

Imitationseffekte bei der Verbreitung von Photovoltaik-Anlagen in Deutschland

Alexander Weber und Johannes Rode

Der in den letzten zwei Dekaden in Deutschland erfolgte Zubau an Photovoltaik-Anlagen ist bemerkenswert. Die mittlerweile umfangreich vorliegenden Daten zu diesen Anlagen erlauben belastbare statistische Analysen über die Faktoren der Verbreitung dieser hauptsächlich dezentralen, auf Hausdächern installierten Energietechnologie. Solche Untersuchungen ermöglichen Empfehlungen sowohl für die Politik als auch für dezentrale Akteure, wie etwa Energieversorgungsunternehmen – nicht nur in Hinsicht auf Photovoltaik, sondern auch in Bezug auf weitere dezentrale Energietechnologien. Wie bisher vorliegende Forschungsergebnisse zur Verbreitung von Photovoltaik-Anlagen auf Hausdächern zeigen, spielen Imitationseffekte dabei eine bedeutende Rolle. Eine aktuelle Studie untersucht, welche räumliche Reichweite diese Nachahmungseffekte in Deutschland haben.

Der vorliegende Artikel geht der Frage nach, welche Rolle Imitationseffekte spielen und welche räumliche Reichweite diese aufweisen [1]. Verschiedene Studien haben Hinweise auf Nachahmungseffekte für den Fall der Installation von Photovoltaik (PV)-Anlagen erbracht. Dabei wurde insbesondere deutlich, dass klassische ökonomische Entscheidungskalküle (die etwa auf dem erwartbaren Ertrag und den Möglichkeiten zur Finanzierung basieren) nur unzureichend geeignet sind, die individuellen Entscheidungen zu erklären, PV-Anlagen (auf Hausdächern) zu installieren [2].

Dies deutet darauf hin, dass politisch-regulatorische Rahmenbedingungen, wie etwa die Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz zwar ggf. notwendige aber nicht in allen Fällen hinreichende Faktoren sind, individuelle Installationsentscheidungen auszulösen. Die Analysen im vorliegenden Artikel unterstreichen dabei, dass Imitation räumlich sehr begrenzt ist und in einem Radius von unter 1.000 Metern stattfindet.

Diffusionsmodelle und ihre Annahmen

Bei der Betrachtung der – auch als Diffusion bezeichneten – Verbreitung von Innovationen über die Zeit fällt schnell auf, dass diese in der Regel einem S-förmigen Verlauf (Abb. 1) folgt [3]. Neben grundsätzlichen Faktoren, die bestimmen, welchen Nutzen eine neue Technologie bei potenziellen Anwendern stiften kann und somit die erwartbare Durchdringung begrenzen, besteht die

Eine wirksame Beeinflussung der PV-Zubauentscheidung durch Imitationseffekte über Entfernungen von 1.000 Metern hinaus findet nicht statt
NicoEINino | Fotolia.com

Frage, wie sich der zeitliche Verlauf der Diffusion erklären lässt.

In der Diffusionsforschung existieren verschiedene Erklärungsmodelle für das Zustandekommen einer S-förmigen Diffusionskurve [4]. Drei idealtypische Varianten sind:

■ Das Modell der *sozialen Beeinflussung*: Hier wird angenommen, dass einzelne Akteure die neue Technologie erst dann einsetzen, wenn bereits genügend andere Akteure dies tun. Die entsprechenden Schwellenwer-

te werden als heterogen über die Akteure verteilt angenommen; je nach Verteilungsfunktion ergeben sich so unterschiedliche Kurvenformen.

■ Beim Konzept des *sozialen Lernens* wird angenommen, dass einzelne Akteure unterschiedliche Annahmen darüber haben, welchen Nutzen ihnen die neue Technologie bringt und auch, dass unveränderbare individuelle Adoptionskosten vorliegen. Erst durch die Beobachtung der Erfahrungen anderer können die Akteure ihre Annahmen aktualisieren und sich so „überzeugen“ lassen.

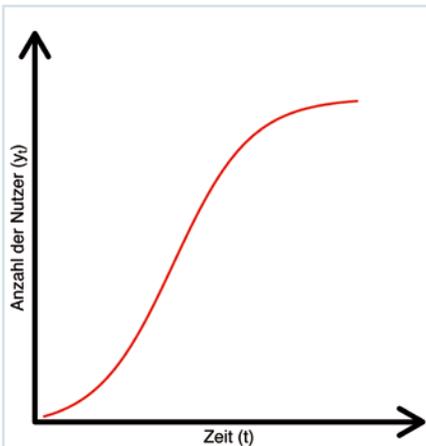


Abb. 1 Eine idealtypische S-Kurve, die so oder in ähnlicher Form für die Verbreitung zahlreicher Technologien beobachtbar ist
Quelle: eigene Darstellung

■ Bei *epidemischen Modellen* wird davon ausgegangen, dass potenzielle Nutzer mit einer gewissen Rate von tatsächlichen Anwendern und einer zentralen Quelle „infiziert“ werden. Plastisch lässt sich dies etwa als die Verbreitung von Überzeugungen und Informationen durch „Mund-zu-Mund-Propaganda“ einerseits und zentralen Maßnahmen wie etwa Fernsehspots und öffentlicher, medialer Berichterstattung andererseits verstehen.

Allen Modellen ist gemein, dass letztlich davon ausgegangen wird, dass durch die Interaktion von tatsächlichen mit potenziellen Nutzern Informationen übertragen werden. Soll die Intensität und Struktur dieses Effektes auf der Basis empirischer Daten abgeschätzt werden, wird häufig auf das epidemische Modell zurückgegriffen. Die anderen beiden Modelle erfordern das Vorliegen besonderer individuen-spezifischer Informationen, die häufig nicht zur Verfügung stehen. Das epidemische Modell, welches auch unter der Bezeichnung „Bass“-Modell bekannt ist, findet auch aus diesem Grund vielfach Anwendung in der Auswertung von Marketingmaßnahmen [5]. Mathematisch lässt sich das Modell wie folgt ausdrücken:

$$\Delta y_t = (\alpha + \beta y_{t-1})(N - y_{t-1})$$

Dabei stellt y_t die Anzahl der Nutzer zum Zeitpunkt t dar, während Δy_t die Anzahl der Nutzer angibt, die zwischen dem Zeitschritt $t-1$ und t hinzukommen. Die Gesamtzahl tat-

sächlicher und potenzieller Nutzer wird mit N bezeichnet.

Die Adoptionsentscheidungen, die durch die zentrale Infektionsquelle ausgelöst werden, bildet der Faktor $\alpha \in [0,1]$ ab: In jeder Periode wird ein Teil α der noch verbliebenen potenziellen Nutzer durch die zentrale Ansteckungsquelle zu Nutzern. Die Adoptionsentscheidungen hingegen, die dadurch zustande kommen, dass andere bestehende Nutzer einen „Ansteckungseffekt“ ausüben, werden durch den Faktor $\beta \in [0,1]$ modelliert.

Die Anwendung eines solchen Modells in Reinform ist jedoch nicht geeignet, einen Ansteckungseffekt grundsätzlich zu identifizieren. Denn neben dem Ansteckungseffekt sieht es keinen alternativen Mechanismus zur Erklärung von Adoptionsentscheidungen vor, d. h. alle Korrelationen würden somit als Ansteckungseffekt gedeutet. Die Lösung besteht daher darin, entsprechende Kontrollvariablen einzuführen. Bei Paneldaten (die verschiedene Erhebungseinheiten über mehrere Beobachtungszeitpunkte hinweg erfassen) sind dies vor allem Besonderheiten jedes einzelnen Beobachtungszeitpunktes und jeder einzelnen Erhebungseinheit, sog. fixe Effekte [6].

Untersuchung der Diffusion von PV-Anlagen in Deutschland

Bei der hier vorgestellten Studie steht die Frage im Mittelpunkt, welche Rolle Imitationseffekte in Bezug auf die Entscheidung, PV-Dachanlagen zu installieren, spielen und welche räumliche Reichweite diese haben. Hierzu wird ein epidemisches Modell eingesetzt, bei der der räumliche Imitationseffekt über zahlreiche Erhebungseinheiten hinweg abgeschätzt wird. Die Erhebungseinheiten werden durch ein Punktraster definiert, welches über das Staatsgebiet Deutschlands gelegt wird. Dies ist in Abb. 2 schematisch für ein Raster von 10 km dargestellt. Im Rahmen der Untersuchung wurden verschiedene Raster bis hinunter zu 500 m Abstand zwischen den Punkten verwendet.

Die Schätzung erfolgt mit Hilfe eines epidemischen Modells (siehe Gleichung), das um eine räumliche Komponente erweitert ist: Wie in Abb. 3 dargestellt, wird für jede Erhebungseinheit i ein Innenkreis definiert,

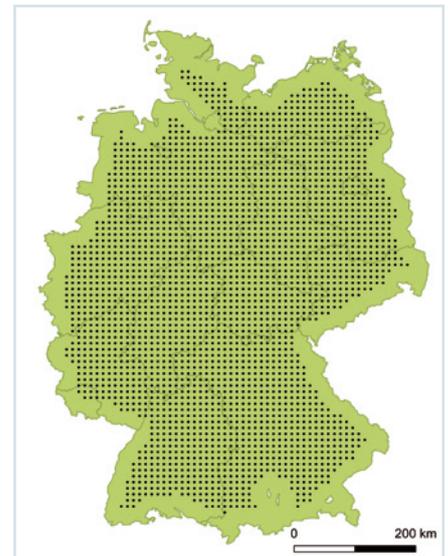


Abb. 2 Die Erhebungseinheiten des Paneldatensatzes werden durch ein gleichmäßiges Punktraster definiert, welches über das deutsche Staatsgebiet gelegt wird; hier gezeigt am Beispiel eines 10-km-Rasters
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [1]

der von konzentrischen Kreisringen umgeben ist [7]. Auf diese Weise lässt sich identifizieren, welche räumliche Reichweite der Nachahmungseffekt hat. Ausgedrückt wird dieser durch die Koeffizienten β .

Datengrundlage der vorliegenden Untersuchung sind alle gesetzlich geförderten PV-Anlagen in Deutschland, die zwischen 1992 und 2009 installiert wurden. Die meist mit vollständiger Adressangabe bei den Übertragungsnetzbetreibern verfügbaren Daten wurden geokodiert (d. h. aus den Adressangaben wurden ihre geographischen Koordinaten ermittelt). Dabei wurden Anlagen mit einer Leistung $> 30 \text{ kW}_{\text{Peak}}$ ausgeschlossen, da diese in der Regel keine Dachanlagen sind. Bei der Geokodierung wurden nur in gut 5 % der Fälle Geokoordinaten ermittelt, die weder exakt einer Hausnummer noch einem Straßenabschnitt zugeordnet werden konnten. Eine weitere kritische Größe ist die Anzahl der potenziellen Nutzer pro Erhebungseinheit ($N_{i,t}$), die aufgrund des langen Betrachtungszeitraums als variabel anzusehen ist. Diese wurde über die Anzahl der Gebäude im jeweiligen Innenkreis abgeschätzt.

Ergebnis und Diskussion

Die zentralen Ergebnisse unserer Untersuchung ergeben sich aus der Analyse des

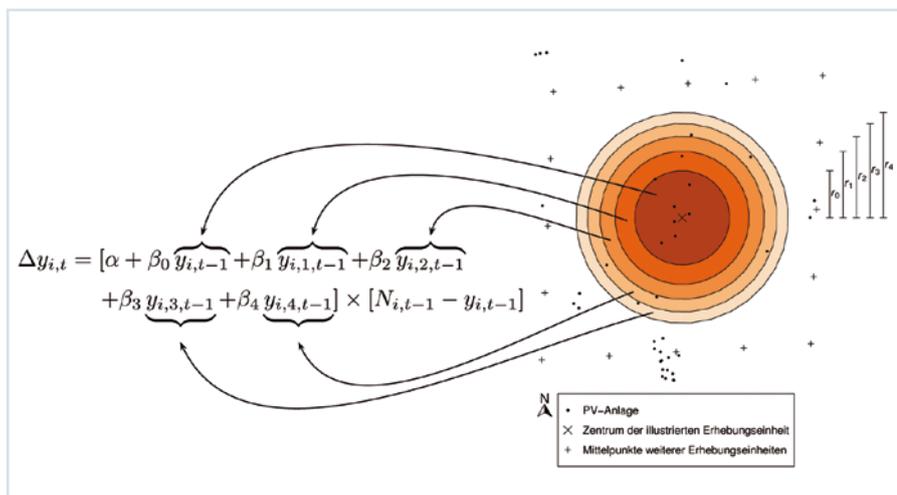


Abb. 3 Die Koeffizienten β zur Schätzung des Imitationseffektes werden konzentrischen, flächengleichen Kreislagen um die Erhebungseinheit herum zugeordnet Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [1]

Datensatzes mit der höchsten Auflösung (500-m-Raster) unter Einsatz von zwei verschiedenen Schätzverfahren, bei denen jeweils die oben genannten fixen Effekte berücksichtigt werden.

Zunächst erfolgt eine Schätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate (OLS, „ordinary least squares“). Diese verdeutlicht, dass sich sowohl der Koeffizient α , als auch die Koeffizienten β des Innenkreises und der ersten umgebenden Kreislagen signifikant von Null unterscheiden und ein positives Vorzeichen haben. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sowohl Imitationseffekte (in ihrer Intensität über die Entfernung abnehmend) als auch die „zentrale Informationsquelle“ einen Einfluss auf die Installationsentscheidungen von PV-Anlagen haben.

In Zahlen ausgedrückt: Die Ergebnisse der OLS-Schätzung ergeben, dass pro Jahr ca. 1 % der potenziellen Nutzer eine Photovoltaikanlage unabhängig von lokalen Imitationseffekten installieren. Weiterhin zeigt sich, dass jede im Innenkreis installierte Anlage dazu führt, dass ca. 0,03 % weitere potenzielle Nutzer eine Anlage installieren. Im ersten Kreisring, welcher einen Radius von 0,35 km bis 0,5 km umfasst, induziert jede dort vorhandene Anlage einen Zuwachs von Anlagen im Innenkreis von zusätzlichen 0,025 % der potenziellen Nutzer. Jede im zweiten Kreisring (Innenradius: 0,5 km, Außenradius 0,61 km) befindliche Anlage bewirkt einen weiteren Zubau im Innenkreis von ca. 0,016 % des dortigen Po-

tenzials. Die Koeffizienten sinken in ihrer Höhe mit zunehmender Entfernung erwartungsgemäß ab. Nach über einem Kilometer Entfernung lässt sich kein Imitationseffekt mehr nachweisen.

Die so ermittelten Ergebnisse liegen in vergleichbarer Größenordnung mit anderen Studien und sind auch nur so zu beurteilen: Die unabhängige Variable enthält Zählraten, die andere statistische Eigenschaften (insbesondere Nicht-Negativität und Heteroskedastizität) aufweisen, die mit den Annahmen einer OLS-Schätzung nicht vollständig kompatibel sind. Die im vorliegenden Fall adäquate Lösung besteht in der Verwendung einer Poisson-Verteilung. Unter Berücksichtigung dieser ergibt sich, dass die Ergebnisse grundsätzlich robust sind. In den meisten Fällen ist jedoch nicht von einem signifikanten Einfluss von Anlagen auszugehen, die sich jenseits des zweiten Kreisrings (d. h. in einem Abstand von mehr als 0,61 km vom Mittelpunkt des Innenkreises) befinden. Die ermittelten Schätzwerte für die Koeffizienten des Modells bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie jene der OLS-Schätzung.

Lokalisierter Imitationseffekt mit beschränkter räumlicher Reichweite

Die Ergebnisse der statistischen Analysen weisen auf die Existenz eines lokalisierten Imitationseffektes hin. Weiterhin zeigen sie, dass dessen räumliche Reichweite stark be-

schränkt ist. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass über Entfernungen von 1.000 Metern hinaus noch eine wirksame Beeinflussung der PV-Zubauentscheidung durch Imitationseffekte stattfindet.

Für die Diffusion neuer Technologien bedeutet die Relevanz von räumlich eingeschränkten Imitationseffekten insbesondere, dass die Ausbreitung neuer Technologien durch eine erfolgreiche Demonstration im unmittelbaren räumlichen Umfeld beschleunigt werden kann. Dies müssen nicht unbedingt von Dritten errichtete Pilotanlagen sein, die unter Umständen weniger wirksam als die Demonstration durch „normale Nutzer“ sind. Zudem müssten sie aufgrund der geringen Reichweite von Imitationseffekten in großer Anzahl installiert werden. Ein wirksames Instrument zur Beschleunigung des Diffusionsprozesses könnten hingegen Maßnahmen des „Empfehlungsmarketings“ („referral-reward“-Programme) darstellen, bei denen die Überzeugung potenzieller Nutzer durch bestehende Nutzer mit einem Anreiz belegt wird.

Wenn die entsprechenden Rahmenbedingungen (insbesondere in Bezug auf die individualwirtschaftliche Rentabilität) vorliegen, ist es plausibel, dass diese Überlegungen auch auf ähnliche Technologien, wie etwa Batteriespeicher, Lastmanagementsysteme sowie dezentrale Erzeugungsanlagen (jenseits von PV) übertragbar sind.

Anmerkungen

[1] Grundlage hierfür ist unser kürzlich erschienener englischsprachiger Artikel: Does localized imitation drive technology adoption? A case study on rooftop photovoltaic systems in Germany. In: Journal of Environmental Economics and Management, 2016, Bd. 78, S. 38–48.

[2] Vgl. z. B. Bollinger, B.; Gillingham, K.: Peer Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Panels. In: Marketing Science, 2012, Bd. 31, Nr. 6, S. 900–912, Noll, D.; Dawes, C.; Rai, V.: Solar Community Organizations and active peer effects in the adoption of residential PV. In: Energy Policy, 2014, Bd. 67, S. 330–343, Rai, V.; Robinson, S.A.: Effective information channels for reducing costs of environmentally-friendly technologies: evidence from residential PV markets. In: Environmental Research Letters, 2013, Bd. 8, Nr. 1, S. 14044, Graziano, M.; Gillingham, K.: Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: The influence of neigh-

bors and the built environment. In: *Journal of Economic Geography*, 2015, Bd. 15, Nr. 4, S. 815–839 sowie Inhoffen, J.H.; Siemroth, C.; Zahn, P.: Does Social Interaction Make Bad Policies Even Worse? Evidence from Renewable Energy Subsidies. 2016, SSRN Working Paper 2796130.

[3] In diesem Zusammenhang sei auf die bedeutende Forschungsarbeit von Griliches, Z.: Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change (in: *Econometrica*, 1957, Bd. 25, Nr. 4, S. 501–522) hingewiesen, der diesen Zusammenhang für den Fall von Hybridmais in verschiedenen Bundesstaaten der USA ökonomisch untersucht hat.

[4] Vgl. für eine Erläuterung z. B. Young, H. P.: Innovation Diffusion in Heterogeneous Populations: Contagion,

Social Influence, and Social Learning. In: *American Economic Review*, 2009, Bd. 99, Nr. 5, S. 1899–1924.

[5] Vgl. Bass, F.M.: A New Product Growth Model for Consumer Durables. In: *Management Science*, 1969, Bd. 15, Nr. 5, S. 215–227.

[6] Fixe räumliche Effekte erfassen alle Erhebungseinheit-spezifischen Faktoren, die über die Zeit stabil sind. Dies können im Fall von PV-Anlagen etwa das solare Strahlungsangebot, die grundsätzliche Geeignetheit von verfügbaren Installationsflächen etc. sein. Fixe zeitliche Effekte decken alle Faktoren ab, die alle Erhebungseinheiten gleichermaßen betreffen, aber sich über die Zeit unterscheiden: Im diskutierten Fall können dies etwa Anpassungen des Förderregimes, Großhandelspreise von PV-Modulen etc. sein.

[7] Die Radien der Innenkreise werden so gewählt, dass die gesamte vom Raster belegte Fläche mit Innenkreisen belegt wird, d. h. für den Fall eines 500-m-Rasters ist $r_0 = 500\text{m} \cdot \sqrt{2}$. Die Fläche der einzelnen Kreisringe ist konstant und identisch mit der Fläche des Innenkreises.

*A. Weber, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik, TU Berlin; J. Rode, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet Internationale Wirtschaft, TU Darmstadt
aw@wip.tu-berlin.de*