

Ökologische Bewertung digitaler Energieinfrastruktur

Daniela Wohlschlager*, Melanie Ostermayer, Simon Köppl, Anika Regett

Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), Am Blütenanger 71, 80995 München,
Tel: +49 (0)89 158121-60, dwohlschlager@ffe.de, www.ffe.de

Kurzfassung: Der von der deutschen Bundesregierung beschlossene Rollout intelligenter Messsysteme (iMSys) gilt als „Ermöglicher“ der Energiewende, da sie den Grundbaustein einer Koordination von zunehmend dezentraler Erzeugung und steigender Anzahl elektrischer Verbraucher darstellt. Zudem stellt die Digitalisierung ein Werkzeug zur aktiven Teilnahme bisher klassischer Letztverbraucher am Energiesystem dar. Zugleich bringt die Digitalisierung der Infrastruktur jedoch einen Ressourcen- und Energieverbrauch mit sich. Im Rahmen der Analyse erfolgt eine ökologische Bewertung der über den Lebenszyklus benötigten Infrastruktur am Beispiel von zwei ausgewählten „Use Cases“: neben dem Prosumer wird der Anwendungsfall eines sog. Flexumers jeweils im Vergleich zum konventionellen Letztverbraucher untersucht. Der Fokus liegt auf der Quantifizierung der im Laufe des Lebenszyklus verursachten Treibhausgase und weiteren Emissionen sowie dem Bedarf an fossilen Rohstoffen. Im Zuge der angewandten „ICT Enablement Methodology“ werden zudem sogenannte Enablement- und Rebound-Effekte qualitativ untersucht. Die vergleichende Analyse zeigt in beiden Anwendungsfällen sowohl eine Erhöhung der direkten Emissionen als auch der Ressourcenintensität. Identifizierte Enablement-Effekte zeigen ein maßgebliches Potenzial für einen Beitrag zur Energiewende, welches berechnete Umweltauswirkungen übersteigt. Dabei müssen jedoch Rebound-Effekte verhindert werden.

Keywords: Smart Meter, Prosumer, Flexumer, ökobilanzielle Bewertung, Emissionen, Enablement, Rebound

1 Digitalisierung als Teil der deutschen Energiewende

Um die deutschen Klimaziele zu erreichen, wird neben Effizienzerhöhungen der Ausbau erneuerbarer Energien vorangetrieben. Gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) soll durch die Energiewende bis zum Jahr 2050 80 % des deutschen Bruttostromverbrauchs durch regenerative Energien gedeckt werden [1]. Vorangetrieben v. a. durch die Einführung der EEG-Vergütung im Jahre 2000 erfolgt seither der Trend hin zur Dezentralisierung des Energiesystems. Neben der Windenergie stieg insbesondere die Anzahl dezentraler Photovoltaikanlagen (PV) [2]. Klassische Letztverbraucher nehmen neue Rollen im Energiesystem ein, indem sie bspw. als Prosumer ihren PV-Strom ins öffentliche Stromnetz einspeisen. Aus Systemsicht führen dezentrale erneuerbare Erzeugungsanlagen jedoch zu einer zunehmend volatilen Erzeugung. Gleichzeitig steigt die Anzahl elektrischer Verbraucher in den Sektoren Verkehr und private Haushalte, wodurch bestehende Verteilnetze belastet werden (vgl. [2]).

Um auf diese Herausforderungen zu reagieren und zugleich das Ziel einer Demokratisierung des Energiesystems durch verstärkte Bürgereinbindung zu erreichen, wurde von der

Bundesregierung das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW) [3] verabschiedet. Intelligente Betriebsmittel und Kommunikationsstrukturen sollen die Basis innovativer Lösungsansätze darstellen, welche durch den Rollout intelligenter Messsysteme (iMSys) realisiert werden. Ein iMSys besteht jeweils aus einer digitalen Stromzähleinheit, der sogenannten modernen Messeinrichtung (mME) sowie einem Kommunikationsmodul, dem Smart Meter Gateway (SMGW). Gemäß dem Rollout-Plan des GDEW werden Verbraucher ab einem Jahresstromverbrauch von 6.000 kWh und Erzeugungsanlagen ab einer installierten Leistung von 7 kW zu einer iMSys-Installation verpflichtet. Zusätzlich betroffen sind Verbraucher auf Niederspannungsebene mit steuerbaren Verbrauchseinrichtungen nach §14a Energiewirtschaftsgesetz. Anhand von Daten aus dem Jahr 2016 kann von rund 1,7 Millionen Pflichteinbaufällen in privaten Haushalten ausgegangen werden [4]. Bis zum Jahr 2030 wird eine Anzahl von 8,6 Millionen Pflichteinbaufällen in privaten Haushalten erwartet [5].

1.1 Neue Lösungsansätze und Rollen im (intelligenten) Energiesystem

Mit dem Trend der Dezentralisierung gehen neue Rollen im Energiesystem einher. Während Privatpersonen im klassischen Energiesystem als Letztverbraucher agieren und Strom aus dem öffentlichen Stromnetz beziehen, werden sie als sog. Prosumer selbst zu Erzeugern. Neben Eigenverbrauch besteht die Möglichkeit der Einspeisung, wodurch ein Wandel von passiven Energiekonsumenten hin zu aktiven Teilnehmern am Energiesystem erfolgt. [2]

Im Rahmen des SINTEG-Projektes „C/sells“¹ konzipiert die FfE gemeinsam mit dem Verteilnetzbetreiber Bayernwerk AG einen lokalen Flexibilitätsmarkt als Möglichkeit eines marktbasiereten Engpassmanagements. Erprobt wird das Konzept in einem Feldversuch in der Region Altdorf bei Landshut – dem Altdorfer Flexmarkt (ALF). Letztverbrauchern wie Privathaushalten oder öffentlichen Liegenschaften wird es dabei ermöglicht, ihre dezentralen Speicher, Erzeugungs- oder Verbrauchsanlagen zum flexiblen Einsatz auf einer lokalen Marktplattform anzubieten [6], [7]. Letztverbraucher können somit neben der Rolle des Prosumers als sog. „Flexumer“ (vgl. [8], [9]) agieren. Voraussetzung dafür ist die iMSys-Infrastruktur.

Im Zuge des Demonstrationsprojektes ALF erfolgt eine ganzheitliche Bewertung digitaler Infrastruktur. Sowohl im Säulenmodell der Nachhaltigkeit [10] sowie im energiepolitischen Zieldreieck der deutschen Bundesregierung stellt die ökologische Dimension einen Grundbaustein dar, welcher im Fokus der vorliegenden Analyse steht.

1.2 Einhergehende ökologische Implikationen als Forschungslücke

Bestehende Studien wie beispielsweise [11], [12] und [13] behandeln Nachhaltigkeitsbetrachtungen von Energiesystemen in ihrer Gesamtheit. Speziell für die Digitalisierung der Energieinfrastruktur ist der aktuelle Stand der Forschung jedoch begrenzt und fokussiert sich bei ökologischen Nachhaltigkeitsbetrachtungen v. a. auf Lebenszyklusanalysen (LCA), welche primär für Infrastruktur in Ländern mit teilweisem oder bereits gänzlich durchgeführtem Rollout vorliegen (vgl. [14], [15], [16]). Ergebnisse im internationalen Kontext sind jedoch nur begrenzt auf den deutschen Anwendungsfall

¹ Information zum Gesamtprojekt sind unter <https://www.csells.net/de/> zu finden.

Eine detaillierte Beschreibung der Projektaktivitäten der FfE finden Sie hier <http://www.ffe.de/csells>.

übertragbar. Das nationale Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) sowie die Richtlinien des deutschen Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) bestimmen spezifische Anforderungen an die Komponenten, u. a. basierend auf erforderlichen Funktionsfähigkeiten [17]. Diese haben eine direkte Auswirkung auf Parameter wie die Leistungsaufnahme, Datenübertragungsraten sowie Komponentenzusammensetzung.

2 Ziel und Methodik

2.1 Zielsetzung

Zielsetzung der ökobilanziellen Bewertung ist eine ökologische Folgeabschätzung der Digitalisierungsmaßnahmen des deutschen Energiesystems auf Haushaltsebene und soll als Basis zur Ableitung von allgemein gültigen Handlungs- und Optimierungsmaßnahmen gelten. Des Weiteren wird dargestellt, wie sich ökologische Implikationen für ausgewählte Anwendungsfälle („Use Cases“), Prosumer- und Flexumer-Haushalt. Diese sind jeweils mit einem iMSys, bestehend aus mME und SMGW, sowie im Falle des Flexumers zusätzlich mit einer Steuerbox ausgestattet. Sie werden in der Bewertung einem konventionellen Letztverbraucher, dem sog. Consumer, mit Nutzung eines Ferrariszählers gegenübergestellt.

2.2 Methodische Vorgehensweise

Als Grundlage für die Bewertung wird mittels einer Metastudie ein Kriterienset definiert, welches sich in Ressourcenintensität, verursachte Emissionen und systemübergreifende Auswirkungen unterteilt. Die Bewertung der definierten Kriterien erfolgt anhand der aus der Informations- und Kommunikationstechnik stammenden ICT (Information and Communications Technology) Enablement Methodology nach [18]. Der Fokus dieser Analyse liegt auf der Quantifizierung verursachter Treibhausgase und weiterer Emissionen sowie dem Bedarf an fossilen Rohstoffen. Betrachtet werden die verschiedenen Lebenszyklusphasen Produktion, Installation, Betrieb und Verwertung der digitalen Energieinfrastruktur auf Haushaltsebene.

Während ein iMSys als zusätzliche Energiesystemkomponente zunächst zu Energie- und Rohstoffverbrauch führt und somit mit erhöhten direkten Emissionen verbunden ist, wird die Digitalisierung im Energiesystem vom Gesetzgeber zugleich als „Ermöglicher“ einer erfolgreichen Energiewende gesehen [3]. In der ICT Enablement Methodology wird dies durch sog. Enablement-Effekte abgebildet. Gleichzeitig können diese Effekte durch Rebounds gehemmt werden. Gemäß der ICT Enablement Methodology sind neben direkten Emissionen sowohl diese primären als auch sekundär damit einhergehende Effekte (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) Teil einer Untersuchung ökologischer Implikationen.

Als Beispiel wird Haushalten einerseits durch das iMSys die Überwachung des Stromverbrauchs ermöglicht (primärer Enablement-Effekt), wodurch über Verhaltensänderungen Energieeinsparungen möglich sind [19]. Andererseits können beispielsweise lastvariable Tarife zum erhöhtem Energieverbrauch außerhalb der Spitzenzeiten führen (primärer Rebound-Effekt).

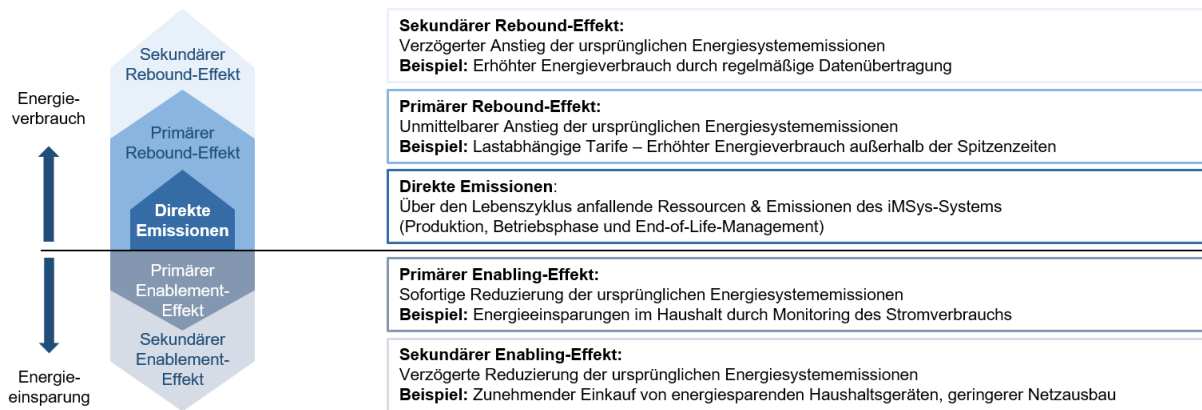


Abbildung 1: Bewertung digitaler Energieinfrastrukturen basierend auf der ICT Enablement Methodology nach [18]

2.3 Modellierung und Datenbasis

Die Analyse wird mit der Open-Source-LCA-Software Brightway2 in Verknüpfung mit der Ökobilanzierungs-Datenbank Ecoinvent 3.6 mit dem Systemmodell „cut-off“ durchgeführt. Zur Berechnung der Wirkungskategorien wird die in Ecoinvent berücksichtigte Auswertungsmethode „ReCiPe Midpoint (H) V1.13 no LT“ herangezogen. Datenlücken in bestehender Literatur werden mit Herstellerdaten sowie Experteninterviews mit Komponentenherstellern geschlossen.

2.4 Systemgrenzen

Da der Schwerpunkt auf der Bewertung direkter Emissionen liegt, werden diese quantitativ bewertet. Enablement- sowie Rebound-Effekte hingegen werden nur qualitativ untersucht. Zur Quantifizierung der direkten Emissionen erfolgt eine ökobilanzielle Bewertung in Anlehnung an ISO 14040 und 14044 unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus, d. h. Produktion, Installation, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung. Als funktionelle Einheit gilt die Stromzähler-Infrastruktur eines deutschen Privathaushalts pro Jahr, die sich je nach Anwendungsfall des Prosumers bzw. des Flexumers unterscheidet. Sowohl die Komponenten als auch die Datenübertragung des Kommunikationssystems externer Akteure (u. a. Verteilnetzbetreiber, externer aktiver Marktteilnehmer) liegen außerhalb des Untersuchungsrahmens. Das Referenzszenario stellt ein Haushalt mit konventionellem, elektromechanischem Stromzähler dar.

3 Ergebnisse

3.1 Direkte Emissionen

Die für die Analyse herangezogenen Wirkungskategorien zur Ressourcenintensität und den verursachten Emissionen resultieren aus der durchgeführten Metastudie. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die ermittelten Werte der ökobilanziellen Bewertung für die Use Cases Prosumer, Flexumer und Consumer.

Tabelle 1: Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung für die Stromzähler-Infrastruktur eines Haushalts pro Jahr, aufgeschlüsselt nach Anwendungsfall

	Wirkungskategorie	Consumer	Prosumer	Flexumer
Ressourcenintensität	Wasserverbrauch [m ³]	0,12	0,25	0,31
	Metallverbrauch [kg Fe-Äq.]	2,67	16,34	17,69
	Verbrauch fossiler Rohstoffe [kg Öl-Äq.]	8,74	14,41	17,56
Verursachte Emissionen	Klimawandel [kg CO ₂ -Äq.]	29,23	51,57	63,28
	Ozonabbau [kg CFC-11-Äq.]	<0,01	<0,01	<0,01
	Humantoxizität [kg 14DCB-Äq.]	3,04	5,41	6,44
	Terrestrische Ökotoxizität [kg 14DCB-Äq.]	<0,01	<0,01	<0,01
	Meeresökotoxizität [kg 14DCB-Äq.]	0,04	0,18	0,20
	Frischwasserökotoxizität [kg 14DCB-Äq.]	0,02	0,04	0,04
	Meereseutrophierung [kg N-Äq.]	<0,01	0,01	0,01
	Frischwasser Eutrophierung [kg P-Äq.]	<0,01	0,01	0,01
	Terrestrische Versauerung [kg SO ₂ -Äq.]	0,08	0,15	0,18
	Partikelbildung [kg PM10-Äq.]	0,03	0,06	0,07

Um den Einfluss der verschiedenen Use Cases zu verdeutlichen, werden die Ergebnisse für den Prosumer und den Flexumer in Abbildung 2 über den Werten des Consumers skaliert.

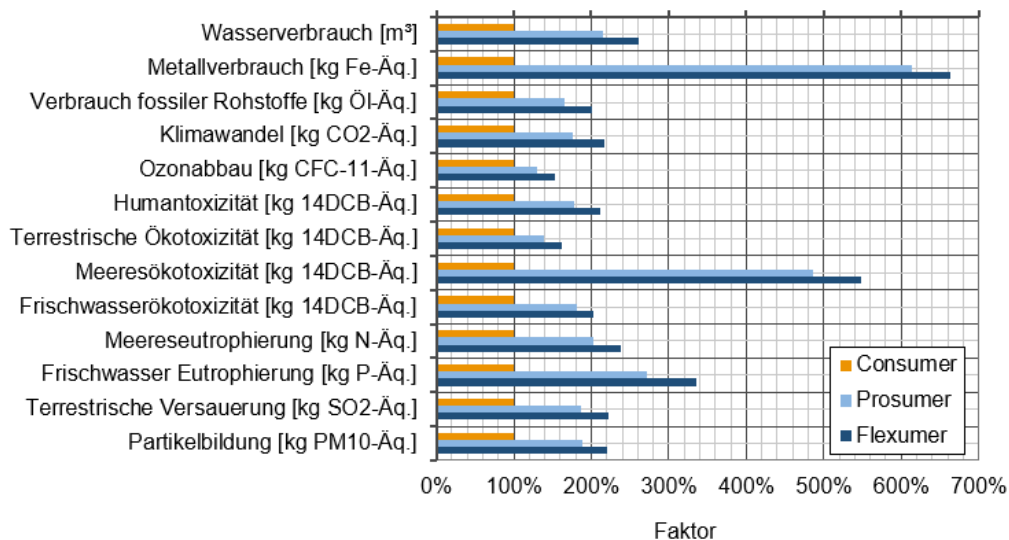


Abbildung 2: Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung nach Anwendungsfall, skaliert am Consumer

Demnach ergeben sich für alle Kategorien höhere Umwelteinflüsse für die neuen Haushaltsrollen mit digitalisierter Stromzählinfrastruktur. Durch die zusätzlich benötigte Komponente der Steuerbox ergeben sich zudem für den Flexumer jeweils höhere Werte als für den Prosumer. So erhöht sich die Umweltwirkung für die Stromzähler-Infrastruktur des Prosumers bzw. des Flexumers verglichen mit dem Consumer um den Faktor 1,8 bzw. 2,2. In den Wirkungskategorien Metallverbrauch und Meeresökotoxizität sind die Unterschiede deutlich größer. So erhöhen sich diese Werte für den Flexumer um den Faktor 6,6 bzw. 5,5 im Vergleich zum Consumer.

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, belaufen sich die Treibhausgas(THG)-Emissionen für die Stromzähler-Infrastruktur für den Prosumer bzw. Flexumer auf jährlich 51,6 kg bzw. 63,3 kg CO₂-Äq. Die THG-Emissionen eines 4-Personenhaushalts mit einem mittleren Haushaltsstromverbrauch von 4.500 kWh betragen mit einem Emissionsfaktor von 523 g CO₂/kWh (vgl. /UBA-17 19) rund 2.354 kg CO₂. Die digitalisierte Stromzählinfrastruktur eines Prosumers würde damit 2,2 % bzw. die eines Flexumers 2,7 % der THG-Emissionen, verursacht durch den Haushaltsstromverbrauch betragen. Zudem können zur Einordnung die verursachten THG-Emissionen eines Smartphones in Höhe von 19 kg CO₂-Äq. pro Jahr [20] gegenübergestellt werden, welche sich auf 36,8 % bzw. 30 % der Emissionen für die Infrastruktur des Prosumers bzw. Flexumers belaufen.

In allen Use Cases verursacht die Installation den geringsten Anteil am CO₂-Äq., wohingegen das SMGW sowohl beim Prosumer als auch beim Flexumer den größten Beitrag hat. Abbildung 3 stellt den Einfluss der Lebenszyklusphasen Produktion und Betrieb jeweiliger Komponenten am Beispiel des Flexumers dar. Die Verwertung („End of Life Management“) geht aufgrund von Gutschriften für das Recycling mit negativem Vorzeichen in die Bilanz ein.

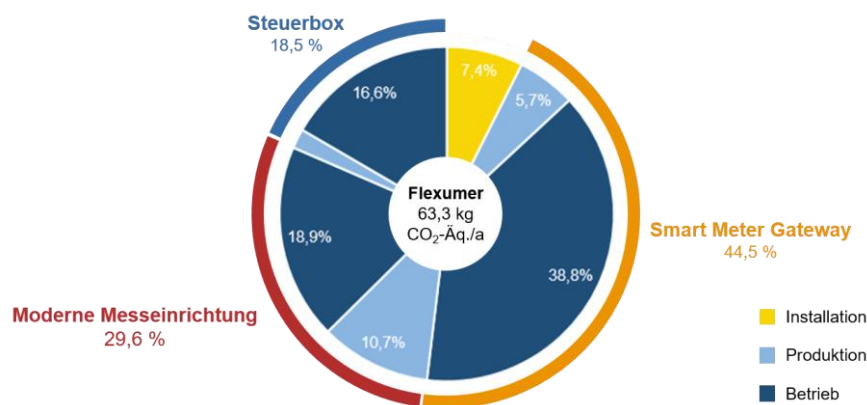


Abbildung 3: Anteil der verbauten Komponenten und der Lebenszyklusphasen an den jährlichen THG-Emissionen der Stromzähler-Infrastruktur des Flexumers

Der Eigenstromverbrauch aller Komponenten während des Betriebs konnte mit einem Anteil von 74,3 % als größter Verursacher an THG-Emissionen identifiziert werden. Am stärksten ausgeprägt zeigt sich der Effekt bei dem SMGW. Dabei sind je zwei Drittel der Emissionen des SMGW und der Steuerbox sowie die Hälfte im Falle der mME auf die Stromerzeugung durch Braun- und Steinkohle zurückzuführen (Annahme Strommix 2016: 523 g CO₂/kWh). Der Stromverbrauch durch den Datentransfer des SMGW stellt einen verschwindend geringen Anteil im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen dar. An dieser Stelle ist jedoch auf die gewählte Systemgrenze hinzuweisen, da die damit einhergehenden Effekte bspw. durch die Datenübertragung und -speicherung bei Akteuren außerhalb der betrachteten Haushalte keine Berücksichtigung finden. Wie ebenfalls aus Abbildung 3 ersichtlich, verursacht die Produktion bei allen Komponenten den zweithöchsten Anteil an THG-Emissionen. In der Sachbilanz ergeben sich durch Recycling negative Werte für CO₂-Äq. der Entsorgung, die jedoch durch das geringe Ausmaß in Abbildung 3 nicht sichtbar werden.

3.2 Sensitivitätsanalysen

Um die Sensitivität der zugrundeliegenden Daten und Annahmen zu evaluieren, werden Berechnungen mit Variationen des Stromverbrauchs des SMGWs, der Nutzungsdauer jeweiliger Komponenten sowie des Strommixes durchgeführt.

Nutzungsdauer der Komponenten

Während für das SMGW die Nutzungsdauer durch einen Experten auf zehn Jahre geschätzt wird, dienen für die Nutzungsdauer der mME und der Steuerbox zwölf Jahre als Annahme. Die Eichfrist der mME beträgt acht Jahre. Laut Experteninterviews wird der mit einer neuen Eichung verbundene Aufwand ggf. als ökonomisch nicht sinnvoll betrachtet. Daher ist es möglich, dass Messstellenbetreiber die digitalisierte Zählinfrastruktur in der Gesamtheit am Ende der Eichfrist austauschen. Im Anwendungsfall des Flexumers erhöhen sich bei Austausch nach acht Jahren die Treibhausgasemissionen um den Faktor 1,4. Ein Geräteaustausch orientiert an der Eichfrist anstatt der technischen Lebensdauer führt demnach zu dreifach höheren Werten im Vergleich zum Consumer.

Stromverbrauch während des Betriebs

Der Eigenstromverbrauch während des Betriebs hat bei den betrachteten Komponenten den größten Einfluss auf das verursachte Treibhauspotential. In den oben durchgeführten Analysen wurde ein konservativer Wert des SMGW-Eigenstromverbrauchs von 4,9 W basierend auf Herstellerdaten angenommen. Für die Sensitivitätsanalyse werden den Datenblättern weiterer Hersteller entsprechend niedrigere Werte von 2,8 W und 3,6 W herangezogen. Somit könnten die jährlichen THG-Emissionen im Flexumer-Anwendungsfall bei einem Eigenstromverbrauch des SMGWs von 2,8 W um bis zu 16,5 % gesenkt werden.

Strommix 2030 und 2050

Wie erläutert ist der Großteil des Treibhauspotentials auf den hohen Kohlestromanteil im Strommix zurückzuführen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, können durch die Dekarbonisierung der Stromerzeugung die jährlichen Treibhausgasemissionen der Zählinfrastruktur des Flexumers von 63,3 auf 41 kg CO₂-Äq. im Jahr 2030 und bis zum Jahr 2050 sogar auf 23 kg CO₂-Äq. reduziert werden.

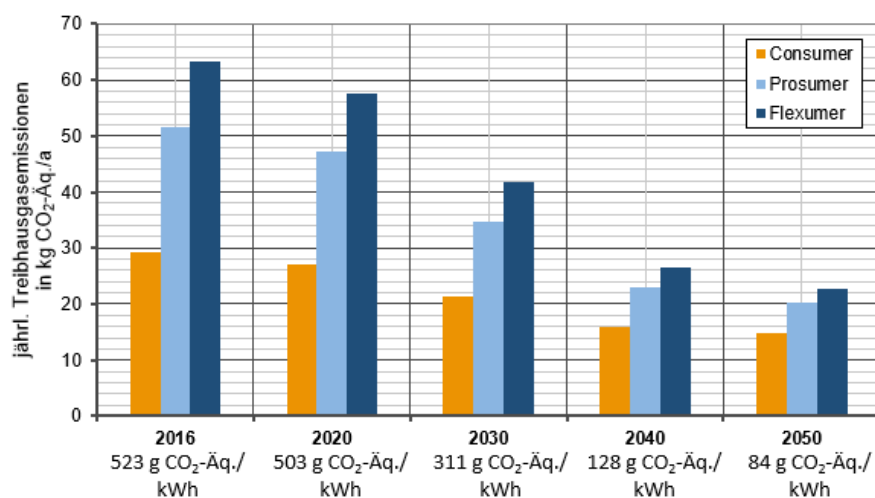


Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse der Klimawirkung der Stromzähler-Infrastruktur in Abhängigkeit vom Emissionsfaktor des Strommixes nach Jahr

Für die Sensitivitätsberechnung wird der in Ecoinvent bestehende Datensatz für Deutschland aus dem Jahr 2016 durch den THG-Emissionsfaktor für 2020, 2030, 2040 und 2050 gemäß dem Klimaschutzszenario „fuEL“ der FfE ersetzt [21]. Die Umrechnung von CO₂- in THG-Emissionsfaktoren erfolgt dabei gemäß der Methodik aus [22] unter Zuhilfenahme von Ecoinvent-Datensätzen. Im Vergleich zu den heutigen Emissionen des Consumers wird deutlich, dass die zusätzlich verursachten Treibhauspotenziale durch die Digitalisierung der Energieinfrastruktur bei fortschreitender Energiewende kompensiert werden können.

3.3 Enablement-Effekte

Die Untersuchung möglicher Enablement-Effekte erfolgt qualitativ mittels Literaturrecherche. In Tabelle 2 werden die drei am häufigsten genannten möglichen Mehrwerte inkl. quantitativen Schätzungen dargestellt. Der mögliche Beitrag je Haushaltsrolle wird mithilfe der Ampelfarben dargestellt. Die genannten Beispiele werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Tabelle 2: Beispiele für untersuchte Enablement-Effekte nach Anwendungsfall

Enablement-Effekt	Prosumer	Flexumer	Beispiel
Energieeinsparung durch Visualisierung der Verbrauchswerte	●	●	Energieeinsparungen zwischen 1 – 5 % des Jahresstromverbrauchs [23], [24], [26]/
Netzdienliche Nutzung von Flexibilitäten	●	●	Einspeisung von zusätzlich 4,7 TWh Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die nicht durch das Einspeisemanagement abgeregelt werden [25]
Verringerter Netzausbau	●	●	Reduktion des Ausbaubedarfs um bis zu 40 % bei Nutzung von 25 % des netzdienlichen Flexibilitätpotenzials [25]

- Effekt durch Rolle erreichbar
- Kein Beitrag

Energieeinsparungen

Gemäß [26] werden neben verringertem Ausbau des Verteilnetzes auch erzielte Energieeinsparungen als größtes Potenzial des iMSys-Rollouts gesehen. Als ein Hauptfaktor für die Erreichung von Energieeinsparungen gilt die Bereitstellung von Stromverbrauchsdaten an die Verbraucher. Während ein konventioneller Letztverbraucher in der Regel nur einmal jährlich Einblick in seinen Stromverbrauch erhält, ermöglicht das iMSys allen Haushalten – d. h. sowohl Prosumern, Flexumern als auch Pflichteinbaufällen – Energieverbräuche zu überwachen und Informationen über Energieverbrauchsmuster zu erhalten.

In der Literatur beschriebene Energieeinsparpotenziale liegen zwischen 0 – 20 % [19], am häufigsten werden potenzielle Einsparungen im Bereich von 1 – 5 % genannt (vgl. [23], [24], [27], [26]). Angewandt auf ein Rechenbeispiel für einen durchschnittlichen 4-Personenhaushalt mit jährlichem Stromverbrauch von rund 4.500 kWh (vgl. [28]) ergibt sich durch die Visualisierung der Verbrauchsdaten und entsprechender Einsparung von 3,7 % gemäß [24] eine Ersparnis von rund 166,5 kWh. Unter Berücksichtigung des CO₂-Emissionsfaktors des Strommixes für 2016 resultiert eine Einsparung in Höhe von 92,7 kg CO₂. Somit kann der Enablement-Effekt die berechneten jährlich verursachten Emissionen des iMSys sowohl für den Anwendungsfall des Prosumers als auch für den Flexumer kompensieren. Im Falle von

einem jährlichen Stromverbrauch von 6.000 kWh (Pflichteinbaufälle für iMSys) reicht eine Energieeinsparung bei einem Prosumer von 1,6 % und bei einem Flexumer von 2 % aus, um das erzeugte Treibhausgaspotenzial des mME und SMGW zu kompensieren.

Netzdienlichkeit

Ein weiterer Enablement-Effekt ergibt sich durch eine steigende Durchdringung mit Flexumern, welche durch die flexible Steuerung von Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen netzdienlich agieren können. Derzeit bestehen netzbezogene Mittel sowie Notfallmaßnahmen, um dem Ausfall oder der Überlastung von Netzbetriebsmitteln vorzubeugen. Im letzteren Fall können Netzbetreiber gemäß § 13 (2) EnWG EE-Erzeugungsanlagen durch Einspeisemanagement abregeln [29]. Zur präventiven Behebung von Netzengpässen bietet der iMSys-Rollout eine verbesserte Netzzustandsabbildung des Verteilnetzes und ermöglicht eine vorzeitige Feststellung von kritischen Netzzuständen. Darüber hinaus ist es Flexumern möglich, ihre Flexibilität netzdienlich zur Verfügung zu stellen. Laut einer Prognose durch [25] kann durch die Flexibilitätsnutzung von Lasten und Speichern während des Betriebs auf Verteilnetzebene im Jahr 2035 der Ausstoß von CO₂-Emissionen erheblich verringert werden. Durch Vermeidung von Einspeisemanagement (EinsMan)-Maßnahmen könnten bis zu 4,7 TWh EE-Erzeugung pro Jahr zusätzlich ins Netz eingespeist werden. Dies macht rund 60 % der andernfalls verlorenen Energiemenge aus. Unter Annahme des Strommixes im Jahre 2035 könnte dies zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen von rund 1,5 Millionen Tonnen führen. [25] Die Mehreinspeisung könnte bei heutigen Verbrauchskennzahlen ca. eine Million Vier-Personen-Haushalte mit Strom aus EE versorgen.

Verringerter Netzausbau

Als Enablement-Effekt neuer Anwendungsfälle durch die iMSys-Infrastruktur wird der Beitrag zur Netzstabilität und in weiterer Folge der reduzierte Netzausbaubedarf gesehen. So können durch Flexumer, d. h. durch die flexible Steuerung dezentraler Anlagen, Lastspitzen reduziert werden. [30] Laut Berechnungen von [25] kann bei Berücksichtigung von 25 % des netzdienlichen Flexibilitätspotenzials in der Netzplanung eine Reduktion von bis zu 40 % des Ausbaubedarfs erzielt werden. Bei Berücksichtigung des vollständigen Flexibilitätspotenzials reduziert sich der Ausbaubedarf sogar um 77 %. Ein verringerter Netzausbaubedarf ist nicht nur mit einem niedrigeren Ressourceneinsatz verbunden, sondern auch mit geringeren Eingriffen in die Landschaft und Natur.

Die hier beschriebenen Effekte können im verringerten Maß auch durch Prosumer geleistet werden, etwa durch eine intelligente Steuerung der Einspeisung, bspw. basierend auf Preissignalen. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass die Preissignale nicht mit den vorhandenen Netzkapazitäten korrelieren und auf lokaler Ebene den Netzausbaubedarf sogar erhöhen können.

3.4 Rebound-Effekte

Während zur Digitalisierung bzw. zum Einsatz von ICT bereits Rebound-Forschung vorliegt (vgl. [23], [31], [32], [33]), besteht in Bezug auf iMSys noch eine Forschungslücke. In der Literatur wird ein energiebezogener Rebound-Effekt in Haushalten in Höhe von 10 – 30 % beschrieben. Der in diesem Zusammenhang dargestellte makroökonomische Rebound-Effekt ist deutlich größer und erreicht Werte zwischen 15 % und mehr als 100 % [34]. Als eine

Methode zur Analyse von Rebound-Effekten gilt die Erhebung von Verhaltensänderungen durch Befragung. Im Zuge der Analyse werden relevante Aspekte durch eine Literaturrecherche definiert und in einen Fragebogen integriert. Die Fragestellungen untersuchen Verbrauchsverhalten und Energieeffizienz sowie die Rebound-Kategorien Einkommens-, Substitutions- als auch motivationale Effekte. Der resultierende Fragebogen kann bspw. in zukünftigen Demonstrationsprojekten durch eine Abfrage vor und nach dem Projekt zur Abschätzung des Rebound-Effekts dienen.

4 Kritische Reflexion

Die Qualität der in der Ökobilanz verwendeten Daten ist von entscheidender Bedeutung für die erzielten Ergebnisse. Aufgrund derzeit unzureichender Datengrundlage und fehlenden Erfahrungswerten zu verschiedenen Anwendungsfällen, mitunter bedingt durch den verzögerten bundesweiten iMSys-Rollout, ist eine Quantifizierung der Energie- und Ressourcenintensität zum Zeitpunkt der Analyse nur begrenzt möglich. Die vorliegende Analyse dient vor allem als erste Einordnung der Umweltauswirkungen und zeigt auf, für welche Bereiche weiterer Forschungsbedarf besteht.

Zudem besteht innerhalb der Literatur Uneinigkeit bezüglich verbauten Rohstoffen in ICT-Geräten. Während einerseits kaum kritische, seltene oder toxische Rohstoffe innerhalb der ICT-Infrastruktur identifiziert werden [16], zeigen aktuellere Quellen vor allem für Mikrocontroller intelligenter Haushaltsgeräte Ressourcen mit verhältnismäßig hohem ökologischem Fußabdruck und sogenannten Konfliktrohstoffen [35]. Hier besteht Forschungsbedarf, inwiefern eine digitalisierte Energieinfrastruktur davon betroffen ist.

Im Rahmen der Arbeit wurde der Fokus auf eine Betrachtung auf Haushaltsebene gelegt. Durch den iMSys-Rollout werden jedoch zusätzliche IT-Systeme für verschiedene Marktteilnehmer benötigt, um bspw. Übertragung, Verarbeitung, Analyse und Speicherung von Daten inkl. das Management von iMSys zu ermöglichen. Dafür ist die Entwicklung, Produktion und der Betrieb neuer IT-Systeme sowie eine Anpassung bereits bestehender Backend-Systeme notwendig, womit weitere ökologische Implikationen einhergehen.

Die ökobilanzielle Bewertung gibt einen Einblick, in welchem Ausmaß durch digitalisierte Zählinfrastrukturen von Haushalten Umweltwirkungen verursacht werden. Allerdings wird nicht berücksichtigt, dass im Rahmen des Rollouts der Ersatz funktionstüchtiger konventioneller Zähler vor Ablauf der technischen Nutzungsdauer stattfindet. Zusätzlich besteht die Gefahr eines frühzeitigen Austausches des iMSys nach Ablauf der Eichfrist.

5 Fazit

Im Rahmen der ökobilanziellen Bewertung digitaler Stromzählinfrastruktur zeigen sich höhere ökologische Implikationen für neue Haushaltsrollen gegenüber dem konventionellen Letztverbraucher. Der Stromverbrauch des iMSys gilt dabei als größter Einflussfaktor, da knapp zwei Drittel des erzeugten Treibhauspotenzials durch den derzeitigen Strommix bedingt sind. Falls der Ausbau erneuerbarer Energien gemäß des verwendeten Klimaschutzszenarios fuEL bis 2040 voranschreitet, kann das zusätzlich verursachte Treibhauspotenzial für die Produktion, Betrieb und Entsorgung digitaler Energieinfrastruktur im Haushalt kompensiert werden. Zudem sollte im Zuge des Produktdesigns auf einen möglichst geringen

Eigenstromverbrauch der Geräte geachtet werden, um die ökologischen Auswirkungen zu reduzieren. Messstellenbetreibern und Komponentenherstellern wird weiterhin eine Harmonisierung technischer Nutzungsdauern und Eichfristen empfohlen, da hierdurch das Potential der Geräte voll ausgeschöpft und Klima- und Umweltwirkungen reduziert werden können.

Die höheren Umweltwirkungen der digitalen Stromzählinfrastruktur in den Haushalten können potenziell durch die identifizierten Enablement-Effekte mehr als ausgeglichen werden, da ein Potenzial zum Beitrag an der Energiewende besteht. Dabei müssen jedoch mögliche Rebound-Effekte verhindert werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017). Berlin: Bundesregierung Deutschland, 2017
- [2] Bogensperger, Alexander et al.: Smart Meter, Prosumer, Flexumer - Wie die Digitalisierung die Rolle von Verbrauchern verändert. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2019.
- [3] Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende. Berlin: Bundesregierung, 2016
- [4] Springmann, Elisabeth: Intelligente Messsysteme als Enabler für Netz- und Systemdienstleistungen durch Flexibilitätsoptionen. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München - Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, betreut durch Estermann, Thomas; Wagner, Ulrich; Mauch, Wolfgang: München, 2019.
- [5] Einführung von Smart Meter in Deutschland - Analyse von Rolloutszenarien und ihrer regulatorischen Implikationen. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2014
- [6] Köppl, Simon et al.: Altdorfer Flexmarkt – Decentral flexibility for distribution networks. In: Internationaler ETG-Kongress 2019. Esslingen: VDE ETG, 2019.
- [7] Zeiselmair, Andreas et al.: Netzdienlicher Handel als Element des zellulären Energiesystems am Beispiel des Altdorfer Flexmarkts (ALF) - 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT). Wien: Technische Universität Wien, 2019.
- [8] Westphal, Egon Leo et al.: Flexumer als Gestalter der digitalen Energiezukunft – Eine Begriffseinordnung. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 7/8. Berlin: Bayernwerk AG, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2019.
- [9] et – Energiewirtschaftliche Tagesfragen. Ausgabe 7/8, 2019. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2019. ISSN: 0720-6240.
- [10] Spindler, Edmund: The History of Sustainability The Origins and Effects of a Popular Concept. In: Sustainability in Tourism; Wiesbaden: Jenkins, Ian, Schröder, Roland, 2013.
- [11] Quitzow, Rainer et al.: Multikriterieller Bewertungsansatz für eine nachhaltige Energiewende. Potsdam: Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS), 2019.
- [12] Rösch, Christine et al.: Indicator system for the sustainability assessment of the German energy system and its transition. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.

- [13] Schlomann, Barbara et al.: Methoden- und Indikatorenentwicklung für Kenndaten zum Klimaschutz im Energiebereich. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2016.
- [14] Sias, Glenn Gregory: Characterization of the Life Cycle Environmental Impacts and Benefits of Smart Electric Meters and Consequences of their Deployment in California. Dissertation. Herausgegeben durch UCLA: Los Angeles, 2017.
- [15] Mujan, Vedad et al.: Environmental Sustainability of Information and Communication Technologies for Advanced Metering and Home Area Networks. Wien: Vienna University of Technology/Institute of Telecommunications, 2015.
- [16] Louis, Jean-Nicholas et al.: Environmental Benefits of Smart Home Automation: Life Cycle Assessment of Home Energy Management System. Oulu, Finland: Centre for Northern Environmental Technology, Thule Institute, University Oulu, 2015.
- [17] Bogensperger, Alexander; Estermann, Thomas; Samweber, Florian; Köppl, Simon; Müller, Mathias; Zeiselmair, Andreas, Wohlschlager, Daniela: Smart Meter - Umfeld, Technik, Mehrwert. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
- [18] Neves, Luis et al.: Evaluating the carbon-reducing impacts of ICT - An assessment methodology. Brussels, Belgium: Global e-Sustainability Initiative (GeSI), 2010.
- [19] Malmodin, Jens et al.: Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation - the example of smart metering. Berlin: Fraunhofer IZM, 2016.
- [20] Ercan, Mine et al.: Life Cycle Assessment of a Smartphone. In: 4th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S 2016); Amsterdam: Atlantis Press, 2016.
- [21] Fattler, Steffen; Conrad, Jochen; Regett, Anika et al.: Dynamis - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Technische Universität München, 2019.
- [22] Laufendes Projekt: BEniVer - Begleitforschung Energiewende im Verkehr. In: <https://www.ffe.de/beniver>. (Abruf am 2019-01-21); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/75aqGM5Uf>); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2018.
- [23] Horner, Nathaniel C. et al.: Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 2016.
- [24] Schleich, Joachim et al.: Smart metering in Germany and Austria – results of providing feedback information in a field trial - Working Paper Sustainability and Innovation. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE), 2011.
- [25] E-Bridge Consulting GmbH: Sichere und effiziente Koordinierung von Flexibilitäten im Verteilnetz. Bonn: E-Bridge Consulting GmbH, 2017.
- [26] Commission Staff Working Document - Cost-benefit analyses & state of play of smart metering deployment in the EU-27. Brussels: European Commission, 2014.

- [27] Karg, Ludwig et al.: E-Energy Abschlussbericht - Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Evaluation der sechs Leuchtturmprojekte. München / Berlin: B.A.U.M. Consult GmbH, 2014.
- [28] Jährlicher Stromverbrauch eines 4-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2017 (in Kilowattstunden): <https://de-statista-com.zu.idm.oclc.org/statistik/daten/studie/558288/umfrage/stromverbrauch-einen-4-personen-haushalts-in-deutschland/>; Hamburg: Statista, 2018.
- [29] Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) - Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. Berlin: Bundesrepublik Deutschland, 2012
- [30] Zeiselmair, Andreas et al.: Altdorfer Flexmarkt (ALF) - Konzeptbeschreibung, Zielsetzung, Funktionsweise und Prozesse des Altdorfer Flexmarkts. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
- [31] Gossart, Cédric: Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. Evry Cedex: Institut Mines-Télécom, 2015.
- [32] Galvin, Ray: The ICT/electronics question: Structural change and the rebound effect. In: Ecological Economics Volume 120, December 2015. Aachen: International Society for Ecological Economics (ISEE), 2015.
- [33] Hilty, Lorenz: Why energy efficiency is not sufficient – some remarks on “Green by IT”. In: 26th International Conference Informatics for Environmental Protection, Zurich: Shaker Verlag, 2012.
- [34] Fischer, Corinna et al.: Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenziale - Mehr als nur weniger. Freiburg: Öko-Institut e.V., 2013.
- [35] Hintemann, Ralph et al.: Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourceneinsparung bei vernetzten Haushaltsprodukten - Kurzstudie im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, 2018.