



# Was beeinflusst das Flexibilitätspotenzial?

**Elektromobilität** | Elektrofahrzeuge können sowohl eine Herausforderung als auch eine Unterstützung für das Stromsystem darstellen. Entscheidend ist, wie sie geladen werden. Um die mobilen Batterien für Flexibilitätsdienste nutzen zu können, sollten Verhaltensaspekte wie das Ladeverhalten und die Bereitschaft zur Teilnahme an der Flexibilitätsbereitstellung berücksichtigt werden.

CHRISTINE GSCHWENDTNER

Das künftige Stromsystem wird zunehmend mehr Flexibilität benötigen, was eine der zentralen Herausforderungen der Energiewende darstellt. Während der Solarstromanteil während der Mittagszeit am höchsten ist, können Elektrofahrzeuge (electric vehicles, EVs) die Nachfragespitzen am Abend erhöhen [1]. Das Flexibilitätspotenzial der Stromnachfrage steigt zunehmend aufgrund der Elektrifizierung, insbesondere durch die mobilen Batterien in EVs.

Wann, wo und wie viel Flexibilität EVs für das Stromsystem bereitstellen

können, hängt stark vom Ladeverhalten und dessen Steuerung ab. In einer Reihe von Studien<sup>1)</sup> [1,2,3] wurde untersucht, wie verschiedene Ladeverhalten und Steuerungsstrategien das Flexibilitätspotenzial von EVs beeinflussen. Mit diesen Erkenntnissen können Strategien entwickelt werden, um das technisch mögliche Flexibilitätspotenzial maximal auszuschöpfen. Da das Ladeverhalten auf dem Fahrverhalten basiert, werden in diesem Artikel zunächst die Fahrverhalten unterschiedlicher Fahrzeugnutzungen diskutiert. Anschliessend wird der

Einfluss des Ladeverhaltens auf das Flexibilitätspotenzial untersucht, was beispielsweise durch Anreize gesteuert werden kann. Dabei muss die Bereitschaft zur Teilnahme von EV-Nutzenden an der Bereitstellung von Flexibilität berücksichtigt werden.

## **Fahrverhalten: Verfügbarkeit und Vorhersagbarkeit**

Die geeignetsten EVs verbinden hohe Verfügbarkeit mit hoher Vorhersagbarkeit. Erstere liegt vor, wenn die EVs nur kurz fahren und die meiste Zeit geparkt und an eine Ladestation angeschlossen

sind. Letztere entsteht u. a. durch geplantes Fahrverhalten mit regelmässigen Parkzeiten (Fahrplan usw.).

**Tabelle 1** zeigt, dass manche Fahrzeugnutzungen geringere Verfügbarkeit, aber höhere Vorhersagbarkeit (Nutzfahrzeuge) oder umgekehrt (Privatfahrzeuge) aufweisen [2]. Sowohl höhere Verfügbarkeit als auch höhere Vorhersagbarkeit ist bei Nutzungen mit langen geplanten Parkzeiten gegeben, z. B. bei Schulbussen, oder in Parkhäusern mit langen Parkzeiten (Flughäfen). In diesen Fällen ist bidirektionales Laden, also sowohl Laden als auch Entladen der Batterie während der Parkzeit (Vehicle-to-Grid, V2G), besonders relevant, da die Batterie sonst nur einmal innerhalb der längeren Parkzeit vollständig geladen werden kann. Obwohl Privatfahrzeuge weniger gefahren werden als Carsharing EVs, können lange Standzeiten bei nicht gebuchten Carsharing EVs zu grossem Flexibilitätspotenzial führen. Die Kombination verschiedener Fahrzeugnutzungen und die daraus resultierende Vielfalt an zeitlichen und räumlichen Nutzungsmustern erhöht die Wahrscheinlichkeit, vereinbarte Flexibilitätsumengen zu einem bestimmten Zeitpunkt bereitstellen zu können.

Ein genauerer Blick auf das Fahrverhalten der Privatfahrzeugnutzenden verrät, dass es sehr unterschiedlich ist (**Bild 1**). In ländlichen Gebieten ist der Anteil der Langstreckenfahrer mit 26% relativ hoch [1]. Obwohl die beiden Fahrverhalten «Lange Strecken» und «Hohe Nutzung» einen relativ geringen Anteil an der Flotte ausmachen, verursachen sie die höchste durchschnittliche Lastspitze im Vergleich zu den anderen Fahrverhalten (**Bild 2a**). Die Flexibilität ist gering wegen des hohen Energiebedarfs bei langen Strecken und den relativ kurzen Parkzeiten, die nahezu vollständig für das Laden genutzt werden müssen. Folglich können diese Fahrverhalten eine besonders grosse Herausforderung für Verteilnetze darstellen, in denen viele Personen mit diesen Fahrverhalten ihre EVs aufladen, was insbesondere in ländlichen Gebieten der Fall sein könnte.

### Ladeverhalten: Unterschiedliches Flexibilitätspotenzial

Während das Fahr- und Ladeverhalten heute noch einheitlich erscheinen, werden sie mit der zunehmenden Ver-

breitung von EVs deutlich diverser. Daher wird in den Studien [1,3] ein breites Spektrum an Ladeverhalten berücksichtigt. Während das Einsteckverhalten von der Entscheidung der EV-Nutzenden abhängt, wann und wo sie einstecken, und sich auf die zeitliche und räumliche Verteilung der Last bezieht, sind Ladevorgänge typischerweise automatisiert – sobald dies vom Nutzenden akzeptiert wurde – und beziehen sich nur auf die zeitliche Verteilung der Last. Wie spielen diese beiden Komponenten des Ladeverhaltens zusammen, und wie beeinflussen sie das Flexibilitätspotenzial?

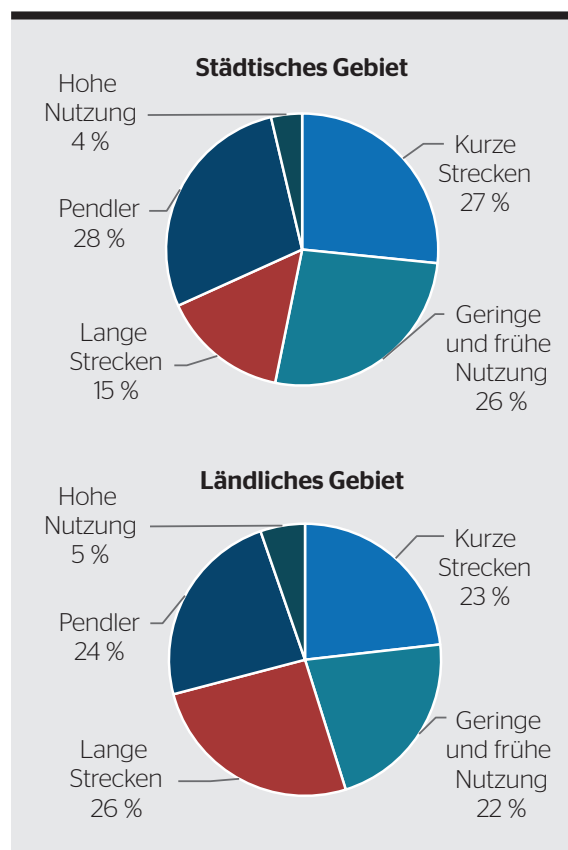
Wenn der Einfluss des Einsteckverhaltens mit den automatisierten Ladevorgängen verglichen wird, zeigt sich, dass die automatisierten Ladevorgänge das Flexibilitätspotenzial insgesamt stärker beeinflussen. Das Einsteckverhalten kann in bestimmten Netzgebieten aber einen erheblichen Effekt auf das Flexibilitätspotenzial aufweisen, insbesondere in ländlichen Netzgebieten. Hier spielt der Ausbau der Ladeinfrastruktur eine besonders relevante Rolle, da nur mit ausreichend diverser Ladeinfrastruktur eine räumliche Veränderung des Einsteckverhal-

tens und damit Verteilung der Ladelast möglich ist, d.h. neben zu Hause auch am Arbeitsplatz und an öffentlichen Orten.

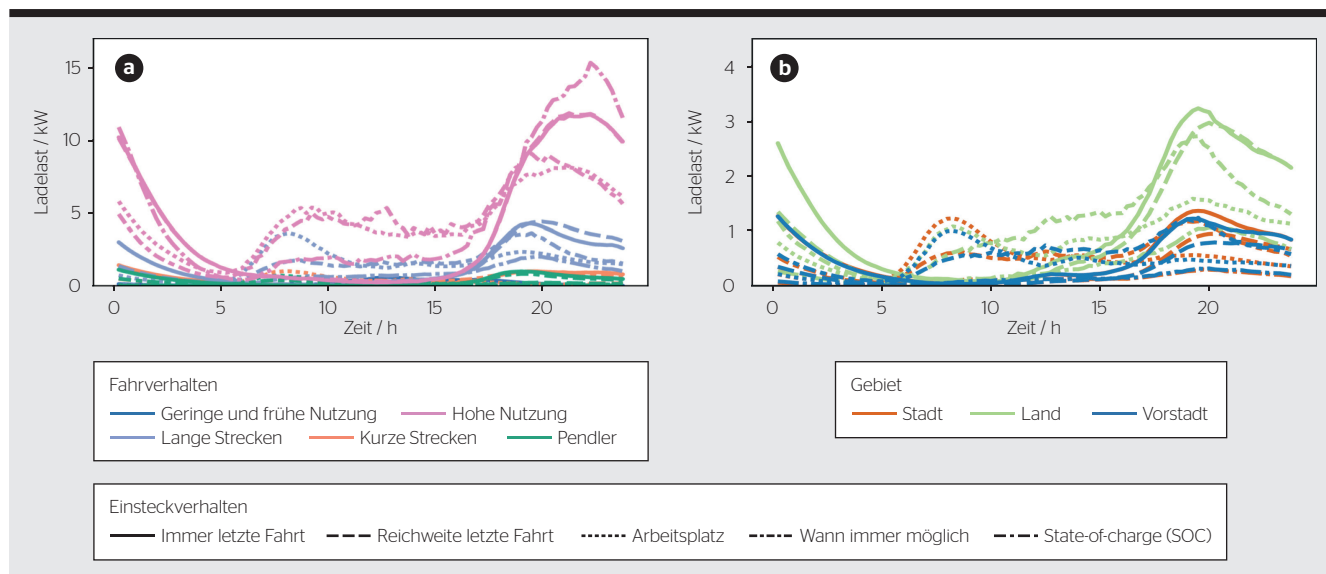
Ein weiterer Kontrast zwischen städtischen, vorstädtischen und ländlichen Gebieten sind die unterschiedlich hohen durchschnittlichen Lastspitzen. Wie **Bild 2b** zeigt, treten die höchsten durchschnittlichen Lastspitzen eines EVs in ländlichen Gebieten auf [1]. Diese Diskrepanz resultiert aus dem unterschiedlichen Fahrverhalten in diesen Gebieten (**Bild 1**). Insgesamt sind die vorteilhaftesten Kombinationen von Einsteckverhalten und automatisierten Ladevorgängen spezifisch für geografische Gebiete und deren Flexibilitätsanforderungen.

### Bereitschaft zur Bereitstellung von Flexibilität

Um das Flexibilitätspotenzial von EVs nutzen zu können, ist die Bereitschaft zur Teilnahme der EV-Nutzenden an der Flexibilitätsbereitstellung entscheidend. Sie müssen also dazu bereit sein, ihr Einsteckverhalten gegebenenfalls anzupassen und zuzustimmen, dass die Ladevorgänge automatisch gesteuert werden. Während die ersten



**Bild 1** Fahrverhalten bei Privatfahrzeugen in den Kantonen Zürich, Freiburg und Graubünden; Daten aus [1].



**Bild 2** Ladelast eines durchschnittlichen privaten EV **a)** mit verschiedenen Fahrverhalten und **b)** in verschiedenen Gebieten, unter der Annahme von 100 % Elektrifizierung der Autoflotte. Die Unterschiede zwischen den Linien gleicher Farbe zeigen jeweils die Flexibilität, die sich aus dem veränderten Einsteckverhalten ergeben kann. Basierend auf [1].

EV-Nutzenden meist grosses Interesse für neue Technologien zeigen, könnten besonders bei einer hohen Verbreitung von EVs die Nutzenden aufgrund von empfundenen Unannehmlichkeiten, Gewohnheiten oder persönlichen Vorlieben zögern, Flexibilität bereitzustellen [4]. Die Beteiligung kann nicht vollständig kontrolliert werden und führt daher zu Unsicherheiten in der tatsächlichen Bereitstellung von Flexibilität durch EVs.

Deshalb sind Anreize für EV-Nutzende notwendig, beispielsweise Preissignale oder Informationen, die sich an Flexibilitätszielen orientieren, z. B. der aktuellen Lastspitze im Netz oder CO<sub>2</sub>-Emissionen im Strommix. Während Informationen für die ersten EV-Nutzenden ausreichend sein könnten, wird erwartet, dass finanzielle Anreize nötig sind, wenn die Verbreitung von EVs hoch ist [5].

Es hat sich gezeigt, dass EV-Nutzende auf Preissignale reagieren [6]. Es wird zwar erwartet, dass zeitabhängige Kosten einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung der Lastspitzen leisten [7], aber bei verschiedenen EV-Nutzenden konnten erhebliche Unterschiede in der Wirkung von Preissignalen festgestellt werden [8].

Preissignale sollten einfach genug sein, um ihre Attraktivität für EV-Nutzende sicherzustellen und gleichzeitig Kompromisse zwischen Flexibilitätsdiensten auf den Ebenen der Übertra-

gung, Verteilung und Erzeugung berücksichtigen. Das Experimentieren mit Opt-in (die Nutzenden müssen sich für eine Teilnahme entscheiden) und Opt-out Konzepten (die Nutzenden müssen sich gegen eine Teilnahme entscheiden) könnte weitere Erkenntnisse darüber liefern, wie sowohl die Wahlmöglichkeiten der Nutzenden als auch die Flexibilitätsbereitstellung gleichzeitig maximiert werden könnten. Die Anreize für bestimmte Einsteckverhalten könnten sich, bei entsprechender Verbreitung von Ladeinfrastruktur an unterschiedlichen Orten, nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich unterscheiden. Dies kann dazu beitragen, die Ladelasten räumlich zu verteilen und damit zu diversifizieren, was wiederum zur Verringerung von Lastspitzen führen kann.

**Fazit**

Die nachfrageseitige Flexibilität hat das Potenzial, eine wirksame und kostengünstige Möglichkeit zur Integration variabler erneuerbarer Energien und zur Verringerung des Netzausbaubedarfs darzustellen. Das Flexibilitätspotenzial von EVs hängt wesentlich von drei Verhaltensaspekten ab: dem Fahr- und Ladeverhalten sowie der Bereitschaft zur Teilnahme an der Bereitstellung von Flexibilität. Verhaltensaspekte und Unterschiede zwischen verschiedenen EV-Nutzenden, insbesondere bei hoher Verbreitung von EVs, sollten bei der Entwicklung von passender Ladesteuerung und entsprechenden Anreizen berücksichtigt werden, um das technisch mögliche Flexibilitätspotenzial maximal ausschöpfen zu können.

Für Entscheidungsträger in der Politik und Industrie, beispielsweise Netz-

	Verfügbarkeit	Vorhersagbarkeit
<b>Nutzfahrzeuge</b>	<b>Geringer</b> Unterschiedliche Muster je nach Unternehmen	<b>Höher</b> Geplante Strecken und Nutzungszeiten
<b>Privatfahrzeuge</b>	<b>Höher</b> Ca. 96% der Zeit nicht für Mobilität genutzt	<b>Geringer</b> Vielfältige Bandbreite an Verhaltensweisen
<b>Schulbusse und Parkhäuser mit längeren Parkzeiten, z. B. an Flughäfen</b>	<b>Höher</b> Schulbusse 80-85% geparkt während des Jahres; Autos an Flughäfen für mehrere Wochen geparkt	<b>Höher</b> Geplante Strecken, Parkticket
<b>Carsharing</b>	<b>Geringer</b> Ca. 30% geringer als Privatfahrzeuge	<b>Höher</b> Buchung im Voraus, Erfahrungswerte

**Tabelle 1** Verfügbarkeit und Vorhersagbarkeit von Flexibilität durch verschiedene Fahrzeugnutzungen; basierend auf [2].

und Ladestationsbetreiber, ergeben sich einige Implikationen. Portfolios aus unterschiedlichen Fahrzeugnutzungen (z.B. verschiedene soziodemografische Gruppen, Nutz- und Privatfahrzeuge) zu entwickeln, erhöht die Zuverlässigkeit der Flexibilität von EVs und verringert damit die Unsicherheit der Flexibilitätsbereitstellung von verschiedenen EV-Nutzenden. Ausserdem sollten bei der Entwicklung von Strategien für die Erhöhung des Flexibilitätspotenzials von EVs das Fahrverhalten sowie beide Komponenten des Ladeverhaltens (Einsteckverhalten und automatisierte Ladevorgänge) berücksichtigt werden, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die resultierende Ladelast und ihre Flexibilität aufweisen. Darüber hinaus sollten dabei der geografische Kontext in einem bestimmten Netzgebiet und dessen Flexibilitätsanforderungen berücksichtigt werden, da davon abhängt, welche Einsteckverhalten und automatisierten Ladevorgänge zum höchsten Flexibilitätspotenzial führen können. In ländlichen Gebieten sollten Änderungen im Einsteckverhalten unterstützt werden,

da sie ein grösseres Flexibilitätspotenzial bieten als in städtischen Gebieten. In städtischen Gebieten sollte dagegen der Fokus auf den Ladevorgängen liegen. Um die Ladelast räumlich verteilen zu können und damit die Lastspitzen zu reduzieren, ist die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur an unterschiedlichen Orten notwendig, z.B. am Arbeitsplatz und an öffentlichen Orten. Zusätzlich sollten wirksame finanzielle Anreize entwickelt werden, die mehrere Flexibilitätsziele integrieren, z.B. Lastspitzen und CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren, und die entsprechenden Einsteckverhalten und automatisierten Ladevorgänge fördern. Dabei sollte die Attraktivität der Anreize für EV-Nutzende sichergestellt werden.

#### Referenzen

- [1] C. Gschwendtner et al., «The impact of plug-in behavior on the spatial-temporal flexibility of electric vehicle charging load», *Sustain. Cities Soc.* 88, 2023, 104263. doi.org/10.1016/j.scs.2022.104263
- [2] C. Gschwendtner et al., «Vehicle-to-X (V2X) implementation: An overview of predominate trial configurations and technical, social and regulatory challenges», *Renew. Sustain. Energy Rev.* 145, 2023, 110977. doi.org/10.1016/j.rser.2021.110977
- [3] C. Gschwendtner et al., «Mind the Goal: Trade-offs between Flexibility Goals for Controlled Electric Vehicle

Charging Strategies», *iScience* 26 (2), 2023, 105937. doi.org/10.1016/j.isci.2023.105937

- [4] M. Muratori, «Impact of uncoordinated plug-in electric vehicle charging on residential power demand», *Nat. Energy* 2018 3, 2018, S. 193-201. doi.org/10.1038/s41560-017-0074-z
- [5] M. Kubli, «EV drivers' willingness to accept smart charging: Measuring preferences of potential adopters», *Transp. Res. Part D Transp. Env.* 109, 2022, 103396. doi.org/10.1016/j.trd.2022.103396
- [6] J. Bailey, J. Axsen, «Anticipating PEV buyers' acceptance of utility controlled charging», *Transp. Res. Part A Pol. Prac.* 82, 2015, S. 29-46. doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.004
- [7] T. M. Khanna et al., «A multi-country meta-analysis on the role of behavioural change in reducing energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in residential buildings», *Nat. Energy*, 6(9), 2021, S. 925-932. doi.org/10.1038/s41560-021-00866-x
- [8] J. H. M. Langbroek et al., «When do you charge your electric vehicle? A stated adaptation approach», *Energy Policy* 108, 2017, S. 565-573. doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.023



#### Autorin

Dr. **Christine Gschwendtner** ist Postdoc am Institut für Daten, Systeme und Gesellschaft des Massachusetts Institute of Technology.  
→ MIT, Cambridge, MA 02142, USA  
→ cgschwen@mit.edu

<sup>1)</sup> Dieser Artikel basiert auf Erkenntnissen des Forschungsprojektes «Enabling Flexible Electric Vehicle Grid Integration (ErVIn)» der Gruppe für Nachhaltigkeit und Technologie (SusTec) der ETH Zürich. Für Inhalt sowie Schlussfolgerungen ist ausschliesslich die Autorin verantwortlich. Das Projekt wurde mit Unterstützung des Bundesamts für Energie durchgeführt.

## RÉSUMÉ

### Qu'est-ce qui influence le potentiel de flexibilité ?

Mobilité électrique

Les véhicules électriques (VE) peuvent représenter autant un défi qu'un soutien pour le système électrique. La manière dont ils sont rechargés est déterminante. La flexibilité du côté de la demande peut en effet constituer une solution efficace et peu onéreuse pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables variables dans le réseau et réduire ses besoins en matière d'extension. Le potentiel de flexibilité des VE dépend essentiellement de trois aspects comportementaux: les comportements en matière de conduite et de recharge ainsi que la disposition à participer à la fourniture de flexibilité. Les aspects comportementaux et les différences entre les divers utilisateurs de VE, notamment en cas de forte augmentation du nombre de ces véhicules, devraient être pris en compte lors du développement d'une gestion de la charge adaptée et des incitations correspondantes, et ce, afin de pouvoir exploiter au maximum le potentiel de flexibilité techniquement possible.

Pour les décideurs politiques et industriels, par exemple les gestionnaires de réseaux et les exploitants de stations de recharge, il en résulte quelques implications. Développer

des portefeuilles pour les différents usages des véhicules (par exemple différents groupes sociodémographiques, véhicules utilitaires et privés) augmente la fiabilité de la flexibilité des VE. En outre, lors du développement de stratégies visant à augmenter le potentiel de flexibilité de ces véhicules, il convient de prendre en compte le comportement de conduite ainsi que les deux composantes du comportement de recharge (comportement de branchement et processus de recharge automatisé). Enfin, le contexte géographique dans la zone du réseau devrait être considéré, car c'est de cela que dépendent les comportements de branchement et les processus de recharge automatisés pouvant mener au plus grand potentiel de flexibilité. Dans les zones rurales, les changements de comportement de branchement devraient être encouragés, car ils offrent un plus grand potentiel de flexibilité que dans les zones urbaines. En revanche, dans les zones urbaines, l'accent devrait être mis sur les processus de recharge. Il convient dans ce cas de s'assurer de l'attractivité des incitations pour les utilisateurs de véhicules électriques.