

SOLARSTROM VOM AUTODACH

Schon in den Pionierzeiten der Solarenergie wurde versucht, die Aussenhülle von Elektroautos für die Erzeugung von Solarstrom zu nutzen. Trotz vieler Anläufe hat sich die Idee bisher nicht in der Breite durchgesetzt. Ein Westschweizer Forschungsprojekt hat nun ein leichtes und flexibel formbares Photovoltaik-Modul aus Kunststoff entwickelt. Der auf Fahrzeugen so selbst erzeugte Solarstrom könnte diesen zusätzliche Reichweiten von 1'000 Kilometern und mehr pro Jahr ermöglichen.



Dieser Renault Twizy wird beim CSEM gegenwärtig mit einem Solardach aus Kunststoff und einer selbst entwickelten Batterie ausgerüstet. Das Fahrzeug dient auch dazu, die am CSEM entwickelten Technologien zu demonstrieren. So wurde das solare Elektroauto im November 2024 beim CSEM Business Day 2024 im Kursaal in Bern ausgestellt. Foto: Leonardo Panattoni

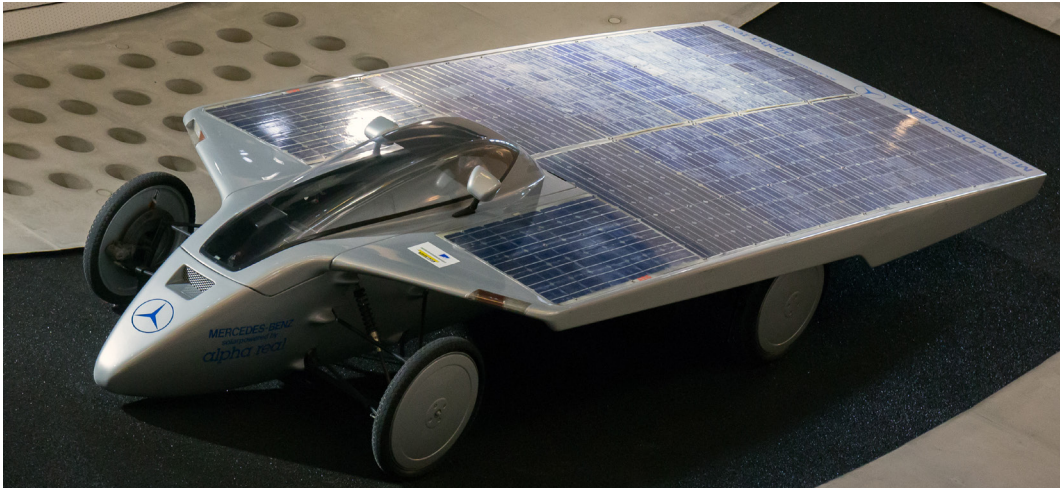


Bild aus den Pionierzeiten der fahrzeugintegrierten Photovoltaik: Das Siegerfahrzeug der Tour de Sol von 1985 (ausgestellt im Mercedes-Benz-Museum in Stuttgart). Foto: Morio, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons

Im Jahr 1985 wurde in der Schweiz die erste Tour de Sol durchgeführt. Der Wettbewerb für solargetriebene Rennwagen führte in fünf Etappen von Romanshorn nach Genf. Die Fahrzeuge durften für den Antrieb Solardächer mit bis zu 6 Quadratmetern Fläche bzw. einer Leistung von 480 W nutzen. Den Sieg errang ein Fahrzeug, das Mercedes-Benz und das Schweizer Ingenieurbüros alpha real an den Start geschickt hatten.

Das Schaulaufen von einfallsreichen Solaringenieuren inspirierte die etablierten Autohersteller. Sie griffen die Idee des Solarantriebs auf. Audi präsentierte 1989 ein erstes Auto mit einem Solardach. Vier Jahre später hatte der Audi A8 ein Solardach mit 30 Watt Leistung, das den Wagen an heißen Tagen kühlte. Im Jahr 2010 rüstete Toyota seinen Prius mit einem Solardach (53 Watt) aus, um die Batterie des Hybridfahrzeugs zu laden. Seither steigerten Autohersteller wie

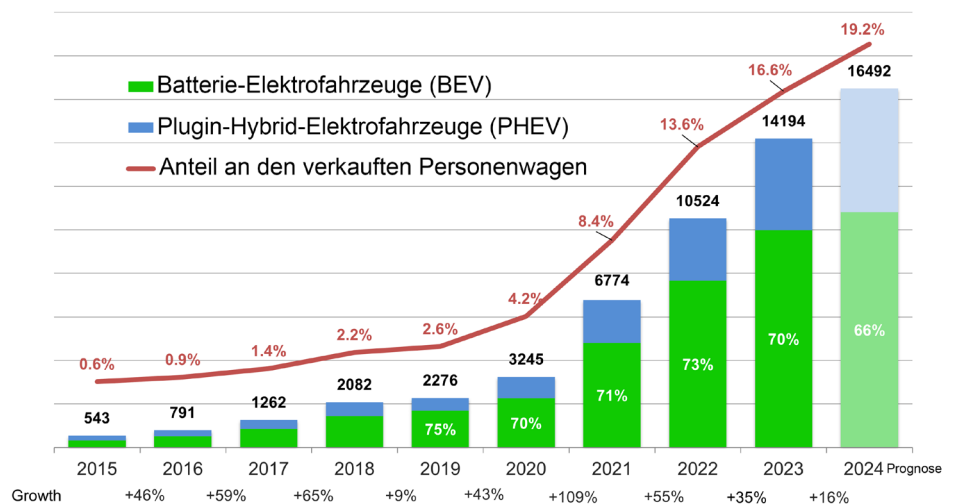
Toyota, Karma, Hyundai, Genesis, Kia und Fisker die Leistung der fahrzeugeigenen Solarpanele. Die Geländelimousine Fisker Ocean erreichte zuletzt eine Leistung von 270 Watt.

CSEM forscht für Komponentenhersteller

Die fahrzeugintegrierte Photovoltaik (Vehicle Integrated PV/ VIPV), die Nutzung von Photovoltaik in Fahrzeugen, hat in den letzten Jahren grosse Fortschritte gemacht. Die Vorteile einer fahrzeuggestützten Solarstrom-Produktion liegen auf der Hand: Der selbst erzeugte Strom steigert die Reichweite, und dies gerade an Tagen mit sonnigem Ausflugs- und Ferienwetter. Darüber hinaus wird das Stromnetz entlastet, wenn E-Autos seltener an die Ladestation müssen.

Trotzdem bleibt die Nutzung der Karosserie zur Stromproduktion bisher ein Nischenphänomen. Solarzellen sind z.B. beim Toyota Prius oder dem Hyundai Ioniq 5 ein kostenpflichtiges

Verkaufte Elektromobile weltweit (in Tausend)



Die Zahl der weltweit verkauften Elektrofahrzeuge wächst – und damit auch das Potenzial für VIPV-Anwendungen. Grafik: EV VOLUMES/ J.D. Power

Extra. In Camping-Mobilen wird die solare Stromerzeugung zwar gern eingesetzt, bei Elektrofahrzeugen hingegen ist sie noch längst nicht Standard. Firmen wie SonoMotors, Light-year oder Fisker, die ganz auf VIPV setzten, konnten sich mit ihren Neuentwicklungen am Markt bisher nicht etablieren. «Ein Solarauto *from scratch* – also von Grund auf – neu zu konzipieren, ist teuer. Will man der VIPV zum Durchbruch verhelfen, ist es sinnvoller, Solardächer von spezialisierten Lieferanten in bestehende Fahrzeugmodelle einzubauen», sagt Antonin Faes vom Neuenburger Technologie-Innovationszentrum CSEM.

Polymer statt Glas

PV-Dächer für Autos stammen unter anderen von Zulieferfirmen wie a2-solar, AGC, Kaneka, Simoldes Plastics oder Webasto. Seit 2020 kooperiert das CSEM mit der portugiesischen Firma Simoldes Plastics, die ein PV-Dach für Stellantis entwickelt hat. Parallel arbeitete das CSEM in den letzten drei Jahren gemeinsam mit dem PV-Labor der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) in Neuenburg an einer neuen Architektur für VIPV-Module. Als Trägermaterial der Solarzellen wird nicht Glas verwendet, wie bisher üblich, sondern Kunststoff (Polymer). Das Projekt mit dem Namen SolarBody wird vom BFE unterstützt und läuft noch bis 2025.

Geleitet wird SolarBody von Antonin Faes. Nach Auskunft des CSEM-Wissenschaftlers hat Kunststoff gegenüber Glas mehrere Vorteile: «Polymer-Module haben weniger Gewicht und eine höhere Bruchfestigkeit. Sie erlauben zudem Anwendungen mit einem grösseren Formenreichtum und sind einfacher herstellbar als Glasmodule.» Gemeinsam mit Industriepartnern hat das CSEM an mehreren Prototypen von Solarautos mitgewirkt, die mit Polymer-Modulen ausgerüstet sind und wo die Machbarkeit und das Potenzial von Kunststoffmodulen aufgezeigt wurde.

Eines dieser Projekte lief von 2020 bis 2024 unter dem Namen «PhotoVoltaic Automotive Body» (PVAB) mit Julien Robin von Simoldes als Projektleiter. Beteiligt waren neben CSEM und Simoldes das portugiesische Produktentwicklungszentrum CEiiA und der Autokonzern Stellantis. Die Forschungspartner versahen ein Elektrofahrzeug vom Typ Citroën AML, das in der Normalausstattung über ein Glasdach (ohne PV) verfügt, mit einem PV-Dach aus Kunststoff (0.71 m², 140 W Leistung). Die Kunststoffkonstruktion ist 13 % leichter als ein entsprechendes Glasmodul. Sie sichert dem für den Stadtverkehr konzipierten Fahrzeug an einem sonnigen Tag eine



Der Citroën AML, ausgerüstet mit einem Solardach aus Kunststoff. Foto aus: Julien Robin, et al. «PhotoVoltaic Automotive Body (PVAB) Project Outcome of 3 years of VIPV R&D industrial project» in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchâtel.



Bei diesem Peugeot 508 wurde die Heckscheibe durch ein Kunststoff-Modul mit Solarzellen ersetzt. Foto aus: Julien Robin, et al. «PhotoVoltaic Automotive Body (PVAB) Project Outcome of 3 years of VIPV R&D industrial project» in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchâtel.

zusätzliche Reichweite von bis zu 8 km. Auf ein Jahr gerechnet entspricht dies rund 1'790 km (berechnet für den Standort München mit durchschnittlich 3'515 Sonnenstunden pro Jahr). Bei einer jährlichen Fahrleistung von 7'000 km könnte das Stadtfahrzeug rund einen Viertel mit Solarstrom bewältigen.

PV-Zellen auf der gesamten Aussenfläche

In einem zweiten Projekt arbeitete CSEM abermals mit Simoldes Plastics und CEiiA zusammen, später ergänzt um das

POLYMER ERSETZT GLAS

Herkömmliche Solarmodule bestehen sonnenseitig aus einer 2 bis 3 mm dicken Frontplatte aus Glas. Darunter werden mehrere Kunststoffschichten aufgebracht, in die die Solarzellen eingebettet sind. Auf der sonnenabgewandten Seite wird das Solarmodul durch eine weitere Kunststoffolie oder eine zweite Glasplatte belegt und mit den nötigen Anschlüssen versehen, damit der Solarstrom ins Netz geleitet werden kann.

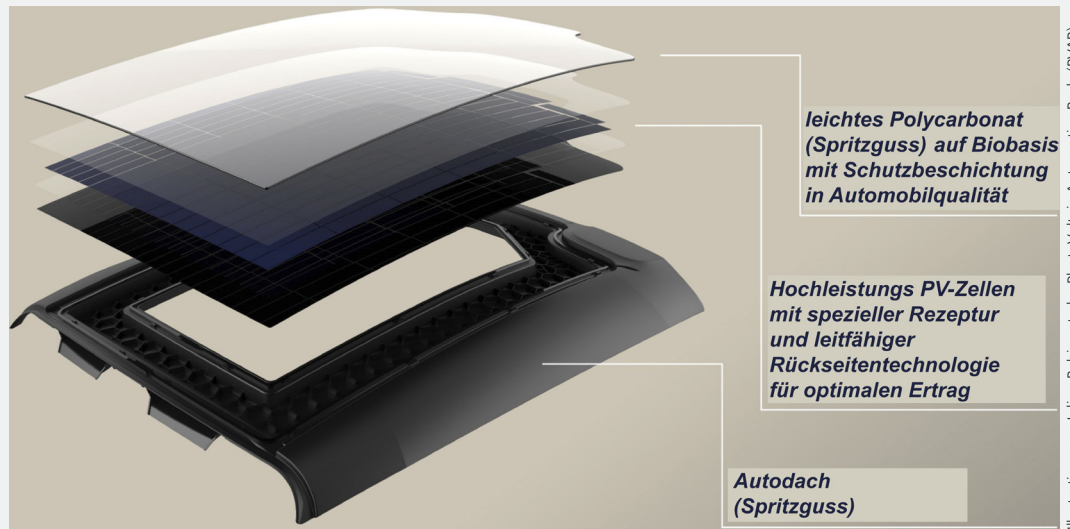


Illustration aus: Julien Robin, et al. «PhotoVoltaic Automotive Body (PVAB) Project: Outcome of 3 years of VIPV R&D industrial project» in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchâtel

Kunststoffmodule sind im Prinzip gleich aufgebaut – mit dem Unterschied allerdings, dass die Frontplatte (und wahlweise auch die rückseitige Glasplatte) nicht aus Glas, sondern aus Kunststoff (Polycarbonat) besteht. Polycarbonat ist ein harter Kunststoff, der mehrfach geschmolzen werden kann. Der Stoff wird in der Automobilindustrie für Autoscheinwerfer und als Sicherheitsglas (Panzerglas, Flugzeugcockpit, Schutzbrillen usw.) verwendet. Er wird auch im Bauwesen eingesetzt, z. B. für starre Gewächshäuser.

Bei der Produktion eines Kunststoffmoduls wird im ersten Produktionsschritt die Frontplatte aus Polycarbonat im Spritzgussverfahren hergestellt. Für ein Auto-Solardach ist diese Platte typischerweise 4 mm dick und misst 100 x 70 cm. Um das Kunststoffteil vor UV-Licht und Kratzern zu schützen, wird es mit zwei Schutzbeschichtungen versehen. Die Herstellung des Solarmoduls erfolgt anschliessend mit denselben Schritten wie beim Glasdach.

Eine grosse Herausforderung bei der Verwendung von Kunststoff ist, dass sich dieser mit zunehmender Temperatur ausdehnt – und zwar stärker als die darin eingebetteten Solarzellen oder die metallischen Kontakte. Das führt im ungünstigen Fall zu unerwünschten Spannungen und in der Folge zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit der Solarzellen.

Gemäss IEC-Norm 61215 muss ein PV-Modul so verarbeitet sein, dass nach 200 Testzyklen der Leistungsverlust 5 % nicht übersteigt. Mit jedem Testzyklus wird die Wärmebelastung des Moduls in einer 24-Stunden-Periode (Tag/Nacht-Unterschied) nachgeahmt. Den CSEM-Forschern ist es gelungen, ein PV-Dach aus Polymer zu konstruieren, bei dem der 5 %-Wert erst nach 2'300 Zyklen erreicht war. Im Zuge des SolarBody-Projekts fanden die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Struktur, die Plastik-Frontplatten aus Polycarbonat verwendet. Die Kunststoff-Module müssen ihre Beständigkeit nun in Langzeittests unter Beweis stellen. Ziel ist eine Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren.

PV-Labor der EPFL. Als Pilot-Fahrzeug diente hier ein Peugeot 508. Die Heckscheibe wurde durch ein transparentes Werkstück aus Polycarbonat ersetzt und mit 161 Solarzellen (Gesamtleistung 100 W) belegt (vgl. Abb. S. 3, Mitte rechts). Die Solarzellen wurden schachbrettartig angeordnet. Damit

wurde eine Transparenz von 50 % sichergestellt, wie sie für die Heckscheibe regulatorisch erforderlich ist.

Für dasselbe Fahrzeug wurde untersucht, welche Oberflächen neben der Heckscheibe zusätzlich mit Solarzellen belegt wer-

den könnten. Hierfür kommen alle Flächen in Frage, die den Krümmungsradius, bei dem Solarzellen brechen, nicht überschreiten. Gemäss den Berechnungen eignen sich rund 6 m² der Fahrzeugoberfläche (inkl. Heckscheibe) für die Belegung mit Solarzellen. So ausgerüstet würde das Fahrzeug über eine Solarleistung von 1'260 W verfügen. Mit dem selbst produzierten Solarstrom könnten am Standort Paris pro Jahr zusätzlich 4'800 km zurückgelegt werden. Die «Solarreichweite» wäre rund 2,5-mal grösser als beim Citroën AML.

Einbezug der Batterieelektronik

In einem dritten Projekt arbeiten CSEM und EPFL ohne Industriepartner zusammen. Dort wurde ein Renault Twizy mit einem Kunststoff-Solardach (24 Solarzellen, 72 W Leistung) und einer Batterie ausgerüstet. Beide Komponenten wurden vom CSEM entwickelt. Für das Forschungsteam stehen die Batterieelektronik und -steuerung für eine optimale Nutzung des Solarstroms im Zentrum. So hat das CSEM ein System entworfen, das die Qualität der einzelnen Batteriezellen überprüft, womit die künftige Degradation (Alterung) antizipiert und die Batterielebensdauer erhöht werden kann.

Ein weiterer Fokus lag auf dem Maximal Power Point Tracker (MPPT), der zwischen Solarzellen und Batterie geschaltet ist und der dazu dient, den optimalen Arbeitspunkt der VIPV-Anlage einzustellen. Das ist anspruchsvoll, weil sich während einer Fahrt die solare Einstrahlung schnell ändert (Schatten, Ausrichtung, usw.). Das Forschungsteam verkürzte mit einer Optimierung der Elektronik die Reaktionszeit, mit der Änderungen der Bestrahlungsstärke erfasst werden. Im verbleibenden Projektjahr wollen die Forscherinnen und Forscher von CSEM und EPFL unter anderem durch Testfahrten die tatsächlichen Energieerträge evaluieren und die Leistungsfähigkeit der Elektronik untersuchen.

Möglichst viel Sonne für das Auto

Wie hoch die Erträge von VIPV tatsächlich sind – das ist eine entscheidende Frage auch für die Wirtschaftlichkeit dieser Technologie. Das SolarBody-Team legt seinen Berechnungen die optimistische Annahme zugrunde, dass die Fahrzeuge bei Sonnenschein stets draussen an besonnten Orten stehen. Das ist nötig, um den maximalen Solarertrag zu erzielen. Die Sonnenexposition versuchen Autofahrerinnen und Autofahrer heute in der Regel zu vermeiden, um den Innenraum kühl zu halten. «Dieses Problem könnte gelöst werden, indem das Auto mit Hilfe einer geeigneten Steuerung kurz vor der



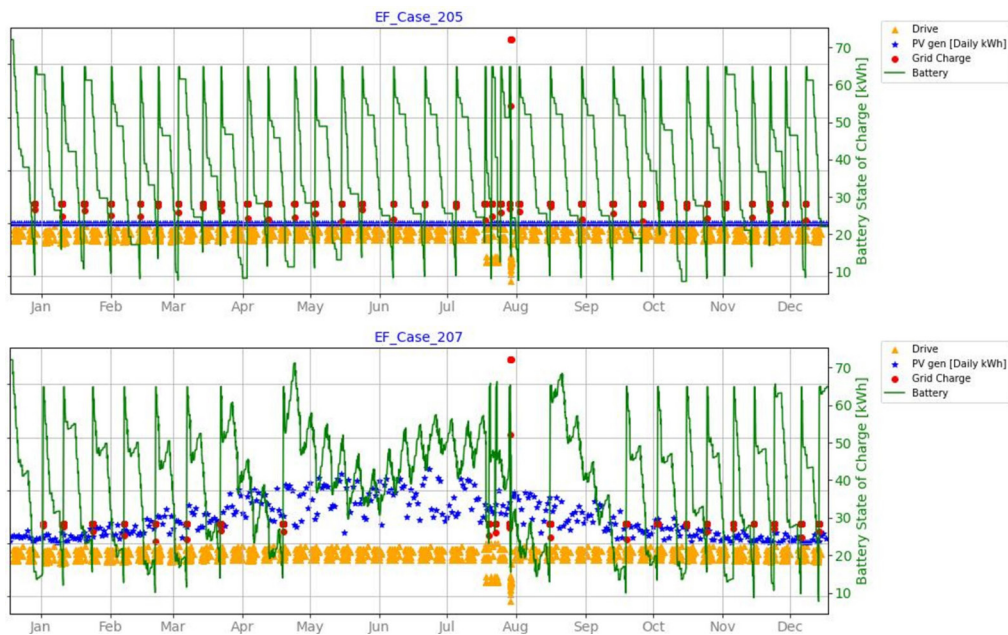
Sie erforschen Solarlösungen für Fahrzeuge: Gianluca Cattaneo (CSEM), Antonin Faes (CSEM), Fahrudin Mujovi (CSEM), Tingyuan Wang (EPFL). Aus dem Forscherteam nicht auf dem Foto: Kléber Nicolet-dit-Félix und Mert Turan (EPFL). Foto: CSEM

Verwendung herunterkühlt wird», schlägt Antonin Faes als Gegenmassnahme vor.

Der CSEM-Forscher sieht in der VIPV auch eine elegante Lösung für ein Problem, das alle Elektrofahrzeuge betrifft, aber in der öffentlichen Debatte bisher nur selten Erwähnung findet: die Tatsache, dass Batterien von geparkten Elektroautos pro Tag 0.5 bis 1 % der gespeicherten Energie verlieren. «Solarpanels auf den Autos wären ein ideales Mittel, um diese Verluste mindestens auszugleichen», betont Faes.



Lieferfahrzeuge von COOP sind heute teilweise schon mit Solar-dächern ausgestattet. Der Solarstrom wird bislang genutzt, um die Batterien der Kühlaggregate mit Strom zu versorgen und um sicherzustellen, dass den Telematik-Einheiten durchgehend Energie zugeführt wird. Foto: David Lambelet



Ein herkömmliches Elektroauto (oben) im Vergleich mit einem Elektroauto, das mit einem Solardach ausgerüstet ist (unten): Dank der Fahrzeug-eigenen Stromproduktion kann die Zahl der Ladevorgänge aus dem Netz (rote Punktpaare) und damit die Netzbelastung stark vermindert werden. Grafik aus: Anna Carr, et al. «Solar Moves: Part 1, Modelling the impact of VIPV» in PVinMotion2024, 6-8 March 2024 in Neuchatel

Dynamische Entwicklung

Die Arbeiten, die unter anderem im Rahmen des Projekts SolarBody durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sich Glas in Solaranwendungen durch harte, unbiegsame Polymere ersetzen lässt. Es handelt sich hierbei um eine innovative Lösung, die sich von den halbflexiblen PV-Modulen unterscheidet, die bisher für Wohnmobile oder zum Aufkleben auf Industriedächern verwendet werden. Letztere kommen zwar auf der Vorderseite ohne Glas aus, verwenden aber ein Polymer, das mit Glasfasern versetzt ist.

Ob die von CSEM und EPFL entwickelten Solarlösungen für Fahrzeuge den Weg in die kommerzielle Anwendung finden, bleibt abzuwarten. Die Entwicklung von PV-Modulen, die ohne bzw. mit wenig Glas auskommen, ist gegenwärtig sehr dynamisch. «Mit diesen neuartigen Modulen müssen nun Erfahrungen gesammelt werden, bevor sie eine Verbreitung wie die bisherigen Glasmodule finden können», sagt CSEM-Forscher Faes.

➤ Das **Forschungsprojekt** «SolarBody – Integration of photovoltaic element for automotive applications» (Integration von PV-Modulen in mobile Anwendungen) läuft noch bis 2025.

➤ **Auskünfte** erteilt Stefan Oberholzer, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Photovoltaik:
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch.

➤ Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Photovoltaik finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-pv.