicles' impacts on residential electric local profiles – A stochastic modelling approach considering socio-economic, behavioural and spatial factors [15]
- Agent-based bidirectional charging algorithms for battery electric vehicles in renewable energy communities [16]
- Impact of emerging technologies on the electricity load profile of residential areas [17]
- From residential electric load profiles to flexibility profiles – A stochastic bottom-up approach [18]
- Renewable Energy Communities as Modes of Collective Prosumership: A Multi-Disciplinary Assessment, Part I—Methodology [19]
- Renewable Energy Communities as Modes of Collective Prosumership: A Multi-Disciplinary Assessment Part II—Case Study [20]
- Participative Renewable Energy Community—How Blockchain-Based Governance Enables a German Interpretation of RED II [21]
- Empowering Consumers within Energy Communities to Acquire PV Assets through Self-Consumption [22]
- Energiegemeinschaften in Österreich – lohnend auch für Deutschland? Eine Fallstudie im Projekt EnStadt:Pfaff [23]
- Technologies for Climate Neutral Districts: Agent Based Energy Management and Blockchain Based Organization for Energy Communities [1]
(Auf englisch veröffentlichter Inhalt dieses Themenberichts)

6 Literatur

- [1] A. Surmann und M. Utz, "20 Technologies for Climate Neutral Districts: Agent Based Energy Management and Blockchain Based Organization for Energy Communities," in *Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts*, S. Leonhardt, T. Nusser, J. Görres, S. Rosinger, G. Stryi-Hipp und M. Eckhard, Hg., De Gruyter, 2023, S. 295–310. Zugriff am: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/002df8c6-308e-4394-97e7-1d7db65c2617/download>
- [2] F. Braeuer, M. Kleinebrahm, E. Naber, F. Scheller und R. McKenna, "Optimal system design for energy communities in multi-family buildings: the case of the German Tenant Electricity Law," *Applied Energy*, Jg. 305, S. 117884, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117884.
- [3] Europäische Union, *Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates: RED III* (2023).
- [4] J. Lowitzsch, C. E. Hoicka und F. J. van Tulder, "Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 122, S. 109489, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109489.
- [5] M. Andoni *et al.*, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 100, S. 143–174, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.10.014.
- [6] A. Lüth, J. M. Zepter, P. Del Crespo Granado und R. Egging, "Local electricity market designs for peer-to-peer trading: The role of battery flexibility," *Applied Energy*, Jg. 229, S. 1233–1243, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.004.
- [7] Y.-C. Tsao und V.-V. Thanh, "Toward sustainable microgrids with blockchain technology-based peer-to-peer energy trading mechanism: A fuzzy meta-heuristic approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 136, S. 110452, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110452.
- [8] E. Fernandez, M. J. Hossain, K. Mahmud, M. S. H. Nizami und M. Kashif, "A Bi-level optimization-based community energy management system for optimal energy sharing and trading among peers," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 279, S. 123254, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123254.
- [9] S. Li, Y. Pan, P. Xu und N. Zhang, "A decentralized peer-to-peer control scheme for heating and cooling trading in distributed energy systems," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 285, S. 124817, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124817.
- [10] IOTA Foundation. "Built to Make a Difference: IOTA is a decentralized blockchain infrastructure to build and secure our digital world." Zugriff am: 25. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.iota.org/>
- [11] Verein deutscher Ingenieure VDI, Hg., "VDI/VDE 2653 Blatt 1: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen," 2018. Zugriff am: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2653-blatt-1-agentensysteme-in-der-automatisierungstechnik-grundlagen>

- [12] A. Surmann und F. Elberzhager, "Smart Home Anwendungen: Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff „Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“,“ 2025.
- [13] M. Utz, S. Johanning, T. Roth, T. Bruckner und J. Strüker, "From ambivalence to trust: Using block-chain in customer loyalty programs," *International Journal of Information Management*, Jg. 68, S. 102496, 2023, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2022.102496.
- [14] A. Surmann, S. Chantrel, D. Fischer, R. Kohrs und C. Wittwer, "Stochastic Bottom-up Framework for Load and Flexibility for Agent Based Controls of Energy Communities," 2019. Zugriff am: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/92a8bfb6-3ab1-4561-b955-939ccd6b04bf>
- [15] D. Fischer, A. Harbrecht, A. Surmann und R. McKenna, "Electric vehicles' impacts on residential electric local profiles – A stochastic modelling approach considering socio-economic, behavioural and spatial factors," *Applied Energy*, Jg. 233-234, S. 644–658, 2019, doi: 10.1016/j.apen-ergy.2018.10.010.
- [16] A. Surmann, R. Walia und R. Kohrs, "Agent-based bidirectional charging algorithms for battery electric vehicles in renewable energy communities," *Energy Inform*, Jg. 3, S1, 2020, doi: 10.1186/s42162-020-00122-8.
- [17] D. Fischer, A. Surmann und K. B. Lindberg, "Impact of emerging technologies on the electricity load profile of residential areas," *Energy and Buildings*, Jg. 208, S. 109614, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109614.
- [18] D. Fischer, A. Surmann, W. Biener und O. Selinger-Lutz, "From residential electric load profiles to flexibility profiles – A stochastic bottom-up approach," *Energy and Buildings*, Jg. 224, S. 110133, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110133.
- [19] S. Chaudhry, A. Surmann, M. Kühnbach und F. Pierie, "Renewable Energy Communities as Modes of Collective Prosumership: A Multi-Disciplinary Assessment, Part I—Methodology," *Energies*, Jg. 15, Nr. 23, S. 8902, 2022, doi: 10.3390/en15238902.
- [20] S. Chaudhry, A. Surmann, M. Kühnbach und F. Pierie, "Renewable Energy Communities as Modes of Collective Prosumership: A Multi-Disciplinary Assessment Part II—Case Study," *Energies*, Jg. 15, Nr. 23, S. 8936, 2022, doi: 10.3390/en15238936.
- [21] S. P. M. Chantrel, A. Surmann, T. Erge und J. Thomsen, "Participative Renewable Energy Community—How Blockchain-Based Governance Enables a German Interpretation of RED II," *Electricity*, Jg. 2, Nr. 4, S. 471–486, 2021, doi: 10.3390/electricity2040028.
- [22] A. Surmann, S. P. M. Chantrel, M. Utz, R. Kohrs und J. Strüker, "Empowering Consumers within Energy Communities to Acquire PV Assets through Self-Consumption," *Electricity*, Jg. 3, Nr. 1, S. 108–130, 2022, doi: 10.3390/electricity3010007.
- [23] A. Surmann und T. Erge, "Energiegemeinschaften in Österreich - lohnend auch für Deutschland?: Eine Fallstudie im Projekt EnStadt:Pfaff," 2021, doi: 10.24406/publica-1583. Zugriff am: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/9e2c15ca-7d8d-4846-87fe-c818c9343754>