



VISE

Virtuelles Institut Smart Energy

Policy Brief

Oktober 2019

**Smart Energy in Haushalten:
Technologien, Einstellungen, Wirtschaftlichkeit**

Autoren

Dr. Hawal Shamon, Gianmarco Aniello, Dr. Wilhelm Kuckshinrichs
(Forschungszentrum Jülich)

Tobias Rehm, Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schneiders
(TH Köln)

Ute Paukstadt, Torsten Gollhardt, Prof. Dr. Dr. h.c. Dr. h.c. Jörg Becker
(ERCIS- WWU Münster)

Felix Große-Kreul, Pauline Overath, Aileen Reichmann,
Katja Witte, Dr. Carolin Baedeker, (Wuppertal Institut)

Broghan Helgeson, PD Dr. Dietmar Lindenberger
(EWI)

Kontakt



VISE

Virtuelles Institut Smart Energy

E-Mail: info@smart-energy.nrw

Website: www.smart-energy.nrw

Gefördert durch



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

Smart Energy in Haushalten: Technologien, Einstellungen, Wirtschaftlichkeit

Die Digitalisierung des deutschen Energiesystems wird als eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende gesehen. Insbesondere im Bereich der Elektrizitätsversorgung kann Digitalisierung die Flexibilitätspotenziale, z. B. für das Verteilnetz, steigern. Dafür sollen klassische Energietechnologien (der Erzeugung, Speicherung sowie Verbraucher) mit Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) oder „Internet-of-Things“-Technologien (IoT) zusammenspielen. Auf diese Weise wandelt sich das Energieversorgungssystem von einem unidirektionalem Netz zu einem bidirektionalem Netzwerk (Smart Grid).

Sowohl Energie als auch energiebezogene Informationen können zwischen Verbraucher*innen, Netzbetreibern und Energieerzeugungsanlagen ausgetauscht werden. In diesem Zusammenhang entwickeln Unternehmen neue smarte Produkte¹ und Dienstleistungen² für private Haushalte, z. B. Smart Home Systeme, Energiemanagementsysteme, Smart Meter³ und intelligente Beleuchtungssysteme. Oder sie bieten digitale Dienstleistungen wie die datenbasierte Fernwartung von Photovoltaik-Anlagen an.

Das interdisziplinäre VISE-Forschungsprojekt „*Energienachfrageverhalten von Haushalten*“ (im Folgenden VISE-Haushalte genannt) untersucht vornehmlich Aspekte der Marktreife von ausgewählten smarten Produkten und Dienstleistungen. Ziel ist, die Präferenzen von Haushalten bei der Anschaffungsentscheidung und bei der Nutzung von smarten Produkten und Dienstleistungen zu untersuchen. Dabei werden verschiedene Geschäftsmodellausgestaltungen berücksichtigt.

Im Projekt wurden bereits unterschiedliche Studien durchgeführt: z. B. repräsentative Befragungen von Konsument*innen, eine Wirtschaftlichkeitsanalyse und interaktive Innovationsworkshops.

Das Forschungsprojekt VISE-Haushalte

¹ Unter smarten Produkten werden digitale Technologien zur Messung, Analyse, Steuerung von klassischen Technologien sowie Möglichkeiten der modernen IT- und Kommunikationstechnik (z. B. Datenübertragung, App-Visualisierung) verstanden (Schneiders, T., A. Löschel. 2017. „Wie steht es um Smart Energy? Ergebnispräsentation zur Arbeit, Vorstudie Smart Energy“, Herausgegeben von: Forschungsgruppe Smart Energy. NRW.).

² Unter smarten Dienstleistungen verstehen wir digitale Dienstleistungen, die auf smarten Produkten aufsetzen und aus den analysierten Daten neue Mehrwerte schaffen (vgl. auch Porter, M. E., J. E. Heppelmann. 2014. „How smart, connected products are transforming competition.“ *Harvard Business Review* 1(November), 3–23; Fleisch, E., M. Weinberger und F. Wortmann. 2014. „Geschäftsmodelle im Internet der Dinge.“ *HMD Praxis Der Wirtschaftsinformatik*, 51, 812–826.

³ Ein Smart Meter besteht aus einem intelligentem Messsystem sowie einer Kommunikationsschnittstelle (sogenanntes Smart Meter Gateway). Smart Meter erlauben es, Stromverbrauch in einem Haushalts in 15 Minuten-Werten zu visualisieren. Dadurch kann das Verbrauchsverhalten der Nutzer*innen beeinflusst werden und es können Geschäftsmodelle mithilfe der Verbrauchsdaten angeboten werden (z. B. variable Strompreistarife, Überwachung von Geräten etc.).

Dabei wurden Technologien der Gebäudeautomation (Smart Home⁴) und der Messsysteme (Smart Metering⁵) berücksichtigt, um Rückschlüsse über ausgewählte Aspekte der Marktreife ziehen zu können (siehe Abschnitte 1 & 2). Nachfolgend werden erste Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und anschließend in den Abschnitten 1–5 vertiefend beleuchtet.

Die wissenschaftliche Literatur zu Innovationsprozessen zeigt die zentrale Rolle der Zivilgesellschaft und von Endverbraucher*innen für Marktdiffusionsprozesse auf: So werden im Rahmen von Roadmapping-Ansätzen drei Bereitschafts-Grade (im Original: Readiness Level) als Kriterien für eine erfolgreiche Diffusion definiert:

- Technologische Einsatzbereitschaft: die Technologien müssen in operativen Anwendungen erfolgreich demonstriert sein;
- Regulierungsreife: das regulatorische Umfeld muss so beschaffen sein, dass ein hohes Maß an politischer und gesellschaftlicher Akzeptanz möglich ist;
- Marktreife: die Perspektive und der Bedarf von Nachfragern müssen so adressiert sein, dass die Kundschaft in den Adoptionsprozess eintritt und das Produkt kauft.

Vor diesem Hintergrund werden innovative smarte Produkte und Dienstleistungen, die das Kriterium der technologischen Einsatzbereitschaft erfüllen, sich nur dann im Markt erfolgreich verbreiten, wenn sie auch die Kriterien der Regulierungs- und Marktreife erfüllen. Das heißt, wenn die etwaig zu schaffenden oder zu ändernden regulatorischen Rahmenbedingungen (z. B. Datenschutzbestimmungen) auf Seiten der Zivilgesellschaft auf Akzeptanz stoßen und die Eigenschaften der Produkte und Dienstleistungen sowie deren Geschäftsmodelle im Einklang mit den Präferenzen der Endverbraucher stehen. Folglich lässt sich die technologische Einsatzbereitschaft lediglich als notwendiges Kriterium und die Regulierungs- sowie Marktreife als hinreichendes Kriterium für erfolgreiche Innovationsprozesse verstehen.

WISE-Haushalte identifizierte zunächst grundlegend relevante smarte Technologien für Haushalte. In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die klassischen Energietechnologien in Energieerzeugungsanlagen, Verbraucher und Energiespeicher kategorisiert. Zudem zeigt die Abbildung die Kategorien Messsysteme, Gebäudeautomation und Energiemanagement System, denen digitale Technologien zur Messung, Gebäudeautomation bzw. Steuerung zugeordnet wurden.

**Marktreife und
Marktdiffusion
neuer Techno-
logien**

**Smarte
Technologien für
Haushalte**

⁴ Ein Smart Home ist ein privat genutztes Heim, in dem die zahlreichen Geräte der Hausautomation (z. B. Heizung, Beleuchtung, Belüftung), Haushaltstechnik, Konsumelektronik und Kommunikationseinrichtungen zu smarten Objekten werden, die sich an den Bedürfnissen der Bewohner anpassen (Strese, Seidel, Knape and Botthof, 2010).

⁵ Smart Metering beinhaltet einen elektronischen Stromzähler der mit einer Kommunikationsschnittstelle zum Datenaustausch ausgestattet ist. Es wird auch vom intelligenten Messsystem gesprochen (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. 2018. „Das Smart-Meter-Gateway“, Cyber-Sicherheit für die Digitalisierung der Energiewende).

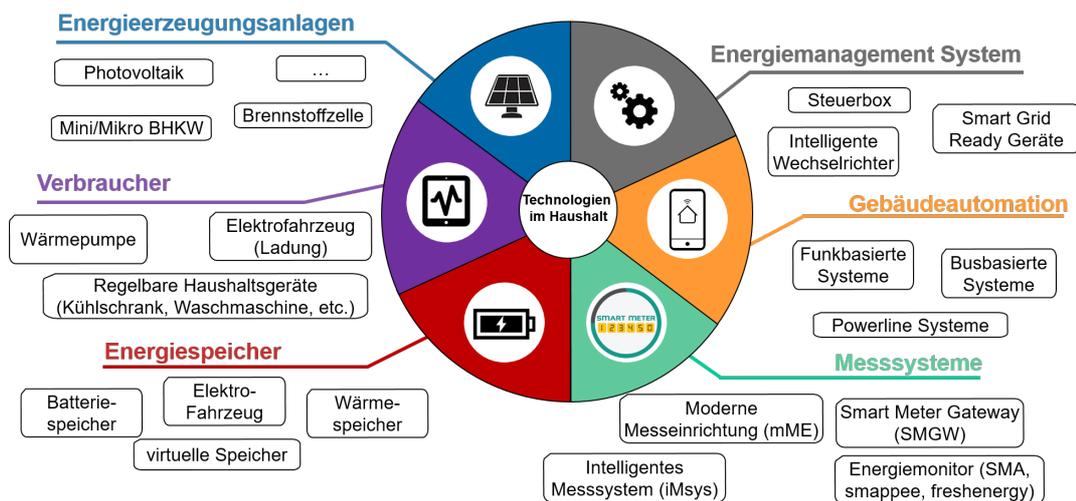


Abbildung 1: Übersichtsgrafik smarte Technologien für Haushalte [Bildquelle: VISE Haushalte].

Da für die Marktreife neben den Eigenschaften von Technologien und Dienstleistungen auch die Ausgestaltung von Geschäftsmodellen von Bedeutung ist, wurde im Rahmen des Projektes eine Taxonomie für gegenwärtige konsumentenzentrierte Geschäftsmodelle im Energiebereich entwickelt (im Folgenden Smart Energy-Geschäftsmodelle genannt). Geschäftsmodelle stellen vereinfacht dar, wie Unternehmen Werte erzeugen und erfassen.⁶ Sie werden als Schablone für die Geschäftslogik verstanden.⁷

**Konsumenten-
zentrierte
Geschäfts-
modelle**

Bei der Entwicklung der Taxonomie wurden sowohl aktuelle Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Literatur als auch praktische Beispiele (vorwiegend Smart Energy-Startups) berücksichtigt. Hierbei werden die vier wesentlichen Geschäftsmodellbausteine abgedeckt: Wertversprechen, Werterzeugung, Wertnetzwerk und Werterfassung. Unternehmen können damit ihre eigenen Geschäftsmodelle besser verstehen und bei Bedarf weiterentwickeln (vgl. Abschnitt 1).

In einer Online-Umfrage mit 700 Mieter*innen und Eigenheimbesitzer*innen in NRW (repräsentativ nach Alter, Geschlecht, Bildung) wurden deren Bedürfnisse und Erwartungen gegenüber Smart Home Technologien erhoben (vgl. Abschnitt 2). Hierfür wurden für die Befragung zwei idealtypische Produkte (sogenannte Smart Offerings⁸), die Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz in Haushalten bieten, beschrieben und durch die Befragten bewertet. Unter anderem geht aus den ersten Analysen hervor, dass auf

**Einstellungen zu
Smart Home**

⁶ Osterwalder, A. 2004. "The Business Model Ontology - A Proposition in a Design Science Approach", *Dissertation*.

⁷ Shafer, S.M., H.J. Smith, and J.C. Linder. 2005. "The power of business models", *Business Horizons* 48(3), 199–207.

⁸ Unter einem Smart Offering verstehen wir das Wertversprechen, welches ein Unternehmen einem Kunden in Form von smarten Produkten und Dienstleistungen anbietet. Beispielweise können Kunden durch den Betrieb eines Smart Home-Systems mehr Komfort erfahren als ohne ein solches System. Beispielweise können Kunden durch den Betrieb eines Smart Home-Systems mehr Komfort erfahren als ohne ein solches System.

Seiten der Befragungsteilnehmenden überraschend wenig Berührungsängste mit solchen neuen Technologien bestehen. Allerdings zeigt sich auch, dass die Affinität für Technologien zur Reduktion von Energieverbräuchen deutlich geringer ausfällt, als die Affinität für Smart Home Anwendungen im Bereich Sicherheit, Gesundheit und Komfort. Ergänzend zu der quantitativen Befragung wurden bereits erste Innovationsworkshops mit spezifischen Stakeholdergruppen durchgeführt. Sie bieten spannende Einblicke und zeigen auch auf, wie vielfältig die Anforderungen an Smart Home Technologien und Dienstleistungen sind, wenn sie Bedarfsgerecht entwickelt werden sollen (vgl. Abschnitt 3).

Zudem ermittelte VISE-Haushalte die Wirtschaftlichkeit von Technologien zur Erzeugung, Speicherung und dem gesteuerten Verbrauch von Haushaltskomponenten. Dabei wurden grundsätzlich auch nutzerorientierte Features der Systeme, z. B. Visualisierung der Verbräuche und die Überwachung des Nutzverhaltens, berücksichtigt. In einer Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde die Rentabilität einer Photovoltaik-Anlage (im Folgenden PV-Anlage genannt) ohne bzw. mit Batteriespeichersystem für vier verschiedene Haushaltstypen und unter aktuellen Rahmenbedingungen ermittelt (vgl. Abschnitt 4). Hierbei zeigte sich unter anderem, dass sich zum derzeitigen Stand der Erwerb einer PV-Anlage (4.72 kWp) insbesondere für Mehrpersonenhaushalte rentiert, in denen einzelne Haushaltsmitglieder über den gesamten Tag anwesend sind. Für alle vier verschiedenen Haushaltstypen zeigte sich zudem, dass eine zusätzliche Investition in einen Batteriespeicher (3.3 kWh) die Rendite verringert.

Letztlich wurden im Projekt mit Hilfe des EWI-Modells „Consumer Management of Decentralized Options“ (COMODO) die zukünftige Diffusion dezentraler Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen mit Hilfe von Szenarien abgeschätzt. COMODO bestimmt das private wirtschaftliche Optimum von privaten Haushalten bei der Deckung seines Strom- und Wärmebedarfs durch eine Investitions- und Einsatzsimulation. Hierbei zeigte sich unter anderem, dass Technologien wie Mikro-KWK ein großes Potenzial für Einfamilienhäuser haben, um ihren Strom sowie Wärme für den Eigenverbrauch selbst zu produzieren. Mittelfristig kann eine Investition in Richtung einer energie-autarken Versorgung für bestimmte Verbrauchertypen lohnenswert sein, wenn Wärme- und Stromerzeugung gekoppelt werden. Um solche Optimierungen in der Realität zu ermöglichen, ist die Marktdiffusion von Energiemanagement- und Messsystemen eine wesentliche Voraussetzung (vgl. Abschnitt 3).

Die Zwischenergebnisse von VISE-Haushalte weisen auf Potenziale hin, wie die Marktdiffusion von Smarten Technologien für die Energiewende unterstützt werden könnte. Ko-Benefits wie Sicherheit und Gesundheit könnten die Diffusion von Smart Homes beschleunigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Affinität von Endverbraucher*innen für Smart Home Anwendungen, die letztlich den Energieverbrauch steigern, deutlich höher ist, als die Affinität

Wirtschaftlichkeit dezentraler Erzeugung und Speicherung im Eigenheim am Beispiel von PV & Batteriespeichern

Abschätzung zur zukünftigen Diffusion von Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen

Fazit & Ausblick

für verbrauchsreduzierende Anwendungen. Dies könnte negative Auswirkungen auf die Energiewende haben. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse suggeriert, dass derzeit keine finanziellen Anreize bestehen, Batteriespeicher als Ergänzung zu PV-Anlagen zu nutzen. Falls dezentrale Speicher auf Haushaltsebene zukünftig als systemdienliche Flexibilitätsoption benötigt werden, könnten Rahmenbedingungen angepasst werden, um die Diffusion von Batteriespeichern zu unterstützen. Die weiterführenden Szenarien des EWI-Modells weisen ferner darauf hin, dass Technologien wie Mikro-KWK zukünftig großes Potenzial für Einfamilienhäuser bieten, Eigenstrom sowie Wärme zu erzeugen. Mittelfristig können Investitionen in Richtung einer energie-autarken Versorgung für bestimmte Verbrauchertypen potenziell lohnenswert sein – allerdings nur in Kombination mit gekoppelter Wärme- und Stromerzeugung. Das Technologiescreening sowie die Smart Energy-Geschäftsmodell-taxonomie können Marktakteure dabei unterstützen, Smarte Produkte und Geschäftsmodelle weiterzuentwickeln. Ausführlichere Darstellungen der Studien und Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten aufgezeigt.

1 Smart Energy Geschäftsmodelle verstehen, vergleichen und entwickeln

Die Digitalisierung des Energiesektors bietet völlig neue Möglichkeiten, aber auch Herausforderungen für die Akteure innerhalb dieser Domäne. Vorstellbar ist, dass Stadtwerke in Zukunft keine eigenen Energieerzeugungsanlagen mehr betreiben, weil Verbraucher selbst Strom erzeugen und bei Überschuss diesen Strom an andere Verbraucher verkaufen. Die Stadtwerke könnten in diesem Szenario bspw. als Betreiber einer Plattform agieren, über welche die Verbraucher den Strom austauschen können.

Auf Grund der Zunahme dezentraler, nachhaltiger Energieerzeugungsanlagen (z. B. Windkraftanlagen) entsteht ein erhöhter Bedarf an Netzstabilität, die durch Flexibilität sichergestellt werden kann. Hier können Kunden zusätzliche Einnahmen generieren, indem sie ihren Energiegebrauch dem aktuellen Zustand des Stromnetzes anpassen; also Flexibilität gegen einen monetären Mehrwert tauschen. Diese Entwicklung verändert traditionelle Marktmechanismen des Energieversorgungssystems und führt zu einer neuen Rollenverteilung, innerhalb derer sich neue Geschäftsmodelle entwickeln werden.

Wie bereits einleitend beschrieben, stellen Geschäftsmodelle vereinfacht dar, wie Unternehmen Werte erzeugen und erfassen. Diese Modelle können somit als Schablone für die Geschäftslogik verstanden werden. Um Smart Energy-Geschäftsmodelle für Haushalte besser verstehen zu können, wurde im Rahmen des Projektes eine Taxonomie für konsumentenzentrierte Geschäftsmodelle entwickelt.

	Dimension	Merkmale				
Wert- versprechen	Angebot	Nur digitaler Service		Digitaler und physischer Service		Intelligentes Produkt-Service-System
	Monetärer Wert	Kosteneinsparung		Zusätzliche Einnahmen		Kein monetärer Wert
	Kundensegment	Verbraucher		Prosumer		Community
Wert- erzeugung	Kundenbeitrag zum Netz	Flexibilität			Kein Beitrag	
	Technologischer Zweck	Produktions-/ Versorgungsorientiert		Verbrauchsorientiert		Integrationsorientiert
	Produkteigentum	Kunde	Fokales Unternehmen	Drittpartei	Verteilt	Nicht relevant
Wert- netzwerk	Digitale Plattform	Betrieb	Beteiligung		Betrieb und Beteiligung	Keine Plattform
	Geschäftspartnerschaft	Kooperation			Eigenständig	
Wert- erf.	Einnahmequelle	Transaktion	Abonnement		Hybrid	Unbekannt

Abbildung 2. Smart Energy-Geschäftsmodelltaxonomie für Haushalte (Werterf. = Werterfassung).⁹

Diese Taxonomie kann als Baukasten verstanden werden, um Smart Energy-Geschäftsmodelle zu analysieren, vergleichen und entwickeln. Bei der Entwicklung der Taxonomie wurden sowohl aktuelle Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Literatur als auch praktische Beispiele (vorwiegend Smart Energy-Startups) berücksichtigt. Die Taxonomie besteht aus neun Dimensionen, welche die vier wesentlichen Geschäftsmodellbausteine abdecken. Jede Dimension hat unterschiedliche Ausprägungen, mit denen Smart Energy-Geschäftsmodelle (re-)konfiguriert werden können. Unternehmen können damit ihre eigenen Geschäftsmodelle besser verstehen und bei Bedarf weiterentwickeln.

Um einen aktuellen Überblick über die Marktsituation zu bekommen, wurden im Zeitraum von Juli 2018 bis März 2019 175 Unternehmen aus dem Energiesektor hinsichtlich ihres Angebotes von Smart Energy-Geschäftsmodellen für private Haushalte analysiert. Neben allgemeinen Firmendaten wie Anzahl der Mitarbeitenden und Gründungsjahr, wurden Typisierungen der Unternehmen selbst und eine Analyse ihrer Geschäftsmodelle für private Haushalte durchgeführt. Zudem wurden aus der Marktanalyse Geschäftsmodellmuster abgeleitet. Diese Muster unterteilen sich einerseits in Business-to-Consumer (B2C) und Business-to-Business-to-Consumer (B2B2C), also die Unterscheidung, ob ein Unternehmen ein Wertversprechen direkt für Endverbraucher*innen anbietet oder indirekt über ein anderes Unternehmen Endverbraucher*innen adressiert. Andererseits werden produkt- und serviceorientierte Geschäftsmodelle unterschieden. Interessanterweise dominieren bei den B2C-Anbietern produktorientierte Geschäftsmodelle, während im B2B2C-Bereich eher serviceorientierte Geschäftsmodelle angeboten werden.

⁹ Paukstadt, U., Gollhardt, T., Blarr, M., Chasin, F., Becker, J. 2019. "A Consumer-oriented Smart Energy Business Model Taxonomy". In: Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems. Stockholm and Uppsala, Sweden.

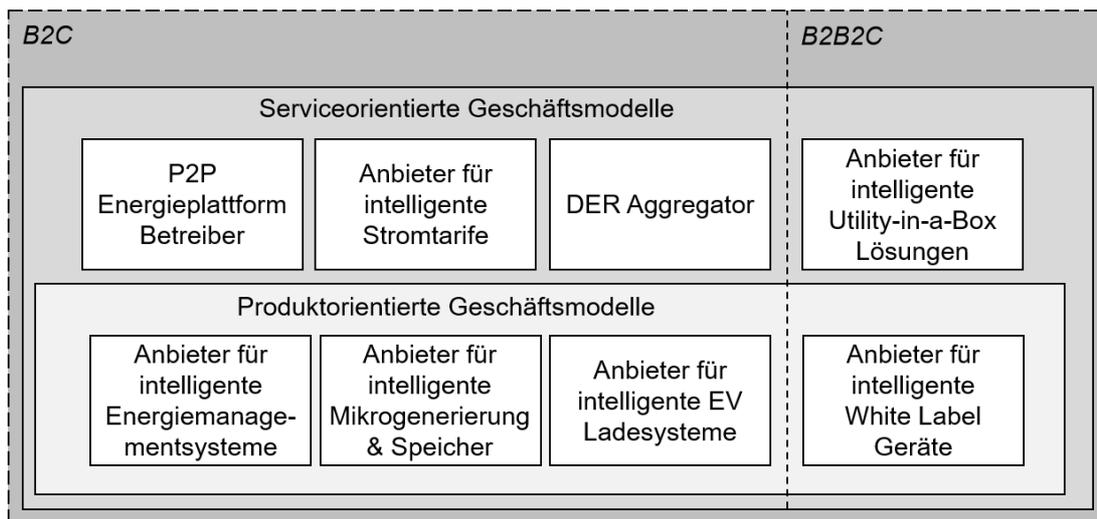


Abbildung 3. Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen (P2P = Peer-to-Peer; DER = Decentralized Energy Resources; EV = Electric Vehicle) (eigene Abbildung).

Die entwickelte Taxonomie und die Archetypen dienen als Grundlage für eine musterbasierte Geschäftsmodellinnovation, die in Form von Workshops mit verschiedenen Stakeholdern aus der Energiewirtschaft durchgeführt werden sollen.

2 Das Smart Home – Einstellungen und Ko-Benefits

Ein dynamisches Geschäftsfeld für die Energiewirtschaft sind Smart Home Anwendungen: Bei noch geringer Marktdiffusion werden deutliche Wachstumspotenziale gesehen.¹⁰ Dabei ist eine große Bandbreite an Geschäftsmodellinnovationen denkbar. Aber welche Bedürfnisse und Erwartungen haben Konsument*innen gegenüber Smart Home Technologien? Und welche Anwendungsfelder wecken das Interesse, ein Smart Home einzurichten?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde in diesem Projekt eine Online-Umfrage mit 700 Mieter*innen und Eigenheimbesitzer*innen in NRW durchgeführt (repräsentativ nach Alter, Geschlecht, Bildung). Untersucht werden Ko-Benefits, unterschiedliche Erwartungshaltungen, soziale Einflüsse und Einstellungen zum Smart Home. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, in welche Richtung sich die Smart Home Technologien entwickeln könnten. Das Befragungsdesign wurde unter der Annahme entwickelt, dass bei vielen Personen keine oder nur geringe Kenntnisse über die diversen Funktionsmöglichkeiten von Smart Home Anwendungen bestehen.¹¹

¹⁰ BMWi. 2017. "Sachstandsbericht zur Marktentwicklung in der intelligenten Heimvernetzung". Bericht 1/2017; Statista. 2018. Smart Home Report 2019 – Control and Connectivity.

¹¹ Die Annahme wurde bestätigt, da 56,1% der Befragten angeben, sich noch nicht mit Smart Home beschäftigt zu haben.

Aufgrund der Vielfältigkeit an Funktionen und der damit einhergehenden Komplexität wurden für die Befragung zwei idealtypische Produkte, sogenannte Smart Offerings, beschrieben und durch die befragten Personen bewertet. Beide Smart Offerings bieten Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz in Haushalten. Jeweils die Hälfte der befragten Personen beantwortete Fragen zu einem Smart Home Heizungspaket (im Folgenden „Smarte Heizung“) und die andere Gruppe zu einem Smart Meter Paket (im Folgenden „Smart Meter“). Dabei zeigt sich, dass überraschend wenig Berührungsängste mit Smart Home Technologien bestehen:

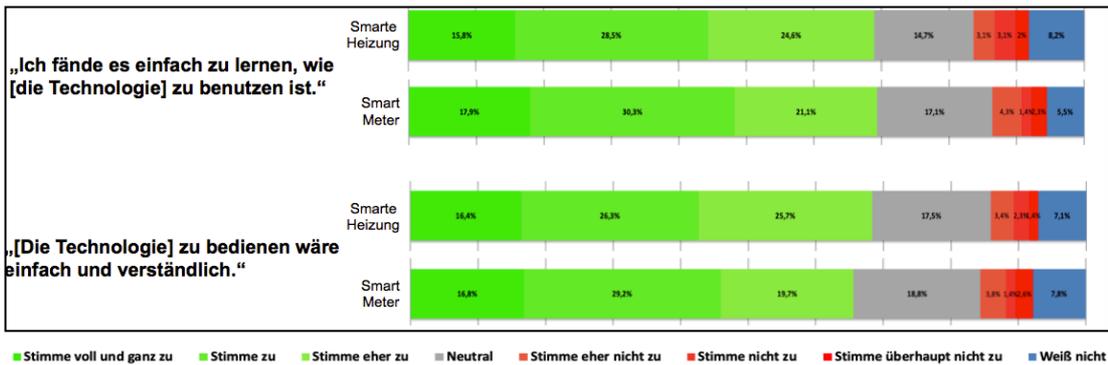


Abbildung 4. Erwarteter Aufwand für die Nutzung von Smart Home (eigene Darstellung).

Trotz mehrheitlich geringer Berührungsängste scheint die Affinität, das jeweilige Smart Offering nutzen zu möchten, sehr unterschiedlich ausgeprägt: 17,5% der befragten Personen sind sich sicher, in Zukunft Smarte Heizungen nutzen zu möchten und 20,2%, sind sicher, künftig Smart Meter zu nutzen („Stimme voll und ganz zu“ + „Stimme zu“). Dagegen stehen 27,4% bzw. 18,8%, die klare Ablehnung äußern („Stimme überhaupt nicht zu“ + „Stimme nicht zu“):

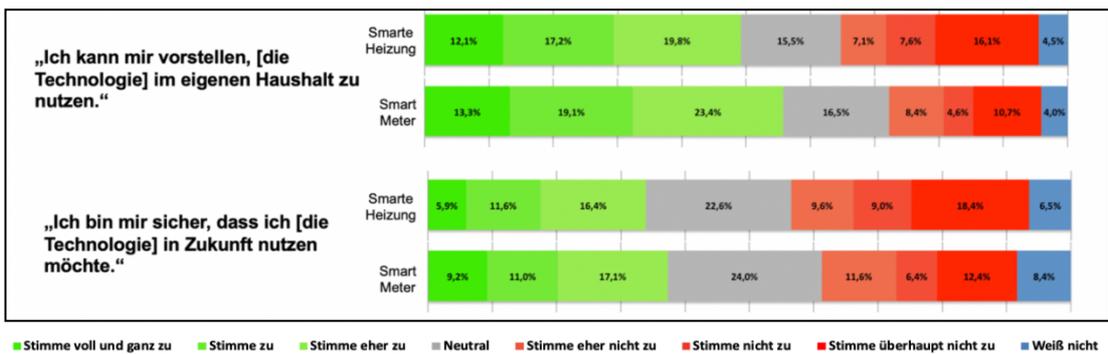


Abbildung 5. Nutzungsintention der Smart Offerings. (eigene Darstellung).

Die Affinität für die beiden Smart Offerings ist insbesondere gering, wenn sie mit der Affinität für Smart Home Funktionen im Bereich Sicherheit, Gesundheit und Komfort verglichen wird.

Diese Ko-Benefits weisen in der Beurteilung durch die Befragten klare mehrheitliche Zustimmung auf, wie die folgende Grafik zum Ko-Benefit „Gesundheit“ verdeutlicht:

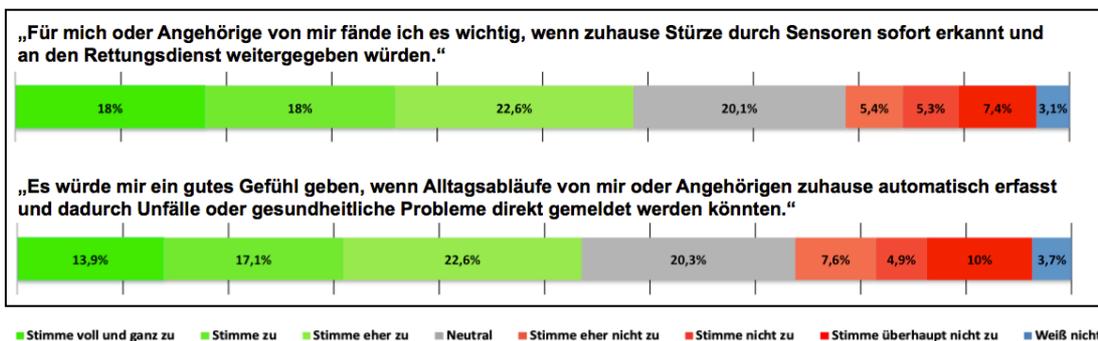


Abbildung 6. Affinität zum Ko-Benefit „Gesundheit“ (eigene Darstellung).

Noch ausgeprägter ist die Affinität zu den beschriebenen Sicherheitsfunktionen – die allerdings nicht mit der Erfassung von Alltagsabläufen einhergehen, wie im Gesundheitsbereich. Auch hier zeigt sich mehrheitlich klare Zustimmung, dass solche Anwendungen nützlich seien und sie das eigene Sicherheitsgefühl erhöhten:

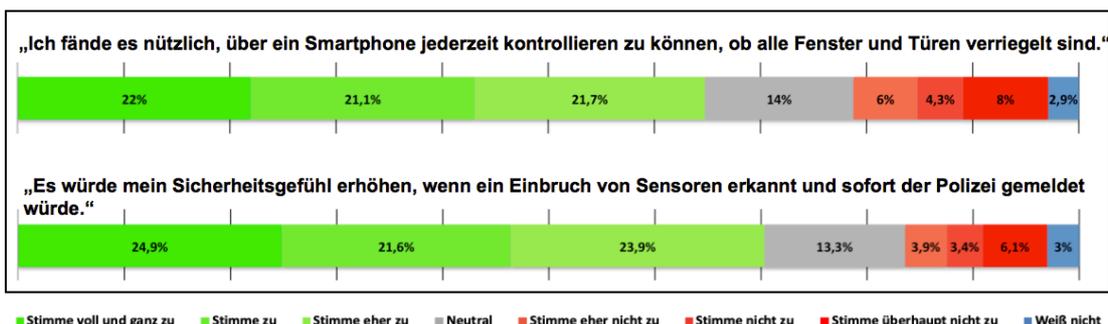


Abbildung 7. Affinität zum Ko-Benefit „Sicherheit“ (eigene Darstellung).

Diese Ergebnisse bieten erste Ansatzpunkte dafür, wie sich Smart Home weiter entwickeln kann und welche Pakete aus Sicht der Konsumenten künftig erfolgreich werden könnten. Die aufgeführten Ko-Benefits könnten für die Marktdiffusion von Smart Home eine wichtige Rolle spielen. Bei den Smart Offerings für Energieeffizienz scheint eher Skepsis angebracht, ob eine durch Konsument*innen getriebene Marktdiffusion zu erwarten ist. Aber welche Rolle könnten z. B. Einstellungen zur Umwelt, Datensicherheit oder soziale Einflüsse spielen? Die weitere Datenanalyse im Rahmen des Projekts soll dafür fundierte Erkenntnisse liefern.

3 Erste Ergebnisse der Innovationsworkshops zu Bedarfen, Ko-Benefits und Hemmnissen von Smart Home Technologien

Im Rahmen des Projektes werden qualitative Innovationsworkshops mit Vertreter*innen der Wirtschaft und Wissenschaft und potenziellen sowie teils tatsächlichen Nutzer*innen durchgeführt, die zum Ziel haben, mögliche Ko-Benefits auf angewandte Smart Home Systeme zu übersetzen und Bedarfe für zukünftige Nutzer*innen zu ermitteln.

Neben einem Workshop mit Meisterschülern der HWK Köln aus dem Fachbereich der Elektrotechnik wird ein Stakeholder-Workshop mit Vertreter*innen der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft durchgeführt. An dieser Stelle ist zu betonen, dass im Gegensatz zur repräsentativen Befragung bei den bisherigen Workshops mit Personengruppen gearbeitet wurde, die sich sowohl privat als auch beruflich mit Fragen der Energieeffizienz befassen, womit der Fokus beider Veranstaltungen sehr auf der Einsparung von Energie und umweltbezogenen Aspekten liegt. Ein weiterer Workshop ist mit Verbraucher*innen (mit und ohne Vorwissen über Smart Home Systeme) in Dorsten geplant. Innerhalb der Workshops werden Fragestellungen zur Akzeptanz und den Ko-Benefits einer Digitalisierung von Infrastrukturen im Energiesystem diskutiert. Neben der Entwicklung von Ko-Benefits erarbeiten die Teilnehmenden in den Innovationsworkshops, welche Zusatznutzen (z. B. Zeitersparnis) von smarten Technologien und Dienstleistungen gewünscht sind sowie mögliche Barrieren und Hemmnisse bzgl. der Anschaffung und Nutzung für Verbraucher*innen. Hierfür entwerfen die Teilnehmenden zunächst fiktive Nutzer*innen (sogenannte Persona), für die die Teilnehmenden im Anschluss erarbeiten, welche Eigenschaften ein Smart Home System für eine energieeffiziente und verbrauchergerechte Nutzung haben muss. Die Einbindung von Teilnehmenden mit unterschiedlichen beruflichen und soziodemografischen Hintergründe ermöglicht die Generierung vieler Ergebnisse und neuer Blickwinkel auf das Forschungsthema. Im Folgenden werden die bisher wichtigsten Ergebnisse aufgeführt.

In der ersten Diskussionsrunde diskutierten die Teilnehmenden mögliche Bedarfe und Ko-Benefits, die potenziellen Nutzer*innen bei Smart Home Systemen wichtig sein könnten. Dabei konnte festgestellt werden, dass für die Teilnehmenden Aspekte der Energieeffizienz besonders von Bedeutung sind (z. B. in Bezug auf das Heizen sowie den Stromverbrauch). Des Weiteren wurde auch die Sicherheit im Gebäude (Schutz vor Einbrüchen & Maßnahmen zum Brandschutz) als sehr wichtig erachtet sowie die Verlässlichkeit des Systems bei Hackerangriffen. Es wurden außerdem Bedenken zum Design der Systeme geäußert.

In beiden Workshops wurde verstärkt der Wunsch nach einer Modularität des Systems geäußert. Die Teilnehmenden stellen sich darunter ein Grundmodell vor, das die Basisfunktionen eines Smart Home Systems enthält, sich nach den individuellen Wünschen und Bedürfnissen der Bewohner*innen richtet und dahingehend ohne großen Aufwand und Kosten erweitert werden kann. Bei der Priorisierung wichtiger Aspekte wurden besonders oft die Themen Datensicherheit und Transparenz gewählt. Aus Sicht der Teilnehmenden ist es für die Konsument*innen wichtig zu wissen, was mit ihren Daten passiert und vor allem soll gewährleistet werden, dass es nicht zu einem Missbrauch der Daten (kriminell oder werbedienlich) kommt. Als weiterer Bedarf wurde in den Workshops der Wunsch nach einem Lernenden System (Künstliche Intelligenz) geäußert, das Veränderungen im Alltag der Bewohner*innen erfasst und sich an neue Gewohnheiten anpasst. Zudem ist es aus Sicht der Verbraucher*innen wünschenswert, dass sich das System per Smartphone oder Tablet (fern-)steuern lässt und eine Abfrage der Systeminformationen von unterwegs möglich macht. Als eine der größten Barrieren in Bezug auf die Nutzung von Smart Home Systemen wurde beim Stakeholderworkshop die Angst vor Rebound-Effekten und damit einhergehend einem zusätzlichen Energieverbrauch genannt. Auch die Verlässlichkeit des Systems, die Schnittstellenkompatibilität, evtl. hohe Kosten und ein hoher Ressourcenverbrauch sind Punkte, die aus Sicht der Teilnehmenden bei den Verbraucher*innen zu Bedenken führen.

Um individuelle Bedürfnisse stärker in den Vordergrund zu rücken, haben die Teilnehmenden beider Workshops anhand der Personas „Urbaner Single-Haushalt“ und „Familie am Stadtrand“ Smart Home Systeme entwickelt, die auf die Bedürfnisse einer bestimmten Zielgruppe zugeschnitten wurden. Beim Stakeholderworkshop „Smart Home zum Testen & Ko-Benefits“ in Düsseldorf entwarfen die Teilnehmenden gemeinsam ein System für eine diverse als Architekt*in arbeitende 32-jährige Person, die sich als technikaffin und umweltbewusst beschreibt. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass das System trotz seiner energiesparenden Auslegung Rebound-Effekte generiert, die durch das häufige Austesten neuer Systeme und Funktionen bedingt sind. Dazu kommt es zu einer Reduzierung von möglichen Einspareffekten sowie einem erhöhten Ressourcenverbrauch. Während sich diese Persona bewusst dafür entscheidet, viel Geld für das Smart Home System auszugeben und möglichst viele neue Funktionen (Steuerung der Musik- und Lichtanlagen, smarte Türklingel etc.) zu testen, haben die Teilnehmenden beim Workshop an der TH Köln die Prioritäten anders gesetzt. Ihre Persona des „urbanen Single-Haushalts“ wurde als technikfern eingeordnet und das System sollte möglichst darauf ausgelegt sein, Kosten einzusparen. Als Ko-Benefit wurde dafür ein Ampelsystem eingebaut, das den Energieverbrauch visualisiert und hilft, die Kosten im Überblick zu behalten.

Die sehr unterschiedlich von den Teilnehmenden entworfenen Personas verdeutlichen, dass smarte Produkte und Dienstleistungen auf verschiedenste individuelle Bedürfnisse eingehen sollten. Aus Sicht der Teilnehmenden gibt es Nutzer*innen, die sich durch einen geringeren bzw. effizienteren Stromverbrauch positive Auswirkungen auf die Umwelt erhoffen, während sich andere mehr Sicherheit vor Einbrüchen, möglichst hohe Kosteneinsparungen sowie mehr Komfort in ihrem Alltag wünschen.

Damit Verbraucher*innen ein Motiv haben, smarte Produkte und Dienstleistungen zu nutzen, müssen diese auf eine energieeffiziente, verbrauchergerichte und nutzerorientierte Nutzung ausgelegt werden. Die bisher auf den Workshops erfassten unterschiedlichen Ansichten, Meinungen und Bedürfnisse liefern erste Erkenntnisse über die teils individuellen Wahrnehmungen, Einstellungen und Bedarfe der KonsumentInnen auf Haushaltsebene. Aufbauend auf den Ergebnissen können zukünftige smarte Produkte und Dienstleistungen so entwickelt werden, dass sie im Haushalt verschiedenster Personengruppen eingesetzt werden können und je nach Bedarf individuelle Zusatznutzen bieten.

4 Dezentrale Erzeugung und Speicherung im Eigenheim – das Beispiel vom Photovoltaikanlagen & Batteriespeicher

Eigenheimbesitzer*innen stehen bei der Wahl, ob sie ihren Haushaltsstrom über das öffentliche Stromnetz von Energieversorgungsunternehmen beziehen oder mittels einer zu erwerbenden Anlage selbst produzieren möchten, vor einer klassischen Investitionsentscheidung. Ein Haushalt kann z. B. den überschüssigen Strom der Mikro-KWK- oder PV-Anlage, d. h., den selbst produzierten Strom, der zu einem bestimmten Zeitpunkt im Haushalt nicht verbraucht wird, in das öffentliche Netz einspeisen und sich somit jede eingespeiste Kilowattstunde [kWh] vergüten lassen. Alternativ können diese Anlagen ihren Strom in einem Batteriespeicher (oder Elektroauto) einspeisen oder in Wärme (z. B. mit einer Wärmepumpe oder Heizstab) umwandeln und ggf. in einen Warmwasserspeicher laden.

Angelehnt an die Übersichtsgrafik zu smarten Technologien (siehe Abbildung 1) ist in der nachfolgenden Abbildung ein vollständig vernetzter Haushalt abgebildet, der ein vernetztes Zusammenspiel von vielen smarten Technologien darstellt. Dabei handelt es sich auch um die übergeordnete Technologie-kategorie des Energiemanagementsystem (kurz EMS), welches die Energieflüsse nach festzulegenden Kriterien für das Stromnetz, für den Nutzer oder nach Umweltaspekten steuert (vgl. Abbildung 8).

Dabei reagiert das EMS auf Signale aus dem Stromnetz, sodass im Fall von Netzschwankungen automatisch (ohne Zutun der Bewohner) definierte Verbraucher herunterregelt oder sogar abgeschaltet werden können. Heutzutage erfolgt dies teilweise über unidirektionale Funkrundsteuersignale, die beispielsweise Wärmepumpen (Lastmanagement) oder PV-Anlagen (Einspeisemanagement) stufenweise regeln können¹².

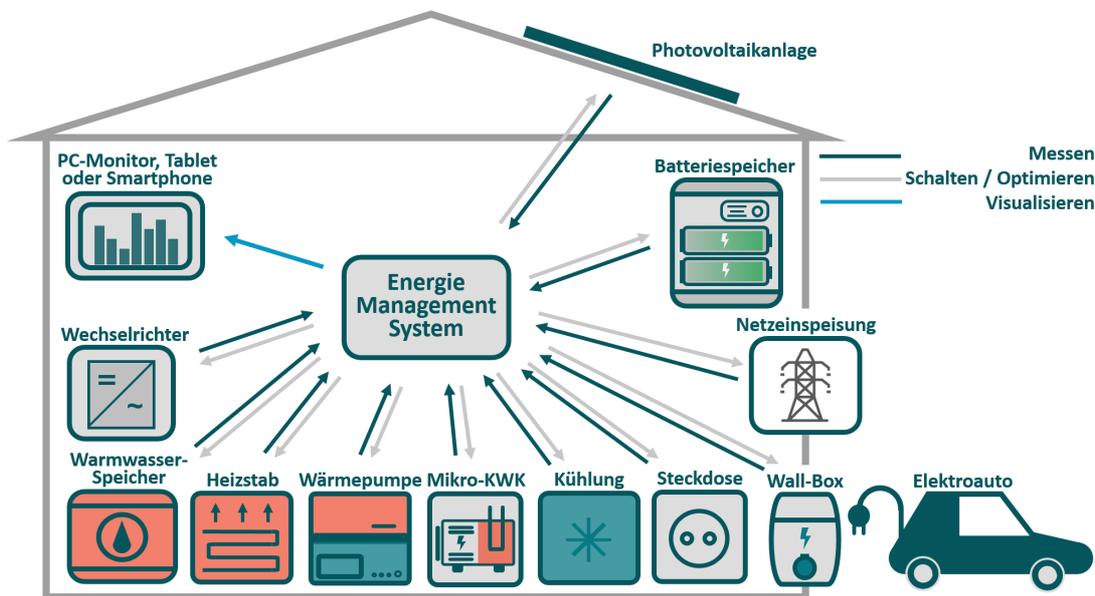


Abbildung 8: Energiemanagementsystem Haushalt [Bildquelle: VISE Haushalte].

Der große Vorteil des EMS ergibt sich durch seine bidirektionale Kommunikation von steuerbaren Anlagen (Erzeugung und Lasten) im Haushalt. Dabei könnte zum einen die Planung zur Netzstabilität, durch den direkten Informationsaustausch von verfügbaren Kapazitäten zur Erhaltung der Netzstabilität (50Hz) durch den Netzbetreiber einfach optimiert werden. Weiterhin können die Verbrauchs- oder Erzeugungsdaten von Haushaltsgeräten ebenfalls Rückschlüsse über das Nutzerverhalten und eine Grundlage für diverse Services und Dienstleistungen (z. B. Wartung, Nutzerüberwachung, Ambient Assisted Living etc.) bilden.

Ein bekanntes Beispiel für eine Technologie zur Erzeugung von Energie in Haushalten ist seit Jahren die Photovoltaik. Die in Deutschland installierte PV-Leistung setzt sich im Jahr 2016 überwiegend aus privaten Haushalten, landwirtschaftlichen Betrieben und Gewerbebetrieben zusammen, wobei die privaten Haushalte den größten Anteil von über 30% an installierter PV-Leistung in Deutschland ausmachen.¹³

¹² Rheinische NETZ Gesellschaft mbH (2017): Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz. Aktueller Stand der TAB NS vom 30.07.2015.

¹³ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. 2019. „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“. Online verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.

Damit ist auch die Photovoltaik die bislang weitverbreitetste Technologie für Eigenheimbesitzer*innen, um elektrische Energie selbst zu erzeugen. Spätestens seit dem Boom in den 2010er Jahren wächst der Photovoltaikzubau bedingt durch die im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) festgelegten hohen Einspeisevergütungen. Zwar hat sich durch die reduzierten Vergütungen das Betriebskonzept von der Volleinspeisung ins Stromnetz hin zum maximierten Eigenverbrauch des selbsterzeugten Stroms verändert. Es deutet sich auf Basis des Unterschieds zwischen dem Arbeitspreis und der Einspeisevergütung an, dass es für Haushalte mit PV-Anlagen wirtschaftlich lukrativer ist, den produzierten Strom selbst zu verbrauchen und nicht ins öffentliche Netz einzuspeisen.

Als Speichertechnologie kommen in Haushalten stationäre Batteriespeicher (aktuell in der Regel Lithium-Ionen-Batterien) zum Einsatz. Diese lassen sich gut mit den oben genannten Photovoltaik-Systemen kombinieren – beispielsweise indem der Speicher den Überschuss an solarer Produktion aufnimmt und dadurch die Eigenverbrauchsquote des Haushalts erhöht. Die Eigenverbrauchsquote beschreibt den Anteil des selbst genutzten Stroms am gesamten Jahresstromverbrauch. Batteriespeichersysteme ermöglichen Haushalten, die Stromproduktion vom Stromverbrauch zeitlich zu entkoppeln, sodass unter aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen Eigenversorgungsquoten zwischen 50% und 70% erreicht werden können.¹⁴ Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Haushalt trotz einer installierten PV-Anlage und Batteriespeichersystemen zwischen 30% und 50% des Haushaltsstroms von einem Drittanbieter (z. B. Energieversorgungsunternehmen) Strom einkaufen muss. Im Jahr 2018 verfügten mehr als die Hälfte aller neu installierten Photovoltaikanlagen über einen Solarstromspeicher¹⁵.

Allerdings ist die Anschaffung eines Batteriespeichers mit weiteren Investitionskosten verbunden, weshalb sich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit stellt, also danach, ob und inwiefern sich für einen Haushalt eine Investition in eine PV-Anlage rentiert und wie sich eine zusätzliche Investitionen in Batteriespeichersysteme auf die Rentabilität auswirken.

Im Rahmen des Forschungsprojektes haben wir eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für vier verschiedene Haushaltstypen durchgeführt: a) einem Vier-Personenhaushalt, in dem zwei erwerbstätige Erwachsene und zwei Kinder leben (HH-Typ 1), b) einem Vier-Personenhaushalt, in dem nur eine der beiden erwachsenen Personen erwerbstätig ist und zwei Kinder leben (HH-Typ 2), c) einem Zwei-Personenhaushalt, indem zwei erwerbstätige Erwachsene leben (HH-Typ 3) und d) einem Zwei-Personenhaushalt, indem zwei

¹⁴ Figgner, J., D. Haberschusz, K.P. Kairies, O. Wessels, B. Tepe und D. U. Sauer. 2018. "Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0-Jahresbericht 2018." ISEA Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe RWTH Aachen: Aachen, Germany.

¹⁵ Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar) (Hg.) (2019): Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik). Online verfügbar unter: https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/bsw_faktenblatt_pv_2019_3.pdf.

Erwachsene im Ruhestand leben (HH-Typ 4). Für jeden der vier Haushaltstypen haben wir 240 unterschiedliche Lastprofile simuliert und die Geräteausrüstung (ausschließlich Geräteeffiziente Haushaltsausrüstung vs. zufällige Gerätekombination) sowie die präferierten Urlaubszeiten (Juli versus Dezember) der Haushalte zufällig variiert. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgte für eine PV-Anlage mit einer Nennleistung von 4.72 kWp und einem optionalen Batteriespeicher mit einer Speicherkapazität von 3.3 kWh.

Wie zu erwarten war, fällt die Eigenverbrauchsquote in der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Fall einer installierten PV-Anlage für den HH-Typ 2 am höchsten (Medianrendite um 8%) und für den HH-Typ 4 am geringsten (Medianrendite um 5%) aus. Ergo rentiert sich der Erwerb der untersuchten PV-Anlage insbesondere für Mehrpersonenhaushalte, in denen einzelne Haushaltsmitglieder den gesamten Tag über zu Hause sind. An diesem Verhältnis ändert sich auch dann nichts, wenn in der Wirtschaftlichkeitsanalyse ein Batteriespeicher zusätzlich zur PV-Anlage bedacht wird. Allerdings verlängern sich im Allgemeinen die Amortisationsdauern im Median um etwa 3 (HH-Typ 2) bzw. 4 Jahre (HH-Typ 4) und verringern sich die Renditen durch die Anschaffung des Batteriespeichers. D. h., auch wenn es für HH-Typ 2 im Vergleich zu HH-Typ 4 immer noch rentabler ist, in den Batteriespeicher zu investieren, so ist die Investition gegenüber einer Investition in eine PV-Anlage ohne Batteriespeicher weniger rentabel. Kurz um: ein Batteriespeicher verschlechtert die Investition, weshalb sich dessen Anschaffung (noch) nicht lohnt. Jedoch werden PV-Anlagen seit den letzten Jahren häufig zusammen mit Stromspeichern installiert, daher stellt sich die Frage, welche nicht-monetäre Faktoren (z. B. Präferenz für Eigenversorgung) und alternative Annahmen (z. B. steigende Strompreisen) kritisch für diese Investitionsentscheidungen sind, und wie alternative Rahmenbedingungen (z. B. Abschaffung von festen Einspeisevergütungen) die Erwartungen von Investoren beeinflussen könnten.

5 Kopplung dezentraler Strom- und Wärmebereitstellung – Optimierung von Energieinvestition und -verbrauch verschiedener Haushaltstypen

Die zukünftig steigende Relevanz von Energiemanagementsystemen in Haushalten erhöht nicht nur den Anteil von dezentraler Energieerzeugung und dezentralem Verbrauch. Sie erweitert auch die Möglichkeiten der Optimierung dezentraler Energiesysteme. Im Rahmen des VISE-Haushalte Projekts wird das EWI-Modell "Consumer Management of Decentralized Options" (COMODO) in der Haushaltskonzeptionierung ausgestaltet.

Ziel ist, die kostenminimale Energiebereitstellung für Endverbraucher*innen oder eine Endverbrauchergruppe bestimmen zu können. COMODO ist ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell (MIP), das lineare Programmiermethoden verwendet, um die Gesamtsystemkosten der Energieversorgung eines bestimmten Endverbrauchertyps oder einer Endverbrauchergruppe zu minimieren. Das entwickelte Modell bestimmt das private wirtschaftliche Optimum des Verbrauchers, hier einzelne private Haushalte, bei der Deckung seines Strom-, Warmwasserbereitung- und Raumwärmebedarfs durch eine Investitions- und Einsatzsimulation.

Die zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich erstellten Haushaltstypen (siehe Abschnitt 4)¹⁶ wurden anhand u.a. ihres Energiebedarfs, der Lastprofile, der Investitionsmöglichkeiten und der Erzeugungspotenziale spezifiziert. Dafür wurden dabei jeweils die Wetterbedingungen an dem zugeordneten Standort einbezogen.¹⁷ Zusätzlich berücksichtigt das Modell sowohl aktuelle als auch geplante oder hypothetische regulatorische Rahmen- und Marktbedingungen¹⁸. Das Modell ist somit in der Lage, Zukunftsszenarien zu simulieren, indem unter anderem die regulatorischen Rahmen- und Marktbedingungen sowie die wirtschaftlichen und technologischen Annahmen angepasst werden. Auf diese Weise bietet COMODO die Möglichkeit, die Diffusionsprozesse von Technologien der verteilten Erzeugung im Zeitverlauf für bestimmte Verbrauchertypen oder akkumulierte Verbrauchergruppen zu analysieren.

Mit COMODO wurde die kostenminimale Investitions- und Energieverbrauchsentscheidung für ein neuerrichtetes Einfamilienhaus (HH-Typ 1) in Köln simuliert.¹⁹ Dieser Haushalt²⁰ hat eine jährliche Wärmenachfrage von 15.378 kWh/a und einen Strombedarf von 5.100 kWh/a (ohne elektrische Heizer).²¹

¹⁶ Insgesamt fünf Haushaltstypen (HH-Typ 1 bis 5) wurden nach unter anderem Gebäudetyp und Alter, Modernisierungsgrad, Wohnfläche, Dachfläche, Bewohnerzahl und Standort definiert.

¹⁷ Die Solarstrahlungsprofile sind für die Erzeugung der PV- und Solarthermie-Anlagen entscheidend. Temperaturprofile werden für die Bestimmung des Wirkungsgrads von Wärmepumpen verwendet.

¹⁸ Wie z.B. Endverbraucherenergiepreise für Strom, Erdgas und Öl sowie technologiespezifische Fördermechanismen (Investitionszuschüsse, Einspeisevergütungen, Marktprämien und Direktvermarktung).

¹⁹ Ergebnisse für weitere Verbrauchertypen wurden an der „16th International Association of Energy Economics (IAEE) European Conference“ am 26. August 2019 in Ljubljana, Slowenien im Namen des VISE-H-Projekts präsentiert. Dieser Policy Brief fokussiert auf die Ergebnisse des HH-Typs 1.

²⁰ Angenommen wurden drei Bewohner*innen auf einer Wohnfläche von 160 m² mit einer Dachfläche von 60m².

²¹ Die Wärme teilt sich in Raumwärme (13.510 kWh/a) und der Warmwasserwärme (1.868 kWh/a) auf. Die stündlichen Lastprofile für Strom und Wärme wurden anhand der VDI4655 (2008) auf Basis der regionalen Wetterbedingungen nach „Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse“ des DWDs (2017) ermittelt.

Um den Energiebedarf des Verbrauchers zu decken, kann COMODO ein Anlageobjekt²² auswählen oder Strom aus dem Netz beziehen. Es wird angenommen, dass die Investitionen in Strom-, Wärme- oder Speichersystemen in 2025 stattfinden. Das Energiesystem wird bis zum Jahr 2045 optimiert. Dabei variieren die Annahmen zu wirtschaftlichen und technologischen Eigenschaften der Anlagen sowie Marktbedingungen über die Jahre. Der regulatorische Rahmen bleibt bis 2040 annahmegemäß unverändert.²³

Die Ergebnisse der Investitionsentscheidungen für HH-Typ 1 werden in

Tabelle 1 dargestellt. Investitionen finden in zwei Stichjahren statt: 2025 und 2040. In 2025 wird eine gasbefeuerte²⁴ Mikro-KWK-Anlage mit einer Leistung von 4 kW gebaut, um dezentral Strom- und Wärme zu erzeugen. Hinzu kommt ein Heizstab, der Strom in Wärme umwandelt. Beide Anlagen können ihre Wärmeerzeugung in einen thermischen Speicher einspeisen. In 2040 muss die Mikro-KWK-Anlage ersetzt werden, da die technische Lebensdauer erreicht wird. Dies erfolgt durch den erneuten Bau einer 4,1 kW Mikro-KWK-Anlage, geringfügig größer als das vorherige System. Weiterhin wird Wärme von dem bestehenden Heizstab und dem Speicher bereitgestellt. Für die Steigerung der Stromerzeugung und zur Ermöglichung von Eigenverbrauch finden Investitionen in eine PV-Anlage und eine Batterie statt.

Tabelle 1: Investitionsentscheidung für HH-Typ 1

		<i>Investitionsobjekt (Kapazität)</i>				
<i>Investitionsjahr</i>	2025	Mikro-KWK (4,0 kW)	Thermischer Speicher (300 L)	Heizstab (2,1 kW)		
	2040	Mikro-KWK (4,1 kW)	***	***	PV (4,6 kW)	Batteriespeicher (7,6 kWh)

*** = Die bestehende Investition ist noch vorhanden.

Neben den Investitionsentscheidungen optimiert das Modell die resultierenden kostenminimalen Verbrauchs-, Erzeugungs- und Speicherauslastungsprofile der installierten Technologien.²⁵ Abbildung 9 stellt die optimalen Einsätze der Erzeugungs- und Speichertechnologien für HH-Typ 1 dar.

²² Der aktuelle Technologiecatalog umfasst 20 dezentrale Erzeugungs- und Speichertechnologien. Spezifische Investitions-, Betriebs- und andere Fixkosten sowie technischen Spezifikationen wie Wirkungsgraden, technischer Lebensdauer und Verfügbarkeit sind in diesem Katalog definiert.

²³ Zusätzliche Annahme ist, dass das Energieverhaltensverhalten des Haushalts sich über die Zeit nicht verändert, d. h., dass die jährliche Nachfrage sowie Lastprofile für jedes Stichjahr gleich sind.

²⁴ Künftige Erdgaspreise inklusive aller Umlagen, Entgelte und Steuern werden anhand des IEAs „World Energy Outlook 2018“ und BDEWs „Gaspreisanalyse Juli 2019“ prognostiziert.

²⁵ Die (Standard-)Zeitaufösung des Modells ist stündlich, kann aber so angepasst werden, dass eine höhere oder niedrigere Zeitaufösung berücksichtigt wird.

Für die Winterwoche im Jahr 2025 tragen alle drei Wärmetechnologien — Mikro-KWK, Heizstab und thermischer Speicher — zu der Deckung des Wärmebedarfs bei (vgl. Abbildung 9). Die Grundwärmelast wird von der Mikro-KWK-Anlage unter vollem Betrieb bereitgestellt, die KWK-Anlage reicht allerdings nicht zur Deckung der Nachfragespitze aus.

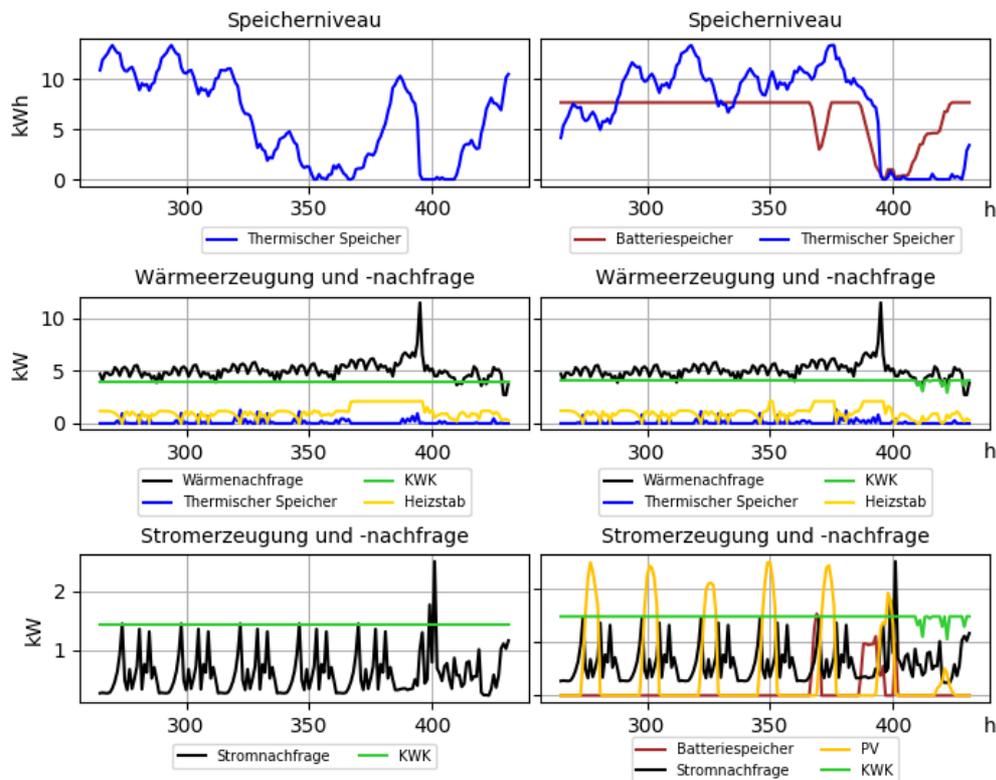


Abbildung 9: Optimaler Einsatz der Erzeugungs- und Speichertechnologien für HH-Typ 1, eine Woche im Februar 2025 (links) und eine Woche im Februar 2040 (rechts)

Gleichzeitig erzeugt die KWK-Anlage Strom, der hauptsächlich die exogene „reguläre“ Stromnachfrage, aber auch den Strombezug des Heizstabs deckt. Der Heizstab erzeugt dann Wärme, wenn die Stromerzeugung aus der KWK-Anlage die exogene Stromnachfrage übersteigt. Diese Erzeugung des Heizstabs kann entweder sofort verbraucht werden oder im thermischen Speicher zwischengespeichert werden. Nachfragespitzen können von Heizstab oder Speicher weitgehend gedeckt werden. In Zeiten extremer Strom- und Wärmespitzen wird Strom aus dem Netz zu einem Endverbraucherstrompreis²⁶ bezogen (z. B. in den Stunden 395, 399 und 401).

In der gleichen Winterwoche in 2040 ergeben sich ähnliche Wechselwirkungen in der Wärmeerzeugung wie in 2025. Allerdings ist nun der Haushalt bezüglich seines Strombedarfs vollständig autark, d. h. der Bedarf wird vollständig über dezentrale Anlagen bereitgestellt.

²⁶ Zukünftige Spotpreise und EEG-Umlagen wurden durch das EWI-Strommarktmodell DIMENSION geschätzt. Berechnungen zu allen anderen Umlagen, Entgelten und Steuern basieren auf u.a. BDEWs „Strompreisanalyse Juli 2019“ und TU Dresdens „Abschätzung der Entwicklung der Netznutzungsentgelte in Deutschland“ (2014).

Dies wird durch die Installation einer PV-Anlage und eines Batteriespeichers ermöglicht. Das heißt, dass in Zeiten der extremen Strom- und Wärmespitzen der Batteriespeicher den Strom liefert (welcher in 2025 aus dem Stromnetz bezogen wurde; vgl. Stunden 387–396). Analog zu den Ergebnissen in 2025 wird der thermische Speicher vor den Wärmespitzenstunden vollgeladen. In diesem Fall werden zuerst der Batteriespeicher (Stunden 367–370) und dann die PV-Anlage (Stunden 369–375) den zusätzlichen Strom für die Wärmepumpe zur Verfügung stellen, um Wärme für den Speicher zu beschaffen. In den verbleibenden „normalen“ Stunden wird der Hauptteil der PV-Erzeugung ins Stromnetz eingespeist, da die KWK-Anlage fast in jeder Stunde die exogene „reguläre“ Stromnachfrage deckt.

Auf Basis der Ergebnisse des Modells lassen sich das kostenminimale Investitions- und Verbrauchsverhalten analysieren und die Diffusion zukünftiger dezentraler Erzeugungsanlagen anhand von Szenarien abschätzen. Technologien wie Mikro-KWK zeigen ein großes Potenzial für Einfamilienhäuser, ihren eigenen Strom sowie Wärme zu produzieren. Mittelfristig kann gemäß unserer Szenarienergebnisse eine Investition in Richtung einer energieautarken Versorgung für bestimmte Verbrauchertypen lohnenswert sein — allerdings nur wenn die Wärme- und Stromerzeugung gekoppelt werden. Um solche Optimierungen in der Realität zu ermöglichen, ist die zunehmende Marktdurchdringung von Energiemanagement- und Messsystemen eine wesentliche Voraussetzung (vgl. Abbildung 9). Zugleich ist zu erwarten, dass sich mehrere regulatorische Aspekte über die nächsten 20 Jahre weiter entwickeln werden. Im Zuge dessen werden weitere Szenarien mit z. B. variablen Strompreisen, einer CO₂-Steuer oder einer veränderten Umlagen- oder Entgeltstruktur mit COMODO analysiert, um die Robustheit der Ergebnisse – und die Bedeutung für Haushalte – zu untersuchen.