

Photovoltaik für den Straßenverkehr im Energiesystem der Zukunft

Einleitung

Solarstrom ist regenerativ und emissionsarm. Photovoltaik (PV) ist in den meisten Teilen der Welt die kostengünstigste Stromquelle geworden [1]. Kombiniert mit Windenergie und Speicherlösungen bildet sie eine der essenziellen Grundlagen des zukünftigen nachhaltigen Energiesystems. Der schnelle weltweite Einsatz ist wichtig, um den globalen Temperaturanstieg auf unter 2 Grad zu begrenzen [2]. Dabei kann Solarstrom die Treibhausgasemissionen nicht nur im Stromsektor, sondern auch aus anderen Industrien reduzieren. Durch die deutlich verstärkte Elektrifizierung in allen Wirtschaftsbereichen bis zum Jahr 2050 wird PV auch im Verkehr eingesetzt werden, um den dort steigenden Strombedarf zu decken.

Zukunft des Verkehrssektors

Nach Angaben der European Energy Agency (EEA) ist der Verkehrssektor mit mehr als einem Viertel der Emissionen der EU derzeit der größte Emissionssektor [3]. Ungeachtet aller technologischen Anstrengungen sind die Emissionen aus dem Transport in den letzten Jahren weiter gestiegen, während die Emissionen anderer Sektoren reduziert werden konnten.

Um eine weitgehende Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, ist jedoch eine 90%ige Reduktion der Verkehrsemissionen notwendig. Daher hat sich die EU auf eine Reihe kurzfristiger politischer Maßnahmen geeinigt, die darauf abzielen, den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Für das Jahr 2030 wurde eine 37,5%ige Reduzierung der CO₂-Emissionen für neue Personenkraftwagen und ein 31%iges Reduktionsziel für neue Lkw beschlossen.

Gegenwärtig sind verschiedene Technologien auf dem Markt, die eine hohe Technologiereife bieten. Die E-Mobilität ist ein zentrales Element der Transformation des Verkehrssektors. Im Allgemeinen wird die direkte Elektrifizierung als die effizienteste technologische Lösung zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs anerkannt. Darunter fallen nicht nur Batterie-Elektrofahrzeuge, sondern auch Elektrofahrzeuge, die mit Brennstoffzellen betrieben werden.

Batteriefahrzeuge haben in der Betriebsphase klare Vorteile gegenüber den Verbrennern bezüglich Effizienz und lokaler Emissionen. Ihre Umweltwirkungen in der Produktionsphase und bei der Energieversorgung sind allerdings nicht immer eindeutig. Bisherige Studien zeigen ein hohes Potenzial zur Reduzierung der Emissionen von CO₂, aber nur, wenn ein kohlenstoffarmer Strommix für die Batterieherstellung und die Batterieladung in der Nutzungsphase verwendet wird [4].

Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCV), die mit Wasserstoff betrieben werden, der mithilfe erneuerbaren Stroms durch Wasserelektrolyse hergestellt wird, werden ebenso als vielversprechende Technologie angesehen. Allerdings ist der Gesamtwirkungsgrad von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen deutlich niedriger als der von Batterie-Elektrofahrzeugen, da die Nutzung von Wasserstoff mehrere zusätzliche Schritte der Energieumwandlung erfordert. Dennoch ist die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie effizienter als die Verwendung synthetischer Kraftstoffe und konventioneller Verbrennungsmotoren (ICEs).

Im Gegenzug bietet Wasserstoff aufgrund seiner im Vergleich zu Strom besseren Speicherbarkeit Vorteile bezüglich der Nützlichkeit in Energiesystemen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien.

Generell kann festgestellt werden, dass Batteriefahrzeuge besser für leichte Fahrzeuge mit kurzer Reichweite (z. B. Pkw) geeignet sind, während Wasserstoff für Langstrecken-Pkw und energieintensivere schwere Nutzfahrzeuge (z. B. Langstrecken-Lkw) besser geeignet erscheint.

In Europa gibt es etwa 250 Millionen leichte Nutzfahrzeuge (hauptsächlich Pkw und Lieferwagen) und etwa 6,5 Millionen Lkw und Busse. Das Hauptaugenmerk liegt daher heute auf der Entwicklung von Batterien für leichte Nutzfahrzeuge. Da jedoch die Prognosen für das Verkehrswachstum in der EU in den nächsten Jahrzehnten zeigen, dass sowohl der Personen- als auch der Güterverkehr zunehmen werden, wird es wichtig sein, auch für Brennstoffzellenautos Lösungen zu entwickeln.



FZ Jülich
Dr. Kaining Ding
k.ding@fz-juelich.de

Olga Kanz
o.kanz@fz-juelich.de

Dr. Thomas Grube
th.grube@fz-juelich.de

Prof. Dr. Uwe Rau
u.rau@fz-juelich.de

Fraunhofer ISE
Dr. Martin Heinrich
martin.heinrich@ise.fraunhofer.de

HZB
Prof. Dr. Rutger Schlatmann
rutger.schatmann@helmholtz-berlin.de

ISFH
Prof. Dr. Robby Peibst
peibst@isfh.de

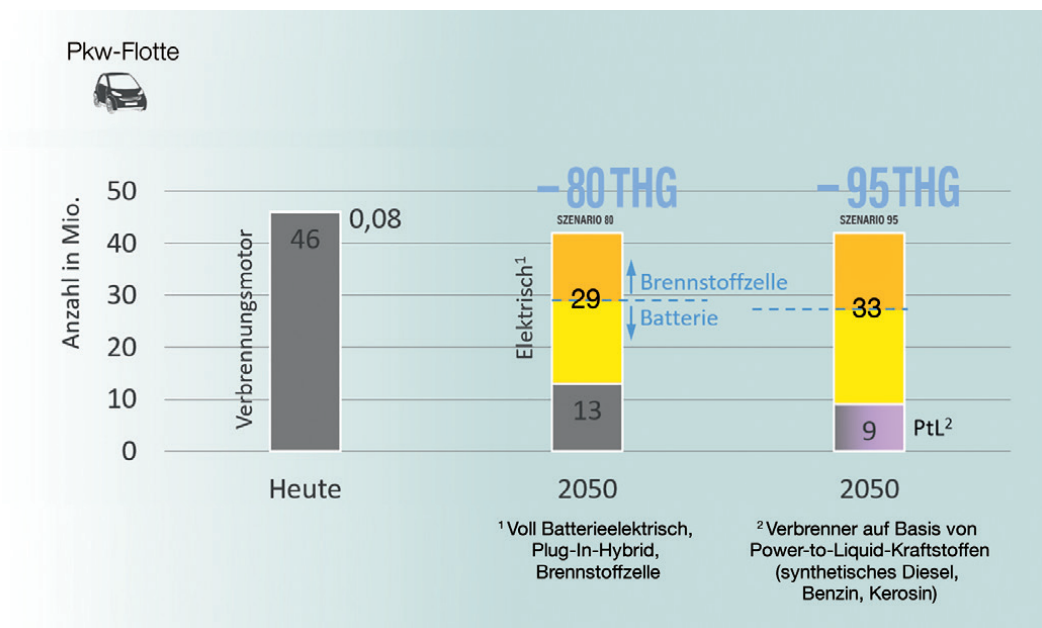
KIT
Apl. Prof. Dr. Alexander Colsmann
alexander.colsmann@kit.edu

ZSW
Dr. Jann Binder
jann.binder@zsw-bw.de

Abbildung 1

Kostenoptimierte Transformationsstrategien für die deutsche Pkw-Flotte in unterschiedlichen Energieszenarien

links: Pkw-Flotte im 80 %-Reduktionsszenario
rechts: Pkw-Flotte im 95 %-Reduktionsszenario
(Quelle: [5])



Je größer der Anteil der Elektrofahrzeuge, desto weniger Benzin wird benötigt, doch steigt dadurch auch der Stromverbrauch des Verkehrs. Hierzu wurde eine Studie vom Forschungszentrum Jülich über kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem veröffentlicht. Das Ergebnis zeigt, dass unter der Annahme, dass die Treibhausgase bis 2050 um 80 % bzw. 95 % gegenüber dem Emissionsniveau von 1990 reduziert werden, die Stromnachfrage des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 auf ca. 40–49 TWh/a ansteigen wird. Für das 80%-Szenario resultiert die kostenoptimale Lösung in einer Flotte von 29 Millionen E-Pkw für das Jahr 2050 und im 95%-Szenario sogar in einer Flotte von 33 Millionen E-Pkw. Abbildung 1 zeigt links das Ergebnis für das 80%- und rechts für das 95%-Reduktionsszenario. Doch woher kommt der benötigte Strom? (► *Abbildung 1*)

- indirekt als erneuerbare Quelle zur Stromerzeugung, zum Aufladen von batterieelektrischen Fahrzeugen oder Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeugen (PHEV)
- direkt über fahrzeugintegrierte PV (engl. vehicle integrated PV = VIPV)

► *Abbildung 2* zeigt die Übersicht unterschiedlicher Anwendungsbereiche.

Direkte PV-Integration in Fahrzeuge

Fahrzeugintegrierte Solarzellen wurden erstmals in den 1960er Jahren vorgeschlagen. In den 1980er und 1990er Jahren wurden fahrzeugintegrierte Solarzellen als ein Add-on genutzt, welches eine zusätzliche Energiequelle für die Beleuchtung oder Klimatisierung darstellt.

Der VIPV-Markt machte sich die Entwicklung des PV-Marktes zunutze. Unter den ersten kommerziellen Modellen waren Plug-in-Hybridautos, die mit Solar-dächern ausgestattet wurden. So wurde der Toyota Prius Plug-in-Hybrid 2012 auf den Markt gebracht. Das Auto war mit einer 180-Wp(WattPeak)-Solaranlage ausgestattet. Im Jahr 2019 folgte der Prius PHEV mit einem effizienteren Solar-Photovoltaikdach. Hocheffiziente 860 Wp-Triple-Junction-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 34% wurden in das Fahrzeug integriert. Die maximale Lade- und Stromversorgung der Antriebs- und Hilfsbatterie ermöglichen unter besten Bedingungen eine Reichweite von 56,3 km. Ebenso gibt es europäische Fahrzeughersteller für VIPV: Sono Motors aus München

PV-Anwendungen im Verkehr

Die Elektrifizierung des Verkehrssektors wird viele neue Anwendungsmöglichkeiten für die Photovoltaik eröffnen. Vergleicht man verschiedene Stromquellen, so ist die Solarenergie dank erheblicher Kostensenkungen und Nachhaltigkeitsaspekte die geeignetste Wahl.

Solarbasierte Anwendungen können für den Verkehr auf verschiedene Weise genutzt werden:

- indirekt durch die Herstellung von Biokraftstoffen (für konventionelle Fahrzeuge) oder Wasserstoff (für Brennstoffzellenfahrzeuge)

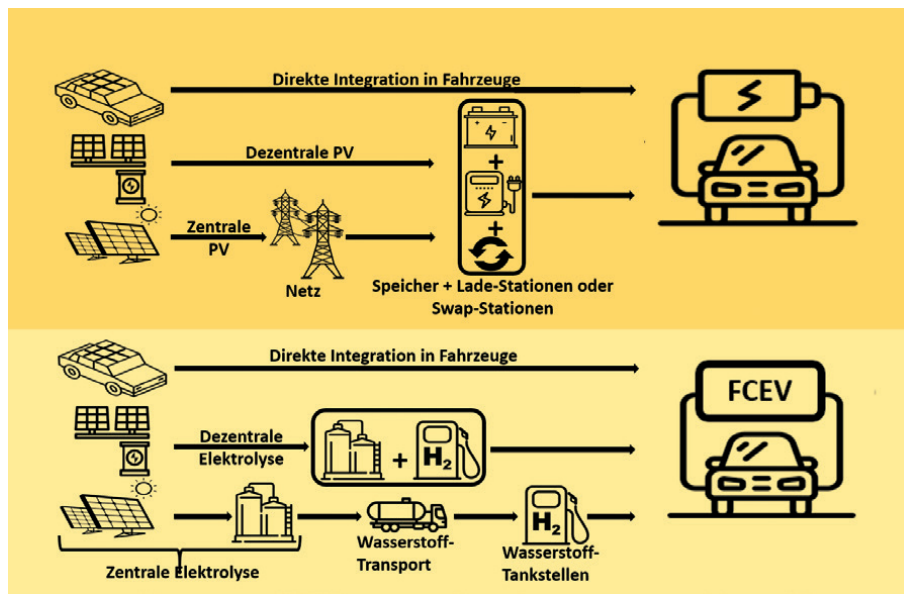


Abbildung 2
**PV im elektrifizierten
 Straßenverkehr**
 (Quelle: eigene Darstellung)

verwendet monokristalline Silizium-Solarzellen, um die Karosserie des Solarautos Sion abzudecken. Unter besten Bedingungen erzeugen die Zellen 1200Wp und erhöhen die Reichweite (max. 255 km WLTP [Prüfverfahren „Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure“] bei 35 kWh) bis zu 34 Kilometer pro Tag. Lightyear aus Eindhoven hat in Zusammenarbeit mit Siemens und NXP ein Luxus-Solarfahrzeug für 2020 angekündigt. Der Lightyear One wird über mehr als 5 m² integrierte Solarzellen verfügen, die 1250Wp erzeugen können. Unter optimalen Bedingungen werden die Solarzellen zusätzlich bis zu 200 km zur Ladung der 60 kWh-Batterie beitragen. Bei einem beeindruckend niedrigen Energieverbrauch von 83 Wh/km (WLTP) können bei optimaler Solarausbeute fast 780 km Reichweite erreicht werden.

Auch in der Forschung gibt es zahlreiche Projekte:

- Bei PATOS (2016 bis 2019) wurde ein Schiebendach in ein Verbrenner-Auto integriert, um die Versorgung der Lüftung mit Solarstrom zu erforschen.
- Im Projekt Street (2018 bis 2021) geht es um Leicht-Nutzfahrzeuge mit integrierter PV.
- Das Projekt Lade-PV (2019 bis 2022) fokussiert sich ebenso auf Lkw. Solarstrom soll hierbei für die Kühlung des Laderaums verwendet werden.

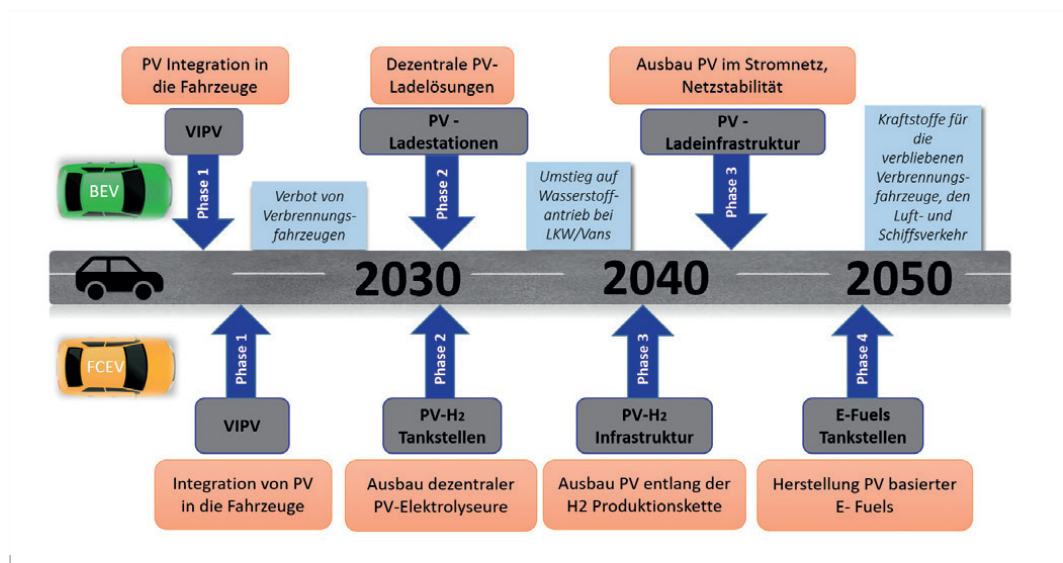
Die Ergebnisse aus der Forschung zeigen, dass sich VIPV für größere Fahrzeuge wie Lkw früher durchsetzen kann. Der Energieverbrauch im Fahrzeug, beispielsweise durch die Klimaanlage, Kaffeemaschine, Kochherd etc. kann dabei mit Sonnenenergie gedeckt werden.

Herausforderung in der Forschung und Entwicklung

Aus technischer Sicht wird es mehrere Herausforderungen geben bei der Abstimmung des Strombedarfs großer Flotten von Elektrofahrzeugen mit der Stromkapazität in den regionalen und lokalen Netzen. Daher wird es wichtig sein, lokale Energiespeichersysteme einzubeziehen, die die Belastung der bestehenden Stromnetze minimieren und die Notwendigkeit von Investitionen in neue Stromnetze verringern. Sowohl PV/Batterie- als auch PV/Wasserstoff-Energiespeichersysteme können als mögliche Lösungen zur Pufferung der im Laufe der Zeit schwankenden PV-Energieproduktion betrachtet werden, und zwar um sowohl kurzfristige Schwankungen (Minuten und Stunden) als auch längerfristige Schwankungen (Tage und Wochen) auszugleichen. Für die zuvor diskutierten PV-Lösungen bleibt die optimale Auslegung für die Integration in die Fahrzeuge und Solarladesysteme in das Stromnetz eine entscheidende Frage.

Eine der wichtigsten Herausforderungen für die Forschung und Entwicklung besteht darin, ein geeignetes Fahrzeugnutzungsmodell zu finden, um das Verhältnis zwischen der Nutzung von Solarenergie und PV-Leistung zu maximieren. Messungen mit Strahlungssensoren, die die Abschattungs- und Reflexionsbedingungen der Fahrzeuge untersuchen, Tests mit Solarmodulen zur Validierung der Berechnungen sowie die geeigneten Speicher- und Batteriemangementsysteme sind wichtig. Hierzu sind internationale Methoden zur Bewertung der Reduktion der CO₂-Emissionen von Netzstrom

Abbildung 3
Mögliche Marktentwicklungen der Solaranwendungen im Straßentransportsektor
 oben: Batterie-Elektrofahrzeuge (BEV)
 unten: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV)
 (Quelle: eigene Darstellung)



(Kapazität, Verbrauch...) sowie des ökonomischen und ökologischen Nutzens erforderlich.

Außerdem muss eine Standardisierung der Technologie eingeführt werden. Eine verbesserte Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen den Akteuren im Automobil- und PV-Bereich kann zur Lösung dieses Problems beitragen. Ebenso können internationale Methoden dazu beitragen, den geschaffenen Wert zu kommunizieren und die Integration von Solarladung und VIPV in die nationale Klimapolitik zu unterstützen.

Die weltweite Markteinführung von PV-Produkten im Transport ist natürlich mit der Einhaltung von Vorschriften verbunden, in diesem Fall sowohl aus dem PV- als auch aus dem Transportsektor. Angesichts der Neuartigkeit der meisten vorgeschlagenen Lösungen werden neue Normen (IEC - CEN/CENELEC) erforderlich sein, um diese Technologien voranzutreiben und regulatorische Hindernisse zu überwinden.

Es gibt technologische Hürden, die für die Anwendungen der Lkw zu überwinden sind. Das Gewicht spielt beispielsweise eine große Rolle für die Wirtschaftlichkeit, die VIPV darf eine maximale Breite nicht überschreiten und es gibt extra Sicherheitsregelungen (bleifreie Materialien). In Bezug auf die konkrete Realisierung von Fahrzeugen mit integrierter Photovoltaik sind wichtige Entwicklungsthemen: leichte und trotzdem haltbare sowie hocheffizienter PV-Module, die Belegung von gekrümmten Flächen mit Solarzellen, die Integration der PV-Module in die Fahrzeugästhetik, sowie die Entwicklung geeigneter elektronischer Komponenten wie schnelle Maximum-Powerpoint-Tracker.

Durch die unterschiedliche Marktreife der Anwendungen wird PV im elektrifizierten Straßentransportsektor etappenweise eingeführt. Die exakte Reihenfolge der Anwendungen ist nur schwer vorherzusehen, doch einige Anwendungen, wie VIPV, sind reifer als andere. Die komplexeste Lösung ist das Aufbauen von zentralen Infrastrukturen. Diese ist zwar eine zielführende Lösung, aber nur langfristig zu erreichen. ► **Abbildung 3** zeigt mögliche Entwicklungen auf dem Bereich der solaren Anwendungen im Verkehr.

Fazit und Ausblick

Der moderne Verkehr benötigt eine kostengünstige Energiequelle mit minimaler Umweltbelastung, um fossile Brennstoffe zu ersetzen. Das Potenzial der PV im Straßenverkehr wächst kontinuierlich. Einerseits, weil der Markt für E-Mobilität boomt und andererseits, weil PV-Strom so günstig geworden ist. Die Einbindung solarbasierter Anwendungen kann im Verkehr auf verschiedene Weisen erfolgen: indirekt beim Laden oder per direkter Integration in die Fahrzeuge. Neben einer kostengünstigen, nachhaltigen und umweltfreundlichen Energieerzeugung bietet direkte PV-Integration auch eine größere Unabhängigkeit vom Netzanschluss. Doch die Herstellung hocheffizienter, speziell für die Anforderungen geeigneter Solarzellen sowie die ästhetisch anspruchsvolle Integration bleiben eine Herausforderung. Die Forschung darf jedoch die bereits bewährte PV-Technologien nicht aus den Augen verlieren: Es werden reife PV-Technologien für reife Anwendungen benötigt, um in diesem Bereich wirtschaftlich erfolgreich zu sein. Es bietet sich eine reale Chance

für das Comeback der deutschen PV-Industrie. Deutschland hat nur ein begrenztes Zeitfenster, um eine VIPV-Wertschöpfungskette und einen VIPV-Markt aufzubauen. Wenn alle Beteiligten von der Forschung über die Industrie bis hin zur Politik aktiver werden und alle Akteure an einem Strang ziehen, werden die PV-Anwendungen im Verkehr Realität werden.

Literatur

- [1] „Lazard’s levelized cost of energy analysis“, Lazard <https://www.lazard.com> (2019)
- [2] „Big and Beyond“, ETIP-PV <https://etip-pv.eu> (2018)
- [3] „Decarbonisation of Transport: options and challenges“, EASAC <https://easac.eu> (2019)
- [4] „Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, Agora Verkehrswende <https://www.agora-verkehrswende.de> (2019)
- [5] „Wege in die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050“ M. Robinius et. al. <https://www.fz-juelich.de> (2020)
- [6] „Solar in the driving seat“, Solar Power Europe, <https://www.solarpowereurope.org> (2019)