

SENDER – Nachhaltige Flexibilisierung des Stromverbrauchs im Haushaltsbereich^{1,2}

Wilhelm SÜBENBACHER³⁽¹⁾, Michael HERBURGER⁽¹⁾, Josefine KUHLMANN⁽²⁾,
Friedrich SEE伯⁽²⁾

⁽¹⁾ FH Oberösterreich, ⁽²⁾ FH Burgenland

Kurzfassung:

Das EU Horizon 2020 Projekt „SENDER“⁴ (Sustainable Consumer engagement and demand response) untersucht verschiedene Möglichkeiten zur nachhaltigen Flexibilisierung des Stromverbrauchs im Haushaltsbereich. Dabei werden unter der aktiven Einbindung von Haushaltskunden im Rahmen eines Co-Creation-Prozesses neuartige Services und Dienstleistungen entwickelt, die eine langfristige Flexibilisierung der Verbraucherlast im Haushaltsbereich ermöglichen. Im folgenden Beitrag wird das Forschungsprojekt vorgestellt und eine erste Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen für die praktische Umsetzung der Anwendungen im Rahmen von Pilotprojekten präsentiert.

Keywords: Demand Response, Co-Creation, Digitaler Zwilling, Regulierung

1 Einleitung

Der steigende Anteil erneuerbarer Energien im elektrischen Energiesystem führt zu einem erhöhten Bedarf an Flexibilität. Diese ist erforderlich, um die mit dem Dargebot schwankende Stromproduktion jederzeit ausgleichen zu können. Stromverbrauchsanlagen stellen ein zentrales Element des elektrischen Energiesystems dar und können mittels Demand Response (DR) Maßnahmen einen wichtigen Beitrag zur sicheren Energieversorgung leisten. Dies gilt auch insbesondere für den Haushaltsbereich. In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wurden bereits viele verschiedene Ansätze zur aktiven Einbindung von Haushaltstromkunden in den Strommarkt bzw. zur Flexibilisierung der Haushaltslast untersucht. Diese führten zu teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen⁵. Wesentliche Herausforderungen in dem Zusammenhang stellen die Identifizierung der konkreten Lasten und Prozesse dar, welche für Flexibilisierungsmaßnahmen in Fragen kommen und andererseits die Ausgestaltung der

¹ The SENDER project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme under Grant Agreement No. 957755. The information and views set out in this document are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union institutions and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information contained therein.

² Das in dieser Arbeit gewählte generische Maskulinum bezieht sich zugleich auf die männliche, die weibliche und andere Geschlechteridentitäten. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Alle Geschlechteridentitäten werden ausdrücklich mitgemeint, soweit die Aussagen dies erfordern.

³ Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, wilhelm.suessenbacher@fh-wels.at

⁴ <https://www.sender-h2020.eu/>

⁵ Siehe [1], [2], [3]

erforderlichen Anreize, damit diese Flexibilität durch die Haushaltskunden auch langfristig bereitgestellt wird. Im Rahmen des Forschungsprojekts SENDER werden daher unterschiedliche Stromverbrauchsanlagen im Haushaltsbereich eingebunden und gemeinsam mit den Haushaltskunden in einem Co-Creation-Prozess neuartige Services und Dienstleistungen entwickelt. Dies soll einerseits ermöglichen, das Demand Response Potential zu heben und andererseits einen nachhaltigen Nutzen für die Kunden sowie ein breites Interesse an den entwickelten Dienstleistungen sicherstellen. Die Services sollen sich dabei nicht nur auf den Energiebereich fokussieren, sondern je nach Kundeninteresse auch sektorenübergreifende Dienstleistungen in den Bereichen Home-Automation, Home-Convenience oder Assisted-Living inkludieren. Diese Anwendungen werden anschließend in drei Pilotregionen umgesetzt. Ein wesentliches Augenmerk liegt hierbei auf den regulatorischen Rahmenbedingungen, welche im Zuge der Projektimplementierung zu berücksichtigen sind. Hierfür wird der auf die Pilotprojekte anzuwendende Rechtsrahmen untersucht und daraus konkrete Prüfkriterien abgeleitet. Basierend auf den Erkenntnissen der Umsetzungsphase werden erforderliche regulatorische Anpassungen ermittelt und Handlungsempfehlungen für die nationalen Regulierungsbehörden erarbeitet.

In der vorliegenden Arbeit soll ein erster Überblick über SENDER gegeben werden. Hierfür werden zuerst die organisatorischen Rahmenbedingungen dargestellt (Abschnitt 2) und anschließend die Ziele des Projekts (Abschnitt 3), das Umsetzungskonzept (Abschnitt 4), die wissenschaftliche Methodik (Abschnitt 5) und die SENDER Entwicklungen über aktuellen Stand der Technik hinaus (Abschnitt 6) detailliert erläutert. Abschließend werden die ersten Zwischenergebnisse aus der Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen für Demand Response und eine aktive Kundenbeteiligung präsentiert.

2 Organisatorische Rahmenbedingungen

Das EU Horizon 2020 Forschungsprojekt SENDER wird im Rahmen des Calls „LC-SC3-EC-3-2020: Consumer engagement and demand response“ gefördert. Übergeordnetes Ziel dieses Arbeitsprogramms ist es, neue und intelligente Wege zu finden, Verbrauchern saubere Energie bereitzustellen. Der geforderte Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL) des Calls wurde mit 5 bis 8 festgelegt. SENDER stellt daher ein Demonstrations- bzw. Systementwicklungsprojekt dar, indem die Anwendungen in einem relevanten bzw. operativen Arbeitsumfeld geprüft und eingesetzt werden sollen. Das Gesamtbudget des Projekts beträgt 6,63 Mio. EUR, wovon 5,83 Mio. EUR über EU-Fördermittel finanziert werden.

Das SENDER Konsortium setzt sich aus 14 Forschungspartnern aus 6 EU-Mitgliedsländern (Finnland, Frankreich, Griechenland, Italien, Österreich, Spanien) und Norwegen zusammen. Konsortialführer ist das norwegische Forschungs- und Entwicklungsunternehmen „Smart Innovation Norway“. Die drei Pilotregionen des Projekts in Espoo (Finnland), Weiz (Österreich) und Alginet (Spanien) werden durch die lokalen Projektpartner VTT (Finnland), Weiz Forschungs & Entwicklungs GmbH (Österreich) und ADEE (Spanien) betreut. Die FH Oberösterreich fokussiert sich im Rahmen des Projekts auf die Themenbereiche Prognose von Energieerzeugung und -verbrauch, Energiemarktregulierung sowie Geschäftsmodelle und Innovationen.

Der Projektstart von SENDER erfolgte am 1. Oktober 2020. Die gesamte Laufzeit des Projekts beträgt vier Jahre und gliedert sich in insgesamt zehn Arbeitspakete an deren Ende ein fortgeschrittener Technologie-Reifegrad der Stufe 8 erreicht werden sollte (siehe Abbildung 1).

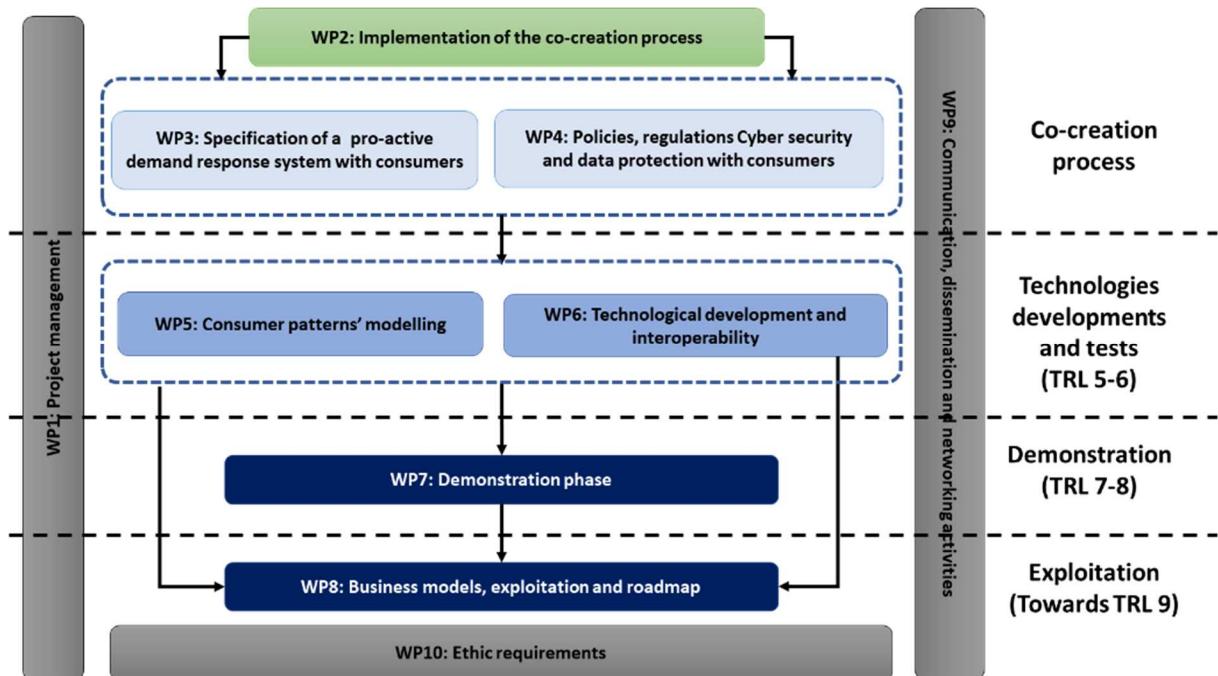


Abbildung 1: SENDER Projektstruktur

Weiterführende Informationen zum aktuellen Projektstatus sowie bereits verfügbare Projektergebnisse können über die SENDER-Homepage <https://www.sender-h2020.eu/> abgerufen werden.

3 SENDER Ziele

Insgesamt wurden in der im Zuge der Planung von SENDER acht eindeutig definierte und messbare Ziele festgelegt, die dazu beitragen sollten, die Flexibilität im Haushaltsbereich zu stärken und sowohl den Kunden als auch den Systembetreibern einen nachhaltigen Nutzen zu stiften. Diese Ziele werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

3.1 Entwicklung innovativer DR Maßnahmen mittels Co-Creation

In den letzten Jahren wurden nur begrenzte Fortschritte bei der aktiven Bereitstellung von DR durch Haushaltskunden erzielt⁶. Dieses Problem war zumeist auf zu geringe finanzielle Anreize oder einen zu geringen Nutzen für die Haushaltskunden zurückzuführen. SENDER versucht dieses Problem durch eine aktive Beteiligung der Haushaltskunden in der Gestaltung der Services mittels Co-Creation zu adressieren. Im Rahmen dieses Prozesses können Haushaltskunden ihre konkreten Ideen und Wünsche einbringen und diese gemeinsam mit den Dienstleistern vor Ort umsetzen. Ziel ist es, innovative Services mit finanziellen, aber auch nicht-finanziellen Anreizen zu entwickeln, die eine aktive Beteiligung der Stromkunden über die Laufzeit des Projekts hinaus langfristig sicherstellen. Die entwickelten Lösungen sollen den Haushaltskunden einen nachhaltigen Mehrwert generieren und auch sektorenübergreifende

⁶ Siehe hierfür z.B. [1], [2], [3], [4]

Services in den Bereichen Home-Automation, Home-Convenience oder Assisted-Living bereitstellen. Insgesamt sollte den Haushaltkunden durch diese Services langfristig eine einfachere Bereitstellung von Flexibilität und eine aktive Beteiligung am Strommarkt ermöglicht werden.

3.2 Neue Ansätze zur Verbrauchsprediction von Haushaltsstromkunden

Die Verfügbarkeit von Verbraucherinformationen und -daten war noch nie höher als heute. Zudem gab es große technologische Fortschritte bei gleichzeitig sinkenden Kosten in der automatisierten Erkennung von Mustern sowie in der Verbrauchsprognose mittels künstlicher Intelligenz (KI) und Machine-Learning (ML). Trotzdem basieren im Bereich DR nach wie vor viele Ansätze und Verfahren auf der Wirkungsweise sehr einfacher Stellsignale, welche durch den Netzbetreiber an die Stromkunden übermittelt werden. Das SENDER Projekt verfolgt das Ziel, neue proaktive DR Ansätze zu entwickeln, in denen die Verhaltensmuster der Konsumenten zusätzlich zur Prognose ihres Verbrauchs herangezogen werden können. Für diesen Zweck werden die Informationen von Sensoren und technischen Anwendungen in den Haushalten, wie z.B. Temperatur- und Bewegungssensoren oder E-Autos mit Ladeinfrastruktur, gesammelt, Verhaltensmuster abgeleitet und diese für eine optimierte Prognose des Verbraucherbehaltens eingesetzt. Durch eine weitere Segmentierung der Haushaltkunden mit Hilfe zielgruppenspezifischer Informationen (z.B. Geschlecht, Einkommen, Standort, Haustyp) kann eine noch kundenspezifischere Prognose durchgeführt werden bzw. können Energiedienstleistungen und Services noch besser auf Kundenbedürfnisse abgestimmt werden.

3.3 Digitale Zwillinge zur besseren Abschätzung des verbraucherseitigen Flexibilitätpotentials

Die Segmentierung der Haushaltkunden, wie oben angeführt, wird in SENDER zudem dafür verwendet, digitale Zwillinge der realen Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen zu entwickeln. Mit Hilfe dieser digitalen Zwillinge können die im Projekt gesammelten Sensordaten und kundenspezifischen Informationen aggregiert und für eine bessere Abschätzung des verbraucherseitigen Flexibilitätpotentials durch Netzbetreiber und Aggregatoren eingesetzt werden. Dies sollte zu einer optimierten Ermittlung, Nutzung und Vermarktung des verbraucherseitigen Flexibilitätpotentials führen, von dem auch Haushaltkunden profitieren. Zudem kann DR auf diese Weise zu einem optimierten Netzbetrieb und einer besseren Integration volatiler erneuerbarer Energien beitragen.

3.4 Innovative Geschäftsmodelle mit Erfolgsbeteiligung für Stromkunden und Netzbetreiber

Viele der derzeitigen DR Projekte fokussieren sich primär auf den Nutzen für den Energieversorger bzw. den Netzbetreiber. Auch der wirtschaftliche Nutzen, z.B. in Form verminderter Ausbaukosten, wird nicht immer in gleichem Maße an die Stromkunden weitergegeben. Dies hat in der Vergangenheit zu einer geringen Beteiligung von Stromkunden an DR Maßnahmen geführt. Das SENDER Projekt verfolgt das Ziel dies zu ändern und durch neue innovative Geschäftsmodelle auch Stromkunden und Prosumern einen fairen Anteil am generierter Nutzen der DR Maßnahmen zukommen zu lassen. Dies stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine proaktive Beteiligung der Verbraucherseite im zukünftigen Energiemarkt dar. Aus diesem Grund werden im Rahmen des SENDER Projekts mit Hilfe eines Co-Creation-Prozesses und der Unterstützung einer Co-Creation Steering Group bestehend aus allen

relevanten Stakeholdern, neue innovative Geschäftsmodelle entwickelt, die eine faire Aufteilung der Erlöse aus den DR Maßnahmen sicherstellen sollen.

3.5 Geeignete rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen für DR

Unflexible oder noch nicht angepasste regulatorische Rahmenbedingungen können ein Hindernis für die Umsetzung neuer Lösungen im Bereich der Elektrizitätswirtschaft darstellen. Die breite Diskussionen um die Einführung von Smart Metern und die Verwendung der dabei erhobenen Daten stellt ein exemplarisches Beispiel hierfür dar. Das SENDER Projekt verfolgt neuartige Ansätze in der Nutzung von Verbraucherdaten und setzt diese für eine optimierte Ermittlung des Verbraucherverhaltens ein. Die Verwendung der Daten stellt daher einen erfolgskritischen Faktor des Projekts dar. Um diesen Umstand Rechnung zu tragen und mögliche Hindernisse für die Umsetzung zu identifizieren, wird ein besonderes Augenmerk auf die Analyse der rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen gelegt. Die Analyse umfasst dabei nicht nur die europäische, sondern auch die nationale Ebene der Länder, in denen die Pilotprojekte umgesetzt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse werden Empfehlungen für die nationalen Regulierungsbehörden abgeleitet werden. Damit sollte das Projekt zu einer einfacheren Umsetzung und harmonisierten Rahmenbedingungen für DR Maßnahmen auf europäischer Ebene beitragen.

3.6 Validierung der entwickelten Lösungen im Rahmen von Pilotprojekten

Um die im Projekt entwickelten Services und Dienstleistungen validieren zu können, werden diese an drei Standorten mit unterschiedlichen kulturellen und geographischen Gegebenheiten sowie Energiebedürfnissen in der EU umgesetzt. Dieser Ansatz soll die Reproduzierbarkeit der Lösungen nach Projektende an ähnlichen Standorten erleichtern und damit fördern.

3.7 Nachhaltigkeit durch umfassende Veröffentlichungen und Nachnutzung

Viele relevante Projekte in den Bereichen Nachhaltigkeit, Klimaschutz und Energie erhalten nicht die erforderliche Aufmerksamkeit der Stakeholder, um eine nachhaltige Wirkung für die Gesellschaft zu erzielen. Das SENDER Projekt setzt daher eine sehr starke Kommunikations- und Veröffentlichungsstrategie auf, die eine große Reichweite der Projektergebnisse sicherstellen soll. Darüber beabsichtigt das SENDER Konsortium nachhaltige Lösungen zu entwickeln, in dem es auf Ergebnisse früherer Horizon 2020 Projekte aufbaut, die Entwickler direkt als Projektpartner miteinbezieht und neue Ansätze gemeinsam mit Stromkunden entwickelt. Das Nachnutzungspotential des Projekts wird durch einen eigenen Nachnutzungsfahrplan unterstützt, in dem die Umsetzbarkeit der Lösungen an anderen Standorten betrachtet wird sowie durch die wirtschaftlichen Interessen der Projektpartner.

3.8 Kooperationen mit EU-Projekten und Fokus auf Querschnittsthemen

Der im Rahmen von SENDER angewandte Co-Creation-Prozess mit direkter Einbeziehung der Verbraucher stellt eine aktuelle wissenschaftliche Methode im Bereich der Innovations- und Technologieentwicklung dar. Der eingesetzte Open Innovation Ansatz mit Inside-Out-Prozess, Coupled-Prozess sowie der durch die Europäische Union geprägte Responsible Research and Innovation (RRI) Prozess basieren auf wesentlichen Erkenntnissen der Sozial-

und Geisteswissenschaften und ermöglichen eine Berücksichtigung von Querschnittsthemen wie z.B. Gleichbehandlung, in der Entwicklung von Services und Technologien. Auch diese Themen werden im Rahmen von SENDER berücksichtigt. Darüber hinaus wird das SENDER Konsortium eng mit anderen Horizon 2020 Projekten wie INTERFACE oder COORDINET zusammenarbeiten, welche das Thema Flexibilität mehr aus der Netzperspektive betrachten, während SENDER sich auf die Konsumentensicht fokussiert. Durch eine Beteiligung an der BRIDGE Initiative der Europäischen Kommission sollen zudem Synergien zum Vorteil aller Projekte gefördert werden.

4 SENDER Umsetzungskonzept

Die Lösungsansätze des SENDER Projekts zeichnen sich durch ihre Proaktivität aus. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass Verbraucher agieren und nicht nur auf Signale des Marktes oder der Netzbetreiber reagieren, wie in vielen aktuellen DR Ansätzen. Hierfür werden Sensordaten in den Räumlichkeiten der Verbraucher und ihrer Umgebung gesammelt und verarbeitet, um mittels KI typische Verhaltensmuster zu identifizieren. Dieser Ansatz ermöglicht es, hochpräzise digitale Zwillinge der Stromkunden auf Basis unterschiedlicher Profile zu erstellen. Die erfassten Sensordaten werden zudem so aufbereitet, dass sie für Anwendungen in den Bereichen Home-Automation, Home-Convenience oder Assisted-Living genutzt werden können. Offene Schnittstelle zwischen den Akteuren und Services sowie umfangreiche Tests sollen die Interoperabilität und Austauschbarkeit der Komponenten in den entwickelten Lösungen sicherstellen. Dieser Ansatz erlaubt außerdem die Nutzung von Legacy-Systemen bzw. Drittanwendungen samt neuer Geschäftsmodelle.

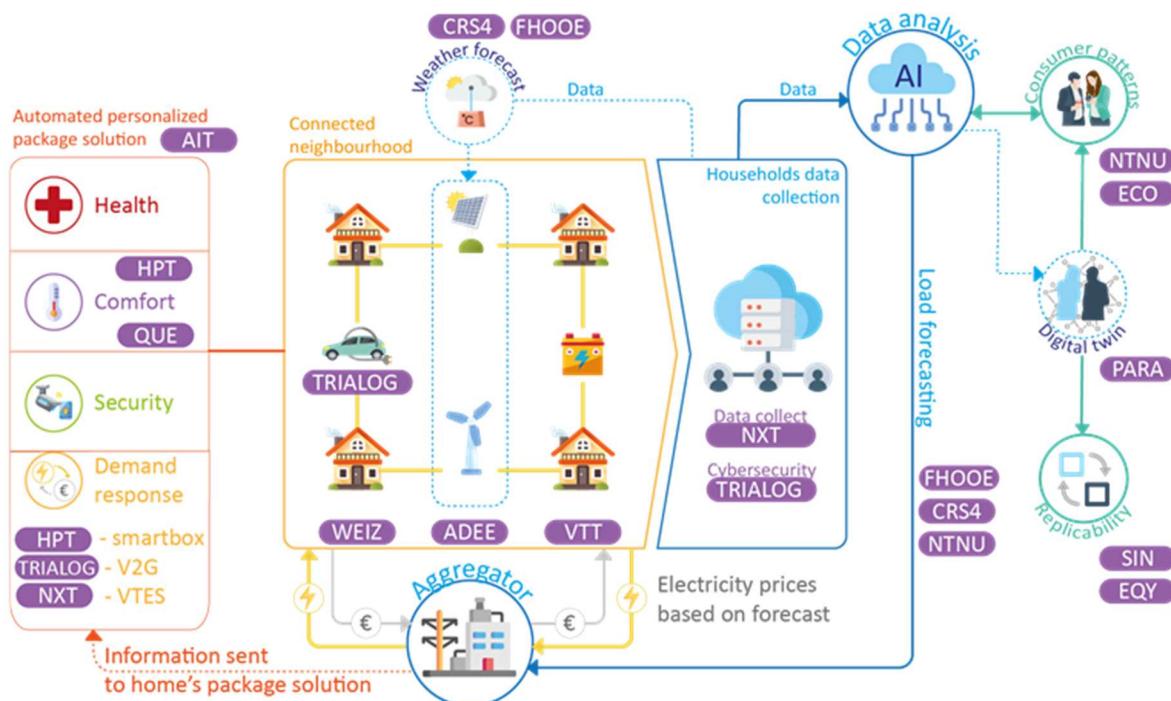


Abbildung 2: Gesamtkonzept des SENDER Projekts

Abbildung 2 zeigt das Gesamtkonzept von SENDER und die wesentlichen Innovationen des Projekts. Im nun folgenden Abschnitt werden diese Innovationen ausführlich beschrieben.

4.1 Virtueller thermischer Energiespeicher (VTES) mit Power-to-Heat (P2H)

Der virtuelle thermische Energiespeicher VTES ist eine innovative Lösung, welche die thermische Speicherfähigkeit vorhandener Pufferspeicher und Gebäudeflächen nutzt, um Flexibilität auf kostengünstige Weise bereitzustellen, ohne dabei den Komfort der Bewohner oder tägliche Abläufe zu beeinträchtigen. Im Rahmen des SENDER Projekts wird ein optimiertes VTES-Heizsystem entwickelt, welches thermische Energiespeicher (TES) wie Pufferspeicher optimal mit P2H-Anlagen wie Wärmepumpen betreibt. Hierfür werden dynamische thermische Gebäudemodelle entwickelt und in den Anlagenbetrieb miteinbezogen. Darüber hinaus werden auch umfangreiche Modelle von TES, wie Pufferspeichern inklusive ihrer thermischen (z.B. Kapazität, Ausspeicherrate) und elektrischen (z.B. Nennleistung, aktuelle Leistung, Einschalt- und Ausschaltzeiten) Eigenschaften entwickelt, um die thermische Speicherkapazität und Flexibilität unter Berücksichtigung der Vorlieben der Bewohner und der aktuellen Betriebsweise bestimmen zu können. Durch diesen dynamischen Modellierungszugang wird ein „one-size-fits-all“-Ansatz vermieden und es können stattdessen thermische Profile für individuelle Gebäude und deren Geräteausstattung erzeugt werden. Eine weitere Entwicklung im Zuge des Projekts stellt das intelligente Control Interface (CI) für Pufferspeicher dar, über welches thermische Speicher wie flexible Batterien betrieben werden können. Hierfür wird die Höchsttemperatur des Wasserinhalts im Tank aktiv reguliert. Auf diese Weise kann der Energiebedarf zur täglichen Bereitstellung von Warmwasser optimiert oder überschüssige Energie aus dem Haushalt zwischengespeichert werden.

4.2 Intelligentes Laden und Vehicle-to-grid (V2G)

Smart Charging ist ein innovatives Energiemanagementsystem (EMS), das im Rahmen des SENDER Projekts zur Flexibilisierung des Stromverbrauchs elektrischer Fahrzeuge eingesetzt wird. Die Flexibilisierung erfolgt dabei mittels intelligenter Ladung und V2G Lösungen und kann zur Verbrauchssteuerung in Verteilernetzen, lokalen Energiegemeinschaften oder für Regelreservezwecke eingesetzt werden. Das EMS basiert auf Smart Contracts und der Blockchain-Technologie und erlaubt eine kosteneffiziente und nachvollziehbare Gebotslegung und Aktivierung von Flexibilitätsprodukten auf lokalen Flexibilitätsmärkten. Das EMS verfügt zudem über Interfaces mit offenen Standards auf verschiedenen Ebenen (Datenmodel, Services, API) und kann damit an die spezifischen Anforderungen der Pilotprojekte sowie an lokale Standards angepasst werden. Hauptinnovationen des EMS sind die gesteuerte Ladung der Elektrofahrzeuge sowie die kosteneffiziente und verifizierbare Aktivierung der Flexibilitätsprodukte mittels Blockchain und Smart Contracts. Letzteres stellt eine wesentliche Weiterentwicklung gegenüber herkömmlichen Stellsignalen ohne Feedback dar, bei denen eine tatsächliche Aktivierung der flexiblen Verbraucher im Nachgang nicht überprüft werden kann.

4.3 Nutzerzentriertes Demand Response mittels SENDER Smart Box

Der Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen (Wärmepumpen, Batteriespeicher, PV-Anlagen, etc.), Smart Home Anwendungen und der IT-Infrastruktur erfolgt über einen eigenen SENDER Gateway. Dieser basiert auf dem integrierten Smart Home Gateway M/490 und stellt die Kompatibilität mit dem OneM2M Standard und Smart Home Kommunikationsprotokollen wie Zigbee, BLE, 6LowPan, etc. sicher. Zudem wird der SENDER Gateway auch zur Erfassung aller Sensordaten (Temperatur, Feuchtigkeit, Helligkeit, etc.) und zur Übertragung der Stell- und Informationssignale zwischen den verteilten

Logik und den Aktoen verwendet. Durch die umfassenden Sensordaten, die Smart Home Anwendungen und die verteilte Logik können spezifische Verhaltens- und Komfortprofile der Gebäudenutzer entwickelt werden. Diese ermöglichen eine nutzerzentrierte Aktivierung von DR Anlagen ohne den Komfort der Kunden einzuschränken.

Eine speziell entwickelte SENDER Smart Box wird als Gateway zwischen dem Gebäude- netzwerk und dem Stromnetz fungieren (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Konzept der SENDER Smart Box

Die SENDER Smart Box umfasst folgende Komponenten:

- eine **Bridge**, welche eine Multiprotokoll Kommunikation im Gebäude und in den verschiedenen Gebäudenetzwerken ermöglicht;
- ein autonomes **Sensor-Aktor-Kombigerät**, in das spezifische Sensoren und Aktoen integriert werden;
- einen **Datenmanagementknoten**, in dem die Informationen von Umgebungssensoren, Messpunkten und Steuereinrichten normalisiert, vorverarbeitet, komprimiert und vor der Übermittlung verschlüsselt werden;
- einen **Sensordatenaggregationsknoten**, in dem die Komponenten der verteilten Logik, welche für die Erstellung der dynamischen Kundenprofile, Flexibilitätsprofile und Steuersignale erforderlich sind, physikalisch untergebracht werden;
- einen „**Home Agent**“, der den Nutzern Zugang zu zahlreichen Smart Home Anwendungen ermöglicht;

- einen „**Prosumer Agent**“, der für das Monitoring und die Zugangskontrolle z.B. durch das Facility Management oder Energiedienstleister eingesetzt werden kann.

4.4 Sensordatenaggregation für dynamische Nutzer- und Flexibilitätsprofile

In den Pilotprojekten werden Sensor- und Energiemessdaten in den Gebäuden in Echtzeit ausgelesen, aggregiert, damit kontextbezogene Nutzerprofile erzeugt und diese mit typischen Haushaltsaktivitätsmustern gekoppelt. Diese Verknüpfung von Haushaltsaktivitätsmuster und Echtzeitdaten ermöglicht die Erstellung detaillierter Aktivitätsprofile der Gebäudebenutzer und eine dynamische Prognose und Steuerung des Haushaltsenergiebedarfs. Durch eine Normalisierung und Ergänzung der Benutzerprofile um relevante personen- und kontextbezogene Informationen können in weiterer Folge noch detaillierte Benutzerprofile erstellt werden. Darüber hinaus wird sich SENDER auch mit den Verbrauchbedürfnissen in den Bereichen thermischer Komfort und Beleuchtung auseinandersetzen und präzise kurz- und mittelfristige Prognose des Haushaltsenergieverbrauchs für Heiz- und Kühlzwecke, die Warmwasseraufbereitung und die Haushaltsbeleuchtung bereitstellen. Dabei wird SENDER auf die THOR User Profiling Engine, welche vom Projektpartner Hypertech bereits als Prototyp entwickelt wurde, zurückgreifen. Die Nutzerkomfortprofile, welche im Projekt entwickelt werden, modellieren die Haushaltsbewohner als dynamische und mit ihrer Umgebung interagierende Einheiten und ermöglichen dadurch eine optimierte Steuerung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen (HLK) sowie der Gebäudebeleuchtung. SENDER wird einen eigenen Framework für Verbraucherflexibilitätsprofile entwickeln, der unter Einbeziehung von KI kurz- (intra-hour) und mittelfristige (intra-day) Prognosen des Haushaltsverbrauchs bzw. der zur Verfügung stehenden Flexibilität in den Haushalten ermöglicht.

4.5 Nutzerorientierte Anreize für Demand Response

In SENDER werden drei Strategien verwendet, um Haushaltkunden einen Anreiz zur aktiven Teilnahme am Projekt bereitzustellen. Diese Strategien sollen einerseits eine maximale Anzahl an Haushaltkunden zur aktiven Teilnahme bewegen und andererseits auch sicherstellen, dass diese während der gesamten Projektlaufzeit und darüber hinaus auf DR Signale reagieren. Die drei Strategien setzen hierfür auf unterschiedlichen Ebenen an. Auf der ersten Ebene ist geplant den Teilnehmern finanzielle Anreize zur aktiven Teilnahme am Projekt zur Verfügung zu stellen⁷. Zu diesem Zweck wurde in der Budgetplanung ein separater Betrag für die Teilnehmerakquise vorgesehen. Dieser soll im Rahmen einer Verlosung unter den teilnehmenden Haushaltkunden aufgeteilt werden. Die zweite Ebene zielt auf eine umfassende Information der Teilnehmer ab. Dafür werden die Haushaltkunden über alle Schritte des Pilotprojekts informiert. Zudem erhalten sie durch ein Frontend umfassende Informationen über ihre Energiedaten, zu Stromtarifen (z.B. Real-Time Pricing, Time of Use Pricing, Critical Peak Pricing, Critical Peak Rabatte), zu Netzengpässen und zu weiteren Anreizen zur Lastverschiebung. Die dritte Ebene verfolgt das Ziel ein Gesamtpaket bereitzustellen, in dem DR in nichtenergiebezogene Services für Komfort, Gesundheit, Sicherheit, etc. so integriert wird, dass Kunden bei der Nutzung der Services gleichzeitig auch ihr DR Potential zur Verfügung stellen. Diese drei Strategien werden durch eine umfassende Kommunikationsstrategie im

⁷ Eine endgültige Entscheidung zur Durchführung dieser Maßnahme ist mit Stand August 2021 noch nicht getroffen.

Rahmen der Pilotprojekte ergänzt. Zudem sollen regelmäßige Workshops in den Pilotregionen dazu dienen Feedback der Teilnehmer einzuholen sowie die Akzeptanz des Projekts und die aktive Beteiligung der Haushalte zu fördern.

4.6 Paketlösung zur Förderung langfristiger Kundenbeteiligung

Eine zentrale Herausforderung für die erfolgreiche Implementierung von DR Maßnahmen besteht darin, die langfristige Akzeptanz und das Engagement der Verbraucher für die entwickelten Lösungen zu gewährleisten. Um dieser Herausforderung zu begegnen, entwickelt das SENDER Projekt eine Paketlösung. Da das SENDER-Konsortium auf einen Co-Creation-Ansatz setzt, wird die finale Entscheidung über die zu integrierenden Services von den Haushaltkunden getroffen. Die folgenden Anwendungen werden jedoch im Rahmen des Projekts vom Konsortium vorgeschlagen:

- **Bereiche „Smart Home-Security“ und „Home-Safety“:** Typische Anwendungen in diesen Bereichen sind Brand- oder Kohlenmonoxid-Melder. Im Falle eines Brandes kann das Smart Home-Security System den Hausbesitzer alarmieren und Einsatzkräfte verständigen.
- **Bereich „Access-Control“:** Bewegungsmelder können feststellen, ob eine Person im Gebäude ein Bewohner, ein erlaubter Besucher oder eine nicht erlaubte Person ist. Diese Information kann an verschiedene Empfänger (z.B. Hausbesitzer, Sicherheitsdienst, Gebäudemanagement) gesendet werden.
- **Bereich „Assisted-Living“:** Bewegungsmelder können auch feststellen, ob ein Bewohner zuhause ist. Wird über einen längeren Zeitraum keine Bewegung festgestellt, kann ein Warnsignal an Nachbarn, Verwandte oder die Hauspflege gesendet werden, welche dann weitere Schritte setzen.
- **Bereich „Home-Convenience“:** Anwendungen in diesem Bereich können beispielsweise Dachfenster öffnen, um das Raumklima zu verbessern oder Beschattungsanlagen steuern. Darüber hinaus kann die SENDER Smart Box die Temperatur in verschiedenen Räumen eines Gebäudes nach persönlichen Vorlieben der Bewohner regeln. Zusätzliche Kundenwünsche aus dem Co-Creation-Prozess können einfach in das SENDER-Konzept integriert werden. Beispiele hierfür sind Warnsysteme vor Überflutungen, Stürmen und Großfeuer oder die Installation lokaler Systeme, welche die Wasserqualität prüfen und im Falle von Verunreinigungen warnen.

4.7 SENDER Frontend und Nutzer Toolkit

Die Konfiguration der SENDER Services sowie die Darstellung der Daten und Informationen erfolgt über ein spezielles Frontend. Hierfür wird auf Module aufgesetzt, welche bereits in Vorgängerprojekten entwickelt und validiert wurden. Dadurch kann ein vollwertiges Nutzerpaket mit umfangreichen Services und Schnittstellen (Web, Mobil) für Endverbraucher und Marktteilnehmer zur Verfügung gestellt werden. Die Schnittstellen sollen sicherstellen, dass die Nutzer jederzeit Kontrolle über die Services in ihrem Haushalt besitzt (auch per Fernzugriff). Die Darstellung der Informationen im Frontend wird sich an den Kundenbedürfnissen orientieren und auf benutzerfreundliche und verständliche Art und Weise erfolgen. SENDER wird auch ein eigenes Frontend sowie ein Toolkit für Aggregatoren und Netzbetreiber zur Verfügung stellen, mit denen die Abläufe der DR Prozesse dargestellt

werden können und die eine umfassende Analyse der Verbraucherflexibilität mit Prognosen für den Einsatz aktiver, passiver sowie impliziter und expliziter DR ermöglichen. Damit wird ein verbesserter Netzbetrieb mittels DR sowie eine umfassende Zustandsanalyse ermöglicht. Mittels Prognosewerkzeugen mit aktiven Zugriff auf DR Anlagen können Aggregatoren ihr Portfoliomanagement zusätzlich optimieren.

4.8 Datensicherheit und Cybersecurity

Datenschutz und Cybersecurity sind wichtige Aspekte des SENDER Projekts, um das Vertrauen der Verbraucher in die entwickelten Lösungen und damit auch deren Nachhaltigkeit sicherzustellen. Aus diesem Grund ist eine klare Kommunikation bzgl. der Verwendung der Daten von hoher Relevanz. Im Rahmen des SENDER Projekts werden sensible Kundeninformationen zur Verbrauchsprognose und zur Anpassung der Lösungen verwendet. Aus diesem Grund werden mehrere Co-Creation Workshops mit Kunden durchgeführt und ein Data Protection Officer (DPO) für das Projekt nominiert werden. Zudem wird ein Datensicherheitskonzept über verschiedene Bereiche des Projekts umgesetzt, welches folgende Teilbereiche beinhaltet:

- Definition und Umsetzung eines Datensicherheits- und Datenschutzmanagementsystems, welches den gesamten Lebenszyklus und das gesamte Ökosystem der SENDER Lösungen umfasst. Dabei werden auch Cybersecurity Frameworks und Privacy-by-Design Ansätzen integriert sowie die Empfehlungen der EU Kommission bzgl. Cybersecurity im Energiesektor, der Smart Grid Task Force Expert Group 2 Report on Cybersecurity, die NISTIR 7628 Guidelines rev.1;
- Adressieren des Problems im Zusammenspiel von Sicherheits- und Datenschutzrichtlinien unter Berücksichtigung der jüngsten Fortschritte in den Bereichen Trust Management, Trust Delegation, unter Verwendung rollenbasierter Zugangskontrollen und Privacy Preference Management;
- Schaffung eines Konsenses über den Ansatz durch die BRIDGE Initiative und durch die Errichtung eines Standardisierungsplans, welcher Arbeiten, wie ISO/IEC 27030 („Guidelines for security and privacy in IoT“) oder ISO/IEC NP 30149 („IoT – trustworthiness framework“) berücksichtigt.

Für die Datensicherheit und den Datenschutz der Pilotprojekte wird ein „Cybersecurity und Datensicherheitsplan“ ausgearbeitet werden. In diesem werden die Maßnahmen zur Umsetzung der notwendigen Schritte in den Pilotprojekten beschrieben als auch die Durchführung der Sicherheits- und Risikoanalysen, die Anforderungen an die Risikominderungsstrategien und die Analyse der Compliance in den Projekten.

4.9 Digitaler Zwilling und Kundengruppierung

Im Rahmen des SENDER Projekts werden digitale Zwillinge der Endkunden entwickelt, welche in der Lage sind, das Verhalten der Stromkunden widerzuspiegeln. Diese digitalen Zwillinge werden dazu verwendet, die in SENDER konzipierten Anwendungen zu testen und zu überprüfen, ob diese auch auf andere Kundengruppen zu übertragen sind. Die Entwicklung der digitalen Zwillinge erfolgt mit Hilfe von Big Data und selbstlernenden KI-Anwendungen und verfolgt das Ziel die komplexen Wechselbeziehungen zwischen Stromkunden und ihrem Verbrauchsverhalten zu modellieren. Durch diese virtuellen Modelle der Stromkunden sollen

neue Möglichkeiten zur Optimierung des Energieverbrauchs geschaffen werden. Auch die detaillierte Kundengruppierung stellt einen wichtigen Aspekt des SENDER Projekts dar. Durch diese können individuelle Ansätze zur Optimierung je Kundengruppe entwickelt werden. SENDER wird hierfür die wichtigsten Verbrauchertypen basierend auf einer Reihe von Segmentierungsvariablen bestimmen. Diese Variablen werden neben traditionellen Informationen wie z.B. Alter und Einkommen auch weiterführende psychographische und soziale Variablen wie angenommene soziale Normen der Stromkunden oder deren Umweltbewusstsein beinhalten. Diese Segmentierung ermöglicht eine noch genauere Bestimmung wie Kundengruppen auf bestimmte Eigenschaften von Energieprodukten und -services, wie deren Preis oder zusätzlicher Komfort, reagieren. Diese Segmentierung kann damit zu einer besseren Bestimmung der Inanspruchnahme bestimmter Energieprodukte und -services in den verschiedenen Kundengruppen beitragen.

5 SENDER Methodik

Ziel des Projekts und der dahinterliegenden Methodik ist die Förderung nachhaltiger Innovationen unter Anwendung eines multi-perspektivischen Ansatzes, der insbesondere die Perspektive der Verbraucher auf das Netz und das Stromsystem berücksichtigt. In Abbildung 4 ist die in SENDER angewandte Methodik von der Analyse- bis zur Umsetzungsphase der Innovation dargestellt. Wie ersichtlich, fokussiert sich die Methodik auf die drei Kernbereiche Technologie, Verbraucher und Geschäftliches. Diese drei Bereiche werden im Rahmen der gesamten Projektlaufzeit weiterentwickelt und sollen neue technologische Ansätze, die Verbraucher in den Fokus stellen und wirtschaftlich Tragfähig sind, sicherstellen.

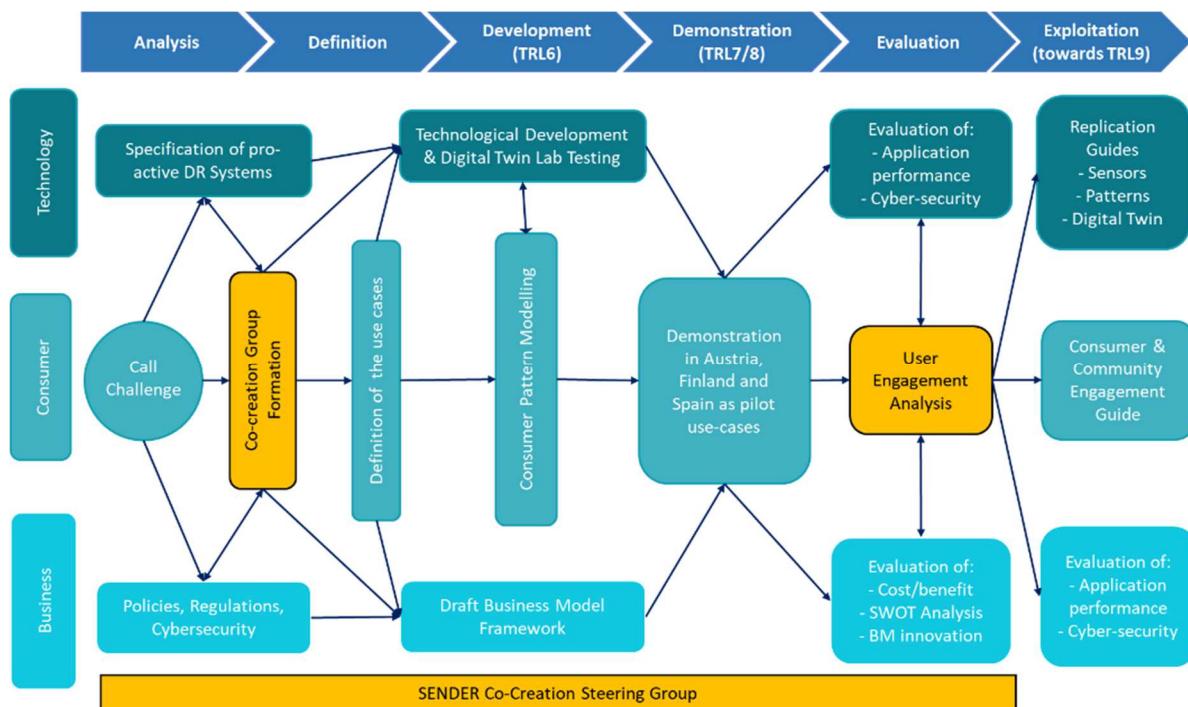
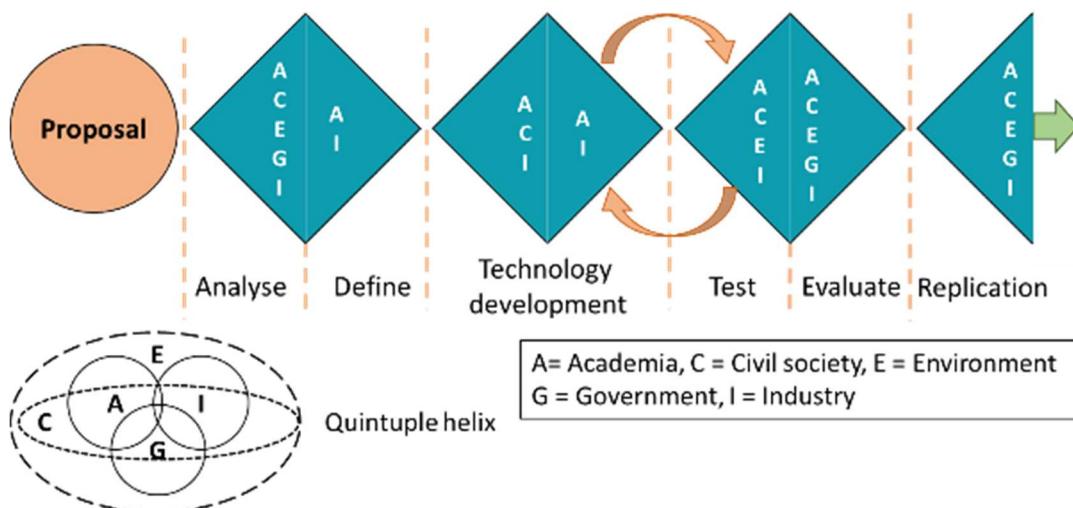


Abbildung 4: Die SENDER Methodik

5.1 Übergeordnete Methodik

Als Innovationsansatz im Projekt wurde das Modell der Fünffach-Innovations-Helix⁸ gewählt, da dieses einen multi-perspektivischen Zugang sicherstellt und einen Innovationsrahmen für nachhaltige Entwicklungen in einer wissensbasierten Wirtschaft sowie eine Reifung der Wissensgesellschaft sicherstellt. Die fünf Helices des Modells repräsentieren die wichtigsten Faktoren und Perspektiven der Gesellschaft, die für die Entwicklung von Innovationen relevant sind, nämlich Wissenschaft, Gesellschaft, Umwelt, Regierung und Industrie. Diese Fünfer-Helix wird im Rahmen des Projekts mit einem verbraucherzentrierten Innovationsansatz verknüpft, woraus sich der in Abbildung 5 dargestellte Innovationsentwicklungs- und Replikationsprozess ergibt.



„Analyse“ Phase: Im Rahmen der Analysephase wird ein Co-Creation-Prozess aufgesetzt, welcher sich auf die Verbraucherbedürfnisse konzentriert, aber auch die Perspektiven Wissenschaft, Umwelt, Regierung und Industrie mitberücksichtigt. Durch Workshops soll eine effektive Verbindung zwischen den entwickelten Innovationen und deren Nutzern sichergestellt werden und damit in weiterer Folge auch die soziale Akzeptanz der Lösungen. Die Experten des Konsortiums werden den Nutzern im Rahmen der Co-Creation Workshops den Stand der Technik im Bereich DR vorstellen sowie technische, rechtliche, regulatorische und umweltrelevante Aspekte, die es zu berücksichtigen gilt. Diese Informationen bilden die Grundlage für die Entwicklung der Innovationen im Co-Creation-Prozess. Parallel dazu werden die wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen in den Pilotregionen untersucht und eine Analyse der sicherheits- und datenschutzrechtlichen Risiken durchgeführt.

„Define“ Phase: Basierend auf den Ergebnissen der Analysephase werden in der Definitionsphase, umsetzbare und allgemein akzeptierte Anwendungsfälle (Use cases) definiert. Dies erfolgt im Rahmen eines moderierten Co-Creation-Prozesses wie in Abbildung 6 dargestellt. Die Systemarchitektur, Smart-Home Anwendungen und Service Plattformen sowie die technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die Umsetzung werden nachfolgend im Projekt noch näher spezifiziert. Es ist zu erwarten, dass sich die vorgeschlagenen Lösungen

⁸ Siehe [5], [6]

abhängig vom nationalen Kontext, auf Grund des unterschiedlichen Energieverbrauchverhaltens, klimatischer Bedingungen, etc. zum Teil signifikant unterscheiden. Aus diesem Grund werden die Lösungen in drei unterschiedlichen Ländern umgesetzt. Darüber hinaus werden auch die Aspekte Datenschutz, Datensicherheit, Cybersecurity und der Regulierungsrahmen auf nationaler Ebene untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen mittelfristig einen großflächigen Rollout in unterschiedlichen europäischen Regionen unterstützen.

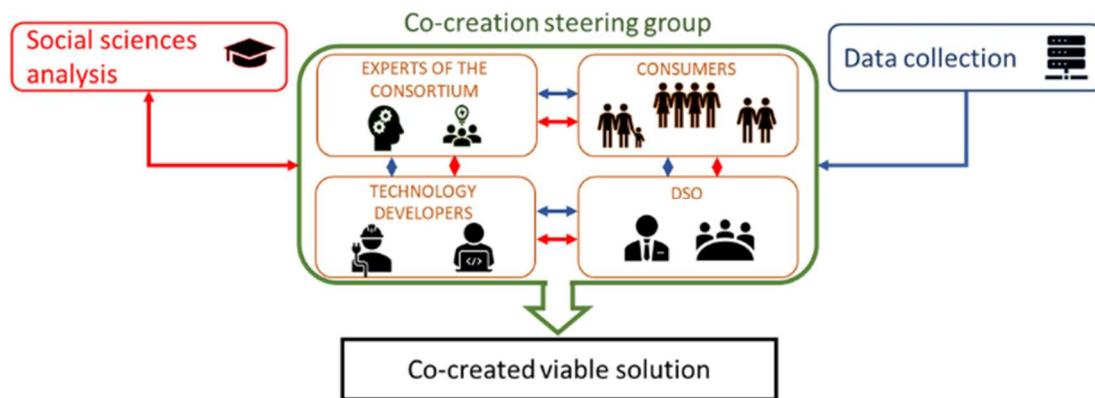


Abbildung 6: Co-Creation-Prozess und Akteure

„Technology Development“ Phase: In dieser Phase werden aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse- und Definitionsphase die technischen Lösungen entwickelt. In einem ersten Schritt werden typische Verbrauchergruppen identifiziert und deren Eigenschaften sowie das typische Verbrauchsverhalten ermittelt. Auf diese Weise können Verbrauchermuster und maßgeschneiderte DR Maßnahmen konzipiert werden. Die Projektergebnisse werden in weiterer Folge auch zur Entwicklung der Modelle für die digitalen Zwillinge der Verbrauchergruppen verwendet. Darüber hinaus werden energiebezogene Services zur Optimierung von Energieerzeugung und Speichern in den Haushalten unter der Verwendung lokaler Last- und Erzeugungsprognosen entwickelt, eine Plattform für den Peer-to-Peer Handel von Flexibilität und Smart Home Anwendungen mit energiebezogenen Services und Komponenten zu Gesamtlösungen zusammengeführt.

„Demonstration“ Phase: Die Demonstrationsphase beginnt mit dem Test der entwickelten Lösungen unter Laborbedingungen. Im Zuge eines iterativen Prozesses werden dabei mögliche Mängel identifiziert und behoben. Damit soll die Entwicklung praktisch umsetzbarer Lösungen sichergestellt werden. Um eine breite Teilnahme der Kunden in den Pilotregionen zu gewährleisten, kommen die vorab konzipierten nutzerorientierten Anreizsysteme zum Einsatz. Die speziellen SENDER Anwendung werden in der Folge in den teilnehmenden Haushalten in den Pilotregionen installiert und deren Einsatz und Wirkungsweise mit speziellen KPIs überwacht. Basierend darauf werden Berichte über die Wirkungsweise und identifizierte Probleme erstellt sowie Verbesserungsvorschläge abgeleitet.

Pilotregionen

Die im Projekt gewählten Pilotregionen unterscheiden sich bewusst in Bezug auf ihre geografische Lage und Gegebenheiten, ihre Kultur sowie ihre Energiebedürfnisse. Mit Finnland, Österreich und Spanien wurden Länder in Nord-, Mittel und Südeuropa gewählt.

Finnland: Der finnische Standort liegt im Süden des Landes, in einem Bezirk der Stadt Espoo, die vor allem aus einem Universitäts- und Forschungscampus besteht. Der Projektpartner VTT

betreibt dort mit Smart Otaniemi Innovation Ecosystem eine Pilotregion, in welcher Unternehmen, Städte und Forschungseinrichtungen neue Lösungen in den Bereichen Sektorenkopplung und Digitalisierung umsetzen können. Im Rahmen des SENDER Projekts liegt der Fokus auf der Ermittlung und Vermarktung des Flexibilitätspotentials von Elektrofahrzeugen. Hierfür werden neue Ansätze der Datenanalyse und Lastprognose für die Ladeinfrastruktur entwickelt und Kunden neue Services, welche auf die Daten der Ladeinfrastruktur und Elektroautos zurückgreifen, angeboten. Zudem wird das Ziel verfolgt, alle energiebezogenen Daten auf einer zentralen Plattform zur Verfügung zu stellen, um so eine Optimierung in einem erweiterten Kontext zu ermöglichen.

Österreich: Die österreichische Pilotregion befindet sich in Weiz in der Steiermark und wird vom Projektpartner Innovationszentrum Weiz betreut. Im Zusammenhang mit dem dort im Entstehen begriffenen neuen Stadtviertel soll die systematische Erweiterung von großflächigen Photovoltaiksystemen gemeinsam mit Stromspeicheranlagen, Lade- und Car-sharing-Infrastruktur für Elektrofahrzeuge vorangetrieben werden. Im Zuge des SENDER Projekts soll die bereits bestehende Gebäude-Datenbank in Bezug auf Elektrizitäts- und Verbraucherverhalten erweitert werden. Zusätzlich werden in zirka 200 Haushalten Energiedaten erhoben und Messgeräte installiert, um Informationen über Elektrizitätsverbrauch und deren Verwendung in DR Management Systemen zu sammeln.

Spanien: Der spanische Projektpartner ADEE ist in Alginet in der Nähe von Valencia angesiedelt. ADEE ist eine Genossenschaft der lokalen Stromendkunden und gleichzeitig Besitzer des lokalen Verteilernetzes. Auf Grund dieser besonderen Eigentümerstruktur, steht die Optimierung des Netzes für die Verbraucher im Vordergrund. Mit Hilfe des bestehenden SCADA Systems kann ADEE auf verschiedene Anlagen und Geräte im Netz per Fernwirktechnik zugreifen. Zudem sind alle Zählpunkte im Netz mit Smart Metern ausgestattet, mit welchen die Verbrauchsdaten an eine zentrale Datenbank übermittelt werden. Im Zuge des SENDER Projekts sollen erste DR Maßnahmen in der Pilotregion umgesetzt werden und diese sukzessive um zusätzliche Energiedienstleistungen erweitert werden.

„Evaluation“ Phase: In der Bewertungsphase erfolgt eine umfassende Analyse der implementierten Lösungen in den Pilotregionen. Basierend auf den Erkenntnissen werden konkrete Empfehlungen für einen großflächigen Rollout abgeleitet. Dabei wird im Besonderen die Bewertung aus Sicht von Wissenschaft, Gesellschaft, Umwelt, Regierung und Industrie berücksichtigt. Die Co-Creation Steering Group nimmt dabei eine wichtige Rolle ein.

„Replication“ Phase: In der Phase der großflächigen Ausrollung werden Geschäftsmodelle für die weitere Vermarktung der SENDER Lösungen entwickelt. Dabei werden auch regionale Umsetzungshindernisse und Einschränkungen mitberücksichtigen. Diese Geschäftsmodelle stellen die Grundlage für ortsspezifische Nutzungspläne und Umsetzungs-Roadmaps dar. Im Rahmen dieser Phase werden zudem die Skalierbarkeit der SENDER Lösungen untersucht und Empfehlungen für zukünftige Vermarktungspotentiale erarbeitet. In diesem Zusammenhang werden die Rückmeldungen aller Stakeholder im gesamten Innovationsentwicklungs- und Replikationsprozess gesammelt, analysiert und in den Nutzungsplan integriert. Abschließend werden von den Konsortialpartnern Empfehlungen für den Umgang mit geistigem Eigentum, für die Phase nach dem Projekt erarbeitet.

6 Entwicklungen über aktuellen Stand der Technik

Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, inwiefern die in SENDER entwickelten Lösungen über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen und damit neue innovative Ansätze zur Nutzung des Flexibilitätspotentials im Haushaltsbereich darstellen.

6.1 Innovative thermische Speicher

TES sind als Mittel zur Integration erneuerbarer Energien auf der Erzeugungsseite weitgehend anerkannt, ihr Einsatz ist aber auch auf der Nachfrageseite möglich⁹. TES können als sensible Wärmespeicher, Latentwärmespeicher oder thermochemische Wärmespeicher ausgeführt werden. Das Interesse für den Einsatz dieser Technologien zur Verbrauchsflexibilisierung hat sich in den vergangenen Jahren deutlich erhöht. Dies schließt auch die Berücksichtigung der thermischen Gebäudemaße als VTES mit ein. Trotz des gestiegenen Interesses und umfangreicher Forschungsarbeiten¹⁰ auf dem Gebiet der thermischen Speicher, ist es aber nach wie vor erforderlich, die Gebäudeintegration sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht weiterzuentwickeln¹¹. Neben den genannten thermischen Speichertechnologien stellen auch P2H-Anwendungen wirksame Flexibilitätsmaßnahmen dar. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Wärmepumpe als ausgereifte und günstige Technologie zu nennen. Auch elektrische Heizkessel werden als relevante Option erachtet¹².

Viele der derzeit verfügbaren TES-Anwendungen besitzen jedoch keine intelligente Logik, um Parameter wie den thermischen Bedarf im Gebäude (kühlen, heizen, Warmwasser) oder die individuellen Komfortwünsche der Kunden mit zu berücksichtigen und gemeinsam zu optimieren. SENDER entwickelt daher eine über den Stand der Technik hinausgehende Logik, welche den Einsatz der TES- und P2H-Anwendungen in Echtzeit gleichzeitig koordiniert und optimiert. Das entwickelte VTES-Modul steuert dabei Anwendungen wie Heiz- und Klimageräte oder Warmwasserboiler und kann dabei die Komfortbedürfnisse der Bewohner mitberücksichtigen. Das VTES-Modul kann für verschiedene Geräte und Gebäudetypen eingesetzt werden, unabhängig von deren Größe, Nutzung und baulichen Merkmale. Personalisierten Komfortprofile der Bewohner erlauben die Vorgabe von Kenngrößen wie Innenraumtemperatur, Luftfeuchtigkeit oder Warmwasserbedarf. Durch die Speisung der Nutzermodelle mit Echtzeitsensordaten kann das Flexibilitätspotential eines individuellen Haushalts ermittelt werden. Dies passiert unter Berücksichtigung von

- Komfortvorgaben der Bewohner;
- Warmwasserbedarf im Haushalt und Verbrauchsprofil des Warmwasserboilers;
- einem dynamischen thermischen Modell der Gebäudemaße;
- einem dynamischen thermischen Modell des Warmwasserboilers.

⁹ Siehe [7], [8]

¹⁰ Siehe [9]

¹¹ Siehe [10]

¹² Siehe [11]

Daraus kann das zeitliche Verlagerungspotential der Heiz- und Klimageräte im Gebäude sowie des Warmwasserboilers ermittelt werden und der Haushalt durch Bereitstellung von Netzdienstleistungen zur Erhöhung der Netzstabilität beitragen. Es können zudem auch zukünftig verfügbare Informationen wie zeitveränderliche Tarife als Steuerungssignale mitberücksichtigt werden.

6.2 Zustandsbasierte Flexibilitätsprofile

Der zunehmende Anteil von erneuerbaren Energien erfordert einen zunehmend flexiblen Netzbetrieb, der von der flexiblen Erzeugung über stärkere Übertragungs- und Verteilungssysteme bis hin zur Speicherung und flexiblen Nachfrage reicht. Das Konzept des "flexiblen Netzes" zielt darauf ab, die Verbraucher zu aktiven Akteuren im Energiemarkt zu machen, die ihre Rolle über den einfachen Bezug von kWh aus dem Netz hinaus ausweiten. Die Fähigkeit zur Nachfrageflexibilität ist zwar nicht neu, aber die neue Generation von Kommunikations- und Steuerungstechnologien ermöglicht es, dass Verbraucher kontinuierlich auf veränderte RES-Angebote und andere Marktsignale reagieren¹³.

Eine Lücke besteht jedoch in der Fähigkeit individuelle Kundenbedürfnisse und Informationen über den Zustand im Gebäude in der Flexibilisierung der Last mit zu berücksichtigen. Das SENDER Projekt schließt diese Lücke durch die Entwicklung eines neuartigen ganzheitlichen Flexibilitätsmanagementsystems, welches mittels Komfortmodellierungstechniken und Echtzeitmessdaten aus dem Gebäude die Komfortparameter (z.B. Temperatur, Beleuchtungsstärke, etc.) ermittelt und basierend darauf die kurzfristige Nachfrageflexibilität (von 15 Minuten bis 1 Stunde in die Zukunft) bestimmt. Auf diese Weise kann das Energiemanagement auf Gebäudeebene optimiert werden, ohne den Betrieb zu stören oder den Komfort der Gebäudenutzer zu beeinträchtigen. Diese Flexibilität kann in weiterer Folge für verschiedene DR-Strategien eingesetzt werden.

6.3 Digitaler Zwilling und Nutzerverhalten

Ein Digitaler Zwilling ist ein Modell eines physischen Prozesses, Objektes oder einer Dienstleistung und hat durch die Fortschritte in den Bereichen IoT, Big Data, ML und KI sehr stark an Bedeutung gewonnen. In der jüngeren Zeit wurde das Konzept des Digitalen Zwillinges auch auf die Modellierung der Art und Weise, wie Menschen in ihrer physischen Umgebung leben und arbeiten, ausgeweitet. Es besitzt jedoch nach wie vor großes ungenutztes Potential¹⁴.

In SENDER werden Digitale Zwillinge aus der Fertigungsindustrie genutzt und diese mit unterschiedlichen Modellen zur Simulation des Nutzerverhaltens in Gebäuden kombiniert¹⁵. Die Modelle für das Nutzerverhalten werden dabei in den drei folgenden Bereichen über den Stand der Technik hinaus entwickelt

- Skalierbarkeit und flexible Einbindung neuer Arten von Verbrauchertypen;
- Verwendung einer standardisierten Methode (IEA EBC Annex 66);

¹³ Siehe [12]

¹⁴ Siehe [13]

¹⁵ Siehe [14], [15]

- Bewertung der Funktionsweise des Modells auf Basis umfassender verhaltens- und anwendungsorientierter Metriken.

Ziel ist die Einreichung eines Patents für den in SENDER entwickelten Digitalen Zwilling der Verbraucher. Dieser soll dazu beitragen das Nutzverhalten und damit auch den Energieverbrauch in Gebäuden besser zu verstehen bzw. diesen besser vorhersagen zu können.

6.4 Prognose von Last und Demand Response

Last- und Erzeugungsprognosen erreichen eine relativ hohe Genauigkeit, wenn sie für größere Netzbereiche erstellt werden. Wesentlich komplexer wird die Aufgabe jedoch, wenn kleinere Abschnitte betrachtet werden sollen, wie z. B. Netzabzweige, eine Teilmenge der Nutzer oder sogar nur einzelne Verbraucher. In diesem Fall sind traditionelle Prognosemethoden, die für großräumige Vorhersagen eingesetzt werden, nur begrenzt anwendbar und alternative Ansätze erforderlich.

Durch den Einsatz von intelligenten Zählern können in Zukunft große Mengen an Verbrauchs- und Erzeugungsdaten erfasst werden. Die großen Fortschritte im Bereich von ML ermöglichen es, basierend auf diesen Informationen, individualisierte Prognosemodelle für einzelne Haushalte und Nutzer zu erstellen. Viele der derzeit eingesetzten Prognosemodelle stützen sich dabei auf probabilistische Ansätze. Diese werden jedoch zumeist für Betrachtungen auf einer höheren aggregierten Ebene eingesetzt. Nur wenige wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich mit dem Einsatz probabilistischer Ansätze auf der Ebene der einzelnen Nutzer.

SENDER fokussiert sich genau auf diesen Bereich und wird unter Einsatz von ML probabilistische Prognoseverfahren für einzelne Verbraucher entwickeln und diese mit Hilfe von Verhaltensmustern, Zustandsinformationen der Gebäude und soziale Eigenschaften der Verbraucher wie Alter, Einkommen, etc. weiter verfeinern. Auf der Erzeugungsseite wird das probabilistische Prognosemodell mit lokalen Wettervorhersagedaten ergänzt, die aus globalen Zirkulationsmodellen abgeleitet werden. Nach der Implementierung der Modelle wird deren Effektivität für lokale Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen ermittelt und kritisch analysiert. Im Rahmen des SENDER Projekts werden die Modelle zur Ermittlung von Basisszenarien für den Verbrauch von Nutzern einsetzt. Dadurch kann die Effektivität unterschiedlicher DR-Strategien verglichen und bewertet werden. Ein weiterer Einsatz der entwickelten Prognosewerkzeuge ist in Energiemanagementsystemen im Haushaltsbereich angedacht.

6.5 Verbraucherbeteiligung an der Energiewende

Untersuchungen zeigen, dass die Anreize für eine aktive Beteiligung von Verbrauchern an der Energiewende vielfach noch nicht ausreichend sind¹⁶. Obwohl Möglichkeiten für eine aktive Beteiligung an der Energiewende gegeben sind, z.B. durch Bürgerkraftwerke oder die Rolle des Prosumers, werden diese nur unzureichend angenommen. Dieser Umstand kann als Hinweis auf einen lückenhaften sozio-organisatorischen Wandel gedeutet werden. Der Übergang zu einem nachhaltigen und rein auf erneuerbaren Energien basierenden System erfordert einen tiefgreifenden, systemischen Wandel an den Orten, an denen diese neuen

¹⁶ Siehe [16]

Technologien errichtet und betrieben werden sollen¹⁷. Es ist daher wichtig die Haupttreiber für eine aktive Bürgerbeteiligung und den Umgang von Bürgern mit dem Thema Energie zu ermitteln, wenn eine breite Beteiligung der Bevölkerung erzielt werden sollte.

Im Rahmen von SENDER wird daher eine umfassende Analyse der Einstellung von Verbrauchern in Bezug auf eine aktive Teilnahme an der Energiewende durchgeführt. Dabei werden regionale, soziale, geschlechterspezifische und klimatische Faktoren mitberücksichtigt¹⁸. Diese Analyse ist Teil des Co-Creation-Prozesses und wird dabei auch auf bestehendes Wissen aus den Horizon 2020 Projekten SHAPE-ENERGY, ELAND und PEAK-APP aufbauen. Die Ergebnisse der Analyse werden zur Entwicklung von Rahmenbedingungen und Prozessen verwendet, welche die soziale Akzeptanz und die aktive Beteiligung der Verbraucher an der Energiewende stärken sollen.

6.6 Virtuelles Labor

Ein besonderes Merkmal moderner Energiesysteme stellt deren Interoperabilität dar. Diese ermöglicht die Zusammenarbeit von Geräten unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Anbieter. Auf EU-Ebene wurden große Anstrengungen unternommen die Interoperabilität zu verbessern¹⁹, da diese als Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung neuer Lösungen gesehen wird.

SENDER wird daher mit „Interoperability by Design“ eine neue Methode zur Gewährleistung der Zusammenarbeit unterschiedlicher Geräte entwickeln. Hierbei wird in einem virtuellen Labor (VLab) die Interoperabilität als wesentliches Merkmal der Anwendungen von der Entwicklungsphase bis zur Test- und Überprüfungsphase integriert. Alle Projektpartner werden in die Spezifikation des Systems eingebunden. Basierend darauf werden Aktoren, Interfaces und APIs Software Development Kits (SKDs) entwickelt, eine Systemdokumentation erstellt und schlussendlich ein transportfähiger Prototyp eines Testsystems angefertigt, der den Projektpartner zur Verfügung gestellt werden kann. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass jeder Projektpartner ein klares Bild bzgl. des vorgeschlagenen Testsystems besitzt und in der Folge alle Services und Dienstleistungen unter gleichen Testbedingungen effizient entwickelt werden können. Die gewonnenen Erfahrungen aus dem SENDER Projekt werden zur Definition der Rahmenbedingungen verwendet, die für einen „Interoperability-by-Design“ Ansatz erfüllt sein müssen. Diese Rahmenbedingungen können in zukünftigen Projekten auf EU-Ebene die Gewährleistung einer maximalen Interoperabilität auf kosteneffiziente Weise sicherstellen.

6.7 SENDER Innovations- und Marktpotential

Derzeit verfügbare Energiemanagementsysteme für den Haushaltsbereich werden zumeist zur Optimierung des Eigenverbrauchs von PV-Anlagen eingesetzt. Darüber hinaus gibt es noch verschiedene Smart-Home Produkte, die intelligente Steuerungsmöglichkeiten für den Haushaltsbereich zur Verfügung stellen und dabei auch auf Wetter- oder Strahlungsdaten aus

¹⁷ Siehe [16]

¹⁸ Siehe [17]

¹⁹ Siehe <http://www.ecis.eu/>

dem Internet zurückgreifen²⁰. Auch Konzern wie Google oder Amazon sind mit speziellen Produkten (Google Home Hub, Amazon Echo) in den Markt eingetreten. Viele dieser Lösungen berücksichtigen die Kundenbedürfnisse jedoch nur unzureichend.

Die in SENDER entwickelten Lösungen werden über diesen Stand der Technik hinausgehen. Durch den Co-Creation-Prozess werden potentielle Kunden in den Entwicklungs- und Spezifikationsprozess miteingebunden. Dadurch sollen die entwickelten Lösungen die Kundenbedürfnisse in besonderer Weise widerspiegeln. Aus Sicht der Datennutzung stellen die lokale Erzeugungs- und Verbrauchsprognose mittels probabilistischem Ansatz sowie die Nutzung von Sensordaten mittels KI zwei Kerninnovationen dar. Eine weitere Besonderheit ist das breite Einsatzgebiet der entwickelten Anwendungen. Während derzeit verfügbare „Insellösungen“ zumeist nur für einen Zweck verwendet werden können (z.B. Home-Security, Home-Automation oder Energiemanagement) deckt SENDER eine Reihe von Anwendungen (z.B. DR, V2G, Home Convenience, Home Security, etc.) ab. Durch die Einbettung von DR in dieses Bündel an Services, kann auch die langfristige Nutzung durch die Verbraucher unterstützt werden. Ein weiterer Vorteil der SENDER Lösung besteht darin, dass diese die Errichtung „echter“ Energiegemeinschaften ermöglicht. Während derzeit verfügbare Produkte für den Massenmarkt entwickelt wurden und lediglich die Errichtung von Gemeinschaften mit anonymen Anwendern erlauben, können mit der SENDER Lösung lokale Energiegemeinschaften oder Kooperationen errichtet werden. Auch Netzbetreiber und Energieversorger können die SENDER Lösung einsetzen, um Flexibilität lokal zu nutzen²¹ oder Kundentreue lokal zu fördern. Insgesamt hat das Konsortium die 11 folgenden Schüsselanwendungen identifiziert, welche nach Projektende zur weiteren Vermarktung genutzt werden können.

- SENDER Smart Box
- Kontextbezogenes Flexibilitätsmanagement
- Intelligentes Lademanagement für Elektrofahrzeuge
- Methodik zur Definition, Integration und Prüfung der Interoperabilität
- Frontend Anwendungen
- Intelligente Warmwasserbereitung
- Digitaler Zwilling der Haushaltsverbraucher
- Lokale Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen
- Peer-to-Peer Handelssystem
- Virtuelles Labor (VLab)
- Global Plattform für SENDER Anwendungen

7 Regulatorische Rahmenbedingungen für Demand Response und Kundenbeteiligung

Im nun folgenden Abschnitt werden die Zwischenergebnisse aus der Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen für Demand Response und eine aktive Beteiligung von

²⁰ Ein Beispiel für diese Produktkategorie ist die Anwendung Sunny Home Manager.

²¹ Siehe z. B. die gemeinsame Zusammenarbeit des deutschen Übertragungsnetzbetreibers Tennet mit Sonnen auf diesem Gebiet (<https://www.tennet.eu/news/detail/europe-s-first-blockchain-project-to-stabilize-the-power-grid-launches-tennet-and-sonnen-expect-res/>)

Endkunden am Strommarkt dargestellt. Ziel ist es, die für die praktische Umsetzung der SENDER Lösungen relevanten Rechtsakte und Bestimmungen zu identifizieren. In einem nachgelagerten Schritt, welcher sich derzeit noch in der Ausarbeitung befindet, wird basierend auf den hier dargestellten Rahmenbedingungen die rechtskonforme Umsetzung der Pilotprojekte vorab geprüft werden.

7.1 Energierecht

Die regulatorischen Rahmbedingungen des Projekts ergeben sich durch das vielschichtige Zusammenspiel nationaler und EU-rechtlicher Bestimmungen. Insbesondere das letzte EU-Energierechtspakt „Saubere Energie für alle Europäer“ enthält konkrete Zielvorgaben und Vorschriften für die Integration von DR-Marktteilnehmern in den gesamten europäischen Energiebinnenmarkt. Diese Integration hat unter Berücksichtigung marktwirtschaftlicher und wettbewerbsrechtlicher Prinzipien die Gleichbehandlung und Nicht-Diskriminierung aller Marktteilnehmer zu beachten, Transparenz sicherzustellen sowie die Erreichung des energiepolitischen Zieldreiecks aus Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit zu fördern.

Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Vorgaben der Elektrizitätsbinnenmarktverordnung sowie der nationalen Umsetzungen der Elektrizitätsbinnenmarktrichtlinie [RL (EU) 2019/944] zu richten, wobei auch andere relevante EU-Rechtsakte sowie deren nationale Umsetzungen für die abschließende Klärung einzelner Detailfragen herangezogen werden müssen.

Erstmalig wird das Konzept von DR im EU-Recht definiert und dadurch auch EU-weit harmonisiert. Artikel 2 Z 20 RL (EU) 2019/944 besagt, dass DR „eine Abweichung der Endkunden-Elektrizitätslast von ihren üblichen oder aktuellen Stromverbrauchsmustern als Reaktion auf Marktsignale, etwa zeitabhängige Strompreise oder Anreizzahlungen, oder als Reaktion auf das angenommene Angebot eines Endkunden, eine Nachfrageverringerung oder -erhöhung zu einem bestimmten Preis auf einem organisierten Elektrizitätsmarkt [...] zu verkaufen, allein oder durch [Aggregation]“. Durch DR soll die Teilnahme und Teilhabe von Verbrauchern am gesamten Elektrizitätsbinnenmarkt und somit auf sämtlichen geeigneten Teilmärkten gefördert und verstärkt werden. Voraussetzung dafür ist eine großflächige Ausrollung von geeigneter technischer Infrastruktur sowie die Schaffung von Möglichkeiten von Einzelpersonen und Aggregatoren als Marktteilnehmern auf den unterschiedlichen Elektrizitätsmärkten aktiv zu werden (Artikel 17 Abs 1 RL (EU) 2019/944). Maßgeblich dafür sind die in den jeweiligen Ländern geltenden Marktregeln, die die Rolle von Aggregatoren und so genannten „aktiven Kunden“ in Zusammenhang mit DR definieren. Dafür sollen, insbesondere für die neu geschaffene Rolle von Aggregatoren, nationale Regelungsrahmen geschaffen werden, die mindestens folgende Elemente enthalten (Artikel 17 Abs 3 RL (EU) 2019/944):

- Recht für (unabhängige) Aggregatoren auf Zutritt zu Elektrizitätsmärkten – ohne Zustimmung anderer Marktteilnehmer;
- Diskriminierungsfreie und transparente Aufgaben und Zuständigkeiten aller Elektrizitätsunternehmen und Kunden;
- Diskriminierungsfreie und transparente Regeln und Verfahren für den Datenaustausch, die den Schutz wirtschaftlich sensibler Informationen und der personenbezogenen Daten der Kunden sicherstellen;
- Übernahme der finanziellen Verantwortung durch die Aggregatoren für die im Stromnetz verursachten Ungleichgewichte;

- Diskriminierungsverbot für Kunden die Verträge mit unabhängigen Aggregatoren abgeschlossen haben;
- Streitbeilegungsmechanismus.

Im Rahmen der Überarbeitung der Marktregeln muss sichergestellt werden, dass die Teilnahme an den jeweiligen Elektrizitätsmärkten, insbesondere für Regelenergie, auch für DR technisch und rechtlich möglich ist. Zusätzlich ist sicherzustellen, dass es weder für Anbieter von DR noch für die Verbraucher zu Mehrkosten oder -aufwand kommt, wobei es jedoch auch zu keiner Bevorzugung von DR kommen darf und Kosten, die durch die Aktivierung von DR entstehen, auszugleichen sind [Artikel 17 Abs 4 RL (EU) 2019/944]. Diesbezüglich sind auch die jeweiligen Tarife oder Methoden von den nationalen Regulierungsbehörden zu überprüfen.

7.2 Verbraucher- und Datenschutzrecht

Von besonderer Bedeutung ist, neben den energierechtlichen Rahmenbedingungen, auch der vertragliche Rahmen, der derartigen Geschäftsmodellen zugrunden liegt. Dabei sind insbesondere verbraucherschutzrechtliche als auch datenschutzrechtliche Vorgaben zu berücksichtigen, da durch die Einbindung zusätzlicher Marktteilnehmer auch zusätzliche Vertragsbeziehungen und Datenflüsse entstehen. Dabei ist insbesondere auf eine ausreichende, kostenfreie, regelmäßige und klar verständliche Information der Verbraucher zu achten.

Soweit die Verarbeitung personenbezogener Daten ein Kernaspekt von SENDER ist, indem Daten zur Identifizierung von Verhaltensmustern von Einzelpersonen, z. B. von Teilnehmern an Pilotprojekten, erhoben werden, müssen datenschutzrechtliche Grundsätze in sämtlichen Anwendungen beachtet und diese jeweils einer kritischen Prüfung unterzogen werden. Es ist sicherzustellen, dass Verbrauchdaten unter Kontrolle der Nutzer verarbeitet und nicht ohne weiteres mit direktem oder indirektem Personenbezug an Dritte übermittelt werden.

Überdies ist zu gewährleisten, dass technische und organisatorische Maßnahmen nach dem jeweils aktuellen Stand der Technik implementiert werden, die die Vertraulichkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Transparenz bei der Verarbeitung aller relevanten Verbrauchs- oder Steuerungsdaten sicherstellen. Hierzu gehören insbesondere geeignete Verschlüsselungstechnologien. Die Anforderungen an den technischen Datenschutz sowie die IT-Sicherheit muss jedenfalls der Sensitivität der Daten und den zu erwartenden Missbrauchsrisiken Rechnung tragen.

7.3 Europäische und nationale Dimension

Wie eingangs erwähnt, sind für die Prüfung der regulatorischen Anforderungen in den Pilotprojekten die nationalen Rechtsvorschriften zu berücksichtigen. Die europäische Rechtssetzung richtet sich lediglich an die nationalen Gesetzgeber und definiert die groben Rahmenbedingungen für eine effiziente Integration von DR in den Strommarkt. Die Umsetzung in den Mitgliedsstaaten erfolgt durch die jeweiligen Gesetzgeber und kann sich auf Grund nationaler Besonderheiten, wie unterschiedlichen Kompetenzverteilungen oder abweichenden Marktregeln und Bestimmungen zum Teil sehr deutlich unterscheiden. Die Prüfung der Rechtskonformität in der Umsetzung hat daher immer unter Berücksichtigung der nationalen Vorgaben zu erfolgen und ist für jede Pilotregion separat durchzuführen.

8 Ergebnis und Schlussfolgerungen

SENDER ist ein Demonstrations- und Systementwicklungsprojekt in dem neue und intelligente Lösungen zur Bereitstellung sauberer Energie für Verbraucher entwickelt werden sollen. Der Fokus des Projekts liegt auf der aktiven Einbindung von Haushaltskunden in den Strommarkt, so dass diese ihr verfügbares Flexibilitätspotential dem Markt zur Verfügung stellen. Um sicherzustellen, dass dies auch langfristig der Fall ist, werden in einem Co-Creation Prozess gemeinsam mit den Kunden neue Services und Dienstleistungen entwickelt, die einen nachhaltigen Mehrwert stiften. Dies können einerseits energiebezogene aber auch darüber-hinausgehende Anwendungen wie Gebäudeschutz mittels Bewegungssensoren oder Assisted-Living Lösungen sein. Durch die längerfristige Nutzung dieser Services bleibt auch die Flexibilität der Kunden längerfristig verfügbar. Damit adressiert das Projekt einen der wesentlichsten Probleme in der aktiven Einbindung von Haushaltskunden in den Strommarkt. Auf Grund des Umstands, dass sich das Projekt noch in einer sehr frühen Phase befindet, liegen noch keine abschließenden Ergebnisse vor.

Ein weiterer Aspekt, welcher in Rahmen des Projekts intensiv untersucht wird, sind die regulatorischen Rahmenbedingungen für die Umsetzung der Lösungen in den Pilotprojekten. Wie die hier präsentierten Zwischenergebnisse zeigen, spielen neben den energierechtlichen Vorgaben auch verbraucher- und datenschutzrechtliche Themen eine wichtige Rolle. Da vor allem im Energierecht viele Vorgaben einer nationalen Umsetzung bedürfen und sich von Mitgliedsland zu Mitgliedsland deutlich unterscheiden können, ist allenfalls eine detaillierte Überprüfung der regulatorischen Rahmenbedingungen auf nationaler Ebene erforderlich. Diese wird in einem nächsten Schritt gemeinsam mit den Projektpartnern in den Pilotregionen erfolgen.

9 Literatur

- [1] H. Saele and O. S. Grande, "Demand Response From Household Customers: Experiences From a Pilot Study in Norway", in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 102-109, March 2011, doi: 10.1109/TSG.2010.2104165
- [2] D. Torstensson and F. Wallin, "Potential and Barriers for Demand Response at Household Customers", in *Energy Procedia*, Volume 75, 2015, Pages 1189-1196, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.570>
- [3] M. Frondel and D. Kussel, "Switching on Electricity Demand Response: Evidence for German Households", in *Ruhr Economic Papers* #763, 2018, ISSN 1864-4872
- [4] J. Andruszkiewicz, J. Lorenc, A. Weychan, "Demand Price Elasticity of Residential Electricity Consumers with Zonal Tariff Settlement Based on Their Load Profiles", in *Energies*, vol.12, no. 22: 4317, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12224317>
- [5] E. G. Carayannis and D. F. Campbell, "Triple Helix, Quadruple Helix and Quintuple Helix and how do knowledge, innovation and the environment relate to each other: a proposed framework for a trans-disciplinary analysis of sustainable development and social ecology", in *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, vol. 1, no. 1, pp.41-69, Januar 2010, doi: 10.4018/jsesd.2010010105
- [6] H. Etzkowitz and L. Leydesdorff, "The Dynamics of Innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of University-Industry-Government Relations", in *Research Policy*, vol. 29, no. 2, pp. 109–123, Februar 2000, doi:10.1016/S0048-7333(99)00055-4

- [7] C. Finck, J. Clauß, P. Vogler-Finck, P. Beagon, K. Zhang, H. Kazmi: "Review of applied and tested control possibilities for energy flexibility in buildings," in *IEA EBC Annex 67*, 2018.
- [8] J. Lizana, R. Chacartegui, A. Barrios-Padura, J.M. Valverde: "Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review," in *Applied Energy*, vol. 203, pp. 219–239, 2017.
- [9] "Energy Conservation through Energy Storage | IEA ECES." [Online]: <https://iea-eces.org/>. [abgerufen: 23.08.2021].
- [10] J. Lizana, Y. Barrios-Padura, M. Molina-Huelva, R. Chacartegui: "Multi-criteria assessment for the effective decision management in residential energy retrofitting," in *Energy Build.*, vol. 129, pp. 284–307, Oct. 2016.
- [11] A. Bloess, W. P. Schill, A. Zerrahn: "Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials," in *Applied Energy*, vol. 212, no. August 2017, pp. 1611–1626, 2018.
- [12] C. Goldenberg, M. Dyson, H. Masters: "Demand Flexibility the Key to Enabling a Low-Cost, Low-Carbon Grid Insight Brief," Rocky Mt. Inst., 2018.
- [13] S. Malakuti, J. Schlake, C. Ganz, K. E. Harper, H. Petersen: „Digital Twin: An Enabler for New Business Models.”, in *Automation 2019*, July 2019.
- [14] M. Zhang, Y. Zuo and F. Tao, "Equipment energy consumption management in digital twin shop-floor: A framework and potential applications," *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361272.
- [15] A. Oti, E. Kurul, F. Cheung, J. Tah: "The utilization of BMS in BIM for facility management". in *Proceedings of the 20th CIB World Building Congress - Intelligent Built Environment for Life*, 10.13140/RG.2.2.28538.49601. (2016).
- [16] G. Carrosio, I. Scotti: "The patchy spread of renewables: A socio-territorial perspective on the energy transition process", in *Energy Policy*, Vol. 129, June 2019, S. 684 - 692.
- [17] N. Pidgeon, C. Demski, C. Butler, K. Parkhill, A. Spence: "Creating a national citizen engagement process for energy policy", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 2014 Sep 16; 111 Suppl 4:13606-13. doi: 10.1073/pnas.1317512111.