

IMPLEMENTIERUNG EINER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ IN DAS DIGITALE ÖKOSYSTEM DES INTERNETS DER ENERGIE AM PARADIGMA DER „WÄRMESPEICHER-STEUERUNG“

Andreas Hutterer¹(*), Anke Tallig²

¹Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg, Deutschland, andreas-klaus.hutterer@student.tu-freiberg.de, <https://tu-freiberg.de>,

²envia Mitteldeutsche Energie AG, Magdeburger Straße 51, 06112 Halle, Deutschland, Anke.Tallig@enviaM.de, www.enviaM.de

Kurzfassung: Die von der deutschen Bundesregierung initiierte Energiewende führt zu einem Transformationsprozess in der Energiewirtschaft. In Folge dessen erleben wir einen Wandel von einer zentralen zu einer dezentralen Energieversorgung. Eine stetig größer werdende Anzahl an kleinen Energieversorgern stehen Millionen von Energieverbrauchern gegenüber. Die envia Mitteldeutsche Energie AG (enviaM) synchronisiert mit der Entwicklung des Internets der Energie beide sich ergänzende Seiten und verknüpft im Rahmen der Sektorenkopplung die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Durch die Digitalisierung von Energieerzeugern und Energieverbrauchern stehen Unmengen an Daten zur Verfügung, welche als Grundlage für eine intelligente Steuerung der Energiesysteme dienen. Mit dem Ziel, eine sichere, wirtschaftliche und umweltfreundliche Energieversorgung sicherzustellen, entwickelt die enviaM-Gruppe mit Partnern aus der Region das Internet der Energie. Die Digitalisierung von Nachtspeicherheizungen soll durch die 24 Stunden Freigabe der Ladezeiten netzseitig die flexible Steuerung ermöglichen und kundenseitig den Wärmekomfort erhöhen. In diesem Zusammenhang, spielt der § 14a EnWG als ein entscheidender Bestandteil zur effizienteren Bewirtschaftung und Neugestaltung des Verteilungsnetzes, eine ausschlaggebende Rolle. Dabei wird durch Einbringung des Tagesablaufes und der entsprechenden Temperatur durch den Kunden eine individuelle und bedarfsgerechte Ladestrategie generiert, welche Einsparungen durch eine effektive Ladesteuerung ermöglichen. Zusätzlich werden durch Implementierung einer künstlichen Intelligenz (KI) weitere Einsparungen erzielt, jene durch die spezielle Technik angepassten Algorithmen realisiert werden.

Keywords: Sektorkopplung, Geschäftsmodell, Agile Produktentwicklung, Power-to-Heat, Künstliche Intelligenz, Reinforcement Learning, Model Predictive Control, Nachtspeicherheizungen, Digitalisierung, Internet of Things, digitales Ökosystem

1 Einleitung

Eine bedarfsgerechte, sichere und wirtschaftliche Auslegung der Netze unter Berücksichtigung der technischen Anforderungen gilt es zukünftig, ebenso wie in der Vergangenheit, zu gewährleisten. Die Energiewende als Transformationsprozess des Energiesystems ist in vollem Gange. Mit diesem findet eine Umgestaltung von einem zentralen Stromnetz hin zu

einem dezentralen Stromversorgungssystem statt. Aufgrund der dezentralen Stromerzeugung, besteht die Möglichkeit für Verbraucher auch als einspeisender Produzent von Strom aufzutreten. Das Kofferwort „Prosumer“ beschreibt die immer wichtiger werdende Rolle von privaten Haushalten als Stromerzeuger und Stromverbraucher im Energiesystem. In Folge dieses Umstandes treten bidirektionale Stromflüsse im Stromnetz auf, welche eine neue Betrachtungsweise des Energiesystems hervorbringt. Dies erfordert erhöhte Anforderungen an Mess- und Koordinationsinstrumente, sowie an Datenverarbeitungssysteme aufgrund vernetzter Produkte und Marktakteuren.¹ Betreffendes erfordert eine sichere Kommunikation, welche durch Gateways realisiert wird, die in der Zertifizierung sind und den Smart Meter Rollout zur Grundlage hat. Intelligente Messsysteme entwickeln sich zur Schnittstelle zwischen lokalem Erzeuger und Verbraucher und dem Netz. Mit dem technologischen Fortschritt und der einhergehenden Digitalisierung, werden Ferraris-Zähler von modernen Messeinrichtungen (mME) disruptiert. Jedoch bietet die moderne Messeinrichtung ohne ein Smart-Meter-Gateway keinen weiteren Kundennutzen. Durch Erweiterung der modernen Messeinrichtung mit einer Kommunikationseinheit, dem Smart-Meter-Gateway, erhält der Kunde am Netzanschluss ein intelligentes Messsystem (iMSys). Als Ergänzung zum Text liegt Abbildung 1 vor.

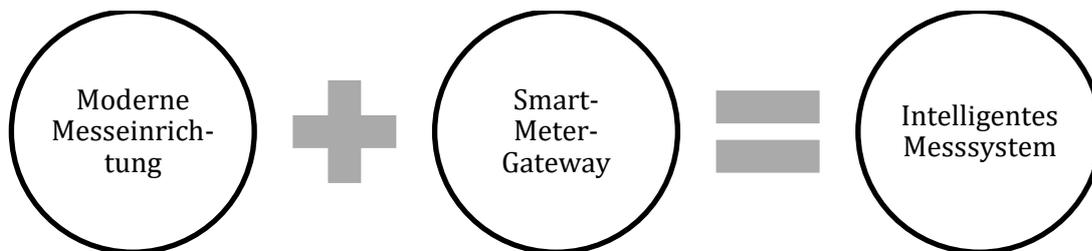


Abbildung 1: Ein intelligentes Messsystem (iMSys) besteht aus zwei Komponenten

Quelle: eigene Darstellung

Das Smart-Meter-Gateway schafft eine Kommunikationsschnittstelle und ermöglicht eine Verbindung zwischen den Marktakteuren. Die Verbrauchsdaten des lokalen Verbrauchers werden in Echtzeit über das Gateway an die Marktakteure versendet.² Dem Endverbraucher, Erzeuger und Netzbetreiber können diese Verbrauchsdaten bereitgestellt werden, um detailliertere Informationen zu erlangen.³ Grundlage für die Entwicklung des Internets der Energie, einem digitalen Ökosystem, welches ein intelligentes Stromnetz ermöglicht, ist die steigende Durchdringung von intelligenten Messsystemen durch den Smart-Meter-Rollout im Bereich der privaten Verbraucher. Die Digitalisierung des Stromnetzes ermöglicht neue Anwendungsmöglichkeiten und Geschäftsmodelle für die Energiewirtschaft und die Netzbetreiber. Durch das effizientere Betreiben des Netzes kann der Netzausbau und die Abschaltungen von erneuerbaren Energien Erzeugungsanlagen an bestimmten Stellen vermieden werden. Das Internet der Energie umfasst das gesamte zukünftige Energiesystem beim Endkunden, bestehend aus Infrastruktur, Erzeugern und Verbrauchern. Im Jahr 2032 soll im Rahmen des Smart-Meter-Rollouts die generelle Umrüstung der analogen mechanischen Stromzähler auf moderne Messeinrichtungen abgeschlossen sein.⁴

¹ Vgl. BMWi Digitalisierung (2016), S.1.

² Vgl. Bundesregierung (2016), S. 1.

³ Vgl. BMWi (2016) S. 1.

⁴ Vgl. BMWi (2016), S. 46.

2 Zielsetzung

In diesem Paper wird die Anwendung der künstlichen Intelligenz des Internets der Energie am Beispiel der „Wärmespeicher-Steuerung“ beschrieben. Der Fokus bezieht sich auf Kunden mit Nachtspeicherheizungen. Voraussetzung ist die Einführung der Smart-Meter-Technologie. Unterstützt wird die Idee von der Energiewende. Der Umgang mit dem gewonnenen Strom aus erneuerbaren Energie-Quellen soll strukturierter und effizienter erfolgen, indem im Rahmen des § 14a EnWG Verbraucher flexibel gesteuert werden.

3 Methodik

Die Produktidee der „Wärmespeicher-Steuerung“ kann als Schlussfolgerung der Energiewende abgeleitet werden. Mit Hilfe des technologischen Wandels und der Einführung von Kommunikationsmöglichkeiten im Bereich der Niederspannungsnetze, wird das intelligente Niederspannungsnetz aufgebaut. Das intelligente Netz ermöglicht den aus erneuerbaren Energien gewonnenen Strom effizient und strukturierter einzusetzen. In Folge des Ausbaus der Erneuerbaren Energien herrscht zu gewissen Zeiten in bestimmten Regionen, mit erhöhtem Anteil an regenerativen Energieerzeugern, ein Überangebot an Strom. Um die Netzstabilität zu gewährleisten, werden Redispatchmaßnahmen umgesetzt. Diese haben zur Folge, dass Stromerzeugungsanlagen vom Netz abgekoppelt werden. Abbildung 2 beschreibt die Anzahl der Eingriffe zur Erhaltung der Netzstabilität der MITNETZ Strom. Dabei wird ersichtlich, dass die Anzahl der gedrosselten Erzeugungsanlagen, die im Rahmen von Netzsicherheitsmaßnahmen durch den Verteilnetzbetreiber nach § 13 Abs. 2 EnWG in den vergangenen Jahren stetig gestiegen ist.

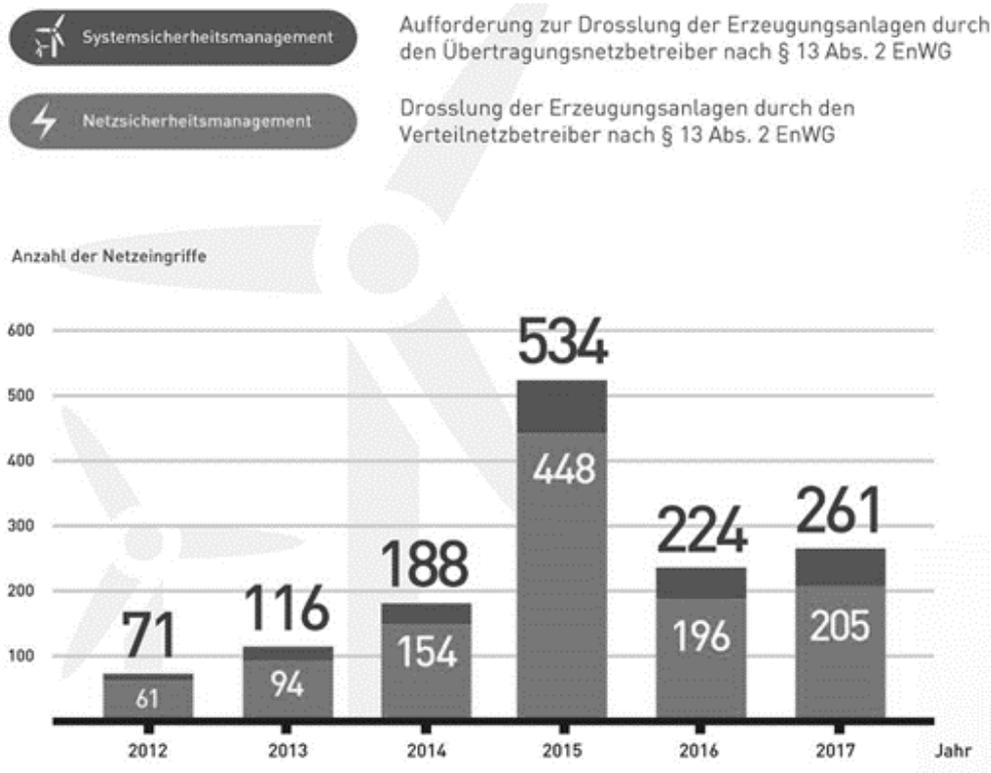


Abbildung 2: Anzahl der Netzeingriffe für Netzsicherheitsmanagement

Quelle: intern enviaM

Der durch diese Anlagen erzeugte Strom kann folglich nicht genutzt werden. Zusätzlich entsteht ein wirtschaftlicher Schaden, da die Produzenten eine finanzielle Vergütung bekommen. Im Jahr 2017 betragen die Kosten für Redispatchmaßnahmen über 1,4 Mrd €. ⁵ Ziel solcher Maßnahmen ist die Einhaltung der Netzstabilität, also das Gleichgewicht aus Stromangebot und Stromnachfrage. Durch diese Feststellung wird ein Bedarf an einem intelligenten Stromnetz mit flexiblen Verbrauchern illustriert. Neben dem Aufkommen der Eigenstromerzeugung in privaten Haushalten muss im Rahmen der Diskussion um ein Smart-Grid die Rolle von flexibel steuerbaren Stromverbrauchern, sogenannten „Flexumer“, überdacht werden. Mit der Inkraftsetzung des Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende erfolgt die Umgestaltung des bisherigen Energiesystems. Dabei ist der § 14a EnWG ein entscheidender Bestandteil zur effizienteren Bewirtschaftung und Neugestaltung des Verteilungsnetzes. Auftretende Herausforderungen der zeitlichen Entkopplung von Stromerzeugung und Stromverbrauch werden durch diesen bewerkstelligt. Die Integration der erneuerbaren Energien erfordert eine flexible Laststeuerung und die intelligente Nutzung von Speichern. Damit die Stabilität des Energiesystems garantiert werden kann, wurden im Zuge der Frequenzerhaltung Stromverbraucher oder Stromerzeuger vom Energiesystem abgekoppelt. Durch die Novellierung des § 14a EnWG werden aus den unterbrechbaren Verbrauchern steuerbare Verbraucher. Bei der Betrachtung darf der Fokus nicht nur bei den Verbrauchern liegen. Stromerzeuger müssen ebenso berücksichtigt werden. Das Interesse an der Steuerbarkeit von Erzeugern geht mit dem anhaltenden Zubau von Erzeugungsanlagen im Verteilungsnetz einher. Deshalb wurde ein einheitliches Rahmenwerk für die Energiewirtschaft geschaffen, welches eine Nachfrage an Flexibilitätsprodukten generiert. Im Mittelpunkt stehen hierbei neben klassischen Verbrauchseinrichtungen, Elektroautomobile, Energiespeicher und Wärmeerzeuger, wie z.B. Wärmepumpe und Nachtspeicherheizungen. Im Gegensatz zu Energieeinspeisern, existiert für flexible Verbraucher der Anreiz von reduzierten Netzentgelten. Der Nachweis der Erbringung von netzdienlichem Betreiben wird perspektivisch über ein intelligentes Messsystem bereitgestellt. Durch die Einführung von intelligenten Messsystemen in Verbindung mit dem Smart Meter Gateway eröffnen sich neue technische Möglichkeiten für die Energiewirtschaft. Die Digitalisierung ist ein prägendes Phänomen der modernen Produktentwicklung. Der technologische Wandel hebt die intelligente Vernetzung von Gegenständen hervor. Durch die Implementierung von Prozessoren in den Produkten, besteht die Möglichkeit cloudbasierte Existenzen zu erschaffen, welche sich in einer Art cyberphysischen Produkten widerspiegelt. Das daraus resultierende Produkt ist durch die Eigenschaften smart, intelligent und vernetzt beschreibbar.

3.1 Das Internet der Energie als digitales Ökosystem

Das Internet der Energie ist das Resultat der Energiewende und der technologischen Progressivität der Digitalisierung. Dabei wird das Stromnetz, Clouds, das Internet und intelligente Produkte zu einem vernetzten Konvolut verknüpft. Resultierend entsteht ein Gesamtsystem der Energieversorgung für den Endkunden, in dem nachhaltige Energieproduktion, dezentrale Speicherung, bedarfsgerechter Transport und intelligenter Verbrauch optimiert werden. Die „Wärmespeicher-Steuerung“ stellt einen Bestandteil des Internets der Energie dar. In diesem werden die verschiedenen Bereiche Stromerzeugung,

⁵ Vgl. BDEW, (2019), S. 6.

Stromspeicherung und -verbrauch, Wärme, Mobilität und Services vereint. Die Konnektivität der einzelnen Handlungsfelder wird durch den technologischen Fortschritt ermöglicht. In der Vergangenheit wurden diese einzelnen Sparten separat betrachtet. Durch den Wandel des Energiesystems mit einhergehender Sektorkopplung verschmelzen diese zu einem Gesamtsystem der Energiewirtschaft. Grundvoraussetzung für die Entwicklung eines solchen digitalen energiewirtschaftlichen Ökosystems ist die Digitalisierung. Das Internet der Dinge, englisch IoT für „Internet of Things“, ist einer der wesentlichen Grundpfeiler der Digitalisierungsstrategien. Die Implementierung von Sensoren und Kommunikationstechnologien führt zu einer Durchdringung von Intelligenz innerhalb des Energiesystems. Das Vernetzen von Objekten und das Analysieren von Daten, verwandelt in ein operationalisierbares Wissen, stellen einen Wettbewerbsvorteil dar. Übertragungs- und Höchstspannungsnetze sind seit längerem mit IKT-Technologien ausgestattet, mit diesen Mitteln wird die Netzauslastung und Stromverteilung visualisiert und gesteuert. Mit Hilfe moderner Technologien erfolgt die Initiierung von Transparenz auch in den Bereichen der Niederspannung, nebst privaten Verbrauchern. Ziel des Internets der Energie ist das intelligente Steuern von Energie. Im Vergleich zu vergangenen Zeiten soll die Energiewirtschaft von heute dezentralisiert, dekarbonisiert und digital denken, ohne die Versorgungssicherheit und den Komfort des privaten Verbrauchers zu beeinträchtigen. Das Internet der Energie spiegelt die intelligente Verknüpfung aller Akteure der Energiewirtschaft wider. Bei der Betrachtung von privaten Verbrauchern erfolgt die Implementierung von Intelligenz auf der untersten Ebene mit dem Einbau des Home Energy Management Systems (HEMS). HEMS besteht aus einer Hardware, dem Energiemanager, der in der Lage ist, Signale zu empfangen, weiterzuleiten und vernetzte Geräte in Abhängigkeit der Daten zu steuern. Dieser ist mit einer Energiecloud verbunden, welche die Intelligenz in den Energiemanager bringt. Die gesammelten Daten werden an die Energiecloud versendet und zusammengefasst. Verschiedene Algorithmen verarbeiten diese und in der Folge werden die aufgearbeiteten Informationen auf dem webbasierten Kunden-Frontend dargestellt. Zusätzlich transferiert die Energiecloud die Daten an den Energiemanager zurück. Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, das HEMS ein intelligentes Energiemanagement ermöglicht, bei dem durch Algorithmen Stromflüsse effizient gesteuert und visualisiert werden können, folglich verbessert sich die Wirtschaftlichkeit der Nutzung. HEMS ermöglicht als modular erweiterbare Lösung die Einführung von neuen digitalen Geschäftsmodellen. Über HEMS als digitalen Vertriebskanal werden ein virtueller Stromspeicher, die Vermarktung von Post-EEG-Anlagen und die in diesem Paper beschriebene „Wärmespeicher-Steuerung“ zur Realität. HEMS dient hierbei als Aggregator der Anwendungsfälle Wärme, Elektromobilität, Community, Smart Home, Speicher und Speichersimulation und virtueller Speicher.

3.2 Das System „Wärmespeicher-Steuerung“

Ausgehend von HEMS verfolgt die „Wärmespeicher-Steuerung“ im Bereich der Wärme das Ziel der Digitalisierung von Nachtspeicherheizungen. Mit dem Smart Meter Rollout entstehen für den Verbraucher Mehrkosten ohne zusätzlichen Wert. Für die Kunden müssen Mehrwerte und Lösungen gefunden werden, welche die Attraktivität der Nachtspeicherheizung steigert, da diese als flexibler Verbraucher eine entscheidende Rolle bei der Energiewende einnehmen. Durch die Digitalisierung der Nachtspeicherheizung wird aus dieser eine Wärmespeicherheizung mit einer effektiven Ladestrategie und einer Flexibilität die 24 Stunden

abdecken könnte. Das netzdienliche Betreiben nach § 14a EnWG ermöglicht verminderte Netzentgelte. Dadurch sollen die Nachteile der hohen Kosten und des mangelndem Wärmekomforts beseitigt werden. Analoge Nachtspeicherheizungen werden für den Aufladevorgang über eine Zeit-Schaltuhr in den Nachtstunden von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr freigeschaltet. Da eine Temperatursteigerung nicht ad-hoc umgesetzt werden kann, können Kunden den Lüfter über einen Regler betätigen, dabei wird über den Lüfter die Restwärme im Speicher in den Raum übertragen. Eine Temperaturregelung findet meist durch Öffnen der Fenster statt bzw. durch Zuschaltung des Lüfters. Perspektivisch könnte nach dem Einbau eines Smart Meter Gateways die Schaltuhr entfallen und die Freischaltzeiten laufen über den regulierten Bereich des Gateways. Vorerst wird die Schaltuhr in die Steuerung integriert. Die momentane Heizungsteuerung ist nicht für die flexible Vorgabe von Freischaltzeiten ausgelegt.

Dabei sind folgende drei Optionen denkbar:

1. Beibehaltung der bisherigen Freigabeschaltzeiten
2. Änderung der Freigabezeiten
3. Flexible Freischaltzeiten

Moderne Optionen können die Heizung und die Heizungsteuerung nicht verarbeiten. Zudem ist die Steuerung von einzelnen Räumen nicht möglich, da die Eingabe für alle Heizungen zentral über einen 3-stufigen Regler erfolgt. Der 3-stufige Regler bestimmt die eingespeicherte Wärmemenge, aber nicht die Wunschtemperatur. Bisher ging die Energiewende an den Wärmespeicherkunden vorbei. An diesem Punkt setzt die „Wärmespeicher-Steuerung“ an, bei der die analoge Nachtspeicherheizung zu einer modernen Wärmespeicherheizung transformiert wird. Diese ermöglicht die digitale Steuerung der Wärmespeicherheizung. Damit können Nutzer die Wärmeversorgung mittels Energiemanagementsystem effizienter, bedarfsgerecht, flexibel und komfortabel gestalten. Wie in Abbildung 3 dargestellt, bilden moderne Technologien die Komponenten der „Wärmespeicher-Steuerung“. Das Schaubild zeigt das Heizungssteuergerät, den Energiemanager und das intelligente Messsystem.



Abbildung 3: Komponenten der „Wärmespeicher-Steuerung“

Quelle: intern enviaM

Die „Wärmespeicher-Steuerung“ bestehend aus dem Konvolut Heizungssteuerungsgerät, Energiemanagement und intelligentes Messsystem, schafft die Möglichkeit der individuellen Manipulation über eine digitale Plattform. Das Heizungssteuerungsgerät realisiert völlig automatisch die intelligente Ladestrategie auf Basis der festgelegten Temperatur- und Zeitwünsche, der Wetterprognose und den gemessenen Innen- und Außentemperaturen. Die Eingabe des gewünschten Temperaturverlaufes erfolgt mittels einer App. Dabei kann der Nutzer an allen Wochentagen zu spezifischen Uhrzeiten seine angestrebte Temperatur

angeben. Neben dem Automatik-Modus ist ein Manueller-Modus vorhanden, bei dem der Wärmelevel direkt verändert werden kann. Aufgrund der Trägheit des Heizungssystems wird ein zeitliches Intervall der Temperaturänderung mit beachtet. Die Eingabe der Wunschtemperatur ermöglicht planbare Auflade-Zeiten der Wärmespeicherheizung und die optimale Bereitstellung von Temperatur und Raumklima. Die eingegebenen Daten werden zu der Energiecloud gesendet und anschließend an den Energiemanager, an HEMS weitergeleitet. Dieser kommuniziert die Einstellungen an die Heizungssteuerung, woraufhin diese eine Auflade-Strategie festlegt. Zusätzlich fließen die Wetterprognose, Innen- und Außentemperatur von Temperatursensoren mit in die Berechnung ein. Abschließend verdeutlicht Abbildung 4 das System der „Wärmespeicher-Steuerung“ mit den miteinander vernetzten Komponenten.

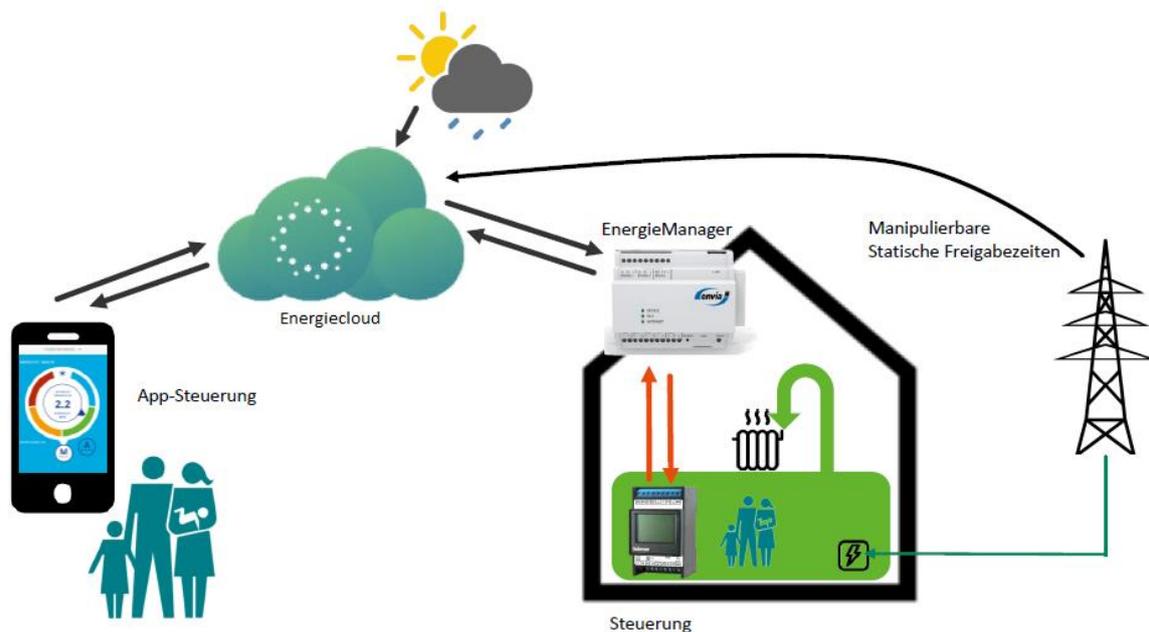


Abbildung 4: Aufbau Kommunikation des Systems der „Wärmespeicher-Steuerung“
Quelle: intern enviaM

3.3 Optimierung über Reinforcement Learning

Unter Einsatz von Reinforcement Learning (RL) können Anforderungen für die künstliche Intelligenz des Internets der Energie erfüllt werden. Durch die KI und seiner Fähigkeit des Reinforcement Learnings werden unterschiedliche Aufgabenstellungen durch schnelle Lösungen bewerkstelligt. Zusammengefasst lassen sich folgende Aufgabenstellungen an die künstliche Intelligenz stellen:

- Generierung eines Analysemodells seiner Interaktion mit der Umwelt in Echtzeit
- Daraus folgende Entscheidungen zur Minimierung einer Zielgröße in Echtzeit ableiten
- Minimierung über die Summe der Zielgrößen aller nächsten Schritte

Unter Einsatz von Reinforcement Learning (RL) werden diese Anforderungen erfüllt. Reinforcement Learning (bestärkendes Lernen) beschäftigt sich damit, Systeme zu entwickeln (sogenannte Agenten), die über ein Wechselspiel mit der Umgebung schrittweise lernen, eine skalare Zielgröße zu maximieren.

4 Applikation der künstlichen Intelligenz in der Praxis

Ein entscheidender Vorteil von Reinforcement Learning ist die Flexibilität. Die künstliche Intelligenz des Internets der Energie wurde in die „Wärmespeicher-Steuerung“ integriert. Infolge dessen soll der Energieverbrauch des Kunden reduziert werden. Damit die vorgegebene Raumtemperatur mit einer optimierten Ladestrategie der Wärmespeicherheizung energiesparend angesteuert wird, registriert die KI alle Einflussparameter. Der iterative Prozess erfolgt über die definierten Zeitintervalle des gesamten Tages hinweg. Zu Beginn des neuen Tages wird eine neue Episode angelegt. Die KI für das Energiemanagement verbessert über den Zeitraum seine Fähigkeit und lernt den Energieverbrauch zu minimieren. Durch das Vorhandensein eines Smart Meters kann der Stromverbrauch von Verbrauchern einfach gemessen werden. Da im vorliegenden Fall eine Belohnung der Vorgehensweise vorliegt, muss die Belohnung in allen Zeitintervallen angepasst werden. In diesem speziellen Fall ist die Belohnung in Wirklichkeit eine Bestrafung, da die zusätzliche Aufnahme von Strom als negativ angesehen wird. Die negativ gewichtete Summe der aufgenommenen Wärmeenergie, der Ist- und Soll-Temperaturabweichung und des Stromverbrauchs definiert die Belohnung. Das Rahmensystem ist um alle Kategorien digitaler Messgeräte und Sensoren erweiterbar. Mithilfe der Vernetzung von modernen Geräten, sind diese einzeln steuerbar.

5 Feldtest Heizungssteuerung

Während der Heizperiode 2018/2019 wurde ein Feldtest mit Testern durchgeführt, bei denen die „Wärmespeicher-Steuerung“ ohne KI verbaut wurde. Parallel sind zwei weitere Testobjekte „Objekt1“ und „Objekt2“ mit den zusätzlichen Komponenten der künstlichen Intelligenz für das Energiemanagement ausgestattet worden. Mit dem Ziel ein Minimal Viable Product (MVP) zur Nutzung von künstlicher Intelligenz in der Steuerung von Wärmespeicherheizungen zu generieren, welches durch sein Einspar- und Flexibilisierungspotential in den Kontext der „Wärmespeicher-Steuerung“ passt. Der Verbau einer einzigartigen Technologie für dezentrale künstliche Intelligenz, der KI-Bibliothek, soll eine signifikante Kostenreduktion für Endkunden bieten. Die neue Art der Heizungssteuerung mit Reinforcement Learning stellt ein Pilotprojekt der Energiewirtschaft dar und erlaubt einen Quantensprung in Komfort und Energieeffizienz. Für diesen Anwendungsfall bietet sich die proprietäre Software-Bibliothek der KI für Reinforcement Learning an, welche in keinem anderen Werkzeug für künstliche Intelligenz enthalten ist und einen Kreislauf aus maschinellem Lernen und Optimieren ermöglicht. Somit ist diese Technologie ideal geeignet, den Komfort der „Wärmespeicher-Steuerung“ durch einen automatisch optimierten Energieverbrauch zu ergänzen, ohne dass eine komplexe Konfiguration über eine App erforderlich ist. Dies widerspiegelt einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil gegenüber konkurrierenden Marktakteuren. Im Vergleich zur normalen „Wärmespeicher-Steuerung“ ist eine KI-basierte Steuerung der Wärmespeicherheizung sehr komfortabel für den Nutzer, reduziert den Energieverbrauch signifikant und ist trivial zu bedienen. Die Software der Bibliothek zum Lernen und Optimieren läuft lokal auf dem Energiemanager des Kunden. Dadurch müssen die Daten des Kunden nicht an eine Cloud versendet werden. Dies ermöglicht eine sehr hohe Datensicherheit. Dabei lernt die KI die Thermodynamik des Hauses, d.h. wie viel bei gegebenem Wetter (Außentemperatur, Sonneneinstrahlung und Wind) geheizt werden muss, damit die Wunschtemperatur der

Räume erreicht wird. Anschließend wird auf Basis einer lokalen Wetterprognose vorausschauend nur so viel geheizt, wie unbedingt nötig, um die Wohlfühltemperatur einzuhalten. Dazu wird eine Gewichtung zwischen Minimierung der Temperaturschwankung und Minimierung der Energiekosten definiert. In späteren Ausbaustufen unterstützt die KI-basierte „Wärmespeicher-Steuerung“ das Erschließen von weiteren Einspar- bzw. Flexibilisierungspotenziale für die Nutzer. Um das Einsparpotenzial besser eingrenzen zu können und auch erste Kundenreaktionen zu erhalten, wurde eine erste Version der KI-basierten Steuerung im Rahmen des MVPs „Wärmespeicher-Steuerung“ in der Heizperiode 2018/2019 getestet. Der wissenschaftliche und innovative Charakter des oben beschriebenen Ansatzes ist zugleich seine große Herausforderung. Es gilt zu beweisen, wie hoch die Wirkung der KI in diesem neuen Anwendungsfeld wirklich ist. Während in vielen Anwendungsfelder bereits signifikanter Nutzen durch KI-basierte Steuerung nachgewiesen werden konnte, muss hier ein Pilotprojekt der agilen Geschäftsentwicklung die Anwendbarkeit und den Nutzen beweisen. Die Modellierung erfolgte über die dargestellten drei Faktoren:

- Zeitreihenprognose für Wetter
- Regression für Thermodynamik mit der Zielgröße Innentemperatur
- Reinforcement Learning-Simulation für Steuerung

Die Datenverarbeitung und Modellbildung erfolgte aus historischen Nutzerdaten und erforderlicher Transformation mit Hilfe der künstlichen Intelligenz des Internets der Energie. Hierbei wurde die Thermodynamik prognostiziert und die Steuerung simuliert. Dazu wurden die Testdaten in eine gleichgroße Trainings- und Testmenge unterteilt. Das Lernen der Thermodynamik erfolgte auf Daten der Trainingsmenge aus dem Dezember. Im nächsten Schritt wurde das Modell der Thermodynamik mit Daten aus dem Januar auf der Testmenge verifiziert, anschließend erfolgte die Simulation der Steuerung. Als Ansatz dient dabei das Model Predictive Control (MPC), welches über Reinforcement Learning (RL) funktioniert. Die KI für das Energiemanagement ist dabei in der Lage über Komfort (Abweichung zur Soll-Temperatur) und Energiebedarf (Lademenge) zu optimieren. Die Gewichtung zwischen Komfort und Energiebedarf erfolgt über den Regularisierungsparameter λ . Je größer dieser ist, desto wichtiger ist die Energieminimierung im Vergleich zur Komfortmaximierung. Das Reinforcement-Optimierungsproblem dient zur Minimierung des Rewards R:

$$\min_{\tau_1, \dots, \tau_n} R(\tau_1, \dots, \tau_n), R(\tau_1, \dots, \tau_n) = \underbrace{\sum_{i=1}^N (T_i - T_s)^2}_{\text{Komfort}} + \lambda \underbrace{\sum_{i=1}^N \tau_i}_{\text{Energieverbrauch}}$$

Der in der Formel betrachtete Zeithorizont beträgt $N=6$ Stunden, dabei optimiert die KI in jedem Zeitschritt den Ladegrad für die nächsten 6 Stunden. Dabei erfolgt der Vergleich von Komfort und Energiebedarf zwischen tatsächlicher Regelung und KI. Da die Solltemperatur für die meisten der Räume extrem schwankend ist wird der bisherige Mittelwert der Innentemperatur genutzt. Die resultierende Steuerung erfolgt über den Ladegrad. Dabei wird ein Regressionsmodell mit einem Zeitschritt von 1 Stunde durch Lernen auf der Trainingsmenge unter Nutzung von Support Vector Machine generiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Prognose und Berechnung der Mittleren Quadratischen Abweichung (RMSE = root-mean-square error) auf die Testmenge. In jedem Zeitschritt erfolgt die Prognose der Innentemperatur für die nächsten 24 Stunden mit anschließender Berechnung des RMSE. Im Vergleich dazu wird die Baseline mit betrachtet, bei dieser wird der aktuelle Temperaturwert für die nächsten 24 Stunden benutzt, analog die Berechnung des RMSE.

6 Resümee Feldtest

Das Ergebnis der Modellierung der Thermodynamik des gesamten „Objektes1“ führte zu einer essentiellen Verbesserung durch die Nutzung der KI gegenüber zur ursprünglichen Baseline. Im weiteren Verlauf wurde die Einstellung der Ladereglung in die Betrachtung mit einbezogen, folglich lieferte das Modell für das gesamte „Objekt1“ gute Ergebnisse. Wie in der Formel beschrieben, kann je nach Gewichtung des Regulierungsparameters der Fokus der Optimierung bei dem Wärme komfort oder der Energieeinsparung liegen. Für beide Möglichkeiten wurde eine Simulation durchgeführt. Parallel zum Testobjekt „Objekt1“ wurde ein Regressionsmodell für das Testobjekt „Objekt2“ modelliert. Wie in Abbildung 4 verdeutlicht, liefert die KI eine zuverlässige Schätzung und prognostiziert eine robuste 7-Tages-Prognose der Innentemperatur innerhalb eines 95%-Korridors. Die Innentemperatur des Testobjektes „Objekt2“ liegt über den betrachteten Zeithorizont im Toleranzbereich des Prognosefensters.

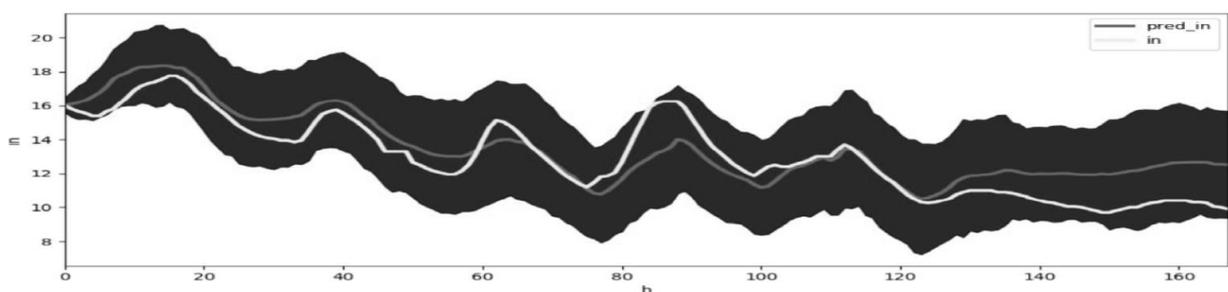


Abbildung 4: 7-Tagesprognose der Innentemperatur mit 95%-Korridor

Quelle: intern enviaM

Als Ergebnis des Feldtests konnte die Funktionalität des Systems der „Wärmespeicher-Steuerung“ erfolgreich in der Praxis erprobt werden. Zudem wurde die Anwendung einer KI-gesteuerten Heizungsregelung erstmals in einem Pilotprojekt erfolgreich getestet. Die KI-basierte Steuerung der Wärmespeicherheizung wird als Service ohne App präferiert, da der Großteil der bisherigen Kunden älter als 60 Jahre ist. Perspektivisch könnte ein neues Geschäftsmodell mittels zusätzlichem Service „Heizungssteuerung“ angeboten werden. Durch die bedarfsgerechte Ladung kann im Betrieb der Speicherheizung Energie gespart. Die netzdienliche Ladung der Wärmespeicherheizung außerhalb der Spitzenlastzeit kann aufgrund der Nutzung von zeitvariablen Tarifen zusätzliche Einsparungen, aufgrund von reduzierten Netznutzungsentgelten, erzielt werden. Für die nächste Heizperiode wird ein weiterer Feldtest angestrebt, welcher zusätzliche Erkenntnisse zur effizienten Implementierung von Wärmespeicherheizungen in das Internet der Energie liefern soll.

In der im Feldtest untersuchten Anwendungsstufe 1 wurde die technische Möglichkeit zur Steuerung der Heizung bezüglich der Komfortschaffung für den Speicherkunden untersucht. Die Einbeziehung des Verbrauchsverhaltens zur Erstellung des Energiebedarfs ermöglicht die in Abbildung 2 dargestellten weiteren Optionen von Anwendungsfällen.



Abbildung 2: Use Cases der Wärmespeicher-Heizung

Das Internet der Energie als digitales Ökosystem der modernen Energiewirtschaft ist beeinflusst durch die Vorgaben der Politik und der Energiewende. Im Bereich der Netzbetreiber findet eine Entwicklung zum Smart-Grid statt, wobei das Niederspannungsnetz intelligent und transparent werden soll, um die Daten für die intelligente Steuerung und damit für das Internet der Energie nutzen zu können. Durch die damit mögliche netzdienliche Steuerung von Verbrauchsanlagen, kann bei Bedarf zusätzliche Flexibilität variabel eingesetzt werden. Perspektivisch ist eine Implementierung von Wärmeanlagen in den Strommarkt im Rahmen der Sektorkopplung vorstellbar. „Flexumer“ gestalten die digitale Energiezukunft und können damit die Stabilität des Netzes gewährleisten.

7 Literaturverzeichnis

BDEW (2019). Redispatch in Deutschland - Auswertung der Transparenzdaten April 2013 bis einschließlich Dezember 2018, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 26. März 2019.

BMWi (2016) Entwurf eines Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende. Abgerufen am 29.01.2020 von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-eines-gesetzes-zur-digitalisierung-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

Bundesregierung (2016). Intelligente Messsysteme für die Energiewende. Abgerufen am 29.01.2020 von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/intelligente-messsysteme-fuer-die-energiewende-336380>.