

Technologien

Geschäftsmodelle



Akzeptanz

Wirtschaftlichkeit

Smart Energy in Haushalten:

Technologien, Geschäftsmodelle, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit

Hawal Shamon, Tobias Rehm, Broghan Helgeson, Felix Große-Kreul, Marvin Gleue, Ute Paukstadt, Gianmarco Aniello, Thorsten Schneiders, Cordelia Frings, Aileen Reichmann, Andreas Löschel, Torsten Gollhardt, Wilhelm Kuckshinrichs, Konstantin Gruber, Pauline Overath, Carolin Baedeker, Friedrich Chasin, Katja Witte, Jörg Becker

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 541

ISBN 978-3-95806-554-3

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)

Smart Energy in Haushalten: Technologien, Geschäftsmodelle, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit

Hawal Shamon, Tobias Rehm, Broghan Helgeson,
Felix Große-Kreul, Marvin Gleue, Ute Paukstadt,
Gianmarco Aniello, Thorsten Schneiders, Cordelia Frings,
Aileen Reichmann, Andreas Löschel, Torsten Gollhardt,
Wilhelm Kuckshinrichs, Konstantin Gruber, Pauline Overath,
Carolin Baedeker, Friedrich Chasin, Katja Witte, Jörg Becker

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 541

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-554-3

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber
und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
 Zentralbibliothek, Verlag
 52425 Jülich
 Tel.: +49 2461 61-5368
 Fax: +49 2461 61-6103
 zb-publikation@fz-juelich.de
 www.fz-juelich.de/zb

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2021

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 541

ISSN 1866-1793
ISBN 978-3-95806-554-3

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess.



This is an Open Access publication distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/),
which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



WISE

Virtuelles Institut Smart Energy

Interdisziplinäre Forschung für die Digitalisierung
der Energiewirtschaft

Smart Energy in Haushalten: Technologien, Geschäftsmodelle, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit

Virtuelles Institut Smart Energy
Teilprojekt „Energienachfrageverhalten Haushalte“

Abschlussbericht

Forschungszentrum Jülich – EWI – TH Köln – Wuppertal Institut – WWU Münster

www.smart-energy.nrw | info@smart-energy.nrw



WISE
Haushalte

2024
EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Autoren*innen



Technology
Arts Sciences
TH Köln



Dr. Hawal Shamon, Gianmarco Aniello, Dr. Wilhelm Kuckshinrichs	Forschungszentrum Jülich
Tobias Rehm, Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schneiders	TH Köln
Broghan Helgeson, Cordelia Frings, Konstantin Gruber	EWI
Felix Große-Kreul, Aileen Reichmann, Pauline Overath, Dr. Carolin Baedeker, Katja Witte	Wuppertal Institut
Marvin Gleue, Prof. Dr. Andreas Löschel	WWU Münster CERES
Ute Paukstadt, Torsten Gollhardt, Dr. Friedrich Chasin, Prof. Dr. Jörg Becker	WWU Münster ERCIS

Kontakt



WISE

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-0600037

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	1
1 Einleitung	8
2 Technologie-Screening: Smart Energy für Haushalte	10
2.1 Haushaltstechnologien im Wandel und Einführung von Smart Energy- Technologien und -Produkten	11
2.2 Aufbau und Methodik Technologie-Screening.....	13
2.3 Untersuchungsergebnisse des Technologie-Screenings.....	16
2.3.1 Definition: Gebäudeautomation – Smart Home.....	16
2.3.2 Untersuchungsergebnisse funkbasierter Gebäudeautomationssysteme	18
2.3.3 Definition: Energiemanagementsysteme.....	22
2.3.4 Untersuchungsergebnisse Energiemanagementsysteme.....	23
2.4 Zusammenfassung	26
3 Smart Energy-Geschäftsmodelle	27
3.1 Smart Energy-Services und Geschäftsmodelle	29
3.2 Status Quo der Smart Energy-Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft.....	30
3.2.1 Smart Energy Geschäftsmodellarchetypen	30
3.2.2 Smart Energy-Marktanalyse.....	32
3.3 Zusammenfassung	34
4 Empirische Untersuchungen in Miet- und Eigentümerhaushalten: Akzeptanz, Flexibilität und Investitionsentscheidungen	35
4.1 Smart Energy für Haushalte: Akzeptanz, Ko-Benefits und Marktdiffusion	36
4.1.1 Befragung und Modell.....	37
4.1.2 Ergebnisse.....	39
4.1.3 Zusammenfassung	40
4.2 Zwischen Technikbegeisterung und Komfort im Smart Home: Narrative der “Early Adopter”	41
4.2.1 Vorgehen und Methodik.....	42
4.2.2 Ergebnisse: Narrative der Innovatoren, Early Adopter und Early Majority	43
4.2.3 Zusammenfassung	47
4.3 Randomisierte kontrollierte Studien zum Energieverbrauchsverhalten von Haushalten	48
4.3.1 Feedback zum Stromverbrauch durch smarte Technologien	48
4.3.2 Das Konzept „Flexibilität im Stromverbrauch“	49

4.3.3	Randomisierte kontrollierte Studie zur Akzeptanz zeitabhängiger Strompreise	51
4.3.4	Randomisierte kontrollierte Studie zum Einfluss von Informationen auf die Nachfrage intelligenter Heizsteuerungen	53
4.3.5	Zusammenfassung	54
4.4	Empirische Ergebnisse von Haushaltsbefragungen unter Eigenheimbesitzer*innen	54
4.4.1	Aktuelle monetäre und nicht-monetäre Vor- und Nachteile am Beispiel Photovoltaikanlagen.....	55
4.4.2	Wichtigkeit von monetären und nicht-monetären Einflussfaktoren, Förderbestimmungen und Geschäftsmodellaspekten bei Adaptionentscheidungen am Beispiel der Photovoltaikanlage.....	57
4.4.3	Flexibilität in der Bereitstellung von PV-Strom und Speicherkapazität.....	60
4.4.4	Zusammenfassung	62
5	Ökonomische Analysen	64
5.1	Definition der Haushaltsgruppen	64
5.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse von PV mit und ohne Batteriesystemen und mögliche Zielkonflikte.....	66
5.2.1	Potenzial für Eigenversorgung nach Haushaltsgruppe.....	67
5.2.2	Einfluss steuerlicher Regelungen.....	68
5.2.3	Einfluss von finanziellen Bewertungskriterien und Diskontierungssätzen.....	69
5.2.4	Einfluss energieeffizienter Geräte und Haushaltsgruppe.....	71
5.2.5	Einfluss der Einspeisevergütung	72
5.2.6	Zusammenfassung	73
5.3	Optimierung von Energieinvestition und -verbrauch „kostenminimierender“ Haushaltstypen bis 2040.....	74
5.3.1	Auswahl der Haushaltstypen.....	75
5.3.2	Szenariorahmen für die Modellierung der „kostenminimierender“ Haushaltstypen bis 2040.....	78
5.3.3	Ergebnisse aus dem COMODO-Modell für die „kostenminimierenden“ Haushaltstypen bis 2040.....	80
5.3.4	Zusammenfassung	85
5.4	Optimierung von Energieinvestition und -verbrauch der Haushaltstypen bis 2040 unter Berücksichtigung von nicht-monetären Präferenzen	86
5.4.1	Quantifizierung von nicht-monetären Präferenzen	86
5.4.2	Haushaltsdefinition und Szenariorahmen.....	87

5.4.3	Ergebnisse der Optimierung im COMODO Modell anhand von Erkenntnissen aus der Onlineumfrage des Forschungszentrums Jülich.....	89
5.4.4	Zusammenfassung	93
6	Smart Energy-Geschäftsmodellinnovation	94
6.1	Innovationsworkshops zur Entwicklung von Smart Home Geschäftsmodellen	94
6.1.1	Ergebnisse: Worldcafé	96
6.1.2	Ergebnisse: Personas	99
6.2	Smart Energy-Geschäftsmodellinnovationen verstehen und entwickeln: Taxonomie und Innovationsworkshop	101
6.2.1	Klassifikationswerkzeuge	101
6.2.2	Innovationsworkshop zur Geschäftsmodellinnovation	102
6.3	Vorstellung innovativer Smart Energy-Geschäftsmodelle	105
6.3.1	„Guaranteed-Energy-Saving-Service-Provider“	106
6.3.2	„Ad-Based-Energy-Visualization-Provider“	106
6.3.3	„Temperature-as-a-Service-Provider“	107
6.4	Zusammenfassung	108
7	Schlussbemerkung	111
	Acknowledgements.....	113
	Anhang.....	114
	Glossar	114
	Ergänzende Daten für die Abschnitte 5.3 und 5.4	125
	Literaturverzeichnis	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick Standard und Smarte Energie-Technologien im Haushalt.....	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung Smartes Energie-Produkt-Service-System.....	13
Abbildung 3: Anwendungstest im Living Lab - Smart Home Demonstrator an der TH Köln	17
Abbildung 4: Schematischer Aufbau von funkbasierten Gebäudeautomationssystemen	18
Abbildung 5: Schematische Darstellung Energiemanagementsystem Haushalt	22
Abbildung 6: Smart Energy-Wertschöpfungskette (in Anlehnung an IEA (2015)).....	27
Abbildung 7: Business Model Canvas nach Osterwalder & Pigneur (2013).....	28
Abbildung 8: Smart Energy-Services und Smart Energy-Produkte nach Paukstadt et al. (2019)	29
Abbildung 9: Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen (Chasin et al., 2020).....	30
Abbildung 10: Absolute Häufigkeiten der identifizierten Geschäftsmodelltypen (B2C) (Chasin et al., 2020).....	32
Abbildung 11: Absolute Häufigkeiten der identifizierten Geschäftsmodelltypen (B2B2C) (Chasin et al., 2020).....	33
Abbildung 12: Haushaltsentscheidungen bei Anschaffungen von Smart Energy-Produkten und -Services	36
Abbildung 13: Das Messmodell	38
Abbildung 14: Einflüsse unterschiedlicher Einstellungen auf die Intention, das Angebot nutzen zu wollen	39
Abbildung 15: Personalisiertes Lastprofil mit Aktivitätsdaten	50
Abbildung 16: Annahmewahrscheinlichkeit zeitvariabler Tarife nach Treatment-Gruppen.....	52
Abbildung 17: Relative Wichtigkeit der Attribute bei der Entscheidungsfindung im vorliegenden DCE	60
Abbildung 18: Kumulierte Eigenversorgungsquote von zusätzlichem Speicher im ersten Betriebsjahr, nach Haushaltsgruppe und PV-Anlagegröße (Medianwerte)	67
Abbildung 19: Einfluss der Einspeisevergütung auf die Wirtschaftlichkeit (NBW) und optimale Systemkonfiguration	72
Abbildung 20: Optimaler Einsatz der Technologien für Haushalttyp HH1a_A_t3 im Januar 2030.....	82
Abbildung 21: Optimaler Einsatz der Technologien für Haushalttyp HH1b_A_t3 im Januar 2030.....	83
Abbildung 22: Optimaler Einsatz der Technologien für Haushalttyp HH2b_N_t1 im Januar 2030.....	84
Abbildung 23: Ergebnisse der "Mentimeter-Umfrage" beim Workshop in Köln	95
Abbildung 24: Diskussionsrunden in den Workshops	96
Abbildung 25: Ermittelte Bedarfe an Smart Home Systeme aus den Workshops (Stand: 02/2020).....	97

Abbildung 26: Benefits durch Smart Home Systeme	98
Abbildung 27: Entwurf eines Smart Home-Systems für eine Familie am Stadtrand (Workshop Dorsten) & Visuelle Darstellung des urbanen Familienhaushalts in Köln Porz (Workshop Köln)	100
Abbildung 28: Smart Energy-Geschäftsmodelltaxonomie adaptiert nach Paukstadt et al. (2019)	102
Abbildung 29: Impressionen aus dem Smart Energy Geschäftsmodell Workshop.....	103
Abbildung 30: VISE Haushalte Stakeholder-Workshop am 08.07.2019 in Düsseldorf	104
Abbildung 31: Kategorisierung von Haushaltsgeräten (Allerding, 2014)	118
Abbildung 32: Typisierung von Living Labs nach den Kriterien Zeit, Raum und Akteuren (Baedeker et al., 2017).....	120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertungsbogen Technologie-Kategorien	15
Tabelle 2: Gesamtübersicht betrachteter funkbasierter Gebäudeautomationssysteme (Stand: Januar 2020).....	21
Tabelle 3: Gesamtübersicht betrachteter Energiemanagementsysteme für Haushalte (Stand: Januar 2020).....	25
Tabelle 4: Definitionen der gemessenen Variablen	38
Tabelle 5: Beispielhafte Darstellung einer von insgesamt 12 Entscheidungssituationen.....	59
Tabelle 6: Überblick von angenommenen Bruttoinvestition- und Bruttobetriebskosten.....	66
Tabelle 7: Wirtschaftlichkeit und optimale Systemdimensionierung.....	69
Tabelle 8: OLS Regressionen über die Einflussfaktoren des IZF für Alternative Systemkonfigurationen.....	71
Tabelle 9: Definition der Haushaltstypen für die ökonomische Analysen (eigene Annahmen) .	75
Tabelle 10: Definition der Haushaltstypen für COMODO-Analysen 1/2	76
Tabelle 11: Definition der Haushaltstypen für COMODO-Analysen 2/2	77
Tabelle 12: Annahmen zu den Endverbraucherpreisen für Strom und Gas in der COMODO-Analyse [Euro-Cent/kWh], eigene Annahmen basierend auf u. a. BDEW (2020) und Umweltbundesamt (2020a)	79
Tabelle 13: Kostenminimale Investitionsentscheidung der Haushaltstypen in 2025 [in kW] 1/2.....	80
Tabelle 14: Kostenminimale Investitionsentscheidung der Haushaltstypen in 2025 [in kW] 2/2.....	80
Tabelle 15: Empirische Zahlungsbereitschaften (nach Normierung) für verschiedene dezentrale Wärmetechnologien nach Präferenzausprägung [in Euro, Normierung erfolgte durch EWI basierend auf Studie des Forschungszentrums Jülich]	89

Tabelle 16: Investitionsentscheidung des Haushaltstyps HH2a_A_t4 mit abwägenden Investitionsverhalten in 2025.....	90
Tabelle 17: Investitionskosten [in Euro] sowie gesamte jährliche Kosten (variable und Fixkosten) [in Euro/Jahr] des Haushalts-typs HH2a_A_t4 mit kostenminimalen und abwägendem Investitionsverhalten in 2025.....	91
Tabelle 18: Technische Daten der Haushaltstypen für COMODO-Analyse, eigene Annahmen u. a. basierend auf BGW (2006), KfW (2020a) und Pflugradt (2020).....	125
Tabelle 19: Spezifische Investitionskosten für die dezentrale Wärme- und Stromerzeugungstechnologien inklusive Installationskosten [Euro/kW], eigene Annahmen basierend auf Industriedaten sowie u. a. (BDEW, 2016, 2017) und (BMU, 2016).....	126
Tabelle 20: Weitere techno-ökonomische Parameter der dezentralen Strom- und Wärmetechnologien, eigene Annahmen basierend auf Industriedaten sowie u. a. (BDEW, 2016, 2017) und (BMU, 2016).....	127
Tabelle 21: Investitionszuschüsse der ausgewählten dezentralen Wärmetechnologien [Euro/kW] (BAFA, 2018; BMJV, 2016).....	127
Tabelle 22: Weitere Förderungen für ausgewählten dezentralen Strom- und Wärmetechnologien [Euro-Cent/kWh] (BMJV, 2016; BNetzA, 2020).....	127

Management Summary

In diesem Management Summary werden die forschungsleitenden Fragen präsentiert, die für die jeweiligen Forschungspartner dieses multidisziplinären Forschungsverbundes wegweisend waren, sowie die zentralen Untersuchungsergebnisse jeweils knapp zusammengefasst. Für detailliertere Informationen zu den Forschungshintergründen, Analysemethoden und Untersuchungsergebnissen wird die Lektüre der jeweils interessierenden Kapitel empfohlen.

Kapitel 1 – Einleitung

Welche Forschungsmotivation liegt diesem Forschungsprojekt zugrunde?

- Die Digitalisierung des deutschen Energiesystems wird als eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende gesehen.
- In diesem Zusammenhang entwickeln Unternehmen innovative smarte Produkte und Dienstleistungen für private Haushalte.
- Für eine erfolgreiche Marktdiffusion von innovativen smarten Produkte und Dienstleistungen spielen Haushalte eine zentrale Rolle.
- Um die Mechanismen einer erfolgreichen Marktdiffusion besser verstehen zu können, untersuchte das multidisziplinäre VISE-Forschungsprojekt „Smarte Technologien für Haushalte“ in der Projektlaufzeit von 2017 bis 2020 Anschaffungsentscheidungen und Nutzungsverhalten von Haushalten bzgl. smarter Produkte und Dienstleistungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geschäftsmodellausgestaltungen.

Kapitel 2 – Technologie-Screening

Wie können technische Herausforderungen der Digitalisierung in Haushalten durch Smart Energy-Technologien sinnvoll kategorisiert und bewertet werden?

- Im Rahmen einer technischen Marktanalyse (im Folgenden Technologie Screening genannt) wurden unterschiedliche am Markt verfügbare Energiehaushaltstechnologien identifiziert und kategorisiert.
- Hierbei wurden Monitorings- und Gebäudeautomations-Systeme (Smart Home) sowie Energiemanagementsysteme (Aspekte und Anwendungen zur Energietransparenz und -management) als „*smarte*“ Technologien klassifiziert.
- Der Entwicklungsstand von smarten Technologien (wie z. B. Energiemanagementsystemen) wurde anhand von vier Kriterien (Anwendbarkeit im Haushaltsbereich, Energieeffizienzpotenzial und Mehrwerte, Kompatibilität und Schnittstellen sowie Kosten) bewertet.
- Hierbei zeigte sich, dass
 - die Hauptfunktionalität von Energiemanagementsystemen die Visualisierung von Energieverbräuchen ist,
 - die Funktion der Ansteuerung in der Regel nur mit kompatiblen Geräten möglich ist, obwohl es eine Vielzahl an Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen auf dem Markt gibt,
 - proprietäre Systeme den Nutzen für Haushaltsbewohner (z. B. Nachrüstbarkeit) verschlechtern,

- Energieeinsparungen konnten nicht quantifiziert werden, dennoch werden Einsparungen und eine Eigenverbrauchsoptimierung für Haushalte durch eine sinnvolle Kopplung von Strom und Wärme durch Energiemanagementsysteme (EMS) vermutet.

Kapitel 3 – Smart Energy-Geschäftsmodelle

Was sind Smart Energy-Produkte, Smart Energy-Services und Smart Energy-Geschäftsmodelle? Wie können diese in einem standardisierten Verfahren analysiert und beschrieben werden? Welche Smart Energy-Geschäftsmodelle werden derzeit im Haushaltsbereich angeboten und wie können diese sinnvoll klassifiziert werden?

- Smart Energy-Services bauen auf Smart Energy-Produkten auf und sind somit eng miteinander verzahnt.
- Gemeinsam bilden Smart Energy-Produkte und Smart Energy-Services die Grundlage für Smart Energy-Geschäftsmodelle.
- Smart Energy-Geschäftsmodelle sind mehr als nur das reine Wertversprechen; hierzu zählen auch die Werterzeugung (z. B. Ressourcen), das Wertnetzwerk (z. B. Kooperationspartner) sowie die Werterfassung (z. B. Zahlungsmodelle).
- Auf Grund der Veränderungen im Smart Energy-Wertschöpfungsnetzwerk nehmen Haushalte zum Teil die Rolle eines Prosumers an, der selbst Strom erzeugt und in das Netz einspeist. Daher kommt dem Wertnetzwerk in Smart Energy-Geschäftsmodellen eine besondere Rolle zuteil.
- In einer Marktanalyse auf Basis von 175 Unternehmen (56 Energieversorger, 107 Smart Energy-Natives, 12 Quereinsteiger) wurden acht verschiedene Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen herausgearbeitet, die sich u. a. in ihrer Produkt- oder Serviceorientierung unterscheiden.
- Der Smart Energy-Markt für Haushalte besteht momentan eher aus produktorientierten Angeboten. Häufig werden Smart Energy-Produkte oder hybride Leistungsbündel (d. h. Smart Energy-Services inklusive eines Smart Energy-Produktes) angeboten.

Kapitel 4 – Empirische Untersuchungen zur Akzeptanz

Kann die Verbreitung von Smart Energy-Produkt-Servicebündeln durch Ko-Benefits wie Smart Home Sicherheits- oder Gesundheits-Services beschleunigt werden? Welche Faktoren beeinflussen die Absicht von Haushalten, Smart Energy-Produkt-Servicebündel nutzen zu wollen?

- Die Ergebnisse der quantitativen Befragung von Haushalten (n=700) suggerieren, dass von Ko-Benefits im Bereich der Sicherheits- und Gesundheitsanwendungen kein demand-pull-Effekt für Smart Energy-Produkt-Servicebündel zu erwarten ist.
- Eine vermarktungsstrategische Verknüpfung dieser nicht energie-bezogenen Smart Home-Services mit Smart Energy-Produkten erscheint vor diesem Hintergrund weniger erfolgsversprechend zu sein.
- Hingegen deuteten die Ergebnisse der Untersuchung darauf hin, dass spezifische Mehrwerte, wie zum Beispiel der Alltags- und Umweltnutzen, die Diffusion der Smart Energy-Produkt-Servicebündel beschleunigen kann.
- Bei der Vermarktung von Smart Energy-Produkt-Servicebündeln könnten Haushalte auch durch Gamification-Aspekte wie Feedback-Funktionen angesprochen werden.

Was sind die zentralen Motive und Beweggründe von Personen, die zu einem frühen Zeitpunkt angefangen haben Smart Home-Produkte zu nutzen (Innovatoren und Early Adopter)? Inwiefern spielen Smart Energy-Produkte für diese Personen eine Rolle? Und waren Smart Energy-Produkte bzw. die Energiewende eine Motivation für diese Personen, Smart Home-Produkte zu nutzen?

- Gemäß der Diffusionstheorie von Rogers (2003) wird der Adaptionierungsgruppe der Innovatoren und Early Adopter eine Meinungsführerschaft zugeschrieben, weshalb die weitere Diffusion eines Produkts von den Erfahrungsberichten dieser Adaptionierungsgruppe maßgeblich beeinflusst wird.
- Die Ergebnisse einer qualitativen Befragung von Haushalten, die als Innovatoren und Early Adopter einzuordnen sind, weisen darauf hin, dass die Energiewende keinen Einfluss auf die Motivation zur Anschaffung und Nutzung von Smart Energy-Technologien hatte. Außerdem lassen sich keine Hinweise finden, dass die Nutzer*innen die Möglichkeit sehen, einen Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten.
- Nur wenige Innovatoren und Early Adopter bringen das private Energieverhalten in einen größeren energiepolitischen Zusammenhang.
- Zudem geben die untersuchten Innovatoren und Early Adopter an, dass sie die Technologien aus technischem Interesse, Komfort- und Sicherheitsgründen, dem Wunsch nach einem zeitgemäßen Wohnstandard sowie ökonomischen Ersparnissen (Reduzierung von Heizkosten) erworben haben.
- Energieeinsparungen werden eher aus ökonomischen als aus Umweltschutzmotiven heraus angestrebt.

Wie kann die technische Entwicklung von Smart Energy-Produkten und -Services entsprechend der individuellen Bedürfnisse gestaltet werden? Welche Barrieren und Hemmnisse werden bei der Nutzung gesehen?

- Smarte Produkte und Dienstleistungen müssen auf verschiedenste individuelle Bedürfnisse in unterschiedlichen Haushaltsformen eingehen.
- Nicht jeder urbane Single-Haushalt hat die gleichen Anforderungen an ein Smart Home-System, wie auch Familienhaushalte in der Stadt oder auf dem Land teils sehr unterschiedliche Bedürfnisse aufweisen.
- Es gibt Haushalte, 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 Haushalte ein Motiv haben, smarte Produkte und Dienstleistungen zu nutzen, müssen diese auf eine energieeffiziente, verbrauchergerechte und nutzerorientierte Nutzung ausgelegt werden.
- Wesentlich ist die Modularität des Systems mit einem Grundmodell, das Basisfunktionen eines Smart Home-Systems enthält, sich aber nach den individuellen Wünschen und Bedürfnissen der Haushalte richtet und ohne großen Aufwand und Kosten erweitert werden kann.
- Zukünftige Systeme sollen "*Lernende Systeme*" (Künstliche Intelligenz) sein, die Veränderungen im Alltag der Haushalte erfassen und sich an neue Gewohnheiten anpassen.

- Barrieren werden vor allem in Bezug auf Datenschutz und Datenhoheit gesehen sowie Sorge besteht, dass durch die automatisierte Steuerung eine Gefahr von Hackerangriffen entsteht, die eine Fremdsteuerung bzw. Manipulation des Systems von außen ermöglichen könnte.
- Befürchtet werden auch Rebound-Effekte und damit einhergehende zusätzliche Energie- und Ressourcenverbräuche bei Herstellung und Nutzung der Systeme.
- Zudem mangelt es derzeit – insbesondere für technikferne Haushalte – an der Bedienbarkeit von Smart Home-Systemen. Smart Home-Systeme sind für viele Personengruppen noch nicht bedarfsgerecht konzipiert.

Können Smart Energy-Produkte flexibles Verbrauchsverhalten in Haushalten fördern? Welche Voraussetzungen müssen dafür gegeben sein?

- Smart Energy-Produkte ermöglichen es Haushalten, ihren Stromverbrauch komfortabler einzusehen, wodurch der einschlägigen Literatur zufolge flexibles Verbrauchsverhalten gefördert werden kann.
- Mithilfe einer eigens programmierten Smartphone-App, in welche Haushaltsmitglieder ihre Aktivitäten eintragen können, erstellen wir im Rahmen eines Reallabors personalisierte Lastprofile, die den Stromverbrauch und jene Aktivitäten der teilnehmenden Haushalte zusammenbringen.
- Zusammen mit einem anschließenden Fragebogen ermitteln wir so die Bereitschaft zur Lastverschiebung der teilnehmenden Haushalte sowie das damit einhergehende Emissionsreduktionspotenzial.
- In randomisierten kontrollierten Studien zeigen wir, dass die Bereitstellung von Informationen zu den Eigenschaften von Smart Energy-Produkten und zu Aspekten flexibler Stromnachfrage sowohl die Nachfrage nach jenen smarten Produkten als auch die Akzeptanz für zeitvariable Stromtarife begünstigen kann.
- Aus diesen empirischen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass die Bereitstellung dieser grundlegenden Informationen zu Smart Energy-Produkten und zu Aspekten flexibler Stromnachfrage die Implementierung eines Demand Side Managements wesentlich begünstigen dürfte und somit dazu beitragen kann, Emissionseinsparungspotenziale durch flexibles Verbrauchsverhalten besser auszuschöpfen.

Welche Motive und Barrieren bestehen aus Sicht von Eigenheimbesitzer*innen im Hinblick auf die Anschaffung von Photovoltaikanlagen? Wie wichtig sind investitionsrelevante Faktoren im Vergleich zu nutzenstiftenden Faktoren und welche Rolle können Förderkredite bei der Adaptionentscheidung spielen?

- Die Ergebnisse mehrerer standardisierter Befragungen von Haushalten weisen darauf hin, dass Adaptionentscheidungen von Photovoltaikanlagen vornehmlich als eine Investitionsentscheidung verstanden werden.
- Investitionsrelevante Faktoren (wie z. B. Investitionskosten, ein etwaiger staatlicher Investitionszuschuss, die jährlich nominale Rendite einer Investition) spielen bei der Entscheidungsfindung eine deutlich wichtigere Rolle als nicht investitionsrelevante Faktoren.
- Zudem zeigte sich, dass (hohe) Anschaffungs- und Einstiegskosten häufig genannte Gründe waren, die gegen den Erwerb einer Photovoltaikanlage sprechen.

- Alternative Geschäftsmodelle, wie zum Beispiel Miet- oder Leasingmodelle, mit der hohe Einstiegskosten als wesentliche Adoptionsbarriere theoretisch ausgehebelt werden könnten, werden von Eigenheimbesitzer*innen kritisch gesehen.
- Zinsgünstige Förderkredite, wie sie etwa für Photovoltaikanlagen aber auch für die Umstellung der Heizung auf erneuerbaren Energien von der KfW (z. B. im Programm 270 oder 167 (KfW, 2020b, 2020c) oder von der NRW.BANK (z. B. im Programm NRW.BANK Gebäudesanierung (NRW.Bank, 2019)) angeboten werden, könnten für Haushalte mit fehlendem Eigenkapital eine gute Alternative darstellen.

Welche Faktoren begünstigen die Bereitschaft von Haushalten, selbstproduzierten Strom und Speicherkapazität zur Verfügung zu stellen?

- Die Bereitschaft von Haushalten, Energieversorgungsunternehmen Zugriff auf ihren Batteriespeicher zu gewähren, um auf diesem kurzfristig überschüssigen Strom zwischen zu speichern oder von diesem in Zeiten einer Unterversorgung PV-Strom abzurufen, hängt in starkem Maße von der Vergütung pro kWh Strom ab.

Kapitel 5 – Ökonomische Analysen

Wie wirtschaftlich sind Photovoltaikanlagen und Batteriespeicher für Eigenheime unter Berücksichtigung unterschiedlicher Lastprofile, steuerlicher Regelungen sowie finanzieller Gegebenheiten?

- Unter den gegebenen Rahmenbedingungen sind Photovoltaik-Anlagen mit oder ohne Batteriespeicher knapp unter dem gesetzlichen Grenzwert von 10 kWp für alle untersuchten Lastprofile wirtschaftlich optimal.
- Die verschiedenen steuerlichen Regelungen beeinträchtigen die Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Photovoltaikanlagen mit oder ohne Batteriespeicher maßgeblich.
- Die Wirtschaftlichkeits-Betrachtung von Batteriespeichern kann in Abhängigkeit des herangezogenen Bewertungskriteriums (Amortisationsdauer, interner Zinsfuß oder Nettobarwert) für die untersuchten Lastprofile schwanken.
- Geringe Diskontierungssätze steigern die Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen mit Batteriespeicher im Vergleich zu Photovoltaikanlagen ohne Batteriespeicher: Die derzeit niedrigen Zinssätze dürften daher die Diffusion von Batteriespeichern begünstigen.
- Je energieeffizienter die elektrische Geräteausstattung eines Haushalts ist, desto unwirtschaftlicher ist die Investition in Photovoltaikanlagen mit oder ohne Batteriespeicher: Es besteht ein Trade-off zwischen Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen und Eigenversorgungstechnologien.
- Eine Absenkung der Einspeisevergütung begünstigt die Anschaffung von kleineren Photovoltaikanlagen und eine Kopplung mit Batteriespeichern.

Wie können einzelne Haushalte eine kostenminimale Energiebereitstellung für die Deckung des Strom-, Warmwasserbereitungs- und Raumwärmebedarfs erreichen?

- Die Energieinvestitionen und -einsätze werden für 32 Haushaltstypen mit dem COMODO-Modell optimiert, um die Gesamtkosten der Wärme- und Strombereitstellung zu minimieren.

- Technologien wie Wärmepumpen können besonders in neue, stark isolierte Einfamilienhäuser zur kostenminimalen Deckung des Energiebedarfs beitragen.
- Zur Deckung von Wärmespitzen werden vornehmlich Heizstäbe eingesetzt, mit diesen können kostenintensive Kapitalinvestitionen reduziert werden.
- Für Haushalte in Altbauten kann eine annäherungsweise stromautarke Versorgung für Verbrauchertypen mit erhöhtem Strombedarf lohnenswert sein – allerdings nur wenn die Wärme- und Stromerzeugung gekoppelt werden. Hierzu werden erweiterte Technologiesysteme mit u. a. Gas-KWK-Anlagen genutzt.

Wie verändern sich Investitions- und Einsatzentscheidungen durch die Verschiebung von Zahlungsbereitschaften auf Basis von nicht-monetären Präferenzen?

- Das COMODO-Modell des EWI wird mit empirischen Zahlungsbereitschaften ergänzt, um nicht-monetäre Präferenzen in den Investitionsentscheidungen für die Energieversorgung der Haushalte zu berücksichtigen.
- Für die Bestimmung von empirischen Zahlungsbereitschaften hat das Forschungszentrum Jülich eine Onlineumfrage für die empirische Parametrisierung von COMODO konzipiert.
- Die Werte für die empirischen Zahlungsbereitschaften für fünf verschiedene Wärmetechnologien werden für vier abwägende Haushaltstypen im COMODO-Modell berücksichtigt.
- Anhand der empirischen Zahlungsbereitschaften konnte der Einfluss von Präferenzen für Autarkie und Umweltschutz auf die Investitionsentscheidungen der Haushalte mit dem Modell untersucht werden.
- Die Ergebnisse des angepassten COMODO Modells zeigen, dass sich die vier abwägenden Haushaltstypen für Energieinvestitionen entscheiden, die von der Investitionsentscheidung des kostenminimierenden Haushalts abweichen.
- Vermehrt werden Wärmetechnologien installiert, für die in der Onlineumfrage die höchsten Zahlungsbereitschaften ermittelt wurden. Zum Beispiel zeigen die Ergebnisse, dass Haushalte mit einer starken Präferenz für Autarkie eine enorme Zahlungsbereitschaft für Solarthermie zeigen, die wiederum die hohen Investitionskosten ausgleicht.

Kapitel 6 – Smart Energy-Geschäftsmodellinnovation

Welche Bedarfe und Ko-Benefits sollten Smart Home-Systeme und damit verbundene Dienstleistungen künftig über ihre technologische Anwendbarkeit hinaus erfüllen?

- Im Rahmen von durchgeführten Innovationsworkshops wurden nachfolgende Anforderungen erarbeitet: Nutzer*innen von smarten Technologien – hier mit Fokus auf Smart Home-Systeme – erwarten zukünftig integrierte Gesamtsysteme, welche neben den Funktionen des Produktes selbst ein entsprechendes Dienstleistungsbündel beinhalten wie z. B. Installation und Wartung, ggf. als Fernwartung mit 24-Stunden-Service.
- Diese Gesamtsysteme sollten mit anderen smarten Technologien kombinierbar sein, skalierbar und auf künftige technologische Entwicklung erweiterbar.
- Ein wesentlicher Bedarf bei der Nutzung von Smart Home-Systemen ist neben der Sicherheit im Gebäude (Schutz vor Einbrüchen & Maßnahmen zum Brandschutz), die Steigerung der Energieeffizienz. Das System sollte in der Lage sein, eigenständig energieeffizient und damit einhergehend strom- und kostensparend arbeiten zu können.

- Darüber hinaus wird eine Steigerung der Lebensqualität durch (deutliche) Zeitersparnisse, mehr Komfort und ein verbessertes Raumklima erwartet.
- Ein ansprechendes Design mit einfachen und nutzerfreundlichen Interfaces (Nutzeroberflächen) soll die Bedienbarkeit für unterschiedliche Zielgruppen von technikaffin bis technikfern erleichtern.

Hinsichtlich des demographischen Wandels und der Zunahme an Ein-Personen-Haushalten können Smart Home-Systeme zukünftig eine wichtige Unterstützung für die Selbstbestimmtheit älterer, alleinlebender (oder kranker) Personen darstellen.

Wie können Unternehmen bei der Entwicklung von Smart Energy-Geschäftsmodellinnovationen unterstützt werden?

- In der praxisorientierten und akademischen Literatur existiert bereits eine Vielzahl von verschiedenen Werkzeugen, die die Entwicklung von Geschäftsmodellinnovationen in unterschiedlichen Phasen (z. B. Ideengenerierung, Implementierung) unterstützen können (sogenannte Innovationswerkzeuge).
- Die in der Literatur existierenden Innovationswerkzeuge beziehen sich zum Teil auf bestimmte Arten von Geschäftsmodellen (z. B. datengetriebene Geschäftsmodelle) oder auf bestimmte Technologien (z. B. Plattform-Geschäftsmodelle).
- Für die Entwicklung und Validierung von Smart Energy-Geschäftsmodellen bietet es sich an, Innovationswerkzeuge (z. B. Geschäftsmodellmuster) im Rahmen von Workshops anzuwenden, an denen Teilnehmer*innen mit unterschiedlichen beruflichen Hintergründen und Qualifikationen teilnehmen.

Welche neuartigen Geschäftsmodelle sind auf Basis von Smart Energy-Produkten und Smart Energy-Services denkbar?

- Auf Basis der Ergebnisse aus der Marktanalyse sowie der Innovationsworkshops wurden verschiedene innovative Smart-Energy-Geschäftsmodellideen entwickelt.
- Beispielhafte innovative Smart Energy-Geschäftsmodelle nutzen u. a. domäne-fremde Einnahmemodelle wie Flatrates oder Werbefinanzierung, um Wertversprechen wie Nachhaltigkeit und Stromsparen anzubieten.
- Zusätzlich sind neue Abrechnungsgrößen auf Basis der mit Smart Energy-Produkten gesammelten Daten, wie z. B. die Raumtemperatur, möglich.
- Diese innovativen Smart Energy-Geschäftsmodelle bedingen neue Schlüsselaktivitäten und Schlüsselressourcen sowie ein intensiveres Partnernetzwerk mit Herstellern von Smart Energy-Produkten, Anbietern von Smart Energy-Services und weiteren Marktakteuren.

1 Einleitung

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

Sowohl Energie als auch energie-bezogene Informationen können zwischen Verbrauchern, Netzbetreibern sowie zwischen Energieerzeugungsanlagen und Energiespeichern ausgetauscht werden. In diesem Zusammenhang entwickeln Unternehmen innovative smarte Produkte und Dienstleistungen¹ für private Haushalte, z. B. Smart Home Systeme, Energiemanagementsysteme, Smart Meter², intelligente Beleuchtungssysteme oder sie bieten digitale Dienstleistungen wie z. B. die datenbasierte Fernwartung von Photovoltaik-Anlagen an.

Die wissenschaftliche Literatur zu Innovationsprozessen zeigt die zentrale Rolle von Endverbrauchern für Marktdiffusionsprozesse auf: So werden im Rahmen von Roadmapping-Ansätzen drei Bereitschafts-Grade (im Original: Readiness Level) – die technologische Einsatzbereitschaft, Regulierungsreife und Marktreife – 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 Adaptionprozess eintritt und das Produkt kauft.

Die technologische Einsatzbereitschaft lässt sich hierbei lediglich als notwendiges Kriterium für erfolgreiche Innovationsprozesse verstehen. Innovative smarte Produkte und Dienstleistungen, die das Kriterium der technologischen Einsatzbereitschaft erfüllen, können sich nur dann im Markt erfolgreich verbreiten, wenn sie auch die Kriterien der Regulierungs- und Marktreife erfüllen. Mit anderen Worten: die technologische Einsatzbereitschaft kann erfüllt werden, wenn die etwaig zu schaffenden oder zu ändernden regulatorischen Rahmenbedingungen (z. B. Datenschutzbestimmungen, Förderprogramme) 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.

¹ Unter smarten Dienstleistungen verstehen wir digitale Dienstleistungen, die auf smarten Produkten aufsetzen und aus den analysierten Daten neue Mehrwerte schaffen (vgl. auch Porter und Heppelmann (2014); Fleisch et al. (2014)).

² Ein Smart Meter besteht aus einem intelligentem Messsystem sowie einer Kommunikationsschnittstelle (sogenanntes Smart Meter Gateway). Smart Meter erlauben es, Stromverbrauch in einem Haushalt 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.).

Das multidisziplinäre VISE-Forschungsprojekt „*Smarte Technologien für Haushalte*“ (im Folgenden VISE-Haushalte genannt) untersuchte im Zeitraum von Juli 2017 bis Dezember 2020, Anschaffungsentscheidungen und Nutzungsverhalten von Haushalten bzgl. smarter Produkte und Dienstleistungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geschäftsmodellausgestaltungen. Hierfür identifizierte VISE-Haushalte a) haushaltsrelevante Erzeugungs-, Umwandlungs-, Speicher- sowie Steuerungstechnologien im Strom- und Wärmebereich, b) gegenwärtige Smart-Energy Geschäftsmodelle und c) ermittelte Haushaltpräferenzen bei der Anschaffung und Nutzung von smarten Produkten und Dienstleistungen unter Berücksichtigung zentraler Geschäftsmodellaspekte mittels empirischer sowie analytischer Methoden. Neben den Präferenzen von Eigenheimbesitzern (z. B. im Zusammenhang mit Anschaffungsentscheidungen bei Photovoltaikanlagen) standen auch Präferenzen von Mietern (z. B. im Zusammenhang mit Smart Home-Systemen) im Mittelpunkt des Forschungsbestrebens. Die Ergebnisse dieses multidisziplinären Forschungsprojektes erweitern das Verständnis der Marktreife von ausgewählten smarten Produkten und Dienstleistungen.

In Kapitel 2 werden die technischen Herausforderungen von am Markt existierenden Smart Energy-Technologien im Rahmen eines Technologiescreenings identifiziert, die für Haushalte bei Adaptionentscheidungen für oder gegen ein Produkt von Belangen sind. In Kapitel 3 wird der Zusammenhang zwischen Smart Energy-Produkten, Smart Energy-Services und Smart Energy-Geschäftsmodellen hergestellt. Anschließend wird der aktuelle Status-Quo des Energiemarktes anhand acht verschiedener Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen ausgeführt. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse verschiedener empirischer Untersuchungen zur Akzeptanz von Smart Home-Technologien, Flexibilitätswilligkeit im Stromkonsum sowie in der Strombereitstellung und zur Investitionsbereitschaft in Stromerzeugungstechnologien präsentiert. In Kapitel 5 werden die wirtschaftlichen Investitionen und der optimale Betrieb verschiedener Energietechnologien im Haushaltsbereich untersucht. In Kapitel 6 werden schließlich mögliche Geschäftsmodellinnovationen für die Bereiche Smart Home und Smart Energy präsentiert, die auf Basis von Innovationsworkshops mit unterschiedlichen Akteuren der Energiewirtschaft (z. B. Vertreter*innen aus Stadtwerken, dem Handwerk, Beratungsfirmen und Hochschulen) entwickelt wurden. Die dargestellten Inhalte wurden mit Hilfe einer Geschäftsmodelltaxonomie erarbeitet und können als Geschäftsmodellwerkzeug fungieren. Diese Geschäftsmodellinnovationen können als Lösungen im Sinne eines „*out-of-the-box-thinking*“-Ansatzes verstanden werden. Der Abschlussbericht endet mit einer Schlussbemerkung in Kapitel 7.

2 Technologie-Screening: Smart Energy für Haushalte

Eine technologie-orientierte Auseinandersetzung mit dem Thema Smart Energy-Technologien und -Services für Haushalte erfordert ein konkretes Verständnis der beiden Begriffe „*Smart Energy-Technologien*“ und „*Smart Energy-Services*“ sowie ein Verständnis über ihr Verhältnis zueinander. Darüber hinaus ist es im Kontext einer Auseinandersetzung mit Adaptionentscheidungen von Haushalten wichtig, die technischen Eigenschaften von am Markt existierenden Smart Energy-Technologien zu untersuchen. Dies erlaubt es, mögliche technische Herausforderungen identifizieren zu können, die die Adaptionentscheidung von Haushalten negativ beeinflussen können. Eine geringe Nutzerfreundlichkeit, zu hohe technische Anforderungen an die Nutzer*innen sowie fehlende Standards, die die Kompatibilität von Systemen unterschiedlicher Hersteller tendenziell unterminieren und somit für Haushalte mit einer mangelnden Transparenz einhergehen, sind konkrete Beispiele dafür, weshalb Haushalte von einer Adaptionentscheidung Abstand nehmen bzw. diese auf unbestimmte Weise in die Zukunft verschieben können.

Vor diesem Hintergrund wurden zunächst bestehende Standards und neue Energie-Technologien für den Haushalt kategorisiert sowie eine Definition für Smart Energy-Technologien und Smart Energy-Services erarbeitet (vgl. Abschnitt 2.1). Diese Definitionen bilden gemeinsam mit der Kategorisierung smarterer Technologien für Haushalte (siehe rechte Seite der Abbildung 1), die Grundlage für die Auswahl relevanter Smart Energy-Technologien in Haushalten für das Technologie-Screening. In Abschnitt 2.2 wird der Aufbau und die Methodik des durchgeführten Technologie-Screenings beschrieben, wobei aus Platzgründen in diesem Projektbericht nur ein exemplarischer Einblick in die Untersuchungsergebnisse zu Gebäudeautomations- und Energiemanagementsystemen gegeben wird (siehe Abschnitt 2.3). Eine ausführliche Beschreibung der Technologie-Kategorisierung und -Bewertung wird in einer noch folgenden separaten Verschriftlichung unter dem Titel „*Technologie-Screening: Smart Energy Technologien für Haushalte*“ veröffentlicht werden, demnächst verfügbar auf der Homepage des VISE: www.smart-energy.nrw.

Eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu den Herausforderungen von Smart Energy-Technologien in Haushalten mit entsprechendem Verweis auf die erstellten Bewertungskriterien sind in Abschnitt 2.4 zu finden. Die Erkenntnisse aus dem Technologie-Screening und dem aktuellen Stand der Technik von Smart Energy-Technologien in Haushalten finden direkten Einzug in die nachfolgenden Kapitel der Geschäftsmodelle, der sozialwissenschaftlichen Untersuchungen sowie der Anwendungstest, die im Rahmen des Projekts durchgeführt worden sind.

2.1 Haushaltstechnologien im Wandel und Einführung von Smart Energy-Technologien und -Produkten

Entwicklung der Energieversorgung in Haushalten

Historisch wurde der Haushalt als reiner Abnehmer und Verbraucher von Energie verstanden. Klassischerweise wurde der Haushaltsstrombedarf von Haushaltsgeräten, wie Geschirrspüler oder Waschmaschine, über das Stromnetz zu einem fixen Endverbraucherpreis gedeckt. Zudem wurden Raumwärme und Warmwasser in der Regel durch eine dezentrale, fossil befeuerte³ Energiewandlungseinheit, welche primär mit Gas oder Öl betrieben wurde, bereitgestellt. Diese Rolle von Haushalten unterliegt im Rahmen der bestehenden Trends zur Digitalisierung, Dezentralisierung und Dekarbonisierung der Energieversorgung zentralen Veränderungen. Wie auf der linken Seite der Abbildung 1 gezeigt, haben Haushalte heute die Möglichkeit, sich mit einer Vielfalt von Energietechnologien auszustatten und dadurch von ihrer bisherigen Position als reiner Energieverbraucher abzuweichen.

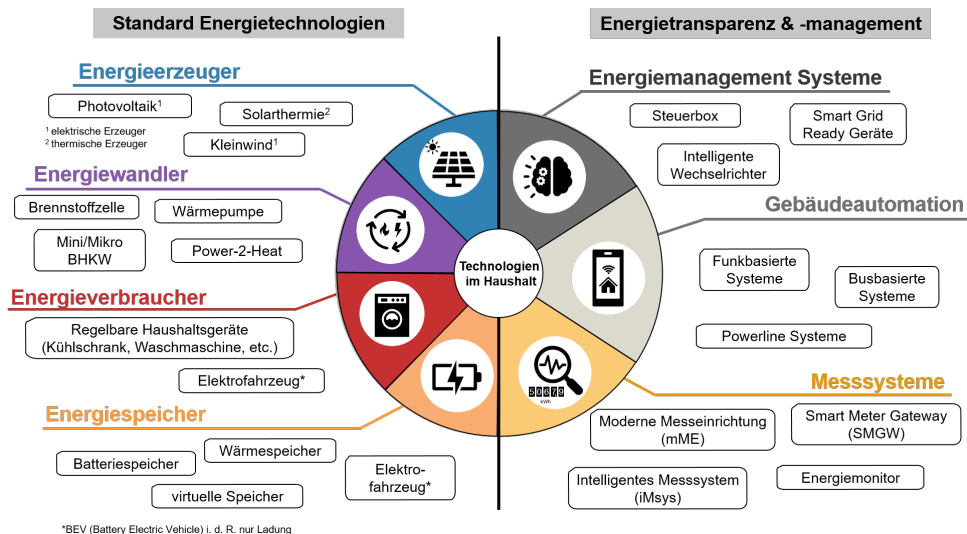


Abbildung 1: Überblick Standard und Smarte Energie-Technologien im Haushalt

Zum Beispiel müssen Haushalte ihre Energienachfrage, wie für stromnutzende Endgeräte, nicht mehr rein aus dem Strom- oder Gasnetz versorgen, sondern ein Teil des Bedarfs kann durch eigene Erzeugung gedeckt werden. Eine Vielzahl von Haushalten hat bereits in dezentrale Energieerzeugungseinheiten wie Photovoltaik- oder Solarthermie-Anlagen investiert. Die Nutzung von Solarthermie, Geothermie und Umweltwärme (z. B. Wärmepumpen) steigt in privaten Haushalten seit dem Jahr 2012 stetig an (Umweltbundesamt, 2020a). Ebenfalls steigt auch der Zubau von Photovoltaik-Anlagen, aktuell (Stand Dezember 2020) sind bereits über 52 Gigawatt PV-Leistung in Deutschland installiert⁴ (Umweltbundesamt, 2020b). Damit gibt es nicht nur eine

³ Ausnahmen stellen hier Nachtspeicherheizungen mit simplen Radiatoren da, welche Strom in Wärme wandeln.

⁴ Der Zubau wird differenziert nach PV-Freiflächenanlagen und Dachflächenanlagen, wobei Dachflächenanlagen den größten Anteil ausmachen.

starke Veränderung in der Energieversorgungsstruktur im Haushaltssektor, sondern vermehrt Stromerzeuger auf der dezentralen Ebene.

Neben der Option der autarken Erzeugung von Strom und Wärme hat sich auch die Auswahl an Energiewandlungstechnologien für Haushalte deutlich erweitert. Haushalte können zwischen einer Vielzahl von Technologien wählen, unter anderem:

- effiziente Brennwertechnologien, die Gas oder Öl mit hohen Wirkungsgraden verbrennen,
- Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, wie Brennstoffzellen, die effizient Wärme und Strom gekoppelt bereitstellen können,
- Wärmepumpen, die mittels Stroms und enormen Effizienzgewinnen Wärme erzeugen.

Auch vor Ort erzeugter Strom kann direkt für die Wärmeversorgung des Haushaltes genutzt werden. Neben der Transformation zur dezentralen Energieerzeugung und -umwandlung ist ein Ausbau von Energiespeichersystemen in Haushalten zu erkennen. Physische Speicher, wie Batterien oder thermische Wärmespeicher, werden genutzt, um Eigenverbrauchsquoten oder den Betriebspunkt von Anlagen zu verbessern. So kann eine Anlage zum Beispiel nur zu bestimmten Zeitpunkten und unter Ideallast betrieben werden, was den Wirkungsgrad typischerweise erhöht, und der Speicher kann eine bedarfsgerechte Bereitstellung der gewünschten Mengen sichern. Zudem können nicht genutzte Strommengen zunächst in einer Batterie gespeichert werden, um so später selbst verbraucht zu werden.

Definition von Smart Energy-Technologien und -Produkten

Der Einfluss der Digitalisierung auf die Energiewirtschaft spiegelt sich in neuen „smarten“ Technologien und Produkten wider. Die in Abbildung 1 dargestellten „Standard Energietechnologien“ können im Verbund mit smarten Anwendungen intelligent gesteuert und geregelt werden. Die rechte Seite der Abbildung 1 illustriert Technologien der Energietransparenz und des Energiemanagements. Diese sind Beispiele von Smart Energy Technologien, die eine intelligente Kommunikation untereinander, mit anderen Geräten oder mit dem Internet zulassen. Mit Hilfe von Energiemanagement-Systemen, Gebäudeautomation und Messsystemen lassen sich neue Möglichkeiten und Geschäftsfelder für Haushalte realisieren.

Die Übermittlung von Informationen über Energieverbrauch, -erzeugung und -speicherstand kann eine große Bedeutung für Haushalte haben. Durch Messsysteme können Daten über das Verbrauchsverhalten von Geräten gesammelt und ausgewertet werden. Diese Information kann z. B. Energieversorger unterstützen, das Gleichgewicht im System zu optimieren. Zudem können Messsysteme, wie Smart Meter eine entscheidende Rolle für die Integration von Elektrofahrzeugen oder Wärmepumpen sowie für das Einspeisemanagement von PV-Anlagen spielen.

Für den Haushalt werden diese Informationen durch das Energiemanagement-System (EMS) oder das Home Energiemanagement-System (HEMS) sichtbar. Diese Transparenz kann durch die Bereitstellung von Energieverbrauchsdaten zu einer Reduktion der Nachfrage führen. Zudem ermöglichen EMS/HEMS es den Haushalten nicht nur das Verbrauchsprofil zu überwachen, sondern in Kombination mit der Gebäudeautomation Signale an einzelne Geräte zu versenden. Solche Signale werden zur Steuerung genutzt. Durch diese Steuerung kann einerseits der Komfort

der Haushalte erhöht werden, z. B. durch automatische Anpassung an die gewünschte Raumtemperatur. Andererseits ist der Eingriff durch Dritte möglich, beispielsweise falls die Erzeugung der Anlage über einer Direktvermarktungsunternehmen vertrieben werden soll, siehe § 20 Absatz 2 des EEG 2017 (BMJV, 2017). Ein weiterer Anwendungsfall der Steuerung könnte der geregelte Lastabwurf oder die Lastverschiebung zugunsten des übergeordneten Energiesystems Deutschlands sein. In diesem Fall wird dem Netzbetreiber die Steuerung von Geräten und Anlagen überlassen. Anhand von Signalen des Netzbetreibers können EMS/HEMS in Engpasssituationen den Energieverbrauch von Haushalten reduzieren, um das Netz zu entlasten.

Durch klassische Hardware-Technologien in Kombination mit modernen IKT-Komponenten bildet sich ein Smartes Energie-Produkt-Service-System, siehe nachfolgende Abbildung 2.

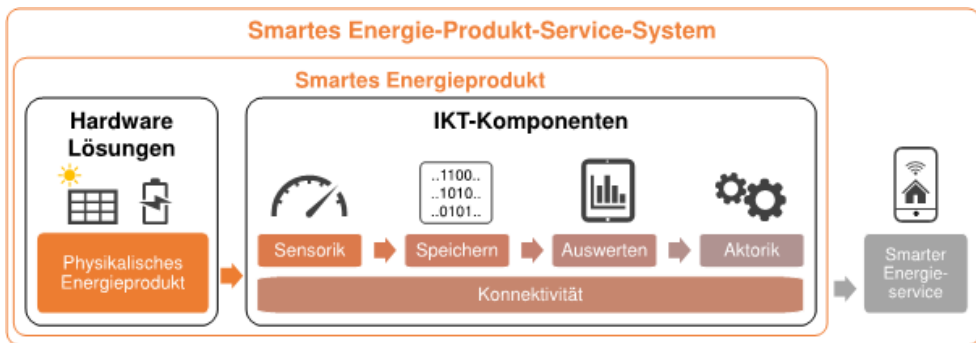


Abbildung 2: Schematische Darstellung Smartes Energie-Produkt-Service-System

Dabei bildet eine Energietechnologie (siehe z. B. die linke Seite der Abbildung 2) die Basis, welche um IKT-Komponenten erweitert wird. Die IKT-Komponenten ermöglichen eine Interaktion mit externen Services oder Mehrwertdiensten, wie z. B. für die aktuelle Ermittlung von Marktinformationen/-situationen bzw. Netzinformationen/-situationen. Das gesamte Zusammenspiel von physischen Energieprodukten mit einer zusätzlichen Konnektivität durch IKT-Komponenten ermöglicht den Aufbau eines Smarten Energie-Produkt-Service-Systems. Diese Konnektivität sind Fähigkeiten der Sensorik, der Datenspeicherung, der Auswertung von Daten sowie der Umsetzung von z. B. Optimierungen durch eine Steuerungs-Aktorik.

2.2 Aufbau und Methodik Technologie-Screening

Um die technischen Herausforderungen von Smart Energy-Technologien in Haushalten darzustellen, wurden im Rahmen eines Technologie-Screenings eine Auswahl von Smart Energy-Technologien kategorisiert, analysiert, bewertet und in Steckbriefen erfasst.

Als Basis wurden harmonisierte Technologie-Steckbriefe auf Kategorie- und Systemebene erstellt, welche innerhalb des Projektes sowie als Schnittstelle zu anderen Teilprojekten im Virtuellen Institut Smart Energy (bspw. im Rahmen der Technologiebetrachtung in Teilprojekt 1 „Weiterentwicklung VISE“) Anwendung fanden. Das Screening wurde über die Projektlaufzeit hinweg in einem kontinuierlichen Monitoring- und Ergänzungsprozess weiterentwickelt, um auch die dynamischen Entwicklungen des Marktes zu berücksichtigen.

Um methodisch eine möglichst vollständige technische Beschreibung einzelner Systeme zu ermöglichen und damit auch eine Bewertungsgrundlage für die Technologie-Kategorien zu schaffen, wurde neben der Recherche nach Produktdatenblättern auch der Kontakt zu Herstellern aufgenommen. Nach Möglichkeit wurde die Einschätzung der Hersteller (beispielsweise zur Anwendbarkeit im Haushaltsbereich oder der allgemeinen Funktionsweise der Systeme) in den Steckbriefen und Beschreibungen berücksichtigt.

Das Ergebnis des Technologiescreenings sind harmonisierte Datensätze, die in Technologies-teckbriefen münden. Aufgebaut sind diese zunächst mit einer allgemeinen Beschreibung im Volltext (ggf. mit Bildern). Im Weiteren folgt der technische Steckbrief mit Angaben zu Komponenten und Schnittstellen. Unter Schnittstellen sind beispielsweise Kommunikationsprotokolle oder mögliche Verbindungen zu anderen Technologien gemeint.

Um eine nachvollziehbare Bewertung der Technologie-Kategorien sicherzustellen, ist eine Bewertungsmatrix erstellt worden, siehe Tabelle 1. Somit werden Einzelbewertungen auf System- bzw. Herstellerebene vermieden. Darüber hinaus sind alle Bewertungskriterien mit dem Fokus auf den Einsatz der Technologien im Anwendungsbereich von Haushalten entstanden, wobei keine Unterscheidung zwischen Miete oder Eigentum gelegt wurde. Insgesamt werden 100 Punkte als Maximalpunktzahl definiert und in vier maßgebliche Kriterien aufgeteilt:

- Allgemeine Anwendbarkeit im Haushaltbereich
- Energieeffizienzpotenzial und Mehrwerte
- Kompatibilität und Schnittstellen
- Kosten

Tabelle 1: Bewertungsbogen Technologie-Kategorien

<p>Anwendbarkeit im Haushaltsbereich</p> <p>max. 25 Punkte</p>	<p>Mit diesem Kriterium wird zunächst allg. betrachtet, inwiefern die Technologie im Haushaltsbereich anwendbar ist. Dabei werden folgende Aspekte berücksichtigt:</p> <p>Benutzerfreundlichkeit, wie intuitiv ist die Steuerung für den Nutzer*in? Weiterhin Aspekte der Nachrüstbarkeit, wie leicht lassen sich neue Technologien in Bestandssysteme integrieren und wie hoch ist der Installationsaufwand für den/die Nutzer*in oder den/die Handwerker*in?</p> <p>Dabei ergeben sich können maximal jeweils 10 Punkte für die Benutzerfreundlichkeit und den Installationsaufwand und weitere 5 Punkte für die Nachrüstbarkeit der Technologie vergeben werden.</p>
<p>Energieeffizienzpotenzial und Mehrwerte</p> <p>max. 25 Punkte</p>	<p>Die Bewertung des Energieeffizienzpotenzials sowie der Mehrwerte, die neben der Senkung von Energiekosten entstehen, gehört zu den wesentlichen Kriterien im Rahmen des Technologie-Screenings. Die betrachteten Technologien werden dabei hinsichtlich der Höhe der Einspareffekte mit maximal 20 Punkten bewertet. Dabei werden in erster Linie direkte Einsparungen (beispielsweise Einsparung von Heizenergie durch Erstellung von Szenarien) sowie indirekte Einsparungen (beispielsweise Erstellung eines Lastprofils für weitere Analysen) berücksichtigt. Weitere 5 Punkte werden für das Potenzial des Lastmanagements gegeben.</p>
<p>Kompatibilität und Schnittstellen</p> <p>max. 25 Punkte</p>	<p>Bei diesem Kriterium wird zum einen die Verfügbarkeit gängiger funkbasierter Datenübertragungsstandards (beispielsweise WLAN) mit maximal 10 Punkten bewertet. Zum anderen wird mit weiteren 15 Punkten auch das Vorhandensein leitungsgebundener Übertragungsstandards (beispielsweise Ethernet-Anbindung) beurteilt. In dieser Gewichtung ist ebenfalls die allgemeine Interoperabilität der Technologie eingeschlossen. Dadurch wird berücksichtigt, ob es sich innerhalb der Technologie (bei verschiedenen Herstellern) um ein „offenes“ System handelt, in das herstellerunabhängig Komponenten eingebunden werden können oder ob das System in sich „geschlossen“ aufgebaut ist und lediglich die Integration herstellereigener Komponenten möglich ist.</p>
<p>Kosten</p> <p>max. 25 Punkte</p>	<p>Dieses Kriterium bringt den Aspekt der Wirtschaftlichkeit in das Technologie-Screening mit ein und dient einem ersten Vergleich der Investitionen für den Einsatz der jeweiligen Technologie. Dabei wird sowohl die Investition in das System an sich bewertet (maximal 15 Punkte) als auch Mehrkosten durch mögliche Installationen durch Fachpersonal (maximal 10 Punkte). Je geringer die Kosten des Systems sind, desto höher ist die Punktzahl. Die Kosten für Komponenten, wie beispielsweise PV-Anlage oder Energiespeicher, die ein EMS voraussetzt, werden dabei nicht berücksichtigt.</p> <p>Die Informationsgrundlage zur Bewertung dieses Kriteriums ist aufgrund der teilweise nicht angegebenen Kosten der Systeme nicht durchgängig vorhanden. Daher ist die Punktevergabe für dieses Bewertungskriterium als Anhaltspunkt zur Einordnung der ungefähren Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Technologie anzunehmen.</p>

2.3 Untersuchungsergebnisse des Technologie-Screenings

Im Rahmen dieses Abschlussberichts werden die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse des Technologie-Screenings exemplarisch an der Kategorie von funkbasierten Smart Home Systemen sowie Energiemanagementsystemen vorgestellt, die in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst sind. Die dort erfassten Kennwerte geben eine Auskunft über den Reife- und Entwicklungsgrad sowie Kostenparameter (je nach Verfügbarkeit) der jeweiligen Technologie.

Eine ausführliche Beschreibung der Technologie-Kategorisierung und -Bewertung ist in der separaten Veröffentlichung „*Technologie-Screening: Smart Energy Technologien für Haushalte*“ dokumentiert, demnächst verfügbar auf der Homepage des VISE: www.smart-energy.nrw.

2.3.1 Definition: Gebäudeautomation – Smart Home

Im durchgeführten Technologien Screening wurde die Kategorie **Gebäudeautomationssysteme** umfasst, die auf dem Markt als „*Smart Home*“ bezeichneten Systeme zur Heimautomation sind. Der Begriff „*Smart Home*“ zielt auf das informations- und sensortechnisch vernetzte Haus ab. Thematisch eingeordnet gehört es zur Gebäude- und Raumautomation sowie teilweise auch zur Anlagenautomation. Die Hauptanwendungen von Smart Home sind im Haushaltsbereich angesiedelt und sollen dem Nutzer (Hausbewohner) das alltägliche Leben erleichtern (assistieren) (Krödel, 2016).

Typische Assistenzfunktionen von Smart Home-Systemen sind z. B.: Energieflussautomatisierung und -visualisierung, Beleuchtungsautomatisierung (z. B. Präsenzmelder) sowie die Temperaturregelung.

Allgemein wird zwischen **funkbasierten** und **kabelgebundenen** Systemen differenziert. Eine besondere Alternative von kabelgebundenen Systemen sind Powerline-Systeme, die bestehende Stromleitungen zur Datenübertragung verwenden. Die kabelgebundenen Systeme werden in der Regel durch Fachhandwerker installiert und durch sogenannte Systemintegratoren in Betrieb genommen, welche die gewünschten Automationen programmieren. Anders bei den funkbasierten Systemen, die auch als Selbsteinbausysteme - sogenannte „*do-it-yourself*“ oder auch „*DIY-System*“ - bezeichnet werden. Diese können nach Herstellerangabe vom Nutzer selbst installiert und in Betrieb genommen werden.

Neben den Komplett-Systemen gibt es unter der Rubrik Smart Home viele Anbieter, die **Einzellösungen** anbieten. Diese sind in der Regel nicht kompatibel mit anderen Komponenten oder Systemen, da beispielsweise unterschiedliche Funkstandards oder Protokolle verwendet werden. In diesem Zusammenhang wird auch von proprietären Herstellern gesprochen.

Eine größere Auswahl an funkbasierten Smart Home Systemen sind im Anwendungstest (Living Lab, siehe Glossar) aufgebaut und konnte im Rahmen von Innovationsworkshops von unterschiedlichen Nutzern getestet werden, siehe Abschnitt 6.1 Innovationsworkshops zur Entwicklung von Smart Home Geschäftsmodellen. Dabei sind Smart Home Anwendungen aus dem Energiebereich zur Steuerung Beleuchtung (z. B. intelligente Sensoren), Optimierung Stromverbrauchs (z. B. schaltbare Zwischenstecker) und Steuerung Wärmeverbrauchs (z. B. smarte Thermostate) verwendet worden. Aspekte wie Sicherheit und Einbruchschutz wurden nur sekundär betrachtet. Auf mobilen Smart Home-Installationswänden (siehe Abbildung 3) können interaktiv der Aufbau, die Funktionsweise und die Programmierung unterschiedlicher Smart

Home-Systeme getestet sowie nachvollzogen werden. Im Testaufbau können neben den Hardwarekomponenten ebenfalls softwareseitig unterschiedliche Apps zur Steuerung und Programmierung mittels Tablets getestet werden.



Abbildung 3: Anwendungstest im Living Lab - Smart Home Demonstrator an der TH Köln

Die Anwendungsbereiche von Gebäudeautomationssystemen liegen in den Bereichen Energieeffizienz, Sicherheit und Komfort. Über Sensoren und Aktoren werden verschiedene Energieverbraucher (beispielsweise Heizungsanlagen, Lampen) und Haushaltsgeräte (beispielsweise Waschmaschinen) miteinander verknüpft. Sprachsteuerungen (beispielsweise Google Assistant, Amazon Alexa) können ebenfalls in das System eingebunden werden und ermöglichen eine komfortable Steuerung. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten kann Abbildung 4 entnommen werden.

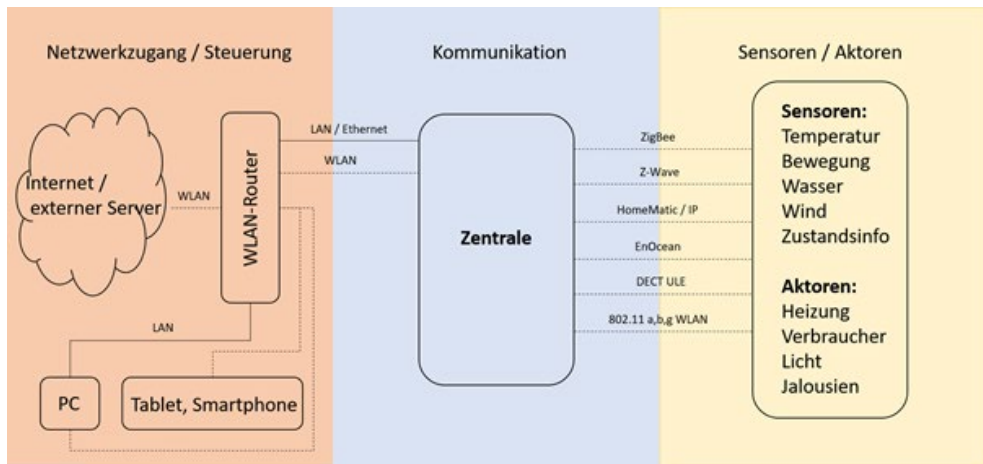


Abbildung 4: Schematischer Aufbau von funkbasierten Gebäudeautomationssystemen

Generell lässt sich bei der Betrachtung von funkbasierten Gebäudeautomationssystemen feststellen, dass diese auf dem Markt als Massenprodukt angeboten werden. Diverse Hersteller bieten die Integration neuer Hardware-Komponenten und Sprachsteuerungen in ihr System an, um die Kompatibilität stetig zu erhöhen und mehr Marktanteile zu erlangen.

2.3.2 Untersuchungsergebnisse funkbasierter Gebäudeautomationssysteme

Bevor eine Bewertung der Kategorie „*funkbasierte Gebäudeautomationssysteme*“ erfolgt, wird zunächst noch eine Übersicht über die einzelnen Hersteller sowie über deren Systeme gegeben. Diese fasst die relevanten Eigenschaften der einzelnen Gebäudeautomationssysteme nochmals zusammen. Tabelle 2 ermöglicht eine Übersicht dieser sowie über deren technischen Eigenschaften und Kosten.

Jeder Hersteller kann im Allgemeinen verschiedene Komponenten in das jeweilige System einbinden. Allerdings ist es bei vielen Herstellern ebenfalls möglich, Drittanbieter, die wiederum eine Vielzahl an Komponenten anbieten, in das System mit zu integrieren. Dies macht eine Aussage über eine Anzahl an einzubindenden Komponenten nicht möglich. Daher wird in der Kategorie *Einbindung von Komponenten* zwischen *Vielzahl* und *wenig* differenziert. Wird in diesem Kontext von *Vielzahl* gesprochen, ist eine Einbindung von allen gängigen Smart Home-Komponenten und grundlegenden Systemen die Rede. Jeder in diesem Kapitel betrachtete Hersteller bietet eine Grundausstattung mit einer *Vielzahl* an verschiedenen Smart Home-Komponenten an, weshalb die Bezeichnung *wenig* bei dieser Auflistung nicht berücksichtigt wird. Grundlegend kann also gesagt werden, dass jeder Hersteller eine ausreichende Produktpalette besitzt, um den Bereich des Wohnens umfangreich abdecken zu können.

Bei der Kategorie *Softwareplattform* wird auf die Möglichkeiten der Darstellung des Smart Home-Systems eingegangen. Diese Kategorie geht mit der Kategorie der *Steuerung* einher. Wird beispielsweise eine Nutzung via Internetbrowser angeboten, kann davon ausgegangen werden, dass eine Nutzung mit allen gängigen internetkompatiblen Geräten möglich ist. Wird allerdings lediglich eine App angeboten, ist eine Steuerung über einen PC nur eingeschränkt möglich. Auch

hier ergeben sich bei den verschiedenen Herstellern lediglich geringe Unterschiede. Grundsätzlich bietet jeder Hersteller ähnliche Systeme an. Auffallend ist allerdings der Hersteller Telekom Deutschland, der als einziges Unternehmen eine kostenpflichtige App anbietet.

Die Kategorie *Kosten* (Grundausstattung) beinhaltet die auf den Herstellerseiten angegebenen Preise für eine Smart Home-Zentrale. Diese können je nach Zeitraum und Angeboten des Herstellers jedoch abweichen. Daher dient diese Kategorie dazu, einen Richtwert zu erhalten, der eine grobe Vergleichbarkeit der Kosten je Hersteller zulässt. Die Preisspanne der Systeme beträgt dabei zwischen 100 und 400 Euro.

Die Anzahl von Funkstandards und die Einbindung von Sprachassistenten, die jedes System nutzen kann, werden in der Kategorie *Schnittstellen* beschrieben. Ähnlich wie bei der Kategorie *Einbindung von Komponenten* ist, aufgrund der Anzahl der verschiedenen Erweiterungen und Einbindung möglicher Komponenten von Drittanbietern eine Aussage über eine konkrete Anzahl nicht möglich. Daher erfolgt bei dieser Kategorie ebenfalls eine Einteilung in *Vielzahl* und *wenig*. Wenn in diesem Kontext von *wenig* gesprochen wird, ist eine Einbindung von allen gängigen Smart Home-Komponenten und grundlegenden Systemen trotzdem möglich. Viele Hersteller bieten darüber hinaus allerdings noch weitere Funkstandards an, um Geräte von Drittanbietern in ihre Systeme einbinden zu können. Ist dies der Fall kann von *Vielzahl* gesprochen werden. Dies wird beispielsweise an dem Hersteller *BOSCH* deutlich. Dieser bietet keine Einbindung oder nur begrenzte Ansteuerung von Drittherstellern an (wie beispielsweise smarten Leuchten). Dementsprechend werden nur wenige Funkstandards unterstützt, diese sind jedoch ausreichend, um alle von *BOSCH* angebotenen Smart Home-Komponenten zu steuern.

Bei der *Erfassung der Energie* wird unterschieden zwischen einer einphasigen Messung von einzelnen Verbrauchern, wie beispielsweise durch Smart Plugs (Zwischenstecker) oder Unterputzaktoren (direkte Messung an Verbrauchern oder Steckdosen). Darüber hinaus gibt es Messgeräte, die ein- oder drei-phasige Ströme von ganzen Unterverteilungen im Haushalt direkt im Schaltschrank messen können. Je nach Ausführung können einzelne Stränge oder der gesamte Haushaltsverbrauch visualisiert werden.

Die Kategorie der *Speicherung / Visualisierung Energie* betrachtet dagegen nicht nur den momentanen energetischen Istzustand einzelner Geräte, sondern einen zeitlichen Verlauf des Energieverbrauchs. Dadurch können einzelne Geräte oder der Stromverbrauch des Gebäudes im Allgemeinen erfasst und über einen bestimmten Zeitraum visualisiert werden. Dadurch wird es dem Anwender möglich seinen Energieverbrauch über einen bestimmten Zeitraum zu betrachten. Wird in diesem Kontext von *möglich mit erhöhtem Aufwand und kostenpflichtiger Erweiterung* gesprochen, bieten Hersteller ein solches System zwar an. Allerdings ist dies nicht über ein Gerät möglich, dass grundlegend von dem jeweiligen Herstellersystem unterstützt wird. Dies wird lediglich über weitere Softwareplattformen und Einbindung andere Systeme von möglichen Drittanbietern erreicht. Das System ist also nicht grundlegend für eine solche Anwendung ausgelegt, kann aber mit passenden Komponenten dahingehend erweitert werden. Dementsprechend sind die Anschaffungskosten eines solchen Systems im Vergleich zu anderen Komponenten, die prinzipiell in dem Produktportfolio des Herstellers angeboten werden um einiges höher.

Die *Datenspeicherung und -sicherheit* beschreibt den Umgang mit den persönlichen Daten der Nutzer des Smart Home-Systems. Dabei wird zwischen *externer* und *interner* Datenspeicherung differenziert. Bei der *internen* Datenspeicherung werden die Daten lokal auf der jeweiligen Smart

Home-Zentrale gespeichert. Bei der *externen* Datenspeicherung werden die Daten in einer von dem Hersteller zur Verfügung gestellten Cloud gespeichert. Alle Hersteller geben an, dass eine erhöhte Sicherheit (beispielsweise Online-Banking-Standard) bezüglich des Datenumgangs- und der -speicherung eingehalten wird.

Bei der Betrachtung der funkbasierten Smart Home-Systeme wird deutlich, dass es eine Vielzahl an verschiedenen Herstellern mit unterschiedlichsten Produkten gibt. Dabei sind der grundlegende Aufbau der Systeme, die Produktpaletten sowie die Steuerung ähnlich. Allerdings besitzen manche Hersteller in verschiedenen Bereichen überdurchschnittliche Kompetenzen oder Alleinstellungsmerkmale. Allgemein wird ein breites Feld für verschiedenste Lösungsansätze im Bereich der funkbasierten Gebäudeautomationssysteme abgedeckt. Die Kategorie *Besonderheiten* geht auf mögliche Alleinstellungsmerkmale der Systeme oder des Herstellers ein.

Tabelle 2: Gesamtübersicht betrachteter funkbasierter Gebäudeautomationssysteme (Stand: Januar 2020)

Smart Home-System	Qivicon	BOSCH Smart Home	ROCKETHOME SmartHome	TYDOM 1.0	homee	Magenta SmartHome	Coqon	FIBARO	wibutler
Einbindung von Komponenten	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl
Einbindung dritter Hersteller	möglich	begrenzt	möglich	begrenzt	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
Softwareplattform	kostenlose App / Browser	kostenlose App / Browser	kostenlose App / Browser	kostenlose App	kostenlose App / Browser	kostenpflichtige App	kostenlose App / Browser	kostenlose App / Browser	kostenlose App
Steuerung	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet
Kosten ⁵ (Grundaustattung)	130,00 Euro	99,95 Euro	249,00 Euro	109,00 Euro	129,00 Euro	99,99 Euro	399,00 Euro	400,00 Euro	378,00 Euro
Schnittstellen	Vielzahl	wenig	Vielzahl	wenig	Vielzahl	Vielzahl	wenig	Vielzahl	Vielzahl
Erfassung Energie	Smart Plug, Unterputz	Smart Plug	Smart Plug, Unterputz, Schaltschrank	Smart Plug	Smart Plug, Unterputz, Schaltschrank	Smart Plug, Unterputz	Smart Plug, Unterputz	Smart Plug, Unterputz, Schaltschrank	Smart Plug, Unterputz, Schaltschrank
Speicherung / Visualisierung Energie	möglich	nicht möglich	möglich ⁶	möglich ³	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
Datenspeicherung und -sicherheit	extern, hoch	lokal, hoch	extern, hoch	lokal, hoch	lokal, hoch	extern, hoch	extern, hoch	extern, hoch	lokal, hoch
Besonderheiten	White Label	/	White Label	Smart Home-Schulungen	Nachrüstbarkeit Funkstandards	Nachrüstbarkeit Funkstandards, Carconnect	/	Programmierlogiken umsetzbar	Schnittstelle Heizkessel

⁵ Unverbindlicher Verkaufspreis

⁶ Möglich mit erhöhtem Aufwand und kostenpflichtiger Erweiterung

2.3.3 Definition: Energiemanagementsysteme

Im durchgeführten Technologie Screening wurde die Kategorie des Energiemanagementsystems (kurz: EMS) betrachtet, siehe in Abbildung 5 schematisch abgebildet. Dort ist das vernetzte Zusammenspiel von vielen smarten Technologien sowie dezentralen Erzeugungs- und Speichertechnologien im Haushalt dargestellt. Mit Hilfe von internen und externen Informationen kann ein EMS energieintensive Haushaltsgeräte steuern. Interne Informationen sind beispielsweise gemessene Sensorwerte, die Auskunft über Gerätezustände, aktuelle elektrische Verbräuche von Geräten sowie das Produktionsniveau von Erzeugern geben. Externe Informationen die ein EMS nutzen kann, stammen aus Daten, die nicht innerhalb der Gebäudehülle erfasst werden können. Dies sind z. B. Wetterdaten für Prognosen zur Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaikanlagen.

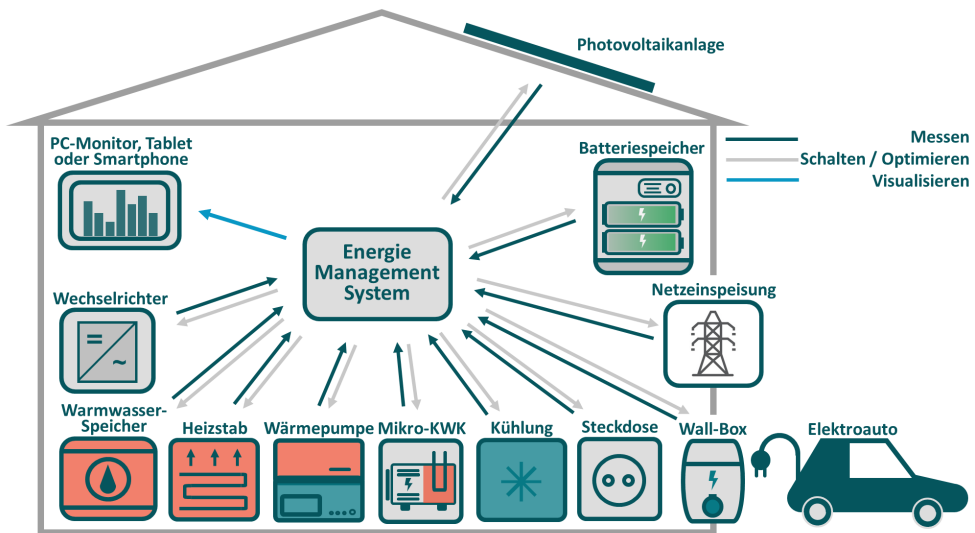


Abbildung 5: Schematische Darstellung Energiemanagementsystem Haushalt

Weitere Daten lassen sich durch gebäudeinterne Informationen gewinnen (Allerding, 2014):

- aktueller sowie prognostizierter Verbrauch
- aktuelle sowie prognostizierte Erzeugung
- Nutzungspräferenzen oder Programmierungen
- spezifische Messdaten (z. B. Raumtemperatur, Luftfeuchte und -qualität etc.)

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 (50 Hz) durch den Netzbetreiber oder Aggregatoren⁷ optimiert werden.

⁷ Als Aggregatoren werden Akteure bezeichnet, die Energie handeln und liefern ohne dabei eigene Bilanzkreise zu bewirtschaften. Ihr Geschäftsmodell besteht vor allem darin, Energieerzeugungsanlagen, flexible Verbraucher und Speichersysteme zu poolen und zu vermarkten. Sie skalieren damit kleine Anlagen auf ein handelbares Volumen EnergieAgentur.NRW GmbH (2020).

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.

Zunächst werden typische Energieerzeuger und -verbraucher eines Haushaltes v. a. hinsichtlich ihrer Eignung für das Energiemanagement untersucht und beschrieben werden. Die Eignung lassen sich durch die zuvor eingebrachten Kriterien der Steuerbarkeit und der zeitlichen Verfügbarkeit diskutieren. Dahingehend lassen sich alle Haushaltskomponenten in steuerbare sowie nicht-steuerbare unterteilen, siehe Glossar.

Im nachfolgenden wurden auf dem Markt erhältliche EMS untersucht und deren Funktionen aufgelistet, dabei wurde darauf geachtet nach Möglichkeit allumfassende Systeme, die v.a. elektrische Energieströme zentral verwalten, aufzeichnen und auf dieser Grundlage managen können.

2.3.4 Untersuchungsergebnisse Energiemanagementsysteme

Die Zusammenfassung der Kategorie der *Energiemanagementsysteme* ist in Tabelle 3 zu sehen. Diese zeigt die relevanten Eigenschaften der einzelnen Managementsysteme nochmals in zusammengefasster Form. Dabei wird auf die technischen Eigenschaften sowie auf die Kosten der Systeme eingegangen.

In der Kategorie *Einbindung von Anwendungsbereichen* wird beschrieben, wie breit das jeweilige Energiemanagementsystem aufgestellt ist und wie viele technischen Eigenschaften dieses besitzt. Hervorzuheben ist dabei das System *Smart Chap* des Herstellers *Sharp Business Systems*.

Bei der Kategorie *Softwareplattform* wird auf die Möglichkeiten der Darstellung des Energiemanagementsystems eingegangen. Diese Kategorie geht mit der Kategorie der *Steuerung* einher. Ähnlich zur Gebäudeautomation, wenn beispielsweise eine Nutzung via Internetbrowser angeboten, kann davon ausgegangen werden, dass eine Nutzung mit allen gängigen internetkompatiblen Geräten möglich ist. Wird allerdings lediglich eine App angeboten, ist eine Steuerung über einen PC nur eingeschränkt möglich. Auch hier ergeben sich bei den verschiedenen Herstellern lediglich geringe Unterschiede. Grundlegend bietet jeder Hersteller ähnliche Systeme an. Zusätzlich bieten zwei Hersteller einen Touchdisplay mit integrierter Software für die Steuerung ihres Systems an.

Die Kategorie *Kosten* (Grundausstattung) beinhaltet die auf den Herstellerseiten angegebenen Preise für ein Hutschienennetzteil (Steuerzentrale). Diese können je nach Zeitraum und Angeboten des Herstellers jedoch abweichen. Daher dient diese Kategorie dazu, einen Richtwert zu erhalten, der eine grobe Vergleichbarkeit der Kosten je Hersteller zulässt. Die Preisspanne der Systeme beträgt dabei zwischen 350 und 650 Euro. Dabei handelt es sich nur um die Steuerungszentrale zusätzliche Komponenten (Aktoren und Sensoren) sind dabei nicht mitinbegriffen.

Die Kategorie *Kommunikation* teilt sich in zwei Bereiche auf. Zum einen wird auf die Anzahl der Möglichkeiten der Kommunikation zwischen Steuerzentrale und Endgeräten eingegangen, die standardmäßig von dem jeweiligen Hersteller angeboten und in dem System implementiert ist. Zum anderen werden die Anzahl an Erweiterungsmöglichkeiten bezüglich Kommunikation zwischen der Steuerzentrale und den Endgeräten vorgestellt. Dabei erfolgt ebenfalls eine Differenzierung zwischen funk- und leitungsgebundenen Energiemanagementsystemen.

Die Anzahl von Digital- und Analogeingängen, Anschlussklemmen, Ethernet-Schnittstellen sowie I/O-Extendern wird in der Kategorie *Schnittstellen* beschrieben. Aufgrund der Anzahl der verschiedenen Erweiterungen und Einbindung unterschiedlichster Komponenten mit unterschiedlichen Anforderungen ist eine Aussage über eine konkrete Anzahl nicht möglich. Daher erfolgt bei dieser Kategorie ebenfalls eine Einteilung in *Vielzahl* und *wenig*. Wenn in diesem Kontext von *wenig* gesprochen wird, ist eine Einbindung von allen angebotenen Anwendungen und grundlegenden Systemen trotzdem möglich. Viele Hersteller bieten darüber hinaus allerdings noch weitere Schnittstellen an, um jegliche Eventualitäten bei Aufbau des Systems, Anwendung der Komponenten und Anzahl der einzubindenden Anwendungsbereiche abzudecken.

Auch bei der Betrachtung der Energiemanagementsysteme wird deutlich, dass der Aufbau der Systeme, die Produktpaletten, die Funktionen der Komponenten sowie die Steuerung des Systems grundlegend ähnlich aufgebaut sind. Daher geht die Kategorie *Besonderheiten* auf mögliche Alleinstellungsmerkmale der Systeme oder des Herstellers ein.

Tabelle 3: Gesamtübersicht betrachteter Energiemanagementsysteme für Haushalte (Stand: Januar 2020)

EMS	e.manager nd	SEM	Sunny Home Manager 2.0	Smart Chap	smart1 pro- fessional	EnergyMan- ager	homee Ener- giemanager	Energiema- nager Pro	OpenEMS
Kategorie	funk- und lei- tungsgebun- den	funk- und lei- tungsgebun- den	funkbasiert	funk- und lei- tungsgebun- den	funkbasiert	funkbasiert	funkbasiert	leitungsge- bunden	leitungsge- bunden
Einbindung von Anwendungsbe- reichen	9	8	9	10	9	7	9	6	7
Softwareplat- form	Browser	kostenlose App / Touch- display	Browser	kostenlose App / Browser	Browser / Touchdisplay	kostenlose App / Browser	kostenlose App	Touchdisplay	Browser
Steuerung	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet, PC	Smartphone, Tablet	Konfiguratio- nen mittels USB via PC	Smartphone, Tablet, PC
Kosten⁸ (Grundausst- tung)	605,00 Euro	379,00 Euro	590,00 Euro	/	/	539,00 Euro	379,00 Euro	450,00 Euro	/
Kommunikation (Standard)	1	3 funkbasiert	1	1 leitungsge- bunden	0	0	1	1	1
Kommunikation (Erweiterbar)	2	2 funkbasiert 1 leitungsge- bunden	1	2 funkbasiert	2	3	3	0	/
Schnittstellen	Vielzahl	Vielzahl	wenig	Vielzahl	Vielzahl	Vielzahl	wenig	wenig	Vielzahl
Besonderheiten	Einbindung dyn. Strom- / Netztarife	Einbindung dyn. Strom- / Netztarife	Einbindung dyn. Strom- / Netztarife	Einbindung dyn. Strom- / Netztarife	/	/	Einbindung dyn. Strom- / Netztarife	/	Offene API (Open Source)

⁸ Unverbindlicher Verkaufspreis

2.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse des Technologie-Screenings für Smart Energy Technologien in Haushalten zeigen, dass das gesamte Zusammenspiel von physischen Energieprodukten mit einer zusätzlichen Konnektivität durch IKT-Komponenten den Aufbau eines Smarten Energie-Produkt-Service-Systems ermöglicht. Im Rahmen der Analyse von unterschiedlichen Smart Energy Technologien für den Haushaltsbereich sind Kategorien aufgestellt worden. Als „*smarte*“ Technologien wurden Monitorings- und Gebäudeautomations-Systeme sowie Energiemanagementsysteme eingestuft.

Aufgefallen bei den neun betrachteten Gebäudeautomationssystemen (Smart Home) ist, dass diese nicht nur primär Energiethemen abdecken, sondern auch stark im Komfort- und Sicherheitsbereich vertreten sind. Den größten Einfluss auf den Energieverbrauch in Haushalten liefern Energiemanagementsysteme, welche die Eigenschaften von Smart Home- und Monitoring-Systemen sowie die Ansteuerung von Erzeugung, Verbrauch und Speicherung übernehmen. Da diese Art an Systemen noch selten vertreten sind, wurden exemplarisch neun Haushalts-Energiemanagementsysteme untersucht. Dabei wurden vier Kriterien zur Bewertung des Entwicklungsstandes aufgestellt:

- Anwendbarkeit im Haushaltsbereich,
- Energieeffizienzpotenzial und Mehrwerte,
- Kompatibilität und Schnittstellen,
- Kosten

Hierbei zeigte sich, dass die Hauptfunktionalität von Energiemanagementsystemen die Visualisierung von Energieverbräuchen ist, die Funktion der Ansteuerung ist in der Regel nur mit kompatiblen Geräten möglich, obwohl es eine Vielzahl an Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen auf dem Markt gibt. Durch proprietäre Systeme wird der Nutzen für Haushaltsbewohner (z. B. Nachrüstbarkeit) verschlechtert. Die Energieeinsparungen konnten nicht quantifiziert werden, dennoch werden Einsparungen und eine Eigenverbrauchsoptimierung für Haushalte durch eine sinnvolle Kopplung von Strom und Wärme durch EMS vermutet.

3 Smart Energy-Geschäftsmodelle

Die digitale Transformation der Energiewirtschaft verändert, welche Geschäftsmodelle auf Basis von energie-bezogenen Produkten und Services für Haushaltskunden*innen angeboten werden. Um diese Veränderung genauer verstehen zu können, bedarf es einer Übersicht der, in der Energiewirtschaft etablierten, Smart Energy-Geschäftsmodelle. Im folgenden Abschnitt werden daher zunächst die Veränderungen des energie-bezogenen Wertschöpfungsprozesses grob skizziert und anschließend Smart Energy-Produkte und Smart Energy-Services als Kern von Smart Energy-Geschäftsmodellen in einen Zusammenhang gebracht. Abschließend werden im Rahmen einer Marktanalyse acht Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen vorgestellt, die den aktuellen Status-Quo repräsentieren.

Die vorherrschenden, traditionellen Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft basieren auf der Massenproduktion von Energie (z. B. Strom, Wärme) und der Lieferung zu einem bestimmten Preis pro Kilowattstunde. Der Wertschöpfungsprozess beginnt bei den zentralen Großkraftwerken mit der Stromerzeugung. Von dort wird der Strom in das Netz geleitet, weiter in Strommärkte und führt dann über Übertragungsnetze mit Hochspannung zu den Verteilungnetzen, die den Endkunden mit Niederspannungsstrom versorgen. Im Stromeinzelhandel wird der produzierte Strom an die Haushalte verkauft. Dieser Teil der traditionellen Wertschöpfungskette besteht hauptsächlich aus Verwaltungsaufgaben. Hierzu gehören beispielweise auch die Messung und Abrechnung. Der letzte Schritt in der Energiewertschöpfungskette ist der Verbrauch (Richter, 2012).

Die Energiewertschöpfungskette wandelt sich aufgrund der Zunahme des bidirektionalen Informationsflusses zwischen dezentralisierten Energieressourcen und Akteuren in ein Smart Energy-Wertschöpfungsnetzwerk; vgl. Abbildung 6 (IEA, 2015).

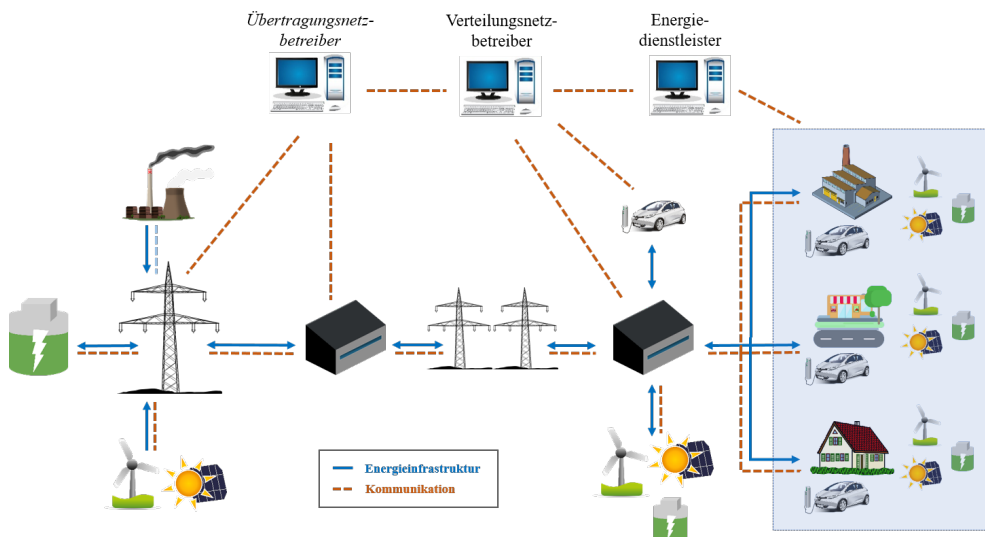


Abbildung 6: Smart Energy-Wertschöpfungskette (in Anlehnung an IEA (2015))

Mit den aufkommenden Smart Grids und Smart Energy-Technologien erfährt die traditionelle Wertschöpfungskette verschiedene Veränderungen, die sich auf private Haushalte auswirken.

Durch die Zunahme von volatilen erneuerbaren Energien gewinnt die Laststeuerung privater Haushalte an Bedeutung. Darüber hinaus entstehen neue Märkte für den Handel, auf denen Verbraucher und Aggregatoren Energie handeln (Greer et al., 2014). Private Haushalte konsumieren nicht nur, sondern erzeugen auch ihren eigenen Strom, verwalten und speichern diesen. Damit werden private Haushalte zu "Prosumer" (d. h. produzierende Konsumenten). Dies bietet neue Möglichkeiten zur Bereitstellung von Dienstleistungen für Privatkunden entlang der Erzeugung, der Versorgung und des Verbrauchsprozesses. Beispiele für solche Dienstleistungen sind Beratung, Installation, Finanzierung, Betrieb, Wartung und Garantien (Richter, 2012). Letztlich werden neben Systemen zur Stromerzeugung (bspw. PV-Anlagen) auch Speichersysteme für Haushalte relevant (IEA, 2015).

Der Zweck von Geschäftsmodellen ist die Darstellung der Wertschaffung, Wertübertragung und der Werterfassung. Geschäftsmodelle können somit als eine Schablone der Geschäftslogik von Unternehmen betrachtet werden (Osterwalder, 2004; Shafer et al., 2005). Sie sind ein Werkzeug zur Beschreibung der Art und Weise, wie ein Unternehmen aus seinen Geschäftsaktivitäten Umsätze generiert (Teece, 2010). Geschäftsmodelle sind hilfreich, um diese Aktivitäten und Komponenten zu erkennen, sie zu analysieren und Handlungen daraus abzuleiten (Osterwalder, 2004).

Für den Entwurf und die Beschreibung eines Geschäftsmodells und seiner Komponenten hat die akademische Literatur mehrere Konzeptualisierungen vorgeschlagen (Zott et al., 2011). Ein Beispiel hierfür ist der Business Model Canvas von Osterwalder & Pigneur (2013), welcher in Abbildung 7 abgebildet ist.



Abbildung 7: Business Model Canvas nach Osterwalder & Pigneur (2013)

Obwohl die einzelnen Komponenten der Konzeptualisierungen sich im Detail unterscheiden, werden oft gemeinsame Dimensionen als übergreifende und konstituierende Bausteine eines Geschäftsmodells zusammengefasst (Osterwalder et al., 2005; Peters et al., 2015). Diese vier Bausteine sind das Wertversprechen, die Werterschaffung, das Wertnetzwerk und die Werterfassung. Das Wertversprechen beschreibt die Produkt- und Service-Bündel, die einem spezifischen Kundensegment angeboten werden und den damit verbundenen Wert. Die Werterschaffung ergibt sich aus der Kombination von unternehmerischen Aktivitäten und vorhandenen Ressourcen. Das Wertnetzwerk nimmt im Zusammenhang mit IoT-Geschäftsmodellen eine zunehmend große Rolle ein, weil aufgrund der steigenden Komplexität von smarten Produkten Partner, Stakeholder

und Konsumenten stärker zusammenarbeiten müssen. Die Werterfassung definiert die Einnahmequellen, die Profitstrategien und betrachtet die Kostenstruktur (Paukstadt et al., 2019).

3.1 Smart Energy-Services und Geschäftsmodelle

Smart Energy-Services benötigen als technische Grundlage Smart Energy-Produkte, auf welchen sie ausgeführt werden. Daher sind Smart Energy-Services und Smart Energy-Produkte untrennbar und können nur schwer unabhängig voneinander betrachtet werden. Smarte Produkte sind solche, die aus physischen Objekten bestehen und smarte (IKT-)Komponenten integrieren (vgl. Abbildung 8).

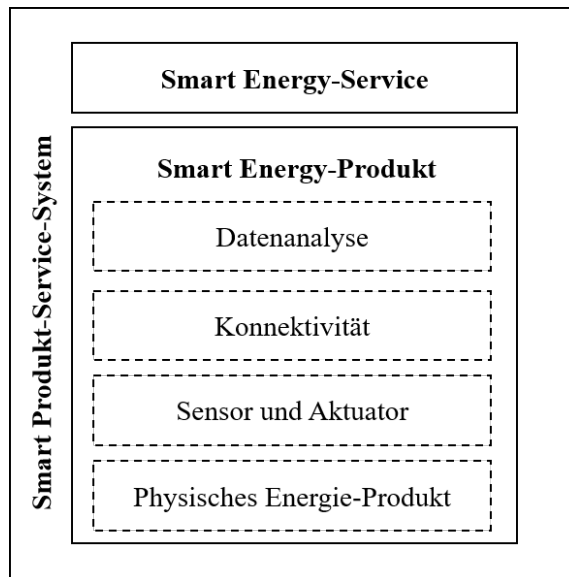


Abbildung 8: Smart Energy-Services und Smart Energy-Produkte nach Paukstadt et al. (2019)

Zusätzlich zeichnen sich Smart Energy-Produkte durch die Bestandteile Bewusstsein und Konnektivität aus. Damit wird das Sammeln von Daten aus der Umwelt (Sensoren), die Interaktion mit dieser (Aktuatoren) und die Kommunikation mit anderen Objekten (Konnektivität) über Kommunikationsnetzwerke (z. B. Bluetooth, WLAN, LoRaWAN) ermöglicht. Erst durch das Hinzufügen von IKT-Komponenten zu physischen Produkten wird die Ausführung von Smart Energy-Services ermöglicht. Einer der wesentlichen Unterschiede von Smart Energy-Services zu traditionellen Dienstleistungen im Energiesektor ist die veränderte Rolle des Konsumenten. Der im Teilprojekt „VISE-Haushalte“ im Fokus stehende private Haushalt konsumiert nicht nur die Waren oder Dienstleistungen, sondern ist ein Teil der Wertschöpfung; sowohl von Daten als auch von Energie selbst. Diese Beteiligung des Nutzers an der Wertschöpfung wird in der Dienstleistungsforschung „Value Co-Creation“ genannt (Vargo & Lusch, 2004).

Smart Energy-Geschäftsmodelle sind IoT-basierte Geschäftsmodelle in der Energieindustrie, die auf Smart Energy-Produkten (bspw. intelligente Stromzähler) basieren und datenbasierte digitale Technologien nutzen, um Werte zu schaffen und (meist in Form von Zahlungsströmen) zurückzuführen. Dies geschieht indem Kunden verbesserte oder neue (energie-bezogene) Wert-

versprechen angeboten werden. Ein Beispiel für ein Smart Energy-Geschäftsmodell ist der Verkauf von energie-bezogenen Smart Home-Produkten. Typische Wertversprechen von Smart Energy-Produkten und -Services sind „Nachhaltigkeit“, „Autarkie“ oder „Strom sparen“. Smart Energy-Technologien können ebenso Erlösströme verändern. Beispielsweise könnte auf Basis der gesammelten Daten eine innovative Schlüssel- bzw. Abrechnungsgröße des Energieverbrauchs anstelle der traditionellen Kilowattstunde verwendet werden. Durch eine Zusammenarbeit mit neuen potenziellen Partnern (Energiemarktplatzbetreibern, IoT-Startups etc.) könnte zum Beispiel das Wertnetzwerk erweitert werden. Die Integration von Smart Energy-Technologien kann insgesamt jeden der genannten Geschäftsmodellbausteine (Wertversprechen, Wertzeugung, Wertnetzwerk und Werterfassung) beeinflussen (Paukstadt et al., 2019).

3.2 Status Quo der Smart Energy-Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft

In den beiden nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die, in der Marktanalyse, identifizierten Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen vorgestellt und beschrieben, siehe Abschnitt 3.2.1. Anschließend werden die quantitativen Ergebnisse der Marktanalyse präsentiert und mögliche Handlungsoptionen für Smart Energy-Geschäftsmodelle diskutiert, siehe Abschnitt 3.2.2. Beide Abschnitte haben einen informierenden Charakter, sollen aber auch als Orientierung und Anregung für Unternehmen im Bereich Smart Energy dienen.

3.2.1 Smart Energy Geschäftsmodellarchetypen

Im Rahmen des Teilprojekts VISE-Haushalte wurden 175 Unternehmen von Juli 2018 bis März 2019 analysiert, die Smart Energy-Produkte und -Services für Privathaushalte anbieten. Unter den 175 Unternehmen befinden sich 56 Energieversorgern, 107 Smart Energy-Natives⁹ und 12 Quereinsteiger¹⁰. Nach einer Inhaltsanalyse der Geschäftsmodelle wurden acht Geschäftsmodellarchetypen abgeleitet, die in Abbildung 9 dargestellt sind (Chasin et al., 2020).

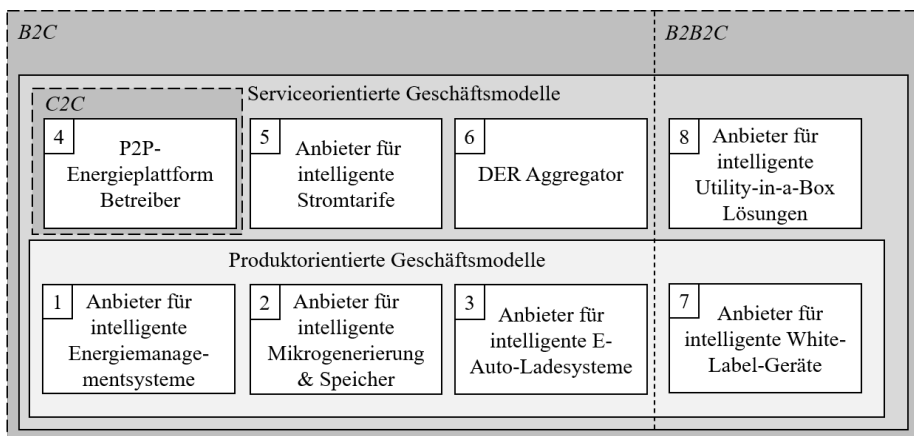


Abbildung 9: Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen (Chasin et al., 2020)

⁹ Da einige ursprüngliche Startups im Laufe der Jahre gewachsen sind und ihren Charakter als „Startup“ verloren haben, werden diese als sog. Smart Energy-Natives bezeichnet.

¹⁰ Dies sind Unternehmen, die zwar zum Teil in anderen Branchen etabliert sind, aber zum Zeitpunkt der Marktanalyse erst relativ neu in die Energiedomäne eingestiegen sind.

Die Archetypen beschreiben häufig wiederkehrende Geschäftsmodelltypen in der (endkundenorientierten) Smart Energy-Domäne. Abbildung 9 differenziert die acht Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen in produktorientierte oder serviceorientierte Geschäftsmodelle. Hierbei beziehen sich produktorientierte Geschäftsmodelle primär auf Verkauf, Verleih oder Leasing von (physischen) Smart Energy-Produkten. In der Regel werden diese zusätzlich durch physische Services unterstützt (z. B. Installationen oder Wartungen). Oft sind innerhalb eines produktorientierten Geschäftsmodells auch physische Produkte über digitale Services mit verschiedenen Applikationen kombiniert. Somit sind die Grenzen zwischen den verschiedenen Archetypen sowie deren Differenzierung bezüglich der Produkt- und Serviceorientierung nicht immer trennscharf. Bei serviceorientierten Geschäftsmodellen basiert das Konzept ebenfalls auf (physischen) Smart Energy-Produkten (z. B. intelligente Stromzähler). Jedoch entsteht ihr Nutzen hierbei primär durch zusätzliche digitale Services, wodurch die Dienstleistung im Vordergrund steht. Serviceorientierte Geschäftsmodelle beinhalten intelligente Lösungen für die Produktion, Verteilung und Versorgung von/mit Energie.

Im Folgenden sollen die acht Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen kurz vorgestellt werden:

1. Der Anbieter von intelligenten Energiemanagementsystemen verkauft, vermietet oder verleast intelligente Energieprodukte (z. B. intelligente Stromzähler) für das Energiemanagement in privaten Haushalten. Der Fokus liegt auf der Verbraucherseite.
2. Beim Geschäftsmodellarchetyp *„Anbieter intelligenter Mikrogenerierung und Speicher“* verkauft, vermietet oder verleast ein Unternehmen intelligente Kleinerzeugungsanlagen, z. B. PV-Systeme oder Kraft-Wärme-Kopplung-Systeme, an private Haushalte.
3. Der Anbieter von intelligenten E-Auto-Ladesystemen verkauft, vermietet oder verleast intelligente Ladesysteme für Elektroautos an private Haushalte. Über weitere Applikationen bieten Unternehmen intelligente Dienstleistungen, z. B. die Überwachung und Kontrolle des Abrechnungsprozesses und des Stromverbrauches, an.
4. Der vierte Archetyp ist der Peer-to-Peer (P2P)-Energieplattformbetreiber. Dieser Geschäftsmodellarchetyp ist serviceorientiert, weil nicht die Bereitstellung eines intelligenten Energieproduktes angeboten wird, sondern ein rein digitaler Dienst (z. B. der Betrieb eines Energiemarktes).
5. Der Anbieter von intelligenten Stromtarifen ist dem Geschäftsmodell eines traditionellen Stromversorgungsunternehmens ähnlich. Hierbei werden innovative Versorgungspläne angeboten, welche auf den Daten, die von intelligenten Energieprodukten gesammelt werden, basieren. Die Stromversorgung kann auch mit anderen Produkten und Dienstleistungen gebündelt werden (z. B. der Verkauf eines smarten Thermostats in Kombination mit einem intelligenten Energievertrag).
6. Der dezentrale Energiere Ressourcen (DER)-Aggregator ist ein weiterer Archetyp im serviceorientierten Bereich mit dem Ziel die Netzlast zu optimieren. Wenn das Stromnetz stark belastet ist, werden Smart Energy-Produkte vom Anbieter entweder selbst gesteuert oder die Verbraucher erhalten entsprechende Anreize. Der Endkunde liefert also Ressourcen (Flexibilität, selbsterzeugter Strom) und erhält einen Wertbetrag.

Die letzten beiden Archetypen sind sog. *„Business-to-Business-to-Consumer“* (B2B2C) Geschäftsmodellarchetypen. B2B2C-Modelle richten sich nur indirekt an den Endkunden. Hierbei verkauft ein Anbieter ein Produkt oder eine Dienstleistung an ein anderes Unternehmen. Bei

diesen Unternehmen handelt es sich häufig um Energieversorgungsunternehmen. Das Unternehmen bietet sodann das Produkt oder die Dienstleistung unter seinem Namen an die Endkunden an.

7. Neben der B2B2C-Charakteristik ist der Anbieter von für intelligenten White-Label-Geräten ein produktorientierter Geschäftsmodellarchetyp. Beispielsweise verkauft ein Startup Smart Home-Systeme an Stadtwerke, welche die Produkte unter ihren Markennamen an private Haushalte weiterverkaufen.
8. Bei diesem Archetyp werden energie-bezogene Software-Lösungen an Unternehmen aus der Energiebranche angeboten, wodurch Smart Energy-Geschäftsmodelle ermöglicht oder unterstützt werden. Beispielsweise bietet ein klassischer Energieversorger auf Basis einer "Utility-in-a-Box"-Lösung einen digitalen Marktplatz für lokal erzeugten Strom an und wird somit zum (P2P)-Energieplattformbetreiber für private Haushalte. Der Softwareanbieter profitiert z. B. von Lizenzgebühren.

3.2.2 Smart Energy-Marktanalyse

Die Studie von Chasin et al. (2020) untersuchte ferner die Häufigkeiten der zuvor abgeleiteten Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen auf dem Markt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

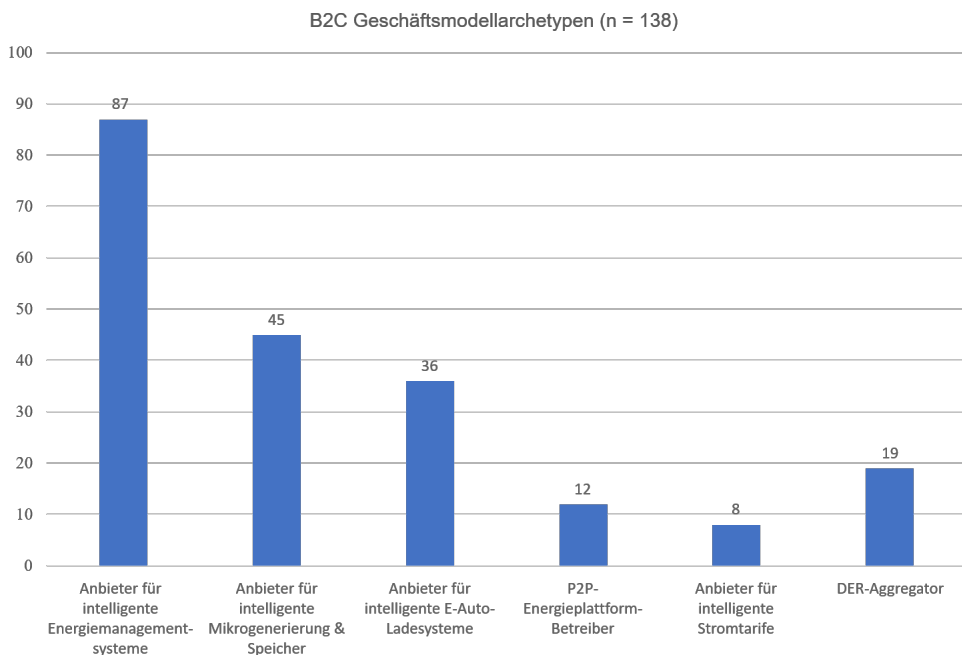


Abbildung 10: Absolute Häufigkeiten der identifizierten Geschäftsmodelltypen (B2C) (Chasin et al., 2020)

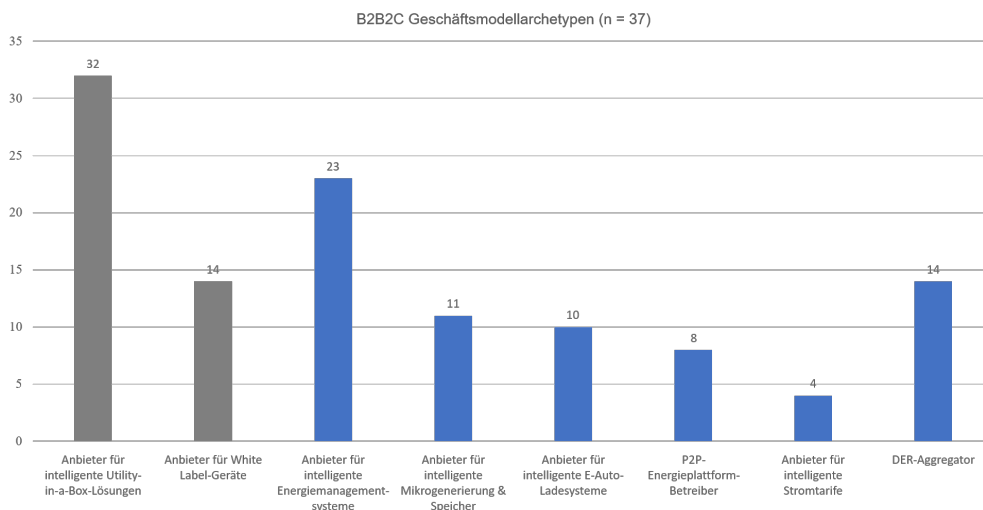


Abbildung 11: Absolute Häufigkeiten der identifizierten Geschäftsmodelltypen (B2B2C) (Chasin et al., 2020)

Mithilfe der durchgeführten Marktstudie konnten Erkenntnisse über die aktuelle Marktentwicklung erlangt werden. Einblicke in die Marktentwicklung lassen sich anhand der Häufigkeit der identifizierten Geschäftsmodellarchetypen zeigen: Vier der 56 einbezogenen Energieversorger bieten kein Smart Energy-Geschäftsmodell für Privatkunden an, während sieben Energieversorger das Smart Energy-Geschäftsmodell nur über ihre Tochtergesellschaften anbieten. Allerdings wird von 45 Energieversorgern mindestens einer der identifizierten Geschäftsmodellarchetypen entweder mit eigenen oder per White-Label-Lösungen angeboten. Insbesondere größere Energieversorger tendieren dazu, alle drei identifizierten produktorientierte Geschäftsmodellarchetypen abzudecken (d. h. Anbieter für intelligente Energiemanagementsysteme, Anbieter intelligenter Mikrogenerierung und Speicher sowie Anbieter für intelligente E-Auto-Ladesysteme). Für B2C wurden deutlich mehr produktorientierte (insgesamt 168) als serviceorientierte (insgesamt 39) Geschäftsmodelle gefunden. Im Gegensatz zu B2C wurden demgegenüber mehr serviceorientierte B2B2C-Geschäftsmodelle (32 Anbieter für intelligente Utility-in-a-Box-Lösungen) als produktbasierte B2B2C-Geschäftsmodelle (14 Anbieter für intelligente White-Label-Geräte) gefunden. Die B2C-Geschäftsmodelle, welche durch die B2B2C-Geschäftsmodelle ermöglicht oder unterstützt werden, spiegeln jedoch die Ergebnisse aus dem B2C-Markt wider. Ein wiederkehrendes Muster ist die Kombination bestimmter Smart Energy-Services und Smart Energy-Produkte (z. B. Demand-Response-Programme und intelligente Thermostate), weil Smart Energy-Services immer Smart Energy-Produkte als Grundlage brauchen (siehe Abschnitt 3.1), auf Basis derer sie funktionieren, und die entsprechenden Smart Energy-Produkte zum Teil noch nicht ausreichend in privaten Haushalten verbreitet sind (Chasin et al., 2020).

3.3 Zusammenfassung

Die Energiewertschöpfungskette wandelt sich aufgrund der Zunahme des bidirektionalen Informationsflusses zwischen dezentralisierten Energieressourcen und Akteuren in ein Smart Energy-Wertschöpfungsnetzwerk. Smart Energy-Services und Smart Energy-Produkte sind eng verzahnt und bilden die Grundlage für Smart Energy-Geschäftsmodelle. Geschäftsmodelle sind mehr als nur das reine Wertversprechen; hierzu zählen auch die Werterzeugung (z. B. Ressourcen), das Wertnetzwerk (z. B. Kooperationspartner) sowie die Werterfassung (z. B. Zahlungsmodelle). Auf Grund der technologischen und regulatorischen Veränderungen im Smart Energy-Wertschöpfungsnetzwerk wird es immer einfacher für Haushaltskund*innen, selber Strom zu erzeugen und in das Netz einzuspeisen. Dementsprechend hat das Wertnetzwerk in Smart Energy-Geschäftsmodellen eine besondere Rolle (Value Co-Creation).

Im Rahmen einer Marktanalyse von 175 Unternehmen wurden acht verschiedene Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen ausgearbeitet. Diese unterscheiden sich in ihrer Produkt- oder Serviceorientierung sowie in ihrer Rolle für den Endkunden, d. h. direkt (B2C bzw. C2C) oder indirekt (B2B2C). Der Smart Energy-Markt für Haushaltskund*innen besteht momentan eher aus produktorientierten Angeboten, entweder Smart Energy-Produkte als stand-alone oder in Verbindung mit Smart Energy-Services (sogenannte hybride Leistungsbündel). Dies mag auf den Umstand zurückgeführt werden, dass die Verbreitung von Smart Energy-Produkten auch im Vergleich zu anderen Ländern (z. B. Schweden und USA) noch nicht sehr fortgeschritten ist und somit die Grundlage für die Ausbreitung von losgekoppelten Smart Energy-Services fehlt.

Somit sollten sich Unternehmen zunächst auf die Verbreitung von Smart Energy-Produkten konzentrieren bzw. diese abwarten bevor sie passende Smart Energy-Services anbieten können. Ferner können Unternehmen, neben der reinen Revision ihrer aktuellen Geschäftsmodelle (bspw. durch die Automatisierung der Metering-Prozesse mit Hilfe von Smart Metern), neue Smart Energy-Geschäftsmodelle in ihr Angebotsportfolio aufnehmen. Entsprechend der steigenden Nachfrage nach E-Mobilität und der Selbsterzeugung von Strom, können Unternehmen z. B. als Anbieter von smarten Ladesäulen oder als P2P-Energieplattformbetreiber auftreten, um beispielsweise Angebot und Nachfrage innerhalb einer Energie-Community zu regulieren. Insbesondere größere Unternehmen können die vorgestellten Smart Energy-Geschäftsmodellarchetypen kombinieren, um gegenüber den Haushaltskund*innen ein, auf die Bedürfnisse der Haushalte abgestimmtes, Angebotsportfolio zu etablieren. Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieser Geschäftsmodelle ist eine Kooperation mit Startups bzw. die Nutzung von White-Label-Produkten und -Services, wenn beispielsweise die hierfür notwendigen Ressourcen nicht im Unternehmen selbst aufgebaut werden können (Chasin et al., 2020). Weitere Anreize für innovative Smart Energy-Geschäftsmodelle sind in Abschnitt 6.3 zu finden.

4 Empirische Untersuchungen in Miet- und Eigentümerhaushalten: Akzeptanz, Flexibilität und Investitionsentscheidungen

Private Haushalte sind für die Energiewende in Deutschland bisher zentral: Mit 30,2 % halten sie den mit Abstand höchsten Anteil installierter erneuerbarer Erzeugungskapazitäten, verglichen mit anderen Akteursgruppen.¹¹ Dennoch ist in den kommenden Jahrzehnten ein massiver Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten notwendig, um das Ziel der Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2050 zu erreichen: So erachten aktuelle Szenarien einen Zubau von z. B. jährlich 10 GW im Bereich PV bis 2030 als notwendig – wobei in den stärksten Ausbaujahren bisher bis zu 8 GW erreicht wurden (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2020). Deutlich wird daran: private Haushalte werden sogar noch stärker mobilisiert werden müssen, um die Klimaziele zu erreichen – beim Ausbau erneuerbarer Energien genauso wie bei der Reduktion von Verbräuchen. Gleichzeitig verändert sich die Energiewelt kontinuierlich im Vergleich zu den Anfängen des EEG. In der nun anstehenden Phase der Energiewende spielt die Digitalisierung z. B. eine zunehmend wichtige Rolle (Weigel & Fishedick, 2018). Die Einstellungen von privaten Haushalten, ihre Akzeptanz neuer technologischer Möglichkeiten, ihre handlungsleitenden Motive und Investitionspräferenzen geben folglich wichtige Aufschlüsse darüber, wie die Energiewende vorangetrieben werden kann, welche Geschäftsmodellinnovationen am Markt bestehen könnten und wo gegebenenfalls Anreizstrukturen verändert werden müssen, um gewünschte Investitionen auszulösen.

In Miet- und Eigentümerhaushalten bestehen jeweils sehr unterschiedliche Herausforderungen sowie Chancen. Miethaushalte sind mit dem klassischen Mieter-Vermieter Dilemma konfrontiert, wodurch größere Investitionen z. B. in Sanierungsmaßnahmen oder eigene Erzeugungsanlagen ausbleiben. Einerseits könnten flexible neue Technologien wie Smarte Thermostate zur Reduktion von Energieverbräuchen eingesetzt werden, die bei Umzug einfach mitgenommen werden können. Andererseits könnten z. B. zeitabhängige Strompreise netzdienliche Anreizstrukturen bieten, wodurch sich auch Miethaushalte aktiv in der Energiewende einbringen könnten (*demand side response*). Fraglich aber ist, ob solche Ansätze auf Akzeptanz in den Haushalten stoßen und welche Bedarfe bestehen.

Im Gegensatz zu Miethaushalten können Eigenheimbesitzern*innen im Elektrizitätsbereich beispielsweise nach eigenem Ermessen entscheiden, ob sie im Hinblick auf Energieanwendungen als passive Verbraucher oder als aktive Stromproduzenten am Strommarktgeschehen teilnehmen möchten. Für den letzteren Fall bieten sich Eigenheimbesitzern*innen diverse Alternativen: die Anschaffung eines Nano- oder Mikro-BHKWs, einer Brennstoffzelle oder einer Photovoltaikanlage mit oder ohne Batteriespeicher (vgl. Kapitel 2). Im Wärmebereich haben Eigenheimbesitzer*innen nach derzeitiger Rechtslage zwar keine Möglichkeit, als aktive Wärmeproduzenten am Wärmemarkt zu agieren, jedoch haben sie auch hier die Möglichkeit, sich zwischen verschiedenen technischen Wärmeanlagen (z. B. Gasbrennwertheizung, Solarthermie-Anlage, Wärmepumpe) bzw. einer Kombination verschiedener Wärmeanlagen zu entscheiden. Aufgrund fehlender Vergütungen bei Wärmeerzeugungsanlagen (z. B. im Sinne einer Einspeisevergütung) unterscheiden sich Entscheidungssituationen bei Wärmeerzeugungsanlagen im Vergleich zu

¹¹ Erhebung von trend:research für das Jahr 2020, einzusehen siehe Agentur für Erneuerbare Energien (2021).

Entscheidungssituationen bei Stromerzeugungstechniken darin, dass sie nicht zusätzlich oder ausschließlich auf die Motivation, eine Geldanlage tätigen zu wollen, zurückgeführt werden können.

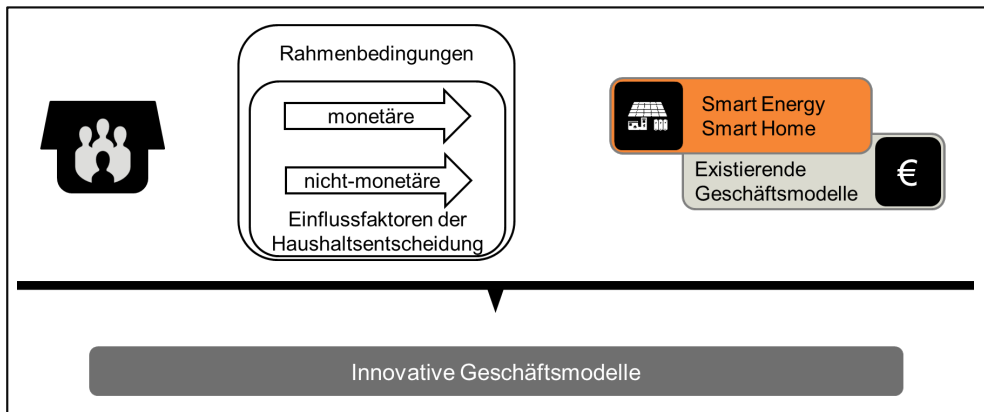


Abbildung 12: Haushaltsentscheidungen bei Anschaffungen von Smart Energy-Produkten und -Services

In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse empirischer Analysen zu ausgewählten Sachverhalten präsentiert (z. B. Akzeptanz von Smart Energy-Technologien (Abschnitt 4.1), Narrative von Smart Energy Early Adoptern (Abschnitt 4.2), Flexibilität im Energieverbrauchsverhalten (Abschnitt 4.3)), die auf (experimentellen) Umfragen basieren. Während in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 sowohl Miet- als auch Eigentümerhaushalte die Zielpopulation der Untersuchungen darstellen, fokussiert Abschnitt 4.4 ausschließlich auf die Untersuchung von Eigenheimbesitzer*innen. Die in Abschnitt 4.4 präsentierten empirischen Ergebnisse von Haushaltsbefragungen unter Eigenheimbesitzer*innen können in Ergänzung zu den ökonomischen Analysen (Kapitel 5) gesehen werden. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Abschnitt 4.4 und Kapitel 5 besteht in der Perspektive, in der ausgewählte Sachverhalte (z. B. Investition in Photovoltaikanlagen) betrachtet werden. Während in Abschnitt 4.4 die Betrachtung aus Sicht von Eigenheimbesitzer*innen untersucht wird, und damit die Subjektivität von Empfindungen und Bewertungen bei Adaptions- und Nutzungsentscheidungen bedacht werden, werden die ausgewählten Sachverhalte in Kapitel 5 aus Expertensicht nach objektiven ökonomischen Kriterien analysiert.

4.1 Smart Energy für Haushalte: Akzeptanz, Ko-Benefits und Marktdiffusion

Obwohl eine zunehmende Marktdiffusion von Smart Energy-Produkten in Haushalten festzustellen ist, besteht noch erhebliches Marktpotenzial (KfW, 2019). Die Einstellungen und Erwartungen von Konsument*innen können Rückschlüsse darauf geben, wie die Diffusion von Smart Energy-Technologien erhöht werden könnte.¹² Zur Untersuchung dieser Konsumentenpräferenzen wurde daher eine Online-Befragung von 700 Personen in NRW durchgeführt. Anhand eines Strukturgleichungsmodells wird analysiert, welche technologiespezifischen und persönlichkeitsbezogenen Überzeugungen die Intention beeinflussen, Smart Energy-Produkt-Servicebündel

¹² Allerdings besteht aktuell keine empirische Evidenz, dass Smart Energy-Technologien in der Anwendung tatsächlich Energieverbräuche reduzieren Nicholls et al. (2020), auch, wenn z. B. für Smarte Thermostate *theoretisch* Einsparungen zu erwarten sind Quack et al. (2019).

nutzen zu wollen (im Folgenden als Smart Energy-Angebote bezeichnet). Daraus werden Implikationen für eine nachfrageorientierte (demand-pull) Diffusionsstrategie skizziert.

Drei Aspekte stehen dafür im Vordergrund der Untersuchung. Erstens: Welche technologiespezifischen und persönlichkeitsbezogenen Überzeugungen beeinflussen die Intention, das jeweilige Smart Energy-Angebot nutzen zu wollen? Zweitens wird für die nächsten Jahre eine starke Nachfrage nach Smart Home-Anwendungen insbesondere im Bereich des „Ko-Benefits“ Sicherheit, aber auch im Bereich Gesundheit erwartet (BMW, 2017a). Kann diese Marktentwicklung für Smart Energy-Angebote genutzt werden? Das wäre der Fall, wenn eine erhöhte Affinität für Smart Home Sicherheits- und Gesundheitsprodukte die Intention von Konsument*innen beeinflusst, Smart Energy-Angebote nutzen zu wollen. Smart Energy-Angebote könnten dann gezielt als Teil umfassenderer Smart Home-Pakete fungieren oder sollten zumindest technisch kompatibel und anschlussfähig an Smart Home Sicherheits- und Gesundheitsprodukte sein. Drittens wird eine vergleichende Analyse von zwei unterschiedlichen idealtypischen Smart Energy-Angeboten durchgeführt – einem Smarten Heizungspaket sowie einem Smart Meter-Angebot mit Feedbackfunktionen. Wird die Intention, das jeweilige Smart Energy-Angebot zu nutzen, von jeweils unterschiedlichen Einstellungen und Erwartungen beeinflusst? Aus der vergleichenden Analyse können angebotsspezifische Implikationen für Strategien zur Diffusion von Smart Energy-Produkten abgeleitet werden.

4.1.1 Befragung und Modell

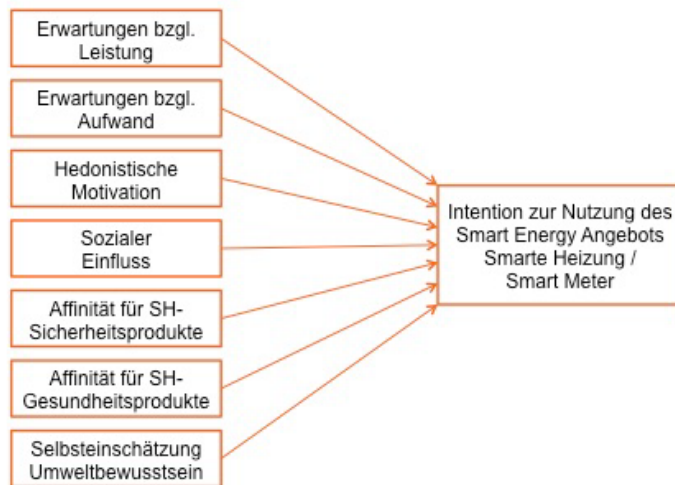
Die Online-Befragung wurde im Juni 2019 von einem Befragungsunternehmen durchgeführt. Befragt wurden Personen im Alter zwischen 18 und 69 Jahren. Es wurden Personen mit unterschiedlichen Bildungsabschlüssen sowie Haushaltseinkommen eingeschlossen. Jeweils 50% der Befragten sind weiblich bzw. männlich. Die Verteilung nach Alter, Geschlecht und höchstem Bildungsabschluss ist repräsentativ für NRW.

Ausgangspunkt des Befragungsmodells sind die viel rezipierten Arbeiten von Venkatesh et al. (2003) und Venkatesh et al. (2012) zur Akzeptanz und Nutzung von Informationstechnologien. Die von Venkatesh et al. (2012) entwickelten Strukturgleichungsmodelle werden bereits in anderen Studien im Kontext von Smart Energy-Angeboten adaptiert und erweitert (Ahn et al., 2016; Baudier et al., 2020; Girod et al., 2017). Strukturgleichungsmodelle werden verwendet, um die Beziehungen zwischen mehreren latenten Variablen zu erklären (Hair et al., 2014). Latente Variablen können nicht unmittelbar gemessen werden, wie z. B. „Umweltbewusstsein“. Nachfolgend sind die in dieser Studie gemessenen latenten Variablen aufgeführt, die sich auf technologiespezifische und persönlichkeitsbezogene Überzeugungen beziehen.

Tabelle 4: Definitionen der gemessenen Variablen

<i>Erwartung bzgl. Leistung:</i>	Das Ausmaß, mit dem eine Person glaubt, dass das Smart Energy-Angebot für sie oder ihn im Alltag hilfreich ist.
<i>Erwartungen bzgl. Aufwand:</i>	Das Ausmaß mit dem erwartet wird, wie leicht die Nutzung des Smart Energy-Angebots der Person fallen wird.
<i>Hedonistische Motivation:</i>	Das Ausmaß an Spaß oder Freude, die bei der Nutzung des Smart Energy-Angebots erwartet wird.
<i>Intention zur Nutzung:</i>	Das Ausmaß mit dem eine Person vor hat, das Smart Energy-Angebot nutzen zu wollen.
<i>Sozialer Einfluss:</i>	Das Ausmaß, mit dem das Interesse einer Person an Smart Home durch andere Personen oder Medien geweckt wird.
<i>Affinität für Smart Home Sicherheitsanwendungen:</i>	Das Ausmaß der Affinität einer Person für Smart Home Sicherheitsprodukte.
<i>Affinität für Smart Home Gesundheitsprodukte:</i>	Das Ausmaß der Affinität einer Person für Smart Home Gesundheitsanwendungen.
<i>Umweltbewusstsein:</i>	Das Ausmaß mit dem sich eine Person für umweltbewusst hält.

Zentral für diese Untersuchung ist die Frage, welche technologiespezifischen und persönlichkeitsbezogenen Überzeugungen der Befragten die Intention beeinflussen, das Smart Energy-Angebot nutzen zu wollen. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht das Modell.



→ = zu überprüfende Hypothese, dass ein begünstigender Einfluss auf die Intention zur Nutzung des jeweiligen Smart Energy Angebots bestehe

Abbildung 13: Das Messmodell

Die Befragten wurden zufallsbasiert in zwei Gruppen eingeteilt (quotiert nach Alter, Geschlecht und Bildung). Einer Gruppe wurde das Smart Energy-Angebot „*Smartes Heizungspake*“ angezeigt, der anderen das Smart Meter-Angebot. Die Befragung bezieht sich auf das jeweilige Angebot, wobei beiden Gruppen die identischen Fragen gestellt wurden. Die beiden idealtypischen

Smart Energy-Angebote wurden auf der Grundlage eines Marktscreenings in Deutschland entwickelt. Das Angebot „*Smartes Heizungspaket*“ umfasst u. a. die automatisierte Steuerung von Heizungen und Fenstern mit Fenstersensoren, das Erlernen von Gewohnheiten und Präferenzen der Bewohner*innen, um die Heizung entsprechend einzustellen, sowie Steuerungsmöglichkeiten über eine App. Das idealtypische Angebot „*Smart Meter*“ hingegen ermöglicht es u. a. den Stromverbrauch insgesamt sowie einzelner Haushaltsgeräte in Echtzeit zu ermitteln, über eine App personalisierte Ratschläge zur Senkung des Stromverbrauchs zu erhalten und eingesparte CO₂-Emissionen angezeigt zu bekommen. Das Angebot liefert 100 % Ökostrom.

4.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen erstens, dass die Nutzungsintention angebotsspezifisch ist und zweitens, dass die Affinität für Sicherheits- und Gesundheitservices keinen Einfluss auf die Nutzungsintention der Smart Energy-Angebote hat.

Das Modell wurde auf der Grundlage verschiedener statistischer Tests ausgewertet und angepasst. Das finale Modell genügt allen gängigen Testanforderungen. Die nachfolgenden Grafiken veranschaulichen die Ergebnisse. Es zeigt sich, dass, abhängig vom jeweiligen Smart Energy-Angebot, unterschiedliche technologiespezifische und persönlichkeitsbezogene Überzeugungen als Einflüsse auf die Intention zur Nutzung signifikant sind. Jeweils unterschiedliche Überzeugungen und Erwartungen der Befragten beeinflussen somit die Intention, das Smart Energy-Angebot nutzen zu wollen. Für das Heizungspaket erweisen sich die technologiespezifischen Überzeugungen „*Erwartungen bezüglich Leistung*“ ($p < 0,01$) sowie „*Sozialer Einfluss*“ ($p < 0,01$) als signifikante Einflüsse. Das bedeutet: Fallen die Erwartungen von Befragten bezüglich der Leistung des Smart Energy-Angebots höher aus, beeinflusst das ihre Intention, das Smart Energy-Angebot nutzen zu wollen, positiv. Für das Smart-Meter-Angebot beeinflussen hingegen die technologiespezifischen Überzeugungen „*Hedonistische Motivationen*“ ($p < 0,01$) und „*Sozialer Einfluss*“ ($p < 0,01$) sowie die persönlichkeitsbezogene Überzeugung „*Selbsteinschätzung Umweltbewusstsein*“ ($p < 0,01$) die Intention, das Angebot nutzen zu wollen.

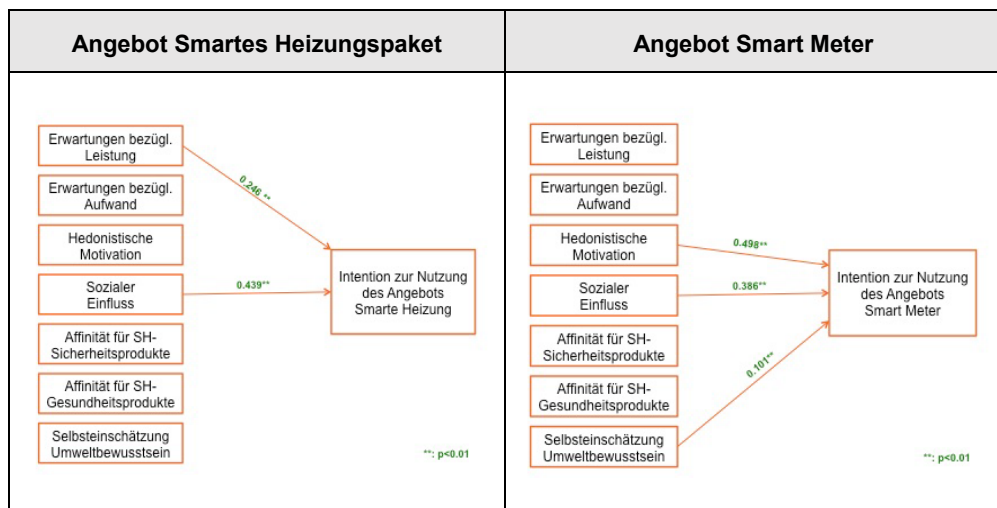


Abbildung 14: Einflüsse unterschiedlicher Einstellungen auf die Intention, das Angebot nutzen zu wollen

Bei beiden Smart Energy-Angeboten begünstigen soziale Einflüsse die Intention, das Angebot nutzen zu wollen, in signifikanter Weise. Befragte, bei denen andere Personen oder Medien das Interesse an Smart Home geweckt haben, weisen eine erhöhte Intention auf, das Smart Energy Angebot nutzen zu wollen (mittlere Effektstärke). Das entspricht auch der grundlegenden Erwartung von Rogers (2003), dass Informationen zu Vor- und Nachteilen einer Innovation im frühen Diffusionsstadium im sozialen Umfeld gesucht werden.

Im Smart Meter-Angebot werden zwei Mehrwerte des Smart Energy-Produkt-Servicebündels dargestellt. Zum einen umfasst das Angebot aufgrund der Feedback-Funktionen Gamification-Aspekte. Zum anderen wird mit der Visualisierung von CO₂-Einsparungen und der Lieferung von 100 % Ökostrom der Umweltnutzen des Angebots hervorgehoben. Beides scheint die Intention, das Smart-Meter-Angebot nutzen zu wollen, zu beeinflussen. Befragte, die ein höheres Ausmaß an Spaß bei der Nutzung des Angebots erwarten („*Hedonistische Motivationen*“), haben auch eine höhere Intention, das Angebot nutzen zu wollen (mit einer mittleren Effektstärke). Auch steigt die Intention, das Angebot nutzen zu wollen, je ausgeprägter die Befragten ihr eigenes Umweltbewusstsein einschätzen (mit einer geringen Effektstärke).

Für das Smarte Heizungskpaket wird die Nutzungsintention davon beeinflusst, inwiefern die Person erwartet, dass das Heizungskpaket für sie oder ihn im Alltag hilfreich ist („*Erwartung bzgl. Leistung*“). Das selbsteingeschätzte Umweltbewusstsein sowie hedonistische Motivationen zeigen demgegenüber keinen signifikanten Einfluss. Bei der Darstellung des Smarten Heizungsangebots werden im Gegensatz zum Smart Meter-Angebot keine umweltspezifischen Mehrwerte oder Gamification-Aspekte dargestellt. Vielmehr werden die automatisierte Steuerung orientiert an den Gewohnheiten und Präferenzen der Bewohner*innen sowie die Steuerungsmöglichkeiten über eine App verdeutlicht.

Die technologiespezifischen Überzeugungen erweisen sich somit als angebotsspezifisch. Das könnte darauf hinweisen, dass technologiespezifische Erwartungen aufgrund geringer Kenntnis von Smart Energy-Technologien (vgl. Raimi & Carrico, 2016) durch die Darstellungen der Angebote mit beeinflusst werden. Ein solcher möglicher Einfluss sollte in einer zukünftigen Studie überprüft werden.

Die Affinität für Smart Home Sicherheits- und Gesundheitsservices (Ko-Benefits) hat keinen signifikanten Einfluss auf die Intention, das jeweilige Smart Energy-Angebot nutzen zu wollen. Folglich kann nicht erwartet werden, dass Anbieter von Smart Energy-Produkten von einer prognostiziert starken Nachfrage von Smart Home Sicherheits- oder Gesundheitsanwendungen profitieren. Zusätzlich steht bei der vorliegenden Befragung die mehrheitlich hohe Affinität für Sicherheits- und Gesundheitsanwendungen einer vergleichsweise geringen Nutzungsintention der Smart Energy-Angebote gegenüber. Dementsprechend ist nicht von starken marktseitigen demand-pull-Effekten für Smart Energy-Angebote auszugehen.

4.1.3 Zusammenfassung

In dieser Befragung wurden die Einstellungen und Erwartungen von Konsument*innen bezogen auf zwei Smart Energy-Angebote untersucht: ein „Smartes Heizungskpaket“ und ein „Smart Meter-Angebot“. Aus einer demand-pull-Perspektive sind für die Diffusion von Innovationen Marktspezifika wie z. B. auch Charakteristika von Endkonsument*innen zentral (Di Stefano et al., 2012). Da bestehende Marktpotenziale für Smart Energy-Produkte derzeit nicht ausgeschöpft

werden (KfW, 2019), könnte eine demand-pull-Strategie deren Diffusion gezielt verstärken. Die Ergebnisse dieser Befragung suggerieren, dass kein demand-pull-Effekt von Ko-Benefits (Sicherheits- und Gesundheitsanwendungen) für Smart Energy-Technologien zu erwarten ist. Für Marktakteure könnte daraus abgeleitet werden, dass eine vermarktungsstrategische Verknüpfung der Anwendungsfelder wenig erfolgsversprechend ist. Demgegenüber beeinflussen die Mehrwerte, die in den jeweiligen Smart Energy-Angeboten hervorgehoben werden, die Nutzungsintention der Befragten. Die Vermarktung von Smart Energy-Technologien könnte deswegen insbesondere Alltags- und Umweltnutzen der Technologien verdeutlichen. Außerdem könnten Konsument*innen durch Gamification-Aspekte wie Feedback-Funktionen angesprochen werden.

4.2 Zwischen Technikbegeisterung und Komfort im Smart Home: Narrative der “*Early Adopter*”

Für die Marktdiffusion und spezifische Weiterentwicklung von Innovationen, wie Smart Energy-Technologien, sind Personen, die Innovation zu einem frühen Zeitpunkt nutzen, von zentraler Bedeutung (Rogers, 2003). Während das technische Potenzial von Smart Energy-Technologien bereits breit diskutiert wird, ist über die tatsächlichen Bedürfnisse und Erwartungen von Nutzer*innen, unter realen Bedingungen, noch wenig bekannt (Nicholls et al., 2020; Sanguinetti et al., 2018; Sovacoal & Del Furszyfer Rio, 2020). Deswegen wurden qualitative Interviews mit Personen geführt, die bereits Smart Home- sowie Smart Energy-Produkte nutzen. In den Interviews wurden die Motivation zur Adaption von Smart Home im Allgemeinen sowie die spezifischen Erfahrungen mit den Smart Energy-Produkte erfragt: Was sind ihre zentralen Motive und Beweggründe der Adaption? Welche Rolle spielen Smart Energy-Produkte für diese Personen? Waren Smart Energy-Produkte bzw. die Energiewende eine Motivation für diese Personen, Smart Home-Produkte nutzen zu wollen? Auf Grundlage der Interviews werden unterschiedliche Adaptionstypen in Form von Narrativen zusammengefasst. Dabei werden auch die Ausstattungen mit unterschiedlichen Smart Home-Produkten sowie Erfahrungen mit Effizienzsteigerungen dargestellt. Die erhobenen Einstellungen und Motivationen können Hinweise darüber liefern, inwiefern Smart Energy-Produkte für den Smart Home-Markt relevant sein werden.

Grundlage dafür ist die von Rogers (2003) vorgelegte, viel rezipierte Typisierung von Konsument*innen, die innerhalb eines Innovations-Diffusionsprozesses in einer Gesellschaft auftreten. Er unterscheidet zwischen Innovator, Early Adopter, Early Majority, Late Majority und Laggards. Die Typen unterscheiden sich durch unterschiedliche Charakteristika sowie dadurch, zu welchem Zeitpunkt sie ein neu eingeführtes Produkt nachfragen. Es wird angenommen, dass Early Adopter eine prägende Rolle für die Diffusion und Etablierung von Innovationen am Markt spielen. Sowohl Smart Home-Produkte insgesamt als auch Smart Energy-Produkte im Speziellen befinden sich aktuell noch in einem frühen Diffusionsstadium und sind demnach von Innovatoren und Early Adoptern in Gebrauch. So liegt aktuell die Marktdiffusion von Smart Home-Produkten in Deutschland bei etwa 16 % (Statista GmbH, 2020). Das Marktsegment der Smart Energy-Produkte liegt bei einer Diffusionsrate von etwa 10 % (Statista GmbH, 2020), Abschnitt 4.1). Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser qualitativen Haushaltsbefragung präsentiert.

4.2.1 Vorgehen und Methodik

Insgesamt wurden 26 qualitative Interviews durchgeführt. Neben solchen Personen, die nach (Rogers, 2003) als Innovatoren und Early Adopter typisiert werden können, wurden auch Personen befragt, die im Zuge eines vorherigen Forschungsprojektes Smart Energy-Produkte (Thermostate und Fensterkontakte) zur Verfügung gestellt bekommen hatten. Diese Personen sind somit keine klassischen Early Adopter, da sie sich nicht selbst für einen Kauf der Technologien am Markt entschieden haben. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Personenkreis als Early Majority definiert werden kann.

Um Innovatoren und Early Adopter für Interviews zu gewinnen, wurden Personen via Internetrecherche über verschiedenen Plattformen wie Tech-Blogs, Twitter sowie YouTube ermittelt. Auf diesem Weg wurden insgesamt 50 Personen kontaktiert (Rücklauf von 26 %, d. h. 13 Personen). Fünf Personen sind direkte Kontakte aus dem Projektkonsortium. Daneben sind acht der Befragten ehemalige Teilnehmende des vorausgegangenen Forschungsprojektes „*Smart Home Rösrath*“ (VISE, 2018) mit 120 Teilnehmer-Haushalten, die mit Smart Energy-Produkten (Thermostate und Fensterkontakte) ausgestattet wurden. Die Interview-Anfrage wurde über diesen Projektverteiler gesendet (172 Personen im Verteiler, Rücklauf 5 %).

Die semi-strukturierten Interviews dauerten zwischen fünfzehn und sechzig Minuten. Sie wurden von Januar bis Juni 2020 telefonisch oder via Video-Call durchgeführt. Die Interviews wurden überwiegend von einem Dienstleistungsunternehmen transkribiert. Folgende Themen wurden adressiert:

- Motivation dafür, Smart Home nutzen zu wollen
- Aktuelle Smart Home-Ausstattung und angestrebte Erweiterungen
- Einfluss von Smart Energy-Produkten auf den privaten Energieverbrauch (Strom und Wärme)
- Einschätzung über den Einfluss von Smart Energy-Produkten auf die Energiewende

Trotz der Eingrenzung auf Nutzer*innen von Smart Energy-Produkten ist die individuelle Ausstattung der Befragten sehr divers und umfasst auch Smart Home-Technologien für z. B. Sicherheit und Komfort. Die Interviewten werden auf Grundlage Ihrer Antworten den Adaptionstypen von Rogers (2003) zugeordnet.

Die Interviewten der Smart Home Rösrath Studie erfüllen nicht die Charakteristik von Innovatoren bzw. Early Adoptern, obwohl die Diffusionsrate zum Zeitpunkt ihrer Technologieadaption entsprechend gering ausgeprägt gewesen ist. Da die Personen aus dieser Gruppe nur indirekt die Initiative zur Nutzung der Smart Home-Produkte ergriffen haben (Incentive über TH Köln und RheinEnergieAG), werden sie, trotz der frühen Adaption, als Early Majority eingeordnet.

Typen von Nutzer*innen: Innovator, Early Adopter und Early Majority

Ausgehend von Übernahmezeitpunkt, sozioökonomischen Status, Persönlichkeitsmerkmalen sowie Kommunikationsverhalten hat Rogers (2003) eine Typologie mit fünf verschiedenen „Übernehmer*innen“ von Innovationen vorgelegt. Die ersten 2,5 % Nutzer*innen einer Innovation werden als „Innovators“ bezeichnet (Rogers, 2003, S. 282f.). Die nächsten 13,5 % sind die „Early Adopter“, während die nachfolgenden 34 % als „Early Majority“ bezeichnet werden (Rogers, 2003, S. 283–284). Die letzten zwei Typen sind die „Late Majority“ (weitere 34 %) sowie die „Laggards“ (die letzten 16 %; (Rogers, 2003, S. 284–285). Für die Marktdiffusion von Innovationen seien Early Adopter besonders wichtig, da sie Innovationen gesellschaftlich legitimierten. Diese Legitimation führe wiederum zu einem Anstieg der Diffusion (Rogers, 2003, S. 283).

Innovatoren: Rogers (2003) beschreibt Innovatoren als risikofreudig. Da sie finanziell gefestigt sind, können sie sich diese Risikofreude leisten. Lösungen zu finden, bereitet ihnen Spaß. Sie verbringen viel Zeit mit ihren Projekten, verkraften aber auch Misserfolge. Innovatoren tauschen sich gern aus und haben Zugang zu einem „kosmopolitischen“ Netzwerk. Sie sind Teil einer „Clique“ aus anderen Innovatoren. Innovatoren verstehen komplexe technologische Zusammenhänge und können diese auch richtig anwenden (Rogers, 2003, S. 282f.). Sechs der interviewten Personen wurden als Innovator*in eingeordnet. Diese interviewten Innovatoren beschäftigen sich seit etwa 20 Jahren intensiv mit Smart Home.

Early Adopter: Rogers (2003) erachtet Early Adopter als entscheidend für die Diffusion von Innovationen. Sie haben ein lokales Netzwerk und werden oft um Rat gefragt. Er charakterisiert Early Adopter dadurch, dass sie „vernünftige“ Entscheidungen treffen: Sie „verkörpern den erfolgreichen, diskreten Einsatz von Ideen“ und haben daher die größte Meinungsführerschaft in der Diffusion von Innovationen. Durch die Legitimation der Early Adopter wird die Beurteilung über das Risiko einer Adaption reduziert (Rogers, 2003, S. 283). Elf der interviewten Personen wurden als Early Adopter eingeordnet. Die von uns interviewten Early Adopter beschäftigen sich etwa ab dem Jahr 2010 mit Smart Home-Technologien.

Early Majority (Smart Home Rösrath): Die Early Majority ist etwas langsamer in Ihrem Entscheidungsprozess. Sie überlegen sich Anschaffungen bewusst, durchdenken Aufwand und Nutzen Ihrer Investitionen. Sie vernetzen sich gern mit Innovatoren und Early Adoptern, nehmen aber eher passive Positionen in diesen Netzwerken ein (Rogers, 2003, S. 283f.). In dieser Untersuchung werden die acht Teilnehmer*innen der Smart Home Rösrath Studie dem Typ der Early Majority zugeordnet. Diese Haushalte haben Smart Energy-Technologien im Rahmen eines Forschungsprojektes erhalten, daher unterscheiden wir sie von denjenigen, die eine reale Kaufentscheidung getroffen haben, obwohl sie Smart Energy-Technologien seit einem frühen Zeitpunkt (2015) im Diffusionsprozess verwenden.

4.2.2 Ergebnisse: Narrative der Innovatoren, Early Adopter und Early Majority

Innovator und Smart Home: Innovatoren haben einen soliden technischen Hintergrund und können sich die erwünschten Lösungen selbst zusammenstellen. Sie besitzen meistens Eigentum und gestalten ihren Haushalt nach den eigenen Vorstellungen, sie setzen ihre Smart Home-Projekte gern eigenständig um. Viele der interviewten Innovatoren beschäftigen sich schon seit der frühen Jugend mit Technik und automatisierten Abläufen. Die meisten haben den Bau des

Eigenheims selbst betreut und den Wohnraum von Beginn an smart gestaltet bzw. Bestandsobjekte entsprechend modernisiert. Ihre Projekte ergeben sich aus konkreten Problemstellungen heraus, diese beschreiben sie als „Use Cases“. Innovatoren können Rückschläge gut verkraften. Wenn ein Automatismus nicht den erwünschten Nutzen bringt, setzen sie sich mit dem Use Case weiter auseinander. Alle von uns interviewten Innovatoren sind aktive Mitglieder in unterschiedlichen Arten von „Tech-Communities“. In den Communities tauschen sie sich über ihre individuellen Lösungswege, sowie über neuste Technologien und Funktionen aus. Innovatoren brauchen keine fertige Lösung von Herstellern. Die interviewten Innovatoren sind auch beruflich eng mit der Thematik verbunden, einige haben selbst Unternehmen in dieser Branche gegründet.

„Also ich war an der Thematik eigentlich schon seit [der] Kindheit irgendwo interessiert. Ich habe früher in den achtziger Jahren auf einem C 64 mir App Homes geflasht, mit denen ich dann Schaltsteckdosen selber geschaltet habe, wenn jemand bei mir irgendwie auch zur Tür reinkam, Musik habe laufen lassen und solche Dinge.“ (Person 2, männlich, ohne Jahresangabe)

„Ich habe zu dem Zeitpunkt [vor 25 Jahren] in Bayern gewohnt und ein Problem war immer, wenn man dann oben auf dem Berg war und man sagt: ‘ich habe jetzt noch 1.5 Stunden nach Hause mit dem Auto und nochmal eine Stunde runtergehen’ – dann möchte ich gerne, dass die Sauna an ist, wenn ich zuhause ankomme. [...] Und da wollte ich gerne vom Telefon aus über einen bestimmten Code die Sauna anschalten. Das war so die Idee, die ich dann auch umgesetzt habe und die auch tatsächlich funktioniert hat.“ (Person 20, männlich, 65 und älter)

„Und [ich] bin da jetzt inzwischen auch in der Community sehr aktiv und ja, [ich] habe damit dann auch angefangen auch andere Komponenten, die am Anfang eher wenig smart waren, dann da auch eben smart einzubinden.“ (Person 13, männlich, 25-39 Jahre)

Innovator und Smart Energy: Innovatoren können durch Smart Energy-Produkte verlässlich Energie sparen. Sie machen keine Erlebnisse mit Rebound-Effekten, da sie durch Feedbacksysteme ihre Verbrauchsprofile kontrollieren. Die Kenntnis über Smart Energy-Produkte und -Dienstleistungen und deren Auswirkungen auf die Energiewende werden von Innovatoren verstanden und gut eingeordnet. Sie haben eine solide Kenntnis über die Energiewirtschaft. Die meisten Innovatoren besitzen ein umfangreiches Energiemanagementsystem mit eigener Energieerzeugung, -speicherung und automatisierten Verbrauchsvorgängen.

„Ja also die Energieerzeugung ist erstmal regenerativ. Das ist glaube ich nochmal ganz entscheidend. Die beste Kombination ist eine Wasser-Wasser-Wärme Pumpe in Kombination mit einer Photovoltaik Anlage. Und zwar eine die richtig groß dimensioniert ist in Verbindung mit einem Akkuspeicher. So komme ich dann mit einem sehr hohen Autarkie-Grad hin. [...] Die schwierigen Monate die wir haben, das sind halt hier in Mitteleuropa die Monate Januar, Februar, März, je nachdem. Die vergangenen Jahre war es sehr gut mit der Sonne und sie müssen eben eine große Fläche haben, um ihre eigene Energie, die sie erzeugen, auch zu verbrauchen. [...] in der Praxis [...] muss man dann immer wieder gucken: Was erzeuge und was verbrauche ich. Wir selbst, also ich privat, erzeuge mehr als ich verbrauche.“ (Person 21, männlich, 40-59 Jahre)

„[...] ich kann sagen, dass ich jedes Mal, wenn ich so eine Maßnahme gemacht habe [...], dass ich [...] regelmäßig die Erdgas-Rechnung senken konnte insgesamt um rund 20 % [...].“ (Person 20, männlich, 65 und älter)

Die Innovatoren sehen ihren eigenen Umgang mit Energie als optimiert an. Ihre Use Cases sind nicht direkt aus energiepolitischen Bestrebungen, wie der Energiewende, heraus motiviert. Spaß an der Umsetzung eigener Projekte, Komfortsteigerung und ökonomischer Nutzen sind wichtigere Argumente. Nichtsdestotrotz haben die meisten Innovatoren die Bereitschaft dazu bekundet, ihre Lastverbräuche weiter zu optimieren und sind daran interessiert, durch smarte Steuerung von Haushaltsgeräten und -verbräuchen das Energiesystem zu entlasten. In diesem Zusammenhang bemängeln sie die geringe Auswahl an flexiblen Energietarifen, die Zusammensetzung des Strompreises, den fehlenden Anreiz zur Lastenverschiebung und die mangelnde Möglichkeit der Kommunikation mit öffentlichen Netzen (Smart Grids).

„Ich habe das durchgerechnet. Selbst, wenn ich große Teile der Last verschieben würde auf dann, wenn es besonders günstig ist, wäre ich auch, mehr oder weniger, null zu null zu einem Standardtarif rausgekommen. Das heißt, auch bis heute gibt es da keinerlei Anreize. Und ich denke, das große Problem ist tatsächlich, wie sich der Strompreis zusammensetzt. Dass wirklich der reine Preis vom Strom, bei dem der Anbieter auch spielen kann und einem wirklich Möglichkeiten des Rabatts gewährt, der ist so klein gegenüber den Steuern, den EEG-Umlagen, den sonstigen Dingen, die da auf dem Preis drauf sitzen, die einfach Fixkosten sind, dass diese ganzen Modelle wahrscheinlich nichts werden, auch nicht in der Zukunft.“ (Person 2, männlich, ohne Jahresangabe)

Early Adopter und Smart Home: Early Adopter brauchen etwas mehr Sicherheit, bevor sie ein Smart Home-Produkt adaptieren. Sie wollen ihre Entscheidung vernünftig begründen und benennen konkrete Ziele, die erfüllt werden sollen. Solche Ziele können das Steigern des Gebäudewerts, mehr Komfort oder die Einsparung von Energiekosten sein. Es leben weniger Early Adopter in Eigentum, als bei den Innovatoren, daher ist Flexibilität und Kompatibilität von Technologien auch ein wichtiges Kriterium bei der Anschaffung. Die befragten Early Adopter haben ihre angestrebten Lösungen hauptsächlich auf Angebotsseite gesucht, sie fertigen weniger in Eigenregie an. Aber auch Early Adopter haben ein solides technisches Grundverständnis und verstehen Funktionalitäten und Möglichkeiten verschiedener Technologien.

„Also bei mir war das ganz klar kostengetrieben, weil das Haus hat enorm hohe Kosten gehabt anfangs. Also, wo ich einzog, hatten wir 13.000 Kilowattstunden Stromverbrauch und achttausend Liter Öl. Und ich habe jetzt weniger als die Hälfte, also das war sehr stark kostengetrieben. Und das war natürlich zu einer Zeit, als wir einzogen, da waren die Strompreise noch nicht so hoch.“ (Person 10, männlich, 40-59 Jahre)

„[...] es wertet das Gebäude auf, also ich finde, ein Neubau heute, ohne Smart Home, da gehe ich von aus, dass das alles später weniger wert sein wird. Also ich gehen davon aus, dass das dann auch eine Wertsteigerung für das Haus bedeutet.“ (Person 26, männlich, 25-39 Jahre)

Early Adopter und Smart Energy: Auch Early Adopter können mit Smart Energy-Anwendungen Energie sparen. Die Smart Energy-Systeme sind allerdings weniger umfangreich als die der In-

novatoren, sie erfüllen dennoch ihren Zweck und Nutzer*innen sparen Energie. Vor allem Feedbacksysteme scheinen eine große Hilfe zu sein. Durch sie können „Energiefresser“ ausfindig gemacht werden. Early Adopter setzen Smart Home weniger konkret in den energiewirtschaftlichen Bezug. Sie sehen den Zusammenhang von Smart Energy zum Energiesystem nicht so deutlich wie Innovatoren und äußern keine direkten bzw. weniger konkret ausformulierten Erwartungen an die Energiepolitik. Die eigenen Optimierungsmöglichkeiten werden weniger systematisch gesehen, Vergleiche werden eher über soziale Kontakte aus dem privaten Umfeld gezogen.

„Also ich hatte bis vor vier oder fünf Jahren ganz normale Thermostate, die ich per Hand auf- und abgedreht habe, im Prinzip. Also die Heizung hat zwar einen Außenfühler, der das schon relativ gut regelt, aber natürlich muss man das immer dann nur da heizen, wo man im Prinzip im Raum auch ist. Und ich kann sagen, dass es mit den smarten Heizkörperthermostaten, also ich habe mindestens sechzig Prozent an Energiekosten im Jahr jetzt gespart, allein dadurch, dass sich die Heizkörper automatisch runter- oder sogar abdrehen, wenn ich nicht zu Hause bin.“ (Person 1, männlich, ohne Jahresangabe)

„[...] im Smart Home [hat man] eine Übersicht [...], welche Geräte [...] zum Beispiel besonders energiehungrig [sind] oder wie könnte man beispielsweise durch kleinere Veränderungen auch bewirken, dass der Stromverbrauch nach unten geht.“ (Person 3, männlich, 25-39 Jahre)

„[...] Energiewende, also wir sind schon vom Stromverbrauch, wenn ich das mal mit so Familienangehörigen oder anderen Familienmitgliedern, die auch Häuser haben, vergleiche [...], durch dieses Smart Home kann man schon Energie sparen, weil wir sind im Durchschnitt immer niedriger von den Stromkosten als die Familienangehörigen.“ (Person 25, männlich, 25-39 Jahre)

Frühe Mehrheit/ Smart Home Rösraith: Es zeigen sich zwei divergierende Einstellungsmuster innerhalb dieser Untersuchungsgruppe: So ist die Hälfte der interviewten des Smart Home Rösraith Projektes grundsätzlich zufrieden mit dem Nutzen der verwendeten Smart Energy-Produkte. Die meisten merken allerdings an, dass sie durch die hohen Investitionssummen im Smart Energy-Segment davon absehen, zeitnah selbst weitere Produkte in ihr System zu integrieren. Einige haben dafür aber bereits günstigere Produkte aus Komfort-, Entertainment- oder Sicherheits-Segment in ihrem Smart Home ergänzt. Alle interviewten Nutzer*innen betonen, dass sich Investitionen in Smart Energy-Produkte klar ökonomisch rentieren müssen.

Die andere Hälfte der Interviewten sind hingegen weder von Smart Home noch von Smart Energy überzeugt. Sie konnten keine Energie sparen, einige gelangten sogar in einen Mehrverbrauch (Backfire) und stellten die Nutzung teilweise bereits ein. Die Gründe für die Ablehnung der Innovationen sind divers. Häufig genannte Ursachen für die Ablehnung werden nachfolgend aufgeführt:

Kompatibilität:

- Verbaute Technologie passt nicht zum heimischen Heizsystem: z. B. Smarte Thermostate nicht effizient in Kombination mit Mikro BHKW, da es zum Mehrverbrauch kommt, wenn viel hoch- und runtergeregt wird (Person 14, weiblich, 40-59 Jahre).

Anwendungsproblematik:

- Unverständnis nach neuen/veränderten Funktionen durch Updates. Freizeitverlust dadurch, dass neue Funktionen erlernt werden müssen (Person 5, m, 25-39 Jahre).
- Falsch eingestellte Szenarien: Räume werden beheizt, die zuvor nicht beheizt wurden (z. B. Gästezimmer) (Person 5, männlich, 25-39 Jahre; Person 6, männlich, 40-59 Jahre).

Produktdefizite:

- Sensoren und Aktoren verlieren die Verbindung zueinander (Person 5, männlich, 25-39 Jahre; Person 6, männlich, 40-59 Jahre).
- Die Bedienung der Produkte ist zu kompliziert (Person 6, männlich, 40-59 Jahre).

Misstrauen/ Unsicherheitsempfinden gegenüber Innovationen:

- Angst vor Blackouts bei Internet-/ Stromausfall (Person 5, männlich, 25-39 Jahre).
- Unwohl, wenn Geräte starten, während niemand zuhause ist (z. B. Angst vor Wasserschaden) (Person 5, männlich, 25-39 Jahre; Person 6, männlich, 40-59 Jahre).
- Angst, dass aus eigenen Daten ein Geschäftsmodell wird (Person 5, männlich, 25-39 Jahre).
- Folgekosten (z. B. Entsorgung) von Erneuerbaren Energien sind unkalkulierbar (Person 12, männlich, 65 Jahre und älter).

4.2.3 Zusammenfassung

Die meisten der befragten Nutzer*innen von Smart Energy können durch die Produkte Energie, hauptsächlich in Form von Wärme, einsparen. Dennoch nennt niemand der Interviewpartner*innen die Energiewende als entscheidenden Adaptiongrund für Smart Energy-Technologien. Die Mehrheit der befragten Nutzer*innen sind aus diversen Gründen mit der Adaptionentscheidung ihres Smart Home zufrieden. Die am häufigsten genannten Gründe und zentrale Motivation für die Anwendung sind: Das technische Interesse, Steigerung an Komfort und Sicherheit, der Wunsch nach einem zeitgemäßen Wohnstandard sowie die Reduzierung von Energiekosten (insb. Heizkosten).

Für Innovatoren sind Spaß und die Beschäftigung mit innovativen Technologien der wichtigste Treiber. Die befragten Innovatoren weisen einen hohen Autarkiegrad auf. Sie können Smart Home in den Kontext energiepolitischer Entscheidungen setzen, zeigen mögliche Lösungswege zentraler Hindernisse auf und adressieren aktuelle Themen für ein digitalisiertes und flexibilisiertes Energiesystem. Innovatoren sind in der Lage ein vollumfänglich durchdachtes Energiekonzept, mit hohem Autarkie-Grad, smarten Automatismen sowie einem hohen Komfortstandard zu erstellen.

Die Energiewende hat auch für die interviewten Early Adopter keinen Einfluss auf die Adaptionentscheidung von Smart Home oder Smart Energy-Produkten. Dennoch sehen sie Möglichkeiten, den eigenen Verbrauch zu optimieren, ohne an Komfort zu verlieren. Den Wohnstandard zu verbessern und die eigenen Energiekosten möglichst gering zu halten sind zentrale Ziele. Einige Early Adopter scheinen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht in der finalen Version ihrer Smart Homes zu leben, sie sind Erweiterungen gegenüber offen, warten aber, bis für sie geeignete und kompatible Produkte oder attraktive Förderungen auf den Markt kommen. Die Kompatibilität ist

auch deshalb wichtig, da sie öfter auf nicht leitungsgebundene „Gadgets“ setzen. Einige der Interviewten planen zurzeit den Hausbau oder eine Renovierung. In diese Planungen sind smarte Komponenten integriert.

Auch bei den interviewten Teilnehmer*innen der Smart Home Rösraith Studie war die Energiewende kein ausschlaggebender Grund für die Adaption von Smart Home-Technologien. Ein Teil dieser Untersuchungsgruppe ist enttäuscht, dass mit den Smart Energy-Technologien keine Energie eingespart werden konnte. Sie stellten die Nutzung bereits ein und sehen in Zukunft eher davon ab, neue Smart Energy-Komponenten zu verwenden. Die fehlgeschlagene Nutzung betont die Notwendigkeit von Kompatibilität und intuitiver Handhabung von innovativen Technologien für eine erfolgreiche Diffusion.

Der Großteil der Interviewten sind jedoch einer Erweiterung ihrer Technologien bis hin zur eigenen Energieproduktion generell nicht abgeneigt. Für diese Investitionen herrschen zurzeit allerdings noch zu große Unsicherheiten, z. B. die unzureichende Kompatibilität unterschiedlicher Produkte oder die finanzielle Sicherheit. Die Einstellungen und Motivationen der Early Adopter scheinen darauf hinzuweisen, dass Smart Energy bei der Diffusion von Smart Home eher eine untergeordnete Rolle spielt und andere Mehrwerte, wie Komfort und Sicherheit, im Fokus liegen. Während Innovatoren das Energiesegment, so wie auch die anderen Segmente wie Komfort und Sicherheit, maßgeblich einbeziehen, scheint dies für Early Adopter weniger relevant. Die Energiewende stellt weder einen ausschlaggebenden Grund für die Adaption von Smart Home allgemein noch von Smart Energy-Produkten im Speziellen dar. Die Bedeutung, die Smart Energy-Produkte für den Massenmarkt sowie die Energiewende einnehmen werden, ist somit eher zu hinterfragen.

4.3 Randomisierte kontrollierte Studien zum Energieverbrauchsverhalten von Haushalten

In diesem Abschnitt sollen zunächst randomisierte kontrollierte Studien über die Auswirkungen von Feedback auf den Stromverbrauch in Haushalten vorgestellt werden (Abschnitt 4.3.1). Daraufhin wird das Konzept „*Flexibilität im Stromverbrauch*“ und die damit einhergehenden Potenziale zur Reduktion von verbrauchsbedingten CO₂-Emissionen dargestellt, wobei der Fokus auf eine Feldstudie des Projektteams gelegt wird, die im Rahmen des Reallabors „*Klimafreundliche Entscheidungen*“ der Stadt Münster durchgeführt wurde (Abschnitt 4.3.2). In den beiden darauffolgenden Abschnitten werden dann vom Projektteam durchgeführte Experimente zum Einfluss von Informationen auf zeitabhängige Strompreise (Abschnitt 4.3.3) und auf die Nachfrage intelligenter Heizungssteuerungen (Abschnitt 4.3.4) präsentiert.

4.3.1 Feedback zum Stromverbrauch durch smarte Technologien

Die Digitalisierung der Energiewirtschaft wird dazu führen, dass Haushalte durch die Ausstattung mit smarten Technologien, wie zum Beispiel *Smart Meter* und sogenannten *Energiemonitoren* (siehe Glossar), einen besseren Überblick über ihr eigenes Stromverbrauchsverhalten bekommen werden. In der Ökonomie wird häufig angenommen, dass Haushalte ihre Elektrizitätskonsumentscheidung aufgrund von fehlender Information und Unsicherheit nicht optimal treffen. Mit einem besseren Verständnis mittels digitaler Technologien könnten diese Informationsdefizite abgebaut- und ein intensives Bewusstsein über den Stromverbrauch in Haushalten geschaffen werden.

Welchen Einfluss dieser verbesserte Informationszugang auf den Gesamtstromverbrauch von Haushalten hat, wurde bereits in vielen internationalen wissenschaftlichen Studien erforscht. Hierbei dienten vor allem die Arbeiten von (Allcott & Rogers, 2014) und (Allcott & Rogers, 2014) sowie (Ayres et al., 2013) als Blaupause für weitere Untersuchungen. In diesen Studien bekamen amerikanische Haushalte über das Software-Unternehmen *OPOWER* detailliertes Feedback über ihren eigenen Stromverbrauch, unter anderem mit Vergleichen zu Stromverbräuchen ähnlicher Haushalte. Mithilfe eines randomisierten, kontrollierten Studiendesigns ermittelten die Autoren durch dieses Verbrauchsfeedback eine durchschnittliche Reduktion des Stromverbrauchs um rund 2 %.

Dieses Studiendesign wurde daraufhin in diversen wissenschaftlichen Untersuchungen rund um den Globus adaptiert, sodass mittlerweile ein umfassendes Bild der Auswirkungen von Stromverbrauchsfeedback gezeichnet werden kann. Einer Metaanalyse von (Delmas et al., 2013) zufolge betragen die durchschnittlichen Einsparungen weltweit, bei Betrachtung ausschließlich hochqualitativer Studien, ebenfalls rund 2 %. Eine systematische Literaturübersicht aktuellerer Studien zum Thema „*Nudges im Stromverbrauch*“ liefern (Andor & Fels, 2018). Für den deutschsprachigen Raum sollten hierbei vor allem die Studien von (Schleich et al., 2013) und (Schultz et al., 2015) erwähnt werden, in welchen die Einsparungseffekte zwischen 1 % und 4 % des durchschnittlichen Stromverbrauchs liegen.

Es gibt demzufolge hinreichend gesicherte Evidenz dafür, dass das Verbrauchsfeedback von smarten Technologien zu statistisch signifikanten, praktisch jedoch eher moderaten Einsparungen im Stromverbrauch führt. Ein weiterer, bislang weitaus weniger erforschter Aspekt smarter Technologien betrifft den Bereich *Flexibilität im Stromverbrauch*. Unter Flexibilität im Stromverbrauch in Haushalten ist die Bereitschaft der Bewohner*innen gemeint, ihren Stromverbrauch zeitlich anzupassen. Wir haben uns daher im Rahmen dieses Projektes das Ziel gesetzt, das von smarten Technologien ausgehende Potenzial zur Flexibilität im Stromverbrauch systematisch zu untersuchen.

4.3.2 Das Konzept „Flexibilität im Stromverbrauch“

Auf dem Strommarkt müssen Angebot und Nachfrage stets ausgeglichen sein. Mit der Ausweitung der Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien wird das Angebot auf dem Strommarkt unflexibler, sodass Lösungen gefunden werden müssen, um die Balance im Strommarkt aufrecht erhalten zu können. Die zentrale Aufgabe wird vor allem darin bestehen, die Stromnachfrage in jenen (peak-)Zeiten zu befriedigen, in welchen die Nachfrage nach Strom die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien übersteigt. Eine Option zur Erreichung dieses Ziels könnte das sogenannte *Demand Side Management* (siehe Glossar), also die (zeitliche) Anpassung des Stromverbrauchs seitens der Verbraucher, darstellen. Es soll hiermit letztlich erreicht werden, dass sich ein Teil der Nachfrage aus den (Tages-)Zeiten mit fossiler Stromerzeugung hin zu Zeiten mit einem ausreichenden Angebot an Strom aus Erneuerbaren Energien verschiebt.

Das Potenzial dieses Demand Side Managements soll durch die umfassende Digitalisierung der Energiewirtschaft voll ausgeschöpft werden (BMW, 2017b). Die elementare Frage hierbei ist jedoch, inwieweit Haushalte als Stromnachfrager zu diesen Anpassungen bereit sind. Wir haben daher in einer Reihe von Studien untersucht, wie Haushalte diesem Konzept grundsätzlich ge-

genüberstehen und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, um emissionsmindernde Nachfrageverschiebungen zu erreichen. Komplementär zu der in Abschnitt 4.4.3 aufgeführten Flexibilitätsbereitschaft von Eigenheimbesitzenden in der Bereitstellung von selbstproduziertem Strom (z. B. durch PV-Anlagen und Batteriespeicher) sollen im Folgenden vor allem die konsumbezogenen Aktivitäten betrachtet werden, die in allen privaten Haushalten grundsätzlich durchführbar sind.

Um Aussagen über die Effekte und Potenziale der zeitlichen Verschiebung von Haushaltsaktivitäten treffen zu können, muss zunächst untersucht werden, welche verbrauchsrelevanten Aktivitäten in den Haushalten in den entsprechenden (peak-)Zeiten durchgeführt werden und ob diese überhaupt verschoben werden können. Zu diesem Zweck haben wir im Rahmen des von der Stadt Münster initiierten Reallabors „Klimafreundliche Entscheidungen“ das Verhalten von neun Haushalten intensiv analysiert. Dafür wurde zunächst in Kooperation mit der Universität Oxford die Smartphone-App „Mein Tag“ (downloadbar im Playstore) entwickelt, in welche jedes Mitglied der untersuchten Haushalte auf einfache Weise die durchgeführten Aktivitäten eintragen konnte. Zugleich wurden von uns mobile Messgeräte zur Aufnahme des aktuellen Stromverbrauchs eigens entwickelt und in den Haushalten installiert. Mit der Zusammenführung der erhobenen Daten konnten so personalisierte Lastprofile für die teilnehmenden Haushalte erstellt werden, in welchen die Aktivitätsdaten aller Haushaltsmitglieder mit den Stromverbrauchsdaten zu jedem Tageszeitpunkt zusammengespielt werden konnten (siehe Abbildung 15).

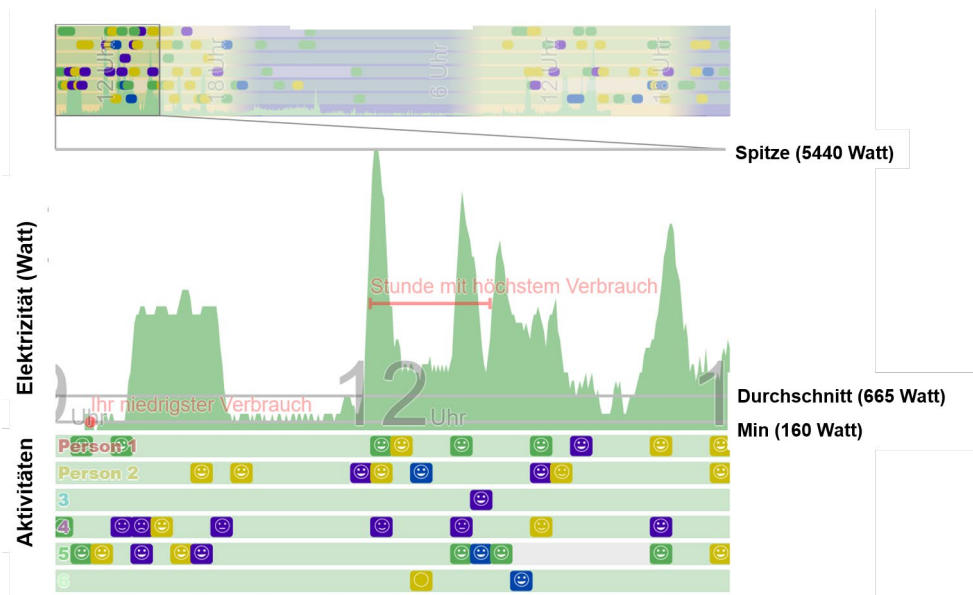


Abbildung 15: Personalisiertes Lastprofil mit Aktivitätsdaten

In der Analyse aller Haushaltsdaten wurde deutlich, dass in Spitzenlastzeiten eine Vielzahl an Aktivitäten zeitgleich durchgeführt wurden. Beispielsweise liefen in einem Haushalt parallel Waschmaschine, Trockner, Spülmaschine, Staubsauger, Fernseher und Ofen. Auf Nachfrage mittels eines an die Datenaufzeichnung anschließenden Fragebogens gaben alle teilnehmenden Haushalte an, dass sie zumindest einen Teil dieser verbrauchsrelevanten Aktivitäten verschie-

ben könnten (bspw. Trockner, Waschmaschine und Spülmaschine), insofern dies dem Umweltschutz dienen und/oder finanzielle Vorteile nach sich ziehen würde (Indexwerte: 4,5 und 4,2 aus 5). Die Befragten gaben zudem explizit an, dass sie ihren Verbrauch vor allem dann zeitlich verschieben würden, wenn elektrische Geräte dies intelligent und selbstständig leisten können (Indexwert: 4,2 aus 5). Die Digitalisierung und der Einsatz von smarten Lösungen zur Laststeuerung von Haushaltsgeräten, kann dementsprechend eine große Rolle beim Erreichen von mehr Flexibilität in der Stromnachfrage spielen.

4.3.3 Randomisierte kontrollierte Studie zur Akzeptanz zeitabhängiger Strompreise

Nachdem in der Feldstudie mit den Teilnehmern des Münsteraner Reallabors die grundlegende Akzeptanz und Möglichkeiten zur Verschiebung des Stromverbrauchs ermittelt wurde, müssen konkrete Maßnahmen eruiert werden, um dieses Lastverschiebungspotenzial auszuschöpfen. Eine Möglichkeit, um die Haushalte für ein flexibleres Verbrauchsverhalten zu motivieren, stellen *zeitabhängige Strompreise* dar (siehe Glossar für ausführliche Definitionen). Diese zeitabhängigen Stromtarife sollten so gestaltet sein, dass zu Zeiten eines großen Angebots an Erneuerbaren Energien im Strommarkt der Verbrauch relativ günstiger ist als in Zeiten mit hauptsächlich fossiler Stromerzeugung. Damit könnte Haushalten ein finanzieller Anreiz gesetzt werden, ihren Verbrauch entsprechend zu verschieben, sodass letztlich weniger CO₂ emittiert wird. Unter Miteinbeziehung der externen Kosten der Stromerzeugung gleichen sich die Verbrauchskosten so den tatsächlichen volkswirtschaftlichen Kosten aus dem Stromverbrauch an, womit die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt erhöht werden kann (Borenstein & Holland, 2003).

Derartige zeitabhängige Strompreise werden durch gestaffelte Tarife bereits von den meisten Versorgungsunternehmen angeboten, die Nachfrage seitens der Konsumenten ist allerdings noch äußerst gering (Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt, 2019; Schlereth et al., 2018). Es stellt sich demnach die Frage nach den Ursachen für diese überschaubare Nachfrage und ob diese schlicht auf die Unwissenheit über das Emissionseinsparungspotenzial von flexibler Energienachfrage seitens der Haushalte zurückzuführen ist. Wir haben daher in einer randomisierten Umfrage erforscht, inwiefern sich Informationen zu Grundidee und CO₂-Einsparungspotenzial von flexibler Energienachfrage auf das Interesse an zeitabhängigen Stromtarifen auswirkt. Zu diesem Zweck wurden im Dezember 2019 164 Teilnehmer*innen aus der Münsteraner Bürgerdatenbank¹³ kontaktiert und zufällig in eine Treatment- und eine Kontrollgruppe aufgeteilt. Diese 164 Teilnehmer*innen waren durchschnittlich 38 Jahre alt, zu 58 % weiblich, und 81 % von ihnen wohnten zur Miete. Personen aus der Treatmentgruppe bekamen ebengenannte Informationen zum Konzept flexibler Energienachfrage, während die Kontrollgruppe lediglich mit Informationen über den durchschnittlichen Stromverbrauch und die zugehörigen Aktivitäten deutscher Haushalte konfrontiert wurde. Im Anschluss an diese Informationen sollten die Teilnehmer*innen angeben, ob sie grundsätzlich dazu bereit wären, einen zeitabhängigen Preistarif anzunehmen,

¹³ Die Münsteraner Bürgerdatenbank enthält E-Mailadressen von Privatpersonen, die in Münster ihren Erst- oder Zweitwohnsitz haben. Sie wurde von der WWU aufgebaut, indem 5.000 Haushalte per Zufallsprinzip (Random-Walk) ausgewählt- und mittels Informationsflyern kontaktiert wurden. Insgesamt haben sich n=309 Personen dazu bereit erklärt, an wissenschaftlichen Studien teilzunehmen. Es wurde darum gebeten, dass maximal ein Haushaltsmitglied teilnimmt.

wenn sie ein entsprechendes Angebot von ihrem Stromanbieter erhalten würden. Die Ergebnisse dieser randomisierten Umfrage sind in Abbildung 16 dargestellt.

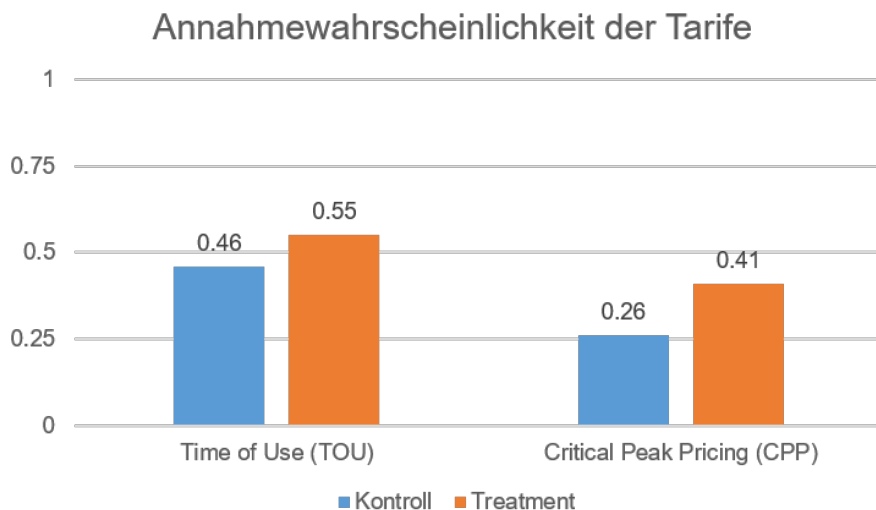


Abbildung 16: Annahmewahrscheinlichkeit zeitvariabler Tarife nach Treatment-Gruppen.

Zunächst wurden die Teilnehmer*innen gefragt, ob sie einen sogenannten „*Tageszeittarif*“ („*Time-of-Use*“, im Folgenden „*TOU*“-Tarif) annehmen würden. Bei diesem Tarif unterscheidet sich der Strompreis (jeden Tag einheitlich) nach dem Zeitpunkt des Verbrauchs, wobei für die peak-Zeiten ein höherer- und für die off-peak-Zeiten ein niedrigerer Preis entrichtet werden muss als im Standardtarif mit konstanten Preisen. Daraufhin wurde nach der Annahmewahrscheinlichkeit eines „*Spitzenlasttarifs*“ („*Critical Peak Pricing*“, im Folgenden „*CPP*-Tarif“) gefragt. Dieser zeichnet sich durch einen reduzierten Strompreis in 315 Tagen im Jahr aus, während an Tagen von Angebotsengpässen ein erhöhter Strompreis gezahlt wird, wobei die Ankündigung dieser erhöhten Preise mindestens einen Tag im Voraus erfolgen muss.

Es ist zu erkennen, dass die Annahmewahrscheinlichkeit des TOU-Tarifs grundsätzlich höher ist als jene des CPP-Tarifs. Die Teilnehmer*innen bevorzugen demzufolge festgelegte Tarifstrukturen gegenüber dynamischen Tarifen (vgl. (vzbv, 2015)). Ein interessantes Ergebnis ergibt sich jedoch aus dem Vergleich von Treatment- und Kontrollgruppe bei den jeweiligen Tarifen: Für beide Tarife gilt, dass die Annahmewahrscheinlichkeit gegenüber den zeitabhängigen Tarifen aufgrund der Informationsbereitstellung im Vergleich zum Standardtarif steigt. Für den CPP-Tarif ist dieser Treatmenteffekt (0,15 Prozentpunkte, $p < 0,05$) jedoch deutlich stärker ausgeprägt als für den TOU-Tarif (0,09 Prozentpunkte, $p = 0,28$). Über das Konzept „*Flexibilität im Energieverbrauch*“ informierte Personen stehen also dynamischen Tarifen grundsätzlich offener gegenüber. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die Akzeptanz der Haushalte gegenüber Demand Side Management und flexiblen Preisstrukturen erhöht werden könnte, insofern diese Instrumente mit Informationskampagnen kombiniert werden. Insgesamt bleibt dennoch festzuhalten, dass auch unter den informierten Teilnehmer*innen immer noch rund die Hälfte einen Standardtarif mit konstanten Strompreisen gegenüber den zeitabhängigen Tarifen bevorzugt.

Um außerdem das Potenzial digitaler Technologien genauer abschätzen zu können, wurden die Teilnehmer*innen gefragt, ob sie sich vorstellen können ihre verbrauchsrelevanten Aktivitäten

zeitlich zu verschieben, insofern elektrische Geräte dies intelligent leisten. Ein Großteil der Befragten konnte sich eine Hilfe bei der Verschiebung ihrer Aktivitäten durch smarte Produkte gut vorstellen (Indexwert: 4,0 aus 5), wobei es hier keine signifikanten Unterschiede zwischen Treatment- (Indexwert: 3,9 aus 5) und Kontrollgruppe gab (Indexwert: 4,1 aus 5). Die Digitalisierung der Energiewirtschaft kann demnach durchaus das Emissionsreduktionspotenzial flexibler Stromnachfrage fördern.

4.3.4 Randomisierte kontrollierte Studie zum Einfluss von Informationen auf die Nachfrage intelligenter Heizsteuerungen

Um neben dem Elektrizitätssektor auch dem Wärmebereich Rechnung zu tragen, wurde eine randomisierte Online-Umfrage zur Nachfrage von intelligenten Heizungssteuerungen durchgeführt, welche über soziale Netzwerke geteilt wurde.

Eine intelligente Heizungssteuerung kennzeichnet sich vor allem durch die selbstständige Einbeziehung von Umweltbedingungen, Haushaltscharakteristiken und Bewohnerverhalten, womit sie sich wesentlich von manuellen oder programmierbaren Temperaturregler-Einheiten unterscheidet. Intelligente Heizungssteuerungen sind innerhalb Deutschlands in ca. 92 % der Gebäude mit Wohnraum anwendbar, können in der Regel selbstständig installiert werden und liegen preislich je nach Haushaltsgröße bei ca. 100 Euro – 300 Euro. Die Intelligenz der Steuerung beruht dabei auf der Verarbeitung von Daten, die die Heizungssteuerung einerseits selbstständig generieren kann und andererseits über unterschiedlichste Kanäle von Informations- und Kommunikationstechnologien empfängt. Im Idealfall passt sich die intelligente Heizungssteuerung den Lebensumständen der Bewohner automatisch an und resultiert dementsprechend in einer effizienten Temperaturregulierung, was beispielsweise ein Absenken der Heizintensivität bei Abwesenheit der Bewohner oder zu Schlafenszeiten impliziert. Unabhängigen Quellen zufolge ist durch die Nutzung intelligenter Heizungssteuerungen eine durchschnittliche Energieersparnis von ca. 12 % gegenüber den gewöhnlichen manuellen Steuerungssystemen zu erwarten (vgl. (Aarish et al., 2015; Johnson & Rubado, 2014). Für einen durchschnittlichen deutschen Haushalt sind das ca. 90 Euro jährliche Ersparnis, womit sich eine intelligente Heizungssteuerung spätestens in zwei bis vier Jahren rentiert.

Trotz dieser durchaus erheblichen Einsparungsmöglichkeiten läuft die Verbreitung der Technologie eher schleppend. Ob dies möglicherweise an Informationsdefiziten seitens der potenziellen Anwender liegt, sollte innerhalb einer Online-Umfrage untersucht werden, die im Juni und Juli 2018 durchgeführt wurde. Im Rahmen dieser Umfrage wurden den Studienteilnehmer*innen in einer randomisierten kontrollierten Studie produktspezifische Informationen zur Verfügung gestellt und daraufhin die Auswirkungen auf die Kaufbereitschaft nach intelligenten Heizungssteuerungen analysiert. Die Informationen beinhalteten vor allem Auskünfte zur Funktionsweise und Produkteigenschaften, zur Performance und zu den Zielgruppen einer intelligenten Heizungssteuerung. Die Studienteilnehmer*innen waren durchschnittlich 37 Jahre alt, zu 59 % männlich und zu 71 % Eigenheimbesitzer.

Die Antworten der rund 160 Studienteilnehmer*innen zeigten auf, dass die Bereitstellung der produktspezifischen Informationen die persönliche Haltung gegenüber der Technologie eindeutig verbessern konnte. Vor allem das Preis-Leistungs-Verhältnis, der erwartete Nutzungsauf-

wand und die Leistungsfähigkeit der intelligenten Heizsteuerungssysteme wurden von den informierten Studienteilnehmer*innen signifikant besser bewertet als von den Teilnehmer*innen der Kontrollgruppe, die keine spezifischen Informationen über die Steuerungssysteme erhalten hatten. Auch die grundlegende Bereitschaft zum tatsächlichen Kauf der intelligenten Systeme schien durch die Informationsbereitstellung gestiegen zu sein, obgleich die Studienergebnisse aufgrund der begrenzten Studiengröße nicht unbedacht generalisiert werden sollten. Des Weiteren zeigte sich über alle Studienteilnehmer*innen, dass die allgemeine Kaufbereitschaft in erster Linie durch das erwartete Nutzungsvergnügen einer intelligenten Heizungssteuerung bestimmt wird. Die Überzeugung zur Leistungsfähigkeit sowie die Erwartung in Bezug auf die negativen Konsequenzen einer intelligenten Heizungssteuerung spielten zusätzlich eine bedeutende Rolle, dabei beziehen sich die negativen Konsequenzen u. a. auf das Risiko des Kontrollverlusts persönlicher Daten.

Wir interpretieren die Studienergebnisse demzufolge als einen Hinweis darauf, dass Informationskampagnen mit einer ausführlichen Aufklärung über Funktionsweise und Potenziale von intelligenten Heizsteuerungssystemen das grundlegende Interesse der Haushalte steigern könnten. Eine Konzentration der Informationen auf die herausgestellten Schlüsselüberzeugungen und -erwartungen in Bezug auf die Kaufintention intelligenter Heizungssteuerungen könnte diese Steigerung zusätzlich verstärken. Die weitere Verbreitung der modernen Technologie würde wiederum in beachtlichen Energieeinsparungen im Haushaltssektor resultieren und somit einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen aus dem Energieverbrauch leisten.

4.3.5 Zusammenfassung

Die Arbeiten in Abschnitt 4.3 haben gezeigt, dass die Digitalisierung der Energiewirtschaft auch einen großen Einfluss auf das Verbrauchsverhalten von Haushalten haben könnte. Digitale Technologien ermöglichen den Haushaltsmitgliedern ein besseres Verständnis über ihren Verbrauch, wodurch zum einen direkte Energieeinsparungen resultieren können (siehe Abschnitt 4.3.1). Zum anderen können jene Technologien auch einen effizienten Energieverbrauch fördern, indem beispielsweise der Energieverbrauch der Haushalte teilweise an die Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien angepasst wird, wodurch wiederum Angebotsengpässe auf dem Strommarkt vermieden werden könnten (sog. Demand Side Management, siehe Abschnitt 4.3.2). In unseren randomisierten kontrollierten Studien haben wir außerdem gezeigt, dass die einfache Informationsbereitstellung sowohl die Akzeptanz zeitvariabler Tarife in der Gesellschaft fördern- (siehe Abschnitt 4.3.3), als auch die Nachfrage nach Smart Energy-Produkten – in unserem Fall intelligente Heizungssteuerungen – erhöhen kann (siehe Abschnitt 4.3.4).

4.4 Empirische Ergebnisse von Haushaltsbefragungen unter Eigenheimbesitzer*innen

Wie zu Beginn des Kapitels 4 erläutert, können Eigenheimbesitzern*innen nach eigenem Ermessen entscheiden, ob und welche Strom- oder Wärmeerzeugungstechnik sie für ihren Haushalt erwerben möchten. Bei Entscheidungssituationen bzgl. des Erwerbs oder Nicht-Erwerbs von Strom- oder Wärmeerzeugungstechniken dürfte es sich eher um komplexe Investitions- als um („einfache“) Konsumententscheidungen handeln („*Investitionshypothese*“). D. h., es ist zu erwarten, dass Haushaltsentscheidungen für die Anschaffung einer bestimmten Strom- oder Wärmeerzeu-

gungstechnik vornehmlich durch ihre Rentabilität und weniger durch den von ihr gestifteten Nutzen bestimmt wird. Allerdings fokussierten diverse Studien (z. B. Balcombe et al., 2013; Korcaj et al., 2015; A. Palm, 2016; J. Palm, 2018) vornehmlich auf die Untersuchung des Einflusses verschiedener nicht-monetärer Faktoren (z. B. Beitrag zum Umweltschutz, Netzwerkeffekte), die nicht den klassischen monetären Faktoren einer Investitionsentscheidung zugeordnet werden können. Obwohl diese Studien dazu beigetragen haben, unser Verständnis über Motive und Barrieren der Photovoltaikanlagenadoption in verschiedenen Ländern zu erweitern, ist aus der Diffusionsforschung bekannt, dass sich die Einflussfaktoren einer Technologieadaption im Zuge des Diffusionsprozesses verändern (J. Palm, 2018; Rogers, 2003).

Vor diesem Hintergrund galt es in einer Onlineumfrage unter Eigenheimbesitzer*innen empirisch zu ermitteln, welche aktuellen monetären und nicht-monetären Vor- und Nachteile aus der Eigenheimbesitzer*innen Sicht für bzw. gegen den Erwerb einer Photovoltaikanlage sprechen (Abschnitt 4.4.1). Darüber hinaus galt es die Wichtigkeit von monetären und nicht-monetären Einflussfaktoren sowie von unterschiedlichen Geschäftsmodellausgestaltungen und Förderinstrumenten bei Erwerbsentscheidungen von Eigentümer*innen zu untersuchen (Abschnitt 4.4.2). Schließlich untersuchten wir die Flexibilitätsbereitschaft von Eigenheimbesitzer*innen in der Bereitstellung von selbstproduziertem Strom und Speicherkapazität (Abschnitt 4.4.3). Hintergrund dieser Untersuchung war die Überlegung, dass die zunehmende Dezentralisierung im Elektrizitätssystem und die hiermit einhergehend zunehmende variable Stromproduktion systemfreundliche Strategien erfordert, die es Dritten (z. B. Unternehmen, Netzbetreibern, Dienstleistern) ermöglicht auf verschiedene Komponenten (z. B. Batteriespeicher) zuzugreifen.

4.4.1 Aktuelle monetäre und nicht-monetäre Vor- und Nachteile am Beispiel Photovoltaikanlagen

Für die Überprüfung der Investitionshypothese und der Bedeutsamkeit der in der Forschungsliteratur zusammengetragenen relevanten Faktoren wurde im April 2019 eine deutschlandweite Onlineumfrage unter Eigenheimbesitzer*innen durchgeführt. Hierfür wurden 300 Eigenheimbesitzer*innen (Durchschnittsalter 53 Jahre, 61 % männlich) über ein Umfrageinstitut nach einem Quotenplan (Quotenmerkmal: Haushaltsgröße) rekrutiert. Die quotenbasierte Stichprobe von 300 Eigenheimbesitzern*innen wurde zunächst danach befragt, ob ihr Haushalt über eine Photovoltaikanlage mit oder ohne Batteriespeicher verfügt. 80 % (n=241) der Befragten gaben an, dass ihr Haushalt den Haushaltsstrom ausschließlich aus dem öffentlichen Stromnetz bezieht (Haushaltstyp 1), während 12 % bzw. 7 % der Befragten angaben, dass ihr Haushalt über eine Photovoltaikanlage (Haushaltstyp 2) bzw. über eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher verfügt (Haushaltstyp 3).

Die Befragten aus Haushalten ohne Photovoltaikanlage wurden zufällig neun verschiedenen Gruppen zugewiesen und in Abhängigkeit ihrer Gruppenzugehörigkeit danach befragt, welche Vor- und Nachteile für Sie dafür bzw. dagegen sprechen, a) eine Photovoltaikanlage für ihren Haushalt zu kaufen (Gruppe 1), b) eine Photovoltaikanlage für ihren Haushalt zu mieten (Gruppe

2), c) eine Photovoltaikanlage mit einem Batteriespeicher und einem Energiemanagementsystem für ihren Haushalt zu kaufen (Gruppen 3 bis 8)¹⁴, oder d) Strom aus dem öffentlichen Stromnetz zu beziehen (Gruppe 9). Die einzelnen Nennungen, die Befragte in offene Antwortfelder eingeben konnten, wurden nach der Feldphase für eine quantitative Analyse aufbereitet, indem Nennungen eines gleichen Sachverhalts manuell zusammen gruppiert bzw. kategorisiert wurden.

Insgesamt nannten die 241 Befragten des Haushaltstyps 1 über alle neun Gruppen hinweg 295 Vorteile sowie 356 Nachteile.¹⁵ In Gruppe 1 bis Gruppe 8, in denen jeweils die Vor- und Nachteile zu PV-Anlagen mit oder ohne Batteriespeicher und Energiemanagementsystemen erfragt wurden, entfiel der größte Anteil an den insgesamt genannten 273 Vorteilen auf Geldeinsparungen (22 %), der zweitgrößte Anteil auf Umweltschutzaspekte (19 %), der drittgrößte Anteil auf Unabhängigkeitsaspekte (15 %) und der viertgrößte Anteil auf Eigenstromversorgungsaspekte (11 %). Hierbei fasst die Kategorie Unabhängigkeitsaspekte jene Nennungen zusammen, in denen die Unabhängigkeit von einer Stromversorgung über das öffentliche Stromnetz zentral war, während die Kategorie Eigenversorgungsaspekte jene Antworten zusammenfasst, die vornehmlich die Selbsterzeugung und den Eigenverbrauch des Stroms in den Vordergrund stellten. Da sich die Empfindungen von Personen auf zwei unterschiedliche Sachverhalte (nämlich Unabhängigkeit und Eigenstromversorgung) bezieht, ist es aus unserer Sicht sinnvoll, zwischen diesen beiden Kategorien zu unterscheiden, auch wenn beide Kategorien inhaltlich in einem Zusammenhang stehen.

Dem gegenüber entfiel der größte Anteil auf Seiten der insgesamt 292 genannten Nachteile in Gruppe 1 bis Gruppe 8 auf hohe Anschaffungs- bzw. Einstiegskosten (42 %), gefolgt vom Aufwand bei der Installation der Anlage (8 %), nachteilhaften Standortfaktoren (7 %) wie Schattenwurf durch Bäume oder suboptimale Dachkonstruktionen und auf Bedenken bzgl. technischer Aspekte (4 %) wie die Haltbarkeit von PV-Anlagen. Somit verteilt sich der Großteil der genannten Vorteile (67 %) relativ gleichmäßig auf verschiedene Dimensionen während der Großteil der genannten Nachteile (61 %) von investitionsrelevanten Faktoren dominiert wird. Es zeigt sich aber auch, dass neben den investitionsrelevanten Motivatoren (Geldeinsparungen und Anschaffungs- und Einstiegskosten) weitere nutzenstiftende Motivatoren relevant sein dürften.

Darüber hinaus lässt die Dominanz der Anschaffungs- und Einstiegskosten auf Seiten der Nachteile erwarten, dass diese wichtigste Adoptionsbarriere (hohe Anschaffungs- bzw. Einstiegskosten) mittels alternativer Geschäftsmodelle (z. B. Miet-, oder Leasingmodelle) überwunden werden könnte. Eine individuelle Auswertung der in Gruppe 2 („*Welche Vor- und Nachteile sprechen für Sie dafür bzw. dagegen eine Photovoltaik für ihren Haushalt zu mieten?*“) genannten Nachteile zeigt aber, dass die Nachteile einer Anmietung von PV-Anlagen auch hier vornehmlich in

¹⁴ In den Gruppen 3 bis 8 war zusätzlich von Interesse, welche Vor- und Nachteile die Befragten mit verschiedenen Funktionen von Energiemanagementsystemen (z. B. Monitoren, Automatisierung) assoziieren. Daher wurde den Befragten der Gruppen 3 bis 8 jeweils eine Funktion des Energiemanagementsystems erläutert. In Gruppe 3, in der die Monitoring-Funktion im Mittelpunkt unseres Interesses stand, lautete diese Erläuterung beispielsweise: „Bei dem Energiemanagementsystem können Sie fortlaufend für Ihren Haushalt einsehen, wie viel Strom die Photovoltaikanlage produziert und wie viel des produzierten Stroms verbraucht, in der Batterie zwischengespeichert oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist wird.“ Da die Antworten der Befragten dieser fünf Gruppen keine nennenswerten Unterschiede im Hinblick auf die Funktionserläuterungen zeigten, wurden Gruppen 3 bis 8 gemeinsam ausgewertet.

¹⁵ Eine Befragungsperson konnte im Einklang mit der Fragestellung mehrere Vor- bzw. Nachteile benennen.

Aspekten gesehen werden, die unmittelbar mit dem Geschäftsmodell verknüpft sind. In 23 % der insgesamt 30 genannten Nachteile der Gruppe 2 äußerten die Befragten eine Präferenz für den Besitz von Eigentum und in weiteren 13 % der Nennungen verwiesen die Befragten auf laufende Kosten als Nachteil eines Mietmodells. Weitere empirische Evidenz für die relativ geringe Präferenz für die Anmietung von Photovoltaikanlagen mag in der Tatsache gesehen werden, dass in der vorliegenden Umfrage nur sechs der 59 Befragten aus einem Haushalt mit Photovoltaikanlage (Haushaltstyp 2 und Haushaltstyp 3) angegeben haben, die technische Anlage gemietet oder geleast zu haben.¹⁶

4.4.2 Wichtigkeit von monetären und nicht-monetären Einflussfaktoren, Förderbestimmungen und Geschäftsmodellaspekten bei Adaptionentscheidungen am Beispiel der Photovoltaikanlage

Die im vorangegangenen Abschnitt präsentierten Ergebnisse zeigen auf, dass Eigenheimbesitzer*innen mit der Anschaffung von Photovoltaikanlagen (mit und ohne Batteriespeicher) sowohl investitionsrelevante (z. B. Geldeinsparungen, hohe (Anfangs-)Kosten) als auch nutzenrelevante (z. B. Umweltschutz) Vor- und Nachteile in Verbindung bringen. Weil sowohl bei den Vor- als auch Nachteilen investitionsrelevante Aspekte am häufigsten genannt wurden, stellt sich weiterhin die Frage, wie wichtig investitionsrelevante Aspekte im Vergleich zu nutzenstiftenden Aspekten bei Adaptionentscheidungen sind.

Darüber hinaus bestand ein weiteres Untersuchungsziel dieses Projektes darin, den Einfluss von Geschäftsmodellausgestaltungen sowie von ausgewählten politischen Rahmenbedingungen auf die Adaptionentscheidung von Eigenheimbesitzern*innen zu untersuchen. Den Entscheidungssituationen von Haushalten ist bei der Anschaffung von Strom- oder Wärmeerzeugungstechniken gemeinsam, dass sie im Kontext von politischen Rahmenbedingungen erfolgen. Die Transformation des deutschen Energiesystems wird mit einer großen Zahl an Förderprogrammen der öffentlichen Hand flankiert, die fortlaufend ersetzt, modifiziert und/oder ergänzt werden. Neben Investitionszuschüssen von Bund, Ländern und ggfs. Kommunen werden Eigenheimbesitzern*innen ebenfalls auf unterschiedlichen Verwaltungsebenen zinsgünstige Kredite angeboten, um die Anschaffung von und/oder den Umstieg auf erneuerbare Wärme- und Stromerzeugungstechnologien finanziell attraktiver zu gestalten. Insgesamt erweist sich die Förderprogrammthematik als sehr vielschichtig. Eigenheimbesitzern*innen kommt hierbei zu Gute, dass der Bund (BAFA) die Energieberatung bzgl. Energieeffizienzmaßnahmen (dies umfasst auch den Heizungsaustausch) durch registrierte Energieberater seit 2020 (vgl. BMWi, 2020) mit 80 % des zwendungsfähigen Beratungshonorars bezuschusst (maximal 1.300 Euro bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern). Auf diese Weise fördert dieses Programm für Eigenheimbesitzer*innen die Transparenz im Hinblick auf die optimale Technologie(bündel)wahl für das Eigenheim, bestehende Fördermöglichkeiten und die Abwicklung der Förderverfahren (Antragstellung, Verwendungsnachweis). In diesem Forschungsprojekt stellte sich daher die Frage, wie wichtig die Ausgestaltung von Förderzuschüssen (z. B. einmaliger Investitionszuschuss, fortlaufender

¹⁶ Da Miet- und Leasingoptionen im Vergleich zur Kaufoption zeitlich kürzer am Markt verfügbar sind, mag dies als eine Alternativerklärung für die geringen Marktanteile von angemieteten Photovoltaikanlagen gesehen werden. Allerdings zeigt sich auf Basis der Umfragedaten, dass von 30 Photovoltaikanlagen, die zwischen 2013 bis 2018 installiert wurden, lediglich drei PV-Anlagen angemietet wurden.

Zuschuss, zinsvergünstigte Kredite) bei der Entscheidungsfindung von Eigenheimbesitzern*innen ist.

Für diese Zwecke wurde ein Discrete-Choice-Experiment (im Folgenden DCE) konzipiert und in eine Online-Umfrage integriert. An dieser Online-Studie nahmen 735 Eigenheimbesitzer*innen (Durchschnittsalter 54 Jahre, 55 % männlich) aus Haushalten mit PV-Anlage (n=485, Durchschnittsalter 56 Jahre, 51 % männlich) sowie aus Haushalten ohne PV-Anlage (n=250, Durchschnittsalter 52 Jahre, 63 % männlich) im August 2020 teil, die über ein Umfrageinstitut nach einem Quotenplan rekrutiert wurden (Quotenmerkmal: Haushaltsgröße). Den 485 Studienteilnehmern*innen dieser quotenbasierten Stichprobe, deren Haushalt ohne eine PV-Anlage ausgestattet ist, wurden 12 hypothetische Entscheidungssituationen präsentiert, bei denen sie jeweils zwischen vier Alternativen wählen konnten (vgl. Tabelle 5).

Drei der vier präsentierten Alternativen einer Entscheidungssituation wurden mit folgenden neun Attributen beschrieben:

- a) der technischen Anlage, die zum Erwerb angeboten wird (Photovoltaikanlagen mit oder ohne Batteriespeicher),
- b) dem Anbieter der Anlage (z. B. überregionales Energieversorgungsunternehmen, Onlinehändler),
- c) der Höhe der Erwerbs- und Installationskosten der Anlage (z. B. 15.000 Euro, 20.000 Euro),
- d) der jährlich zu erwartenden nominalen Rendite (z. B. 2 %, 6 %),
- e) einem etwaigen staatlichen Investitionszuschuss (z. B. einmaliger Investitionszuschuss),
- f) der möglichen Finanzierungsform (z. B. Eigenfinanzierung, Kreditfinanzierung),
- g) dem Eigenversorgungspotenzial der Anlage (z. B. 20 %, 40 %),
- h) den inbegriffenen kostenfreien Dienstleistungen des Anbieters, sowie
- i) dem Beitrag zur jährlichen Einsparung des CO₂-Ausstoßes in der deutschen Stromproduktion (z. B. 490 kg).

Die Ausgestaltung der Attribute variierte gemäß eines experimentellen Plans, wobei jede der präsentierten Alternativen pro Befragungsperson eine individuelle Kombination an Attributausprägungen aufwies. Für den Fall, dass Eigenheimbesitzer*innen keine der drei Angebote erwerben wollten, hatten sie die Möglichkeit Alternative 4 („*ich würde keine dieser Anlagen erwerben*“) zu markieren. Dies erlaubt es, die Entscheidungssituationen in DCEs zu Sachverhalten wie in dem vorliegenden Fall realistischer abzubilden.

Tabelle 5: Beispielhafte Darstellung einer von insgesamt 12 Entscheidungssituationen

Bitte vergleichen Sie die folgenden Angebote sorgfältig und markieren Sie das Angebot, das Sie für Ihr Eigenheim erwerben würden. Sollten Sie keins der Angebote für Ihr Eigenheim erwerben wollen, markieren Sie bitte die rechte Option.				
Technische Anlage	Photovoltaikanlage	Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher	Photovoltaikanlage	Ich würde keine dieser Anlagen erwerben
Anbieter	Überregionales Energieversorgungsunternehmen	Onlinehändler	Onlinehändler	
Investitionskosten	15.000 Euro	15.000 Euro	20.000 Euro	
Jährliche zu erwartende nominale Rendite über 20 Jahre	2 %	2 %	6 %	
Staatlicher Investitionszuschuss	Einmaliger Investitionszuschuss von 10 %	Kein Investitionszuschuss	Kein Investitionszuschuss	
Finanzierungsform des gesamten Kauf- und Installationspreises	Eigenfinanzierung	Kreditfinanzierung Effektiver Jahreszins: 3,53 % Kreditlaufzeit: 10 Jahre Restschuld nach 10 Jahren: 0 Euro	Eigenfinanzierung	
Eigenversorgungspotenzial der Anlage	20 %	40 %	40 %	
Inbegriffene kostenfreie Dienstleistung des Anbieters	Grafische Visualisierung der mit der PV-Anlage produzierten Strommenge und des aktuellen Stromverbrauchs (in Minutenauflösung)	Überwachung der PV-Anlage und des Batteriespeichers zu Wartungs- und Reparaturzwecken aus der Ferne	Grafische Visualisierung der mit der PV-Anlage produzierten Strommenge und des aktuellen Stromverbrauchs (in Minutenauflösung)	
Einsparungen des jährlichen CO₂-Ausstoßes in der deutschen Stromproduktion	Einsparung in Höhe von 490 kg	Einsparung in Höhe von 5.000 kg	Einsparung in Höhe von 490 kg	
	0	0	0	0

DCEs erlauben es unter anderem, die Wichtigkeit der Attribute bei der Entscheidungsfindung für das durchgeführte Experiment zu ermitteln. Aus der (relativen) Attributwichtigkeit lässt sich für jedes DCE schlussfolgern, welches Attribut bei den Entscheidungen der Studienteilnehmer*innen die größte bzw. geringste Rolle spielte. Es handelt sich also um studienspezifische Werte. Angesichts der relativ zahlreichen und unterschiedlichen Attribute, mit denen die drei Alternati-

ven in diesem DCE beschrieben wurden, ist es unter anderem möglich, investitions- und nutzenrelevante Faktoren miteinander zu vergleichen. Abbildung 17 zeigt die relative Attributwichtigkeit. Investitionsrelevante Faktoren (z. B. Investitionskosten, kostenfreie Dienstleistung, etwaiger staatlicher Investitionszuschuss, jährlich nominale Rendite) spielen bei der Entscheidungsfindung eine deutlich wichtigere Rolle als nicht investitionsrelevante Faktoren. Hierbei erweist sich die Höhe der Investitionskosten von besonderer Bedeutung (24 %), gefolgt von kostenfreien Dienstleistungen (14 %) sowie staatlichen Investitionszuschüssen (12 %). Gemeinsam vereinen diese drei Attribute 50 % auf sich, was die praktische Relevanz der Untersuchung von Investitionskosten, Geschäftsmodellen und staatlichen Förderbedingungen hervorhebt und Fragen nach deren Ausgestaltung aufwirft.

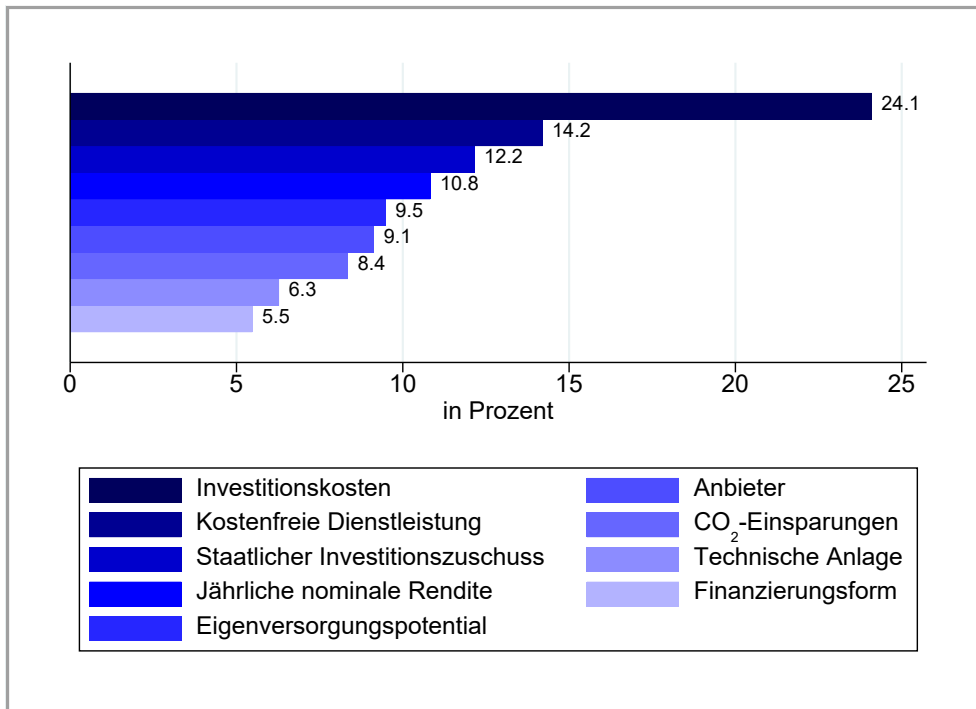


Abbildung 17: Relative Wichtigkeit der Attribute bei der Entscheidungsfindung im vorliegenden DCE
 Anmerkungen: Analysen basieren auf Angaben von 485 Eigenheimbesitzern*innen.

4.4.3 Flexibilität in der Bereitstellung von PV-Strom und Speicherkapazität

Im Projekt stand aber nicht nur die Analyse von Adaptionsentscheidungen von Eigenheimbesitzern*innen im Mittelpunkt des Interesses. Auch wenn Eigenheimbesitzer*innen mit ihren individuellen Adaptionsentscheidungen einen Beitrag zur Zielerreichung der Energiewende leisten, besitzt ihre Einzelentscheidung eine gewisse Systemrelevanz. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass Eigenheimbesitzer*innen sich für Photovoltaikanlagen entscheiden, die aufgrund ihrer variablen Stromproduktion das Versorgungsnetz punktuell stark belasten können (Orth et al., 2018). 2020 sind 1,7 Mio. PV-Anlagen mit einer Nennleistung von 49,5 GW installiert (Strom-Report, 2020). Batteriespeicher mit sowie ohne Energiemanagementsysteme(n) können dazu beitragen, dieses Problem zu entschärfen, indem sie systemfreundlich eingesetzt werden. Dies

allerdings erfordert auf der Seite der Eigenheimbesitzer*innen die Bereitschaft, Dritten (z. B. Unternehmen, Netzbetreibern, Dienstleistern) den Zugriff auf verschiedene Komponenten (z. B. Batteriespeicher) zu gestatten. Darüber hinaus mag eine weitere Hürde darin bestehen, dass ein systemfreundlicher Betrieb von Anlagen durch Dritte in einem Konflikt mit den Interessen von Eigenheimbesitzern*innen steht. Diese Vermutung dürfte genau dann relevant sein, wenn ein systemfreundlicher Einsatz für den/die Eigenheimbesitzer*in einzelwirtschaftlich betrachtet suboptimal ist. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit Eigenheimbesitzer*innen bereit sind, Dritten Zugriffsrechte zu gewähren und wie sich die Bereitschaft von Eigenheimbesitzern*innen vor dem Hintergrund verschiedener Ausgestaltungsformen dieser Zugriffe verändert. Hiermit ergänzen wir den Aspekt der Flexibilitätsbereitschaft im Stromkonsum (vgl. Abschnitt 4.3) um den Aspekt der Flexibilitätsbereitschaft in der Bereitstellung von selbstproduziertem Strom und Speicherkapazität. Konkret widmen wir uns der Frage: „Sind Eigenheimbesitzer*innen mit Stromerzeugungsanlagen flexibel genug, um in einer möglichen künftigen Strategie für Netzstabilität bedacht zu werden?“ Um die Flexibilität der 250 Studienteilnehmer*innen der Online-Studie aus Haushalten mit PV-Anlage in der Bereitstellung von PV-Strom und Batteriespeicherkapazität zu untersuchen, haben wir den Befragten zwei hypothetische Situationsbeschreibungen präsentiert.

In Situationsbeschreibung 1 (im Folgenden auch Flexibilität PV-Stromverkauf genannt) baten wir die Studienteilnehmer*innen sich vorzustellen, dass ihr Haushalt über einen Batteriespeicher verfügt, der einen gewissen Ladestand aufweist (mögliche Ausprägungen: halbgeladen oder vollgeladen) und ein Energieversorgungsunternehmen ihnen diesen Inhalt zu einem gewissen Preis (mögliche Alternativen: 0,15 Euro/0,30 Euro/0,40 Euro/0,45 Euro/0,50 Euro für jede Kilowattstunde) abkaufen möchte. Dieser Vorgang wurde den Studienteilnehmer*innen mit einer gewissen Information begründet (mögliche Alternativen: um das Stromnetz stabil zu halten/um den Ausbau erneuerbarer Energien zu erleichtern). Hierbei entschied ein Zufallsprozess darüber, welche Alternative für eine Befragungsperson in der hypothetischen Situationsbeschreibung zu lesen war. Anschließend baten wir die Studienteilnehmer*innen uns anzugeben, ob sie dem Energieversorgungsunternehmen den im Batteriespeicher gespeicherten Strom verkaufen würden. Die Studienteilnehmer*innen konnten hierauf mit „nein“, „ja“ oder „weiß nicht“ antworten.

In unseren Analysen der 219 gültigen Antworten zeigt sich, dass die Entscheidung der Studienteilnehmer*innen, dem Energieversorgungsunternehmen den im Batteriespeicher gespeicherten Strom zu verkaufen, in statistischem Sinne weder vom Ladestand noch von der angeführten Begründung beeinflusst wird ($\alpha=0,05$). Hingegen hatte der Preis einen erwartungsgemäßen und statistisch signifikanten Einfluss ($\alpha=0,05$). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Haushalt den Inhalt seines Batteriespeichers an ein Energieversorgungsunternehmen verkauft, fällt in unseren empirischen Analysen um 27 %-punkte höher aus, wenn der PV-Strom mit 0,30 Euro anstelle von 0,15 Euro pro Kilowattstunde vergütet wird. Darüber hinaus steigert ein höherer Vergütungspreis als 0,30 Euro die Wahrscheinlichkeit, den PV-Strom an das Energieversorgungsunternehmen zu verkaufen, allerdings nicht weiter. Mit anderen Worten liegt die Preisschwelle bei 0,30 Euro pro Kilowattstunde, was dem durchschnittlichen Arbeitspreis für eine Kilowattstunde Haushaltsstrom entspricht.

In Situationsbeschreibung 2 (im Folgenden auch Flexibilität Speicherkapazität genannt) baten wir die Studienteilnehmer*innen sich vorzustellen, dass ein Energieversorgungsunternehmen

kurzfristig eine gewisse Speicherkapazität (mögliche Ausprägungen: 50 % oder 100 %) ihres Batteriespeichers nutzen möchte, um überschüssigen Strom für eine gewisse Dauer (mögliche Ausprägungen: eine Stunde, sechs oder 12 Stunden) zwischen zu speichern. Darüber hinaus wurde den Studienteilnehmer*innen geschildert, dass das Energieversorgungsunternehmen ihnen diesen Zugriff mit einem gewissen Geldbetrag (mögliche Ausprägungen: 0,10 Euro, 0,20 Euro oder 0,30 Euro) für jede Kilowattstunde Strom vergütet, sie allerdings während der Zugriffszeit eine gewisse Kapazität (mögliche Ausprägungen: 50 % oder 100 %) des Batteriespeichers nicht für eigene Zwecke nutzen könnten. Wieder entschied ein Zufallsprozess darüber, welche Ausprägungen in der hypothetischen Situationsbeschreibung formuliert wurden. Anschließend baten wir die Studienteilnehmer*innen uns anzugeben, ob Sie dem Energieversorgungsunternehmen gestatten würden, die Speicherkapazität Ihres Batteriespeichers kurzfristig zu nutzen. Die Studienteilnehmer*innen konnten mit „nein“, „ja“ oder „weiß nicht“ antworten.

Unsere auf 205 gültigen Antworten fußenden Analysen zeigen, dass die Entscheidung der Studienteilnehmer*innen, dem Energieversorgungsunternehmen den Zugriff auf ihren Batteriespeicher zu gewähren, statistisch gesehen weder von der gewählten Speicherkapazität noch von der Zugriffsdauer abhängen ($\alpha=0,05$). Vielmehr wurde ihre Entscheidung in signifikanter Weise durch die Preiswahl und die Eigennutzungsmöglichkeit beeinflusst ($\alpha=0,05$). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Haushalt einem Energieversorgungsunternehmen die Speicherkapazität seines Batteriespeichers zur Verfügung stellt, fällt in unseren empirischen Analysen erwartungsgemäß und in signifikanter Weise um 13 %-punkte ($\alpha=0,10$) (oder 23 %-punkte ($\alpha=0,05$)) höher aus, wenn das Energieversorgungsunternehmen dem Haushalt den Zugriff mit 0,20 Euro (oder 0,30 Euro) anstelle von 0,10 Euro pro Kilowattstunde Strom entlohnt. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Eigennutzungsmöglichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung der Eigenheimbesitzer*innen hat. Kann der Haushalt während des Zugriffs durch das Energieversorgungsunternehmen noch 50 % der Speicherkapazität für eigene Zwecke verwenden, steigt die Wahrscheinlichkeit den Zugriff zu gewähren, in erwartungsgemäßer und signifikanter Weise um 17 %-punkte ($\alpha=0,05$).

4.4.4 Zusammenfassung

Insgesamt lassen sich auf Basis der verschiedenen empirischen Untersuchungen unter Eigenheimbesitzer*innen mehrere Ergebnisse festhalten. Zum einen sollte die Adaptionentscheidung vornehmlich als eine Investitionsentscheidung verstanden werden. So verteilen sich die Gründe, die aus Sicht von Eigenheimbesitzer*innen für die Anschaffung einer Photovoltaikanlage sprechen, auf mehrere unterschiedliche Dimensionen (Geldeinsparungen, Umweltschutz, Unabhängigkeitsaspekte, Eigenstromversorgung), wobei die Liste der Vorteile von Überlegungen zu Geldeinsparungen angeführt wird (vgl. Abschnitt 4.4.1). Gleichzeitig dominieren auf der Seite der Nachteile die (hohen) Anschaffungs- und Einstiegskosten die Überlegungen von Eigenheimbesitzer*innen. Eine Adaption ist also umso wahrscheinlicher je mehr Kosten sich mit der Photovoltaikanlage einsparen lassen bzw. je geringer die Anschaffungs- und Einstiegskosten sind. Diese Aussage stützt sich auch auf die Ergebnisse der Analysen in Abschnitt 4.4.2. Aus diesen geht hervor, dass investitionsrelevante Faktoren, wie z. B. Investitionskosten, ein etwaiger staatlicher Investitionszuschuss, die jährlich nominale Rendite der Investition bei der Entscheidungsfindung eine deutlich wichtigere Rolle spielen als nicht investitionsrelevante Faktoren. Im Hinblick auf die Anschaffungs- und Einstiegskosten ist zu bedenken, dass die für ein Immobilienobjekt

konkret kalkulierten Anschaffungs- und Installationskosten in Abhängigkeit von etwaig erforderlichen Umfeldmaßnahmen (z. B. Installation eines neuen Zählerschranks oder Erdspießes) deutlich höher ausfallen können als die allgemeinen einsehbaren Anbieterpreise für Photovoltaikanlagen es vermuten lassen. Alternative Geschäftsmodelle, wie zum Beispiel Miet- oder Leasingmodelle, mit der diese (wichtigste) Adoptionsbarriere theoretisch ausgehebelt werden könnte, werden von Eigenheimbesitzern*innen ebenfalls kritisch gesehen. Eine relativ stark ausgeprägte Präferenz für den Besitz von Eigentum sowie Bedenken bzgl. laufender Kosten bei gemieteten und geleasten Anlagen lassen nicht erwarten, dass die Diffusion von Photovoltaikanlagen mit Hilfe dieser Geschäftsmodellalternativen substantiell voranschreiten wird. Gerade vor diesem Hintergrund dürften zinsgünstige Förderkredite, wie sie etwa für Photovoltaikanlagen aber auch für die Umstellung der Heizung auf erneuerbaren Energien von der KfW (z. B. KfW 270, KfW 167) oder von der NRW.BANK (z. B. NRW.BANK. Gebäudesanierung) angeboten werden, für Eigenheimbesitzer*innen mit Adaptionabsicht aber ohne nötigem Eigenkapital eine gute Alternative darstellen. Sie ermöglichen es Eigentümern*innen, Eigentum zu erwerben, während die Investitionskosten bei relativ geringen Kreditzinsen auf die Dauer der Kreditlaufzeit umgelegt werden können. Die zu erwartenden Geldeinsparungen durch die Anschaffung einer auf erneuerbaren Energien basierenden und/oder moderneren Anlage kompensieren zumindest teilweise die laufenden Kreditkosten. In diesem Zusammenhang besteht allerdings das Problem, dass die Anträge für Förderkredite der KfW und NRW.BANK über das Filialnetz der Sparkassen, Volks- und Raiffeisenbanken und der Geschäftsbanken (in der Regel die Hausbank) abgewickelt werden. Aufgrund eines fehlenden Kontraktionszwangs auf Seiten der Sparkassen, Volks- und Raiffeisenbanken sowie der Geschäftsbanken sind Eigentümer*innen auf das Mitwirken ihrer Hausbank angewiesen.

Im Kontext von Systemstabilitätsstrategien zeigt sich zudem, dass die Bereitschaft von Haushalten mit Photovoltaikanlage, Energieversorgungsunternehmen Zugriff auf ihren Batteriespeicher zu gewähren, um auf diesem kurzfristig überschüssigen Strom zwischen zu speichern oder von diesem in Zeiten einer Unterversorgung PV-Strom abzurufen, in starkem Maße von der Vergütung pro kWh Strom abhängt. Hierbei erweist sich ein Preis in Höhe von 0,30 Euro pro Kilowattstunde Strom als bereitchaftsmaximierend. Fraglich aber ist, ob dieser Preis für Netzbetreiber rentabel ist bzw. ob andere Alternativen, wie z. B. die Errichtung von zentralen kurzfristigen Speichermöglichkeiten durch den Netzbetreiber nicht kostengünstiger sind.

5 Ökonomische Analysen

Neben den in Kapitel 4 beschriebenen Attributen der Investitionsentscheidung und möglichen Ko-Benefits von Smart Technologien ist der Einsatz von Technologien treibend für die finanzielle Belastung der Haushalte. Ferner gibt es technische, finanzielle und regulatorische Rahmenbedingungen, die die Investitionsentscheidung sowie die Ausgaben der Haushalte beeinflussen können. Die Wirtschaftlichkeit und die optimale Anschaffung verschiedener Energietechnologien im Haushaltsbereich wurden in diesem Kapitel anhand von drei separaten Analysen ermittelt.

Zuerst definiert Abschnitt 5.1 die Haushaltsgruppen, die in allen drei Analysen berücksichtigt werden. Die erste Analyse (Abschnitt 5.2) konzentriert sich auf die Stromversorgung und ermittelt sowohl technische (z. B. Energieeffizienz) als auch steuerliche und finanzielle Aspekte, die die Wirtschaftlichkeit und die optimale Dimensionierung von PV-Anlagen und Batteriespeichern beeinflussen. In der zweiten Analyse (Abschnitt 5.3) wird die kostenminimale Energiebereitstellung für Haushalte anhand eines Optimierungsmodells bestimmt. Dabei wird unter anderem die Investitionsentscheidung, Anlagenauslegung und die Betriebsoptimierung für die Strom- sowie Wärmeversorgung im Rahmen eines Szenarios bis 2040 betrachtet. Die dritte Analyse (Abschnitt 5.4) ergänzt die zweite Analyse durch die Berücksichtigung von nicht-monetären Präferenzen und deren Auswirkungen auf die Investitionsentscheidungen der Haushalte. Individuelle Einflussfaktoren wie zum Beispiel Umweltschutz- und Autarkiepräferenz werden durch Zahlungsbereitschaften im Modell berücksichtigt. Die optimale Energiebereitstellung für diese abwägenden Haushalte wird wieder im Rahmen eines Szenarios bis 2040 untersucht und mit dem kostenminimierenden Fall der zweiten Analyse verglichen.

5.1 Definition der Haushaltsgruppen

Im Rahmen der ökonomischen Analysen werden heterogene Haushalte berücksichtigt, weil die Wirtschaftlichkeit von Energietechnologien für Einfamilienhäuser abhängig von haushaltspezifischen Strom- bzw. Wärmelastprofilen ist. Um diese Heterogenität zu berücksichtigen, wurden zunächst vier verschiedene Haushaltsgruppen definiert, die sich hinsichtlich der Anzahl und des Erwerbsstatus der Haushaltsmitglieder wie folgt unterscheiden:

- Ein Vier-Personenhaushalt, in dem zwei erwerbstätige Erwachsene und zwei Kinder leben (HH1a),
- Ein Vier-Personenhaushalt, in dem nur eine der beiden erwachsenen Personen erwerbstätig ist und zwei Kinder leben (HH1b),
- Ein Zwei-Personenhaushalt, in dem zwei Erwachsene im Ruhestand leben (HH2a),
- Ein Zwei-Personenhaushalt, in dem zwei erwerbstätige Erwachsene leben (HH2b).

Mit dieser Definition werden gängige Haushalte in Deutschland abgebildet (Statistisches Bundesamt, 2020). Alle Haushaltsgruppen befinden sich in selbstgenutztem Eigentum. Diese Annahme ermöglicht die Analysen zu der Wirtschaftlichkeit von einer Investition in dezentrale Energieerzeugungstechnologien, da das Mieter-Vermieter-Dilemma öfter in einer Auslassung von energetisch sinnvollen Investitionen resultiert (EnergieAgentur.NRW GmbH, 2015). Außer-

dem führen die unterschiedlichen Arbeitszeiten und Bewohnerzahlen zu Variationen in den Energieverbrauchsverhaltensweisen und des Energieverbrauchsniveaus, die sich sowohl auf die Strom- als auch auf die Wärmelast auswirken.

Für die Betrachtung dieser heterogenen Stromverbrauchscharakteristiken ersetzen wurden synthetische jährliche Stromlastprofile mittels des *Loadprofilegenerators*¹⁷ generiert. Dabei handelt es sich um ein Tool, das durch die Simulation des Verbraucherverhaltens von Haushaltsmitgliedern Lastprofile für den Energie- und Wasserverbrauch in vordefinierten Haushalten erstellt. Mit dem *Loadprofilegenerator* können beliebige Eigenschaften wie Standort, Bewohnerzahl, Gebäudeart und -alter, Arbeitszeiten, Urlaubszeiten, Geräteauswahl und -zustand für Haushalte definiert werden. Diese individuelle Ausgestaltung der Haushaltseigenschaften ermöglicht die Simulation von typischen und heterogenen Stromlastprofilen mit hohen Fluktuationen in einer detaillierten zeitlichen Auflösung¹⁸.

Für die Analysen in den Abschnitten 5.2 bis 5.4, wurden die vier obengenannten Haushaltsgruppen in dem *Loadprofilegenerator* ausgewählt. Zudem wurden die folgenden Variationen innerhalb der Haushaltsgruppen berücksichtigt:

- zwei Varianten in Bezug auf die Ausstattung von elektrischen Geräten, nämlich ausschließlich energieeffiziente Geräte bzw. eine zufällige Kombination von Geräten mit unterschiedlichen Effizienzniveaus, und
- zwei Varianten in Bezug auf Urlaubszeiten, nämlich einem 20-tägigen Urlaub in Juli bzw. einem 16-tägigen Urlaub in Dezember.

Diese weitere Differenzierung ermöglicht je Haushaltsgruppe vier verschiedene Kombinationen von Urlaubszeiten und Geräteausstattungen, sodass sich die Lastprofile der betrachteten Haushaltsgruppen nicht nur entlang der zeitlichen Dimension unterscheiden, sondern auch in der absoluten jährlichen Größenordnung. Durch die Berücksichtigung solcher Aspekte wird in den Analysen eine erhöhte Heterogenität des Energiekonsums der betrachteten Haushalte erzielt.

Weitere Annahmen insbesondere zu dem elektrischen und thermischen Verbrauchsverhalten der Haushalte sind für die Analysen in den Abschnitten 5.3 und 5.4 notwendig. Diese werden in den Abschnitten 5.3.2 und 5.4.2 spezifiziert.

¹⁷ Der Loadprofilegenerator kann hier eingesehen werden <https://www.loadprofilegenerator.de/>. Weitere Details, siehe Pflugradt (2016).

¹⁸ Der Loadprofilegenerator kann Lastprofile bis hin zu einer minütlichen Auflösung erzeugen.

5.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse von PV mit und ohne Batteriesystemen und mögliche Zielkonflikte

Im Rahmen des Projekts wurde eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung von PV-Anlagen mit optionalen Batteriespeichern für verschiedene Haushaltsgruppen durchgeführt, wobei zudem relevante finanzielle und steuerliche Aspekte gesonderte Berücksichtigung fanden.¹⁹ Für jeden der vier Haushaltsgruppen (siehe Abschnitt 5.1) wurden 240 unterschiedliche Lastprofile erstellt, um Unterschiede in der Geräteausstattung (ausschließlich geräteeffiziente Haushaltsausstattung vs. zufällige Gerätekombination, im Folgenden als Standardgeräteausstattung bezeichnet) sowie Unterschiede in präferierten Urlaubszeiten (Juli versus Dezember) zu berücksichtigen und letztlich die Heterogenität von Haushaltslastprofilen abzubilden.

In unserer Analyse betrachteten wir PV-Anlagen mit einer Nennleistung von 4,72 kW_P, 6,49 kW_P, 7,96 kW_P, 9,73 kW_P (im Folgenden als S-PV, M-PV, L-PV bzw. XL-PV bezeichnet). Gleichermaßen betrachteten wir Batteriespeichersysteme mit einer Bruttospeicherkapazität von 3,3 kWh, 6,5 kWh, 9,8 kWh, 13,1 kWh (im Folgenden als S-BS, M-BS, L-BS bzw. XL-BS bezeichnet). Tabelle 6 zeigt die angenommenen Bruttoinvestitions- und jährlichen Bruttobetriebskosten, die auf der Grundlage von Online-Angeboten sowie der Fachliteratur zum Thema ausgewählt wurden. Die Bruttobetriebskosten steigen annahmegemäß mit jährlicher Inflationsrate von 2 %.

Tabelle 6: Überblick von angenommen Bruttoinvestition- und Bruttobetriebskosten

Systeme Kosten	PV-Anlagen (Euro per kW _P)				Batteriespeicher (Euro per kWh)			
	4.72 kW _P [S]	6.49 kW _P [M]	7.96 kW _P [L]	9.73 kW _P [XL]	3.3 kWh [S]	6.5 kWh [M]	9.8 kWh [L]	13.1 kWh [XL]
Anschaffung	1.467	1.372	1.258	1.170	1.179	826	680	619
Betrieb (Jahr 1)	31	25	23	20	-	-	-	-

Für jedes der 960 simulierten Lastprofile wurden 20 technische Simulationen von PV-Anlagen mit und ohne Batteriespeicher für den Standort Essen durchgeführt, d. h. vier PV-Anlagen multipliziert mit fünf Speichermöglichkeiten (insgesamt 20, durch die Berücksichtigung der Möglichkeit, PV-Anlagen ohne Batteriespeicher zu installieren). Insgesamt wurden auf diese Weise 19.200 Simulationen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten und über 21 Jahren durchgeführt, um den jährlichen Eigenverbrauch und die jährliche Netzeinspeisung (jeweils in kWh) unter Berücksichtigung der gesamten Systemalterung zu ermitteln. Diese Energiemengen wurden mit dem jeweiligen Stromarbeitspreis und der Einspeisevergütung multipliziert, um jährliche Cashflows zu berechnen. Hierbei wurde ein Arbeitspreis in Höhe von 27,86 Euro Cent pro kWh für den Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz angenommen (dieser entsprach dem günstigsten Tarif des lokalen Grundversorgers in Essen in 2019) und eine jährliche Erhöhung um 2 %

¹⁹ Die hier dargestellte Analysestrategie sowie die getroffenen technischen Annahmen sind in Aniello et al. (2021) dokumentiert. Die publizierte Studie stellt eine Erweiterung der hier durchgeführten Analysen dar.

(d. h. Inflationsrate) unterstellt. Ferner haben wir eine Systeminstallation am 01.01.2019 unterstellt, weshalb die damalige feste/geltende Einspeisevergütung in Höhe von 11,47 Euro Cent pro kWh über 21 Jahren (bis zum 31.12.2039) berücksichtigt wurde.

5.2.1 Potenzial für Eigenversorgung nach Haushaltsgruppe

Abbildung 18 zeigt ein wesentliches Ergebnis unserer technischen Simulationen für das erste Betriebsjahr. Aufgeführt sind die Medianwerte bezüglich des Eigenversorgungspotenzials, d. h. die Quote des jährlichen Strombedarfs, die durch ein PV-BS System gedeckt werden kann, je Haushaltsgruppe und für jede Systemkombination. Bei einem S-PV ohne Speicher werden Medianeigenverbrauchsquoten von 27 % bzw. 28 % für Haushaltslastprofile 1a bzw. 2b und von 35 % für die beiden anderen Haushaltsgruppen (HH1b und HH2a) erzielt. Diese Quote steigt bis zu 34-35 % bzw. 44 % im Falle einer XL-PV-Anlage. Die Kopplung eines S-Stromspeichers kann die Eigenversorgungsquote von 16 Prozentpunkte bzw. 19 Prozentpunkte bei HH1a bzw. HH2a und 23 Prozentpunkte bei HH2a und HH2b erhöhen, allerdings sinken die zusätzlichen Gewinne aus der Eigenversorgung, wenn eine größere Speicherkapazität installiert wird. Wird eine XL-PV installiert, die mit einem XL-BS gekoppelt ist, können in Vierpersonenhaushalten ca. 81–82 % und in Zweipersonenhaushalten 88 % der Stromnachfrage gedeckt werden. Jedoch treffen solche Ergebnisse nur auf das erste Jahr unserer Analyse zu. Tatsächlich beeinflusst die Systemalterung das Potenzial für die Eigenversorgung deutlich, insbesondere bei kleinen Speichersystemen.

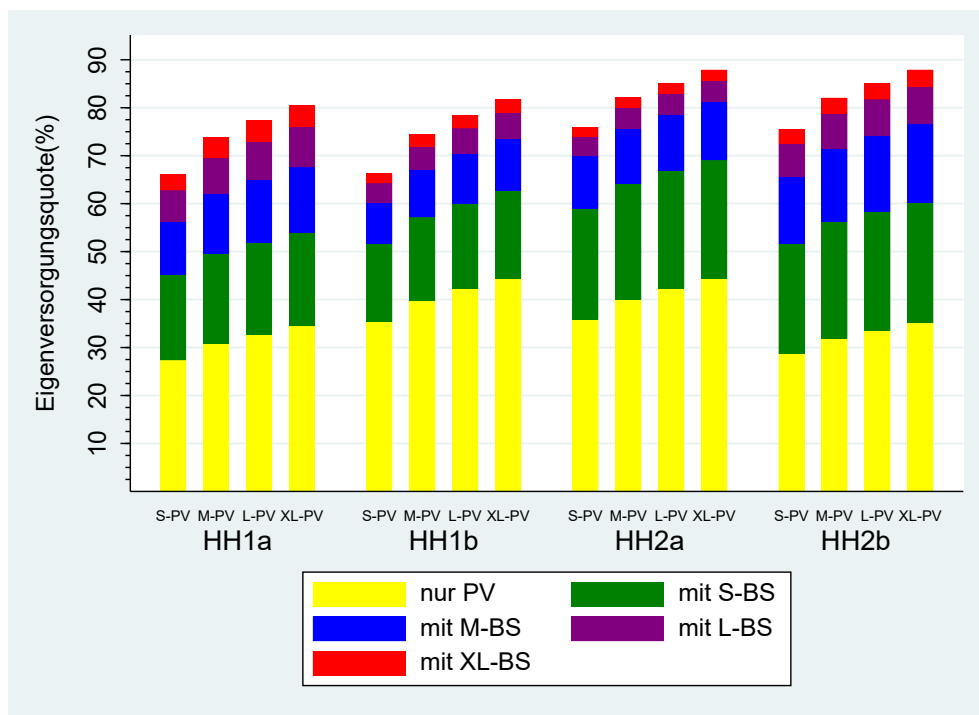


Abbildung 18: Kumulierte Eigenversorgungsquote von zusätzlichem Speicher im ersten Betriebsjahr, nach Haushaltsgruppe und PV-Anlagegröße (Medianwerte)

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Systemgrößen welchen Haushalten die höchste Rentabilität bieten und inwieweit technische Faktoren (z. B. Energieeffizienz) und monetäre Faktoren (z. B. finanzielle Bewertungskriterien, Einspeisevergütung) bei dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse eine Rolle spielen.

5.2.2 Einfluss steuerlicher Regelungen

Ziel dieser Analyse ist eine detaillierte Kalkulation der Wirtschaftlichkeit dieser Technologien aus der Perspektive des investierenden Haushalts. Deshalb wird die Behandlung von Umsatz- und Einkommensteuern zur Anpassung der jährlichen Cashflows berücksichtigt.

In Bezug auf die Umsatzsteuer können Betreiber von kleinen PV-Anlagen als Besteuerungsform zwischen Regelbesteuerung (*Rb*) und Kleinunternehmerregelung (*Kur*) wählen. Die erste Besteuerungsform bietet den Vorteil, dass die beim Kauf von PV- und Batteriespeichersystemen sowie bei Betriebsausgaben gezahlten Umsatzsteuern zurückerstattet werden. Allerdings muss der Haushalt die Umsatzsteuer auf den selbstverbrauchten Strom zahlen und somit mit einem höheren administrativen Aufwand beim Finanzamt rechnen. Die Kleinunternehmerregelung stellt eine vereinfachte Alternative dar. Der Haushalt muss sich mit der Umsatzsteuer nicht befassen. Allerdings erstattet das Finanzamt keine Umsatzsteuer, daher entstehen um 19 % höhere Kosten für die Anschaffung der Technologien. Schließlich steht den Haushalten eine dritte Alternative zur Verfügung, da sie an die Regelbesteuerung nur für 5 Jahre gebunden sind. Als dritte Besteuerungsform untersuchten wir einen Wechsel von der Regelbesteuerung zur Kleinunternehmerregelung (*Rb*→*Kur*). In dieser Alternative wählen Haushalte die *Rb* ab dem Anschaffungsdatum, um von niedrigeren Anschaffungskosten (d. h. Nettokosten) zu profitieren. Ab dem siebten Jahr (01.01.2025) wechseln sie zur *Kur*.

Darüber hinaus unterliegen die erwirtschafteten Gewinne der Einkommensteuer. Zur Ermittlung des steuerpflichtigen Gewinnes ist die Differenz zwischen jährlichen Einnahmen und Ausgaben zu berechnen, nämlich Einspeisevergütung und Wert von selbstverbrauchtem Strom abzüglich der Betriebskosten und der Abschreibung der Photovoltaikanlage. Batteriespeicher können hingegen nicht abgeschrieben werden. Bei der Abschreibung dürfen Privathaushalte zwischen einer linearen Einteilung über 20 Jahre und einer speziellen Einteilung wählen, bei der zusätzlich 20% des PV-Kaufpreises innerhalb der ersten fünf Jahre abgeschrieben werden können. Daher betrachteten wir in unserer Analyse zwei alternative Abschreibungsmöglichkeiten: eine lineare Abschreibung (5 % über 20 Jahre) und eine Sonderabschreibung (25 % im ersten Jahr, 5 % im zweiten bis zum fünften Jahr; und 3,67 % für die übrigen 15 Jahre).

Insgesamt untersuchten wir die Auswirkung von sechs alternativen steuerlichen Alternativen (d. h. Kombinationen von Besteuerungsformen und Abschreibungsvarianten) auf die Wirtschaftlichkeit von PV und Batteriespeicher.

Die Kombination von *Rb*→*Kur* und Sonderabschreibung ergibt die höchste Rentabilität, da die höchste Rendite (d. h. realer Interne Zinsfuß, siehe Abschnitt 5.2.3) für jede der 19.200 Simulationen durch diese steuerliche Behandlung erreicht wird. Der Umfang dieses Einflusses ist erheblich. Insbesondere im Vergleich zur reinen Kleinunternehmerregelung, da bis zu zwei Prozentpunkte zusätzlicher Rendite realisiert werden können. In den folgenden Abschnitten präsentieren wir die Ergebnisse dieser finanziell optimalen Wahlmöglichkeit.

5.2.3 Einfluss von finanziellen Bewertungskriterien und Diskontierungssätzen

Für die Bewertung der Cashflows nutzten wir drei alternative finanziellen Metriken: die Amortisationszeit, den realen Internen Zinsfuß (IZF) und der Nettobarwert (NBW). Die Amortisationszeit entspricht dem Zeitraum, über welchen die Anfangsinvestition durch die erzielten positiven Cashflows wiedergewonnen wird. Der Nettobarwert ergibt sich aus der Summe der abgezinsten zukünftigen Cashflows abzüglich der Anfangsinvestition, deshalb ist es erforderlich, dass ein realer Diskontierungssatz angenommen wird (im Folgenden r). Schließlich entspricht der IZF dem impliziten Diskontierungssatz über den betrachteten Zeitraum einer Investition, bei dessen Verwendung sich ein Nettobarwert von null ergibt. D. h., der IZF entspricht genau jener Diskontierungsrate, bei der die Summe aller auf den heutigen Tag abgezinsten Ab- und Zuflüsse gleich null ist. Jede Metrik hat ihre Vorteile und Nachteile:

- Die Amortisationszeit ist die einfachste und intuitivste, aber berücksichtigt nicht den Zeitwert des Geldes und die Cashflows nach der Rückzahlung.
- Der IZF ist die objektivste, weil diese Metrik keinen subjektiven Diskontierungssatz braucht. Allerdings sind alternative Investitionsgrößen schwierig zu vergleichen.
- Der Nettobarwert erlaubt den Vergleich zwischen Projekten mit verschiedenen Investitionskosten. Jedoch hängt er von einem subjektiven Diskontierungssatz ab.

Nachfolgend präsentieren wir relevante Ergebnisse dieser Wirtschaftlichkeitsbewertung (Tabelle 7). Bei der angenommenen Einspeisevergütung wird die höchste Rentabilität immer bei XL-PV Anlagen erreicht und das gilt für alle Bewertungskriterien. Bei Medianwerten nach Haushaltsgruppe erreichen PV-Anlagen ohne Speicher Amortisationszeiten zwischen 8,1 und 9,7 Jahren, IZF zwischen 8,93 % und 6,23 % und Nettobarwerte (mit $r = 2\%$) zwischen 6.966 Euro und 3.887 Euro für HH1b bzw. HH2b (Tabelle 7).

Tabelle 7: Wirtschaftlichkeit und optimale Systemdimensionierung

Haushaltsgruppe	System		Wirtschaftlichkeit (Medianwerte)			Optimales System nach Metriken (% von Lastprofilen)				
	PV (kWp)	BS (kWh)	Am.z. (Jahre)	IZF (%)	NBW (€), $r = 2\%$	Am.z.	IZF	NBW, $r = 2\%$	NBW, $r = 1\%$	NBW, $r = 0\%$
1a	9,73	0	9,0	7,25	4994	100,0%	100,0%	99,2%	32,1%	0,0%
	9,73	3,3	10,7	5,15	3962	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	9,73	6,5	10,7	5,17	4445	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	15,4%
	9,73	9,8	10,9	5,03	4635	0,0%	0,0%	0,4%	46,7%	41,3%
	9,73	13,1	11,4	4,58	4283	0,0%	0,0%	0,4%	21,3%	43,3%
1b	9,73	0	8,1	8,93	6966	100,0%	100,0%	100,0%	67,5%	21,7%
	9,73	3,3	9,7	6,48	5898	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	9,73	6,5	9,9	6,29	6258	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%
	9,73	9,8	10,3	5,95	6273	0,0%	0,0%	0,0%	32,5%	71,3%
	9,73	13,1	10,8	5,32	5672	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%
2a	9,73	0	9,0	7,24	4981	100,0%	100,0%	100,0%	97,1%	38,3%
	9,73	3,3	10,7	5,15	3954	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	9,73	6,5	10,9	4,98	4188	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	21,7%
	9,73	9,8	11,4	4,53	3851	0,0%	0,0%	0,0%	2,9%	40,0%
	9,73	13,1	12,1	3,84	2987	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2b	9,73	0	9,7	6,23	3887	100,0%	100,0%	100,0%	51,3%	24,6%
	9,73	3,3	11,3	4,35	2862	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	9,73	6,5	11,3	4,46	3372	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%
	9,73	9,8	11,6	4,24	3343	0,0%	0,0%	0,0%	48,8%	71,3%
	9,73	13,1	12,3	3,67	2692	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alle	9,73	0	9,0	7,24	4987	100,0%	100,0%	99,8%	62,0%	21,1%
	9,73	3,3	10,7	5,15	3958	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	9,73	6,5	10,8	5,08	4316	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,4%
	9,73	9,8	11,2	4,78	4243	0,0%	0,0%	0,1%	32,7%	55,9%
	9,73	13,1	11,8	4,21	3635	0,0%	0,0%	0,1%	5,3%	11,6%

Auf Grundlage dieser ersten drei Bewertungskriterien sind XL-PV ohne Speicher die wirtschaftlich optimalen Systeme für fast alle simulierten Lastprofile (ca. 99,8 %). Allerdings variierten wir zusätzlich die Annahme zum Diskontierungssatz r . Aufgrund der aktuell niedrigen Zinsen berücksichtigten wir alternative reale Diskontierungssätze von 0% und 1 %. Bei diesen alternativen Annahmen wird die Anschaffung von Batteriespeichern optimal für viele Lastprofile: z. B. mit $r = 1 %$ werden L-Batteriespeicher die optimale Wahl für ca. 47 % (bzw. 33 %) der Lastprofile HH1a (bzw. HH2b). Mit anderen Worten: Bei einem realen Abzinsungsfaktor von 1 % (d. h. nominal 3,02 %), wird die Lastprofilheterogenität (z. B. die Haushaltsgruppe) entscheidend für die optimale Anschaffung und Dimensionierung des Speichers. Anschließend wird mit $r = 0%$ die Anschaffung von Batteriespeichern optimal für die Mehrheit der Lastprofile (ca. 78,9 %) und bei allen Haushaltsgruppen: z. B. bei HH2a, die Haushaltsgruppe die am wenigstens von Batteriespeichern profitiert, sind M-BS und L-BS für 61,7 % der Lastprofile optimal.

5.2.4 Einfluss energieeffizienter Geräte und Haushaltsgruppe

Aus Tabelle 8 geht der Einfluss von den Lastprofilemerkmalen auf die Rentabilität der XL-PV, mit und ohne Speicher, hervor. Für jedes der betrachteten Systeme wurde in einer Regressionsanalyse mit der Methode der kleinsten Quadrate (auch als OLS bezeichnet) die durchschnittliche Auswirkung der betrachteten Merkmale auf den IZF untersucht. So zeigt sich zum einen, dass die Wirtschaftlichkeit der Investition bei allen Systemen, unter sonst gleichen Bedingungen, für HH1b am größten und für HH2b am kleinsten ausfällt. Beispielsweise fällt der IZF bei einer Investition in ein XL-PV System ohne Batteriespeicher bei einem Vier-Personenhaushalt, in dem nur eine der beiden erwachsenen Personen erwerbstätig ist (HH1b), um 1,68 Prozentpunkte höher aus ($<0,001$ in allen Modellen) als bei einem Vier-Personenhaushalt, in dem beide erwachsenen Personen erwerbstätig sind (HH1a). Allerdings schwindet dieser Rentabilitätsvorteil mit zunehmender Speichergröße. So beträgt der Rentabilitätsvorteil von HH1b gegenüber HH1a bei einem XL-PV mit sehr großem Batteriespeicher (d. h., XL-BS) lediglich 0,78 Prozentpunkte. Somit verschlechtert die zusätzliche Investition in einen Batteriespeicher die Wirtschaftlichkeit der Investition für HH1b.

Tabelle 8: OLS Regressionen über die Einflussfaktoren des IZF für Alternative Systemkonfigurationen

XL-PV:	Ohne BS IZF (%)	Mit S-BS IZF (%)	Mit M-BS IZF (%)	Mit L-BS IZF (%)	Mit XL-BS IZF (%)
HH1a	ref. (.)	ref. (.)	ref. (.)	ref. (.)	ref. (.)
HH1b	1,684*** (0,042)	1,356*** (0,034)	1,139*** (0,034)	0,948*** (0,038)	0,784*** (0,042)
HH2a	0,062 (0,042)	0,033 (0,034)	-0,183*** (0,034)	-0,475*** (0,038)	-0,714*** (0,042)
HH2b	-0,959*** (0,042)	-0,764*** (0,034)	-0,728*** (0,034)	-0,822*** (0,038)	-0,934*** (0,042)
Standard Geräte	1,330*** (0,034)	1,103*** (0,028)	1,239*** (0,027)	1,485*** (0,031)	1,636*** (0,034)
Urlaub Dezember	0,173*** (0,030)	0,179*** (0,024)	0,196*** (0,024)	0,188*** (0,027)	0,174*** (0,029)
Konstante	6,053*** (0,042)	4,129*** (0,034)	4,022*** (0,034)	3,665*** (0,038)	3,085*** (0,042)
N	960	960	960	960	960
R ²	0,854	0,858	0,850	0,836	0,823

Anmerkungen: Standardfehler in Klammern, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$; zweiseitige Tests.

Zudem zeigt sich, dass die Energieeffizienz der Haushaltsausstattung eine entscheidende Größe für die Rentabilität darstellt. Der IZF einer XL-PV Anlage ohne Speicher liegt in einem Haushalt mit Standardgeräteausstattung 1,33 Prozentpunkte höher als bei einem Haushalt, der ausschließlich mit energieeffizienten Geräten ausgestattet ist. Der Renditevorteil fällt bei Kopplung mit großen (L-BS) oder sehr großen (XL-BS) Batteriespeichern um 1.64 Prozentpunkte signifikant größer aus ($p < 0,001$). Daraus folgt, dass ein Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Rentabilität von PV Eigenverbrauch besteht, besonders bei der Kopplung mit großen Batteriespeichern. Schließlich ist die Auswirkung von den Urlaubsvarianten auf die Rentabilität statistisch zwar signifikant, praktisch aber relativ unerheblich ($< 0,2$ Prozentpunkte).

5.2.5 Einfluss der Einspeisevergütung

Im letzteren Teil dieser Analyse ermitteln wir den Einfluss der Einspeisevergütungsdegression auf die Rentabilität und auf die optimale Systemkonfiguration des Investitionsobjektes. Abbildung 19 zeigt die Wirtschaftlichkeit des Investitionsobjektes für die heterogenen Lastprofile der vier Haushaltstypen (vgl. Abschnitt 5.2.1) auf Basis des NBW (mit $r = 2\%$) bei einer Degression der Einspeisevergütung von 11 Euro Cent pro kWh auf 0 Euro Cent pro kWh.

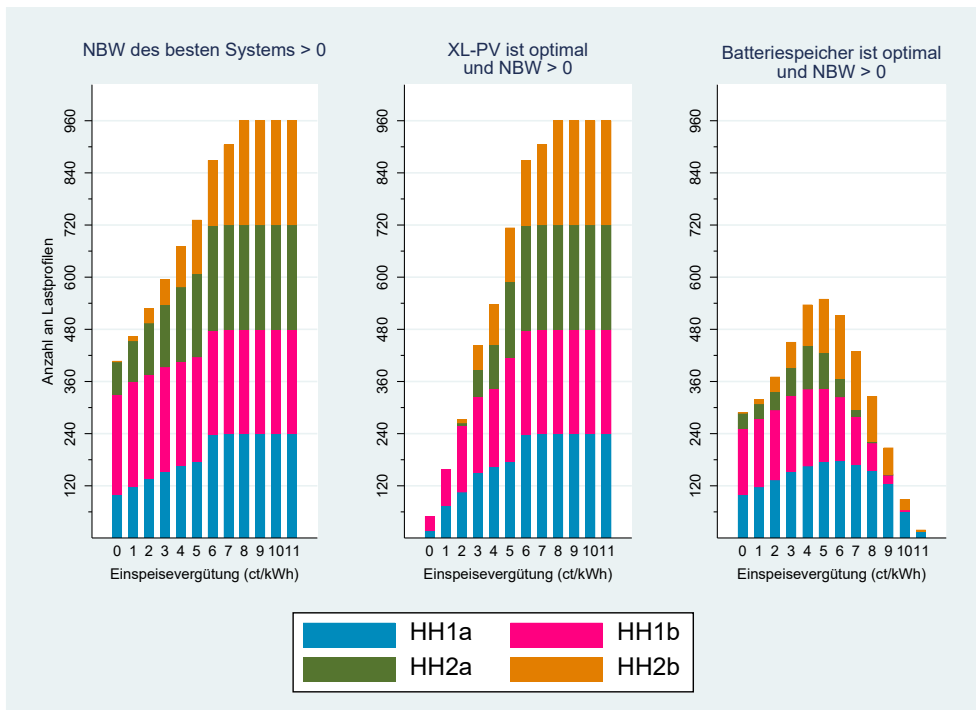


Abbildung 19: Einfluss der Einspeisevergütung auf die Wirtschaftlichkeit (NBW) und optimale Systemkonfiguration

Auf der linken Abbildung lässt sich erkennen, dass der NBW für PV-BES-Systeme bis einschließlich einer Vergütung von 8 Euro Cent pro kWh für alle vier Haushaltstypen größer Null ist, sie somit rentabel sind. Allerdings zeigt sich auch, dass die Investition in die PV-Anlage umso unwirtschaftlicher wird, je niedriger die Einspeisevergütung unter diesen Schwellenwert fällt.

In der mittleren Abbildung lässt sich erkennen, wie die Höhe der Einspeisevergütung die optimale Dimensionierung von PV-Systemen bei Haushalten beeinflusst, bei denen der NBW der Investition positiv ist. Bei einer Einspeisevergütung unterhalb von 6 Euro Cent pro kWh wird die Eigenverbrauchsquote entscheidend für die PV-Dimensionierung, weil kleinere PV-Anlagegrößen bereits hinreichend Eigenstrom für den Eigenverbrauch produzieren.

In der rechten Abbildung zeigt sich der u-inverse Zusammenhang zwischen Einspeisevergütung und Batteriespeicher im Hinblick auf die Rentabilität der PV-Anlage. Bei einer Senkung der Einspeisevergütung wird die Steigerung der Eigenverbrauchsquote für die Rentabilität wichtiger, weshalb die Anschaffung von Batteriespeichern zunächst zunehmend optimaler wird. Dies gilt bis zu einem Wendepunkt, der um einen Wert von 5 Euro Cent pro kWh liegt. Bei dieser Einspeisevergütung sind BS-Systeme optimal für ca. 57,3 %²⁰ der simulierten Haushaltlastprofilen. Bei geringeren Einspeisevergütungen sinkt die Zahl an Haushalten, für die die Wahl eines Batteriespeichers optimal ist, weil die PV-Stromerzeugung im Allgemeinen mit abnehmender Einspeisevergütung zunehmend unwirtschaftlich wird.

An den Abbildungen lässt sich auch die Wirtschaftlichkeit der Investition für den Fall einer vollständigen Abschaffung der Einspeisevergütung ablesen. Unter diesen Umständen erreichen weniger als die Hälfte der simulierten Haushalte (ca. 42,4 %) einen positiven NBW, bei ca. 5,2 % der Haushalte ist die Anschaffung einer XL-PV-Anlage optimal, wohingegen bei ca. 30,1 %²¹ der Haushalte die Kopplung mit einem Batteriespeicher wirtschaftlich optimal wäre.

5.2.6 Zusammenfassung

Insgesamt lassen sich auf Basis der Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Berücksichtigung von heterogenen Haushaltlastprofilen und finanziellen Aspekten mehrere Ergebnisse für PV-Anlagen mit optionalen Batteriespeichern festhalten. So hat zum einen die Wahl der steuerlichen Regelungen einen entscheidenden Einfluss auf Wirtschaftlichkeitsberechnung von Investitionen in Photovoltaikanlagen mit oder ohne Batteriespeicher. Hinsichtlich der finanziell optimalen Anlagendimensionierung sind unter den gegebenen Rahmenbedingungen PV-Anlagen mit oder ohne Batteriespeicher knapp unter dem gesetzlichen Grenzwert von 10 kW_P für alle Lastprofile und nach allen Wirtschaftlichkeitskennzahlen wirtschaftlich optimal. Allerdings kann die optimale Anschaffung und Dimensionierung von Batteriespeichern je nach verwendetem Bewertungskriterium (Amortisationsdauer, Interner Zinsfuß, Nettobarwert) sowie in Abhängigkeit der untersuchten Lastprofile schwanken. Während Batteriespeicher gemäß der beiden Kennzahlen Amortisationsdauer und interner Zinsfuß niemals eine optimale Alternative darstellen, verbessert sich der Nettobarwert einer PV-Investition durch die Kopplung mit einem Batteriespeicher in manchen Fällen.

Bei der Untersuchung des Einflusses der finanziellen Parameter zeigt sich, dass niedrige Diskontierungssätze die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen mit Batteriespeichern stärker steigern als PV-Anlagen ohne Batteriespeicher. Ein besonderes Ergebnisdetail besteht darin, dass eine Absenkung des realen Diskontierungssatzes von 2 % auf 0 % vor dem Hintergrund der unter-

²⁰ Zum Vergleich, in unserem Anfangsszenario, bei einer Einspeisevergütung von 11,47 Euro Cent pro kWh und gleichem realen Diskontierungssatz von 2%, waren Batteriespeicher nur in ca. 0,2% der Fälle optimal.

²¹ Nämlich die Mehrheit der Lastprofile, für die die PV-Anschaffung noch wirtschaftlich ist.

stellten Einspeisevergütung in Höhe von 11,47 Euro Cent pro kWh zu einer Zunahme der Diffusion von batteriegekoppelten PV-Anlagen von 0,2 % auf 78,9 % der in unserer Analyse betrachteten Lastprofile führt. Daraus folgt, dass die derzeit niedrigen Zinssätze die Diffusion von Batteriespeichern begünstigen dürften. Im Hinblick auf die Berücksichtigung heterogener Lastprofile unterscheiden sich die Haushaltsgruppen maßgeblich bezüglich der Wirtschaftlichkeit und optimalen Systemkonfiguration. Zudem ist die Energieeffizienz der elektrischen Geräteausstattung besonders relevant: je energieeffizienter die Geräteausstattung ist, desto unwirtschaftlicher wird eine Investition in PV-Anlagen mit oder ohne Batteriespeicher. Daraus folgt, dass einen Trade-off zwischen Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen und Eigenversorgungstechnologien besteht.

Schließlich wurden die Folgen einer stufenweisen Absenkung der Einspeisevergütung bei einem festen Diskontierungssatz von 2 % betrachtet. Hier zeigt sich, dass eine Einspeisevergütung von weniger als 6 Euro Cent pro kWh die Anschaffung von kleineren PV-Anlagen begünstigen würde. Bei einer Einspeisevergütung in Höhe von 5 Euro Cent pro kWh wäre bei den betrachteten Lastprofilen die Kopplung mit Batteriespeichern am häufigsten optimal. Jedoch, je niedriger die Einspeisevergütung unterhalb ca. 8 Euro Cent pro kWh absinkt, desto unwirtschaftlicher wird die Anschaffung einer PV-Anlage (mit und ohne Batteriespeicher) für immer mehr Haushaltlastprofile. Diese Erkenntnis dürfte gerade vor dem Hintergrund der potenziellen zukünftigen Absenkung (bzw. Abschaffung) der Einspeisevergütung von Interesse sein.

5.3 Optimierung von Energieinvestition und -verbrauch „kostenminimierender“ Haushaltstypen bis 2040

Der Trend im Haushaltsbereich geht nicht nur zur Dezentralisierung der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs, sondern auch zu einer Transformation und Integration des kompletten Haushaltsenergiebedarfs. Zum Beispiel kommen strombetriebene Technologien wie Elektrofahrzeuge oder Wärmepumpen im Energiekonzept der Haushalte zunehmend vor. Energiemanagementsysteme ermöglichen eine optimierte Koordination der unterschiedlichen Komponenten.

Im Rahmen des VISE-Haushalte Projekts wird das EWI-Modell "*Consumer Management of Decentralized Options*" (COMODO) weiterentwickelt. Ziel ist, die kostenminimale Energiebereitstellung für einzelne Endverbraucher*innen oder ganze Gruppen zu bestimmen. COMODO ist ein gemischt ganzzahliges Optimierungsmodell (Mixed Integer Programm - MIP), das lineare Programmierung verwendet, um die Gesamtsystemkosten der Energieversorgung eines bestimmten Endverbrauchertyps oder einer Endverbrauchergruppe zu minimieren. Dabei wird sowohl die Anlagenauslegung als auch die Betriebsoptimierung betrachtet. Das entwickelte Modell bestimmt die privaten wirtschaftlichen Optima der Verbraucher*innen (Consumer oder auch Prosumer), hier einzelne Haushalte, bei der Deckung des Strom-, Warmwasserbereitungs- und Raumwärmebedarfs durch eine Investitions- und Einsatzsimulation.

In den folgenden Abschnitten wird die von EWI durchgeführte ökonomische Analyse für 32 verschiedenen Haushaltstypen dargestellt. Die gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich erstellten Haushaltsgruppen (siehe Abschnitt 5.1) wurden u. a. anhand ihres Energiebedarfs, der Lastprofile und der Erzeugungspotenziale weiter ausdifferenziert und werden im Abschnitt 5.3.1 näher beschrieben. Danach werden die Investitionsentscheidungen und der Technologieeinsatz der Haushaltstypen anhand von einem Szenario über eine mögliche Marktentwicklung bis 2040

mit COMODO optimiert. Hierfür berücksichtigt das Modell sowohl aktuelle als auch geplante oder hypothetische regulatorischen Rahmen- und Marktbedingungen sowie die Entwicklung der wirtschaftlichen und technologischen Eigenschaften der Investitionsobjekte. Dieser Szenariorahmen für die Modellierung mit COMODO wird im Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Optimierung im Abschnitt 5.3.3 vorgestellt.

5.3.1 Auswahl der Haushaltstypen

Die vier Haushaltsgruppen aus Abschnitt 5.1 (HH1a, HH1b, HH2a und HH2b) werden für die Analyse mit COMODO weiter ausdifferenziert, um die Haushaltstypen auch hinsichtlich relevanter Aspekte des Wärmebedarfs differenziert betrachten zu können. Tabelle 9 fasst die wesentlichen Eckdaten ausgewählter Haushaltsgruppen aus Abschnitt 5.1 zusammen und stellt weitere Informationen zu den Wohngebäuden dar. Die Wohnfläche ist für den Wärmeverbrauch entscheidend, wohingegen die Dachfläche für das Solar-Erzeugungspotenzial ein wesentliches Kriterium darstellt.

Tabelle 9: Definition der Haushaltstypen für die ökonomische Analysen (eigene Annahmen)

	HH1a	HH1b	HH2a	HH2b
Bewohnerzahl	4	4	2	2
Anteil der Arbeitnehmer*innen	50 %	25 %	0 %	100 %
Wohnfläche [m²]	122,4	122,4	96	96
Nutzbare Dachfläche [m²]	60	60	60	60

Zuerst wurden vier Profile je nach Haushaltsgruppe mit dem *Loadprofilegenerator* simuliert, die sich hinsichtlich der Urlaubszeit (Juli oder Dezember) und der Geräteausrüstung (Standard oder Effizient) unterscheiden (wie im Abschnitt 5.1 beschrieben). Dadurch unterscheiden sich die 16 resultierenden Variationen der Haushaltsgruppen (HH1a_t1-HH1a_t4; HH1b_t1-HH1b_t4; HH2a_t1-HH2a_t4; HH2b_t1-HH2b_t4) voneinander (i) in der jährlichen Struktur der Lastprofile (durch die unterschiedlichen Urlaubszeiten) und (ii) in den jährlichen Stromverbrauchsmengen, da die strombetriebenen Geräte in unterschiedlichen Kombinationen (durch die Randomisierung des *Loadprofilegenerator*) sowie in verschiedenen Effizienzniveaus vorliegen.

Zunächst werden diese Haushalte weiter nach Gebäudetypen differenziert. Dafür werden drei verschiedene Gebäudetypen berücksichtigt, nämlich Altbauten, Neubauten und Niedrigenergiehäuser (siehe Glossar im Anhang). Diese Differenzierung ist vor allem für die Wärmenachfrage wichtig, da Neubauten aufgrund der erhöhten Effizienz (z. B. durch stärkere Isolierung) meist über einen geringeren Energiebedarf als Bestandgebäude verfügen.²² Letztlich ergeben sich für die nachfolgenden Analysen 32 spezifische Haushaltstypen: 16 Haushaltstypen in Altbauten, 8 Haushaltstypen in Neubauten und 8 Haushaltstypen in Niedrigenergiehäusern. Für Neubauten

²² Das Wärmeverhaltensverhalten ist unabhängig von der spezifischen Gerätekombination. Dieses wird maßgeblich von Wetterverhältnissen, dem Sanierungsgrad des Gebäudes und Urlaubszeiten getrieben.

und Niedrigenergiehäuser fällt die Kombination mit einer Standardgeräteausrüstung weg (_t3 und _t4), da angenommen wird, dass neugebaute Häuser nur mit effizienten Geräten bestückt werden. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Stromlast und das zugehörige Profil unabhängig vom Gebäudetyp sind, sodass z. B. HH1a_t1 in einem Altbau die gleiche Stromnachfrage wie HH1a_t1 in einem Neubau hat.²³ Alle Haushaltstypen befinden sich in der Umgebung von Köln.

In einem weiteren Schritt werden die Wärmeprofile für die Haushaltstypen simuliert. Dafür werden die Angaben zur untertägigen Verteilung des Gasbedarfs aus dem Leitfaden des Bundesverbands der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft verwendet, um stündliche Wärmelastprofile in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Standort Köln) abzuschätzen (BGW, 2006). Diese Methodik wird für den Wärmeverbrauch der 16 Haushaltstypen in Altbauten durchgeführt, wobei Unterschiede auf Grund des Zustandes strombetriebener Geräte sowie der Anteil der Erwerbstätigen im Haushalt nicht berücksichtigt werden. In diesem Fall spielen nur die Urlaubszeiten sowie die Wohnfläche und der Gebäudestandard eine Rolle, da diese Faktoren die Wärmelaststruktur sowie den absoluten Wärmeverbrauch zentral beeinflussen. Für Neubauten und Niedrigenergiehäuser wird die jährliche Wärmenachfrage der Altbauten nach unten skaliert, um einen spezifischen Wärmebedarf pro qm abzuschätzen. Für Neubauhäuser werden 70 kWh/m² und für Niedrigenergiehäuser 25 kWh/m² angenommen (KfW, 2020a).²⁴ Der Verlauf der Wärmelastprofile für Neubauten und Niedrigenergiehäuser folgt der Struktur der zugehörigen Altbauten.

Ein Überblick über die Haushaltstypen ist in den Tabelle 10 und Tabelle 11 zu finden. Die Annahmen zu den jährlichen Strom- und Wärmenachfragen für die verschiedenen Haushaltstypen finden sich im Anhang (Tabelle 18).

Tabelle 10: Definition der Haushaltstypen für COMODO-Analysen 1/2

	HH1a_A				HH1b_A				HH2a_A				HH2b_A			
	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
Altbau	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Urlaub Juli	X		X		X		X		X		X		X		X	
Urlaub Dezember		X		X		X		X		X		X		X		X
Geräte Effizient	X	X			X	X			X	X			X	X		
Geräte Standard			X	X			X	X			X	X			X	X

²³ Die exogenen angenommenen Strommengen und Lastprofile beinhalten lediglich den „regulären“ Haushaltsstrombedarf für Beleuchtung, Geräte und Ähnliches. Die Strombedarfsmengen sowie die Strombedarfsprofile für Umwandlungstechnologien, wie z. B. Wärmepumpen, werden endogen in COMODO bestimmt.

²⁴ Niedrigenergiehaus nach der Definition der Energieeffizienzklasse, siehe Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014).

Tabelle 11: Definition der Haushaltstypen für COMODO-Analysen 2/2

	HH1a_ N		HH1b_ N		HH2a_ N		HH2b_ N		HH1a_ P		HH1b_ P		HH2a_ P		HH2b_ P	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Neubau	X	X	X	X	X	X	X	X								
Niedrig- energiehaus									X	X	X	X	X	X	X	X
Urlaub Juli	X		X		X		X		X		X		X		X	
Urlaub Dezember		X		X		X		X		X		X		X		X
Geräte Effizient	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Bezüglich der Technologieauswahl sind die Investitionsmöglichkeiten für alle Haushaltstypen gleich. Sie haben die Möglichkeit in eine einzelne Technologie oder in eine Kombination der nachfolgenden Technologien zu investieren: Gasbrennwertkessel, Mikro-Kraftwärmekopplung (Mikro-KWK, Ottomotor), Pelletheizung, Luft-Wasser Wärmepumpe, Heizstab (elektrische Heizung), Solarthermie-Anlage, thermische Speicher, PV-Anlage und Batteriespeicher. Für die Berechnung der zeitlich variablen PV- und Solarthermie-Potenziale sowie der Wirkungsgrade bzw. „Coefficient of Performance“ (COP) der Wärmepumpen²⁵ wird das Wetterjahr 2015 am Standort Köln/Bonn Flughafen verwendet (DWD, 2020).

²⁵ Das stündliche COP-Profil wird mittels des Temperaturprofils für das Wetterjahr 2015 am Standort Köln/Bonn Flughafen berechnet. Der COP ist das Verhältnis von Nutzwärme zur aufgewendeten elektrischen Energie und stellt somit ein Maß für die stündliche Effizienz der Wärmepumpe dar. Der COP wird anhand der stündlich variierenden Temperaturdifferenz zwischen Heizungsvorlauf (Nutzwärme) und Wärmequelle (für gewöhnliche Außenluft) bestimmt (siehe Glossar im Anhang).

5.3.2 Szenariorahmen für die Modellierung der „kostenminimierender“ Haushaltstypen bis 2040

Für die Optimierung der zukünftigen Energiesysteme der Haushaltstypen muss ein Szenariorahmen definiert werden, um die Entwicklung der wirtschaftlichen und technologischen Eigenschaften der Anlagen sowie Marktbedingungen bis 2040 abzubilden. Dazu gehören Annahmen u. a. zu Technologiekosten und -effizienz, Fördermechanismen sowie die Strom- und Gaspreiskomponenten der Endverbraucherpreise, die in den folgenden Absätzen sowie im Anhang dargestellt sind.

Um den Energiebedarf des Haushaltstyps zu decken, kann COMODO ein Anlageobjekt auswählen oder Strom aus dem Netz beziehen. In dieser Analyse wird angenommen, dass die Investitionen in Strom-, Wärme- oder Speichersystemen erst ab dem Jahr 2025 stattfinden können.²⁶ Die Technologiekosten, Wirkungsgrade und Lebensdauer für die Stichjahre 2025, 2030, 2035 und 2040 werden anhand von heutigen Industriedaten berechnet und sind in Tabelle 19 und Tabelle 20 im Anhang dargestellt. Fast alle Technologien profitieren von Lernkurven, die in unterschiedlicher Weise die Investitionskosten über die Jahre hinweg senken. Fördermechanismen für bestimmte Technologien, z. B. durch Investitionszuschüsse, Einspeisevergütungen oder Eigenverbrauchsprämien werden berücksichtigt. Diese sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang zusammengefasst. Es wird angenommen, dass die Lernkurven der Investitionskostendegression auch für die Subventionen (d. h. Investitionszuschüsse) gelten. Zwei Technologien, Mikro-KWK²⁷ und Wärmepumpen, können im Modell von solchen einmaligen Fördergeldern profitieren. Für PV und Mikro-KWK²⁸ gibt es eine Marktprämie²⁹ bzw. eine Einspeisevergütung für jede Kilowattstunde des erzeugten Stroms, der ins Netz eingespeist wird. Für die Mikro-KWK gibt es auch eine Eigenverbrauchsprämie für die Stromerzeugung, die mit der Mikro-KWK-Anlage erfolgt und von dem Haushalt selbst verbraucht wird (siehe Glossar).

Für alle Haushaltstypen aus Tabelle 10 und Tabelle 11 wird ein einheitlicher Endverbraucherpreis für Strom sowie Gas angenommen. Annahmen zu den Entwicklungen der einzelnen Preiskomponenten bis 2040 werden im Rahmen des Projekts entwickelt und sind in Tabelle 12 dargestellt. Für die Pelletheizung wird ein Endverbraucherpreis für Holzpellets von 7,2 Euro Cent pro kWh im Jahr 2025 angenommen, mit einer jährlichen Steigerung von 3 % (DEPI, 2020; Strauss, 2018).

²⁶ Für die Haushaltstypen in Altbauten wird angenommen, dass die bestehende Wärmanlage in 2025 ausgewechselt werden muss. Für Neubau- und Niedrigenergiehäuser steht die Annahme, dass 2025 das Einrichtungjahr ist.

²⁷ Die Änderung des KWKGs zu 2020 fanden nach dem Analysezeitraum statt und wurden dementsprechend nicht berücksichtigt, siehe Bundesgesetzblatt (2020).

²⁸ Die Änderung des KWKGs zu 2020 fanden nach dem Analysezeitraum statt und wurden dementsprechend nicht berücksichtigt, siehe Bundesgesetzblatt (2020).

²⁹ Die Marktprämie wird durch die Differenz zwischen dem Großhandelspreis für Strom und der anlagen-spezifischen Förderhöhe bestimmt. Die Höhe der Marktprämie wird durch ein Gebotsverfahren festgelegt, in dem aus der installierten Leistung und einem Gebotswert pro kWh der sogenannte anzulegende Wert ermittelt wird, siehe BMJV (2017). Es ist zu erwarten, dass die Einspeisevergütung für PV-Anlagen mit dem Marktprämienmodell ersetzt wird, da dies eine flexible und marktgeführte Stromeinspeisung ermöglicht. Zudem sind sinkende Einspeisevergütungen festgelegt, sodass Profite mittelfristig für den optimierenden Haushalt aus der Einspeisevergütung und der Marktprämie gleichwertig sind oder sogar durch die Marktprämie höhere Renditen erzielt werden können.

Tabelle 12: Annahmen zu den Endverbraucherpreisen für Strom und Gas in der COMODO-Analyse [Euro-Cent/kWh], eigene Annahmen basierend auf u. a. BDEW (2020) und Umweltbundesamt (2020a) ³⁰

Jahr	Endverbraucherpreis Strom		Endverbraucherpreis Gas	
	2025	2040	2025	2040
Beschaffung, Vertrieb	5,0	8,0	2,4	2,9
Netzentgelt inkl. Messung und Messstellenbetrieb	8,0	9,0	1,6	1,6
Konzessionsabgabe	2,0	2,0	0,0	0,0
Strom-/Erdgassteuer	2,0	2,0	0,6	0,6
Mehrwertsteuer	5,0	4,0	1,1	1,2
EEG-Umlage / CO ₂ -Preis	3,3	0,0	1,1	1,3
Sonstiges	1,0	1,0	1,2	1,5
Summe	26,3	26,0	8,0	9,0

Bezüglich des Bezugs und Verbrauchs von konventionellem Erdgas wird angenommen, dass ein CO₂-Preis von den Haushalten zu entrichten ist. Der Preis entspricht im Jahr 2025 55 Euro/tCO₂ und steigt ab 2030 auf 65 Euro/tCO₂, in Anlehnung an Umweltbundesamt (2020a). Diese werden anhand des CO₂-Faktors von Erdgas (201 gCO₂/kWh Erdgas) in Energieeinheiten umgerechnet und im Gasendverbraucherpreis berücksichtigt. Mit der Einführung eines CO₂-Preises für Erdgas wird eine Entlastung der EEG-Umlage für den Strompreis angenommen. Die EEG-Umlage halbiert sich von 2020 bis 2025 (von 6,76 auf 3,34 Euro-Cent/kWh) und wird ab 2035 abgeschafft.

³⁰ Zudem wurden die Daten der Bundesnetzagentur verwendet, siehe Bundesnetzagentur (2020).

5.3.3 Ergebnisse aus dem COMODO-Modell für die „kostenminimierenden“ Haushaltstypen bis 2040

Die Ergebnisse der Investitionsentscheidungen für die in den Tabelle 10 und Tabelle 11 definierten Haushaltstypen werden in den Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt. Alle Haushaltstypen installieren die angezeigten Energiesysteme direkt im ersten möglichen Investitionsjahr 2025.

Tabelle 13: Kostenminimale Investitionsentscheidung der Haushaltstypen in 2025 [in kW] 1/2

	HH1a_A				HH1b_A				HH2a_A				HH2b_A			
	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
Gasbrennwertkessel	5,9	5,9	5,9		5,9	5,9		5,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Heizstab	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,3	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Mikro-KWK				4,1			4,2									
Thermische Speicher [kWh]				13,3			13,3									

Tabelle 14: Kostenminimale Investitionsentscheidung der Haushaltstypen in 2025 [in kW] 2/2

	HH1a_N		HH1b_N		HH2a_N		HH2b_N		HH1a_P		HH1b_P		HH2a_P		HH2b_P	
	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2	t1	t2
Gasbrennwertkessel									5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Wärmepumpe	2,4	2,4	2,4	2,4	2,0	2,0	2,0	2,0								
Thermische Speicher [kWh]	13,3	13,3	13,3	13,3	7,6	7,6	7,6	7,6								

Erkennbar ist, dass die kostenminimale Lösung für verschiedene Haushaltstypen in Altbauten durch zwei verschiedene Energiesysteme erreicht werden kann. Die Haushaltstypen unterscheiden sich dabei durch die absolute Größenordnung des jährlichen Stromverbrauchs, welche durch die Ausstattung der Geräte sowie durch die Bewohnerzahl bestimmt wird. Für die Vier-Personen-Haushalte mit effizienten Geräten (HH1a_A_t1, HH1a_A_t2, HH1b_A_t1 und HH1b_A_t2) sowie alle Zwei-Personen-Haushalte (HH2a_A und HH2b_A) in Altbauten wird in 2025 ein Gasbrennwertkessel für die Grundversorgung in Kombination mit einem kleinen Heizstab, der Strom in Wärme zu Deckung der Wärmespitzen umwandelt, installiert. Auch zwei der Vier-Personen-

Haushalte mit Standard-Geräten (HH1a_A_t3 und HH1b_A_t4) entscheiden sich für diese Lösung, da die randomisierte Auswahl der Geräte in beiden Fällen zu einer vergleichsweise niedrigeren Stromnachfrage führt. Der Strombezug für die Haushaltstypen mit dem Gasbrennwertkessel-/Heizstabwärmesystem wird komplett über das Netz gedeckt. Für diese Haushaltstypen lohnt es sich wirtschaftlich nicht in eine dezentrale Stromerzeugungstechnologie zu investieren. Der absolute jährliche Stromverbrauch ist hier zu niedrig, als dass eine kostenintensive Investition rentabel wäre.

Für die zwei Altbau-Haushalte mit den Standard-Geräten und dem höchsten Stromverbrauch (HH1a_A_t4 und HH1b_A_t3) wird eine gasbefeuerte Mikro-KWK-Anlage installiert, um dezentral Strom- und Wärme bereitzustellen. Bereits eine geringe Erhöhung der jährlichen Stromnachfrage (+3,5 % im Vergleich zu dem nächstkleineren Haushaltstyp) macht es wirtschaftlich sinnvoll, in eine dezentrale Stromerzeugungstechnologie zu investieren, anstatt den Strombedarf komplett aus dem Netz zu decken. Hinzu kommt ebenfalls ein Heizstab, der zur Abdeckung von Spitzenlasten im Wärmebedarf (bis zu 7,6 kW) dient. Zudem bietet der Heizstab eine wirtschaftliche Option für die Verwendung der Stromerzeugung aus der Mikro-KWK Anlage. Selbsterzeugter Strom wird in Wärme umgewandelt, da dies in diesem Fall profitabler als einspeisen ist. Beide Anlagen können ihre Wärmeerzeugung in einen thermischen Speicher einspeisen. Der thermische Speicher ermöglicht den Haushalten den Eigenverbrauch der Stromerzeugung aus der Mikro-KWK zu maximieren, da das „Zweitprodukt“ Wärme gespeichert werden kann. Ebenfalls kann die Wärmeerzeugung aus dem Heizstab direkt genutzt werden oder für einen späteren Zeitpunkt gespeichert werden.

Für die Neubauten und Niedrigenergiehäuser weichen die Ergebnisse von den Altbau-Ergebnissen ab. Im Vergleich zu den Altbau-Alternativen ist die jährliche Wärmenachfrage für die Neubauten und Niedrigenergiehäuser 50-80 % geringer, wobei die Stromnachfrage unverändert bleibt (siehe Tabelle 18 im Anhang). Die Reduktion im Wärmebedarf ermöglicht Investitionen in kleinere Energiesysteme, die auf Grund geringer Kapitalkosten und z. B. der angenommenen Fördermechanismen wirtschaftlich werden. Um den Wärmebedarf zu decken, installieren die Vier-Personen-Haushalte in Neubauhäusern jeweils eine kleine Luft-Wasser-Wärmepumpe (2,4 kW) und können von einem Investitionszuschuss in Höhe von ca. 2.100 Euro pro Anlage profitieren (siehe Tabelle 21 im Anhang). Außerdem kann der Haushalt seine variablen Kosten verringern, da die Wärmepumpen einen hohen Wirkungsgrad (COP)³¹ erreichen können. Der Strombedarf wird in beiden Fällen vollständig über das Netz bedient.

Aufgrund des minimalen Wärmebedarfs zeigen die Niedrigenergiehäuser andere Ergebnisse im Vergleich zu den Neubauten: Mit einem jährlichen Wärmebedarf von max. 3.749 kWh lohnt es sich nicht für die Niedrigenergiehäuser eine Wärmepumpe zu installieren, da die Vorteile durch den hohen Wirkungsgrad (COP) die hohen Kapitalkosten nicht rechtfertigen können. Bei den geringen zu deckenden Energiemengen überwiegen die Effekte der Kapitalkosten die Effekte der variablen Kosten, da nur sehr wenig Endenergie bezogen werden muss, unabhängig davon welche Technologie gewählt wird. In diesem Fall wählt das Modell den kleinsten möglichen Gas-

³¹ Die hohen COPs werden insbesondere durch die geringe Heizungsvorlauftemperatur von Fußbodenheizungen ermöglicht, welche für Neubauten und Niedrigenergiehäuser angenommen wird. Für Neubauten und Niedrigenergiehäuser wird eine Vorlauftemperatur von 35°C angenommen, diese liegt bei Altbauten deutlich höher.

brennwertkessel (5 kW) und deckt somit den Wärmebedarf mit einer überaus wenig kapitalintensiven Technologie. Trotz des vergleichsweise geringen Wirkungsgrades bleiben die variablen Kosten minimal.

Neben den Investitionsentscheidungen optimiert das Modell die resultierenden kostenminimalen Verbrauchs-, Erzeugungs- und Speicherauslastungsprofile der installierten Technologien. Die folgenden Abbildungen stellen die optimalen Einsätze der Erzeugungs- und Speichertechnologien für zwei Haushaltstypen in Altbauten dar, einmal mit der Gasbrennwertkessel-/Heizstablösung (HH1a_A_t3, Abbildung 20) und einmal mit der KWK-/Heizstab-/Speicherlösung (HH1b_A_t3, Abbildung 21). Der Haushaltstyp HH1a_A_t3 hat eine jährliche Stromnachfrage von 5.489 kWh mit einer Spitzenlast von 8,3 kW, und HH1b_A_t3 eine jährliche Stromnachfrage von 5.675 kWh und eine Spitzenlast von 4,7 kW. Obwohl beide Haushalte mit Standard-Geräten ausgestattet sind, führen die Randomisierung des *Loadprofilegenerators* sowie die unterschiedlichen Anteile von Arbeitnehmern im Haushalt zu zwei verschiedenen Stromlastprofilen. Die restlichen Parameter (z. B. Wärmenachfrage, Urlaubszeit und Bewohnerzahl) sind für diese beiden Haushaltstypen identisch.

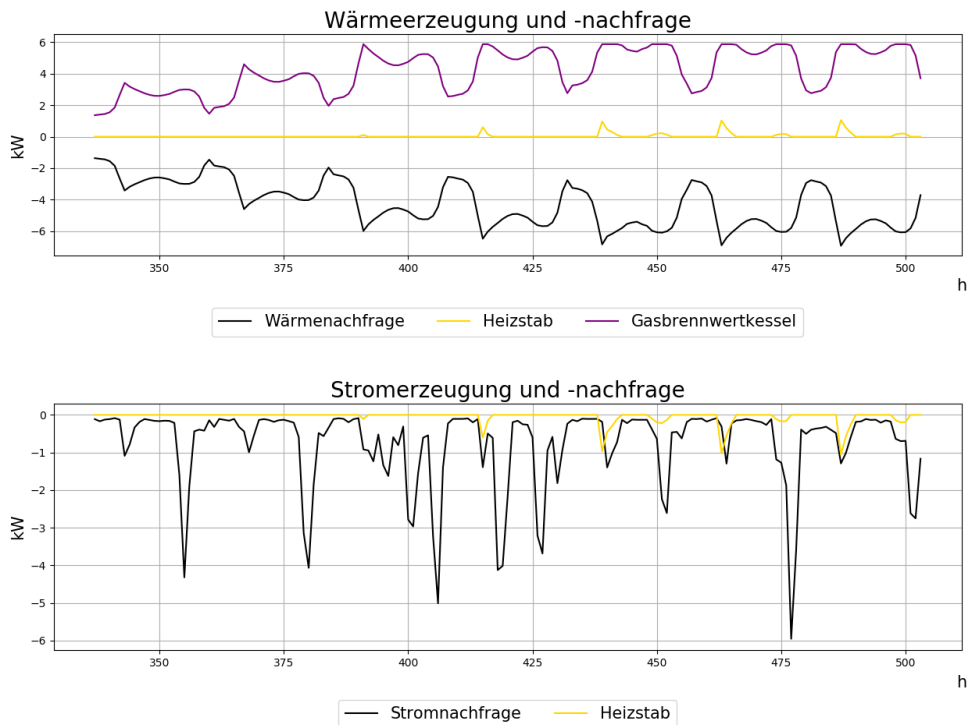


Abbildung 20: Optimaler Einsatz der Technologien für Haushaltstyp HH1a_A_t3 im Januar 2030

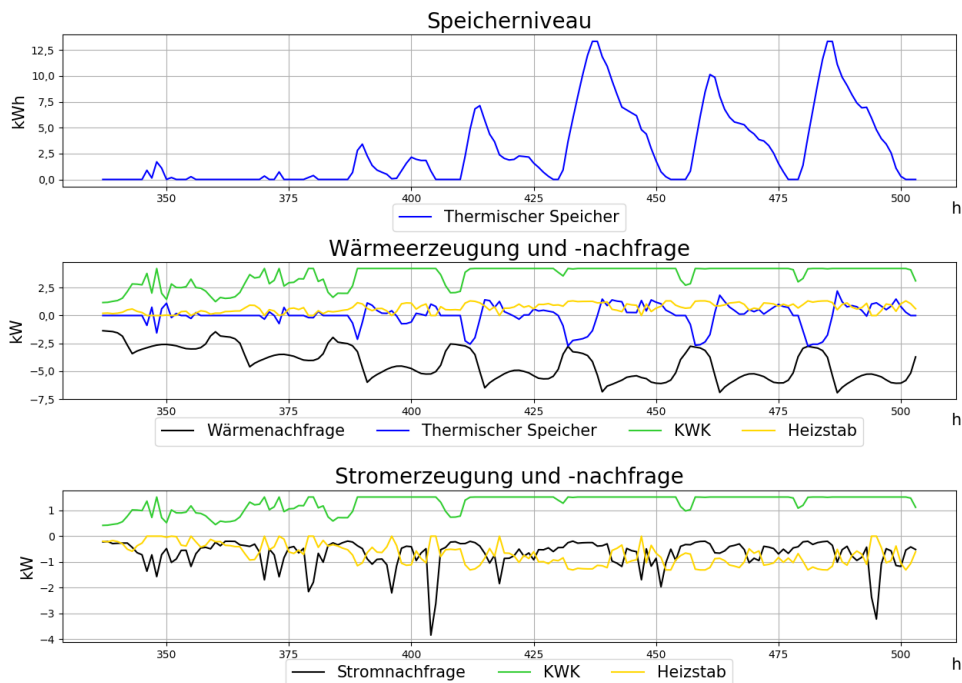


Abbildung 21: Optimaler Einsatz der Technologien für Haushaltstyp HH1b_A_t3 im Januar 2030

Wie bereits diskutiert resultiert die Diskrepanz in den jährlichen Stromverbrauchsmengen sowie in der Spitzenlast in einem Wechsel in der Investitionsentscheidung. Für den Haushalt mit der niedrigeren jährlichen Stromnachfrage (HH1a_A_t3) wird ein Gasbrennwertkessel für die Grundwärmelast bereitgestellt. Allerdings reicht die Gasanlage nicht zur Deckung der Nachfragespitze aus. In Abbildung 20 ist zu erkennen, wie der Heizstab regelmäßig zur Deckung von Wärmelastspitzen eingesetzt wird. Ferner ist zu beobachten, dass abends eine hohe Spitzenlast in der Stromnachfrage (z. B. in Stunde 477) auftritt, die genau wie der Strombedarf in anderen Stunden vollständig aus dem Netz gedeckt wird. Diese ist auf die Erwerbstätigkeit der Bewohner zurückzuführen, die tagsüber arbeiten und erst abends heimkehren.

Für den Haushalt mit einem höheren jährlichen Strombedarf (HH1b_A_t3) wird eine Mikro-KWK anstatt eines Gasbrennwertkessels bevorzugt, um einen Anteil des verbrauchten Stroms selber zu erzeugen. Zudem profitiert die Mikro-KWK von einer Eigenverbrauchsprämie (4 Euro-Cent/kWh Strom), einer Einspeisevergütung (8 Euro-Cent/kWh Strom), welche allerdings kaum genutzt wird, sowie einem Investitionszuschuss in Höhe von 465 Euro/kW (siehe Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang). Wie in Abbildung 21 dargestellt, sind die Stromlastspitzen für den Vier-Personen-Haushalt mit einer erwerbstätigen Person niedriger im Vergleich zum Haushalt mit zwei Arbeitnehmer*innen. Dies ermöglicht es mit der Mikro-KWK-Anlage (mit einer elektrischen Kapazität von 1,5 kW) einen signifikanten Eigenverbrauchsanteil in mehreren Stunden zu erreichen. Die erzeugte Strommenge wird hauptsächlich zur Deckung der exogenen „regulären“ Stromnachfrage genutzt. Zudem wird auch der Strombezug des Heizstabs anteilig gedeckt. Der

Strombezug des Heizstabs findet in Stunden statt, in denen die „reguläre“ Stromnachfrage niedrig ist bzw. der Strom aus der Mikro-KWK-Anlage zur Verfügung steht ohne anderweitig genutzt zu werden (siehe Abbildung 21). Dadurch kann der Strombedarf des Heizstabs in bis zu 98% der Stunden ausschließlich von der Mikro-KWK-Anlage bedient werden. Die erzeugte Wärme des Heizstabs kann entweder sofort verbraucht werden oder im thermischen Speicher zwischengespeichert werden. Nachfragespitzen können vom Heizstab oder durch Nutzung des Speichers weitgehend gedeckt werden. In den Zeiten, in denen die Stromlast das Stromerzeugungspotenzial der Mikro-KWK (von 1,5 kW) überschreitet, wird Strom aus dem Netz zum Endverbraucherstrompreis bezogen.

Für die Haushaltstypen in Neubauten wird ein beispielhafter Haushaltstyp ausgewählt und der optimale Einsatz der Erzeugungs- und Speichertechnologien in Abbildung 22 dargestellt. Gezeigt ist ein Zwei-Personen-Haushalt, in dem zwei erwerbstätige Personen wohnen, welcher Urlaub im Sommer nimmt und effiziente Geräte besitzt (HH2b_N_t1). Der jährliche Strombedarf liegt bei 2.469 kWh und der jährliche Wärmebedarf bei 6.940 kWh (siehe Tabelle 18 im Anhang).

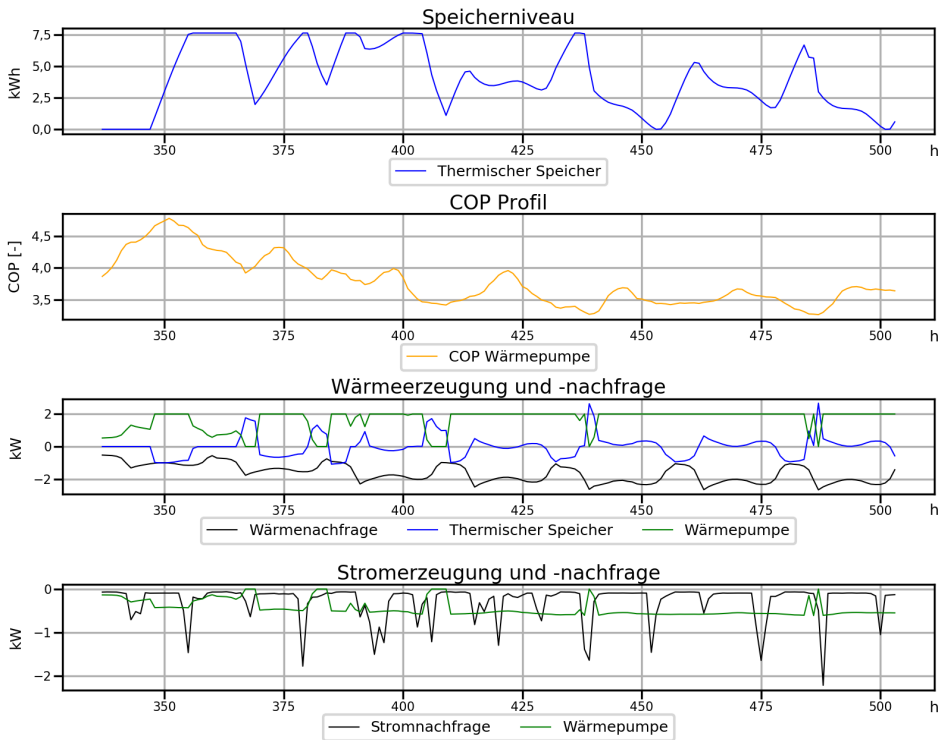


Abbildung 22: Optimaler Einsatz der Technologien für Haushaltstyp HH2b_N_t1 im Januar 2030

Die Ergebnisse der installierten Kapazitäten zeigen, dass sich alle Haushalte in Neubauten für die gleichen zwei dezentralen Wärmetechnologien entscheiden. Mit einer Wärmespitzenlast von 2,9 kW installiert der Zwei-Personen-Haushalt HH2b_N_t1 eine Wärmepumpe mit einer Kapazität von 2,0 kW zusammen mit einem thermischen Speicher (7,6 kWh). Dank des hohen Wirkungsgrades (COP) kann die Wärmepumpe von vergleichsweise niedrigen variablen Kosten profitieren und dadurch ihre vergleichsweise hohen Investitionskosten — die durch den

Investitionszuschuss reduziert werden — kompensieren. Zudem ist in Abbildung 22 gut zu erkennen, wie der Einsatz der Wärmepumpe sich gegen den COP optimiert. In Stunden mit niedrigeren Außentemperaturen und somit niedrigeren COP (z. B. in den Stunden 405-415) fährt die Wärmepumpe runter und der Haushalt bezieht die Wärme aus dem thermischen Speicher. Das flexible Laden und Entladen des Wärmespeichers ermöglicht dem Wärmepumpensystem seine variablen Kosten zu minimieren bzw. seine Effizienz zu maximieren.³² Der Strom für den „regulären“ Bedarf sowie für die Wärmepumpe wird komplett aus dem Netz bezogen.

5.3.4 Zusammenfassung

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 Wärmepumpen zeigen ein großes Potenzial für neue, stark isolierte Einfamilienhäuser, die ihre Wärme aus Strom erzeugen. Für Altbauhäuser kann gemäß der Szenarioergebnisse eine Investition in Richtung einer energieautarken Versorgung für Verbrauchertypen mit erhöhtem Strombedarf 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. 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, oder einer veränderten Umlagen- oder Entgeltstruktur mit COMODO analysiert, um die Robustheit der Ergebnisse – und die Bedeutung für Haushalte – zu untersuchen.

³² In der Modellierung wird durchgehend von smarten Wärmepumpen ausgegangen, die über die Option von Wetterprognosedaten verfügen. Ferner gibt es keine regulatorischen Einschränkungen für den Betrieb der Wärmepumpe. Lediglich die maximale Stromnetzbezugskapazität kann einschränkend wirken.

5.4 Optimierung von Energieinvestition und -verbrauch der Haushaltstypen bis 2040 unter Berücksichtigung von nicht-monetären Präferenzen

Während finanzielle Aspekte eine zentrale Rolle in der Investitionsentscheidung von Haushalten spielen, ziehen Haushalte in der Realität mitunter auch nicht-monetäre Faktoren bei der Auswahl von Energietechnologien in Betracht, wie in Abschnitt 4.4 empirisch ermittelt. Im Zuge der sozialen sowie politischen Bewegung in Richtung der Dekarbonisierung der Endverbrauchersektoren, hat ein zunehmender Anteil der Haushalte ein starkes Interesse an einer effizienten und nachhaltigen Energiebereitstellung. Insbesondere im Wärmebereich haben dezentralen Erzeugungstechnologien mit hoher Effizienz und niedrigem CO₂-Ausstoß tendenziell größere Anschaffungskosten im Vergleich zu den herkömmlichen Gas- oder Öl-Brennwertkesseln. In solchen Fällen kann es sein, dass der kostenminimierende Technologiemitmix ohne Berücksichtigung der nicht-monetären Faktoren solche Wunschkriterien des Haushalts nicht erfüllt, was zu einer Senkung des Gesamtnutzens führen kann.

Im Rahmen des Projekts wird das Modell COMODO um die Berücksichtigung von nicht-monetären Präferenzen ergänzt. Dies erfolgt durch die Einführung von Zahlungsbereitschaften in der Zielfunktion bzw. in der Berechnung der Investitionskosten. Analog zu Investitionszuschüssen können Haushalte für ihre Zahlungsbereitschaft „kompensiert“ werden, wenn sie in Technologien investieren, die ihren Nutzen erhöhen.³³ Technologien, für welche eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft existiert, können dadurch im Vergleich zu anderen Technologien mit niedrigeren Anschaffungskosten konkurrenzfähiger werden. Die Gesamtkosten werden nach wie vor minimiert – allerdings unter Berücksichtigung manipulierter Investitionskosten, die durch die Einbindung der Zahlungsbereitschaften entstehen. Somit internalisiert COMODO den subjektiven Nutzen der Heiztechnologien und optimiert die Investitionsentscheidung anhand monetärer und nicht-monetärer Aspekte. Um diese neue Dimension in COMODO zu implementieren, ist eine Quantifizierung der Zahlungsbereitschaften nötig. Für dieses Projekt wurden die Zahlungsbereitschaften im Rahmen eines Discrete-Choice-Experiments empirisch ermittelt, welches das Forschungszentrum Jülich für die empirische Parametrisierung von COMODO konzipiert hat.

Das Verständnis von Präferenzen bzw. Nutzen und die Quantifizierung durch Zahlungsbereitschaften wird in Abschnitt 5.4.1 diskutiert. Die Werte für die empirisch ermittelten Zahlungsbereitschaften für fünf verschiedene Wärmetechnologien sowie die Definition der vier abwägenden Haushaltstypen für die COMODO-Analyse werden im Abschnitt 5.4.2 dargestellt. Abschnitt 5.4.3 fasst die Ergebnisse der Optimierung zusammen.

5.4.1 Quantifizierung von nicht-monetären Präferenzen

Historisch wurde die Entscheidung, in eine bestimmte Energietechnologie zu investieren, fast ausschließlich von finanziellen Faktoren bestimmt. Wie in Kapitel 0 beschrieben, hat die Bewegung hin zu einer stärkeren Dekarbonisierung und Dezentralisierung im Energiesektor neue finanzielle Anreize für Haushalte geschaffen. Die Einführung von Maßnahmen wie zum Beispiel

³³ Abhängig von der Präferenz kann ein Konsument Zahlungsbereitschaften für mehrere Technologien haben, die entweder allein oder in Kombination zu einer Steigerung des Nutzens führen. Die Zahlungsbereitschaft ist in diesem Fall nur positiv und darf nicht die Investitionskosten der Technologie übersteigen.

Einspeisetarifen für PV-Anlagen im Jahr 2000 ermutigte Haushalte, erneuerbarer Energieerzeuger und -verbraucher zu werden. Zudem hatten Haushalte nicht nur die Möglichkeit ihren CO₂-Ausstoß zu reduzieren, sondern auch ihre Abhängigkeit vom Stromnetz zu beeinflussen. Obwohl für bestimmte Haushalte eine Investition in eine PV-Anlage möglicherweise nicht kostenoptimal war, konnten sie dadurch gegebenenfalls weitere nicht-monetäre Präferenzen erfüllen.

Dieser Effekt wird in der Mikroökonomie mit dem Konzept des Nutzens abgebildet. Konsumenten versuchen nach diesem Konzept ihren Gesamtnutzen zu maximieren. Nutzenfunktionen bilden die Entscheidung der Konsumenten ab, indem der Nutzen von Güterbündeln miteinander verglichen wird (Varian, 2016). In mikroökonomischen Analysen wird häufig „nutzenmaximierend“ mit „kostenminimierend“ zur Vereinfachung gleichgesetzt. Für den Fall, dass der Haushalt eine oder mehrere (nicht-monetäre) Präferenzen hat, kann allerdings die nutzenmaximierende Investitionsentscheidung von der kostenminimalen Investitionsentscheidung abweichen.

Eine übliche Herausforderung ist die Auswahl bzw. Einbindung geeigneter Indikatoren, um die Abweichung zum kostenminimalen Verhalten abbilden zu können. In der Mikroökonomie wird vorwiegend von der marginalen Zahlungsbereitschaft gesprochen. Die Zahlungsbereitschaft entspricht dem (maximalen) Preis, zu dem ein Individuum bereit ist eine Einheit eines Gutes zu kaufen. Diese beschreibt in welchem Verhältnis unterschiedliche Präferenzen zueinanderstehen. Haben Haushalte starke Präferenzen für Autarkie oder Umweltschutz, haben diese ebenso eine hohe marginale Zahlungsbereitschaft, um einen höheren Grad an Autarkie zu erreichen oder einen höheren Beitrag zum Umweltschutz zu leisten. Um die Zahlungsbereitschaft in der Praxis zu ermitteln, benötigt man jedoch empirische Datensätze. Unter anderen sind ökonometrische Ansätze wie z. B. Discrete-Choice Modelle ein geeignetes Werkzeug, um die Zahlungsbereitschaft von Konsumenten zu quantifizieren.

5.4.2 Haushaltsdefinition und Szenariorahmen

Für die Bestimmung der Zahlungsbereitschaften für COMODO werden Ergebnisse einer Onlineumfrage verwendet, die das Forschungszentrum Jülich eigens für die empirische Parametrisierung von COMODO konzipiert hat. Für die Durchführung der Studie und Bereitstellung von Rohwerten für die Berechnung von spezifischen Zahlungsbereitschaften wurde ein Befragungsinstitut beauftragt. Auf Basis der Rohdaten hat das Forschungszentrum Jülich Zahlungsbereitschaften nach Vorgaben von EWI berechnet und bereitgestellt. Im Anschluss wurden diese Zahlungsbereitschaften von EWI normiert, um die Anforderung des COMODO-Modells zu gewährleisten.

Die 284 Befragungsteilnehmer*innen der Onlineumfrage (ausschließlich Eigenheimbesitzer*innen) konnten sich im Rahmen eines Discrete-Choice-Experiments zwischen der Adaption von Wärmetechnologien entscheiden. Als Technologien wurden in der Studie Gasbrennwertkessel, Pelletheizung, Mikro-KWK, Solarthermie und Luft-Wasser-Wärmepumpe berücksichtigt. Zu jeder Wärmetechnologie erhielten die Befragten weitere zufällig variierende Informationen zu vier Attributen: Investitionskosten, jährliche Energiekosten, möglichem Eigenversorgungspotenzial sowie resultierender CO₂-Einsparung.³⁴ Darüber hinaus wurden in der Onlineumfrage Befragten-

³⁴ Diese Eigenschaften wurden für einen vier-Personen Referenzhaushalt berechnet, mit einem jährlichen Strombedarf von 6.000 kWh und einem jährlichen Wärmebedarf von 17.000 kWh.

Merkmale erhoben, anhand derer Präferenzen abgeschätzt werden können. Beispielsweise wurden die Personen gebeten anzugeben, wie wichtig ihnen eine autarke Energieversorgung und Umweltschutz bei einer Investition in eine neue Anlage sind. Auf Basis dieser Befragten-Merkmale lassen sich Befragungsteilnehmer*innen nach ihren nicht-monetären Präferenzen unterscheiden, d. h. wie stark ihre Präferenz für Autarkie ausgeprägt ist (im Folgenden als Autarkiepräferenz bezeichnet) und wie stark ihre Präferenz ausgeprägt ist, einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten (im Folgenden als Umweltschutzpräferenz bezeichnet).³⁵

Für die Analyse in COMODO wurde vom Befragungsinstitut für vier verschiedene Befragtengruppen (Befragtengruppen 1 und 2 mit geringer bzw. hoher Autarkiepräferenz, Befragtengruppen 3 und 4 mit geringer bzw. hoher Umweltschutzpräferenzen) jeweils die durchschnittlichen Zahlungsbereitschaften für jede Attributausprägung zur Verfügung gestellt. Für die empirische Parametrisierung wurden ausschließlich die durchschnittlichen Zahlungsbereitschaften der vier Gruppen für die jeweilige Wärmetechnologie herangezogen. Bei der Zahlungsbereitschaft, die hier in EURO ausgewiesen werden, handelt es sich um ein relatives Konzept. Dies bedeutet, dass sich anhand der Zahlungsbereitschaften ermitteln lässt, für welche Technologie auf Seiten der Befragten eine höhere bzw. geringere Zahlungsbereitschaft besteht.

Tabelle 15 stellt die empirisch ermittelten Zahlungsbereitschaften für die vier unterschiedlichen Befragtengruppen nach erfolgter Normierung dar. Deutlich zu sehen ist, dass die Haushalte mit jeweils schwachen Präferenzausprägungen eine Investition in einen Gasbrennwertkessel (relativ) stark bevorzugen. Für den Haushalt mit einer starken Präferenz für Autarkie besteht für Solarthermie eine deutliche Bevorzugung gegenüber den anderen Technologien, da dies eine Wärmetechnologie ist, die komplett autark betrieben werden kann. Für den Haushalt mit einer starken Präferenz für Umweltschutz ist der Unterschied in den Zahlungsbereitschaften zwischen den Technologien eher geringer, wobei für Solarthermie auch in diesem Fall die höchste Zahlungsbereitschaft vorliegt. Nichtsdestotrotz sind die Zahlungsbereitschaften für Mikro-KWK und Wärmepumpen deutlich positiv ausgeprägt, sodass eine Investition in diese Technologien die Präferenzen abbilden könnte.

In Anlehnung an diese vier Gruppen mit unterschiedlichen Präferenzausprägungen werden für die Analyse in COMODO vier verschiedene „*abwägende*“ Haushalte modelliert: ein Haushalt mit einer starken Autarkiepräferenz, ein Haushalt mit einer schwachen Autarkiepräferenz, ein Haushalt mit einer starken Umweltschutzpräferenz und ein Haushalt mit einer schwachen Umweltschutzpräferenz. Um die Auswirkungen der Präferenzen auf die Investitionsentscheidung zu untersuchen, wird ein Haushaltstyp aus Abschnitt 5.3.1 für die Analyse in COMODO ausgewählt. Ein Haushaltstyp, der repräsentativ hinsichtlich des Energieverbrauchs von deutschen Einfamilienhäusern ist, ist „*HH2a_A_t4*“, mit einer jährlichen Stromnachfrage von 4.029 kWh/a und einer jährlichen Wärmenachfrage von 13.709 kWh/a (siehe Tabelle 18 im Anhang).³⁶ Der Haushaltstyp „*HH2a_A_t4*“ in Kombination mit den vier Präferenzausprägungsgruppen in Tabelle 15 sowie

³⁵ Im Einklang mit der in Abschnitt 4.5.2 berichteten Studie orientierte sich die Erfassung der Befragtenmerkmale an Photovoltaikanlagen. Für die erhobenen Befragtenmerkmale ist anzunehmen, dass sie statistisch gesehen in gleichen Maßen auch für andere Technologien Geltung haben.

³⁶ Ein durchschnittliches Einfamilienhaus (2,5 Personen) in Deutschland hat einen jährlichen Stromverbrauch von rund 4.000 kWh. Der durchschnittliche, jährliche Wärmeverbrauch liegt in Deutschland bei ungefähr 142 kWh/m² unter Berücksichtigung der aktuellen Sanierungsraten, siehe Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2019); Koch et al. (2017); Statistisches Bundesamt (2011); Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019).

ohne nicht-monetären Präferenzen („kostenminimierend“) ergibt fünf Haushalte, die in COMODO optimiert werden. Die Technologieauswahl aus Abschnitt 5.3.1 sowie die techno-ökonomischen Annahmen und der Szenariorahmen aus Abschnitt 5.3.2 gelten weiterhin in dieser Analyse.

Tabelle 15: Empirische Zahlungsbereitschaften (nach Normierung) für verschiedene dezentrale Wärmetechnologien nach Präferenzausprägung [in Euro, Normierung erfolgte durch EWI basierend auf Studie des Forschungszentrums Jülich³⁷]

	Autarkiepräferenz		Umweltschutzpräferenz	
	Stark	Schwach	Stark	Schwach
Gasbrennwertkessel	431	4.739	0*	12.174
Mikro-KWK	0*	0*	929	0*
Wärmepumpe	0*	294	899	0*
Pelletheizung	373	0*	0*	6.972
Solarthermie	15.073	354	3.467	0*

* Entstanden durch die Normierung, siehe Fußnote 40.

5.4.3 Ergebnisse der Optimierung im COMODO Modell anhand von Erkenntnissen aus der Onlineumfrage des Forschungszentrums Jülich

Für die Betrachtung von Haushalten, die nach ihren Präferenzen abwägend entscheiden, wurde zunächst das kostenminimierende Verhalten des Haushaltstyps HH2_A_A_t4 untersucht. Dieses wird anschließend mit dem durch Präferenzen beeinflussten Verhalten verglichen.

Im kostenminimalen Investitionsfall entscheidet sich der Haushaltstyp HH2a_A_A_t4 für die Anschaffung eines 5 kW Gasbrennwertkessels zur Deckung der Heizgrundlast und eines elektrischen Heizstabes mit 1 kW zur Deckung der Wärmebedarfsspitzen. Der Einsatz der Technologien erfolgt hierbei analog zum Technologieinsatz des Haushaltstyps HH1a_A_A_t3, der in Abschnitt 5.3.3 und Abbildung 20 dargestellt wird. Zur Deckung des Haushaltsstrombedarfes und des Strombedarfes zur Deckung der Wärmespitzenlasten bezieht der kostenminimierende Haushalt HH2a_A_A_t4 den Strom vollständig aus dem Netz.

³⁷ Die bereitgestellten absoluten Werte der empirischen Zahlungsbereitschaften wurden für jede Befragten-Gruppe anhand ihrer durchschnittlichen Werte normiert. Durch die Normierung konnten negative Zahlungsbereitschaften entstehen. Die resultierenden negativen Zahlungsbereitschaften wurden nicht weiter berücksichtigt. Eine „schwache“ Präferenzausprägung bedeutet, dass der Haushalt die Präferenz nur minimal zeigt bzw. eher „neutral“ gegenüber der Präferenz ist. Dies soll nicht als eine „negative“ Wahrnehmung der Präferenz (z. B. gegen Umweltschutz) interpretiert werden. Somit würden negativ normierte Zahlungsbereitschaften dieser Einstufung von Präferenzausprägungen widersprechen und wurden daher auf null korrigiert.

Die Berücksichtigung der dargestellten Präferenzen für Haushaltstyp HH2a_A_t4 führt zu stark variierenden Investitionsentscheidungen je nachdem, ob eine Präferenz stark oder schwach ausgeprägt ist. Die Investitionen werden vollständig im ersten möglichen Investitionsjahr getätigt (2025) und sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Investitionsentscheidung des Haushaltstyps HH2a_A_t4 mit abwägenden Investitionsverhalten in 2025

	Kostenminimal	Autarkiepräferenz		Umweltschutzpräferenz	
		Stark	Schwach	Stark	Schwach
Gasbrennwertkessel [kW]	5,0	5,0	5,8		5,8
Heizstab [kW]	1,0			1,1	
Mikro-KWK [kW]				3,3	
Thermischer Speicher [kWh]		19,8		13,3	
Solarthermie [m²]		30,2			

Die im Anschaffungsjahr (2025) anfallenden Investitionskosten des kostenminimierenden Haushaltes und der abwägenden Haushalte werden in Tabelle 17 gezeigt. Neben den Investitionskosten im Anschaffungsjahr 2025 fallen für den Haushaltstyp HH2_a_A_t4 auch jährliche Kosten für den Strom-³⁸ und Gasbezug aus dem Netz und auch mögliche Fixkosten wie Wartung und Reparatur an. Diese jährlichen Kosten werden auch in Tabelle 17 aufgeführt.

Ist eine Präferenz nur geringfügig ausgeprägt, so kann dies dennoch aufgrund der (wenn auch niedrigen) angepassten Zahlungsbereitschaft Einfluss auf die Investitionsentscheidung haben.³⁹ Der Vergleich zwischen Investitionen des kostenminimierenden Haushaltstypen und des abwägenden Haushaltstypen bei schwacher Präferenzausprägung zeigt, dass die Technologie, die für die Grundversorgung des Haushaltes genutzt wird, identisch ist. In beiden Fällen wird ein Gasbrennwertkessel für die Wärmegrundlast genutzt. Allerdings unterscheidet sich die Wahl der Technologie für die Spitzenlaststunden des Wärmebedarfs: Während die kostenminimale Investitionsentscheidung für die Spitzenlaststunden einen elektrischen Heizstab nutzt, entscheidet sich der abwägende Haushaltstyp mit schwacher Präferenzausprägung dafür, den Gasbrennwertkessel mit einer höheren Kapazität zu wählen (siehe Tabelle 16). Die Grundlage dieser Entscheidung sind die Zahlungsbereitschaften wie sie in Tabelle 15 dargestellt sind. Es ist deutlich

³⁸ Die dargestellten Stromkosten beinhalten sowohl Ausgaben für Strombezug aus dem Netz sowie mögliche Zahlungen, die der Haushalt für eingespeisten Strom erhält.

³⁹ Das Ergebnis für schwache Autarkiepräferenz und niedriges Umweltschutzpräferenz ist identisch und wird daher im Folgenden zusammengefasst betrachtet.

erkennbar, dass beide Haushaltstypen mit schwach ausgeprägter Präferenz eine erhebliche Zahlungsbereitschaft für Gasbrennwertkessel haben.

Tabelle 17: Investitionskosten [in Euro] sowie gesamte jährliche Kosten (variable und Fixkosten) [in Euro/Jahr] des Haushalts-typs HH2a_A_t4 mit kostenminimalen und abwägendem Investitionsverhalten in 2025

	Kostenminimal	Autarkiepräferenz		Umweltschutzpräferenz	
		Stark	Schwach	Stark	Schwach
Investitionskosten	3.649	19.771	3.831	11.246	3.831
Gesamte jährliche Kosten*	2.950	2.368	2.949	2.360	2.949
davon jährliche Fixkosten*	231	497	233	160	233
davon jährliche Stromkosten*	1.117	1.113	1.113	167	1.113
davon jährliche Gaskosten*	1.602	1.028	1.603	2.033	1.603

* gemittelt über den Zeitraum 2025 bis 2040

Der Vergleich zwischen den Anschaffungskosten des kostenminimierenden Haushaltes und der Haushalte mit schwach ausgeprägten Präferenzen zeigt, dass die Entscheidung weg von einer strombetriebenen Spitzenlasttechnologie hin zu einem größeren Gasbrennwertkessel zu einer Kostensteigerung von 5 % der Anschaffungskosten führt. Die hohen Zahlungsbereitschaften für die gasbefeuerte Technologie führen dazu, dass abwägende Haushaltstypen mit schwacher Ausprägung der Präferenz diese Mehrkosten tragen, um so ihren persönlichen Nutzen, der die Präferenzen berücksichtigt, zu maximieren. Die anfallenden jährlichen Kosten sind für beide Haushaltstypen annähernd identisch. Die geringfügigen Unterschiede entstehen, weil der kostenminimierende Haushalt die Wärmespitzen mit dem strombetriebenen Heizstab (und nicht mit dem Gasbrennwertkessel) deckt. In beiden Fällen wird der Strom zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs vollständig aus dem Stromnetz bezogen.

Sind die Präferenzen im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Fällen allerdings stark ausgeprägt, so verändert sich das Investitionsverhalten deutlich. Der Haushaltstyp HH2a_A_t4 mit stark ausgeprägter Autarkiepräferenz hat, wie in Tabelle 15 ersichtlich, eine sehr hohe Zahlungsbereitschaft für eine Solarthermie-Anlage. Die hohe Zahlungsbereitschaft zeigt sich in den Investitionen des Haushaltstyps in 2025 (siehe Tabelle 16). Der Haushaltstyp investiert aufgrund der Autarkiepräferenz in eine außerordentlich große Solarthermie-Anlage von 30 Quadratmetern. Diese Solarthermie-Anlage ermöglicht es dem Haushalt seine Präferenz für Autarkie zu realisieren und seinen Wärmebedarf zu mehr als 35 % über selbsterzeugte Wärme zu decken. Da die Solarstrahlung nicht immer gleichzeitig mit dem Haushaltswärmebedarf auftritt, installiert der

Haushalt mit einer Solarthermie-Anlage zusätzlich einen thermischen Speicher. Dieser Speicher ist mit seinen 19,8 kWh größer als sämtliche Speicher, die von den Haushaltstypen im Abschnitt 5.3.3 installiert wurden. Diese Größe ist aufgrund der hohen zu verschiebenden Wärmemengen aus der Solarthermie-Anlage notwendig. Da der Wärmebedarf nicht vollständig in allen Stunden über die Solarthermie-Anlage und den zugehörigen Speicher gedeckt werden kann, installiert der Haushalt trotz starker Autarkiepräferenz weiterhin einen kostengünstigen Gasbrennwertkessel.

Der Haushaltstyp HH2a_A_t4 mit stark ausgeprägter Autarkiepräferenz setzt aufgrund dieser Präferenz im Vergleich zu dem minimalen Investment des kostenminimierenden Haushaltstyps annähernd das Fünfeinhalbfache des Kapitals im Investitionsjahr 2025 ein (siehe Tabelle 17). Dies ist auf die hohe Belastung durch die Investitionskosten der Solarthermie-Anlage zurückzuführen. Dennoch senkt der abwägende Haushaltstyp seine jährlichen Kosten um 19,7 %, von 2.950 Euro auf 2.368 Euro. Die Solarthermie-Anlage zusammen mit dem thermischen Speicher ermöglicht diesem Haushalt seinen Gasverbrauch und damit auch die jährlichen Kosten für Gas gegenüber dem kostenminimierenden Haushaltstyp um mehr als 35 % zu reduzieren. Dadurch senkt der Haushalt seine Abhängigkeit vom Erdgasnetz und profitiert vom erhöhten Nutzen.

Auch der Haushaltstyp HH2a_A_t4 mit stark ausgeprägter Umweltschutzpräferenz zeigt eine erhöhte Zahlungsbereitschaft für Solarthermie-Anlagen (siehe Tabelle 15). Allerdings sind Solarthermie-Anlagen sehr kapitalintensiv, wie aus den Investitionskosten-Ergebnissen des Haushaltes mit stark ausgeprägter Autarkiepräferenz ablesbar ist (siehe Tabelle 17). Da seine Zahlungsbereitschaft die hohen Kosten einer ausreichend großen Solarthermie-Anlage nicht kompensiert, investiert der Haushalt mit erhöhter Umweltschutzpräferenz in eine Mikro-KWK-Anlage mit 3,3 kW. Auch für die KWK-Anlage hat der Haushalt mit hoher Umweltschutzpräferenz eine Zahlungsbereitschaft, wenn auch nicht vergleichbar hoch. Diese Anlage ermöglicht es dem Haushalt Strom und Wärme dezentral mit hohen Wirkungsgraden aus Gas bereitzustellen. Diese Technologie ist allerdings kapitalintensiv und wird somit nicht auf den Peak des Wärmebedarfs ausgelegt. Zur Deckung der Wärmespitzen nutzt der Haushalt zwei Spitzentechnologien: einen thermischen Speicher mit 13,3 kWh und einen Heizstab mit 1,1 kW. Der Einsatz der Technologien ist hierbei analog zum Einsatz des Haushaltstyps HH1b_A_t3, der in Abschnitt 5.3.3 und Abbildung 21 dargestellt wurde. Wie beim Haushaltstyp HH1b_A_t3 kann der Wärmespeicher die Wärmeerzeugung der KWK-Anlage in Stunden mit geringerem Wärmeverbrauch abnehmen und diese dann in Stunden mit hohem Wärmebedarf verschieben. Dabei ermöglicht der thermische Speicher dem Haushalt den Eigenverbrauch der Stromerzeugung aus der Mikro-KWK zu maximieren: Durch die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung wird rund 90% des Gesamtstrombedarfs (für den Heizstab sowie für die Deckung der „regulären“ Stromnachfrage) von der KWK-Anlage gedeckt.

Im Gegensatz zum Haushalt mit stark ausgeprägter Autarkiepräferenz, gibt der Haushalt mit einer stark ausgeprägten Umweltschutzpräferenz „nur“ das Dreifache des Kapitals im Vergleich zum minimalen Investment des kostenminimierenden Haushalts im Investitionsjahr 2025 aus. Dies resultiert hauptsächlich aus den unterschiedlichen Investitionskosten zwischen Gasbrennwertkessel und Mikro-KWK (siehe Tabelle 19 im Anhang). Aber aufgrund des erhöhten Wirkungsgrads sowie der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme entsteht eine deutliche Verschiebung der Struktur der jährlichen Kosten im Vergleich zu den anderen Ausprägungen:

Während die Stromkosten im Vergleich zum kostenminimierenden Fall um mehr als 85 % reduziert wurden, steigen die Gaskosten um lediglich 27 % an. Außerdem ist dieser Haushalt der einzige Fall, in dem die Fixkosten niedriger (-31 %) als beim kostenminimalen Haushaltstyp sind. Dies liegt auch an den unterschiedlichen Annahmen zu den Wartungskosten von Mikro-KWK und Gasbrennwertkesseln (siehe Tabelle 20 im Anhang). Dadurch hat der Haushaltstyp HH2a_A_t4 mit stark ausgeprägter Umweltschutzpräferenz im Vergleich zu allen anderen Ausprägungen die niedrigsten jährlichen Kosten (-20 % im Vergleich zum kostenminimierenden Haushaltstyp). Mit seiner Investition und der Fahrweise der Anlagen kann der Haushaltstyp mit stark ausgeprägter Umweltschutzpräferenz seinen jährlichen mittleren CO₂-Ausstoß⁴⁰ um 7 % reduzieren (gegenüber dem kostenminimierenden Haushaltstyp). Durch die verbesserte Energieeffizienz und die Reduktion der Emissionen profitiert der Haushalt entsprechend seiner Präferenz auch durch die Reduktion der Umweltbelastung.

5.4.4 Zusammenfassung

Die Implementierung von Zahlungsbereitschaften im COMODO ermöglicht die Berücksichtigung von nicht-monetären Präferenzen in den Investitionsentscheidungen für die Energieversorgung der Haushalte. Aufbauend auf einem Discrete Choice Experiment, welches das Forschungszentrum Jülich für die empirische Parametrisierung des COMODO Modells konzipiert hat, konnte mit dem Modell der Einfluss von Präferenzen für Autarkie und Umweltschutz untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die vier abwägenden Haushaltstypen für Energieinvestitionen entscheiden, die von der Investitionsentscheidung des kostenminimierenden Haushalts abweichen. Größtenteils ist bei den Ergebnissen zu sehen, dass die Wärmetechnologie mit den höchsten Zahlungsbereitschaften installiert wird. Haushalte mit einer starken Präferenz für Autarkie zeigen eine massive Zahlungsbereitschaft für Solarthermie, die wiederum die hohen Investitionskosten ausgleicht. Für Energieversorger sowie Entscheidungsträger ist es wichtig zu verstehen, wie solche Präferenzen die Energieversorgungsstruktur beeinflussen könnten. Informationen über Zahlungsbereitschaften von Haushalten mit unterschiedlichen Präferenzen können ein starker Indikator für die Bestimmung von finanziellen Anreizen (z. B. Investitionszuschüsse) sein. Mit Optimierungsmodellen können geeignete Instrumente und Fördermechanismen sowie deren Größenordnung bestimmt werden, um einerseits kosteneffiziente aber auch nutzenmaximierenden Technologien zu unterstützen.

⁴⁰ Die Berechnung des CO₂-Ausstoßes erfolgt anhand der CO₂-Faktoren vom Gas sowie vom deutschen Stromerzeugungsmix in 2025 zusammen mit dem jährlichen Gas- und Stromverbrauch.

6 Smart Energy-Geschäftsmodellinnovation

Neue (digitale) Technologien besitzen per se keinen intrinsischen Wert für ein Unternehmen bis diese in der Form von Geschäftsmodellen nutzbar gemacht werden (Zott et al., 2011). Um geeignete Smart Energy-Geschäftsmodelle auf Basis von Smart Energy-Technologien für Haushaltskund*innen zu entwickeln, wurden im Rahmen von mehreren Innovationsworkshops mit Vertreter*innen der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft verschiedene Ansätze verfolgt. Zudem wurden im Rahmen des Projekts passende Werkzeuge zur Unterstützung von Geschäftsmodellinnovationen entwickelt und erprobt. Im folgenden Abschnitt 6.1 werden zunächst Erkenntnisse aus drei Innovationsworkshops zum Bereich Smart Home Systeme präsentiert. Im darauf folgenden Abschnitt 6.2 wird ein im Rahmen von VISE-Haushalte entwickeltes Geschäftsmodellwerkzeug für den weiter gefassten Bereich Smart Energy sowie dessen Erprobung in einem Innovationsworkshop präsentiert. Mit Hilfe des Geschäftsmodellwerkzeuges können Unternehmen, unter anderem ausgehend von ihrem aktuellen Unternehmensprofil, individuelle Smart Energy-Geschäftsmodelle für die eigene Zwecke entwerfen. Im Abschließend Abschnitt 6.3 werden drei mögliche Smart Energy-Geschäftsmodelle vorgestellt, die auf Basis der Ergebnisse der Marktanalyse (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3) sowie der Resultate der durchgeführten Workshops entwickelt wurden (vgl. Abschnitte 6.1 und 6.2.2).

6.1 Innovationsworkshops zur Entwicklung von Smart Home Geschäftsmodellen

Im Rahmen des Projekts wurden drei qualitative Innovationsworkshops mit Nutzer*innen von Smart Home Systemen sowie Vertreter*innen der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft durchgeführt. Ziel war es, mögliche Ko-Benefits (siehe Glossar) auf angewandte Smart Home Systeme zu übersetzen, Bedarfe für zukünftige Nutzer*innen auf Haushaltsebene zu ermitteln und derzeitige Hindernisse in Bezug auf die Nutzung der Systeme zu identifizieren. Im Juni 2019 wurde an der TH-Köln ein Workshop mit Meisterschülern der Handwerkskammer zu Köln (HWK) aus dem Fachbereich der Elektrotechnik durchgeführt, gefolgt von einem Stakeholder-Workshop mit Vertreter*innen der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft im Juli 2019 in Düsseldorf. Der letzte Workshop fand im November 2019 in der Ortschaft Dorsten in Nordrhein-Westfalen statt. Dort wurde mit Eigenheimbesitzer*innen über die Anwendung von Smart Home Systemen diskutiert. An dieser Stelle ist vorab zu betonen, dass, komplementär zur quantitativen Befragung (siehe Abschnitt 4.1), insbesondere bei dem Workshop in Düsseldorf mit Personengruppen gearbeitet wurde, die sich sowohl privat als auch beruflich mit Fragen der Energieeffizienz befassen, womit der Fokus dieser Veranstaltung sehr auf der Einsparung von Energie und umweltbezogenen Aspekten liegt.

Thematisch wurden innerhalb der Workshops Fragestellungen diskutiert, die sich mit der Akzeptanz und den Ko-Benefits einer Digitalisierung von Infrastrukturen im Energiesystem befassen. Neben der Entwicklung von Ko-Benefits erarbeiteten die Teilnehmenden in den Innovationsworkshops, welche Zusatznutzen (z. B. Zeitersparnis) von smarten Technologien und Dienstleistungen gewünscht sind und welche möglichen personenbezogenen Barrieren der Anschaffung und Nutzung dieser Produkte gegenüberstehen. Hierfür entwarfen die Teilnehmenden im zweiten Teil der Workshops fiktive Nutzer*innen (im Folgenden Persona genannt), für die die Teil-

nehmenden ein individuelles Smart Home-System entwickeln, das eine auf die Persona abgestimmte energieeffiziente und verbrauchergerechte Nutzung ermöglicht. Die Einbindung von Teilnehmenden mit unterschiedlichen beruflichen und soziodemografischen Hintergründen ermöglicht die Generierung vielseitiger Ergebnisse und neuer Blickwinkel auf das Forschungsthema.

Zur Beantwortung der zuvor genannten Forschungsfragen kommen in den Workshops verschiedene wissenschaftliche Methoden zum Einsatz. Zu Beginn erfolgen zum Einstieg Impulsvorträge der Moderatoren des Wuppertal Instituts und der TH Köln sowie eine Abfrage zum Begriff „Smart Home“ über eine Online-Live-Umfrage via „Mentimeter“, siehe Abbildung 23. Anschließend haben die Teilnehmenden die Möglichkeit, in Kleingruppen die von der TH Köln entwickelten, mobilen Smart Home-Installationswände interaktiv zu testen und damit den Aufbau, die Funktionsweise und die Programmierung unterschiedlicher Smart Home-Systeme nachzuvollziehen. Im Testaufbau können neben den Hardware Komponenten ebenfalls softwareseitig unterschiedliche Apps zur Steuerung und Programmierung mittels Tablet getestet werden. Anhand der eigenständigen interaktiven Bedienung der verschiedenen Systeme ergeben sich bei diesem Part des Workshops oftmals schon erste Hindernisse bei der Nutzung oder darauf aufbauend Ideen für mögliche Ko-Benefits (z. B. Lernendes System).

Welche drei Begriffe fallen Ihnen zum Thema "Smart Home" ein?

Mentimeter



© VISE (2019)

16

Abbildung 23: Ergebnisse der „Mentimeter-Umfrage“ beim Workshop in Köln

Zur Beantwortung der Leitfragen diskutieren die Teilnehmenden im sog. Worldcafé⁴¹ mögliche Bedarfe und Ko-Benefits, die potenziellen Nutzer*innen bei Smart Home Systemen wichtig sein könnten, sowie Barrieren und Hemmnisse für den Einsatz von Smart Home Systemen. Die Methode des Worldcafé ermöglicht eine besonders vielschichtige Auseinandersetzung mit dem Thema, zudem gewährt sie Einblicke in Denk- und Handlungsmuster verschiedener Zielgruppen.

⁴¹ Ein Worldcafé bildet einen einfachen und dennoch umfangreichen Kommunikationsprozess ab, der einer Gruppe hilft, einen konstruktiven Dialog über kritische Fragen zu führen, gemeinschaftliches Lernen zu fördern und gleichzeitig auf persönlicher Ebene zu arbeiten Fouché und Light (2011).

Als weitere Stärken dieser Methode gilt die Generierung vieler Daten innerhalb einer kurzen Zeitspanne sowie die Möglichkeit, eine Vielzahl von Ideen interaktiv zu entwickeln und gleichzeitig reflektiv zu hinterfragen. In der ersten Runde diskutieren die Teilnehmenden an zwei Thementischen zu einer der folgenden Fragestellungen:

- *Welche Bedarfe und Ko-Benefits für Smart Home Systeme sehen Sie?*
- *Welche Barrieren und Hemmnisse für den Einsatz von Smart Home Systemen haben Sie?*

Nach einer 10 bis 15-minütigen Gesprächsrunde wechseln die Teilnehmenden zusammen zu dem jeweils anderen Thementisch. Die Ergebnisse werden auf Plakaten notiert und später von den Moderierenden im Plenum vorgestellt (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: Diskussionsrunden in den Workshops

In der zweiten Diskussionsrunde wird mit einer Methode aus dem „*Design Thinking*“ gearbeitet, die es ermöglicht, Produkte und Dienstleistungen näher an der*dem Verbraucher*in zu entwickeln. Anhand vorab definierter Personas entwickeln jeweils zwei Gruppen ein Smart Home System, das auf diese Persona ausgerichtet ist. So werden individuelle Bedürfnisse stärker berücksichtigt und eventuell neue, von den Herstellenden bisher unbedachte, Aspekte und Zusammenhänge aufgedeckt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Workshops werden im Folgenden aufgeführt.

6.1.1 Ergebnisse: Worldcafé

In der ersten Diskussionsrunde diskutierten die Teilnehmenden im Worldcafé mögliche Bedarfe und Ko-Benefits, die potenziellen Nutzer*innen bei Smart Home Systemen wichtig sein könnten.

Dabei konnte bei allen dreien Workshops festgestellt werden, dass für die Teilnehmenden Aspekte der Energieeffizienz als besonders wichtig erachtet werden (z. B. in Bezug auf das Heizen). Das System sollte in der Lage sein, eigenständig energieeffizient und damit einhergehend strom- und kostensparend arbeiten zu können. In allen Workshops wurde besonders die Steigerung der Lebensqualität, herbeigeführt durch (deutliche) Zeitersparnisse, mehr Komfort oder Aspekte wie ein verbessertes Raumklima als zentrale Anreize zum Kauf von Smart Home-Systemen genannt. Zudem wurde auch des Öfteren die Sicherheit im Gebäude (Schutz vor Einbrüchen & Maßnahmen zum Brandschutz) als sehr wichtig erachtet sowie die Verlässlichkeit des Systems bei Hackerangriffen. Die Themen Datenschutz und Datenhoheit wurden bislang bei jedem Workshop von den Teilnehmenden angesprochen und verdeutlichen, dass es aus Sicht der Teilnehmenden für die Nutzer*innen wichtig ist zu wissen, was mit ihren Daten passiert. Im Rahmen der Sicherheit wurde zudem beim Workshop in Dorsten die frühzeitige Schadenserken- nung als wichtiger Ko-Benefit z. B. bei einem Wasserschaden angesprochen. Demgegenüber wurde beim Workshop mit den Elektrotechnik-Meisterschülern der HWK Köln als Bedarf ein an- sprechendes Design der Systeme und ihrer Komponenten diskutiert, dass sich in das Gesamtbild des Raumes einfügt, ohne negativ aufzufallen. Zudem berücksichtigten die Meisterschüler auch Ko-Benefits, die die Wartung und Installation des Systems betreffen. Ein Wartungsvertrag könnte beispielsweise sicherstellen, dass das Smart Home System der Kundin und des Kunden regel- mäßig überprüft und repariert wird. Optional könnten Angebote zur Fernwartung softwaretechni- sche Probleme im System zu jeder Tages- und Nachtzeit lösen. Beim Workshop in Dorsten hat- ten die Teilnehmenden den Wunsch nach gewerbeübergreifenden Angeboten zur Wartung und Beratung aus einer Hand geäußert.

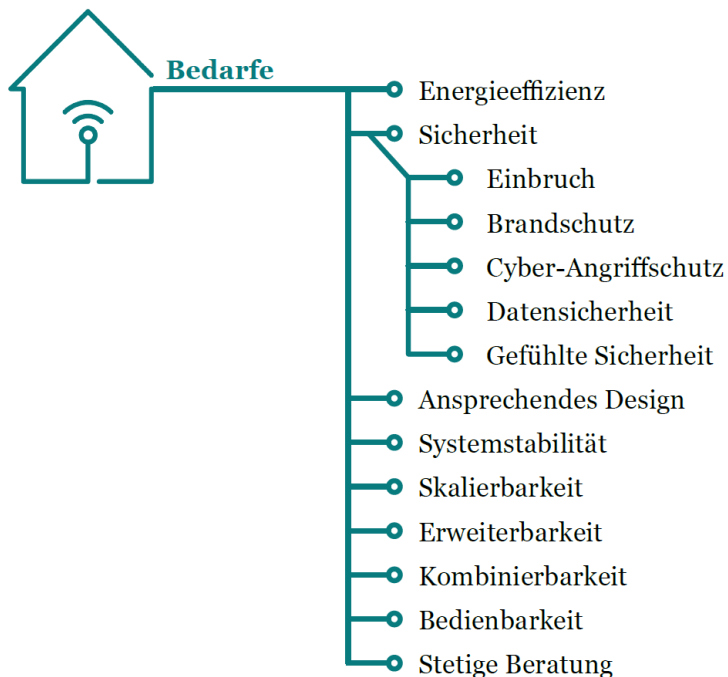


Abbildung 25: Ermittelte Bedarfe an Smart Home Systeme aus den Workshops (Stand: 02/2020)

In allen 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 aber nach den individuellen Wünschen und Bedürfnissen der Bewohner*innen richtet und dahingehend ohne großen Aufwand und Kosten erweitert werden kann. Als weiterer Bedarf wurde in den Workshops in Köln und Düsseldorf 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 auch aus Sicht der Verbraucher*innen wünschenswert, dass sich das System per Smartphone oder Tablet (fern-) steuern lässt und damit eine Abfrage der Systeminformationen auch von unterwegs möglich macht.

Weiterhin wurde vermehrt die Überwachung der Bewohner*innen als Unterstützung / Betreuung von jungen, alten und/oder pflegebedürftigen Personen genannt. Hinsichtlich der Verstärkung des demographischen Wandels und der Zunahme an Ein-Personen-Haushalten v. a. bei älteren Personen kann ein Smart Home-System zukünftig eine wichtige Unterstützung darstellen, die neue Möglichkeiten der Selbstbestimmtheit für ältere (oder kranke) Personen eröffnet. Die weiteren Ko-Benefits, die in den Workshops genannt wurden, sind in Abbildung 26 zusammengefasst.

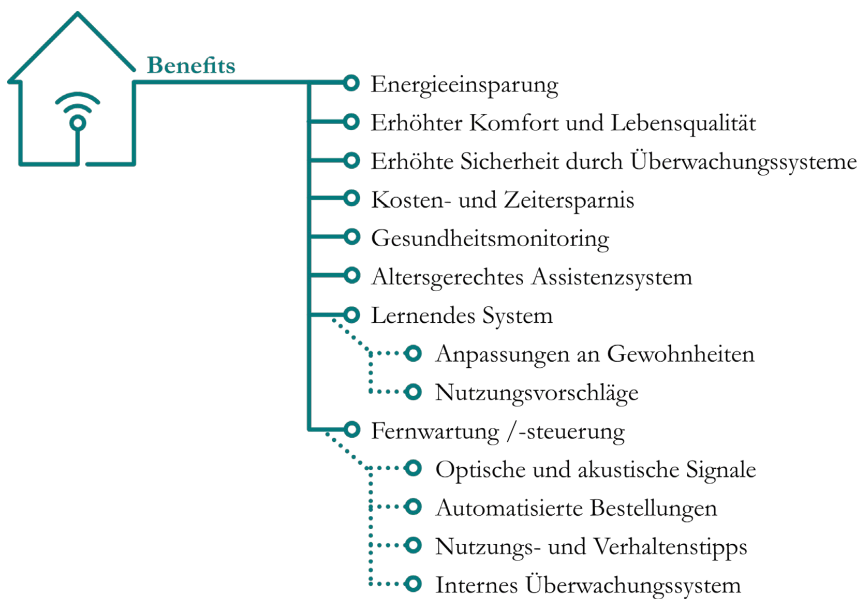


Abbildung 26: Benefits durch Smart Home Systeme

Als eine der größten Barrieren in Bezug auf die Nutzung von Smart Home-Systemen wurde beim Stakeholderworkshop die Angst vor Rebound-Effekten wie zusätzliche Energie- und Ressourcenverbräuche bei Herstellung und Nutzung genannt. Auch die Verlässlichkeit des Systems, die Schnittstellenkompatibilität und evtl. höhere Kosten führen aus Sicht der Teilnehmenden bei den Verbraucher*innen zu Bedenken. In allen Workshops wurden Barrieren hinsichtlich der Bedienbarkeit, insbesondere für technikferne Nutzer*innen, diskutiert. Besonders beim Workshop in Dorsten wurde angemerkt, dass Smart Home Systeme derzeit aus Sicht der Teilnehmenden für

viele Personengruppen noch nicht bedarfsgerecht konzipiert sind. Dabei wurden v. a. die Komplexität der Systeme sowie der befürchtete Kontrollverlust („*Verlust der analogen Bedienbarkeit*“) angemerkt. Auch Befürchtungen vor einer Manipulation des Systems von außen und damit verbunden die Angst vor einem externen Eingreifen in Haushaltsabläufe könnten aus Sicht der Teilnehmenden Hemmnisse für den Einsatz von Smart Home Systemen in Privathaushalten darstellen. Nicht zu vernachlässigende Barrieren, die von den Meisterschülern der HWK Köln genannt wurden, sind die Unsicherheit über die Höhe der entstehenden Wartungskosten und das derzeit fehlende Know-how der Techniker*innen. Die Teilnehmenden haben angemerkt, dass viele Techniker*innen noch für die Beratung, den Einbau und Einsatz von Smart Home Systemen geschult werden müssen. Demgegenüber haben die Teilnehmenden des Stakeholder-Workshops den vermehrten Einsatz von Smart Home-Systemen als positiven ökonomischen Anreiz gesehen. Es entstehen neue Kompetenzfelder für klassische Berufe z. B. des Handwerks – in anderen Wirtschaftszweigen (Herstellung, Wartung etc.) könnten neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Jedoch haben sie außerdem angemerkt, dass die Nutzung eines Smart Home-Systems einen Rückgang der Selbstständigkeit („*Verlernen*“ von einfachen Handgriffen oder Bewegungsabläufen im Alltag) verursachen kann. Auch im Bereich der Umweltwirkungen hatten die Akteur*innen mehrere Hürden identifiziert. Es wurden kritische Fragen zum Ressourcenverbrauch bei der Herstellung und Nutzung der Systeme geäußert sowie der Gegensatz „*Umweltfreundlich vs. Komfort*“ thematisiert. Die Teilnehmenden in Dorsten haben als kritischen Aspekt die zu geringe Transparenz über die Produkte seitens der Herstellenden angemerkt.

6.1.2 Ergebnisse: Personas

Um individuelle Bedürfnisse stärker in den Vordergrund zu rücken, haben die Teilnehmenden der drei 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. Gewünschte Funktionen des Systems stellen beispielhaft die Steuerung der Beleuchtung und der Musik über eine App auf dem Handy sowie eine smarte Türklingel dar. Zusammengefasst generiert das System trotz seiner energiesparenden Auslegung Rebound-Effekte, 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, um möglichst viele neue Funktionen (Steuerung der Musik- und Lichtenanlagen, smarte Türklingel etc.) zu testen, haben die Teilnehmenden beim Workshop an der TH Köln ihre 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 in der Wohnung eingebaut, das den Energieverbrauch visualisiert und hilft, die Kosten jederzeit im Überblick zu behalten.

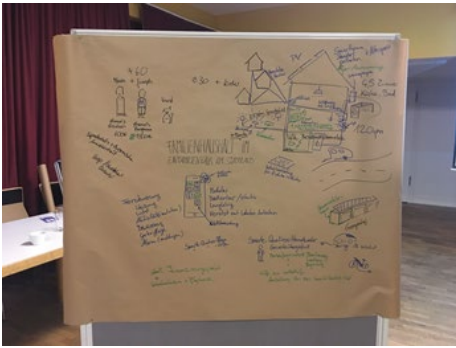


Abbildung 27: Entwurf eines Smart Home-Systems für eine Familie am Stadtrand (Workshop Dorsten) & Visuelle Darstellung des urbanen Familienhaushalts in Köln Porz (Workshop Köln)

Auch die Entwicklung des Smart Home-Systems für die Persona „*Familie am Stadtrand*“ gestaltete sich bei allen Workshops sehr unterschiedlich. Beim Workshop an der TH-Köln wählten die Teilnehmenden eine junge vierköpfige Familie, die in einer Eigentumswohnung in Köln Porz lebt und in ihrer Lebensweise als umwelt- und gesundheitsbewusst beschrieben werden kann (siehe Abbildung 27). Der Fokus dieses Smart Home Systems liegt auf der Einsparung von Strom(-kosten) und der effizienten Nutzung ihrer Solaranlage, mit der sie u. a. den E-Dienstwagen der Frau oder das E-Bike des Mannes aufladen. Zu den weiteren Benefits des Systems zählen viele Automatisierungen im Alltag darunter einen Kühlschrank, der eigenständig Lebensmittel nachbestellt, biodynamisches Licht, automatisierte Raumklimasteuerung und das regelmäßige Saugen und Wischen der Wohnung. Neben den Funktionen, die auf mehr Komfort und damit eine Steigerung der Lebensqualität eingehen, bietet das System externe Sicherheitsfunktionen. Zudem enthält es spezielle Module, die die Sicherheit der Kinder (6 & 14 Jahre) im Internet steigern.

Demgegenüber wurde beim Innovationsworkshop in Dorsten ein Smart Home System für ein Ehepaar im Ruhestand entwickelt, das in einem Autofreien Quartier lebt, womit der Fokus nun auf neue Bedarfe und Ko-Benefits gelegt wurde (siehe vorherigen Abschnitt Abbildung 25 und Abbildung 26). Das System soll modular, intuitiv bedienbar, langlebig und mit lokalen Anbietern vernetzt sein. Besonders wichtig ist die Einbindung eines*iner Smarte-Quartiers-Handwerker*in, die sich auf die Bedürfnisse von älteren Personen im Smarten Quartier spezialisiert hat. Er*Sie lebt ebenfalls im Quartier und hilft mit einer zusätzlichen Ausbildung der Nachbar*innen-schaft in allen Smart-Living-Fragen weiter. Eine weitere Person ist für die Smarte-Quartiers-Hilfe /-Pflege verantwortlich und unterstützt die Bewohner*innen mit Hilfe eines smarten Lebensumfelds. Um dem älteren Ehepaar in Ruhestand ihren Alltag im Haus zu erleichtern, wurden diverse Funktionen wie eine automatische Bewässerung der Pflanzen, ein smarter Rasenmäher, eine Alarmanlage und eine Lichtsteuerung in das System integriert. Das Prinzip der autofreien Siedlung bei dem die Autos in weitem Abstand zu den Wohnhäusern parken, ermöglicht vergrößerte Fußgängerwege und schmale Straßen, die primär für andere Nutzungen (z. B. Aufenthalt und Spielfläche für Kinder) geplant wurden. Die E-Fahrzeuge auf den Stellplätzen außerhalb der Siedlung können über dort installierte Solaranlagen und Ladestationen aufgeladen werden.

Die von den Teilnehmenden sehr unterschiedlich entworfenen Personas verdeutlichen, dass smarte Produkte und Dienstleistungen auf verschiedenste individuelle Bedürfnisse eingehen sollten. Nicht jeder urbane Single-Haushalt hat die gleichen Anforderungen an ein Smart Home-

System und auch Familienhaushalte weisen teils sehr unterschiedliche Bedürfnisse auf. 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, verbrauchergerechte und nutzerorientierte Nutzung ausgelegt werden. Die in den Workshops erfassten unterschiedlichen Ansichten, Meinungen und Bedürfnisse liefern erste Erkenntnisse über die teils individuellen teils gemeinsamen Wahrnehmungen, Einstellungen und Bedarfe der Konsument*innen 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.

6.2 Smart Energy-Geschäftsmodellinnovationen verstehen und entwickeln: Taxonomie und Innovationsworkshop

Forschung zu Geschäftsmodellinnovation beschäftigt sich u. a. mit der Dynamik von Geschäftsmodellen aufgrund der Veränderung einzelner oder mehrerer Geschäftsmodellkomponenten. Im Gegensatz zum volkswirtschaftlichen Begriffsverständnis nach Schumpeter & Backhaus (2003) werden nicht nur „echte Innovationen“, welche sich auf dem Markt etablieren konnten, sondern auch „Inventionen“, die noch nicht erfolgreich am Markt erprobt wurden, als Innovationen gezählt. Darüber hinaus gibt es in der Literatur unterschiedliche Auffassungen von Geschäftsmodellinnovation (Bucherer et al., 2012; Saebi & Foss, 2016). Hierbei können Geschäftsmodellinnovationen unterschieden werden, ob diese neu für das Unternehmen, neu für die Branche oder eine Weltneuheit sind (Dahlin & Behrens, 2005; Saebi & Foss, 2016; Zott & Amit, 2007). Einige Forscher argumentieren jedoch, dass Neuheit im Sinne von „neu für das Unternehmen“ keine Geschäftsmodellinnovation ist, da dies die einfache Übernahme des etablierten Geschäftsmodells eines anderen Unternehmens in der gleichen Branche einschließen würde (Saebi & Foss, 2016). Abgesehen von der Neuheit lassen sich Änderungen nach ihrem Umfang unterscheiden (Saebi & Foss, 2016). Aufgrund der starken Interdependenzen zwischen den Geschäftsmodellbausteinen, z. B. der Wertschöpfung, Werterzeugung und Werterfassung, beeinflusst eine Geschäftsmodellinnovation oft mehrere Teile eines Geschäftsmodells. Manchmal wird dieser Änderungsumfang als radikale oder inkrementelle Geschäftsmodelländerungen diskutiert (Bucherer et al., 2012; Saebi & Foss, 2016).

6.2.1 Klassifikationswerkzeuge

Um Smart Energy-Geschäftsmodelle besser verstehen zu können, wurde eine Geschäftsmodelltaxonomie entwickelt (vgl. Abbildung 28). Diese Taxonomie kann als Baukasten verstanden werden, um Smart Energy-Geschäftsmodelle zu analysieren, vergleichen und zu 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 setzt sich aus vier wesentlichen Geschäftsmodellbausteinen zusammen: Wertversprechen (Value Proposition), Werterzeugung (Value Creation), Wertnetzwerk (Value Network) und Werterfassung (Value Capture). Ferner werden die Bausteine in zehn Dimensionen differen-

ziert. 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 (Paukstadt et al., 2019).

	Dimension	Merkmale							
Wertversprechen	Angebot	Nur digitaler Service			Digitaler und physischer Service			Intelligentes Produkt-Service-System	
	Wert	Umwelt	Autonomieität	Wirtschaftlichkeit	Transparenz	Verlässlichkeit	Komfort	Community	Status
	Kundensegment	Verbraucher			Prosumer			Community	
Werteszeugung	Kundenbeitrag zur Netzstabilität	Flexibilität			Daten			Kein Beitrag	
	Technologischer Zweck	Produktions-/ Versorgungsorientiert			Verbrauchsorientiert			Integrationsorientiert	
	Produkteigentum	Kunde			Unternehmen (Fokal oder Drittpartei)			Nicht relevant	
Wertnetzwerk	Digitale Plattform	Betrieb			Beteiligung			Keine Plattform	
	Geschäftspartnerschaft	Kooperation				Keine Geschäftspartnerschaft			
Werteinfassung	Verbraucher Zahlungsplan	Transaktion				Abonnement			
	Verbraucher Zahlungsmittel	Geld		Digitale Ressourcen		Aufmerksamkeit		Energiequelle	

Abbildung 28: Smart Energy-Geschäftsmodelltaxonomie adaptiert nach Paukstadt et al. (2019)

6.2.2 Innovationsworkshop zur Geschäftsmodellinnovation

Im Rahmen des Projektes wurde vom ERCIS (European Research Center for Information Systems) und der EnergieAgentur.NRW ein gemeinsamer Innovationsworkshop mit Akteuren der Energiewirtschaft (z. B. Vertreter aus Stadtwerken, Beratungsfirmen und Hochschulen) ausgerichtet. Ziel war es, den Teilnehmenden Werkzeuge nahezubringen, mit denen sie selbst innovative Smart Energy-Geschäftsmodelle entwickeln (Definition siehe Kapitel 3 sowie Abschnitt 6.2.1) können, und ihnen somit Innovationspotenziale in der Energiebranche aufzuzeigen.

Thematisch lag der Schwerpunkt auf der Vorstellung der verschiedenen Werkzeuge und deren interaktiven Anwendung. Bei der Gestaltung des Workshops erhielten drei Faktoren höchste Priorität: *Verständnis, Anwendung und Diskurs unter Sachverständigen*. Daher sollten die Teilnehmenden in kleinen Gruppen gemeinsam unter Verwendung der vorgestellten Werkzeuge innovative Geschäftsmodellideen entwickeln. Die Vorstellung der Werkzeuge wurde in zwei Phasen unterteilt, die jeweils sowohl einen theoretischen als auch einen praktischen Teil beinhalteten. In jeder Arbeitsphase wendeten die Teilnehmenden die im Theorieteil präsentierten Werkzeuge an. Somit wurde den Teilnehmenden ermöglicht, ihr Verständnis bzgl. der präsentierten Werkzeuge zu überprüfen und Rückfragen zu stellen, um etwaige Unklarheiten auszuräumen.

Zu Beginn wurden den Teilnehmenden die relevanten Veränderungen im Energiemarkt präsentiert, um ihnen die Bedeutsamkeit der Implementierung von Smart Energy-Geschäftsmodellen zu verdeutlichen. Die Vorstellung der Werkzeuge zur Einordnung und Strukturierung von innovativen Geschäftsmodellen bildete den theoretischen Teil der ersten Workshopphase. Auf diese folgte die erste Arbeitsphase. Die Teilnehmenden beschrieben zunächst in Einzelarbeit ein ihnen bekanntes Geschäftsmodell mithilfe des Business Model Canvas (siehe Kapitel 3, Abbildung 7) und präsentierten dieses im Anschluss der Gruppe. Als Abschluss des ersten Teils des Workshops gaben die Teilnehmenden ein kurzes Feedback zur Anwendung des Business Model Canvas. Es wurde angemerkt, dass durch die Einzelarbeitsphase mit dem Business Model Canvas

ein Mehrwert für die Teilnehmenden entstanden ist. Beispielsweise wäre dieses Wissen im Falle einer geplanten Analyse des eigenen Geschäftsmodells von Vorteil.

Die zweite Phase startete mit der Vorstellung der Geschäftsmodellarchetypen (siehe Kapitel 3) und verschiedener Geschäftsmodellmuster.⁴² In kleinen Gruppen wurde jeweils eines der Geschäftsmodelle, welches in der vorangegangenen ersten Arbeitsphase von den Teilnehmenden in das Business Model Canvas eingeordnet wurde, zur weiteren gemeinsamen Entwicklung in der Teilnehmergruppe ausgewählt. Ziel der Gruppenarbeit war die Entwicklung eines innovativen Smart Energy-Geschäftsmodells. Die Teilnehmenden entwickelten ihre Geschäftsmodelle mithilfe der Geschäftsmodellarchetypen und durch Anreicherung passender Geschäftsmodellmuster weiter. Zum Abschluss stellte jede Gruppe ihr innovatives Smart Energy-Geschäftsmodell vor. Als Leitfaden der Präsentation fungierte die Smart Energy-Geschäftsmodelltaxonomie (siehe Abschnitt 6.2.1).



Abbildung 29: Impressionen aus dem Smart Energy Geschäftsmodell Workshop

Einige der im Workshop entstandenen innovativen Geschäftsmodelle fokussieren sich auf das Angebot von erneuerbaren Energien in Verbindung mit Digitalisierung. Im Rahmen des Workshops wurden u. a. die folgenden zwei Smart Energy-Geschäftsmodelle entwickelt. Ein Smart Energy-Geschäftsmodell ist „AirBnB Mobility“ für das Kundensegment der Prosumer und Verbraucher im Bereich der Elektromobilität. Hierbei ist das zentrale Angebot des Geschäftsmodells „Alle Anbieter mit einer Karte – egal wo: E-Autos abstellen und aufladen!“. Hinter der Idee der

⁴² Als Geschäftsmodellmuster werden wiederkehrende Probleme und deren Lösung in Form von erfolgreich getesteten Kombinationen von Geschäftsmodellelementen bezeichnet (Abdelkafi et al. , 2013).

Teilnehmenden verbirgt sich ein intelligentes Produkt-Service-System. Anreiz war eine neue Kreation von Serviceleistungen für E-Auto Nutzer und -Vermieter. Zudem kann dieses Geschäftsmodell mit anderen Serviceleistungen (bspw. Leasing von E-Ladesäulen) kombiniert werden. Die Ladesäule fungiert hierbei als Smart Energy-Produkt. Das Wertversprechen ist ein Komfortwert für Kund*innen, weil mit einer Karte problemlos alle Ladesäulen in einer Stadt genutzt werden können. Zusätzliche Wertversprechen sind Verlässlichkeit und Transparenz. Für Kund*innen können zudem weitere individuelle Leistungen angeboten werden, die über das „Alle Anbieter mit einer Karte“-Angebot hinausgehen. Ein Beispiel hierfür ist eine *individuelle Flatrate*, ein *bestimmtes Datenvolumen* unter Berücksichtigung des „Pay-as-you-need“-Prinzips oder ein „Ein Preis für alle Anbieter“-Angebot. Der Kundenkontakt läuft über eine App für mobile Endgeräte. Das Geschäftsmodell benötigt entsprechende Partner, die ihre Ladesäulen im Sinne einer Kooperation zur Verfügung stellen sowie genügend Anbieter von E-Autos für den Verkauf, Leasing oder Vermietung. Einnahmen werden durch Entgelte für die Servicebereitstellung erzielt. Weitere Einnahmen können außerdem auf Basis von Werbung auf den jeweiligen Smart Energy-Produkten (d. h. Aufmerksamkeit) erzielt werden.

Ein anderes Workshopergebnis bezieht sich auf den Smart Home-Bereich. Die Idee des Geschäftsmodells wurde unter dem Namen „WayBetter“ vorgestellt. Es repräsentiert ebenfalls ein intelligentes Produkt-Service-System in Kombination mit erneuerbaren Energien aus der Region. Das Wertversprechen an Kund*innen ist nicht nur eine umweltfreundliche Stromerzeugung, sondern auch noch die Möglichkeit der Kosteneinsparung durch Investitionen in grünen Strom aus der Region. Kund*innen investieren in eine Anlage, erhalten aber kein Geld als Rendite, sondern eine Gutschrift für Strom. Wenn mehr verbraucht wird, als gutgeschrieben ist, muss Strom teurer dazugekauft werden. Somit erhalten Kund*innen einen Anreiz zu wirtschaftlichem Stromverbrauch und die Möglichkeit der Kosteneinsparung, wenn sie keinen Strom nachkaufen müssen.



Abbildung 30: VISE Haushalte Stakeholder-Workshop am 08.07.2019 in Düsseldorf

Das Geschäftsmodell spricht besonders Kund*innen an, die in erneuerbare Energien investieren möchten, jedoch kein eigenes Haus besitzen und damit nicht in der Lage sind, z. B. Strom aus einer PV-Anlage auf dem Dach zu beziehen. Der Kundenstatus ist damit beispielsweise „*Anteilseigner einer Windanlage*“. Durch die Verknüpfung mit installierten Smart Energy-Produkten kann

eine Verbrauchsanalyse und Kostenkontrolle erfolgen. Das Geschäftsmodell kann somit auch mit anderen Geschäftsmodellen verknüpft werden. Denkbar sind Kooperationen mit Anbietern von Smart Energy-Produkten zum Leasing oder Verkauf entsprechender Geräte. Ferner werden Partner aus vor- und nachgelagerten Bereichen in Bezug auf die Stromerzeugungsanlagen benötigt (Bau der Anlagen, Wartung, Stromverteiler etc.). Einnahmen werden in Form von Zahlungsströmen erwirtschaftet und ggf. des Anlagen-Restwerts im Falle eines Vertragsausstiegs der Kund*innen.

Zum Abschluss des Workshops wurden in einer Feedback-Runde die Eindrücke, Erfahrungen und Ergebnisse gesammelt. Hinsichtlich der vorgestellten Innovationswerkzeuge äußerten sich die Teilnehmenden sehr positiv, da somit eine Überprüfung der Stimmigkeit der einzelnen Komponenten und Bausteine möglich ist. Insgesamt merkten die Teilnehmenden an, dass sie positiv überrascht waren, wie schnell sie gemeinsam gute, realisierbare und innovative Ideen generieren und diese in ein mögliches Geschäftsmodell überführen konnten. Als besonders hilfreich wurden die Smart Energy-Geschäftsmodelltaxonomie, die Geschäftsmodellmuster sowie die verschiedenen Geschäftsmodellarchetypen empfunden. Alle Teilnehmenden berichteten, dass sie durch den Diskurs und die Zusammenarbeit zu einer essenziellen Erkenntnis kamen: Obwohl sie alle über Fachwissen und Knowhow im Bereich Energie verfügten, gab es in den Arbeitsgruppen unterschiedliche Definitionen von „Strom“. Des Weiteren konnten sie aufgrund der verschiedenen Spezialisierungen unterschiedliche Sichtweisen auf Smart Energy-Produkte und -Services erfahren. Hierbei spielten die übergreifenden Diskussionen in den Gruppen eine zentrale Rolle. Die Teilnehmenden empfanden die vermittelten Werkzeuge als sehr interessant und äußerten, dass sie sich in der Lage fühlten, die erlernten Mittel in den Arbeitsalltag einzubinden. Es wurde beschrieben, dass durch den Workshop zusätzlich ein Zusammenkommen von Digitalisierung und erneuerbaren Energien ermöglicht wurde und sie von der Vielfalt der Blickwinkel und Meinungen der Gruppenmitglieder profitieren konnten. Die Mischung aus Vortrag (Theorieteil) und Aktivität (Arbeitsphase) hat den Teilnehmenden sehr zugesagt. Weiterhin wurde der Wunsch nach einer Fortsetzung geäußert, in der ein zentrales Fallbeispiel gemeinsam bearbeitet wird, um auftretende Probleme kennenzulernen, gemeinsam zu behandeln und Lösungsansätze zu erarbeiten.

6.3 Vorstellung innovativer Smart Energy-Geschäftsmodelle

Im Folgenden werden drei Ideen für Smart Energy-Geschäftsmodelle dargestellt, die als Impulse im Sinne eines „*out-of-the-box-thinking*“-Ansatzes verstanden werden können. Hierbei handelt es sich um eine Auswahl aus insgesamt neun Geschäftsmodellideen, die im Rahmen einer VISE zentrierten Dissertation Paukstadt (2020) entwickelt wurden. Als Basis diente das Wissen, das während der gesamten Projektlaufzeit u. a. in Workshops mit Unternehmen, Literaturrecherchen und Marktanalysen generiert wurde. Einige der Geschäftsmodellideen wurden im Rahmen von Workshops mit Unternehmen auch evaluiert. So wurden den Experten in den Evaluationsworkshops beispielsweise die Geschäftsmodellideen „*Guaranteed-Energy-Saving-Service-Provider*“ und „*Ad-based Energy Visualization Service Provider*“ gemeinsam mit einer entsprechenden Beschreibung und einem ausgefüllten Business Model Canvas präsentiert. Anschließend wurden sie gebeten anzugeben, inwiefern sie die Modelle als konsistent, vollständig, verständlich, nützlich und innovativ erachten. Im Folgenden sollen die drei innovativsten Geschäftsmodellideen kurz vorgestellt werden.

6.3.1 „Guaranteed-Energy-Saving-Service-Provider“

Der „Guaranteed-Energy-Saving-Service-Provider“ (auf Deutsch: „garantierter Energieeinsparungsdienstleister“) erzielt Einnahmen, wenn Kund*innen Energie sparen. Diese werden mit Smart Energy-Produkten ausgestattet und erhalten einen Stromliefervertrag auf Pauschalbasis. Die Kund*innen reagieren auf vom Anbieter gesetzte Anreize zum Energiesparen, um unter der Pauschale zu bleiben. Zusätzlich kann der Anbieter durch Fernsteuerung der Geräte den Verbrauch beeinflussen. Bei der Einordnung des Geschäftsmodells in die Komponenten des Business Model Canvas wird das Konzept des Geschäftsmodells noch deutlicher:

Wichtige *Geschäftspartner* des Anbieters sind die Hersteller von Smart Energy-Produkten, Energieproduzenten und Netzbetreiber. Die *Schlüsselaktivitäten* des Anbieters sind die Versorgung der Verbraucher mit Strom aus regenerativen Quellen, das Sammeln und Auswerten von Daten sowie die Überwachung und Kontrolle der Geräte. Eine andere Haupttätigkeit ist es, Anreize (z. B. durch Bonuspunkte) zu schaffen, um das Verbraucherverhalten zu beeinflussen. Aus den Hauptaktivitäten können notwendige *Ressourcen* für das Geschäftsmodell abgeleitet werden. Der Anbieter benötigt Knowhow bezüglich der Beschaffung und ggf. Erzeugung von Strom bzw. Wärme (sofern er diese nicht nur einkauft). Darüber hinaus sind Wissen und Erfahrung in Datenanalyse und IT wichtig. Zusätzlich wird ein umfangreiches Knowhow bezüglich „Nudging“ benötigt, um das Verbraucherverhalten durch Anreize optimal zu beeinflussen.

Als *Wertversprechen* profitieren Kund*innen von der Garantie, Energie zu sparen und von der Versorgung mit nachhaltiger Energie. Darüber hinaus werden Kund*innen mit Smart Energy-Produkten ausgestattet. Sie erhalten eine individuelle Flatrate, die mithilfe historischer Verbrauchsdaten berechnet wird. Die *Kundenbeziehung* ist auf der Basis von 1-2 Jahresverträgen ausgerichtet. In dieser Zeit stehen Kund*innen, über die Website des Anbieters, entsprechende Applikationen für mobile Endgeräte oder über das Produkt selbst, z. B. einen Sprachassistenten, mit dem Anbieter in Verbindung (*Kundenkanal*). Vor allem Kund*innen, die energiebewusst sind und von dem „Rund-um-Sorglos-Paket“ profitieren wollen, werden von diesem Modell angesprochen (*Kundensegment*).

Beim Anbieter entstehen zunächst *Kosten* für das Versorgen seiner Kunden mit Energie, z. B. Netzgebühren. Darüber hinaus fallen *Kosten* für die Datenanalyse und IT an. Der letzte *Kostenfaktor* ergibt sich durch den Einsatz der notwendigen Ressourcen zur Beeinflussung des Verbraucherverhaltens, damit Kund*innen Energie einsparen und unterhalb der Flatrate bleiben.

Der Anbieter erzielt einen *Gewinn* durch die Arbitrage aus der Flatrate und dem energiesparenden Verbraucherverhalten. Zudem kann er eine Marge für den Verkauf von zusätzlichen Smart Energy-Produkten erzielen.

6.3.2 „Ad-Based-Energy-Visualization-Provider“

Der „Ad-Based-Energy-Visualization-Provider“ (auf Deutsch: „Anbieter von werbebasierten Lösungen zur Visualisierung des Energieverbrauchs“) stellt Smart Energy-Produkte und -Services zur Messung des Energieverbrauchs (z. B. Smart Home-Geräte, Smart Meter-Applikationen, Energiemonitore) kostenlos zur Verfügung.

Der Anbieter profitiert durch Werbeplatzierung anderer Unternehmen in den Applikationen und Monitoren der Smart Energy-Produkte. Wichtige *Geschäftspartner* sind somit andere Unternehmen, die Werbung platzieren. Daher sind die *Schlüsselaktivitäten* bei diesem Geschäftsmodell zum einen der Aufbau eines Netzwerks von Unternehmen, die ihre Werbung platzieren möchten. Zum anderen müssen Formate entwickelt werden, auf welchen die Werbung dargestellt werden kann (z. B. auf Monitoren des Smart Energy-Produktes oder in Applikationen für Smartphones). Dies setzt voraus, dass Produkte entwickelt werden, die den Energieverbrauch überwachen können. Die bedeutendsten *Ressourcen* definieren sich also durch ein gutes Partnernetzwerk, die Zurverfügungstellung von Smart Energy-Produkten und -Services sowie das dazugehörige Knowhow in Datenanalyse und IT.

Als *Wertversprechen* wird Kund*innen eine kostenlose Energievisualisierung bereitgestellt, die eine erhöhte Transparenz über den eigenen Energieverbrauch ermöglicht. Darüber hinaus bekommen Kund*innen individuell abgestimmte Werbung und die Möglichkeit des Hinzubuchens von zusätzlichen Smart Energy-Services angeboten. Die *Beziehung* zu Kund*innen erfolgt über die Applikationen und über die Smart Energy-Produkte selbst. Zusätzlich zu den Applikationen für mobile Endgeräte wird die Website des Anbieters genutzt, um mit den Kund*innen zu kommunizieren (*Kundenkanal*).

Das *Kundensegment* besteht aus Verbraucher*innen, die Energie und Geld sparen möchten. Allerdings müssen die Kund*innen ferner eine hohe Toleranzgrenze beim Thema Datenschutz haben (ähnlich wie bei Facebook, wo der Dienst kostenlos im Gegenzug für die Bereitstellung von Nutzerdaten angeboten wird).

Die *Kostenstruktur* setzt sich aus Herstellkosten des Smart Energy-Produktes sowie aus Kosten für die Softwareentwicklung, Datenanalyse, Marketing und die Akquise im Partnernetzwerk zusammen. Der Anbieter erhält seine *Einnahmen* in erste Linie durch die Zahlung von den Unternehmen, die Werbung schalten. Eine zusätzliche Einnahmequelle kann der Verkauf der (teil-) anonymisierten Energiedaten an Dritte sein, die damit z. B. ihre Smart Energy-Produkte für bestimmte Kundengruppen optimieren.

6.3.3 „Temperature-as-a-Service-Provider“

Der „*Temperature-as-a-Service-Provider*“ (auf Deutsch: „*Anbieter von temperaturbasierten Dienstleistungen*“) verkauft Wärmelieferungsverträge, die nicht auf Kilowattstunde als abstrakte Abrechnungsgröße beruhen, sondern auf den gesammelten und analysierten Daten der Smart Energy-Produkte. Verträge können abhängig von Messgrößen wie der Raumtemperatur, dem Beleuchtungs- und Kühlungsniveau abgerechnet werden. Damit steht der Begriff „*Temperature-as-a-Service-Provider*“ nicht nur für temperaturbasierte Energieabrechnungsmodelle (z. B. im Schlafzimmer 18 Grad Celsius und im Wohnzimmer 20 Grad Celsius), sondern lässt weitergehende durch Smart Energy-Produkte messbare Charakteristiken (z. B. Beleuchtungsniveau, kritische Stromversorgung, Energiemix) als Abrechnungsgröße zu.

Schlüsselpartner sind Hersteller von Smart Energy-Produkten, Netzbetreiber und Smart-Meter-Administrationsdienstleister, weil Daten für die Ermittlung der individuellen Messgrößen benötigt werden. Die *Haupttätigkeiten* bestehen aus der Überwachung und dem Kontrollieren der Smart Energy-Produkte, um mittels der Daten den passenden Vertrag zu definieren. Ferner erstellt der

Anbieter Abrechnungen und kauft Energie und Smart Energy-Produkte ein. Die *Ressourcen* bestehen vor allem aus dem Knowhow im Energiemarkt (kostengünstige und effektive Energiebeschaffung und -lieferung) sowie der Datenanalyse und Softwareentwicklung, um individuelle Abrechnungsmodelle kundenorientiert bereitzustellen.

Als *Wertversprechen* wird Kund*innen die Möglichkeit angeboten, dass ihre Abrechnung auf der Basis einer alternativen Messgröße als der Kilowattstunde erstellt wird. Sie wählen also die Größe selbst aus, die zur Steuerung und Kontrolle der Smart Energy-Produkte genutzt wird. Die Einfachheit und der Komfort zusammen mit der erhöhten Transparenz könnten für Kund*innen attraktiv sein. Zudem wird die Abrechnung viel verständlicher. Die *Beziehung* zu den Kund*innen wird über die Verträge und die Überwachung der Smart Energy-Produkte (z. B. Thermostate) gepflegt. Kanäle sind klassisch die Website des Anbieters, aber auch die Applikationen, über die jederzeit die aktuellen Vertrags-, Verbrauchs- und Kostendaten eingesehen werden können (*Kundenkanal*). Der Anbieter ist so in regelmäßiger Interaktion mit den Kund*innen und kann Vorschläge und Tipps zur Kostensenkung und zum Energiesparen kommunizieren. Bei diesem Geschäftsmodell werden in erster Linie Kund*innen, die von dieser Transparenz, dem Komfort und der Einfachheit profitieren wollen, angesprochen (*Kundensegment*).

Kosten werden durch die Datenanalyse, IT, Netzgebühren und Energiebeschaffung verursacht. Die *Einnahmen* werden primär durch den Verkauf von Energie erzielt. Jedoch kann der Verkauf von passenden Smart Energy-Produkten zusätzliche Umsätze generieren.

6.4 Zusammenfassung

Für die Entwicklung von funktionierenden Geschäftsmodellinnovationen sind die Nutzer- (Nachfrage) sowie die Angebotsseite von essentieller Bedeutung. Mithilfe der durchgeführten Innovationsworkshops (vgl. Abschnitt 6.1) konnten Bedarfe von Nutzer*innen für den Bereich Smart Home ermittelt werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen der nutzerseitigen Smart Home Workshops wurden weitere Innovationsworkshops zur Geschäftsmodellentwicklung von Smart Energy-Produkten durchgeführt (vgl. 6.2). Dazu wurden u. a. Werkzeuge zur Klassifizierung von Smart Energy-Produkten aufgezeigt sowie neue Smart Energy-Geschäftsmodelle exemplarisch entwickelt (vgl. 6.3).

Im Folgenden werden die relevantesten Ergebnisse aus den Smart Home-Innovationsworkshops zusammengefasst (vgl. Abschnitt 6.1), die wichtige Erkenntnisse zu Geschäftsmodellen aus Nutzersicht für den Themenbereich Smart Home liefern.

Insgesamt wurden drei qualitative Innovationsworkshops mit Nutzer*innen von Smart Home-Systemen sowie Vertreter*innen der Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft durchgeführt. Ziel war es, mögliche Ko-Benefits von Smart Home-Systemen zu erarbeiten, Bedarfe für zukünftige Nutzer*innen auf Haushaltsebene zu ermitteln und derzeitige Barrieren in Bezug auf die Nutzung der Systeme zu identifizieren.

Aus allen drei Innovationsworkshops wurde deutlich, dass Nutzer*innen von smarten Technologien – hier mit Fokus auf Smart Home-Systeme – zukünftig ein integriertes Gesamtsystem erwarten, welches neben den Funktionen des Produktes selbst ein entsprechendes Dienstleistungsbündel beinhaltet wie z. B. Installation und Wartung, ggf. als Fernwartung mit 24-Stunden-Service. Dieses Gesamtsystem sollte mit anderen smarten Technologien kombinierbar sein, skalierbar und auf künftige technologische Entwicklung erweiterbar. Ein wesentlicher Bedarf bei der

Nutzung von Smart Home-System ist neben der Sicherheit im Gebäude (Schutz vor Einbrüchen & Maßnahmen zum Brandschutz), die Steigerung der Energieeffizienz. Das System sollte in der Lage sein, eigenständig energieeffizient und damit einhergehend strom- und kostensparend arbeiten zu können. Darüber hinaus wird eine Steigerung der Lebensqualität durch (deutliche) Zeitersparnisse, mehr Komfort und ein verbessertes Raumklima erwartet. Ein ansprechendes Design mit einfachen und nutzerfreundlichen Interfaces (Nutzeroberflächen) soll die Bedienbarkeit für unterschiedliche Zielgruppen – von technikaffin bis technikfern – erleichtern.

Die in den Innovationsworkshops sehr unterschiedlichen entworfenen Personas (siehe Abschnitt 6.1.2) verdeutlichen, dass smarte Produkte und Dienstleistungen auf verschiedenste individuelle Bedürfnisse in unterschiedlichen Haushaltsformen eingehen sollten. Nicht jeder urbane Single-Haushalt hat die gleichen Anforderungen an ein Smart Home-System wie auch Familienhaushalte in der Stadt oder auf dem Land teils sehr unterschiedliche Bedürfnisse aufweisen. 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. Es besteht der Wunsch nach einer Modularität des Systems mit einem Grundmodell das die Basisfunktionen eines Smart Home-Systems enthält, sich aber nach den individuellen Wünschen und Bedürfnissen der Nutzer*innen richtet und ohne großen Aufwand und Kosten erweitert werden kann. Dabei soll dieses System ein lernendes System (Künstliche Intelligenz) sein, das Veränderungen im Alltag der Bewohner*innen erfasst und sich an neue Gewohnheiten anpassen kann. Hinsichtlich des demographischen Wandels und der Zunahme an Ein-Personen-Haushalten können Smart Home-Systeme zukünftig eine wichtige Unterstützung für die Selbstbestimmtheit älterer, alleinlebender (oder kranker) Personen darstellen.

Barrieren werden bei den Nutzer*innen vor allem in Bezug auf Datenschutz und Datenhoheit gesehen sowie eine Sorge geäußert wird, dass durch die automatisierte Steuerung eine Gefahr von Hackerangriffen entsteht, die eine Fremdsteuerung bzw. Manipulation des Systems von außen ermöglichen könnte. Ebenso werden Rebound-Effekte und damit einhergehende zusätzliche Energie- und Ressourcenverbräuche bei Herstellung und Nutzung der Systeme befürchtet. Laut den Nutzer*innen mangelt es derzeit zum einen an der Bedienbarkeit von Smart Home-Systemen, insbesondere für technikferne Nutzer*innen.

Damit Verbraucher*innen ein Motiv haben, smarte Produkte und Dienstleistungen zu nutzen, müssen diese auf eine energieeffiziente und verbrauchergerechte Nutzung ausgelegt werden. Die in den Workshops erfassten unterschiedlichen Ansichten, Meinungen und Bedürfnisse liefern erste Erkenntnisse.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus den Smart Energy-Innovationsworkshops sowie der aufgezeigten Klassifikationswerkzeuge zusammengefasst (vgl. Abschnitt 6.2), diese beleuchten wichtige Erkenntnisse für innovative Geschäftsmodelle aus Anbietersicht für den Themenbereich Smart Energy (vgl. Abschnitt 6.3).

In der praxisorientierten und akademischen Literatur existiert bereits eine Vielzahl von verschiedenen Werkzeugen, welche die Geschäftsmodellinnovationen in unterschiedlichen Phasen (z. B. Ideengenerierung, Implementierung) unterstützen können. Diese Innovationswerkzeuge beziehen sich zum Teil auf bestimmte Arten von Geschäftsmodellen (z. B. datengetriebene Geschäftsmodelle) oder auf bestimmte Technologien (z. B. Plattform-Geschäftsmodelle). Insbesondere die

Ideengenerierung kann in der Form von Workshops zielführend durch Innovationswerkzeuge wie beispielsweise Geschäftsmodellmuster unterstützt werden. Hierdurch können Ideen für Smart Energy-Geschäftsmodelle gemeinsam entwickeln und validiert werden.

Auf Basis der Ergebnisse aus der Marktanalyse sowie der Innovationsworkshops wurden verschiedene innovative Smart Energy-Geschäftsmodellideen entwickelt. Beispielhafte Smart Energy-Geschäftsmodelle nutzen u. a. domäne-fremde Einnahmemodelle wie Flatrates oder Werbefinanzierung, um Wertversprechen wie Nachhaltigkeit und Stromsparen anzubieten. Zusätzlich sind neue Abrechnungsgrößen auf Basis der mit Smart Energy-Produkten gesammelten Daten (bspw. Raumtemperatur) möglich. Diese Smart Energy-Geschäftsmodelle bedingen neue Schlüsselaktivitäten und Schlüsselressourcen sowie ein intensiveres Partnernetzwerk mit Herstellern von Smart Energy-Produkten, Anbietern von Smart Energy-Services und weiteren Marktakteuren.

7 Schlussbemerkung

Die Dekarbonisierung privater Haushalte ist eine zentrale Herausforderung der Energiewende: private Haushalte machen gut ein Viertel des gesamtdeutschen Endenergieverbrauches aus (BMU, 2020). Im Zuge der nun anstehenden Systemintegration erneuerbarer Energien sowie der Kopplung mit anderen Sektoren werden digitale Lösungen und Geschäftsmodelle zunehmend relevant, z. B. um Millionen dezentrale und fluktuierende Erzeugungsanlagen mit einer flexibleren Energienachfrage zu koordinieren (Weigel & Fishedick, 2018). Private Haushalte könnten zu Smart Energy-Haushalten werden und damit eine aktive Rolle in digital organisierten Wertschöpfungsnetzwerken der Zukunft spielen.

Die vorliegenden Ergebnisse, die bereits in übersichtlicher Weise in der Management Summary zusammengefasst sind, verweisen zunächst darauf, wie umfangreich und vielschichtig sich die digitale Transformation von Energiesystem und Energiewirtschaft auf private Haushalte auswirken könnten. Ein tieferes Verständnis sozioökonomisch-technischer Wechselwirkungen wird noch wichtiger in einem System, das von diversen Akteursrollen (Konsument, Prosumer, Flexibilitätsanbieter), von komplexen und fortlaufend ändernden regulatorischen Rahmenbedingungen sowie von zunehmendem Dekarbonisierungsdruck, wie ihn die aktuellen Entscheidungen von EU-Kommission⁴³ und EU-Parlament⁴⁴ zur Verschärfung der Reduktionsziele verdeutlichen, geprägt sein wird. Hinzu könnten durch die Digitalisierung ausgelöste disruptive Entwicklungspfade kommen, wie andere Branchen sie bereits erfahren haben.

Durch integrierte sozioökonomisch-technische Analysen mit stark empirisch geleiteten Erkenntnisinteressen greift der vorliegende Forschungsbericht zentrale marktrelevante Fragestellungen im Kontext von Smart Energy-Geschäftsmodellen für Haushalte auf: Die empirischen Ergebnisse zu Akzeptanz, Einstellungen und Investitionsentscheidungen privater Haushalte gegenüber unterschiedlichen Smart Energy-Technologien und Geschäftsmodellen können von Akteuren der Energiewirtschaft dazu genutzt werden, bedarfsgerechte Geschäftsmodellentwicklung für Smart Energy-Haushalte voranzutreiben (Kapitel 4). Außerdem werden für die Geschäftsmodellentwicklung einerseits partizipative Methoden mit unterschiedlichen Akteursgruppen anwendungsnah dargestellt und Geschäftsmodelle abgeleitet (Abschnitte 6.1 und 6.2), andererseits wird theoretisch-konzeptionelles Werkzeug geliefert, um Konzepte der digitalen Ökonomie besser zu verstehen und digitale Geschäftsmodelle für die Energiewirtschaft zu entwickeln (Kapitel 6). Entscheidend wird für private Haushalte dabei immer auch die Wirtschaftlichkeit von Investitionen in neue Technologien sein (vgl. Kapitel 4 und 5) und wie eine kostenminimale Energiebereitstellung die Strom-, Warmwasserbereitungs- und Raumwärmebedarfe decken kann (Kapitel 5).

Dieser Bericht bietet umfangreiche und diverse empirische Erkenntnisse zu smarten Technologien und Geschäftsmodellen für Haushalte – und erhebt dennoch keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit. Im Gegenteil: Insbesondere bei progressiver regulatorischer Ausgestaltung werden neue Formen der digital organisierten Energiewende sichtbar: Energy-sharing oder P2P-Trading können die Bürgerenergiebewende weiter vorantreiben und smartes Energie- und Netzmanagement dezentral ermöglichen. Der nun gestartete gesetzliche Smart Meter-Rollout in Unternehmen wird weitere Erkenntnisse für die Entwicklung von Smart Energy-Geschäftsmodellen liefern,

⁴³ Klimaschutzplan für 2030 der European Commission (2020).

⁴⁴ EU climate law: MEPs want to increase 2030 emissions reduction target to 60%, siehe European Parliament (2019).

aus denen auch Geschäftsmodelle für Haushalte abgeleitet werden könnten. Netzdienliche Flexibilität dürfte weiter an Bedeutung gewinnen und auch im Haushaltskontext neue Geschäftsmodelle hervorbringen, für die hierzulande aktuell noch zum Teil die gesetzliche oder technische Grundlage fehlt. Der Einfluss der Digitalisierung auf die Energiewirtschaft könnte etablierte Vorstellungen von Zentralität und Dezentralität, von Wertschöpfungsketten hin zu flexiblen Wertschöpfungsnetzwerken und davon, wie das Energiesystem mit anderen Sektoren verzahnt werden kann, komplett neu konfigurieren.

Aufgrund dieser Dynamiken können die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Taxonomie für Smart Energy-Geschäftsmodelle sowie die abgeleiteten Geschäftsmodellarchetypen kontinuierlich weiterentwickelt werden. In zukünftigen Studien können die neu entwickelten Smart Energy-Geschäftsmodelle (vgl. Kapitel 6) hinsichtlich ihrer Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Neue Smart Energy-Produkte und Smart Energy-Services sollten mit Praxispartnern prototypisch umgesetzt und in Reallaboren getestet werden. Zentral wird dabei für die Entwicklung neuer Smart Energy-Geschäftsmodelle sein – bei aller digitalen Zukunftseuphorie – dass die vielfältigen Einstellungen und Bedarfe von Konsument*innen nicht simplifizierend einer dominanten Markt- oder Ingenieursvision untergeordnet werden (siehe dazu Strengers, 2014). Notwendig ist vielmehr, ein empirisch entwickeltes und stets reflexives Verständnis der tatsächlichen Bedarfe von Konsument*innen als Ausgangspunkt für Geschäftsmodellentwicklung zu etablieren. Die in diesem Bericht dargestellten empirischen, sozioökonomisch-technischen Untersuchungen orientieren sich an dieser Forderung.

Acknowledgements

Seit Beginn dieses Forschungsprojektes im Jahr 2017 hat das VISE Haushalte Team bei der Durchführung der Untersuchungen vom Fachwissen und der Zuarbeit diverser Kollegen*innen profitiert. Sie haben zur Qualität dieser Arbeit maßgeblich beigetragen. Wir bedanken uns bei:

EWI

- Professor Dr. Marc Oliver Bettzüge
- Dr. Johannes Wagner
- Frederike Fitz
- Dennis Bakalis
- Pranisaa Charnparttaravanit

TH Köln

- René Etzkorn

Wuppertal Institut

- Jana Schindler

WWU Münster, CERES

- Matthias Feldbrügge
- Jens Unterberg
- Maximilian Winter

WWU Münster, ERCIS

- Katharina Troßbach
- Neele Grund

Anhang

Glossar

- **Abwägende Haushalte**

Abwägende Haushalte unterscheiden sich von den kostenminimierenden Haushaltstypen in ihrem Entscheidungsverhalten. Zusätzlich zu den rein monetären Aspekten betrachten diese Haushalte bei Entscheidungen bezüglich Investitionen auch nicht-monetäre Aspekte wie Umweltschutzpräferenz und Autarkiepräferenz. Diese Faktoren spiegeln sich in den von den Haushaltstypen gewählten Zahlungsbereitschaften für bestimmte Technologien wider.

- **Altbauten**

Altbauten sind Gebäude aus einem meist älteren Baujahr und haben einen vergleichsweise hohen Raumwärmebedarf (siehe Tabelle 18). Dennoch ist es möglich, dass durch Kombinationen von Modernisierung, Baujahr und Gebäudestandard Gebäude unterschiedlichen Alters den gleichen Raumwärmebedarf aufweisen. Daher wird von der Festlegung eines spezifischen Gebäudealters abgesehen.

- **Batterie/Batteriespeicher**

Batterien oder größere Batteriespeicher, die mehrere Batterieblocks enthalten, ermöglichen die Speicherung von elektrischer Energie (Strom). Dieser Strom kann zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden. Die technischen Merkmale der Technologie sind die geringen Energieverluste der Speicherzyklen und die erhöhten Investitionskosten. Technisch wird die Speicherung mittels elektrochemischer Reaktionen bewerkstelligt.

- **Blockheizkraftwerke / KWK**

Das Blockheizkraftwerk, kurz BHKW, ist eine Technologie der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit kombinierter Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie, deren Leistungs- und/oder Baugröße signifikant kleiner ist als die von herkömmlichen Kraft- und Heizkraftwerken. BHKWs befinden sich meist in der Nähe des Energiekonsumenten. Die kombinierte Strom- und Wärmenutzung sorgt für eine höhere Energieausbeute im Vergleich zu einer reinen Stromerzeugung.

- **Brennstoffzelle**

Brennstoffzellen wandeln auf direkte Weise chemische Energie in Wärme und Elektrizität um, indem Wasserstoff und Sauerstoff interagieren. Mit dieser Technologie werden Wirkungsgrade von bis zu 90 % erreicht. Die Sauerstoffzufuhr geschieht durch Luft, während die Wasserstoffzufuhr entweder direkt durch Wasserstoff oder durch die Aufbereitung von wasserstoffhaltigen Energieträgern wie Erdgas erfolgt.

- CO₂-Preis**

Mit der Einführung des CO₂-Preises schafft die Bundesregierung ab 2021 einen Mechanismus um Emissionen im Verkehr- und Wärmesektor zu bepreisen. Demnach müssen Unternehmen, die mit Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel handeln, Verschmutzungsrechte in Form von Zertifikaten kaufen. Die Kosten für die Zertifikate werden von den Endverbrauchern*innen in den Endverbraucherpreisen der jeweiligen Energieträger entrichtet.
- Coefficient of Performance (COP)**

Der COP ist eine technische Größe von Wärmepumpen. Er beschreibt die aktuelle zu diesem Zeitpunkt vorliegende Umwandlungsrate mit welcher Strom in Wärme gewandelt wird. Da eine Wärmepumpe Umweltenergie nutzbar macht, liegt dieser Wert immer über 100%. Der COP ist ähnlich dem Wirkungsgrad von anderen Technologien zu begreifen. Aufgrund seiner Abhängigkeit von äußeren Parametern, wie der Temperatur der Wärmequelle (meist Außenlufttemperatur) unterliegt der COP zeitlichen Schwankungen und wird so mit einem zeitvariablen Profil beschrieben.
- Demand-Side Management (DSM)**

DSM ist die gezielte Beeinflussung der zeitlichen Struktur des Energieverbrauchs, im Regelfall abhängig von der Markt- oder Netzsituation. Unter DSM könnte die Nachfrage möglicherweise an Einflussfaktoren wie z. B. erneuerbare Energieerzeugung oder variable Strompreise angepasst werden. Dadurch könnten mithilfe von DSM Haushalte ihre Energiekosten verringern oder die Netzstabilität des Energiesystems erhöht werden.
- Dezentrale Energieerzeugung**

„Die Erzeugung von Energie – beispielsweise von elektrischer Energie oder Wärme – kann entweder zentral oder dezentral durchgeführt werden. Eine zentrale Stromerzeugung erfolgt in Großkraftwerken, z. B. in großen Kernkraftwerken, Kohlekraftwerken, Gaskraftwerken und Wasserkraftwerken. Dezentrale Energieerzeugung dagegen bedeutet, dass die Erzeuger (z. B. Kraftwerke) eher kleine Anlagen sind, die über größere Gebiete verstreut sind“ (RP-Energie-Lexikon, 2020), wie zum Beispiel: Photovoltaikanlagen, Windenergieanlagen, Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen, etc.
- Echtzeittarife (Real-Time-Pricing, RTP)**

Echtzeittarife gelten als die dynamischste Form zeitvariabler Stromtarife. Bei ihnen wird der Preis der Stromerzeugung zu jedem Zeitpunkt direkt an die Verbraucher weitergegeben, wobei dieser zur Absicherung der Stromabnehmer gegen überdimensionierte Preise zumeist in einem zuvor festgelegten Preiskorridor liegt. Als „Echtzeit“ gilt bereits eine stündliche variierende Bepreisung, wobei je nach Technikstand auch deutlich kürzere Zeitintervalle flexibler Preise möglich sind. Der aktuelle Strompreis wird dem Verbraucher in der Regel über sogenannte „In-Home-Displays“ oder über Smartphone-Apps angezeigt.

- **EEG-Umlage**
Die EEG-Umlage ist ein Kostenbestandteil des Strompreises, der für alle Konsumenten anfällt. Die Umlage verteilt die Mehrkosten aus der Vergütung erneuerbarer Energiequellen auf den/die Stromkonsumenten*innen. Für manche Konsumenten*innen, wie zum Beispiel aus der stromintensiven Industrie, entfällt oder verringert sich die EEG-Umlage (BMJV, 2017).
- **Eigenverbrauch und Eigenverbrauchsquote/Selbstverbrauchsquote**
Der Eigenverbrauch entspricht der Eigenversorgung. Die Eigenverbrauchsquote ist der Anteil des Eigenverbrauches am selbst erzeugten Strom.
- **Eigenversorgung und Eigenversorgungsquote/ Selbstversorgungsquote/ Autarkiegrad**
Die Eigenversorgung ist „der Verbrauch von Strom, den eine natürliche oder juristische Person im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit der Stromerzeugungsanlage selbst verbraucht, wenn der Strom nicht durch ein Netz durchgeleitet wird und diese Person die Stromerzeugungsanlage selbst betreibt“ (BMJV, 2021). Die Eigenversorgungsquote bezeichnet den Anteil des Energieverbrauches am gesamten Energieverbrauch, den ein Prosumer durch die Eigenversorgung decken kann.
- **Eigenverbrauchsprämie**
Als Eigenverbrauch wird der dezentral erzeugte Strom bezeichnet, der selbst verbraucht wird und nicht ins regionale Netz eingespeist wird. Für manche Technologien, wie Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Anlagen besteht eine Vergütung für den Eigenverbrauch. Hierbei wird jede erzeugte Kilowattstunde durch eine Prämie vergütet, solange der Strom in der eigenen Liegenschaft konsumiert wird (BMJV, 2016; Bundesgesetzblatt, 2020).
- **Einspeisemanagement**
Mit dem Einspeisemanagement bezeichnet man Maßnahmen des Netzbetreibers, um die Stromnetzstabilität aufrecht zu erhalten. Im Zuge dieser Maßnahmen greift der Netzbetreiber in den Betrieb erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen, KWK- und Grubengasanlagen ein und reduziert dabei deren Stromproduktion. (Next Kraftwerke GmbH, 2020b)
- **Einspeisevergütung**
Die Einspeisevergütung ist die Entlohnung, welche ein Anlagenbetreiber für das Einspeisen elektrischer Energie in das Stromnetz erhält. Der regionale Netzbetreiber ist hierbei der Abnehmer des erzeugten Stroms. Die Höhe der Einspeisevergütung richtet sich unter anderem nach der Erzeugungstechnologie, der installierten Leistung und dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlage.

- **Energiemanagementsysteme für Haushalte**

Das Energiemanagement-System für Haushalte wird auch als Home Energy Management Systeme (HEMS) bezeichnet. HEMS sind Gateways bzw. Zwischengeräte, die versuchen, den Energieverbrauch der Bewohner zu beeinflussen, z. B. über Energieverbrauchsfeedback oder über Monitoring- und Steuerungsfähigkeiten, die eine Kontrolle über den Energieverbrauch ermöglichen. Ein HEMS kann nicht nur Energieeinsparungen im eigenen Haus unterstützen, sondern auch die Verlagerung der Spitzlast im Netz (van Dam et al., 2010). Falls eine Photovoltaikanlage und eventuell ein Speicher zur Verfügung stehen, können HEMSs die Energieflüsse im Haus optimieren und die Autarkie (Eigenverbrauchsquote) erhöhen (Byun et al., 2011; Piti et al., 2017).

- **Energiemonitor**

Neben abrechnungsrelevanten Zählern gibt es eine Vielzahl an Einzellösungen zum Energiemonitoring in Haushalten. Diese haben die grundlegende Funktion Energieverbräuche aus dem Haushalt zu visualisieren. Anwendungsmöglichkeiten sind beispielsweise alte ineffiziente Geräte zu identifizieren oder den Eigenverbrauch durch Erzeugungsanlagen zu optimieren. Zur Erfassung der Verbrauchsdaten kann unterschieden werden zwischen einer direkten und indirekten Messung. Bei der direkten Messung werden beispielsweise Stromverbräuche direkt in der Unterverteilung mit z. B. Stromklappwandlern gemessen. Eine andere weitverbreitete Variante ist die optische Auslesung von vorhandenen Zählern (z. B. Strom-, Wasser- oder Gaszähler). Dadurch werden analoge Messdaten digitalisiert und können den Endnutzern für eine Visualisierung oder andere Anwendungen zur Verfügung gestellt werden.

- **Gasbrennwertkessel**

Ein Gasbrennwertkessel ist eine moderne Form der gasbefeuchten Heizkessel. Gas wird über den Brenner im Brennraum verbrannt. Die entstandene Wärme wird an das Warmwasser-Heizungssystem und so an den Heizkreislauf des Gebäudes übergeben. Die Kesselart hat die historisch viel genutzten Heizwertkessel mittlerweile abgelöst. Essentieller Unterschied zwischen dem Gasbrennwertkessel und dem Gasheizwertkessel ist, dass das Brennwertsystem das Rauchgas auskondensiert und so dem Rauchgas weiter Wärme entzieht als es im Heizwertsystem möglich ist. So entsteht eine höhere Effizienz der Anlage.

- **Haushaltskomponenten**

Typische Haushaltskomponenten (Energieerzeuger und -verbraucher) lassen sich durch das Kriterium der Steuerbarkeit in steuerbare, teil- und nicht-steuerbare Komponenten unterteilen:

- **Nicht-Steuerbare Verbraucher** oder auch Individuell gesteuerte Verbraucher genannt, beinhaltet beispielsweise Beleuchtung oder Geräte zum Kochen, die an individuelle Bedürfnisse von Nutzern gekoppelt sind. An dieser Stelle kann lediglich das Energienachfrageverhalten durch Aufklärung zur effizienteren Nutzung sowie dem Einsatz von neuen effizienten Geräten helfen.
- **Steuerbare Verbraucher** wiederum lassen sich in dauerhaft aktive Geräte (beispielsweise Kühlschrank) und zeitabhängige Geräte (Teilsteuerbare-Verbraucher) unterteilen. Wobei zeitabhängige Geräte in der Regel programmgesteuert sind, d. h. wenn ein Vorgang gestartet ist, muss dieser bis zum Ende durchlaufen, wie beispielsweise Waschmaschinen oder Spülmaschinen.

Für das Energiemanagement sind vor allem die zeitabhängigen Geräte von Interesse, da diese stets einen zeitlichen Spielraum mitbringen (auch Freiheitsgrad genannt). Abbildung 31 zeigt die Kategorisierung der Haushaltsgeräte bezüglich dauerhafter und zeitabhängiger Dienste sowie vorhersagbarer und nicht vorhersagbarer Komponenten, die den Nicht-Steuerbaren-Verbrauchern entsprechen (Allerding, 2014).

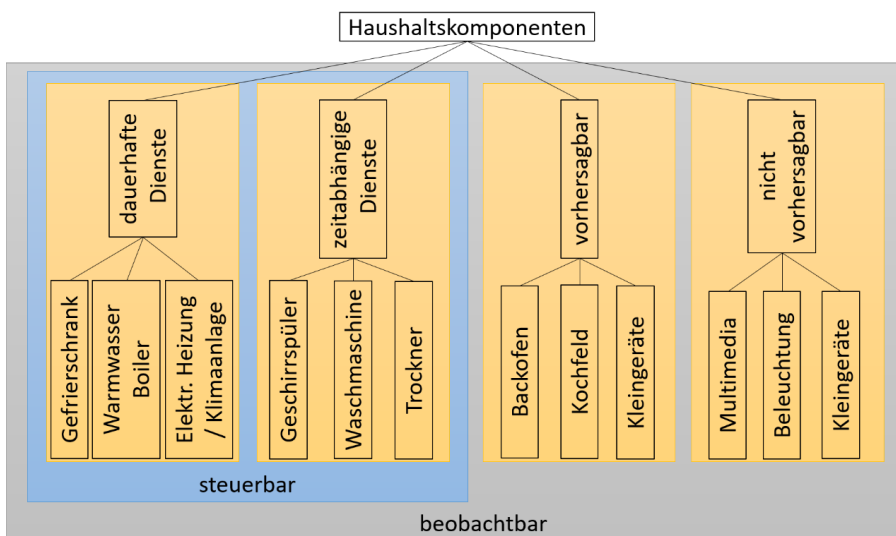


Abbildung 31: Kategorisierung von Haushaltsgeräten (Allerding, 2014)

Zusammenfassend sind besonders große steuerbare Verbraucher für ein EMS interessant, da sich damit die größten Einsparungen oder wirtschaftlichen Erlöse erzielen lassen. Dies sind flexibel ein- und ausschaltbare Verbraucher wie beispielsweise Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen. Wichtig dabei sind vorher definierte Grenzwerte, die nicht unterschritten werden dürfen. Beispielsweise durch Vorgabe von Mindestfüllstand (Ladezustand Elektrofahrzeug) oder Temperaturen (Heizung). (Stille, 2018)

- **Heizstab**
Ein Heizstab ist ein elektrischer Widerstand, der direkt in den Warmwasserspeicher integriert werden kann. Dieser ermöglicht die Umwandlung von elektrischer Energie (Strom) in thermische Energie (Wärme). Das Prinzip ist hierbei mit einem Wasserkocher vergleichbar.
- **Investitionszuschuss**
Investitionszuschüsse sind Zuwendungen zur Anschaffung z. B. einer Energieversorgungstechnologie. Durch Zuschüsse sinken die Kapitalkosten, welche die Haushalte für die Anschaffung aufwenden müssen. Dieses Instrument kann somit genutzt werden, um gezielte Anreize für spezielle Technologien zu setzen. Beispielsweise könnten öffentliche Institutionen effiziente oder umweltfreundliche Technologien für den Haushalt attraktiver machen, indem sie diese bezuschussen.
- **Jahresarbeitszahl**
Die Jahresarbeitszahl beschreibt welche Effizienz eine Wärmepumpe gemessen über ein ganzes Jahr erreicht hat. Sie vergleicht die Summe der im ganzen Jahr bereitgestellten Wärme mit der Summe des im ganzen Jahr genutzten Stroms. Anders als der Coefficient of Performance ist die Jahresarbeitszahl eine einzige Zahl, die sich grundsätzlich erst nach dem abgeschlossenen Betrachtungsjahr bestimmen lässt. Sie ist von dem in diesem Jahr vorgekommenen Wetterphänomenen und den spezifischen Verbrauchsverhalten des Nutzers abhängig.
- **Kostenminimierende Haushalte**
Kostenminimierende Haushalte entscheiden bei ihren Investitions- und Betriebsentscheidungen für Energieversorgungsanlagen lediglich anhand von monetären Kriterien. Die Entscheidung wird grundsätzlich mit der kostenminimalen Variante der Versorgung über einen bestimmten Zeithorizont (unter Berücksichtigung der Entwicklung des Markt- und Förderrahmens) übereinstimmen. Dabei werden Gewinne, die durch die Veräußerung von Energiemengen entstehen, zur Deckung der Gesamtkosten angerechnet.
- **Lastprofile**
Das Lastprofil eines Verbrauchers (z. B. Stromlastprofil) zeigt den zeitlichen Verlauf einer bezogenen Leistung (z. B. Stromverbrauch) über einen bestimmten Zeitraum (z. B. ein Jahr) zu einer bestimmten zeitlichen Auflösung (z. B. stündlich) an.

- **Living Lab**

„Ein Living Lab ist ein Modell für einen kombinierten technologie-sozioökonomischen Ansatz, um eine Interaktion zwischen Produktions- und Konsumnetzen zu entwickeln“ (Baedeker et al., 2017).

In einem Living Lab beteiligen sich die für einen Kontext notwendigen Akteure (Produktion, Konsum, Kommunen), um durch das Testen von Produktansätzen und Technologien in Live-Szenarien Akzeptanz zu schaffen und Deutungssysteme zu verändern (Baedeker et al., 2017). Living Labs können allgemein hinsichtlich der Zeit, dem Raum und den involvierten Akteuren charakterisiert werden (vgl. Abbildung 32).

Typisierung Living Lab		
ZEIT	RAUM	AKTEURE
<ul style="list-style-type: none"> • projektbasiert z.B. gebunden an Forschungsprojekt • institutionalisiert z.B. gebunden an eigenständige Institution 	Realwelt-Repräsentation: <ul style="list-style-type: none"> • Simulation (virtuell/physisch) • Realwelt (Experiment/ Umsetzung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Privatwirtschaft • öffentliche Bildung und Forschung

Abbildung 32: Typisierung von Living Labs nach den Kriterien Zeit, Raum und Akteuren (Baedeker et al., 2017)

Bezogen auf das Forschungsprojekt VISE-H wird das Living Lab-Konzept sowohl als physische Simulation (z. B. Demonstrationwand Smart Smart Home und dem Energiesystem Haushalt) umgesetzt. Der im Forschungsprojekt durchgeführte Anwendungstest kann daher als Umsetzung des Living Labs nach unterschiedlichem Grad der Realweltrepräsentation verstanden werden.

- **Marktprämie**

Laut dem Erneuerbaren Energie Gesetz (EEG) ist die Marktprämie eine Förderung erneuerbarer Energietechnologien, welche durch die EEG-Umlage finanziert wird. Die Höhe der Marktprämie wird durch die Bundesnetzagentur für die jeweilige Erzeugungstechnologie in einem Gebotsverfahren ermittelt. Anhand der installierten Leistung und einem Gebotswert lässt sich zunächst der anzulegende Wert errechnen. Die Höhe der Marktprämie ist wiederum die Differenz des anzulegenden Wertes und des monatlichen Durchschnittswertes der jeweiligen Erzeugungstechnologie. Die Marktprämie kann alternativ zur festen Einspeisevergütung gewählt werden oder gilt generell für Anlagebetreiber, falls sie ihren Strom direkt vermarkten müssen (BMJV, 2017). Weitere Informationen zur Marktprämie finden Sie in der Quelle von Next Kraftwerke GmbH (2020a).

- **Moderne Messeinrichtung**

Eine moderne Messeinrichtung grenzt sich von herkömmlichen Messeinrichtungen dadurch ab, dass sie durch eine detaillierte Verbrauchsdarstellung den tatsächlichen Energiekonsum und die tatsächliche Verbrauchszeit wiedergibt. Darüber hinaus kann eine moderne Messeinrichtung durch ein Smart-Meter-Gateway in ein Kommunikationsnetz integriert werden (Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch die Bundesministerin der Justiz und für Verbraucherschutz, 2016).
- **Netzentgelte**

Netzentgelte sind von jedem Nutzer eines Strom- oder Gasnetzes an den Netzbetreiber zu entrichten. Haushaltskunden zahlen Netzentgelte indirekt über ihre Stromkosten. Dabei leitet der Stromversorger die gezahlten Netzentgelte an den Netzbetreiber weiter. Industrie- und Gewerbekunden zahlen ihre Netzentgelte direkt an den Netzbetreiber. Das Netzentgelt unterteilt sich in einen Leistungs- und Arbeitspreis. Die gesetzliche Grundlage hierfür bildet die Strom- bzw. Gasnetzentgeltverordnung (StromNEV / GasNEV).
- **Neubauten**

Neubauten sind Gebäude aus einem meist neueren Baujahr und haben im Vergleich zu den Altbauten einen niedrigeren Raumwärmebedarf (siehe Tabelle 18). Dennoch ist es möglich, dass durch Kombinationen von Modernisierung, Baujahr und Gebäudestandard Gebäude unterschiedlichen Alters den gleichen Raumwärmebedarf aufweisen. Daher wird von der Festlegung eines spezifischen Gebäudealters abgesehen.
- **Niedrigenergiehäuser**

Niedrigenergiehäuser zeichnen sich durch den geringen Bedarf der Wärmeerzeugung aus. Durch eine effektive Wärmedämmung und die Nutzung von Abwärme elektrischer Geräte, Körperwärme oder Sonnenwärme wird der Energieverbrauch des Gebäudes reduziert.
- **Pelletheizung**

Pelletöfen und Pellet-Zentralheizungen sind die geläufigsten Formen der Pelletheizungen in Deutschland. Pelletheizungen verwenden als Brennstoff meist Holzpellets um einzelne Räume oder das ganze Gebäude und Brauchwasser zu erwärmen. Holzpellets werden vorwiegend aus Säge- und Hobelspänen produziert. Durch das Pressen dieser losen Bestandteile entsteht ein trockener, rieselfähiger Brennstoff mit einem Heizwert von ca. 5 kWh/kg (FNR, 2013).
- **Photovoltaik-Anlage**

Als Photovoltaik (PV) wird das Verfahren bezeichnet, welches Strahlungsenergie durch Solarzellen in elektrische Energie umwandelt. Üblicherweise sind Photovoltaik-Anlagen auf Dächern oder freien Flächen installiert.

- **Präferenz**

In dieser Studie werden Präferenzen als Neigungen verstanden. Diese Neigungen beinhalten nicht-monetäre Aspekte, welche eine Rolle bei der Wahl verschiedener Technologien im Haushaltsbereich spielen können.

- **Prosumer**

„Prosumer sind also Menschen, die ein bestimmtes Gut sowohl produzieren als auch konsumieren können“ (BMW, 2016). In diesem Bericht bezeichnet dieser Begriff einen Haushalt, der nicht nur Strom konsumiert, sondern gleichzeitig mittels eines dezentralen Stromerzeugers auch produziert.

- **Smart Energy-Geschäftsmodell**

Smart Energy-Geschäftsmodelle sind IoT-basierte Geschäftsmodelle in der Energieindustrie, die auf Smart Energy-Produkten (bspw. intelligente Stromzähler) basieren und datenbasierte digitale Technologien nutzen, um Werte zu schaffen und (meist in Form von Zahlungsströmen) zurückzuführen. Dies geschieht indem Kunden verbesserte oder neue (energie-bezogene) Wertversprechen angeboten werden.

- **Smart Home**

Ein Smart Home ist ein privat genutztes Heim, in dem die zahlreichen Geräte der Hausautomation (z. B. Heizung, Beleuchtung, Belüftung), Haushaltstechnik (z. B. Kühlschrank, Waschmaschine), Konsumelektronik (z. B. Unterhaltungselektronik, PC- und IKT-Technik) und Kommunikationseinrichtungen zu smarten Objekten werden, die sich an den Bedürfnissen der Bewohner anpassen (Strese et al., 2010). Häufig verwendete Synonyme sind etwa Connected Home, Intelligentes Wohnen, Smart House, Smart Environment, Smart Living und Aware Home. Das Konzept des Smart Home ist nicht gleichzusetzen mit Smart Building, da hierunter oftmals mehrere, räumlich voneinander getrennte Gebäude verstanden werden, die unter betriebswirtschaftlichen Aspekten verwaltet werden (Strese et al., 2010). Häufig wird ein Smart Home zur Hausautomatisierung eingesetzt, um Komfort und Bequemlichkeit zu steigern. Es kann jedoch auch anderen Zwecken wie der Energieeinsparung, Sicherheit oder als altersgerechtes Assistenzsystem dienen (Alam et al., 2012; Fabi et al., 2017; Ford et al., 2017). Eine der wichtigsten und grundlegendsten Eigenschaften eines Smart Home ist eine Art Gerätesteuerung (Alam et al., 2012), die von der einfachen Fernsteuerung über die Konfiguration und Verwendung von Automatisierungsregeln (häufig Wenn-Dann Regeln, (Ur et al., 2014), vordefinierten Regeln bis hin zu intelligenten, autonom arbeitenden Systemen reichen kann (Ford et al., 2017). Da die Funktionalitäten und die technologische Reife von Smart Home-Systemen stark variieren können, tun dies auch die damit verbundenen Produkte und Dienstleistungen.

- **Smart Meter (Intelligentes Messsystem)**

Ein Smart Meter oder intelligentes Messsystem ist eine moderne Messeinrichtung, welches über ein Smart-Meter-Gateway in ein Kommunikationsnetz integriert ist. Für diese Technologiekategorie gelten Bestimmungen zur Datensicherheit, zum Datenschutz und zur Interoperabilität nach §§ 21 und 22 (MsbG) (Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch die Bundesministerin der Justiz und für Verbraucherschutz, 2016), S.5.

- **Smart-Meter-Gateway**

Das Smart Meter Gateway ist ein Bestandteil des Smart Meters, welcher die Kommunikation zwischen dem Letztverbraucher, dem Netzbetreiber, dem Energieversorger und anderen Marktteilnehmern gewährleistet. Sämtliche Kommunikationsverbindungen zwischen den Akteuren werden durch das Smart-Meter-Gateway verschlüsselt (Stille, 2018).

- **Smarte Technologien / Produkte**

Der Einfluss der Digitalisierung auf die Energiewirtschaft spiegelt sich in neuen „smarten“ Technologien und Produkten wider. Durch klassische Hardware Technologien in Kombination mit modernen IKT-Komponenten bildet sich ein Smartes Energie-Produkt-Service-System, siehe Abbildung 2 in Abschnitt 2.1. Dabei bildet die Basis eine klassische Energie-Technologie (z. B. Erzeuger, Speicher oder Verbraucher), welche um IKT-Komponenten erweitert wird. Durch die Erweiterung der Konnektivität sind Fähigkeiten der Sensorik, der Datenspeicherung, der Auswertung von Daten sowie der Umsetzung von z. B. Optimierungen durch eine Steuerungs-Aktorik möglich. Die IKT-Komponenten ermöglichen eine Interaktion mit vielen externen Services oder Mehrwertdiensten, wie z. B. für die aktuelle Ermittlung von Marktinformationen/-situationen bzw. Netzinformationen/-situationen. Das gesamte Zusammenspiel von physischen Energieprodukten mit einer zusätzlichen Konnektivität durch IKT-Komponenten ermöglicht den Aufbau eines Smarten Energie-Produkt-Service-Systems.

- **Spitzenlasttarife (Critical Peak Pricing, CPP)**

Bei sogenannten Spitzenlasttarifen wird ausschließlich zu den Tagen und Tageszeitpunkten ein erhöhter Strompreis berechnet, an welchen die Stromnachfrage im Vergleich zum Angebot außerordentlich hoch ist. Dieser Preis liegt dann in der Regel deutlich über dem Festpreis an üblichen Tagen. Verbraucher werden über das Auftreten dieser kritischen Lastspitzen und dem damit einhergehenden erhöhten Preis üblicherweise ein paar Tage im Voraus informiert.

- **Tageszeittarife (Time-of-Use Pricing, TOU)**

In Tageszeittarifen wird der Preis pro verbrauchter kWh Strom zeitlich gestaffelt. In der Regel ist der Verbrauch in Zeiten vergleichsweise hoher Nachfrage relativ zum Stromangebot teurer als in Zeiten niedrigen Verbrauchs. Sogenannte Nachtstromtarife, bei denen der Verbrauch nachts günstiger ist als am Tag, sind ein klassisches Beispiel für Tageszeittarife. In modernen Tageszeittarifen können die morgendlichen (z. B. 7:00-9:00 Uhr) und abendlichen Verbrauchsspitzen (18:00-22:00 Uhr) höher bepreist werden als der Verbrauch zu den restlichen Tageszeitpunkten.

- **Wärmepumpe**

Wärmepumpen sind elektrische Heizer. Mit Hilfe von elektrischer Energie wird Umgebungswärme (in der Regel die über die Temperatur in der Außenluft oder der Erde gespeichert Energie) auf ein Temperaturniveau gebracht, welches die Nutzung für Raumheizungszwecke und Warmwassererwärmung ermöglicht. Aufgrund der Nutzung von einer externen Energiequelle nutzt dieser Heizer Umwandlungsgrade von elektrischer in thermische Energie von weit über 100%. Es wird also mehr Wärme bereitgestellt, als Strom verbraucht wurde. Der Umwandlungsgrad ist abhängig von der notwendigen Temperatur mit der Wärme bereitgestellt werden soll und der Temperatur der Umgebungsquelle. Somit ist dieser zeitlich variabel und wird Coefficient of Performance genannt.

- **Wärmespeicher**

Ein Wärmespeicher ist ein Speicher für thermische Energie. In der Regel wird ein gut isolierter Tank mit Wasser erwärmt, sodass das warme Wasser, bzw. die in diesem Tank gespeicherte Energie zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden kann. Da es keine perfekte Isolierung gibt ist jeder Speichervorgang mit Verlusten behaftet. Wie hoch diese Verluste sind hängt unter anderem von der Speicherdauer und der Speichertemperatur ab.

- **Wirkungsgrad**

Der Wirkungsgrad einer Anlage in Kennzahl des Umwandlungsprozesses der Anlage und beschreibt wie viel Energie in gewünschter Form (z. B. Wärme) bereitgestellt werden kann, wenn eine bestimmte Menge Energie in der Ursprungsform (z. B. Gas) dem System zugeführt wird. Ein hoher Wirkungsgrad bedeutet also, dass die Anlage hocheffizient arbeitet und viel Energie aus dem Input nutzbar macht, ein niedriger Wirkungsgrad spricht für eine wenig effiziente Anlage und es wird folglich wenig Energie bereitgestellt. Angegeben wird der Wirkungsgrad in Prozent. Es wird also ein bestimmter Prozentsatz der zugeführten Energie als gewünschtes Produkt bereitgestellt. Grundsätzlich gilt, dass der Wirkungsgrad jeder Anlage aufgrund von physikalischen Gesetzen kleiner als 100% sein muss.⁴⁵

- **Zeitabhängige Strompreise**

Mit zeitabhängigen Stromtarifen variiert der Preis für Strom je nach Zeitpunkt des Verbrauchs. Im Gegensatz zu den üblichen, zeitunabhängigen Tarifen, bei welchen Verbraucher einen festen Arbeitspreis pro kWh Strom zahlen, können mit zeitabhängigen Strompreisen den ebenfalls zeitabhängigen Kosten in der Stromerzeugung Rechnung getragen werden. Diese Kosten der Erzeugung richten sich vor allem danach, wie groß der Anteil an den kostengünstigeren (aber eben nicht beliebig einsetzbaren) Erneuerbaren Energien im Vergleich zu fossilen Energieträgern zur Stromerzeugung ist. Die drei geläufigsten Varianten von zeitabhängigen Strompreisen sind: Tageszeittarife (Time-of-Use Pricing, TOU), Spitzenlasttarife (Critical Peak Pricing, CPP) und Echtzeittarife (Real-Time Pricing, RTP).

⁴⁵ Nicht zu verwechseln mit dem COP von Wärmepumpen (siehe Definition „Coefficient of Performance“ im Glossar Seite 122).

Ergänzende Daten für die Abschnitte 5.3 und 5.4

Die folgende Tabelle 18 beschreibt den Energieverbrauch der Haushaltstypen, die in Abschnitt 5.3 betrachtet werden.

Tabelle 18: Technische Daten der Haushaltstypen für COMODO-Analyse, eigene Annahmen u. a. basierend auf BGW (2006), KfW (2020a) und Pflugradt (2020)

Haushaltstyp	Jährliche Stromnachfrage [kWh/a]	Spezifischer Wärmeverbrauch [kWh/qm]	Jährliche Wärmenachfrage [kWh/a]
HH1a_A_t1	3.263	147	18.051
HH1a_A_t2	3.248	143	17.479
HH1a_A_t3	5.489	147	18.051
HH1a_A_t4	5.867	143	17.479
HH1b_A_t1	3.723	147	18.051
HH1b_A_t2	3.749	143	17.479
HH1b_A_t3	5.675	147	18.051
HH1b_A_t4	4.375	143	17.479
HH2a_A_t1	2.598	147	14.158
HH2a_A_t2	2.601	143	13.709
HH2a_A_t3	4.280	147	14.158
HH2a_A_t4	4.029	143	13.709
HH2b_A_t1	2.469	147	14.158
HH2b_A_t2	2.482	143	13.709
HH2b_A_t3	3.414	147	14.158
HH2b_A_t4	4.262	143	13.709
HH1a_N_t1	3.263	70	8.849
HH1a_N_t2	3.248	70	8.568
HH1b_N_t1	3.723	70	8.849
HH1b_N_t2	3.749	70	8.568
HH2a_N_t1	2.598	70	6.940
HH2a_N_t2	2.601	70	6.720
HH2b_N_t1	2.469	70	6.940
HH2b_N_t2	2.482	70	6.720
HH1a_P_t1	3.263	25	3.160

HH1a_P_t2	3.248	25	3.060
HH1b_P_t1	3.723	25	3.160
HH1b_P_t2	3.749	25	3.060
HH2a_P_t1	2.598	25	2.479
HH2a_P_t2	2.601	25	2.400
HH2b_P_t1	2.469	25	2.479
HH2b_P_t2	2.482	25	2.400

Tabelle 19 stellt die Annahmen zu den Investitionskosten für die dezentralen Strom- und Wärmetechnologien der COMODO Analysen dar. Weitere techno-ökonomische Parameter sind in Tabelle 20 zu finden.

Tabelle 19: Spezifische Investitionskosten für die dezentrale Wärme- und Stromerzeugungstechnologien inklusive Installationskosten [Euro/kW], eigene Annahmen basierend auf Industriedaten sowie u. a. (BDEW, 2016, 2017) und (BMU, 2016)

	2025	2030	2035	2040
PV	2.530	2.236	1.942	1.647
Gasbrennwertkessel	670	664	657	650
Mikro-KWK	3.148	3.000	2.852	2.704
Luft-Wasser-Wärmepumpe	3.581	3.457	3.372	3.287
Heizstab	20	20	20	20
Solarthermie (Euro/qm)	737	709	684	658
Thermischer Speicher	18	18	18	18
Batteriespeicher	2.072	1.079	1.079	996

Tabelle 20: Weitere techno-ökonomische Parameter der dezentralen Strom- und Wärmetechnologien, eigene Annahmen basierend auf Industriedaten sowie u. a. (BDEW, 2016, 2017) und (BMU, 2016)

	O&M Kosten [Euro/kW/a]	Wirkungsgrad [%]	Technische Lebensdauer [a]	Ökonomische Lebensdauer [a]
PV	116	100	30	15
Gasbrennwertkessel	42	98	20	15
Mikro-KWK	38	24,4 (el) 67,6 (th)	15	15
Luft-Wasser-Wärmepumpe	79	430 (JAZ* = 4,3)	30	15
Heizstab	0	100	30	15
Solarthermie [Euro/qm/a]	13	100	20	15
Thermischer Speicher	0	99	40	15
Batteriespeicher	63	92	15	10

*Jahresarbeitszahl

Tabelle 21 und Tabelle 22 zeigen die Annahmen zu den finanziellen Förderungen für die relevanten Technologien für das COMODO-Modell.

Tabelle 21: Investitionszuschüsse der ausgewählten dezentralen Wärmetechnologien [Euro/kW] (BAFA, 2018; BMJV, 2016)

	2025	2030	2035	2040
Mikro-KWK*	465	443	421	400
Luft-Wasser-Wärmepumpe	951	918	896	873

* Die Änderung des KWKGs zu 2020 fanden nach dem Analysezeitraum statt und wurden dementsprechend nicht berücksichtigt, siehe Bundesgesetzblatt (2020).

Tabelle 22: Weitere Förderungen für ausgewählten dezentralen Strom- und Wärmetechnologien [Euro-Cent/kWh] (BMJV, 2016; BNetzA, 2020)

	Marktprämie	Einspeisevergütung	Eigenverbrauchsprämie
Mikro-KWK	-	8*	4
PV	6	-	-

* Die Änderung des KWKGs zu 2020 fanden nach dem Analysezeitraum statt und wurden dementsprechend nicht berücksichtigt, siehe Bundesgesetzblatt (2020).

Literaturverzeichnis

- Aarish, C., Perussi, M., Rietz, A. & Korn, D. (2015). *Evaluation of the 2013-2014 Programmable and Smart Thermostat Program*. http://www.cadmusgroup.com/wp-content/uploads/2015/06/Cadmus_Vectren_Nest_Report_Jan2015.pdf
- Abdelkafi, N., Makhotin, S. & Posselt, T. (2013). Business Model Innovations for Electric Mobility - What can be learned from existing Business Model patterns? *International Journal of Innovation Management*, 17(01), 1340003. <https://doi.org/10.1142/S1363919613400033>
- Agentur für Erneuerbare Energien (Hg.). (2021). *Neue Studie zeigt: Bürgerenergie bleibt zentrale Säule der Energiewende*. <https://www.unendlich-viel-energie.de/studie-buergerenergie-bleibt-zentrale-saeule-der-energiewende>
- Ahn, M., Kang, J. & Hustvedt, G. (2016). *A model of sustainable household technology acceptance* (Nr. 1). <https://doi.org/10.1111/ijcs.12217>
- Alam, M. R., Reaz, M. B. I. & Ali, M. A. M. (2012). A Review of Smart Homes—Past, Present, and Future. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(6), 1190–1203. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2012.2189204>
- Allcott, H. & Rogers, T. (2014). The Short-Run and Long-Run Effects of Behavioral Interventions: Experimental Evidence from Energy Conservation. *American Economic Review*, 104(10), 3003–3037. <https://doi.org/10.1257/aer.104.10.3003>
- Allerding, F. (2014). *Organic Smart Home: Energiemanagement für Intelligente Gebäude*. KIT Scientific Publishing.
- Andor, M. A. & Fels, K. M. (2018). Behavioral Economics and Energy Conservation – A Systematic Review of Non-price Interventions and Their Causal Effects. *Ecological Economics*, 148, 178–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.018>
- Aniello, G., Shamon, H. & Kuckshinrichs, W. (2021). Micro-economic assessment of residential PV and battery systems: The underrated role of financial and fiscal aspects. *Applied Energy*, 281, 115667. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115667>
- Ayres, I., Raseman, S. & Shih, A. (2013). Evidence from Two Large Field Experiments that Peer Comparison Feedback Can Reduce Residential Energy Usage. *The Journal of Law, Economics, and Organization*, 29(5), 992–1022. <https://doi.org/10.1093/jleo/ews020>
- Baedeker, C., Liedtke, C. & Welfens, M. J. (2017). Green Economy as a Framework for Product-Service Systems Development: The Role of Sustainable Living Labs. In D. V. Keyson, O. Guerra-Santin & D. Lockton (Hg.), *Living Labs: Design and Assessment of Sustainable Living* (S. 35–52). Springer International Publishing; Imprint: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33527-8_4
- Balcombe, P., Rigby, D. & Azapagic, A. (2013). Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.012>
- Baudier, P., Ammi, C. & Deboeuf-Rouchon, M. (2020). *Smart home: Highly-educated students' acceptance*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.043>

- Borenstein, S. & Holland, S. (2003). On the Efficiency of Competitive Electricity Markets With Time-Invariant Retail Prices. *National Bureau of Economic Research*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.3386/w9922>
- Bucherer, E., Eisert, U. & Gassmann, O. (2012). Towards Systematic Business Model Innovation: Lessons from Product Innovation Management. *Creativity and Innovation Management*, 21(2), 183–198. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2012.00637.x>
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hg.). (2018). *Förderübersicht Wärmepumpe, Kurzübersicht zur Basis-, Innovations- und Zusatzförderung im Bereich Wärmepumpen*. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ew_waermepumpen_foerderuebersicht.html
- Bundesgesetzblatt (Hg.). (2020). *Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze: Kohleausstiegsgesetz*. http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl120s1818.pdf
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.). (2014). *Immobilienanzeigen: Vermieter müssen ab 1. Mai Energiedaten nennen*. <https://www.bmwi-energie.wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2014/11/Meldung/immobilienanzeigen-vermieter-muessen-ab-mai-energiedaten-nennen.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.). (2016). *Was ist ein "Prosumer"?* <https://www.bmwi-energie.wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/06/Meldung/direkt-erklart.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.). (2017a). *SmartLiving2Market: Sachstandsbericht zur Marktentwicklung in der intelligenten Heimvernetzung – Bericht 1/2017*. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/2017-broschuere-smartliving2market.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.). (2017b). *Was ist eigentlich „Demand Side Management“?* <https://www.bmwi-energie.wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2017/01/Meldung/direkt-erklart.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.). (2020). *Richtlinie - über die Förderung der Energieberatung für Wohngebäude (Vor-Ort-Beratung, individueller Sanierungsfahrplan): BAnz AT 04.02.2020 B1*.
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz (BMJV) (Hg.). (2016). *Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG*. https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/KWKG.pdf
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz (BMJV) (Hg.). (2021). *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021): § 3 Begriffsbestimmungen*. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_3.html
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz (BMJV) (Hg.). (2017). *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien: Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017*. http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf

- Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.). (2016). *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf
- Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.). (2019). *Wohnen und Sanieren: Empirische Wohngebäudedaten seit 2002*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23_cc_22-2019_wohnenundsaniieren_hintergrundbericht.pdf
- Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.). (2020). *Energieverbrauch privater Haushalte*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hg.). (2020). *EEG-Registerdaten und -Fördersätze*. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html;jsessionid=EB55429067FE7592B6DB3DD09BEAB403
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hg.). (2020). *Preise und Rechnungen: Informationen zu Strom- und Gaspreisen für Haushaltskunden*. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Verbraucher/PreiseRechnTarife/preiseundRechnungen-node.html>
- Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt (2019). *Monitoringbericht 2019*.
- Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch die Bundesministerin der Justiz und für Verbraucherschutz (Hg.). (2016). *Gesetz über den Messstellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen (Messstellenbetriebsgesetz - MsbG)*.
- Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) (Hg.). (2006). *Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nicht Leistungsgemessener Kunden*. https://services.vereinigte-stadtwerke.de/vsg/de/f/c/2/media_token/fu2ho36i70
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (Hg.). (2016). *BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016: Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung im Neubau*. https://www.bdew.de/media/documents/Heizkostenvergleich_Nebau.pdf
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (Hg.). (2017). *BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017: Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Altbauten*. https://www.bdew.de/media/documents/Heizkostenvergleich_Altbau.pdf
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (Hg.). (2020). *BDEW-Strompreisanalyse Januar 2020: Haushalte und Industrie*. https://www.bdew.de/media/documents/20200107_BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2020.pdf
- Byun, J., Hong, I., Kang, B. & Park, S. (2011). A smart energy distribution and management system for renewable energy distribution and context-aware services based on user patterns and load forecasting. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57(2), 436–444. <https://doi.org/10.1109/TCE.2011.5955177>

- Chasin, F., Paukstadt, U., Gollhardt, T. & Becker, J. (2020). Smart energy driven business model innovation: An analysis of existing business models and implications for business model change in the energy sector. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122083. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122083>
- Dahlin, K. B. & Behrens, D. M. (2005). When is an invention really radical? *Research Policy*, 34(5), 717–737. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.03.009>
- Delmas, M. A., Fischlein, M. & Asensio, O. I. (2013). Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012. *Energy Policy*, 61, 729–739. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.109>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.). (2020). *Climate Data Center*. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/air_temperature/historical/
- Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI) (Hg.). (2020). *Pelletpreis – Wirtschaftlichkeit*. <https://depi.de/pelletpreis-wirtschaftlichkeit>
- Di Stefano, G., Gambardella, A. & Verona, G. (2012). *Technology push and demand pull perspectives in innovation studies: Current findings and future research directions* (Nr. 8). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.03.021>
- EnergieAgentur.NRW GmbH (Hg.). (2015). *Das Mieter-Vermieter Dilemma: Grafik*. https://www.energieagentur.nrw/mediathek/Grafik/das_mieter-vermieter_dilemma
- EnergieAgentur.NRW GmbH (Hg.). (2020). *Aggregatoren*. <https://www.energieagentur.nrw/netze/aggregatoren>
- European Commission (Hg.). (2020). *Klimazielplan für 2030*. https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/2030_ctp_de
- European Parliament (Hg.). (2019). *EU climate law: MEPs want to increase 2030 emissions reduction target to 60%*. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20201002IPR88431/eu-climate-law-meps-want-to-increase-2030-emissions-reduction-target-to-60>
- Fabi, V., Spigliantini, G. & Corgnati, S. P. (2017). Insights on Smart Home Concept and Occupants' Interaction with Building Controls. *Energy Procedia*, 111, 759–769. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.238>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.). (2013). *Marktübersicht Pellet-Zentralheizungen und Pelletöfen*. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/mu_pellet_web.pdf
- Fleisch, E., Weinberger, M. & Wortmann, F. (2014). Geschäftsmodelle im Internet der Dinge. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 51(6), 812–826. <https://doi.org/10.1365/s40702-014-0083-3>
- Ford, R., Pritoni, M., Sanguinetti, A. & Karlin, B. (2017). Categories and functionality of smart home technology for energy management. *Building and Environment*, 123, 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.020>

- forsa im Auftrag des Verbraucherzentrale Bundesverbands (vzbv). (2015). *Akzeptanz von variablen Stromtarifen: Ergebnisse einer qualitativen Vorstufe und einer bevölkerungsrepräsentativen Umfrage*. https://www.vzbv.de/sites/default/files/downloads/Akzeptanz-variable-Stromtarife_Umfrage-Forsa-vzbv-November-2015.pdf
- Fouché, C. & Light, G. (2011). An Invitation to Dialogue: The World Cafe' In Social Work. *Qualitative Social Work: Research and Practice*, 10(1), 28–48. <https://doi.org/10.1177/1473325010376016>
- Girod, B., Mayer, S. & Nägele, F. (2017). *Economic versus belief-based models: Shedding light on the adoption of novel green technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.065>
- Greer, C., Wollman, D. A., Prochaska, D. E., Boynton, P. A., Mazer, J. A., Nguyen, C. T., Patrick, G. J., Nelson, T. L., Koepke, G. H., Hefner Jr., A. R., Pillitteri, V. Y., Brewer, T. L., Golmie, N. T., Su, D. H., Eustis, A. C., Holmberg, D. G. & Bushby, S. T. (2014). NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0. https://www.nist.gov/publications/nist-framework-and-roadmap-smart-grid-interoperability-standards-release-30?pub_id=916755
- Hair, J. F., Babin, B. J., Anderson, R. E. & Black, W. C. (2014). *Multivariate data analysis. Pearson custom library*. Pearson. <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=527034>
- International Energy Agency (IEA) (Hg.). (2015). *How2Guide for Smart Grids in Distribution Networks*. <https://www.iea.org/reports/how2guide-for-smart-grids-in-distribution-networks>
- Johnson, M. & Rubado, D. (2014). Energy Trust of Oregon Nest Learning Thermostat Heat Pump Control Pilot Evaluation.
- KfW (Hg.). (2019). *KfW-Energiewendebarmeter 2019: Haushalte möchten mehr Erneuerbare Energien nutzen – Durchbruch der Elektromobilität bis 2030 erwartet*. <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-KfW-Energiewendebarmeter/KfW-Energiewendebarmeter-2019.pdf>
- KfW (Hg.). (2020a). *Anlage zum Merkblatt: Energieeffizient Bauen: Technische Mindestanforderungen*. https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-%28Inlandsf%C3%B6rderung%29/PDF-Dokumente/6000003465_M_153_EEB_TMA_2018_04.pdf
- KfW (Hg.). (2020b). *Merkblatt 167: Energieeffizient Sanieren – Ergänzungskredit*. [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000003615_M_167_EES_Ergaenzungs-kredit.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000003615_M_167_EES_Ergaenzungs-kredit.pdf)
- KfW (Hg.). (2020c). *Merkblatt 270: KfW-Programm Erneuerbare Energien "Standard"*. [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/600000178_M_270_EE-Standard.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/600000178_M_270_EE-Standard.pdf)
- Koch, M., Hesse, T., Kenkmann, T., Bürger, V., Haller, M., Heinemann, C., Vogel, M., Bauknecht, D., Flachsbarth, F., Winger, C., Wimmer, D., Rausch, L., Hermann, H., Stieß, I., Birzler-Harder, B., Kunkis, M. & Tambke, J. (2017). *Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration*. Unpublished. https://www.researchgate.net/profile/dierk_bauknecht/publication/319333926_einbindung_des_waerme-_und_kaltesektors_in_das_strommarktmodell_powerflex_zur_analyse_sektoruber-

greifender_effekte_auf_klimaschutzziele_und_ee-integration
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22708.35207>

- Korcaj, L., Hahnel, U. J. & Spada, H. (2015). Intentions to adopt photovoltaic systems depend on homeowners' expected personal gains and behavior of peers. *Renewable Energy*, 75, 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.007>
- Krödel, M. (2016). *Die richtige Technologie in Erwägung ziehen: Tipp des Monats April 2016*.
- Next Kraftwerke GmbH (Hg.). (2020a). *Was ist die Marktprämie? Definition*. <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/marktpraemie#:~:text=ist%20die%20Marktpr%C3%A4mie%3F-,Definition,und%20der%20anlagenspezifischen%20F%C3%B6rderh%C3%B6he%20ausgleicht>
- Next Kraftwerke GmbH (Hg.). (2020b). *Was ist Einspeisemanagement? Definition*. <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/einspeisemanagement>
- Nicholls, L., Strengers, Y. & Sadowski, J. (2020). *Social impacts and control in the smart home* (Nr. 3). <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0574-0>
- NRW.Bank (Hg.). (2019). *Merkblatt: NRW.BANK.Gebäudesanierung: Zinsgünstige Darlehen für private Hauseigentümer/-innen*. <https://www.nrwbank.de/foerderlotse-dokumente/Binary-nrw-bank-gebaeudesanierung-merkblatt.pdf.pdf?contentType=application/pdf&pfad=/2/1/6621/>
- Orth, N., Weniger, J., Tjaden, T., Munzke, N., Schwarz, B., Büchle, F., Messner, C., Figgener, J., Haberschusz, D. & Quaschnig, V. (2018). *Vergleich verschiedener Kennzahlen zur Bewertung der energetischen Performance von PV-Batteriesystemen*. Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin; Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Austrian Institute of Technology (AIT); Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA).
- Osterwalder, A. (2004). *The business model ontology a proposition in a design science approach*.
- Osterwalder, A. & Pigneur, Y. (2013). *Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Wiley&Sons.
- Osterwalder, A., Pigneur, Y. & Tucci, C. L. (2005). Clarifying Business Models: Origins, Present, and Future of the Concept. *Communications of the Association for Information Systems*, 16(1). <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
- Palm, A. (2016). Local factors driving the diffusion of solar photovoltaics in Sweden: A case study of five municipalities in an early market. *Energy Research & Social Science*, 14, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.027>
- Palm, J. (2018). Household installation of solar panels – Motives and barriers in a 10-year perspective. *Energy Policy*, 113, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.047>
- Paukstadt, U. (2020). *Business Model Innovation in the Age of the Internet of Things - Analysis and Development of Business Models for Consumer-Oriented Smart Energy Technologies: Kummulative Dissertation*.
- Paukstadt, U., Gollhardt, T., Blarr, M., Chasin, F. & Becker, J. (2019). A TAXONOMY OF CONSUMER-ORIENTED SMART ENERGY BUSINESS MODELS. *Research Papers*. https://aisel.aisnet.org/ecis2019_rp/111

- Peters, C., Blohm, I. & Leimeister, J. M. (2015). Anatomy of Successful Business Models for Complex Services: Insights from the Telemedicine Field. *Journal of Management Information Systems*, 32(3), 75–104. <https://doi.org/10.1080/07421222.2015.1095034>
- Pflugradt, N. (2016). *Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten*. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-209036>
- Pflugradt, N. (2020). *LoadProfileGenerator: Version 7.2*. <https://www.loadprofilegenerator.de/>
- Piti, A., Verticale, G., Rottondi, C., Capone, A. & Lo Schiavo, L. (2017). The Role of Smart Meters in Enabling Real-Time Energy Services for Households: The Italian Case. *Energies*, 10(2), 199. <https://doi.org/10.3390/en10020199>
- Porter, M. E. & Heppelmann, J. E. (2014). *How smart, connected products are transforming competition*.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (Hg.). (2020). *Klimaneutrales Deutschland: Zusammenfassung im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität*. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
- Quack, D., Liu, R. & Gröger, J. (2019). *Smart Home – Energieverbrauch Smart Home - Energieverbrauch und Einsparpotenzial der intelligenten Geräte*.
- Raimi, K. T. & Carrico, A. R. (2016). *Understanding and beliefs about smart energy technology*. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.018>
- Richter, M. (2012). Utilities' business models for renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2483–2493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.072>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations: 5. ed.*
- RP-Energie-Lexikon (Hg.). (2020). *RP-Energie-Lexikon: Dezentrale Energieerzeugung*. https://www.energie-lexikon.info/dezentrale_energieerzeugung.html
- Saebi & Foss. (2016). *What drives business model adaptation*.
- Sanguinetti, A., Karlin, B., Ford, R., Salmon, K. & Dombrovski, K. (2018). What's energy management got to do with it? Exploring the role of energy management in the smart home adoption process. *Energy Efficiency*, 11(7), 1897–1911. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9689-6>
- Schleich, J., Klobasa, M., Gölz, S. & Brunner, M. (2013). Effects of feedback on residential electricity demand—Findings from a field trial in Austria. *Energy Policy*, 61, 1097–1106. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.012>
- Schlereth, C., Skiera, B. & Schulz, F. (2018). Why do consumers prefer static instead of dynamic pricing plans? An empirical study for a better understanding of the low preferences for time-variant pricing plans. *European Journal of Operational Research*, 269(3), 1165–1179. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.03.033>
- Schultz, P. W., Estrada, M., Schmitt, J., Sokoloski, R. & Silva-Send, N. (2015). Using in-home displays to provide smart meter feedback about household electricity consumption: A randomized control trial comparing kilowatts, cost, and social norms. *Energy*, 90, 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.130>

- Schumpeter, J. & Backhaus, U. (2003). The Theory of Economic Development. In J. G. Backhaus (Hg.), *The European heritage in economics and the social sciences: Bd. 1. Joseph Alois Schumpeter: Entrepreneurship, style and vision* (S. 61–116). Kluwer Academic Publ. https://doi.org/10.1007/0-306-48082-4_3
- Shafer, S. M., Smith, H. J. & Linder, J. C. (2005). The power of business models. *Business Horizons*, 48(3), 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2004.10.014>
- Sovacool, B. K. & Del Furszyfer Rio, D. D. (2020). Smart home technologies in Europe: A critical review of concepts, benefits, risks and policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109663. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109663>
- Statista GmbH (Hg.). (2020). *Smart Home Report 2020: Statista Digital Market Outlook – Market Report*.
- Statistisches Bundesamt (Hg.). (2011). *Zensus: Gebäude mit Wohnraum sowie Wohngebäude nach Baujahr*. <https://ergebnisse.zensus2011.de/datenbank/online?operation=statis-tic&code=3000G#abreadcrumb>
- Statistisches Bundesamt (Hg.). (2020). *Wohnen - Art der Nutzung der Wohneinheit von Haushalten*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabelle/haushaltsstruktur-deutschland-nutzung-wohneinheit.html;jsessionid=CC2995738771D22ECACDCB8D9C8ADF1D.internet8722>
- Stille, K. S. (2018). *Energiemanagement von Haushaltsgeräten: Intelligente Lastverschiebung mit Lastspitzenvermeidung*. Springer Berlin Heidelberg.
- Strauss, S. W. (2018). *Forecasting Industrial Wood Pellet Prices—A new model for calculating future prices*. <https://www.futuremetrics.info/wp-content/uploads/2018/09/Forecasting%20Industrial%20Wood%20Pellet%20Prices%20by%20FutureMetrics.pdf>
- Strengers, Y. (2014). Smart energy in everyday life. *Interactions*, 21(4), 24–31. <https://doi.org/10.1145/2621931>
- Strese, H., Seidel, U., Knappe, T. & Botthof, A. (2010). *Smart Home in Deutschland: Untersuchung im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung zum Programm Next Generation Media (NGM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie*. <http://partner.vde.com/bmbf-aal/publikationen/studien/extern/documents/iit-studie-smart-home.pdf>
- Strom-Report (Hg.). (2020). *Photovoltaik in Deutschland: Daten, Fakten & Meinungen zum Solarstrom bis 2020*. <https://strom-report.de/photovoltaik/>
- Teece, D. J. (2010). Business Models, Business Strategy and Innovation. *Long Range Planning*, 43(2-3), 172–194. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003>
- Umweltbundesamt (Hg.). (2020a). *Entwicklung des Wärmeverbrauchs aus erneuerbaren Energien: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeerzeugung-aus-erneuerbaren-energien>
- Umweltbundesamt (Hg.). (2020b). *Monatsbericht zur Entwicklung der erneuerbaren Stromerzeugung und Leistung in Deutschland: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)*. <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/monatsbericht-zur-entwicklung-der-erneuerbaren>

- Ur, B., McManus, E., Pak Yong Ho, M. & Littman, M. L. (2014). Practical trigger-action programming in the smart home. In M. Jones, P. Palanque, A. Schmidt & T. Grossman (Hg.), *CHI 2014, one of a CHIInd: Conference proceedings : Toronto, Canada, April 26 - May 1, 2014 ; the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 803–812). Assoc. for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557420>
- van Dam, S. S., Bakker, C. A. & van Hal, J. D. M. (2010). Home energy monitors: impact over the medium-term. *Building Research & Information*, 38(5), 458–469. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.494832>
- Vargo, S. L. & Lusch, R. F. (2004). Evolving to a New Dominant Logic for Marketing. *Journal of Marketing*, 68(1), 1–17. <https://doi.org/10.1509/jmkg.68.1.1.24036>
- Varian, H. R. (2016). *Grundzüge der Mikroökonomik* (9. Aufl.). De Gruyter Studium. De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783110478051>
- Venkatesh, Morris & Davis. (2003). *User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View* (Nr. 3). <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Venkatesh, Thong & Xu. (2012). *Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (Nr. 1). <https://doi.org/10.2307/41410412>
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hg.). (2019). *VDI 4655: Referenzlastprofile von Wohngebäuden für Strom, Heizung und Trinkwarmwasser sowie Referenzerzeugungsprofile für Fotovoltaikanlagen*. <http://www.vdi.de/4655-1>
- Virtuelles Institut Smart Energy (VISE) (Hg.). (2018). *Policy Brief: Forschungsstudie SmartHome Rösraht: Feldtest in 120 Haushalten zur Untersuchung von Heizenergieeinsparungen in Bestandsgebäuden*. https://www.smart-energy.nrw/sites/smartenergy/files/vise_policy_brief_q_3_2018.pdf
- Weigel, P. & Fishedick, M. (2018). *Rolle der Digitalisierung in der soziotechnischen Transformation des Energiesystems*. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7120>
- Zott, C. & Amit, R. (2007). Business Model Design and the Performance of Entrepreneurial Firms. *Organization Science*, 18(2), 181–199. <https://doi.org/10.1287/orsc.1060.0232>
- Zott, C., Amit, R. & Massa, L. (2011). The Business Model: Recent Developments and Future Research. *Journal of Management*, 37(4), 1019–1042. <https://doi.org/10.1177/0149206311406265>

Band / Volume 528

Entwicklung von Schutzschichten für nicht-oxidische Faserverbundwerkstoffe

M. Wolf (2021), VI, 150, 2 pp

ISBN: 978-3-95806-524-6

Band / Volume 529

Mechanical reliability and oxygen permeation of $\text{Ce}_{0.8}\text{Gd}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$ - FeCo_2O_4 dual phase membranes

F. Zeng (2021), IV, VI, 222 pp

ISBN: 978-3-95806-527-7

Band / Volume 530

Capacitance-Based Methods to Study Charge Transport and Recombination in Organic Solar Cells

I. Zonno (2021), vi, 153 pp

ISBN: 978-3-95806-528-4

Band / Volume 531

Einflüsse von Klimavariabilität und -wandel auf Ausbau und Erzeugung im Europäischen Stromsystem

F. P. Gotzens (2021), XXIII, 231 pp

ISBN: 978-3-95806-530-7

Band / Volume 532

Weltweite Infrastruktur zur Wasserstoffbereitstellung auf Basis erneuerbarer Energien

P.-M. Heuser (2021), VII, 231 pp

ISBN: 978-3-95806-531-4

Band / Volume 533

Mechanische Eigenschaften von katalysatorbeschichteten Membranen für die Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse

E. Borgardt (2021), viii, 181 pp

ISBN: 978-3-95806-533-8

Band / Volume 534

Techno-economic Assessment of Hybrid Post-combustion Carbon Capture Systems in Coal-fired Power Plants and Steel Plants

Y. Wang (2021), IV, xx, 230 pp

ISBN: 978-3-95806-545-1

Band / Volume 535

Wissenschaftliche Begleitstudie der Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen

S. Cerniauskas, P. Markewitz, J. Linßen, F. Kullmann, T. Groß, P. Lopion, P.-M. Heuser, T. Grube, M. Robinius und D. Stolten

(2021), IV, 89 pp
ISBN: 978-3-95806-547-5

Band / Volume 536
High-Resolution Photocurrent Mapping of Thin-Film Silicon Solar Cells Using Scanning Near-Field Optical Microscopy
Z. Cao (2021), xiii, 148 pp
ISBN: 978-3-95806-548-2

Band / Volume 537
Kompressionseigenschaften der Gasdiffusionslage einer Hochtemperatur-Polymer-elektrolyt-Brennstoffzelle
E. Hoppe (2021), viii, 153 pp
ISBN: 978-3-95806-549-9

Band / Volume 538
Transparent Passivating Contact for Crystalline Silicon Solar Cells
M. Köhler (2021), 186 pp
ISBN: 978-3-95806-550-5

Band / Volume 539
Distribution of trace gases with adverse effects on fuel cells
D. Klemp, R. Wegener, R. Dubus, L. Karadurmus, N. Kille, Z. Tan (2021), 160 pp
ISBN: 978-3-95806-551-2

Band / Volume 540
Cyclotron Irradiation on Tungsten & Co-relation of Thermo-Mechanical Properties to Displacement and Transmutation Damage
R. Rayaprolu (2021), xiv, 211 pp
ISBN: 978-3-95806-552-9

Band / Volume 541
Smart Energy in Haushalten: Technologien, Geschäftsmodelle, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit
H. Shamon, T. Rehm, B. Helgeson, F. Große-Kreul, M. Gleue, U. Paukstadt, G. Aniello, T. Schneiders, C. Frings, A. Reichmann, A. Löschel, T. Gollhardt, W. Kuckshinrichs, K. Gruber, P. Overath, C. Baedeker, F. Chasin, K. Witte, J. Becker
(2021), VI, 142 pp
ISBN: 978-3-95806-554-3

Weitere **Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich** unter
<http://www.zb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 541
ISBN 978-3-95806-554-3