EE-Rebound

Clara Lenk, Lukas Torliene, Julika Weiß, Jan Wiesenthal (IÖW)

Wie wirken Rebound-Effekte von Prosumern?

Ökologische und ökonomische Bewertung auf Haushaltsebene

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
FONA Forschung für Nachhaltigkeit

i|ö|w INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG
FCN | Future Energy Consumer Needs and Behavior | E.ON Energy Research Center | RWTH AACHEN UNIVERSITY
Fraunhofer ISI

Impressum

Autor/innen:
Clara Lenk, Lukas Torliene, Dr. Julika Weiß, Jan Wiesenthal (IÖW)
Unter Mitarbeit von Dr. Jan Kegel und Nesrine Ouanes (IÖW)

Projektleitung:
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin
www.ioew.de

Kooperationspartner:
Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN)
RWTH Aachen
Templergraben 55, 52062 Aachen
www.fcn.eonerc.rwth-aachen.de

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Hansastraße 27 c, 80686 München
www.fraunhofer.de

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt Rebound-Effekte durch Umstieg auf Erneuerbare Energien? – Untersuchung von Konsumenten und Prosumerhaushalten“. Das Projekt ist Teil der Fördermaßnahme „Rebound-Effekte aus sozial-ökologischer Perspektive“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Sozial-Ökologischen Forschung (SÖF).

Förderkennzeichen 01UT1705

Zitiervorschlag:
Lenk, Clara; Torliene, Lukas; Weiß, Julika; Wiesenthal, Jan (2022): Wie wirken Rebound-Effekte von Prosumern? Ökologische und ökonomische Bewertung auf Haushaltsebene, Arbeitsbericht des Forschungsprojekts EE-Rebound. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin

Für nähere Informationen zum Projekt: www.ee-rebound.de

Berlin, Januar 2022

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung
FONA Forschung für Nachhaltigkeit

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

FCN | Future Energy Consumer Needs and Behavior | E.ON Energy Research Center | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Fraunhofer ISI

Zusammenfassung

Schaffen sich Haushalte eine PV-Anlage an und werden dadurch zu Prosumern, also konsumieren nicht nur Energie, sondern produzieren diese auch, kann dies zu Verhaltensänderungen führen, welche den Gesamtverbrauch des Haushalts beeinflussen. Im Rahmen des Projekts EE-Rebound wurden Rebound-Effekte untersucht, welche durch den Umstieg auf Prosuming auftreten können. In diesem Arbeitspapier werden die ökologischen und ökonomischen Effekte analysiert, welche durch Verhaltensänderungen wie Rebound-Effekte auftreten, und für die Haushaltsebene dargestellt.

Zunächst werden mit Hilfe eines Simulationsmodells Prosumerhaushalte abgebildet. In verschiedenen Szenarien werden Erzeugung, Eigenverbrauch und Einspeisung von Prosumern simuliert. Die Szenarien zeichnen sich durch unterschiedliches Verbrauchsverhalten, Haushalts- und Anlagengrößen aus. Insgesamt führt der Umstieg auf Prosuming erwartungsgemäß zu einem geringeren Netzbezug im Vergleich zum reinen Konsum. Darüber hinaus wird deutlich, dass der Gesamtverbrauch sowie der Netzbezug durch Rebound-Effekte sowie durch zusätzliche Verbraucher ansteigt, während der Netzbezug durch Lastverschiebung reduziert werden kann. Auch wenn eine befürchtete Abregelung ein Grund für einen Mehrverbrauch nach der Installation einer PV-Anlage sein kann, konnten die Simulationen zeigen, dass die Abregelung eigentlich unproblematisch ist, da sie in allen Szenarien relativ gering ist.

Die Ergebnisse der Simulationen bilden die Grundlage für die ökologische und ökonomische Bewertung. Bei der ökologischen Bewertung werden zusätzlich zu den Szenarien auch Unterschiede hinsichtlich des aus dem Netz bezogenen Stroms untersucht (Graustrom vs. Ökostrom). Die ökologischen Auswirkungen sind vor allem abhängig vom Stromanbieter dieses zusätzlichen Netzbezugs bzw. dessen Emissionsfaktors. Durch Mehrverbrauch und zusätzliche Verbraucher erhöhen sich auch die Emissionen bei Graustrombezug. Eine größere Dimensionierung von PV-Anlagen und Batterien verringert den Netzbezug und damit auch die ökologischen Auswirkungen möglicher Rebound-Effekte. Der zusätzliche selbst erzeugte und verbrauchte PV Strom wird jedoch nicht eingespeist und fehlt entsprechend dem Stromnetz.

Bei der ökonomischen Bewertung werden sowohl Auswirkungen der Verhaltensänderung beim Umstieg auf Prosuming aufgezeigt, als auch Einkommensveränderungen für den Prosumerhaushalt in den verschiedenen Szenarien. Der Wechsel zu Prosuming führt bei vergleichsweise kleiner Dimensionierung der Anlagen zu positiven Einkommensveränderungen des Haushalts. Diese positive Entwicklung kann durch Suffizienz und Lastverschiebung verstärkt oder aber durch Rebound-Effekte reduziert werden. Die größere Dimensionierung der Anlagen führt ab einem bestimmten Wert zu negativen Einkommensveränderungen. Einfluss auf die ökonomischen Auswirkungen für den Haushalt hat darüber hinaus auch die Art der Finanzierung (Höhe der Verzinsung sowie Anteil von Eigen- und Fremdkapital). Insgesamt wirkt sich eine Reduktion der Verzinsung positiv auf die Einkommensveränderung aus. Die Anteile von Eigen- und Fremdkapital wirken sich auf die Einkommensveränderung nur aus, wenn die Verzinsung der Kapitalarten unterschiedlich ist. Darüber hinaus beeinflussen die Anteile vor allem die Verteilung der Kosten über den Betrachtungszeitraum. Hierbei werden durch einen hohen Anteil Fremdkapital mit den entstehenden, jährlichen Tilgungskosten mehr laufende Kosten verursacht als bei einem hohen Anteil Eigenkapital.

Abstract

If households install a PV system and thus become prosumers, i.e. not only consume energy but also produce it, this can lead to behavioural changes that influence the overall consumption of the household. The EE-Rebound project investigated rebound effects that can occur as a result of switching to prosuming. In this working paper, the environmental and economic effects that occur due to behavioural changes such as rebound effects are explored and presented for the household level.

First, prosumer households are mapped using a simulation model. Generation, self-consumption and feed-in of prosumers are simulated in different scenarios. The scenarios are characterized by different consumption behaviour, household and system sizes. Overall, as expected, the switch to prosuming results in lower grid purchases compared to pure consumption. Furthermore, it becomes clear that total consumption as well as grid purchases increase due to rebound effects as well as additional consumers, while grid purchases can be reduced by load shifting. Even though feared curtailment can be a reason for additional consumption after the installation of a PV system, the simulations were able to show that curtailment is actually unproblematic, as it is relatively low in all scenarios.

The results of the simulations form the basis for the ecological and economic evaluation. In the ecological evaluation, in addition to the scenarios, differences are also examined with respect to the electricity purchased from the grid (grey electricity vs. green electricity). The ecological effects are mainly dependent on the electricity provider of this additional grid purchase or its emission factor. Due to additional consumption and additional consumers, emissions also increase with grey electricity purchases. A larger dimensioning of PV systems and batteries reduces the grid purchase and thus also the ecological impact of possible rebound effects. However, the additional self-generated and consumed PV electricity is not fed into the grid and is accordingly missing from the grid.

The economic evaluation shows both effects of the behavioural change when switching to prosuming and income changes for the prosumer household in the different scenarios. The switch to prosuming leads to positive income changes for the household if the dimensioning of the systems is comparatively small. This positive development can be enhanced by sufficiency and load shifting or reduced by rebound effects. Larger dimensioning of the plants leads to negative income changes above a certain value. Furthermore, the type of financing (amount of interest as well as share of equity and debt capital) also has an influence on the economic effects for the household. Overall, a reduction in the interest rate has a positive effect on the change in income. The proportions of equity and debt capital only affect the change in income if the interest rates on the types of capital are different. In addition, the proportions primarily influence the distribution of costs over the period under consideration. In this context, a high share of debt capital with the resulting annual repayment costs generates more current costs than a high share of equity capital.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 7

2 Veränderung der Energieflüsse durch Rebound-Effekte 9

2.1 IÖW Energie-Prosumer Modell 9
2.2 Szenarienauswahl und Annahmen 10
2.2.1 Szenarien mit Rebound-Effekten 11
2.3 Einfluss der Rebound-Effekte auf die Energieflüsse im Haushalt 12
2.3.1 Energieflüsse im Haushalt bei Mehrverbrauch 13
2.3.2 Energieflüsse im Haushalt bei zusätzlichen Großverbrauchern 15

3 Ökologische Bewertung 17

3.1 Methodik, Datengrundlage und Annahmen 17
3.2 Ergebnisse 19
3.2.1 Vergleich Strombezug und Prosuming 19
3.2.2 Ökologische Wirkung von Rebound-Effekten 20
3.2.2.1 Rebound durch Verhaltensänderung 20
3.2.2.2 Rebound durch Großverbraucher 22
3.2.3 Exkurs: Zusatz- vs. Ersatzanschaffung 24
3.2.4 Fazit zur ökologischen Bewertung 26

4 Ökonomische Bewertung 28

4.1 Methodik, Datengrundlage und Annahmen 28
4.2 Ergebnisse 30
4.2.1 Kosten der Stromerzeugung 30
4.2.2 Wechsel von Netzbezug zu Prosuming 31
4.2.3 Prosuming mit Verhaltensveränderung 34
4.2.4 Prosuming mit größerer Dimensionierung und zusätzlichen Großverbrauchern 35
4.2.5 Finanzierung 38

5 Fazit 40

6 Literaturverzeichnis 44

7 Anhang 48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Beispielhaftes Lastprofil generiert mit dem IÖW-EProM Modell 9

Abbildung 2-2: Netzbezug und Eigenverbrauch bei gestiegenem Stromverbrauch 13

Abbildung 2-3: Eigenverbrauch und Netzbezug bei gestiegenem Stromverbrauch und smarter Laststeuerung 14

Abbildung 2-4: Abregelung in Haushalten bei steigendem Energiebedarf 15

Abbildung 2-5: Deckung Strombedarf von zusätzlichen Großverbrauchern 16

Abbildung 3-1: Systemgrenze der ökologischen Bewertung von Rebound-Effekten nach dem Umstieg auf Prosuming 17

Abbildung 3-2: CO_2 -Emissionen ohne PV/Bat, PV, PV+Bat 20

Abbildung 3-3: CO_2-Emissionen durch Rebound-Effekte 21

Abbildung 3-4: CO_2-Emissionen durch Rebound-Effekte bei größerer Dimensionierung 22

Abbildung 3-5: CO_2-Emissionen durch Neuanschaffungen 23

Abbildung 3-6: CO_2-Emissionen durch Zusatzanschaffungen bei größerer Dimensionierung 24

Abbildung 4-1: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Wechsel von Netzbezug zu Prosuming 32

Abbildung 4-2: Einkommensveränderung – Wechsel von Netzbezug zu Prosuming .. 33

Abbildung 4-3: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit Verhaltensveränderung 34

Abbildung 4-4: Einkommensveränderung – Prosuming mit Verhaltensveränderung.. 35

Abbildung 4-5: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit größerer Dimensionierung 36

Abbildung 4-6: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit zusätzlichen Geräten und größerer Dimensionierung 36

Abbildung 4-7: Einkommensveränderung – Prosuming mit größerer Dimensionierung und zusätzlichen Geräten 37

Abbildung 4-8: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit unterschiedlichen Finanzierungskonditionen 38

Abbildung 4-9: Einkommensveränderung – Wechsel von Netzbezug zu Prosuming mit unterschiedlichen Finanzierungkonditionen 38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Annahmen Referenzhaushalte zur Ausstattung mit PV-Anlage und Speicher 10

Tabelle 3-1: Emissionsfaktoren inklusive Vorketten für die ökologische Bewertung des Stromverbrauchs auf Haushaltsebene 18

Tabelle 3-2: Übersicht zur Auswahl vergleichender Ökobilanzstudien zu elektrisch und konventionell betriebenen Autos 25

Tabelle 4-1: Datengrundlage der ökonomischen Bewertung I 28

Tabelle 4-2: Datengrundlage der ökonomischen Bewertung II 29

Tabelle 7-1: Annahmen Referenzhaushalte 48

Tabelle 7-2: Formeln zur Wirtschaftlichkeitsberechnung 48

Tabelle 7-3: Netzbezug und Eigenverbrauch bei gestiegenem Stromverbrauch 49

Tabelle 7-4: Netzbezug und Eigenverbrauch bei gestiegenem Stromverbrauch und smarter Lastverschiebung 50

Tabelle 7-5: Netzbezug und Eigenverbrauch bei zusätzlichen Großverbrauchern 50

Tabelle 7-6: Ökologische Bewertung - Ergebnisübersicht 51

Tabelle 7-7: Ökonomische Bewertung - Ergebnisübersicht 54

Tabelle 7-8: Ökonomische Bewertung - Sensitivitätsanalyse 57

Abkürzungsverzeichnis

BAT ..... **Batterie (Speichersystem)**

BNetzA ..... **Bundesnetzagentur**

EE ..... **Erneuerbare Energien**

EEG ..... **Erneuerbaren-Energien-Gesetz**

EK ..... **Eigenkapital**

FK ..... **Fremdkapital**

iMSys ..... **Intelligentes Messsystem**

Invest ..... **Investitionskosten**

kWh ..... **Kilowattstunden**

kWp ..... **Kilowatt-Peak**

LCOE ..... **Stromgestehungskosten (Levelized Costs of Energy)**

PV ..... **Photovoltaik**

1 Einleitung

Sowohl eine deutliche Reduzierung des derzeitigen Energieverbrauchs, als auch ein Umstieg auf erneuerbare Energien (EE) ist notwendig, um die nationalen und internationalen Klimaschutzziele einzuhalten. Bei der Untersuchung von Energieeffizienzmaßnahmen in Haushalten wurde festgestellt, dass die Einsparungen häufig geringer als erwartet ausfallen und entsprechend Rebound-Effekte auftreten. Erste empirische Untersuchungen unter anderem im Projekt EE-Rebound zeigen, dass auch beim Wechsel zu erneuerbaren Energien eine Veränderung des Energieverbrauchs von Haushalten auftritt. Diese Effekte sind für die Energiewende von großer Bedeutung, denn es wird eine Versorgung mit 100 % EE angestrebt. Da zukünftig Strom auch für Mobilität und Wärme zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist ebenso eine sehr hohe Nachfrage nach EE-Strom zu erwarten. Vor dem Hintergrund der bestehenden Hemmnisse für einen schnellen EE-Ausbau ist deshalb die Reduktion des Energieverbrauchs von großer Bedeutung.

Das Projekt EE-Rebound befasst sich mit der Frage, inwiefern der Wechsel zu erneuerbaren Energien sich auf den Stromverbrauch auswirkt, welche Wirkungen das sowohl auf der Ebene der Haushalte als auch für das Stromsystem zur Folge hat und welche Möglichkeiten bestehen, die Rebound-Effekte zu verringern. Da in Haushalten bisher EE-Strom fast ausschließlich in Photovoltaik (PV) Anlagen erzeugt wird fokussiert sich das Vorhaben auf **PV-Prosumerhaushalte**. Unter Prosumern werden Haushalte verstanden, die Strom nicht nur konsumieren, sondern auch produzieren. Sie leisten bereits heute durch die Erzeugung von PV-Strom einen relevanten Beitrag zur Stromerzeugung. Die Prosumerhaushalte speisen ihren Strom entweder ins Netz ein oder können ihn selber nutzen. Bedingt durch sinkende Kosten und sinkende Einspeisevergütungen im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), ist aktuell insbesondere der Eigenverbrauch lohnend und das gängige Marktmodell. Um den Eigenverbrauch zu optimieren haben viele Prosumerhaushalte ergänzend eine Batterie als Stromspeicher, durch welche der eigenerzeugte Strom über einen längeren Zeitraum am Tag zur Verfügung steht. Zudem wird der eigenerzeugte Strom auch zur Wärmeerzeugung und für E-Mobilität eingesetzt.

Rebound-Effekte bei Prosumerhaushalten

Interviews im Vorhaben EE-Rebound haben gezeigt, dass in Prosumerhaushalten mit Eigenverbrauch die Nutzung des selbsterzeugten Stroms von großer Bedeutung ist. Monetäre und psychologische Faktoren führen hier teilweise zu einem sorglosen Umgang mit dem Strom (Dütschke et al. 2021). Zudem zeigte sich in den Interviews, dass teilweise die Vorgaben zur Abregelung im EEG bei den Prosumern zur Befürchtung führen, dass ein relevanter Anteil ihres erzeugten Stroms vernichtet wird. Dies unterstützt noch die Bemühungen, den wertvollen eigenerzeugten Strom zu möglichst großen Anteilen im eigenen Haushalt einzusetzen. In der Summe kommt es zu Rebound-Effekten, teilweise da zusätzliche elektrische Verbraucher wie E-Räder oder Springbrunnen angeschafft werden oder aber bspw. der Pool elektrisch beheizt wird. Neben diesen Effekten kann auch beobachtet werden, dass einige Haushalte im Gegenteil durch die installierte PV-Anlage verstärkt Energie einsparen (Dütschke et al. 2021).

Insgesamt kommen die quantitativen Erhebungen und Datenanalysen im Vorhaben zu dem Ergebnis, dass derzeit in der Summe der Stromverbrauch durch die Installation von PV-Anlagen steigt - und dass dies nicht nur aus dem Einsatz von Strom in anderen Bereichen resultiert. Besonders hoch ist dabei der Mehrverbrauch bei Haushalten, die nach 2011 eine

PV-Anlage installiert haben, bei der aufgrund der geringen Einspeisevergütung der Eigenverbrauch eine große Rolle spielt (Galvin et al. 2022). Die genaue Höhe von Rebound-Effekten bei diesen Haushalten ist schwierig zu bestimmen. Auf Basis einer Umfrage unter Haushalten mit und ohne PV-Anlage wurde die Höhe des Mehrverbrauchs in den Prosumerhaushalten, die nach 2011 eine PV-Anlage installiert haben, auf im Schnitt ca. 18 % abgeschätzt (Galvin et al. 2022). Dabei fand ein Matching statt, so dass die Prosumerhaushalte mit anderen Haushalten mit ähnlichen Charakteristika und Ausstattungsmerkmalen verglichen wurden. Dadurch kann einerseits nicht berücksichtigt werden, dass auch die Anschaffung weiterer Geräte Teil des Rebound-Effekts sein kann. Andererseits konnten trotz dieses Vorgehens die Mehrverbräuche durch Sektorkopplung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Vereinfachend wird in dem vorliegenden Arbeitspapier deshalb davon ausgegangen, dass der Mehrverbrauch ohne Berücksichtigung der Sektorkopplung im Bereich zwischen 10 und 20 % liegt, so dass Szenarien mit diesen Werten betrachtet werden.

Auf der anderen Seite wird ein Suffizienz-Szenario betrachtet, bei dem davon ausgegangen wird, dass zukünftig mehr Haushalte durch Feed-Back-Systeme ihren Stromverbrauch reduzieren, da durch den Rollout der Smart Meter die Voraussetzungen hierfür gerade bei Prosumerhaushalten gut sind. So zeigen Studien, dass mit differenziertem Verbrauchsfeedback gegebenenfalls inklusive Gerätekennung in Haushalten mittelfristig Einsparungen von bis zu 8- 12 % erzielbar sind (Carrie Armel et al. 2013; Dromaque und Grigoriou 2018; Gährs et al. 2021). In anderen Studien mit einfacheren Systemen liegt der Wert häufig allerdings deutlich geringer (Fraunhofer ISE 2011; Raw und Ross 2011; Hoffmann et al. 2012; Renner et al. 2012). Hier wird für das Suffizienz-Szenario ein Wert von 10 % untersucht, der beispielsweise aus umfassenden Einsparungen durch Feed-Back-Systeme resultieren könnte (bei gleichzeitigem Ausbleiben von negativen Rebound-Effekten).

Fragestellung und Aufbau

Rebound-Effekte resultieren aus einer Veränderung des Energieverbrauchsverhaltens. Maßgeblich für die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen dieser Effekte auf Haushaltsebene sind neben der reinen Veränderung der insgesamt verbrauchten Energiemenge auch noch die Energieflüsse innerhalb des Haushaltes. Wird ein zusätzlicher Energiebedarf, der durch einen Rebound Effekt entsteht, primär durch die eigene PV-Anlage gedeckt entgeht dem Haushalt aus ökonomischer Sicht lediglich ein verhältnismäßig kleiner finanzieller Ertrag durch die verminderte Einspeisung. Und auch aus ökologischer Sicht verursacht der Haushalt möglicherweise keine zusätzlichen Emissionen. Muss für den erhöhten Verbrauch allerdings eine größere Energiemenge aus dem Netz bezogen werden führt das zum einen zu deutlich höheren Kosten durch den Strombezug und zum anderen zu zusätzlichen Emissionen, die dem aus dem Netz bezogenen Strom zuzurechnen sind. Für die ökonomische sowie ökologische Bewertung soll daher in einem ersten Schritt bestimmt werden, inwiefern sich die Energieflüsse durch einen Rebound-Effekt innerhalb eines Haushaltes verändern.

2 Veränderung der Energieflüsse durch Rebound-Effekte

Um die Auswirkungen von Rebound-Effekten auf die Energieflüsse im Haushalt für eine Bandbreite an Szenarien abzubilden wird das am IÖW entwickelte Energie-Prosumer-Modell (EProM) eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Simulation fließen in die Bewertung in den nachfolgenden Kapiteln als Input-Parameter ein. Im Folgenden wird kurz das Modell vorgestellt, die getroffenen Annahmen und Szenarien erläutert und die Ergebnisse der Simulationen dargelegt und analysiert.

2.1 IÖW Energie-Prosumer Modell

EProM ist ein Bottom-up Simulationsmodell, das für einen oder mehrere Haushalte bis hin zu einem Quartier die Energieerzeugung und den Energieverbrauch sowie die Wechselwirkungen minutengenau für ein Jahr simuliert. Dabei kann die Steuerung der strom- und wärmeseitigen Erzeuger, Verbraucher und die Speicherung in Abhängigkeit vom Anwendungsfall angepasst werden. Das Modell zeichnet sich durch eine hohe zeitliche Auflösung aus, die zu realistischen Werten sowohl zum Energieverbrauch, als auch zu bei der Nutzung von verschiedenen Energieträgern führt. Zudem können Schlüsselkomponenten wie zum Beispiel die Anzahl der Haushalte, Ausstattung, Kapazitäten der Anlagen, Speichermöglichkeiten und Jahresverbrauch variiert werden. In Abbildung 2-1 sind exemplarisch für einen Haushalt die Energieflüsse über einen Tag dargestellt.

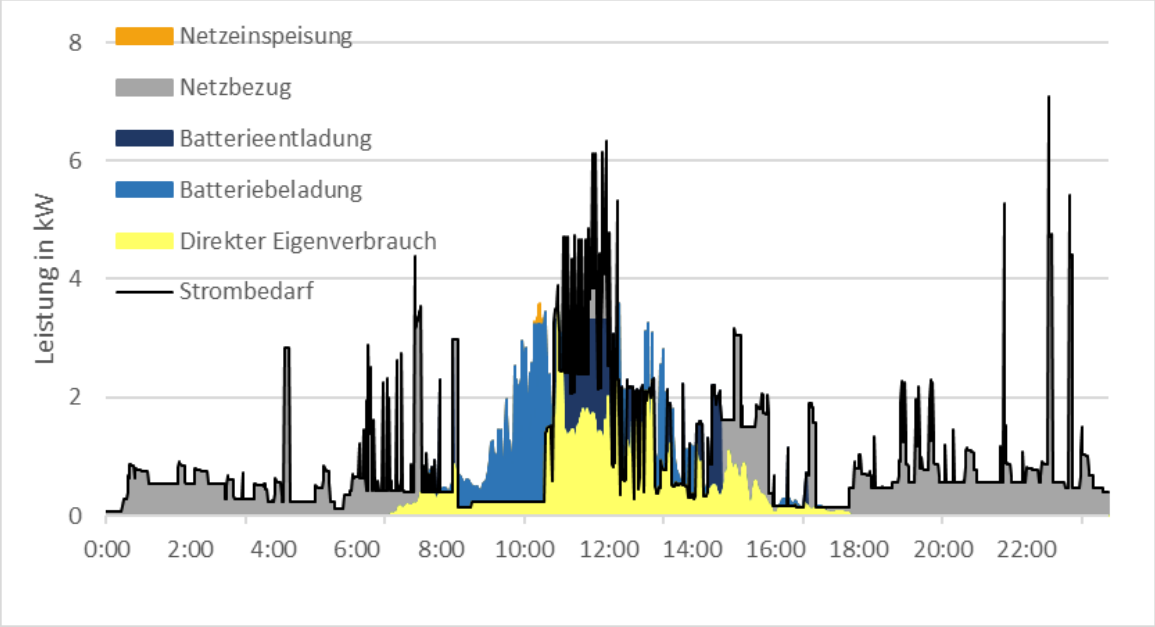

Abbildung 2-1: Beispielhaftes Lastprofil generiert mit dem IÖW-EProM Modell
Annahme: 5 Personen-Haushalt I 5 kWp PV I 5 kWh BAT | smarte Lastverschiebung | Wetterdaten vom 20.3.2004
Quelle: eigene Darstellung

Die Ergebnisse zeigen für den simulierten Tag, dass die Stromerzeugung durch die PV-Anlage und der in der Batterie eingespeicherte Strom den Verbrauch nur zeitweise decken kann. Insbesondere in der Nacht wird Strom aus dem Netz bezogen. In Zeiten, in denen die

Erzeugung den Verbrauch übersteigt, wird zunächst die Batterie beladen. Übersteigt die Erzeugung die maximale Ladeleistung oder ist die Batterie voll, wird der zusätzliche Strom ins Netz eingespeist.

2.2 Szenarienauswahl und Annahmen

In dieser Studie wird die Wirkung von Rebound-Effekten im Vergleich zu Referenzhaushalten analysiert. Die unterschiedlichen Ausprägungen und getroffenen Annahmen werden im Folgenden erläutert.

Referenzhaushalt

Um auf der einen Seite zu gewährleisten, dass Ergebnisse nicht nur für einzelne Beispielhaushalte gelten, sondern auf eine möglichst große Zahl an Haushalten übertragbar sind und zum anderen den Aufwand zu begrenzen, werden als Referenzhaushalt zwei Haushaltsgrößen (drei und fünf Personen Haushalte) gewählt, die aber für einen großen Teil der Prosumerhaushalte relevant sind. Denn Haushalte mit mehr als 3 Personen leben überwiegend in Ein- und Zweifamilienhäusern (Statistisches Bundesamt 2019) auf denen ein überwiegender Teil der PV-Anlagen installiert ist (vgl. Weiß et al. 2019).

Es können folgende Referenzfällen anhand der Anlagenausstattung unterschieden werden:

1. Referenz ohne PV/Batterie (BAT): Haushalt ohne PV-Anlage und Batterie
2. Referenz mit PV: Haushalt mit PV-Anlage
3. Referenz mit großer PV: Haushalt mit großer PV-Anlage
4. Referenz mit PV + BAT: Haushalt mit PV-Anlage und Batterie

Die PV-Leistungen und Batteriekapazitäten sind in Tabelle 2-1 dargelegt.[1]

Tabelle 2-1: Annahmen Referenzhaushalte zur Ausstattung mit PV-Anlage und Speicher

	3 Personen Haushalt	5 Personen Haushalt	Begründung und Annahmen
Referenz ohne PV/BAT	Keine PV-Anlage		Um Vergleich zu einem Nicht-Prosumerhaushalt ziehen zu können
Referenz mit PV	PV-Anlage mit 3,5 kWp	PV-Anlage mit 5 kWp	Für hohen Eigenverbrauch wird Anlagengröße in etwa in Höhe des Verbrauchs gewählt
Referenz mit großer PV	PV-Anlage mit 10 kWp		In der Vergangenheit aufgrund von regulatorischen Rahmenbedingungen häufig gewählte PV-Anlagen Größe[2]
Referenz mit PV + BAT	Batterie mit 3,5 kWh	Batterie mit 5 kWh	Batterie Kapazität in kWh entspricht Leistung der PV Anlage

[1] Weitere Annahmen, die der Simulation zu Grunde gelegt sind finden sich im Anhang in Tabelle 7-1
[2] Bis zur EEG Novelle 2021 musste bei Anlagen >10 kWp auf den eigenverbrauchten PV-Strom die EEG Umlage gezahlt werden.

Referenz mit großer PV + BAT	Batterie mit 10 kWh	Batterie Kapazität in kWh entspricht Leistung der PV Anlage

Eine Simulation mit Batteriespeicher ist sinnvoll, da Batteriekapazitäten im Prosumerbereich eine zunehmende Bedeutung erfahren.[3] Die Leistung der PV-Anlage und, sofern vorhanden, installierten Batteriekapazität werden variiert. Für die PV-Leistung wurden zwei Ansätze gewählt. Einerseits wurde die Leistung der PV-Anlage an dem Strombedarf des Haushaltes ausgerichtet, um einen möglichst hohen Anteil des selbstproduzierten Stroms selber zu verbrauchen. In der Vergangenheit wurde angenommen, dass dies zu einer höheren Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen beitragen kann (Ritter und Bauknecht 2021; Weiß et al. 2019). Andererseits wurde eine PV-Leistung von 10 kWp gewählt, da dies in der Vergangenheit eine häufig gewählte PV-Anlagengröße darstellte.

2.2.1 Szenarien mit Rebound-Effekten

Wie einleitend beschrieben, kann ein Rebound-Effekt in unterschiedlicher Ausprägung auftreten. In dieser Studie werden zwei Szenarien betrachtet.

Szenario „Verhaltensänderung“

Dieses Szenario betrachtet unterschiedliche Verhaltensänderungen. Unter anderem wird ein prozentualer **Mehrverbrauch**, beispielsweise durch die häufigere und längere Nutzung von Geräten und dem Einsatz von weniger energieeffizienten Geräten angenommen. Dabei werden wie in der Einleitung dargestellt unterschiedliche Mehrverbräuche simuliert: 20 % Mehrverbrauch im Rebound 20 % Szenario und 10 % Mehrverbrauch im Rebound 10 % Szenario. In einzelnen Fällen kann die Anschaffung einer PV-Anlage auch zu einem erhöhten Bewusstsein für den Umgang mit Energie und damit verbunden zu einer Reduktion des Stromverbrauchs führen (**Suffizienz**). Wie in der Einleitung dargestellt wird deshalb im Suffizienz-Szenario die Verminderung des Stromverbrauchs um 10 % analysiert. In weiteren Szenarien wird darüber hinaus zudem eine bewusste Verhaltensänderung der Bewohner*innen berücksichtigt. Bei einer sogenannten **„smarten“ Steuerung** wird der Verbrauch bewusst in die sonnenreichen Stunden des Tages gelegt. Dies ist gerade für Prosumerhaushalte attraktiv, um den Anteil des selbstverbrauchten Stroms zu erhöhen. Gleichzeitig kann dies auch zu einem Mehrverbrauch führen, wenn beispielsweise eine Waschmaschine vorzugsweise halbvoll mittags angestellt wird. Die verschiedenen Verbrauchsszenarien werden daher nochmals in Kombination mit einer smarten Steuerung simuliert.

Szenario „zusätzliche Großverbraucher“

Ein Grund für den Strommehrverbrauch in Prosumerhaushalten ist die Anschaffung von zusätzlichen energieintensiven Geräten, wie die Interviews im Vorhaben ergeben haben. Dies wird nicht beim allgemeinen Mehrverbrauch berücksichtigt. Deshalb wird ergänzend ein Szenario mit Mehrverbrauch durch die Anschaffung einzelner energieintensiver Geräte untersucht. Es werden die Effekte von vier verschiedenen Großverbrauchern simuliert und analysiert:

- **Sauna:** Auf Basis eigener Lastmessungen in einer privaten Sauna wurde ein Lastprofil für einen zwei- und einen dreistündigen Saunagang erstellt. Beim ermittelten Lastprofil liegt die Leistung während der Aufheizphase konstant und dann sequenziell immer wieder über kürzere Zeiträume in Phasen der Nachheizung bei 9 kW. Für

[3] Laut Figgener et al. (2021) werden derzeit rund zwei von drei PV-Anlagen mit einer Batterie installiert

einen zweistündigen Saunagang ergibt sich ein Stromverbrauch in Höhe von 10,2 kWh und für einen dreistündigen Saunagang in Höhe von 13,35 kWh. Aufgrund von fehlender Datengrundlage zu Saunanutzungen in privaten Haushalten mussten an dieser Stelle Annahmen zur Häufigkeit der Saunanutzung getroffen werden. Es wurde davon ausgegangen, dass im Jahr je nach Anzahl der Bewohnerinnen und Bewohner rund 50 Saunagänge (zu etwa gleichen Teilen zweistündig und dreistündig) stattfinden, vermehrt in der kalten Jahreszeit und am Wochenende. Hieraus ergibt sich ein Jahresstromverbrauch der Sauna in Höhe von rund 560 kWh im 3-Personen und 591 kWh im 5-Personen Haushalt.

- **Pool:** In dieser Studie wird ein 50 m³ Pool betrachtet, der mit einer Wärmepumpe aufgeheizt wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Poolsaison von Anfang Mai bis Ende August geht und der Pool auf 25°C geheizt wird. Hieraus ergibt sich ein Jahresstrombedarf in Höhe von rund 2.500 kWh.

- **E-Auto:** Die Anschaffung eines E-Autos führt zu einem zusätzlichen Strombedarf. Ersetzt das E-Auto allerdings ein Auto mit Verbrennungsmotor handelt es sich im Sinne der Sektorkopplung nicht um einen Rebound-, sondern um einen Substitutionseffekt. In dieser Studie wird die Wirkung eines zusätzlichen E-Autos untersucht. Für die Fahrleistung wird daher nur eine relativ geringe Fahrleistung von rund 10.000 km im Jahr angenommen, die unter der durchschnittlichen deutschen Fahrleistung von Autofahren in Höhe von 13.000 km liegt (Kraftfahrt-Bundesamt 2021). Für den Verbrauch wird in Anlehnung an den BMW i3, 13,1 kWh/100 km angenommen (BMW 2021) .

- **E-Rad:** Hier wird angenommen, dass es sich bei der Anschaffung eines E-Rades um einen zusätzlichen Verbraucher handelt. Im Vergleich zu einem E-Auto, einem Pool oder einer Sauna ist der jährliche Strombedarf eines E-Rads deutlich geringer und fällt im Vergleich zum allgemeinen Stromverbrauch kaum ins Gewicht. Daher wurde, um eine Art Worst Case zu simulieren, eine hohe Fahrleistung von rund 4.400 km (vgl. u.a. fahrrad.de 2021) und ein hoher Verbrauch je 100 km von 0,92/kWh (Babboe 2019) gewählt.

2.3 Einfluss der Rebound-Effekte auf die Energieflüsse im Haushalt

Die Ergebnisdarstellung beschränkt sich sowohl bei der Auswertung der Energieflüsse im Haushalt als auch bei der späteren ökologischen und ökonomischen Bewertung primär auf die 3-Personen Haushalte. Außerdem werden in diesem Abschnitt nur die Ergebnisse für die große PV-Anlage dargestellt. Die Ergebnisse für die 5-Personen Haushalte und eine kleinere Anlagendimensionierung unterscheiden sich nicht grundlegend, sondern es werden lediglich zum Teil Effekte verstärkt oder abgeschwächt. Die Ergebnisse der im Kapitel nicht dargestellten Simulationen sind im Anhang in Tabelle 7-3,

Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 dokumentiert.

2.3.1 Energieflüsse im Haushalt bei Mehrverbrauch

Entscheidend für die ökonomische und die ökologische Bewertung der Rebound-Effekte auf Haushaltsebene ist es zu analysieren, welcher Teil des Strombedarfs durch den selbsterzeugten Strom und welcher über das Netz gedeckt wird. In Abbildung 2-2 sind die Ergebnisse für den Eigenverbrauch und Netzbezug der Simulation des 3-Personen Haushalts mit einer großen Anlagendimensionierung abgebildet.[4]

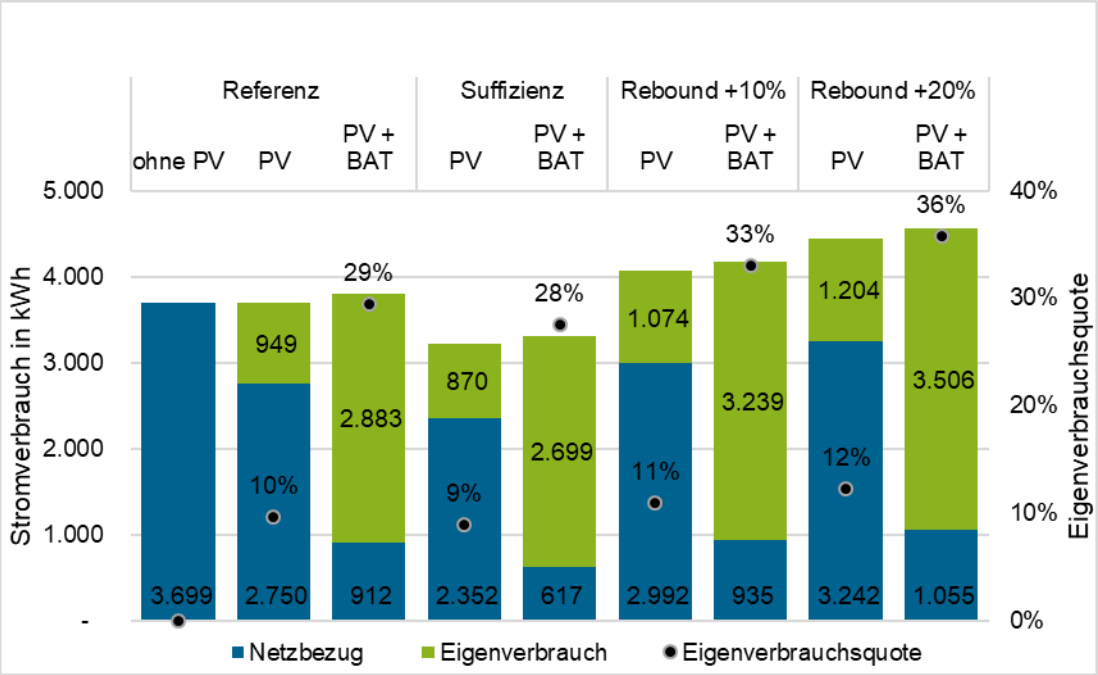

Abbildung 2-2: Netzbezug und Eigenverbrauch bei gestiegenem Stromverbrauch
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Anhand der Abbildung 2-2 wird deutlich, dass in dem Prosumerhaushalt selbst bei 20 % Mehrverbrauch weniger Strom vom Netz bezogen wird (3.242 kWh), als bei einem Haushalt ohne PV-Anlage (3.699 kWh). Werden Prosumerhaushalte untereinander verglichen, zeigt sich, dass mit steigendem Strombedarf in Folge eines Rebound-Effekts auch ein größerer Anteil des selbstproduzierten Stroms im Haushalt verbraucht wird. Bei dem Prosumerhaushalt ohne Batterie steigt die Eigenverbrauchsquote von 9 % im Suffizienz-Szenario auf 12 % im Rebound 20 %-Szenario. Beim Prosumerhaushalt mit Batterie steigt die Eigenverbrauchsquote sogar um 8 Prozentpunkte von 28 % auf 36 %. Aufgrund der in allen Szenarien gleich hohen Stromerzeugung bedeutet dies allerdings auch, dass der eigenerzeugte Strom, den der Haushalt zusätzlich verbraucht, nicht in das Netz eingespeist wird. Außerdem muss sowohl beim Szenario ohne Batterie als auch mit Batterie ein Teil des zusätzlichen Strombedarfs aus dem Netz bezogen werden. So steigt der Strombezug bei Prosumerhaushalten ohne Batterie von 2.352 kWh im Suffizienz-Szenario auf 3.242 kWh im Rebound 20 %-Szenario. Bei Haushalten mit einer entsprechend großen Batterie ist der Anstieg deutlich geringer von 617 kWh auf 1.055 kWh.

[4] Ergebnisse der Auswirkungen von Mehrverbrauch für einen 5 Personen-Haushalt mit kleiner und großer Anlagendimensionierung sowie für einen 3 Personen-Haushalt mit einer kleinen Anlagendimensionierung sind im Anhang in Tabelle 7-3 aufgeführt.

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, kann eine Erhöhung des Energieverbrauchs auch mit einer Verhaltensänderung hin zu einer smarten Steuerung gekoppelt sein. In Abbildung 2-3 ist dargestellt, wie sich das auf die Energieflüsse auswirkt.[5] Hierbei wird deutlich, dass durch eine zeitliche Anpassung der Verbräuche ein Teil des Mehrverbrauchs durch die selbst erzeugte Strommenge gedeckt werden kann. So können im Vergleich zu den Szenarien ohne smarte Lastverschiebung durchgängig höhere Eigenverbrauchsquoten erzielt werden (Abbildung 2-2). Im Vergleich zu einem Prosumerhaushalt ohne Rebound-Effekt und ohne Lastverschiebung ist beim Rebound 10 %-Szenario mit smarter Lastverschiebung der Netzbezug sogar leicht geringer. Allerdings wird in diesem Fall auch entsprechend weniger Strom ins Netz eingespeist. Beim Rebound 20 %-Szenario muss neben einer verminderten Stromeinspeisung zudem mehr Strom aus dem Netz bezogen werden.

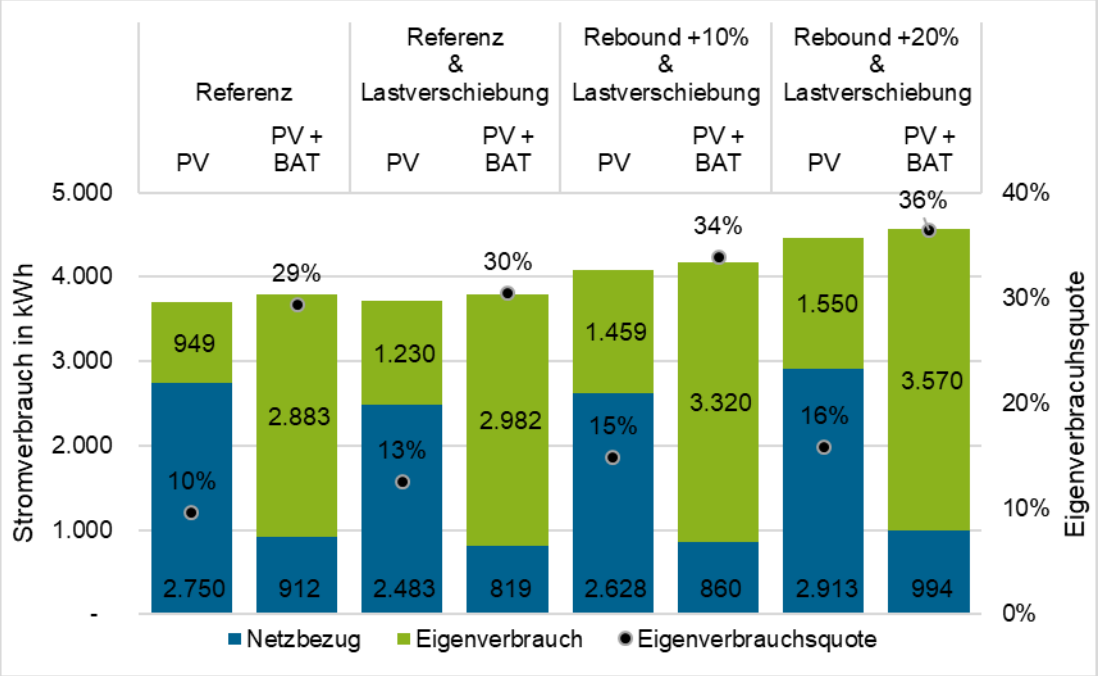

Abbildung 2-3: Eigenverbrauch und Netzbezug bei gestiegenem Stromverbrauch und smarter Laststeuerung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT I smarte Lastverschiebung
Quelle: eigene Darstellung

Wie einleitend beschrieben, besteht eine weitere mögliche Ursache für Rebound-Effekte in der Bestrebung, einer Abregelung zu entgehen. In der Simulation wurde analysiert, wie hoch die Strommenge ist, die in das Netz eingespeist wird und über 70 % der Nennleistung der PV-Anlage liegt und damit abgeregelt wird. Die Ergebnisse in Abbildung 2-4 bestätigen mit einer Abregelung zwischen 31 und 50 kWh andere Studien, die darauf hinweisen, dass die Abregelung nur einen geringen Anteil der Erzeugungsleistung (hier ~0,5 % von ~9.800 kWh Erzeugungsleistung) ausmacht (Wirth und Fraunhofer ISE 2021). Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass sich der Unterschied zwischen der höchsten Abregelung (49,7 kWh im Suffizienz-Szenario) und der niedrigsten Abregelung (Rebound +20 % mit Batterie) im Bereich von weniger als 20 kWh bewegt und damit vernachlässigbar gering ist.

[5] Ergebnisse der Auswirkungen der smarten Lastverschiebung für einen 5 Personen-Haushalt mit kleiner und großer Anlagendimensionierung sowie für einen 3 Personen-Haushalt mit einer kleinen Anlagendimensionierung sind im Anhang in Tabelle 7-3 aufgeführt.

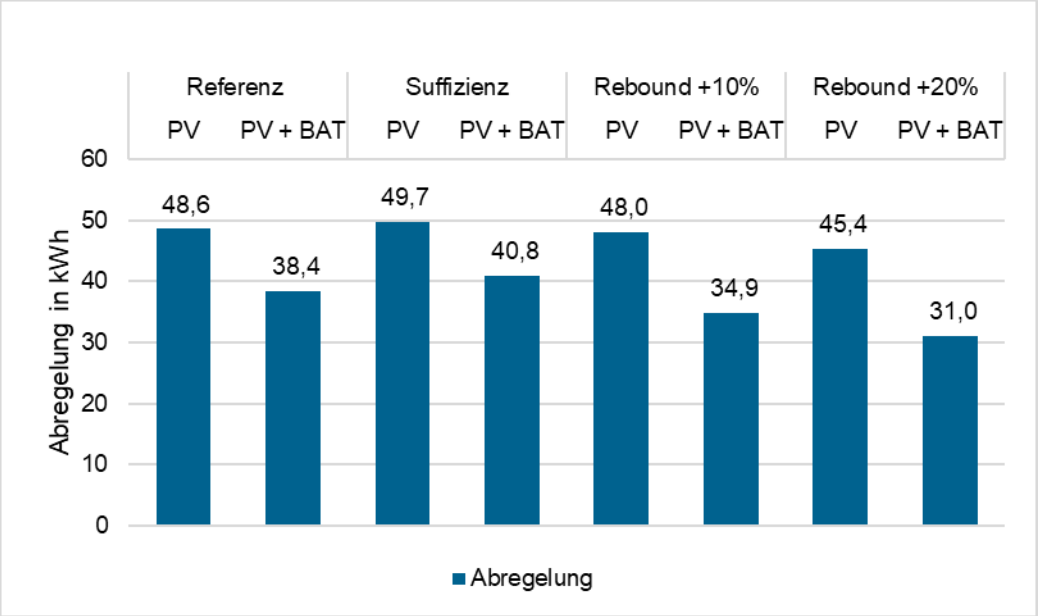

Abbildung 2-4: Abregelung in Haushalten bei steigendem Energiebedarf
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

2.3.2 Energieflüsse im Haushalt bei zusätzlichen Großverbrauchern

Auch bei der Anschaffung weiterer Großverbraucher stellt sich die Frage, inwiefern der zusätzliche Energiebedarf durch die eigene Erzeugung gedeckt ist oder ob der zusätzliche Bedarf an Elektrizität durch das Netz gedeckt werden muss. Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, werden an dieser Stelle vier Großverbraucher betrachtet. In Abbildung 2-5 ist für die vier Szenarien jeweils mit und ohne Batterie dargestellt, inwiefern der zusätzliche Energiebedarf durch den Großverbraucher durch das Netz oder den selbsterzeugten Strom gedeckt wird.[6] Es wird deutlich, dass bei allen Großverbrauchern die zusätzlich benötigte Strommenge nur zum Teil von der eigenen PV-Anlage gedeckt werden kann. Außerdem ist zu erkennen, dass sich der relative Anteil, der durch die eigene Anlage gedeckt werden kann, bei den verschiedenen Großverbrauchern unterscheidet. Beim Pool kann mit 1.065 kWh selbsterzeugtem Strom und 1.456 kWh Netzbezug (bzw. 1.844 kWh ggü. 677 kWh beim Prosumerhaushalt mit Batterie) ein deutlich höherer Anteil des zusätzlichen Energiebedarfs durch die eigne PV-Anlage gedeckt werden als bei den anderen Verbrauchern. Der Grund hierfür ist, dass der Strombedarf für den Pool primär in die sonnenreichen Stunden des Tages (Wärmepumpe wird tagsüber betrieben) und Monaten (Poolsaison zwischen Mai und Ende August) fällt. Der Verbrauch der Sauna fällt dagegen größtenteils in die Abendstunden und Wintermonate. Bei den E-Fahrzeugen wurde angenommen, dass diese nach der Rückkehr nach Hause über eine Ladesäule mit 22 kW Leistung geladen werden. Dies fällt daher auch eher in die Abendstunden und damit vorwiegend in Zeiten, in denen kein überschüssiger Strom vorhanden ist.

Sollte der Anschaffung des Großverbrauchers auch die Überlegung zugrunde liegen, einer Abregelung zu entgehen, ist, wie auch schon beim Szenario Mehrverbrauch (siehe Abschnitt 2.3.1), der Effekt marginal.

[6] Ergebnisse der Auswirkungen von zusätzlichen Großverbrauchern bei einem 5 Personen-Haushalt mit kleiner und großer Anlagendimensionierung sowie für einen 3 Personen-Haushalt mit einer kleinen Anlagendimensionierung sind im Anhang in Tabelle 7-3 aufgeführt.

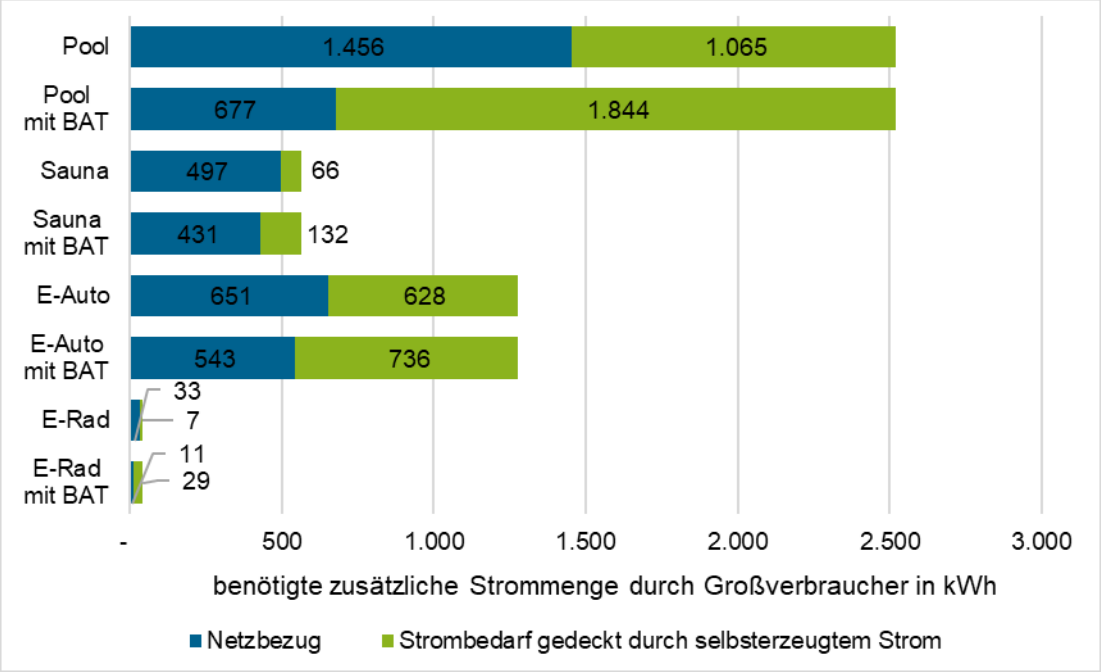

Abbildung 2-5: Deckung Strombedarf von zusätzlichen Großverbrauchern
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

3 Ökologische Bewertung

3.1 Methodik, Datengrundlage und Annahmen

Das **Ziel** der ökologischen Bewertung ist die Abschätzung der Umweltwirkung von Rebound-Effekten nach dem Umstieg auf Prosuming aus Haushaltssicht.

Das zu untersuchende System ist in der Abbildung 3-1 dargestellt. Innerhalb der **Systemgrenze** werden der selbst erzeugte und selbst genutzte PV-Strom des Prosumerhaushalts, der eingespeiste Strom und der zusätzlich bezogene Netzstrom betrachtet. Als **funktionelle Einheit** wird der jährliche Stromverbrauch eines 3 bzw. 5 Personen Prosumerhaushalts mit einer PV-Anlage betrachtet.

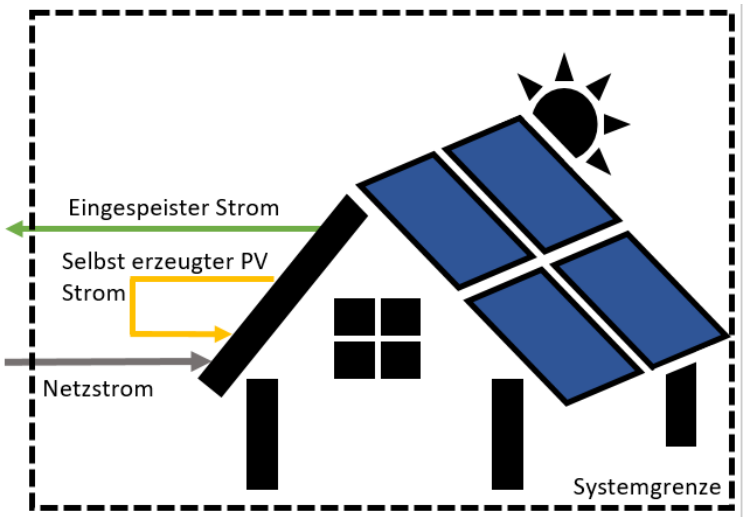

Abbildung 3-1: Systemgrenze der ökologischen Bewertung von Rebound-Effekten nach dem Umstieg auf Prosuming
Quelle: eigene Darstellung

Örtlich wird der Standort Deutschland untersucht und zeitlich wird das Referenzjahr 2019 gewählt. Die verwendeten Daten sollen sich, soweit möglich, innerhalb dieses örtlichen und zeitlichen Rahmens befinden.

Im Rahmen der **Sachbilanz** wurden die Ergebnisse aus der Simulation genutzt (Kapitel 2). Aus den Simulationen wurden zum einen die Parameter der verschiedenen Szenarien übernommen (Haushaltsgröße, Dimensionierung der Anlage, Vorhandensein einer Batterie und Art des Rebounds) und zum anderen die Ergebnisse zur Höhe des selbstverbrauchten Stroms, des eingespeisten Stroms und der zusätzliche Netzbezug.

Die **Wirkungsabschätzung** begrenzt sich auf die Wirkungskategorie des Treibhausgaspotentials ausgedrückt in CO_2-Äquivalenten (kg CO_2-eq.). Diese Wirkungskategorie ist zentral für das Erreichen der Klimaschutz- und Energiewendeziele. Zur Berechnung des Treibhausgaspotentials wurde auf Emissionsfaktoren inklusive Vorketten zurückgegriffen. Die Emissionsfaktoren beziehen sich also nicht nur auf direkte, sondern auch auf indirekte Emissionen, die durch die Herstellung der Anlagen entstehen. Erneuerbarer Strom weist also auch Emissionen auf, welche durch die Anlagenherstellung bedingt sind. Die Emissionsfaktoren wurden aus einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes übernommen, welche die Emissionen von erneuerbaren Energien berechnet hat (Lauf et al. 2019). Auch der Emissionsfaktor für den deutschen Strommix stammt vom Umweltbundesamt (Umweltbundesamt 2021). Da

für alle Szenarien jeweils auch ein Fall mit Batterie als Heimspeicher betrachtet wurde, wird auch für die Batterie ein Emissionsfaktor angegeben, der sich auf die Batteriekapazität bezieht. Dieser wurde aus der Datenbank Ökobaudat entnommen (BMI 2018). In der folgenden Tabelle 3-1 sind die verwendeten Emissionsfaktoren mit den jeweiligen Quellen aufgelistet. Es zeigt sich, dass PV-Strom im Vergleich beispielsweise zu Strom aus Windenergie oder Wasserkraft durch die Vorketten doch recht hohe Emissionen aufweist.

Tabelle 3-1: Emissionsfaktoren inklusive Vorketten für die ökologische Bewertung des Stromverbrauchs auf Haushaltsebene

Energiequelle	**Emissionsfaktor**		**Quelle**
Strommix 2019	470	g CO_2/kWh	Umweltbundesamt (2021)
Wind onshore	8,9	g CO_2/kWh	Lauf et al. (2019)
Wind offshore	4,3	g CO_2/kWh	Lauf et al. (2019)
PV Strom	55,7	g CO_2/kWh	Lauf et al. (2019)
Ökostrom Lichtblick (Wasserkraft)	2,7	g CO_2/kWh	Lichtblick (2021) Lauf et al. (2019)
Batterie	12.195	g CO_2/kWh Batteriekapazität	BMI (2018)

Zur Berechnung der CO_2-Emissionen wird zunächst die Veränderung des Stromverbrauchs betrachtet. Relevant ist vor allem der Eigendeckungsgrad, der angibt, wie viel des verbrauchten Stroms durch die PV Anlage gedeckt wird und wie viel Strom entsprechend aus dem Netz bezogen werden muss. Die ökologische Bewertung dieser beiden Größen wird über die Emissionsfaktoren (Tabelle 3-1) vorgenommen (1).

$$CO_2eq. = Selbstverbrauchter\ Strom * EF_{PV} + Netzbezug * EF_{Netz} \qquad (1)$$

Damit auch der eingespeiste Strom berücksichtigt werden kann, wird der Emissionsfaktor für PV-Strom nur anteilig dem Haushalt angerechnet. Mit dem Eigendeckungsgrad wird der Anteil des Emissionsfaktors bestimmt, welcher dem Haushalt angerechnet wird. Weist ein Haushalt beispielsweise einen Eigendeckungsgrad von 30 % auf, dann wird der Emissionsfaktor mit diesem Wert multipliziert und so ergibt sich der Emissionsfaktor für den selbst verbrauchten PV-Strom.

In den Szenarien, in denen das Vorhandensein einer Batterie angenommen wird, werden auch die Emissionen der Batterieherstellung berücksichtigt. Diese werden in g CO_2/kWh Batteriekapazität angegeben und entsprechend der Formel (2) berechnet.

$$CO_2eq. = Batteriekapazität * EF_{Batterie} \quad (2)$$

Bei einer Kapazität von 3,5 kWh liegen die CO_2-Emissionen für eine Batterie etwa bei 43 kg CO2-eq. pro Jahr. Die Emissionen der Batterie werden in den Szenarien mit Batterie zu den Emissionen durch den Stromverbrauch addiert.

Zunächst wurde berechnet welche Emissionen ein Referenzhaushalt mit den gleichen Kenngrößen (Haushaltsgröße und Stromverbrauch) ohne Prosuming durch den Stromverbrauch aufweist. Hierfür wurden zwei Varianten betrachtet: zum einen der Bezug des deutschen Strommixes (Graustrom), und zum anderen der Bezug von Ökostrom. Im Fall Ökostrom wurde der Anbieter Lichtblick ausgewählt, da dieser in Deutschland die meisten Kund*innen hat. Auch bei den Prosumerhaushalten wurde zum einen der zusätzliche Bezug von Graustrom und zum anderen der zusätzliche Bezug von Ökostrom betrachtet.

Um ökologische Effekte zu bewerten, die durch die Anschaffung von Geräten entstehen, wurden exemplarisch die Szenarien E-Auto und Sauna betrachtet. Für E-Autos wurden eine Reihe von Ökobilanzstudien hinsichtlich der CO_2-Emissionen ausgewertet. Für die Sauna wurde eine grobe ökologische Abschätzung angefertigt.

3.2 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der ökologischen Bewertung von Rebound-Effekten auf Haushaltsebene dargestellt. Zunächst werden die Referenzfälle dargestellt, die aufzeigen, wie hoch die Emissionen ohne Prosuming sind. Im Weiteren wird auf die ökologischen Wirkungen eingegangen, die sich durch die verschiedenen Rebound Szenarien ergeben. Emissionen resultieren aus dem selbstgenutzten PV-Strom, dem zusätzlich bezogenen Netzstrom und den Emissionen, die sich aus der Herstellung der Batterie ergeben. Der eingespeiste Strom wird in dieser Betrachtung mithilfe des Eigendeckungsgrads berücksichtigt.

3.2.1 Vergleich Strombezug und Prosuming

Beim Vergleich zwischen reinem Strombezug und Prosuming zeigen sich Veränderungen bei den CO_2-Emissionen, wobei hier wie oben dargestellt nur die Veränderung durch den Stromverbrauch des Haushalts berücksichtigt werden. In Abbildung 3-2 werden die Emissionen dargestellt, die sich ohne PV-Anlage und Batterie, mit PV-Anlage und mit PV-Anlage und Batterie aus dem Stromverbrauch ergeben, jeweils für den Bezug von Grau- bzw. Ökostrom.

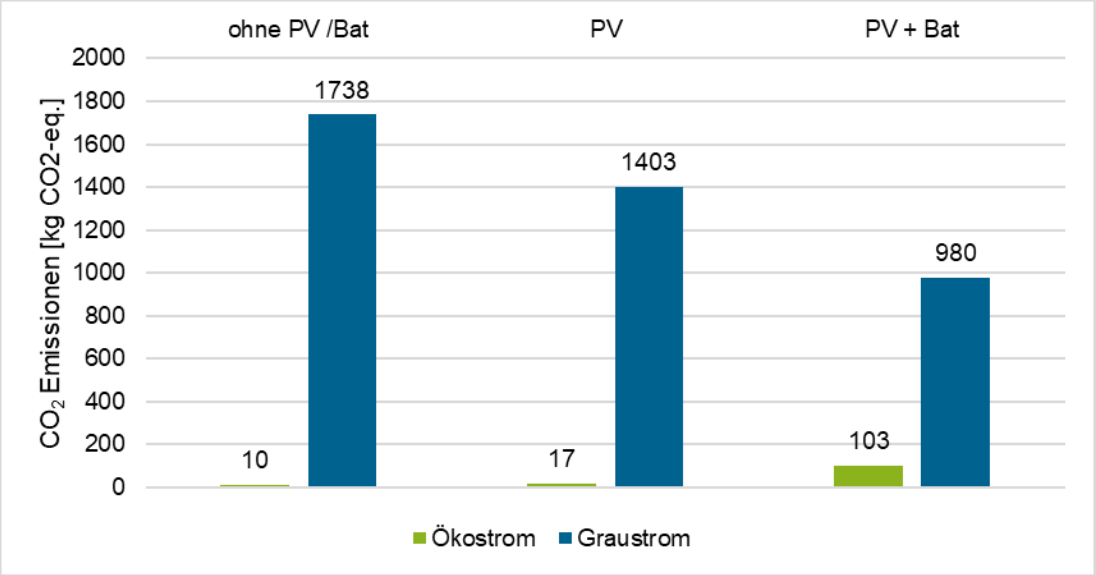

Abbildung 3-2: CO_2-Emissionen ohne PV/Bat, PV, PV+Bat
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh Bat
Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung macht deutlich, dass durch den Bezug von Graustrom weit mehr Emissionen entstehen als beim Bezug von Ökostrom. Nach dem Umstieg auf Prosuming (PV und PV+Bat) sinken die Emissionen bei Graustrom deutlich ab. Für den Ökostrom steigen die Emissionen dagegen etwas an, was aus den unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Ökostrom je nach Energieträger resultiert (vgl. Tabelle 3-1). Für den Ökostrom wurde hier der Strommix von Lichtblick angenommen, da dieser in Deutschland die meisten Kunden hat. Lichtblick liefert Strom, welcher zu 100 % aus Wasserkraft besteht. Da der Ökostrombezug von Lichtblick mit einem Emissionsfaktor von nur 2,7 g CO_2-eq. deutlich unter dem Emissionsfaktor für PV-Strom (55,7 g CO_2-eq.) liegt, ergeben sich also höhere Emissionen durch den eigenerzeugten PV-Strom. Bei einer anderen Zusammensetzung des Ökostroms könnte sich dies ändern. In Tabelle 3-1 sind auch Emissionsfaktoren von anderen Ökostromarten dargestellt; der Strommix von Lichtblick weist einen verhältnismäßig geringen Emissionsfaktor auf. Aus Sicht des Energiesystems, welches möglichst klimaneutral werden soll und dadurch einen immer höheren Anteil an erneuerbaren Energien benötigt, ist der Wechsel von Ökostrom zu Prosuming auch aus ökologischer Sicht positiv, selbst wenn der Emissionsfaktor für PV-Strom höher ist. Wenn mehr PV-Anlagen installiert werden bedeutet das auch, dass das Energiesystem immer weniger klimaschädlich wird, weil fossile Energieträger verdrängt werden.

3.2.2 Ökologische Wirkung von Rebound-Effekten

Welche Umweltwirkungen resultieren aus den Rebound-Effekten? Für die nachfolgende Darstellung der verschiedenen Rebound Szenarien dienen als Referenz jeweils Prosumerhaushalte ohne Rebound-Effekt mit bzw. ohne Batterie.

3.2.2.1 Rebound durch Verhaltensänderung

Die Umweltwirkung des Mehrverbrauchs durch verändertes Nutzungsverhalten ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

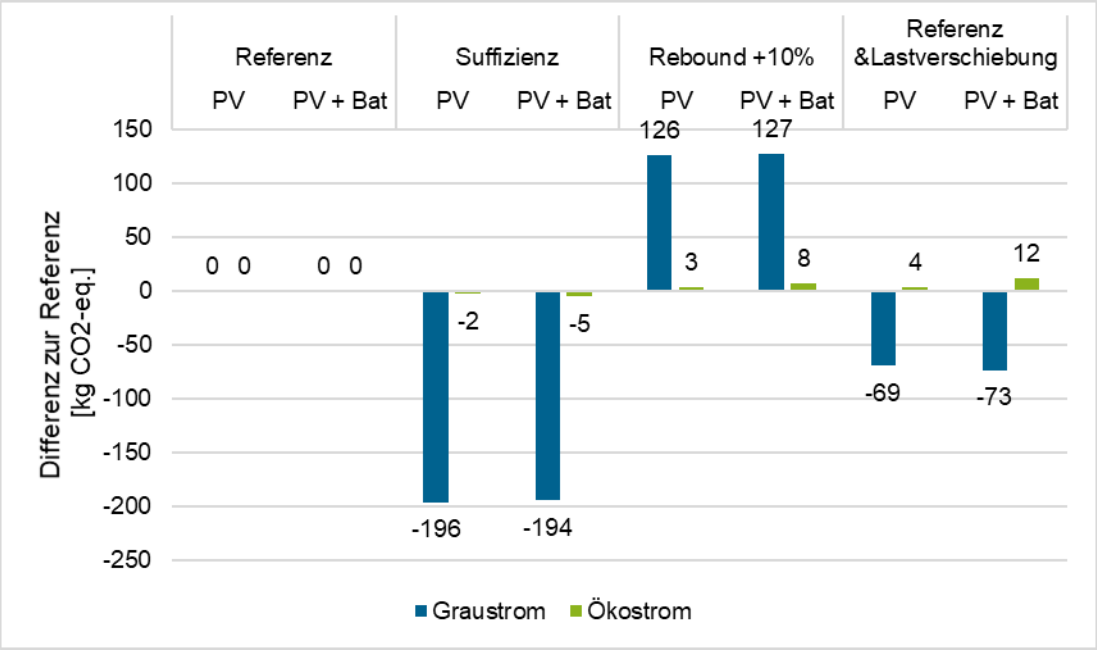

Abbildung 3-3: CO_2-Emissionen durch Rebound-Effekte
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh Bat
Quelle: eigene Darstellung

Durch den Mehrverbrauch steigt der Strombezug. Hierdurch ergeben sich bei Graustrom Emissionen von 126 bzw. 127 kg CO_2-eq. Im Fall des Ökostrombezugs ergeben sich nur 3 bzw. 8 kg CO_2-eq. zusätzlich. Im Szenario Referenz und Lastverschiebung werden bei Graustrom Emissionen eingespart und bei Ökostrom entstehen zusätzliche Emissionen. Das resultiert daraus, dass in diesem Szenario nicht mehr Strom verbraucht wird, sondern dieser nur zu anderen Zeiten genutzt wird. Die Lastverschiebung ermöglicht es Prosumern mehr selbsterzeugten PV-Strom zu nutzen, was entsprechend den Netzbezug senkt. Bei Graustrom wird also Graustrom eingespart, was sich positiv auf die CO_2-Emissionen auswirkt. Im Fall des Ökostroms entstehen zusätzliche Emissionen, da, wie oben erklärt, der selbsterzeugte PV-Strom einen höheren Emissionsfaktor aufweist, als der bezogene Ökostrom.

In Abbildung 3-4 sind die Emissionen im Verhältnis zur Referenz (PV/PV+Bat ohne Rebound) und im Vergleich zu einer größer dimensionierten PV-Anlage dargestellt. Verglichen werden die Effekte für Anlagen mit 3,5 kWp bzw. 10 kWp.

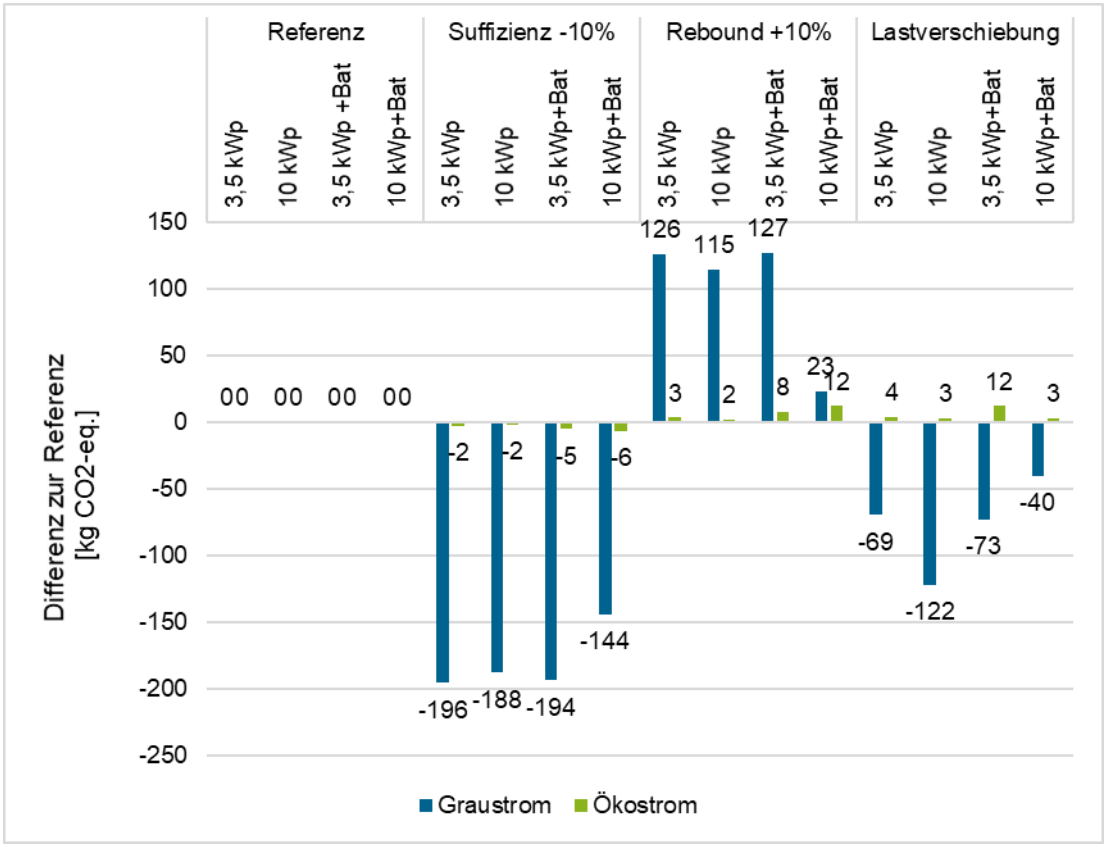

Abbildung 3-4: CO_2-Emissionen durch Rebound-Effekte bei größerer Dimensionierung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5/10 kWp PV I 3,5/10 kWh Bat
Quelle: eigene Darstellung

Bei dem zusätzlichen Bezug von Graustrom sorgt eine größer dimensionierte Anlage dafür, dass die Emissionen sinken, da mehr selbsterzeugter PV-Strom genutzt werden kann. Bei Ökostrombezug ergibt sich entsprechend ein anderer Effekt, es kommt zu mehr Emissionen, wenn zusätzlich zur größeren Dimensionierung auch eine Batterie vorhanden ist, was darauf zurückzuführen ist, dass auch die Batterie größer ist und höhere Emissionen aufweist. Für das Szenario Rebound +10 % ist erkennbar, dass die Emissionen im Vergleich zu dem Fall ohne Rebound-Effekt bei einer 10 kWp Anlage mit Batterie bei zusätzlichem Graustrombezug sinken.

3.2.2.2 Rebound durch Großverbraucher

Die zusätzliche Anschaffung von Geräten als Folge des Prosuming wird auch als Rebound-Effekt kategorisiert und beeinflusst den Stromverbrauch und auch die Zusammensetzung des Stromverbrauchs im Haushalt. Entsprechend ändern sich auch die CO_2-Emissionen. In der Abbildung 3-5 sind die Effekte durch zusätzliche Anschaffungen auf die CO_2-Emissionen dargestellt für E-Auto, E-Rad, Pool und Sauna. Referenz ist der gleiche Haushalt mit PV/PV+Bat ohne einen Rebound-Effekt.

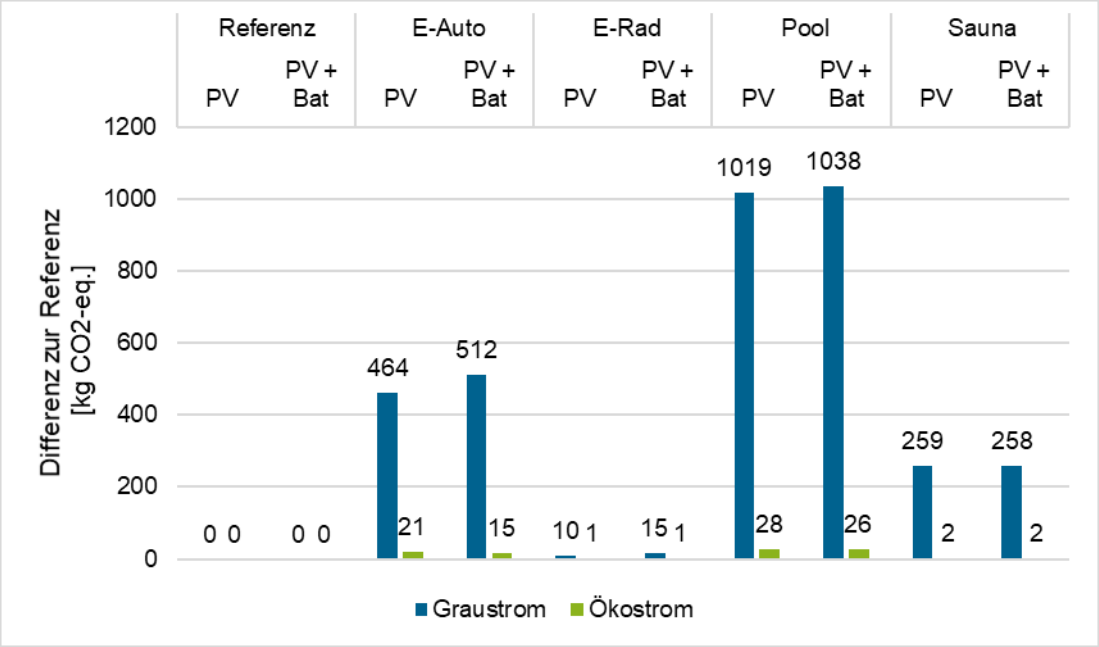

Abbildung 3-5: CO_2-Emissionen durch Neuanschaffungen
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh Bat
Quelle: eigene Darstellung

Durch die Zusatzanschaffungen ergeben sich zusätzliche CO_2-Emissionen, die aber in ihrer Höhe je nach Anschaffung schwanken. Die zusätzlichen Emissionen bei der Anschaffung eines E-Rads sind sehr gering und können fast vernachlässigt werden, vor allem beim Ökostrombezug (1 kg CO_2-eq.). Auch die Sauna weist beim Ökostrombezug nur sehr geringe zusätzliche Emissionen auf, was daran liegt, dass diese zu Tageszeiten genutzt wird, wo kaum selbsterzeugter PV Strom, sondern Ökostrom aus dem Netz bezogen wird. Bei dem Bezug von Graustrom ergeben sich hingegen deutlich höhere Emissionen bei der Anschaffung einer Sauna. Auch die Anschaffung eines E-Autos führt, bei Bezug von Graustrom, zu deutlich höheren CO_2-Emissionen. Die meisten Zusatzemissionen verursacht jedoch der Pool, was daran liegt, dass dieser viel Strom verbraucht. Durch die Anschaffung resultieren fast 2.500 kWh Mehrverbrauch, was bei Graustrombezug die Emissionen deutlich erhöht.

Auch bei der Betrachtung von Emissionen durch Neuanschaffung spielt die Dimensionierung der Anlage eine Rolle. In der folgenden Abbildung 3-6 sind die Emissionen des Stromverbrauchs im Vergleich für zwei Dimensionierungen angegeben (PV-Leistung 3,5 kWp bzw. 10 kWp und Batteriekapazität 3,5 kWh bzw. 10 kWh).

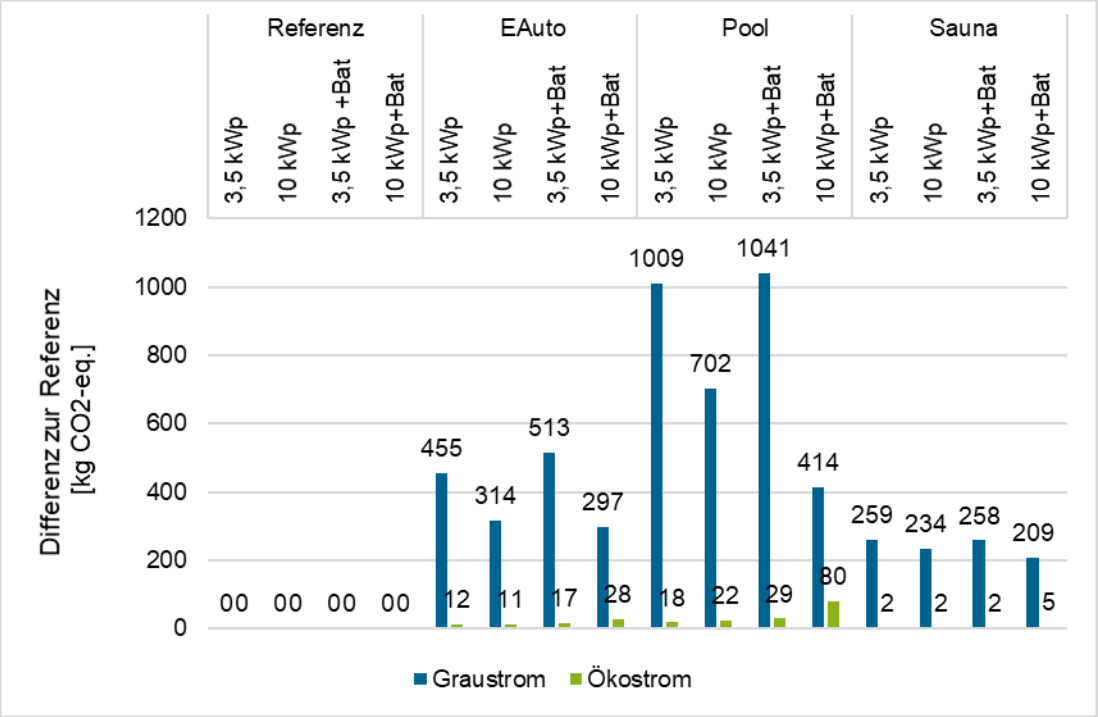

Abbildung 3-6: CO_2-Emissionen durch Zusatzanschaffungen bei größerer Dimensionierung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5/10 kWp PV I 3,5/10 kWh Bat
Quelle: eigene Darstellung

Generell kann bei der größeren Dimensionierung mehr selbsterzeugter Strom auch selbst verbraucht werden. Bei dem Bezug von Graustrom führt das dazu, dass die ökologischen Effekte der Zusatzanschaffungen abgemildert werden können. Aber auch hier wird deutlich, dass durch zusätzliche Anschaffungen die Emissionen, die aus dem Stromverbrauch resultieren, im Vergleich zur Referenz ohne Rebound-Effekt ansteigen. Weiterhin wird deutlich, dass bei dem Bezug von Ökostrom die Emissionen ansteigen bei der größeren Dimensionierung, wenn eine Batterie vorhanden ist. Das liegt daran, dass auch die Batterie größer dimensioniert ist und die Emissionen aus der Herstellung der Batterie höher sind. Dies hat einen großen Einfluss auf die Emissionen bei Ökostrombezug, da diese sonst eher gering sind. Ohne Batterie sind die Emissionen bei Ökostrombezug in etwas gleich, wenn die Anlage größer dimensioniert ist, da zwar mehr selbstverbrauchter Strom genutzt werden kann und dieser einen höheren Emissionsfaktor aufweist als der Ökostromnetzbezug aber auch mehr Strom eingespeist wird, was zu einem geringeren Emissionsfaktor für selbstverbrauchten PV-Strom führt. Bei dieser ökologischen Betrachtung ergibt sich, dass der Wechsel von Ökostrom zu PV-Strom teilweise negativ zu bewerten ist (bei größerer Dimensionierung und zusätzlicher Batterie).

3.2.3 Exkurs: Zusatz- vs. Ersatzanschaffung

Bei der Betrachtung von Rebound-Effekten durch die Anschaffung zusätzlicher Geräte ist die Unterscheidung zwischen Zusatz- bzw. Ersatzanschaffung relevant. Die Szenarien, in denen ein Pool oder eine Sauna angeschafft werden, sind klare Zusatzanschaffungen. Wird jedoch ein E-Bike oder ein E-Auto angeschafft, kann diese Anschaffung sowohl ein Zusatz als auch ein Ersatz zu einem konventionell betriebenen Auto sein. Handelt es sich um eine Zusatzanschaffung, so ist diese immer mit zusätzlichen ökologischen Wirkungen und entsprechend höheren CO_2-Emissionen verbunden. Bei einer Ersatzanschaffung ist hingegen vor allem relevant was substituiert wird. Um diese Thematik zu verdeutlichen werden im Folgenden die

Anschaffungen E-Auto, E-Bike und Sauna und deren ökologische Wirkungen analysiert. In der folgenden Auswertung liegt der Fokus auf dem Treibhausgaspotential und entsprechend den CO_2-Emissionen, da diese aus klima- und energiepolitischer Sicht die größte Bedeutung haben.

In der Literatur finden sich einige Ökobilanz Studien, die konventionell betriebene und elektrisch betriebene Autos aus ökologischer Sicht vergleichen. Dolganova et al. haben in einem Review von vergleichenden Ökobilanzstudien festgestellt, dass ein Großteil der Studien auf veralteten Daten beruht. In dem Review von Verma et al. konnten nur zwei Studien identifiziert werden die den gesamten Lebenszyklus betrachten (cradle-to-grave). Viele der Ökobilanzstudien kommen zu dem Ergebnis, dass die Produktion eines E-Autos mit höheren Emissionen verbunden ist, was sich vor allem auf die Herstellung der Batterie zurückführen lässt. Bei Einbeziehung der Nutzungsphase ändert sich jedoch die Bilanz und fällt für das E-Auto positiver aus.

In der folgenden Tabelle 3-2 sind zur Übersicht die vereinfachten Ergebnisse von vergleichenden Ökobilanzstudien dargestellt. Abgebildet ist das Treibhausgaspotenzial von einem gefahrenen Kilometer in kg CO_2-eq./km für Verbrenner- und Elektroautos.

Tabelle 3-2: Übersicht zur Auswahl vergleichender Ökobilanzstudien zu elektrisch und konventionell betriebenen Autos

Studie	**Geografischer Fokus**	**GWP (kg CO_2-eq./km) über gesamten Lebensweg**	
		Verbrenner	**E-Auto**
Del Pero et al 2018	Italien	0,203	0,129
Burchart-Korol et al 2018	Polen	0,284	2015: 0,276 2050: 0,172
Souza et al 2018	Brasilien	0,291	0,151
Pipitone et al 2021	Europa	0,187	EU mix: 0,107

In allen Studien wird deutlich, dass das Treibhauspotential über den gesamten Lebensweg bei einem E-Auto geringer ist. Bei den Ergebnissen der Studie mit dem geografischen Fokus in Polen ist erkennbar, dass der Strommix, mit welchem ein E-Auto aufgeladen wird, entscheidend ist für das Treibhauspotential. Unterscheiden sich die Emissionen in 2015 noch kaum, werden für 2050 deutlich geringere Emissionen errechnet, da für den Strommix ein geringerer Emissionsfaktor angenommen wird. Weiterhin entstehen bei einem E-Auto, anders als bei einem Verbrenner, in der Nutzungsphase keine Abgase, die ein Treibhauspotential aufweisen. Es ist also anzunehmen, dass der Ersatz eines Verbrenners durch ein E-Auto einen positiven Einfluss hat auf die CO_2-Emissionen. Wird ein E-Auto jedoch als Zusatzanschaffung angeschafft ergibt sich kein ökologischer Vorteil.

Aus den Studien zu E-Autos geht hervor, dass vor allem die Batterie für höhere CO_2-Emissionen in der Herstellung sorgt. Ähnlich ist es entsprechend bei dem Ersatz eines E-Bikes für ein konventionelles Fahrrad. Allerdings weist ein konventionelles Fahrrad keine Emissionen während der Nutzungsphase auf und ein E-Bike weist daher immer mehr Emissionen auf als

ein konventionelles Fahrrad. Wird durch ein E-Bike allerdings ein Auto ersetzt, fällt die Bilanz zugunsten des E-Bikes aus.

Für die Zusatzanschaffung Sauna wurden grobe ökologische Abschätzung durchgeführt. Die Annahmen für die Abschätzung stammen von dem Internetauftritt eines Saunaanbieters (Holzprofi24 2021). Aus der ökologischen Abschätzung ergeben sich CO_2-Emissionen bei Herstellung, Transport und Abfallbehandlung in Höhe von insgesamt 948 kg CO_2-eq. Vereinfacht wurden das notwendige Holz, ein Saunaofen und eine Glastür bilanziert. Ausgehend von einer Lebensdauer von 20 Jahren beträgt der jährliche CO_2-Fußabdruck der Sauna 47,4 kg CO_2-eq. Bei der Betrachtung des Stromverbrauchs in dem Fall der Anschaffung einer PV-Anlage und zusätzlich einer Sauna ergeben sich bei zusätzlichem Bezug von Graustrom zusätzliche Emissionen von 259 bzw. 258 CO_2-eq pro Jahr (mit bzw. ohne Batterie) und bei Ökostrombezug 2 kg CO_2-eq pro Jahr. Im Fall des Graustrombezugs kommen unter Einbeziehung nochmal ein Fünftel der durch den zusätzlichen Stromverbrauch entstehenden Emissionen hinzu. Das Gerät an sich hat also einen geringeren Beitrag auf die ökologische Wirkung als der Stromverbrauch. Wird jedoch Ökostrom zusätzlich bezogen hat die Anschaffung des Gerätes den Großteil der entstehenden Emissionen zu verantworten und ist nicht vernachlässigbar. Bei der Beurteilung der Relevanz der ökologischen Wirkung des Gerätes im Verhältnis zum Stromverbrauch, ist entscheidend, ob zusätzlich zum eigenen PV Strom Grau- bzw. Ökostrom bezogen wird. Generell fallen ökologische Folgen geringer aus, wenn Ökostrom bezogen wird. Hier fallen zwar die Emissionen des Gerätes an sich stärker ins Gewicht, allerdings sind die Emissionen insgesamt um einiges geringer als bei dem Bezug von Graustrom. Das gilt für alle zusätzlich angeschafften Geräte.

3.2.4 Fazit zur ökologischen Bewertung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei einem Mehrverbrauch an Strom beim Prosuming zusätzliche CO_2-Emissionen entstehen. Dies ist auch der Fall, wenn zusätzlich zum selbsterzeugten Strom Ökostrom bezogen wird, da dieser einen geringeren Emissionsfaktor aufweist als der selbsterzeugte PV-Strom. Auch zusätzliche Verbraucher, welche im Rahmen des Umstiegs auf Prosuming angeschafft werden, führen zu zusätzlichen Emissionen, allerdings in unterschiedlicher Höhe je nach Art der Anschaffung. Werden auch die ökologischen Wirkungen der Herstellung der Geräte betrachtet, ist entscheidend, ob es sich um eine Zusatz- oder Ersatzanschaffung handelt und was ersetzt wird. Wird also zusätzlich ein Gerät angeschafft, was einen hohen Stromverbrauch hat und auch mit Emissionen in der Herstellung einhergeht, ergeben sich insgesamt höhere Emissionen, als bei einer Verhaltensveränderung und zusätzlichen Stromverbrauch von +10 %. Eine größere Dimensionierung der PV-Anlagen weist bei Rebound-Effekten geringere Emissionen auf als bei kleineren Anlagen. Allerdings stellt sich die Frage, ob eine größere Dimensionierung nicht auch dazu führt, dass der Rebound-Effekt und damit der Mehrverbrauch größer wird, da mehr selbsterzeugter Strom zur Verfügung steht.

In der ökologischen Bewertung dieser Studie wurde die Wirkung der Stromeinspeisung anhand des Eigendeckungsgrads des Haushalts berücksichtigt. Daraus resultieren spezifische Emissionsfaktoren für den selbstgenutzten PV-Strom im Haushalt für jedes Szenario. Möglich wäre anstatt der Allokation über den Emissionsfaktor auch eine Gutschrift für den eingespeisten Strom. Der eingespeiste Strom würde dann mit dem Emissionsfaktor des verdrängten Stroms im Energiesystem multipliziert werden und diese CO_2-eq. dem Haushalt gutgeschrieben. Da aber zum einen unklar ist, welcher Strom von dem eingespeisten PV-Strom verdrängt wird und zum anderen nur der Stromverbrauch auf Haushaltsebene bewertet

wurde, wurde in der Rechnung die Allokation über den Eigendeckungsgrad angewandt. Die gängige Möglichkeit wäre, den eingespeisten Strom mit dem Emissionsfaktor des Strommix zu multiplizieren. Prosuming ist bei der Berücksichtigung einer Gutschrift immer positiv zu bewerten – auch mit Rebound-Effekten und ausgehend von Ökostrom. In dieser Studie ging es jedoch nicht um eine Bewertung des Prosumings, sondern um die Frage, wie sich die CO_2-Emissionen des Haushalts durch den Rebound-Effekt verändern. Die Wirkung auf das Energiesystem wurde vertiefend in einer eigenen Studie untersucht (Kegel et al. 2022).

4 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung betrachtet die Auswirkungen verschiedener Szenarien auf das Einkommen von Haushalten:

- Wechsel von Netzbezug Ökostrom zu Prosuming-PV und PV + BAT
- Prosuming mit Verhaltensänderung (Rebound-Effekt, Suffizienz, Lastverschiebung)
- Prosuming größerer Dimensionierung und mit zusätzlichen Geräten
- Betrachtung der Abhängigkeit von Finanzierung (Eigen-, Fremdkapital)

Als Eingrenzung zu Tabelle 7-1 werden bei der ökonomischen Bewertung ausschließlich die 3-Personen Haushalte betrachtet, da sich bei den 5-Personen Haushalten identische Auswirkungen lediglich in einer stärkeren Ausprägung ergeben. Dadurch wird die Komplexität reduziert und die Übersichtlichkeit erhöht.

Das Ziel dieser Bewertung ist es, Aussagen über die Einkommensveränderung für Haushalte in den obengenannten Szenarien zu treffen. Darüber hinaus werden monetäre Effekte, die zu direkten und indirekten Rebound-Effekte führen können, aufgezeigt.

4.1 Methodik, Datengrundlage und Annahmen

Die ökonomische Bewertung erfolgt auf Grundlage der Annuitätenmethode mit Restwertbetrachtung, verglichen werden die Stromgestehungskosten (LCOE – Levelized Cost of Electricity) und die Einkommensdifferenzen zwischen verschiedenen Szenarien. In Anlehnung an Kost et al. (2021) werden zur Kalkulation der Annuitäten die Zahlungsströme (Investitionen, Einnahmen und Ausgaben) auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt diskontiert und anschließend mit dem Annuitätenfaktor multipliziert. Hierdurch wird der Wert der Szenarien in einer jährlich wiederkehrenden Zahlung in konstanter Höhe (hier: in €) ausgedrückt. Die Stromgestehungskosten beschreiben das Verhältnis zwischen der Annuität und dem durchschnittlichen, jährlichen Stromverbrauch (hier: in €/kWh) und können zum Vergleich der Szenarien und der Konzepte mit unterschiedlicher Dimensionierung und Stromverbrauch genutzt werden. Die Einkommensdifferenz ist die Differenz zwischen den Annuitäten von zwei Szenarien und erleichtert die Ergebnisinterpretation für die Haushaltsebene.

Die ökonomische Bewertung basiert auf den Ergebnissen der technischen Simulation (siehe Kapitel 2) sowie der Datengrundlage aus Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2.

Tabelle 4-1: Datengrundlage der ökonomischen Bewertung I
Quelle: Annahme sowie Kost et al. (2021), Welter (2021), BNetzA (2021a) und Experteninterview mit Energiedienstleister.

Rahmenbedingungen	Wert	Einheit	Quelle
Investitionszeitpunkt	Jan 2021	-	Annahme
Betrachtungszeitraum	20	Jahre	Kost et al. (2021)
Ersatzbeschaffung (PV)	30	Jahre	Kost et al. (2021)

Ersatzbeschaffung (BAT)	15	Jahre	Kost et al. (2021)
Eigenkapitalanteil	20%	-	Kost et al. (2021)
Eigenkapitalzins	0,050	-	Kost et al. (2021)
Fremdkapitalzins	0,030	-	Kost et al. (2021)
Kalkulationszins	0,027	-	-
Annuitätenfaktor a	0,065	-	-
Umsatzsteuer/MwSt	0,190	-	-
Investitionskosten	**Wert**	**Einheit**	**Quelle**
PV Invest (≈ 5 kWp)	1.500	€/kWp	Welter (2021)
PV Invest (≈ 10 kWp)	1.200	€/kWp	Welter (2021)
BAT Invest (≈ 5 kWh)	1.000	€/kWh	Welter (2021)
BAT Invest (≈ 10 kWh)	800	€/kWh	Welter (2021)
BAT Ersatzbeschaf-fung - Kostenfaktor	50%	-	Kost et al. (2021)
Betriebskosten	**Wert**	**Einheit**	**Quelle**
PV Betrieb	26	€/kWp	Kost et al. (2021)
BAT Betrieb	6	€/kWh	Kost et al. (2021) / Interview
iMsys Betrieb	40-100	€	BNetzA (2021)

Darüber hinaus wird mit einer EEG-Vergütung von 8,16 Cent/kWh (Stand EEG Januar 2021) und dem Förderprogramm „Stromspeicher Berlin“ von 300 €/kWh pro 1,2 kWp installierter PV-Leistung gerechnet, welches exemplarisch für Förderprogramme von Stromspeichern in den verschiedenen Bundesländern steht (SenWEB 2021; Frahm 2021a; Frahm 2021b). Für die Szenarien mit Netzstrombezug und Reststrombezug aus dem Netz werden die folgenden spezifischen Tarife verwendet.

Tabelle 4-2: Datengrundlage der ökonomischen Bewertung II
Quelle: Check24 (2021) – Stand von Januar 2021 in Berlin.

Ökostromtarif Strommenge	**< 2.000**	**< 3.000**	**< 3.500**	**< 4.000**	**< 4.500**	**< 5.000**	**> 5.000**	**kWh**
Grundpreis	13	13	14	16	17	17	20	€/Monat
Arbeitspreis	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	0,30	€/kWh
Bonus I	144	199	221	218	248	252	261	€
Bonus II	15 % der gesamten Stromkosten im 1. Jahr							€
Graustrom Strommenge	**rund 4.000**				**rund 6.000**			**kWh**
Grundpreis	9				9			€/Monat
Arbeitspreis	0,29				0,29			€/kWh
Bonus I	333				350			€

Die hier verwendeten Strompreise für Berlin können durch die durchschnittlichen Strompreise gemäß BNetzA (2021b) in ihrer allgemeinen Gültigkeit validiert werden, welche ähnlich ausgeprägt sind mit 31,66 Cent pro kWh (Öko-Strom) und 28,8 bis 31,22 Cent pro kWh (Graustrom). Durch den vergleichsweise geringen Unterschied zwischen Öko-Strom und Graustrom bezieht sich die ökonomische Bewertung im Vergleich zur ökologischen Bewertung ausschließlich auf den Netzbezug mit Öko-Strom.

Durch den Betrieb einer PV-Anlage mit gewinnbringender Einspeisung verfolgen Haushalte nach Steuerrecht eine unternehmerische Tätigkeit, auch wenn diese gewinnbringende Einspeisung bei Kleinanlagen gegebenenfalls nicht mehr pauschal unterstellt werden kann. Hierbei gibt es für den Umgang mit Einkommens- und Umsatzsteuer zwei Möglichkeiten: die Kleinunternehmer-Regelung oder den Vorsteuer-Abzug. Bei der Wahl des Vorsteuerabzugs ist ein Wechsel zur Kleinunternehmer-Regelung nach 5 Jahren möglich (Seltmann 2021). Die ökonomische Bewertung in diesem Arbeitspapier wird unter Anwendung der Kleinunternehmer-Regelung vollzogen – d.h. dass keine Umsatzsteuer für den Eigenverbrauch abgeführt werden muss.[7]

Darüber hinaus gilt die Annahme einer Inflationsrate von 1,2 % pro Jahr (Kost et al. 2021). Der Einfluss weiterer zentraler Indikatoren wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse betrachtet, hier aber nicht genauer ausgeführt. Die Sensitivitätsanalyse sowie eine Übersicht der Ergebnisse zur ökonomische Bewertung sind im Anhang einsehbar.

Im Folgenden werden Zahlungsstruktur, LCOE und Einkommensveränderung für die verschiedenen Szenarien anhand von Annuitäten dargestellt und bewertet. Die Formeln zur Berechnung sind im Anhang einsehbar.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Kosten der Stromerzeugung

Während die folgenden Abschnitte die LCOE und Einkommensveränderungen der Haushaltsebene betrachten, soll an dieser Stelle kurz auf die Kosten der Stromerzeugung aus Technologieperspektive eingegangen werden. Hierfür werden die Anlagenkosten in Beziehung zur gesamten Stromerzeugung gesetzt. Die folgenden Ergebnisse basieren auf konservativen Annahmen und sind hierdurch im oberen Bereich der Spannbreiten von Kost et al. (2021) zu verorten:

- PV (3,5 kWp): 0,12 €/kWh
- PV (3,5 kWp) + BAT (3,5 kWh): 0,18 €/kWh
- PV (10 kWp): 0,09 €/kWh
- PV (10 kWp) + BAT (10 kWh): 0,14 €/kWh

Die Ergebnisse der Berechnung können unter anderem wie folgt interpretiert werden. Die im Vergleich zum Netzbezug geringen Kosten mit 0,09 bis 0,18 €/kWh können bei Haushalten zu einem weniger überlegten Konsum von Energie führen, wodurch der Gesamtverbrauch steigt. Hierdurch könnte entweder das Stromsystem mehr belastet werden oder der Haushalt

[7] Die Alternative des Vorsteuerabzugs wurde auch betrachtet. Sie führt zwar zu Ergebnissen mit geringeren LCOE, die Interpretation der Ergebnisse verändert sich hierdurch jedoch nicht – letztendlich ist zu beobachten, dass die Vorteilhaftigkeit des Vorsteuerabzugs bei Szenarien mit größeren Anlagendimensionierungen und weniger Eigenverbrauch zunimmt.

speist weniger erneuerbaren Strom in das Netz ein als es möglich wäre. Andererseits sind die oben beschriebenen Kosten höher als die Einspeisevergütung von 0,08 €/kWh. Dies bedeutet, dass für einen Haushalt die Einspeisung von eigenerzeugten Strom ins Netz nicht wirtschaftlich ist, wie von Weiß et al. (2021) bereits thematisiert. Im Beispiel mit der PV-Anlage (3,5 kWp) würde ein Haushalt für jede eingespeiste kWh Strom netto 0,04 € zahlen anstelle daran zu verdienen. Dies birgt das Risiko von Rebound-Effekten, da der Eigenverbrauch als wirtschaftlich sinnvoller wahrgenommen werden kann.

Ritter und Bauknecht (2021) konstatieren, dass ein PV-Betrieb ohne Eigenverbrauch für Anlagengrößen bis 100 kWp in Deutschland aktuell nicht wirtschaftlich ist. Darüber hinaus berechnen sie für Kleinanlagen mit 5 kWp einen notwendigen Eigenverbrauchsanteil von rund 27 % unter der Annahme konstanter Strompreise und durchschnittlichen Stromgestehungskosten der Anlage.

4.2.2 Wechsel von Netzbezug zu Prosuming

In diesem Abschnitt wird der Wechsel von Netzbezug (Ökostrom) zu Prosuming in Kombination mit Ökostrom betrachtet. Hierbei wird eine Dimensionierung von 3,5 kWp (PV) und 3,5 kWh (BAT) angenommen. Der Wechsel zu Prosuming geht mit einer Veränderung der Zahlungsstruktur einher, wie Abbildung 4-1 zeigt (hier Referenz genannt). Bei der Referenz mit PV sinken die laufenden Ausgaben leicht, da weniger Strom bezogen werden muss, und Einnahmen durch die Einspeisung von Überschussstrom erzielt werden. Zusätzlich entsteht eine Annuität durch die Investitionskosten der Anlage. Bei der Referenz mit PV + BAT können die laufenden Ausgaben durch den erhöhten Eigenverbrauch und dem daraus folgenden verminderten Netzbezug gegenüber Referenz mit PV noch stärker reduziert werden. Durch die entsprechend geringere Menge an Überschussstrom sinken jedoch auch die laufenden Einnahmen. Die Investitionskosten steigen durch die zusätzliche Anschaffung des Speichers an. Insgesamt verschiebt sich die Zahlungsstruktur hierbei noch stärker von laufenden Einnahmen und Ausgaben zu Investitionen. Die gesamten LCOE können in beiden Szenarien im Vergleich zum Netzbezug mit Ökostrom reduziert werden. Durch die Umverteilung der Kostenstruktur von laufenden Einnahmen und Ausgaben zu Investitionen fallen die LCOE ohne Investitionen (Eigenkapital-Anteil - EK) noch geringer aus. Der Unterschied ist jedoch durch die geringe Eigenkapitalquote nicht stark ausgeprägt:

- Differenz zwischen LCOE von 0,37 zu 0,34 bzw. 0,33 €/kWh. Strom kann günstiger konsumiert werden.
- Differenz zwischen LCOE ohne Investitionen (EK-Anteil) von 0,37 zu 0,32 bzw. 0,30 €/kWh. Strom kann günstiger konsumiert werden.

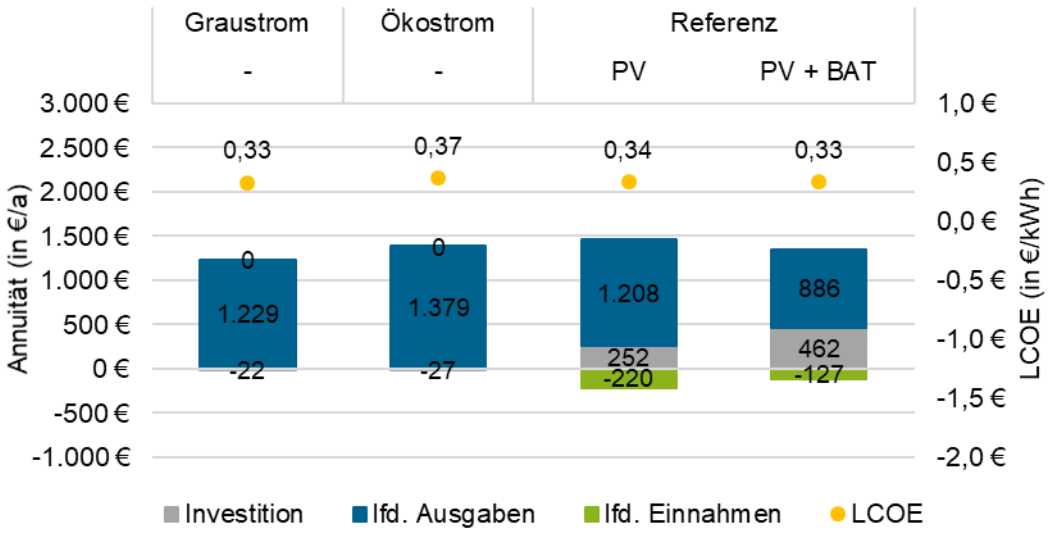

Abbildung 4-1: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Wechsel von Netzbezug zu Prosuming
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung[8]

Obwohl die Erzeugungskosten der Anlagen in diesem Szenario für den Strom bei 0,12 €/kWh (PV) bzw. 0,18 €/kWh liegen, fällt der Effekt auf die Veränderung der LCOE für die Haushaltseben gering aus. Dies liegt an der aktuellen negativen Differenz zwischen Einspeisevergütung und Stromgestehungskosten der Anlage, wie in 4.2.1 beschrieben. In diesem Beispiel kostet eine kWh durch PV 0,12 €, wird aber bei der Einspeisung ins Netz nur mit 0,08 € vergütet. Bei der Berechnung der LCOE für die Haushaltsebene wird dieser negative Betrag aus der Einspeisung mit bilanziert und führt zu dessen Steigerung.

Im Folgenden werden die Auswirkungen eines Wechsels von Netzbezug mit Ökostrom zum Prosuming beschrieben und in Abbildung 4-2 dargestellt:[9]

- Mehreinkommen durch positive Einkommensdifferenz bei den laufenden Einnahmen und Ausgaben von +196 bzw. +258 € pro Jahr.
- Mehreinkommen durch positive Einkommensdifferenz bei den gesamten Zahlungsströmen (mit Investitionen) von +112 bzw. +130 € pro Jahr.

[8] Die negative Annuität bei den Szenarien Netzbezug mit Grau- und Ökostrom entsteht durch die Bonuszahlungen der Tarife.
[9] Hierbei wird der Zusammenhang zwischen LCOE und Einkommensveränderung deutlich. Die Differenz der LCOE multipliziert mit dem Stromverbrauch ergibt die Einkommensdifferenz der gesamten Zahlungsströme, korrespondierend für LCOE ohne Zahlung in t=0 und Einkommensdifferenz der laufenden Einnahmen und Ausgaben.

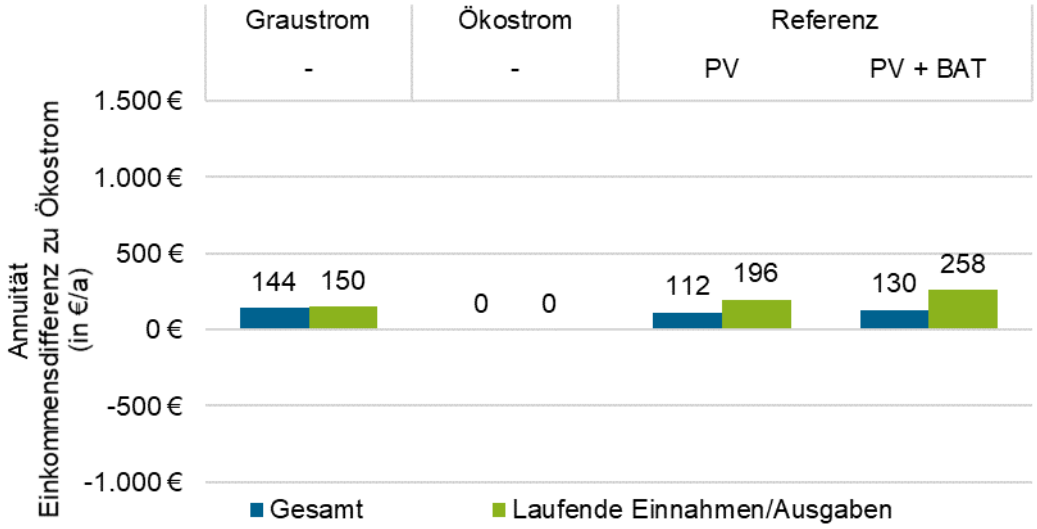

Abbildung 4-2: Einkommensveränderung – Wechsel von Netzbezug zu Prosuming
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Auffällig ist, dass der Wechsel zu Referenz mit PV + BAT bei dieser kleinen Anlagendimensionierung vorteilhafter ist als der Wechsel zu Referenz mit PV. Hier überwiegt der erhöhte Eigenverbrauch die entgangene Vergütung aus der verringerten Einspeisung des Überschussstroms sowie die gestiegenen Investitionskosten. Ansonsten zeigt die ökonomische Bewertung, dass beim Wechsel von Netzbezug Ökostrom zu sowohl Referenz mit PV als auch zu Referenz mit PV + BAT geringere LCOE sowie positive Einkommensdifferenzen der laufenden Einnahmen/Ausgaben (ohne EK-Anteil der Investitionskosten) und der gesamten Zahlungsströme erzielt werden können.

Beim Wechsel von Netzbezug mit Graustrom auf Prosuming in Kombination mit Graustrom fallen die Einkommensdifferenz der laufenden Einnahmen und Ausgaben (ohne EK-Anteil der Investitionskosten) geringer aus (+46 bzw. +108 €) und die gesamte Einkommensdifferenz sogar leicht negativ (-32 bzw. -14 €). Durch diesen Wechsel entsteht also ein geringer Einkommensverlust.

4.2.3 Prosuming mit Verhaltensveränderung

In diesem Abschnitt wird Prosuming als Referenzszenario mit verschiedenen Verhaltensveränderungen berechnet und bewertet. Hierdurch sollen ökonomische Effekte beschrieben werden, die nach einem Wechsel zu Prosuming durch Verhaltensänderungen entstehen können. Die Dimensionierung der Anlagen ist in diesen Konzepten unverändert mit 3,5 kWp (PV) und 3,5 kWh (BAT).

Die modellierten Verhaltensveränderungen wirken sich hauptsächlich auf die laufenden Einnahmen und Ausgaben aus. Ein geringer Effekt auf die Investitionskosten kann durch eine Veränderung der Bonuszahlungen im Rahmen der Stromtarife entstehen. Während im Suffizienz-Szenario durch einen geringeren Verbrauch und die hierdurch erhöhte Einspeisung die Ausgaben sinken und Einnahmen steigen, dreht sich dieser Effekt in den Rebound-Szenarien um. Die Lastverschiebung führt zu einem erhöhten Eigenverbrauch, wodurch sowohl die Ausgaben als auch die Einnahmen im Vergleich zu den Szenarien Referenz leicht sinken. Die LCOE variieren durch den veränderten Stromverbrauch in den Szenarien und befinden sich in einer Spanne zwischen 0,31 - 0,34 €/kWh, wobei der Unterschied zwischen der Betrachtung mit und ohne Investitionen (EK-Anteil) sehr gering ist. Interessant ist aber, dass die LCOE bei Lastverschiebung sogar unter die LCOE von Graustrom fallen (siehe 4.2.1):

- Differenz zwischen LCOE von 0,34 zu 0,32 (PV) bzw. 0,33 zu 0,31 (PV+BAT) €/kWh.
- Differenz zwischen LCOE ohne Investitionen (EK-Anteil) von 0,32 zu 0,29 (PV) bzw. 0,30 zu 0,28 (PV+BAT) €/kWh.

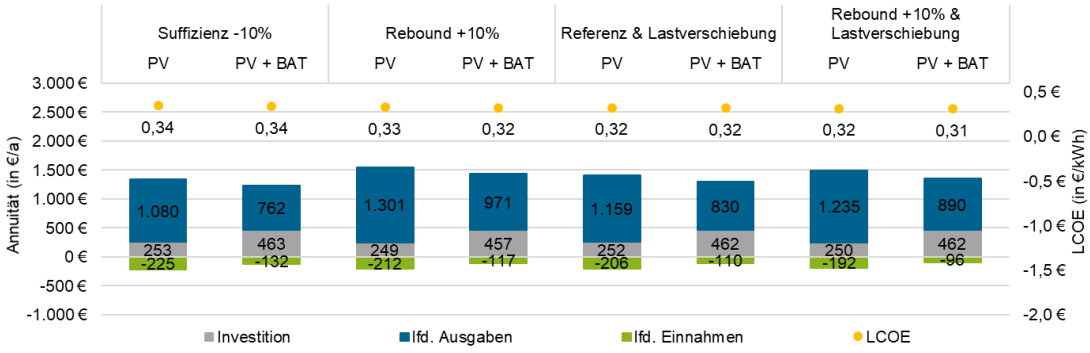

Abbildung 4-3: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit Verhaltensveränderung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Die in Abbildung 4-4 dargestellten Einkommensveränderungen beziehen sich auf die Fälle Referenz mit PV und Referenz mit PV + BAT. Es wird deutlich, dass die Veränderungen bei Betrachtung von PV und PV + BAT fast gleich ausfallen und bei den einzelnen Technologien zwischen der Berücksichtigung von laufenden Einnahmen und Ausgaben sowie von den gesamten Zahlungen (mit EK-Anteil der Investition) annähernd identisch sind. Im Suffizienz-Szenario ergibt sich eine Einkommensdifferenz von +131 bzw. +129 € pro Jahr und im Rebound-Szenario von -100 bzw. -90 € beträgt. Die leichten Einkommenszugewinne bei der Lastverschiebung drehen sich in der Kombination mit Rebound-Effekten wieder ins Negative.

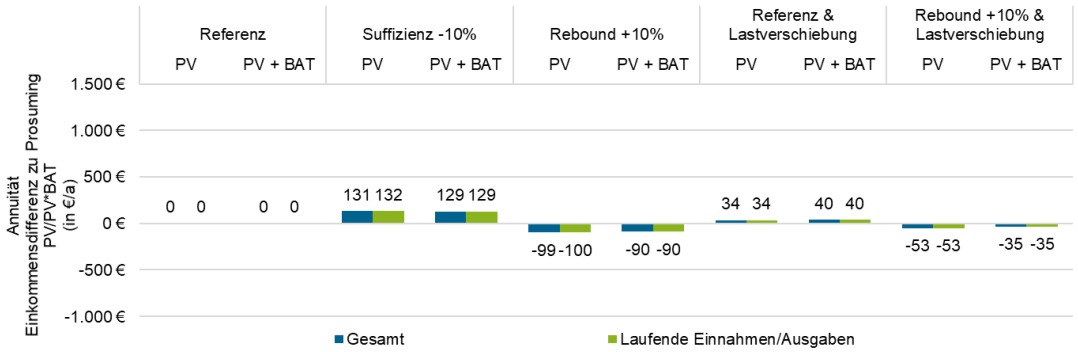

Abbildung 4-4: Einkommensveränderung – Prosuming mit Verhaltensveränderung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Während durch Suffizienz und Lastverschiebung nach dem Wechsel zum Prosuming weiteres Mehreinkommen generiert werden kann, führen Rebound-Effekte zu einer Verminderung des Einkommens.

Bei Betrachtung des Wechsels von Netzbezug Ökostrom zu Prosuming aus Kapitel 4.2.2 in Kombination mit Rebound-Effekten wird deutlich, dass die Gesamtauswirkungen auf die Einkommen mit +13 (PV) bzw. +40 (PV+BAT) € pro Jahr geringfügig sind, da die Rebound-Effekte Einkommenszugewinne vom Wechsel zum Prosuming annähernd wieder kompensieren.

4.2.4 Prosuming mit größerer Dimensionierung und zusätzlichen Großverbrauchern

In diesem Abschnitt werden einerseits die ökonomischen Auswirkungen einer größeren Anlagendimensionierung berechnet und andererseits die Effekte von zusätzlichen Geräten, wie z.B. E-Rad und Sauna. Beide Untersuchungsgegenstände sind aufgrund der aktuellen Entwicklungen bei Haushalten zu größeren Anlagen und mehr Geräten relevant. Zuerst werden die Kostenstrukturen beider Szenarien einzeln präsentiert, anschließend die Einkommensveränderung in einer gemeinsamen Abbildung.

Die größere Dimensionierung von PV und PV + BAT verstärkt die Effekte, die sich bereits beim Wechsel von Netzbezug zu Prosuming abgezeichnet haben, wie in Abbildung 4-5 dargestellt:

- Steigerung der Investitionskosten
- Steigerung der laufenden Einnahmen

Die laufenden Ausgaben verhalten sich ambivalent. Sie steigen bei Referenz mit PV und sinken bei Referenz mit PV + BAT.

Bei der Betrachtung der LCOE zeigt sich, dass anders als bei den kleinen Anlagen bei größerer Dimensionierung ein Wechsel zu Referenz mit PV (0,32 €/kWh) wirtschaftlicher zu sein scheint als zur Referenz mit PV + BAT (0,34 €/kWh). Die Investitionskosten des Speichers werden ab einer bestimmten Kapazität nicht mehr durch den erhöhten Eigenverbrauch und die steigende Einspeisung ausgeglichen.

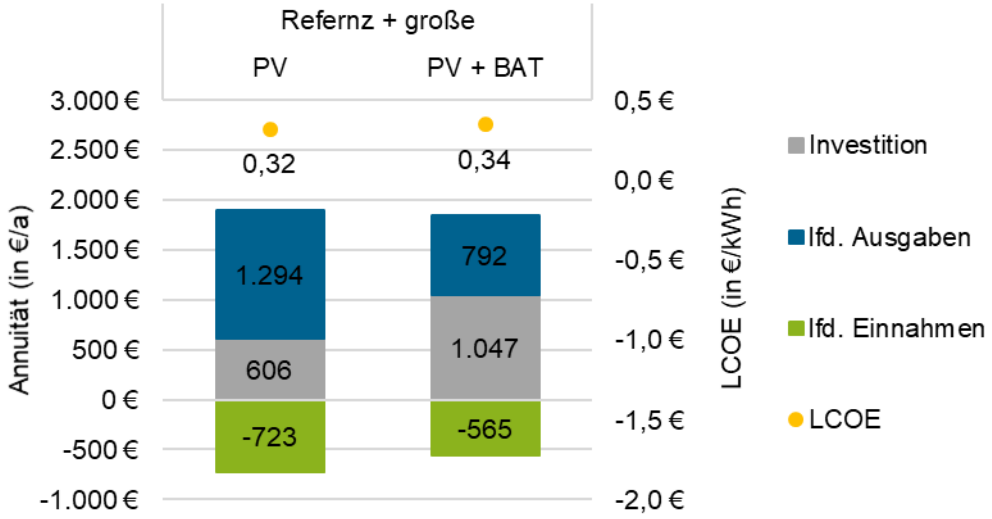

Abbildung 4-5: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit größerer Dimensionierung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung.

Die Bewertung der Szenarien mit zusätzlichen Geräten erfolgt ohne Berücksichtigung der Kosten für die Geräte selbst. In der Darstellung zur Kostenstruktur in Abbildung 4-6 werden ausschließlich Kosten für die Erzeugungsanlagen betrachtet. Aus diesem Grund bleiben die Investitionskosten im Vergleich zu den vorherigen Szenarien (Prosuming und Prosuming mit größerer Dimensionierung) konstant.

Im Vergleich zum Szenario Referenz mit größerer Dimensionierung ist eine Steigerung der laufenden Ausgaben für den erhöhten Netzbezug zu verzeichnen sowie eine Reduktion der laufenden Einnahmen durch verminderte Netzeinspeisung. Insgesamt erhöht sich die Eigenverbrauchsquote durch die zusätzlichen Geräte. Diese Kostenentwicklung führt in der Kombination mit dem höheren Stromverbrauch zu niedrigeren LCOE als beim Netzbezug oder bei Referenz mit großer Dimensionierung. Es werden z.B. LCOE von 0,29 bzw. 0,27 €/kWh für den Pool als zusätzliches Gerät erreicht. Dieser Effekt wurde in Kapitel 4.2.1 bereits beschrieben.

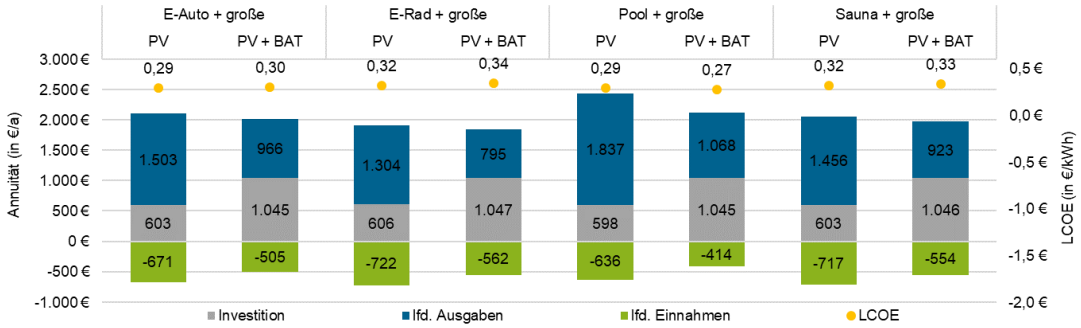

Abbildung 4-6: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit zusätzlichen Geräten und größerer Dimensionierung
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Die folgende Abbildung 4-7 stellt die Einkommensveränderung der Szenarien im Vergleich zum Anwendungsfall Referenz Prosuming dar. Der Wechsel zu Anlagen mit größerer Dimensionierung hat geringe Effekte auf die Einkommenssituation:

- Referenz + große PV: Mehreinkommen durch positive Einkommensdifferenz bei den laufenden Einnahmen und Ausgaben (+139 € pro Jahr) sowie den gesamten Zahlungsströmen (+62 € pro Jahr)
- Referenz + große PV + BAT: Mehreinkommen durch positive Einkommensdifferenz bei den laufenden Einnahmen und Ausgaben (+76 € pro Jahr) sowie Einkommensreduktion durch negative Einkommensdifferenz bei den gesamten Zahlungsströmen (-52 € pro Jahr)

Die oben beschriebene Veränderung der Vorteilhaftigkeit durch die höheren Investitionskosten spiegelt sich auch in der Einkommensveränderung der Haushalte wieder.

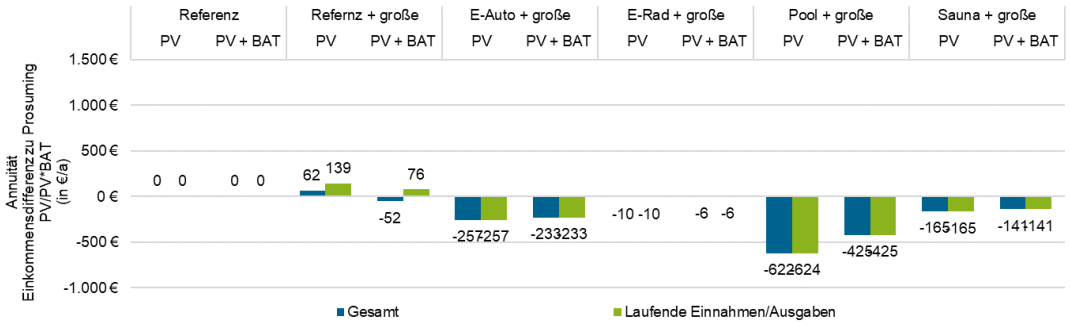

Abbildung 4-7: Einkommensveränderung – Prosuming mit größerer Dimensionierung und zusätzlichen Geräten
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 10 kWp PV I 10 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Die Auswirkungen auf die Einkommensdifferenzen zwischen den Szenarien mit großer Dimensionierung und den Szenarien mit zusätzlichen Geräten sind für laufende Einnahmen und Ausgaben (ohne EK-Anteil der Investitionskosten) sowie die gesamten Zahlungsströme identisch. Insgesamt zeigt sich, dass zusätzliche Geräte zu einer negativen Einkommensdifferenz führen und folglich zu einer Reduktion des Einkommens von Haushalten:

- E-Auto: -257 bzw. -233 € pro Jahr
- E-Rad: -10 bzw. -6 € pro Jahr
- Pool: -622 bzw. -425 € pro Jahr
- Sauna: -165 bzw. -141 € pro Jahr

4.2.5 Finanzierung

Neben den beschriebenen Szenarien hat auch die Art der Finanzierung einen Einfluss auf die Kostenverteilung und letztendlich auf die ökonomische Bewertung. Hierfür ist einerseits das Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital (EK/FK) von Interesse und andererseits die Höhe der Verzinsung. Abbildung 4-8 illustriert für die Szenarien Referenz verschiedene Finanzierungskonditionen. Der FK-Zins bleibt konstant bei 3 %. Während die Szenarien mit 5 % EK-Zins eher unternehmerische Tätigkeiten widerspiegeln, könnten Haushalte mit deutlich niedrigeren Erwartungen an die Verzinsung des EK Investitionen tätigen.

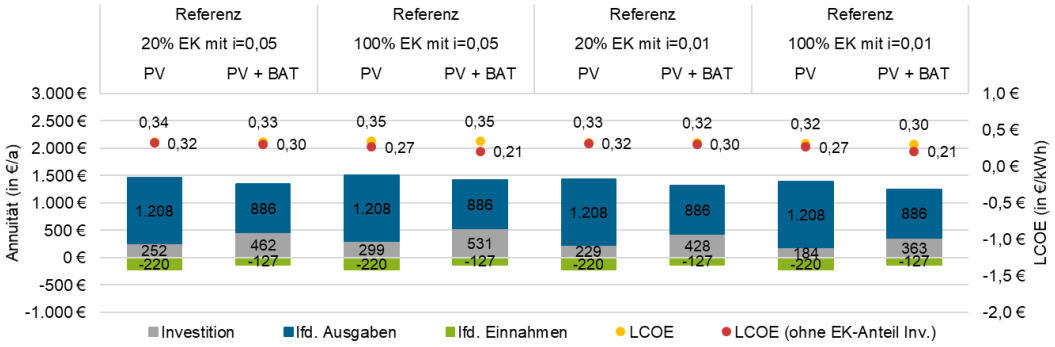

Abbildung 4-8: Zahlungsstruktur und Stromgestehungskosten – Prosuming mit unterschiedlichen Finanzierungskonditionen
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Die Variation der Finanzierungskonditionen verdeutlich zwei Effekte. Erstens führt die ausschließliche Finanzierung mit EK zu einer Reduktion der LCOE (ohne EK-Anteil der Investition). Wie auch die LCOE der Anlagen (Kapitel 4.2.1) könnte dies dazu führen, dass die Kosten für jede zusätzliche kWh Strom als gering wahrgenommen werden. Die hohen Anfangsausgaben (Investitionskosten) in t=0 werden in den folgenden Perioden nicht mehr dem Stromverbrauch zu gerechnet. Zweitens wirkt sich die Verzinsung auf die LCOE aus. Eine niedrigere Verzinsung hat auch niedrige LCOE zur Folge. Abbildung 4-9 stellt die Einkommensveränderung im Vergleich zum Netzbezug dar.

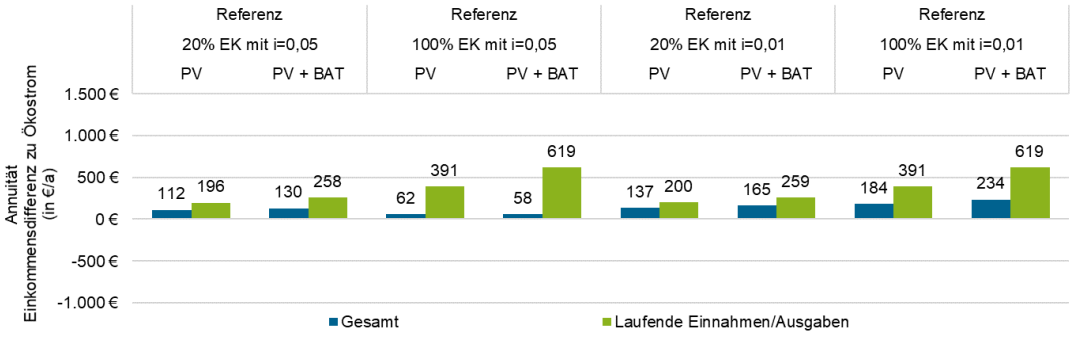

Abbildung 4-9: Einkommensveränderung – Wechsel von Netzbezug zu Prosuming mit unterschiedlichen Finanzierungkonditionen
Annahme: 3 Personen-Haushalt I 3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT
Quelle: eigene Darstellung

Auch mit Blick auf die Einkommensveränderung wirken sich der Grad der EK-Verzinsung sowie die Zinshöhe aus:

- Zinshöhe: Durch die niedrigeren EK-Zinsen (1 %) nimmt die Vorteilhaftigkeit des Wechsels zu Prosuming zu. Der Effekt durch die Zinshöhe wirkt sich hierbei durch die geringere Abzinsung der Restwerte stärker auf das Szenario Referenz mit PV + BAT aus. Dies ist besonders deutlich im Fall der Finanzierung mit 100 % EK:
  - Referenz mit PV: +62 zu +184 € pro Jahr
  - Referenz mit PV + BAT: +58 zu +234 € pro Jahr
- Investition und Tilgung: Der Unterschied zwischen den Einkommensdifferenzen von laufenden Einnahmen und Ausgaben (grün) und gesamten Zahlungen (blau) nimmt stark zu. Durch die 100 prozentige EK-Finanzierung fallen keine laufenden Ausgaben für Kredittilgung an, wodurch die Einkommensdifferenz der laufenden Einnahmen und Ausgaben stark positiv werden:
  - Referenz mit PV: +196 zu +391 € pro Jahr
  - Referenz mit PV + BAT: +258 zu +619 € pro Jahr

5 Fazit

In diesem Arbeitspapier wurde untersucht, wie sich Rebound-Effekte in Prosumerhaushalten auf die Energieflüsse auswirken und welche ökologischen und ökonomischen Effekte dies auf Haushaltsebene zur Folge hat. Hierfür wurden zunächst die Energieflüsse der Prosumerhaushalte und damit auch die Einspeisung und der Netzbezug simuliert. Dabei wurden folgende Szenarien zur Verbrauchsänderung untersucht: Mehrverbrauch von 10 bzw. 20 % durch Rebound-Effekte, Minderverbrauch von 10 % durch Suffizienzmaßnahmen sowie die zusätzliche Installation unterschiedlicher Großverbraucher. Auf Basis dieser Energieflüsse wurden dann die ökologischen Wirkungen des Haushaltsstromverbrauchs sowie die ökonomische Auswirkung untersucht. Als Hintergrund wurden in einem ersten Schritt die Wirkungen des Prosuming ohne Rebound-Effekte (Referenz) dargestellt. Nachfolgend werden die zentralen Ergebnisse des Arbeitspapiers zusammengefasst und diskutiert.

Prosumerhaushalte beziehen weniger Strom vom Netz

Prosumerhaushalte leisten in Summe einen wichtigen Beitrag zur Energiewende. Selbst wenn der Haushalt nach der Anschaffung einer PV-Anlage den allgemeinen Strombedarf um 20 % erhöht, beziehen sie dennoch weniger Strom vom Netz als vor der Anschaffung. Von daher sind ggf. auftretende Rebound-Effekte kein Grund gegen die Installation von PV-Anlagen durch Bürger*innen. Werden Prosumerhaushalte untereinander verglichen wird allerdings deutlich, dass Mehrverbrauch nur zum Teil von der eigenen Anlage gedeckt werden kann und durch den Mehrverbrauch gleichzeitig weniger Strom ins Netz eingespeist wird. Der Mehrverbrauch verringert somit die positiven Effekte des Prosumings. In dem vorliegenden Arbeitspapier wurde untersucht, wie sich das ökologisch und ökonomisch auf Haushaltsebene auswirkt.

Der Effekt der Abregelung ist gering und wird durch Mehrverbrauch kaum verringert

Eine Motivation von Prosumern, gerade in der Mittagszeit Strom großzügig zu nutzen, ist die Vorstellung, dass der Strom sonst sowieso zu einem erheblichen Anteil abgeregelt wird (Dütschke et al. 2021). In der Praxis führen aber Abregelungen nur zu einer geringen Reduktion des erzeugten PV-Stroms. Die Simulationen zeigen, dass diese Abregelung durch einen Mehrverbrauch zwar gemindert werden kann, die Reduktion aber mit weniger als 20 kWh in einer Größenordnung bewegt, die im Vergleich zum Gesamtstrombedarf von rund 3.500 kWh marginal ist.

Lastverschiebung kann Netzbezug deutlich verringern

Einen positiven Effekt auf die Höhe des Netzbezugs hat eine gezielt gesteuerte Verschiebung der Lasten in Zeiten der Stromproduktion. Dies ermöglicht es den Netzbezug zu verringern. Im Vergleich zu einem Prosumerhaushalt ohne smarte Steuerung liegt der Netzbezug sogar unter dem eines Prosumerhaushalts mit 10 % Mehrverbrauch und smarter Steuerung. Allerdings wird hier durch den Mehrverbrauch entsprechend weniger Strom ins Netz eingespeist und bei höheren Rebound-Effekten reicht die smarte Steuerung nicht mehr aus, um den Netzbezug im Vergleich zu einem nicht smarten Prosumerhaushalt niedriger zu halten.

Zusätzliche Großverbraucher führen zu mehr Netzbezug

Bei allen betrachteten Großverbrauchern (Pool, Sauna, E-Auto, E-Rad) zeigen die Ergebnisse, dass im Vergleich zu einem Referenz-Prosumerhaushalt nur ein Teil der zusätzlich

benötigten Energie durch die eigene PV-Anlage gedeckt werden kann. Sehr energieintensive Verbraucher, wie die Warmwasserbereitung für einen Pool, können sogar dazu führen, dass mehr Storm vom Netz bezogen wird als bei einem Referenzhaushalt ohne PV-Anlage.

Ökologische Bewertung von Prosuming auf Haushaltsebene abhängig vom Stromanbieter

Bei der ökologischen Betrachtung des Stromverbrauchs zeigt sich, dass die Bewertung vor allem davon abhängt, welcher Strom bezogen wird. Denn vor allem der zusätzlich bezogene Netzstrom hat Einfluss auf die ökologischen Effekte. Sind bei dem Bezug von Ökostrom die Auswirkungen von Rebound-Effekten deshalb eher gering, werden diese bei Graustrombezug doch deutlich.

Zusätzliche Großverbraucher führen zu höheren Emissionen

Zusätzliche Großverbraucher führen durch einen erhöhten Netzbezug, vor allem bei dem Bezug von Graustrom zu hohen zusätzlichen Emissionen. Besonders hervorzuheben sind die Auswirkungen einer zusätzlich angeschafften Sauna, welche für sehr hohe Emissionen sorgt, da der zusätzliche Strom eher dann genutzt wird, wenn die PV-Anlage keinen grünen Strom produziert, nämlich am Abend. Der Pool, der noch höhere Verbräuche aufweist, kann dagegen zu einem höheren Anteil mit PV-Strom beheizt werden, so dass die ökologische Bewertung auf der Haushaltsebene hier besser ausfällt.

Batterien und eine größere Dimensionierung der Anlagen reduzieren trotz Rebound-Effekten den zusätzlichen Netzbezug

Bei der Betrachtung von Haushalten mit Batterien wird deutlich, dass diese das Potenzial haben die ökologischen Auswirkungen von Rebound-Effekten aufgrund des zusätzlichen Netzbezugs abzumildern. Dies liegt vor allem daran, dass sie die Möglichkeit schaffen, den selbst erzeugten grünen Strom auch dann zu nutzen, wenn er nicht erzeugt werden kann. Zwar gehen auch mit der Herstellung von Batterien ökologische Effekte einher, diese sind aber geringer als die Vorteile, die sich bieten, wenn mehr selbst erzeugter PV Strom nutzbar gemacht wird. Eine größere PV-Dimensionierung sorgt ebenfalls dafür, dass mehr selbst erzeugter PV Strom im Haushalt genutzt werden kann. Dies führt auch zur Abschwächung von ökologischen Auswirkungen von Rebound-Effekten.

Zusätzlich verbrauchter Strom fehlt dem Energiesystem

Auch wenn der ökologische Effekt des Mehrverbrauchs an Strom durch Batterien oder eine größere Dimensionierung abgemildert werden kann, fehlt dem Energiesystem der eingespeiste PV-Strom. Wenn mehr Strom im Haushalt selbst verbraucht wird, kann auch weniger eingespeist werden und der deutsche Strommix enthält mehr fossile Energieträger als notwendig. In diesem Arbeitspapier wurde nur der Stromverbrauch bewertet, der eingespeiste PV-Strom bzw. der durch diesen verdrängten Strom dagegen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus ist für eine umfassende Bewertung der ökologischen Wirkung auch die Einspeisung und deren Reduktion durch den Mehrverbrauch im Haushalt zu berücksichtigen. Deshalb werden die ökologischen Effekte für das Stromsystem in einem separaten Arbeitspapier analysiert (Kegel et al. 2022).

Prosuming führt zu Mehreinkommen für Haushalte

Der Wechsel von Netzbezug zu Prosuming führt häufig zu geringeren Stromgestehungskosten und in der Folge bei unverändertem Stromverbrauch zu einer Steigerung des Haushaltseinkommens. Dabei sinken teilweise die laufenden Kosten deutlich stärker als die Gesamtkosten, so dass die wahrgenommenen Kostensenkungen noch höher ausfallen können.

Ökonomische Auswirkungen sind abhängig von der Anlagendimensionierung

Bei kleinen Anlagendimensionierungen ist die Einkommensdifferenz vorteilhafter für Prosuming mit Batterie im Vergleich zu Prosuming ohne Batterie. Die Auswahl von Anlagen mit größerer Dimensionierung führt dazu, dass Prosuming ohne Batterie vorteilhafter wird als Prosuming mit Batterie. Die Gründe hierfür sind u.a. die hohen Investitionskosten der Batterie sowie der bereits hohe Eigenverbrauchsanteil bei einer großen PV-Anlage.

Rebound-Effekte und zusätzliche Geräte verursachen Mehrkosten für Haushalte

Die Ergebnisse zeigen, dass der erhöhte Stromverbrauch durch Rebound-Effekte und durch die Anschaffung von zusätzlichen Geräten zu einer Reduktion des Einkommens von Haushalten führt. Der Mehrverbrauch durch Verhaltensänderungen und zusätzliche Geräte führt aber auch zu sinkenden Stromgestehungskosten, wodurch jede zusätzlich verbrauchte Stromeinheit günstiger wird.

Im Gegensatz hierzu führen sowohl Suffizienz durch reduzierten Stromverbrauch als auch Lastverschiebung durch erhöhten Eigenverbrauch und reduzierten Stromverbrauch zu einer Steigerung des Haushaltseinkommens. Die Stromgestehungskosten steigen jedoch in beiden Szenarien durch den reduzierten Stromverbrauch an.

Die Veränderung der Stromgestehungskosten kann tendenziell bei sparsamen Haushalten die Sparsamkeit verstärken, da die Kosten für jede weitere Einheit Strom mit sinkendem Stromverbrauch steigen. Ebenso kann andersrum wenig effizientes Verhalten unterstützt werden, wenn jede Stromeinheit wie bei steigendem Verbrauch günstiger wird.

Finanzierungskonditionen beeinflussen die ökonomischen Auswirkungen

Die ökonomische Bewertung des Prosumings ist abhängig von der Art der Finanzierung. Eine Finanzierung mit Eigenkapital führt zu einer Verlagerung großer Kostenbestandteile in das Anfangsjahr des Betrachtungszeitraums und entsprechend geringen laufenden Kosten.[10] Eine Finanzierung mit Fremdkapital führt aufgrund der jährlichen Zinszahlung dagegen zu einer Angleichung der Einkommensdifferenzen von laufenden Einnahmen sowie Ausgaben und den gesamten Zahlungen über den gesamten Finanzierungszeitraum hinweg, da auch die Investitionskosten über mehrere Jahre abbezahlt werden. Darüber hinaus führen niedrige Zinsen (z.B. durch niedrige Erwartungen an die Eigenkapitalverzinsung von Haushalten) in der Investitionsrechnung zu geringeren Stromgestehungskosten und höheren Einkommenszugewinnen.

Monetäre Rebound-Effekte durch Prosuming?

Die Betrachtung der ökonomischen Wirkung des Prosuming zeigt, dass aufgrund sinkender laufender Kosten sowie teilweise der Stromgestehungskosten monetäre Rebound-Effekte durch eine wahrgenommene oder reale Steigerung des Haushaltseinkommens auftreten

[10] Hierdurch kann die Wahrnehmung von geringen Kosten für den Stromverbrauch entstehen, da die Investitionskosten im „mental Accounting“ nicht auf die folgenden Jahre verteilt werden. Dies kann zu der Einschätzung von einem höheren Monatseinkommen und zu Mehrkonsum führen.

können. Das tatsächliche Auftreten ist aber davon abhängig, wie Verbraucher*innen das wahrgenommene oder tatsächliche Mehreinkommen verwenden.

Weiterer Forschungsbedarf

Unsere Untersuchungen zeigen, welche Effekte Mehr- und Minderverbrauch bei Prosumerhaushalten für die Energieflüsse sowie für die ökologische Bewertung des Stromverbrauchs der Haushalte und deren ökonomische Situation haben können. Insgesamt sind die Effekte dabei abhängig von der Dimensionierung der Anlagen sowie den konkreten Verhaltensänderungen und Veränderungen der Geräteausstattung. Welche Veränderungen in der Praxis auftreten sollte noch eingehender durch Erhebungen untersucht werden. Insbesondere ist dabei der Zusammenhang zwischen Mehrverbrauch und Sektorkopplung vertiefend zu betrachten, da die ökonomische wie ökologische Wirkung des Mehrverbrauchs hiervon stark abhängt. So ändert sich die Bewertung, wenn durch den Mehrverbrauch weniger Gas zum Heizen oder Benzin zum Autofahren eingesetzt wird. Hierzu besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Bei der Frage nach den monetären Rebound-Effekten sollte durch weitere quantitative und qualitative Erhebungen zudem vertiefend die Wahrnehmung und das Konsumverhalten von Haushalten konkreter untersucht werden.

Implikationen in Richtung Politik und Zivilgesellschaft

Die Ergebnisse des Arbeitspapiers zeigen, dass Mehrverbrauch selbst bei Haushalten, die sich zu einem großen Anteil mit erneuerbarem Strom versorgen, zu negativen ökologischen und ökonomischen Effekten auf Haushaltsebene führt, insbesondere da der Mehrverbrauch zusätzlichen Netzbezug zur Folge hat. Dies zeigt, dass eine Erhöhung des Eigenverbrauchs für die Haushalte nicht vorteilhaft ist, wenn sie insgesamt zu Mehrverbrauch führt.

Die neue Ampelkoalition hat sich ehrgeizige Ziele für die Energiewende im Stromsektor gesetzt: Bis 2030 sollen 80 % des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Energien erzeugt werden (SPD et al. 2021). Dabei sind schon zusätzliche Strombedarfe durch die Sektorkopplung berücksichtigt. Das Erreichen dieser Ziele wird deutlich einfacher wenn der Haushaltsstromverbrauch zukünftig trotz steigender EE-Anteile sinkt und nicht steigt.

Deshalb muss bei den politischen Rahmenbedingungen sowie bei Informations- und Beratungsangeboten darauf geachtet werden, dass bei Prosumern kein sorgloser Umgang mit Strom unterstützt wird. Deshalb ist es wichtig, dass bei allen Maßnahmen darauf hingewirkt wird, dass die Energiewende durch ein Zusammenspiel aus Energieträgerwechsel und Verbrauchsreduktion gelingen kann.

6 Literaturverzeichnis

Babboe (2019): Lastenfahrrad Elektro - Vorteile und Spezifikationen. Website: https://www.babboe.de/lastenfahrrad-elektro (Zugriff: 3. Juli 2019).

BDEW (2021): Wie heizt Deutschland 2019? https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf (Zugriff: 14. Dezember 2021).

BMI (2018): Lithium Eisenphosphat (LFP) Batterie (pro 1kWh Speicherkapazität). Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=en&uuid=10c531c8-329c-479a-bbe9-17990ca5dfd6&version=20.19.120 (Zugriff: 13. September 2021).

BMW (2021): Technische Daten des BMW i3. Website: https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2021/bmw-i3-technische-daten.html#/tab-0&tl=sea-gl-GSP%20(BS)%20BMW%20i3-mix-miy-I01-sech-BMW%20i3-.-b-%2Bbmw%20%2Bi3%20%2Bautos-.-.&clc=sea-gl-GSP%20(BS)%20BMW%20i3-mix-bi01&gaw=sea:59052874707_kwd-456708303506 (Zugriff: 19. Oktober 2021).

BNetzA [Bundesnetzagentur] (2021a): Bundesnetzagentur - Messeinrichtungen / Zähler. Website: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Verbraucher/Metering/start.html (Zugriff: 9. September 2021).

BNetzA [Bundesnetzagentur] (2021b): Monitoringbericht 2020. Bonn: BNetzA. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht_Energie2020.pdf;jsessionid=E4CF05901BACB614759BC3CD65C47DA1?__blob=publicationFile&v=8 (Zugriff: 30. August 2021).

Carrie Armel, K., Abhay Gupta, Gireesh Shrimali und Adrian Albert (2013): Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity. *Energy Policy* 52: 213–234.

CHECK24 (2021): CHECK24 | Das Vergleichsportal (Stromvergleich). Website: http://www.check24.de/ (Zugriff: 9. September 2021).

co2online (2019): Stromspiegel für Deutschland 2019. https://www.stromspiegel.de/fileadmin/ssi/stromspiegel/Broschuere/Stromspiegel-2019-web.pdf.

Dromaque, Christophe und Rafaila Grigoriou (2018): The Role of Data for Consumer Centric Energy Markets and Solutions. https://esmig.eu/sites/default/files/report_-_the_role_of_data_for_consumer_centric_energy_markets_and_solutions_2019.pdf (Zugriff: 2. Juni 2021).

Dütschke, Elisabeth, Ray Galvin und Iska Brunzema (2021): Rebound and spillovers: Prosumers in transition. *Frontiers in Psychology* 12: 636109.

EnergieAgentur.NRW (2015): Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“. Stromverbrauchsanteile verschiedener Anwendungsbereiche in Ein- bis Fünf-Personen-Haushalten – 2015 und 2011 im Vergleich. https://energietools.ea-nrw.de/_database/_data/datainfopool/erhebung_wo_bleibt_der_strom.pdf.

fahrrad.de (2021): Studie zur allgemeinen Fahrradnutzung in Deutschland 2015. Website: https://www.fahrrad.de/on/demandware.static/-/Library-Sites-bikester/default/dw7f90cb9f/Blog/studie-fahrradnutzung-deutschland.pdf (Zugriff: 19. Oktober 2021).

Figgener, Jan, David Haberschusz, Sebastian Zurmühlen und Dirk Uwe Sauer (2021): Speichermonitoring BW - Schlussbericht (inhaltlicher Teil).

Frahm, Torben (2021a): Aktuelle Einspeisevergütung für Photovoltaik Anlagen 2021. Website: https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/wirtschaftlichkeit/einspeiseverguetung (Zugriff: 9. September 2021).

Frahm, Torben (2021b): Stromspeicher Förderung 2021 von KfW und Bundesländern. Website: https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/stromspeicher/foerderung (Zugriff: 17. September 2021).

Fraunhofer ISE [Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme] (2011): Projekt »Intelliekon« legt erste Ergebnisse zur Stromeinsparung durch Smart Metering vor. 1. Juli. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2011/ISE_PI_d_Intelliekon_Ergebnisse.pdf (Zugriff: 13. Februar 2020).

Gährs, Swantje, Hannes Bluhm, Elisa Dunkelberg, Jannes Katner, Julika Weiß, Peter Henning, Laurenz Herrmann und Matthias Knauff (2021): *Potenziale der Digitalisierung für die Minderung von Treibhausgasemissionen im Energiebereich*. Climate Change 74/2021. Berlin: Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenziale-der-digitalisierung-fuer-die-minderung.

Galvin, Ray, Johannes Schuler, Ayse Tugba Atasoy, Hendrik Schmitz, Matthias Pfaff und Jan Kegel (2022): A health research interdisciplinary approach for energy studies: Confirming substantial rebound effects among solar photovoltaic households in Germany. *Energy Research & Social Science* 86.

Hoffmann, Patrick, Günther Frey, Malte Friedrich, Stefan Kerber-Clasen, Jörg Marschall und Manfred Geiger (2012): Praxistest „Moderne Energiesparsysteme im Haushalt“. Forschungsbericht. Saarbrücken. https://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/EM_8_705.pdf (Zugriff: 2. Juni 2021).

Holzprofi24 (2021): Sauna Jutta mit bronzierter Glastür + 9 kW Saunaofen integr. Strg. Website: https://www.holzprofi24.de/sauna-jutta-mit-bronzierter-glastuer-9-kw-saunaofen-integr.-strg.-wo1499?gclid=CjwKCAjw0qOIBhBhEiwAyvVcf4ElhjE5PBrbk1_Mv_8hcrcipT-FUdXUI6hI6Wa_z5UMcbiCITBb3ThoCzXwQAvD_BwE (Zugriff: 14. September 2021).

Kegel, Jan, Clara Lenk, Nesrine Ouanes, Jan Wiesenthal und Julika Weiß (2022): Prosumerverhalten und Energiewende. Berlin: IÖW.

Kost, Christoph, Shivenes Shammugam, Verena Fluri, Dominik Peper, Aschkan Davoodi Memar und Thomas Schlegel [Fraunhofer für Solare Energiesysteme ISE] (2021): Studie: Stromgestehungskosten erneuerbare Energien - Fraunhofer ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html (Zugriff: 14. September 2021).

Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2021): Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK). https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/2020/verkehr_in_kilometern_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Zugriff: 19. Oktober 2021).

Lauf, Dr. Thomas, Michael Memmler und Sven Schneider (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2018. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_cc-37-2019_emissionsbilanz-erneuerbarer-energien_2018.pdf.

Lichtblick (2021): Schwimmt mal mit dem Strom – dem ÖkoStrom. Website: https://www.lichtblick.de/oekostrom/.

PROSA [Product Sustainability Assessment] (2013): PROSA Umweltzeichen / Top 100. 2. April. Website: http://www.prosa.org/index.php?id=413.

Raw, Gary und David Ross (2011): Energy Demand Research Project: Final Analysis. AECOM. https://www.ofgem.gov.uk/publications-and-updates/energy-demand-research-project-final-analysis (Zugriff: 13. Februar 2020).

Renner, Stephan, Andrea Jamek, Martin Baumann und Maximilian Urban (2012): Smart Metering. Die Auswirkungen von Feedback auf das Energieverbrauchsverhalten. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency. https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/12/Endbericht-final-2.pdf (Zugriff: 13. Februar 2020).

Ritter, David und Dierk Bauknecht [Öko Institut e.V.] (2021): Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Dachanlagen - Eine differenzierte Betrachtung von Volleinspeise- und Eigenverbrauchsanlagen. UBA.

Seltmann, Thomas (2021): Steuertipps: Umsatzsteuerpflicht oder Kleinunternehmer? *pv magazine Deutschland*. 1. April. Website: https://www.pv-magazine.de/2021/04/01/steuertipps-umsatzsteuerpflicht-oder-kleinunternehmer/ (Zugriff: 17. September 2021).

SenWEB [Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe] (2021): Förderprogramm Stromspeicher Berlin. 7. September. Website: https://www.berlin.de/sen/energie/energie/erneuerbare-energien/foerderprogramm-stromspeicher/ (Zugriff: 9. September 2021).

SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP.

Statistisches Bundesamt (2016): Laufende Wirtschaftsrechnungen Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsgueter/AusstattungprivaterHaushalte2150200167004.pdf?__blob=publicationFile.

Statistisches Bundesamt (2019): Wirtschaftsrechnungen - Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, Wohnverhältnisse privater Haushalte 2018. Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/evs-wohnverhaeltnis-haushalte-2152591189004.pdf?__blob=publicationFile.

Umweltbundesamt (2021): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. 20. Juli. Website: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Kraftwerke (Zugriff: 13. September 2021).

Weiß, Julika, Ivo Fehling und Swantje Gährs (2019): Marktüberblick und Dienstleistungen für EE-Eigenversorgung und -Bezug, Arbeitspapier des Forschungsprojekts EE-Rebound.

Weiß, Julika, Swantje Gährs und Ray Galvin (2021): Rebound-Effekte und Prosumer. Die Rolle der Rahmenbedingungen für den Stromverbrauch bei Photovoltaik-Erzeugern. *Ökologisches Wirtschaften* 1/2021: 17–19.

Welter, Philippe, Hrsg. (2021): Schadensbegrenzung - Warum Photovoltaikversicherungen unverzichtbar bleiben. *Photon- Das Solarstrom-Magazin*, Nr. 5: 26–29.

Wirth, Dr Harry und Fraunhofer ISE (2021): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland.

7 Anhang

Tabelle 7-1: Annahmen Referenzhaushalte

	3 Personen Haushalt	5 Personen Haushalt	Begründung/ Annahme/ Quelle
Stromverbrauch	Rund 3.400 kWh (ohne Raumwärme und Warmwasser)	Rund 4.500 kWh (ohne Raumwärme und Warmwasser	Stromeffizienzklasse C laut Stromspiegel Deutschland 2019 (co2online 2019)
	Keine smarte Verbrauchssteuerung		
Geräteausstattung	Keine zusätzlichen Großverbraucher		Typische Haushaltsausstattung nach u.a. (PROSA 2013; EnergieAgentur.NRW 2015; Statistisches Bundesamt 2016)
Wärmeerzeugung	Gasheizung		Meist genutzte Heizungsart (BDEW 2021)
PV Ausrichtung	Südausrichtung, 37,5° Neigung, ohne Verschattung		Simulation von einem optimalen Ertrag
Dimensionierung Wechselrichter	90% der Nennleistung		Häufig von Installateuren angewandte Faustregel
Wetterdaten	Lindenberg bei Berlin		Minütlich verfügbare Strahlungsdaten

Tabelle 7-2: Formeln zur Wirtschaftlichkeitsberechnung
Quelle: Kost et al. .

Formeln	Abkürzungen
$LCOE = \frac{(I_o + \sum_{t=0}^{n} A_t) * ANF}{M}$	A_t laufende Zahlungen ANF Annuitätenfaktor EK Eigenkapitalanteil (%) FK Fremdkapitalanteil (%) i Kalkultationszins i_{EK} Eigenkaptialzins i_{FK} Fremdkaptialzins I_o Anfangszahlung M Strommenge p.a. n Betrachtungszeitraum r Inflationsrate
$ANF = \frac{i * (1+i)^t}{(1+i)^t - 1}$	

$i = \frac{i_{EK} * EK + i_{FK} * FK}{(1+r)^t}$	t Jahr

Tabelle 7-3: Netzbezug und Eigenverbrauch bei gestiegenem Stromverbrauch für 5 Personen-Haushalte ohne Anlagen, mit kleiner und großer Anlagendimensionierung (5/10 kWp PV I 5/10 kWh BAT) und 3 Personen-Haushalte mit kleiner Anlagendimensionierung (3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT)

	3 Personen Haushalt		5 Personen Haushalt	
	Netzbezug	Eigenverbrauch	Netzbezug	Eigenverbrauch
Referenz mit PV	2.966	732	4.092	1.114
Referenz mit PV + Bat	1.875	1.880	2.513	2.776
Suffizienz (PV)	2.552	672	3.332	1.020
Suffizienz (PV + Bat)	1.471	1.809	1.797	2.653
Rebound +10% (PV)	3.228	838	4.528	1.272
Rebound +10% (PV + Bat)	2.131	1.993	2.953	2.929
Rebound +20% (PV)	3.508	939	4.936	1.423
Rebound +20% (PV + Bat)	2.415	2.089	3.368	3.073
Referenz mit großer PV	2.750	949	3.867	1.341
Referenz mit großer PV + Bat	912	2.883	1.504	3.825
Suffizienz (große PV)	2.352	870	3.151	1.217
Suffizienz (große PV + Bat)	617	2.699	979	3.504
Rebound +10% (große PV)	2.992	1.074	4.249	1.550
Rebound +10% (große PV + Bat)	935	3.239	1.714	4.219
Rebound +20% (große PV)	3.242	1.204	4.626	1.733
Rebound +20% (große PV + Bat)	1.055	3.506	1.975	4.523

Tabelle 7-4: Netzbezug und Eigenverbrauch bei gestiegenem Stromverbrauch und smarter Lastverschiebung für 5 Personen-Haushalte mit kleiner und großer Anlagendimensionierung (5/10 kWp PV I 5/10 kWh BAT) und 3 Personen-Haushalte mit kleiner Anlagendimensionierung (3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT)

	3 Personen Haushalt		5 Personen Haushalt	
	Netzbezug	Eigen-verbrauch	Netzbezug	Eigen-verbrauch
PV + Lastverschiebung	2.808	905	3.673	1.575
PV + Bat + Lastverschiebung	1.693	2.079	2.037	3.298
Rebound +10% + Lastverschiebung (PV)	3.013	1.075	3.989	1.868
Rebound +10% + Lastverschiebung (PV + Bat)	1.888	2.259	2.379	3.563
Rebound +20% + Lastverschiebung (PV)	3.304	1.159	4.428	1.977
Rebound +20% + Lastverschiebung (PV + Bat)	2.197	2.324	2.842	3.648
große PV + Lastverschiebung	2.483	1.230	3.246	2.002
große PV + Bat + Lastverschiebung	819	2.982	1.260	4.093
Rebound +10% + Lastverschiebung (große PV)	2.628	1.459	3.524	2.333
Rebound +10% + Lastverschiebung (große PV + Bat)	860	3.320	1.444	4.523
Rebound +20% + Lastverschiebung (große PV)	2.913	1.550	3.963	2.443
Rebound +20% + Lastverschiebung (große PV + Bat)	994	3.570	1.713	4.811

Tabelle 7-5: Netzbezug und Eigenverbrauch bei zusätzlichen Großverbrauchern für 5 Personen-Haushalte mit kleiner und großer Anlagendimensionierung (5/10 kWp PV I 5/10 kWh BAT) und 3 Personen-Haushalte mit kleiner Anlagendimensionierung (3,5 kWp PV I 3,5 kWh BAT)

	3 Personen Haushalt		5 Personen Haushalt	
	Netzbezug	Eigen-verbrauch	Netzbezug	Eigen-verbrauch

PV + Pool	5.086	1.133	6.083	1.643
PV + Bat + Pool	4.041	2.232	4.577	3.228
PV + Sauna	3.516	744	4.652	1.144
PV + Bat + Sauna	2.422	1.897	3.062	2.818
PV + E-Auto	3.913	1.063	4.979	1.505
PV + Bat + E-Auto	2.938	2.099	3.561	3.010
PV + E-Rad	2.984	754	4.110	1.136
PV + Bat + E-Rad	1.906	1.890	2.543	2.786
große PV + Pool	4.205	2.014	5.371	2.355
große PV + Bat + Pool	1.627	4.727	2.496	5.382
große PV + Sauna	3.246	1.015	4.408	1.388
große PV + Bat + Sauna	1.348	3.015	1.967	3.956
große PV + E-Auto	3.400	1.576	4.529	1.956
große PV + Bat + E-Auto	1.488	3.619	2.229	4.403
große PV + E-Rad	2.783	956	3.867	1.379
große PV + Bat + E-Rad	925	2.912	1.521	3.849

Tabelle 7-6: Ökologische Bewertung - Ergebnisübersicht
Quelle: eigene Darstellung

		Haushaltsgröße	**PV Leistung [Wp]**	**Bat Kapazität [Wh]**	**Emissionen bei Ökostrombezug [kg CO_2-eq.]**	**Emissionen bei Graustrombezug [kg CO_2-eq.]**
Referenz	PV	3	3500	3500	16,7	1402,5
Referenz	PV	5	5000	5000	25,1	1937,3
Referenz	PV + Bat	3	3500	3500	103,4	979,7
Referenz	PV + Bat	5	5000	5000	152,7	1327,1
Suffizienz	PV	3	3500	3500	14,2	1206,9
Suffizienz	PV	5	5000	5000	20,8	1578,0
Suffizienz	PV + Bat	3	3500	3500	98,1	785,8
Suffizienz	PV + Bat	5	5000	5000	143,4	983,2

Rebound +10%	PV	3	3500	3500	20,1	1528,6
Rebound +10%	PV	5	5000	5000	30,6	2146,5
Rebound +10%	PV + Bat	3	3500	3500	111,1	1106,9
Rebound +10%	PV + Bat	5	5000	5000	163,7	1543,9
Rebound +20%	PV	3	3500	3500	23,8	1662,9
Rebound +20%	PV	5	5000	5000	36,3	2342,7
Rebound +20%	PV + Bat	3	3500	3500	118,1	1246,5
Rebound +20%	PV + Bat	5	5000	5000	174,5	1748,5
Referenz &Last-verschiebung	PV	3	3500	3500	20,9	1333,1
Referenz &Last-verschiebung	PV	5	5000	5000	38,1	1754,5
Referenz &Last-verschiebung	PV + Bat	3	3500	3500	115,5	906,5
Referenz &Last-verschiebung	PV + Bat	5	5000	5000	186,9	1138,6
Lastverschiebung +10%	PV	3	3500	3500	26,9	1434,7
Lastverschiebung +10%	PV	5	5000	5000	50,4	1914,5
Lastverschiebung +10%	PV + Bat	3	3500	3500	128,5	1010,6
Lastverschiebung +10%	PV + Bat	5	5000	5000	208,2	1320,1
Lastverschiebung + 20%	PV	3	3500	3500	30,7	1574,6
Lastverschiebung + 20%	PV	5	5000	5000	56,4	2125,8
Lastverschiebung + 20%	PV + Bat	3	3500	3500	134,1	1160,9
Lastverschiebung + 20%	PV + Bat	5	5000	5000	216,4	1544,3
Refernz+große PV	PV	3	10000	10000	12,5	1297,6
Refernz+große PV	PV	5	10000	10000	20,7	1827,6
Refernz+große PV	PV + Bat	3	10000	10000	170,1	596,4
Refernz+große PV	PV + Bat	5	10000	10000	206,5	909,2
Suffizienz - 10% +große PV	PV	3	10000	10000	10,7	1109,6
Suffizienz - 10% +große PV	PV	5	10000	10000	16,9	1489,4
Suffizienz - 10% +große PV	PV + Bat	3	10000	10000	163,6	452,1
Suffizienz - 10% +große PV	PV + Bat	5	10000	10000	192,1	649,5
Rebound +10% +große PV	PV	3	10000	10000	14,6	1412,7
Rebound +10% +große PV	PV	5	10000	10000	25,1	2010,7
Rebound +10% +große PV	PV + Bat	3	10000	10000	182,1	619,2
Rebound +10% +große PV	PV + Bat	5	10000	10000	224,5	1025,5
Rebound +20% +große PV	PV	3	10000	10000	17,0	1532,2
Rebound +20% +große PV	PV	5	10000	10000	29,6	2191,1

Rebound +20% +große PV	PV + Bat	3	10000	10000	192,4	685,6
Rebound +20% +große PV	PV + Bat	5	10000	10000	240,0	1162,9
Lastverschiebung Referenz große PV	PV	3	10000	10000	15,3	1175,7
Lastverschiebung Referenz große PV	PV	5	10000	10000	31,5	1548,5
Lastverschiebung Referenz große PV	PV + Bat	3	10000	10000	173,2	556,0
Lastverschiebung Referenz große PV	PV + Bat	5	10000	10000	218,1	807,0
Lastverschiebung +10% + große PV	PV	3	10000	10000	19,2	1247,4
Lastverschiebung +10% + große PV	PV	5	10000	10000	40,4	1687,4
Lastverschiebung +10% + große PV	PV + Bat	3	10000	10000	185,2	587,2
Lastverschiebung +10% + große PV	PV + Bat	5	10000	10000	239,3	914,1
Lastverschiebung + 20% +große PV	PV	3	10000	10000	21,5	1382,8
Lastverschiebung + 20% +große PV	PV	5	10000	10000	44,6	1896,4
Lastverschiebung + 20% +große PV	PV + Bat	3	10000	10000	195,0	659,7
Lastverschiebung + 20% +große PV	PV + Bat	5	10000	10000	254,9	1055,4
E-Auto	PV	3	3500	3500	28,9	1857,6
E-Auto	PV	5	5000	5000	39,2	2366,1
E-Auto	PV + Bat	3	3500	3500	120,1	1493,2
E-Auto	PV + Bat	5	5000	5000	170,6	1834,9
E-Rad	PV	3	3500	3500	17,3	1411,7
E-Rad	PV	5	5000	5000	25,8	1946,2
E-Rad	PV + Bat	3	3500	3500	104,0	994,8
E-Rad	PV + Bat	5	5000	5000	153,4	1341,7
Pool	PV	3	3500	3500	34,6	2411,2
Pool	PV	5	5000	5000	47,1	2889,9
Pool	PV + Bat	3	3500	3500	132,5	2021,1
Pool	PV + Bat	5	5000	5000	188,9	2327,8
Sauna	PV	3	3500	3500	18,5	1661,6
Sauna	PV	5	5000	5000	27,4	2201,5
Sauna	PV + Bat	3	3500	3500	105,9	1237,5
Sauna	PV + Bat	5	5000	5000	156,8	1587,8
EAuto + große PV	PV	3	10000	3500	23,3	1612,1
EAuto + große PV	PV	5	10000	5000	34,0	2150,2
EAuto + große PV	PV + Bat	3	10000	10000	197,7	892,9
EAuto + große PV	PV + Bat	5	10000	10000	234,4	1276,2
ERad + große PV	PV	3	10000	3500	12,7	1313,0

ERad + große PV	PV	5	10000	5000	21,2	1828,4
ERad + große PV	PV + Bat	3	10000	10000	171,0	603,1
ERad + große PV	PV + Bat	5	10000	10000	207,5	918,5
Pool + große PV	PV	3	10000	3500	34,4	1999,3
Pool + große PV	PV	5	10000	5000	46,0	2555,9
Pool + große PV	PV + Bat	3	10000	10000	249,7	1010,1
Pool + große PV	PV + Bat	5	10000	10000	288,7	1455,0
Sauna + große PV	PV	3	10000	3500	14,6	1531,4
Sauna + große PV	PV	5	10000	5000	22,8	2082,9
Sauna + große PV	PV + Bat	3	10000	10000	175,5	805,2
Sauna + große PV	mit PV + Bat	5	10000	10000	340,6	1259,8

Tabelle 7-7: Ökonomische Bewertung - Ergebnisübersicht
Quelle: eigene Darstellung

	Anlagen	Haushalts-größe	LCOE	Einkommensdifferenz	
				Gesamt	Laufende Einnahmen & Ausgaben
Graustrom	-	3	0,33 €/kWh	144 €/a	150 €/a
Graustrom	-	5	0,32 €/kWh	209 €/a	222 €/a
Ökostrom	-	3	0,37 €/kWh	0 €/a	0 €/a
Ökostrom	-	5	0,36 €/kWh	0 €/a	0 €/a
Referenz	PV	3	0,34 €/kWh	112 €/a	196 €/a
Referenz	PV	5	0,32 €/kWh	191 €/a	307 €/a
Referenz	PV + BAT	3	0,33 €/kWh	130 €/a	258 €/a
Referenz	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	233 €/a	413 €/a
Suffizienz -10%	PV	3	0,34 €/kWh	244 €/a	327 €/a
Suffizienz -10%	PV	5	0,32 €/kWh	455 €/a	572 €/a
Suffizienz -10%	PV + BAT	3	0,34 €/kWh	259 €/a	388 €/a
Suffizienz -10%	PV + BAT	5	0,32 €/kWh	464 €/a	645 €/a
Rebound +10%	PV	3	0,33 €/kWh	13 €/a	96 €/a
Rebound +10%	PV	5	0,31 €/kWh	43 €/a	158 €/a
Rebound +10%	PV + BAT	3	0,32 €/kWh	40 €/a	168 €/a
Rebound +10%	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	86 €/a	265 €/a
Rebound +20%	PV	3	0,33 €/kWh	-105 €/a	-22 €/a
Rebound +20%	PV	5	0,32 €/kWh	-181 €/a	-66 €/a
Rebound +20%	PV + BAT	3	0,32 €/kWh	-54 €/a	73 €/a
Rebound +20%	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	-123 €/a	56 €/a
Referenz & Last-verschiebung	PV	3	0,32 €/kWh	146 €/a	230 €/a
Referenz & Last-verschiebung	PV	5	0,30 €/kWh	262 €/a	379 €/a
Referenz & Last-verschiebung	PV + BAT	3	0,32 €/kWh	170 €/a	298 €/a

Referenz & Last-verschiebung	PV + BAT	5	0,29 €/kWh	336 €/a	516 €/a
Rebound +10% & Lastverschiebung	PV	3	0,32 €/kWh	59 €/a	142 €/a
Rebound +10% & Lastverschiebung	PV	5	0,29 €/kWh	142 €/a	258 €/a
Rebound +10% & Lastverschiebung	PV + BAT	3	0,31 €/kWh	95 €/a	223 €/a
Rebound +10% & Lastverschiebung	PV + BAT	5	0,28 €/kWh	210 €/a	389 €/a
Rebound +20% & Lastverschiebung	PV	3	0,31 €/kWh	-37 €/a	46 €/a
Rebound +20% & Lastverschiebung	PV	5	0,30 €/kWh	-66 €/a	49 €/a
Rebound +20% & Lastverschiebung	PV + BAT	3	0,30 €/kWh	-7 €/a	120 €/a
Rebound +20% & Lastverschiebung	PV + BAT	5	0,29 €/kWh	1 €/a	181 €/a
Referenz + große	PV	3	0,32 €/kWh	174 €/a	335 €/a
Referenz + große	PV	5	0,30 €/kWh	279 €/a	447 €/a
Referenz + große	PV + BAT	3	0,34 €/kWh	78 €/a	334 €/a
Referenz + große	PV + BAT	5	0,29 €/kWh	330 €/a	594 €/a
Suffizienz -10% + große	PV	3	0,33 €/kWh	300 €/a	461 €/a
Suffizienz -10% + große	PV	5	0,30 €/kWh	528 €/a	696 €/a
Suffizienz -10% + große	PV + BAT	3	0,36 €/kWh	181 €/a	438 €/a
Suffizienz -10% + große	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	513 €/a	778 €/a
Rebound +10% + große	PV	3	0,31 €/kWh	91 €/a	252 €/a
Rebound +10% + große	PV	5	0,30 €/kWh	143 €/a	310 €/a
Rebound +10% + große	PV + BAT	3	0,32 €/kWh	42 €/a	298 €/a
Rebound +10% + große	PV + BAT	5	0,28 €/kWh	235 €/a	498 €/a
Rebound +20% + große	PV	3	0,31 €/kWh	-5 €/a	155 €/a
Rebound +20% + große	PV	5	0,30 €/kWh	-50 €/a	117 €/a
Rebound +20% + große	PV + BAT	3	0,31 €/kWh	-16 €/a	240 €/a
Rebound +20% + große	PV + BAT	5	0,28 €/kWh	72 €/a	335 €/a
Lastverschiebung Referenz + große	PV	3	0,30 €/kWh	231 €/a	392 €/a
Lastverschiebung Referenz + große	PV	5	0,27 €/kWh	435 €/a	603 €/a
Lastverschiebung Referenz + große	PV + BAT	3	0,34 €/kWh	97 €/a	354 €/a
Lastverschiebung Referenz + große	PV + BAT	5	0,28 €/kWh	381 €/a	645 €/a
Lastverschiebung +10% + große	PV	3	0,29 €/kWh	169 €/a	330 €/a
Lastverschiebung +10% + große	PV	5	0,27 €/kWh	301 €/a	469 €/a

Lastverschiebung +10% + große	PV + BAT	3	0,32 €/kWh	58 €/a	314 €/a
Lastverschiebung +10% + große	PV + BAT	5	0,27 €/kWh	291 €/a	555 €/a
Lastverschiebung + 20% + große	PV	3	0,29 €/kWh	76 €/a	237 €/a
Lastverschiebung + 20% + große	PV	5	0,27 €/kWh	101 €/a	268 €/a
Lastverschiebung + 20% + große	PV + BAT	3	0,30 €/kWh	-3 €/a	253 €/a
Lastverschiebung + 20% + große	PV + BAT	5	0,27 €/kWh	116 €/a	380 €/a
E-Auto	PV	3	0,32 €/kWh	-239 €/a	-156 €/a
E-Auto	PV	5	0,32 €/kWh	-201 €/a	-86 €/a
E-Auto	PV + BAT	3	0,31 €/kWh	-215 €/a	-88 €/a
E-Auto	PV + BAT	5	0,32 €/kWh	-201 €/a	-22 €/a
E-Rad	PV	3	0,33 €/kWh	105 €/a	188 €/a
E-Rad	PV	5	0,32 €/kWh	184 €/a	300 €/a
E-Rad	PV + BAT	3	0,33 €/kWh	120 €/a	248 €/a
E-Rad	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	223 €/a	403 €/a
Pool	PV	3	0,33 €/kWh	-708 €/a	-626 €/a
Pool	PV	5	0,32 €/kWh	-585 €/a	-470 €/a
Pool	PV + BAT	3	0,32 €/kWh	-663 €/a	-537 €/a
Pool	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	-539 €/a	-362 €/a
Sauna	PV	3	0,34 €/kWh	-91 €/a	-9 €/a
Sauna	PV	5	0,32 €/kWh	16 €/a	131 €/a
Sauna	PV + BAT	3	0,33 €/kWh	-41 €/a	87 €/a
Sauna	PV + BAT	5	0,31 €/kWh	51 €/a	230 €/a
E-Auto + große	PV	3	0,29 €/kWh	-83 €/a	78 €/a
E-Auto + große	PV	5	0,29 €/kWh	-39 €/a	128 €/a
E-Auto + große	PV + BAT	3	0,30 €/kWh	-155 €/a	101 €/a
E-Auto + große	PV + BAT	5	0,29 €/kWh	3 €/a	266 €/a
E-Rad + große	PV	3	0,32 €/kWh	164 €/a	324 €/a
E-Rad + große	PV	5	0,30 €/kWh	276 €/a	444 €/a
E-Rad + große	PV + BAT	3	0,34 €/kWh	71 €/a	328 €/a
E-Rad + große	PV + BAT	5	0,29 €/kWh	323 €/a	586 €/a
Pool + große	PV	3	0,29 €/kWh	-448 €/a	-289 €/a
Pool + große	PV	5	0,29 €/kWh	-359 €/a	-193 €/a
Pool + große	PV + BAT	3	0,27 €/kWh	-347 €/a	-91 €/a
Pool + große	PV + BAT	5	0,26 €/kWh	-172 €/a	91 €/a
Sauna + große	PV	3	0,32 €/kWh	9 €/a	170 €/a
Sauna + große	PV	5	0,30 €/kWh	108 €/a	275 €/a
Sauna + große	PV + BAT	3	0,33 €/kWh	-64 €/a	192 €/a
Sauna + große	PV + BAT	5	0,29 €/kWh	180 €/a	444 €/a

Tabelle 7-8: Ökonomische Bewertung - Sensitivitätsanalyse
Quelle: eigene Darstellung

Sensitivität	Variation	Grau-strom	Referenz		Suffizienz -10%	Rebound +10%	Referenz + Lastver-schiebung	Referenz + große		E-Auto	E-Pool
			PV	PV + BAT	PV + BAT	PV + BAT	PV + BAT	PV	PV + BAT	PV + BAT	PV + BAT
Stromgestehungs-kosten	€/kWh	0,33	0,34	0,33	0,34	0,32	0,32	0,32	0,34	0,31	0,32
Investitionskosten	-5 bis 5 %	0,33 - 0,33	0,34 - 0,34	0,32 - 0,34	0,32 - 0,35	0,31 - 0,34	0,3 - 0,33	0,28 - 0,35	0,28 - 0,41	0,3 - 0,33	0,32 - 0,33
BAT-Investitions-kosten	-5 bis 5 %	0,33 - 0,33	0,34 - 0,34	0,32 - 0,35	0,33 - 0,36	0,31 - 0,34	0,31 - 0,34	0,32 - 0,32	0,32 - 0,4	0,31 - 0,33	0,32 - 0,34
Jahr der Ersatzbe-schaffung (BAT)	10 bis 20	0,33 - 0,33	0,34 - 0,34	0,35 - 0,32	0,36 - 0,33	0,34 - 0,31	0,33 - 0,31	0,32 - 0,32	0,38 - 0,32	0,33 - 0,31	0,33 - 0,32
Inflation	-5 bis 5 %	0,32 - 0,33	0,41 - 0,32	0,44 - 0,31	0,46 - 0,32	0,42 - 0,3	0,43 - 0,3	0,49 - 0,29	0,59 - 0,3	0,39 - 0,3	0,39 - 0,31
Strompreis	-5 bis 5 %	0,23 - 0,50	0,27 - 0,45	0,29 - 0,4	0,31 - 0,4	0,28 - 0,4	0,28 - 0,38	0,31 - 0,34	0,37 - 0,3	0,26 - 0,41	0,26 - 0,43
Betriebskosten	-5 bis 5 %	0,32 - 0,33	0,32 - 0,36	0,32 - 0,35	0,32 - 0,37	0,31 - 0,34	0,3 - 0,34	0,29 - 0,37	0,31 - 0,4	0,3 - 0,33	0,31 - 0,34
Finanzierung	EK - FK	0,33 - 0,33	0,35 - 0,33	0,35 - 0,33	0,36 - 0,33	0,34 - 0,32	0,34 - 0,31	0,35 - 0,31	0,39 - 0,33	0,33 - 0,31	0,33 - 0,32

www.ee-rebound.de