

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 109 (2018)
Heft: 10

Artikel: Energiebilanz von Solarstrom = Quel bilan pour le photovoltaïque?
Autor: Novotný, Radomir
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856992>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

dossier.

Energiebilanz von Solarstrom

Von Facts und Fake News | Bezüglich Sonneneinstrahlung ist die Schweiz weniger privilegiert als südliche Länder. Lohnt sich aus energetischer Sicht hierzulande der Einsatz von PV überhaupt? Die Ansichten gehen da stark auseinander.

Quel bilan pour le photovoltaïque ?

Faits et fake news | La Suisse est moins privilégiée que les pays du sud en termes de rayonnement solaire. L'utilisation du photovoltaïque est-elle ici judicieuse du point de vue énergétique ? Les avis divergent fortement.



Photovoltaik-Faltdach

Die ARA Chur ist nun für den Eigenverbrauch mit einem einziehbaren PV-Faltdach mit einer Nennleistung von 636 kW ausgestattet.

Toit ouvrant photovoltaïque

La station d'épuration ARA Chur est désormais équipée, pour sa consommation propre, d'un toit ouvrant PV rétractable d'une puissance nominale de 636 kW.



TEXT RADOMÍR NOVOTNÝ

Die Frage, ob Solaranlagen in der Schweiz energetisch amortisiert werden können, ist berechtigt. Von der Antwort sollte nämlich die Gestaltung der energetischen Zukunft abhängen. Man möchte schliesslich mit vernünftigen Investitionen die optimalen Energieformen wählen, um ein möglichst nachhaltiges Energiesystem zu schaffen. Entscheidungen basierend auf falschen Vorstellungen und Zahlen können unerwünschte Folgen haben, die sich nicht auf die Schnelle korrigieren lassen.

Um die gesellschaftliche Meinungsbildung zu erneuerbaren Energien auf ein solides Fundament zu stellen, wurden in wissenschaftlichen Zeitschriften Beiträge veröffentlicht, die, durch die Tagespresse aufgegriffen, eine gewisse Breitenwirkung entfalten. Beispielsweise der in der Basler Zeitung vom 20. Dezember 2017 erschienene Artikel mit dem Titel «Die verheerende Bilanz von Solarenergie». Der Artikel wurde von Alex Reichmuth und Ferruccio Ferroni verfasst und stützt sich auf Publikationen des Letzteren in der Zeitschrift Energy Policy [1, 2]. Da die Resultate dieser Artikel weit entfernt vom allgemeinen Forschungskonsens liegen, veröffentlichte Energy Policy auch eine umfassende Antwort von zahlreichen Wissenschaftlern, die dessen

Iest légitime de se demander si, en Suisse, les installations solaires peuvent être amorties du point de vue énergétique. De la réponse à cette question devrait en effet dépendre la conception de l'avenir énergétique. L'objectif consiste finalement, en investissant de manière raisonnable, à choisir les formes d'énergie optimales en vue de créer un système énergétique aussi durable que possible. Or, les décisions prises sur la base de fausses idées et de chiffres erronés peuvent avoir des conséquences indésirables et difficiles à corriger.

Afin de fournir une base solide sur laquelle nous pouvons forger une opinion à propos des énergies renouvelables, des articles ont été publiés dans des revues scientifiques. Or, quelque-uns, relayés par la presse quotidienne, ont eu un certain impact. L'article intitulé « Le bilan désastreux de l'énergie solaire » (Die verheerende Bilanz von Solarenergie) paru dans le Basler Zeitung du 20 décembre 2017 en est un exemple. Rédigé par Alex Reichmuth et Ferruccio Ferroni, l'article se base sur des publications de ce dernier parues dans la revue Energy Policy [1, 2]. Dans la mesure où les résultats de ces articles sont très éloignés du consensus général de la recherche, Energy Policy a également publié une réponse détaillée de nombreux scientifiques qui remettent en question la

Methodik und das verwendete Zahlenmaterial infrage stellten.[3] Sie kamen zum Schluss, dass die Energiebilanz deutlich positiver zu beurteilen sei. Oder konkret: Der erste Beitrag äusserte die Ansicht, dass der Erntefaktor EROI (extended), der erweiterte Energy Returned on Energy Invested, bei 0,8 liegt, dass also für PV-Anlagen in der Schweiz mehr Energie benötigt wird, um sie herzustellen, zu transportieren, zu installieren usw., als sie in ihrer gesamten Lebensdauer produzieren können. Sie dürften also eigentlich nicht als Energiequellen bezeichnet werden. Marco Raugei und weitere 21 Autoren kommen in einer anderen Ausgabe desselben Journals auf Resultate, die um eine Grössenordnung besser sind: Sie kommen auf einen EROI, der zwischen 7 und 8 liegt, wobei sie auch Aspekte wie Service, Projektmanagement und Versicherungen berücksichtigen. Es überrascht also nicht, dass die Öffentlichkeit Mühe mit der Beurteilung des PV-Ertrags hat, wenn bereits in einer Zeitschrift eines renommierten Wissenschaftsverlags Artikel mit so divergierenden Resultaten veröffentlicht werden.

Die Frage bezüglich der Energiebilanz von Solarstrom ist im Prinzip zwar einfach, aber die Situation komplex, denn es gilt vieles zu berücksichtigen: die Energie für die Bereitstellung der für das PV-System benötigten Materialien, die Energie für die Herstellung der PV-Anlagen, die Energie für den Transport der Materialien und der kompletten PV-Anlagen, die für die Installation der Systeme und für deren Entsorgung bzw. das Recycling erforderliche Energie sowie die Primärenergie, die für den Betrieb und die Wartung der Solaranlagen benötigt wird.

Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Situation dynamisch ist, denn die Fertigungsprozesse der PV-Anlagen werden kontinuierlich optimiert und der Materialeinsatz für die PV-Schicht sowie für die Montagestruktur minimiert. Diese Komplexität führte bereits in den 1970er-Jahren dazu, methodologische Fragen zur Ermittlung des EROI zu diskutieren, um zu einem Konsens zu kommen. Wie man an den aktuellen Publikationen sieht, ist diese Diskussion noch nicht abgeschlossen.

Die Situation heute

Eine auf einem wissenschaftlichen Konsens basierende Studie wurde von der internationalen Energieagentur IEA herausgegeben.[4] Sie befasst sich mit dem Life Cycle Assessment der künftigen Solarstromproduktion durch Anlagen im Haushaltsbereich in Europa, also um kleinere, auf Dächern installierte PV-Anlagen. Die Studie geht auf monokristalline Siliziumzellen und auf CdTe-Dünnschicht-Zellen ein. Siliziumzellen (mono- und polykristalline) sind in der Schweiz marktbeherrschend. Der Marktanteil von CdTe-Zellen liegt in der Schweiz gemäss Franz Baumgartner, Professor an der ZHAW, unter 1%, weltweit unter 6%. Franz Baumgartner hat sich seit 30 Jahren intensiv mit der Solartechnologie beschäftigt, zunächst in der Halbleiterforschung und heute mit Schwerpunkt auf der Anwendung und Zuverlässigkeit der Solarsysteme. Gemäss ihm ist der Anteil an Dünnschicht-PV in der Schweiz so gering, weil keine Fussballfeld-grossen Kraftwerke wie bei-

méthode et les chiffres utilisés. [3] Ceux-ci sont arrivés à la conclusion que le bilan énergétique est nettement plus positif. Ou concrètement: le premier article exprimait l'avis que le taux de retour énergétique EROI (extended), soit le taux « Energy Returned on Energy Invested » étendu, est de 0,8 et que, par conséquent, les installations PV en Suisse nécessitent plus d'énergie pour leur fabrication, leur transport, leur installation, etc., qu'elles ne peuvent en produire sur toute leur durée de vie. Elles ne peuvent donc, en fait, pas être considérées comme des sources d'énergie. Dans une autre édition de la même revue, Marco Raugei et 21 autres auteurs présentent des résultats qui diffèrent d'un ordre de grandeur: ils obtiennent un EROI de 7 à 8, pour lequel les aspects tels que le service, la gestion de projet et les assurances ont également été pris en considération. Il n'est donc pas surprenant que le public ait du mal à estimer le taux de rendement PV si des articles parus dans la même revue d'une maison d'édition scientifique renommée présentent des résultats aussi divergents.

En principe, la question relative au bilan énergétique de l'énergie solaire est simple, mais la situation est complexe. En effet, de nombreux éléments doivent être considérés: l'énergie nécessaire pour la mise à disposition des matériaux utilisés pour le système PV, l'énergie pour la fabrication des installations PV, l'énergie pour le transport des matériaux et de l'ensemble de l'installation photovoltaïque, l'énergie requise pour l'installation des systèmes et pour leur élimination ou leur recyclage de même que l'énergie primaire nécessaire pour l'exploitation et la maintenance des installations solaires.

Le fait que la situation soit dynamique rend les calculs encore plus difficiles. En effet, les processus de fabrication des installations PV sont continuellement optimisés et la consommation de matériaux pour les éléments PV ainsi que pour la structure de montage est constamment réduite. Cette complexité générait déjà dans les années 1970 des discussions quant à la méthodologie utilisée pour la détermination de l'EROI en vue de parvenir à un consensus. Comme les publications actuelles l'indiquent, cette discussion n'a pas encore abouti.

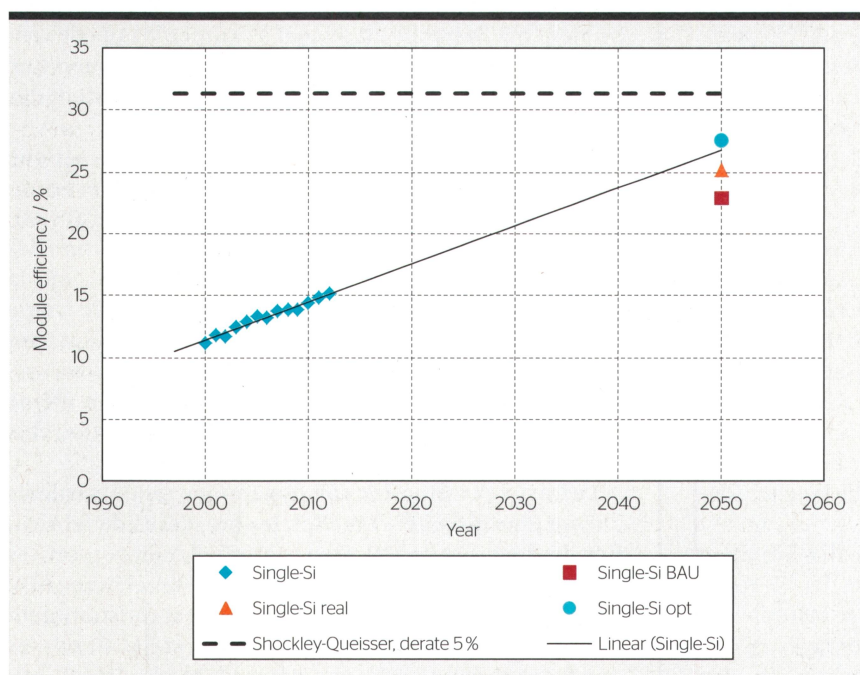
La situation aujourd'hui

Une étude basée sur un consensus scientifique a été publiée par l'Agence Internationale de l'Energie IEA. [4] Elle se penche sur le Life Cycle Assessment de la future production d'électricité photovoltaïque par le biais d'installations domestiques en Europe, c'est-à-dire d'installations PV de petites tailles installées sur les toits. L'étude se consacre aux cellules en silicium monocristallin et aux cellules CdTe à couches minces. Les cellules en silicium (mono- et polycristallin) dominent le marché suisse. D'après Franz Baumgartner, professeur à l'Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW), la part de marché des cellules CdTe est inférieure à 1% en Suisse et à 6% sur le plan international. Franz Baumgartner étudie la technologie solaire depuis 30 ans: il a commencé par la recherche dans le domaine des semi-conducteurs et se

Calculations	Calculated value	Ferroni and Hopkirk	Marco Raugei et al.
Energy return	Specific yield per surface area, kWh/(m ² a)	106	120
	Lifetime, a	25	25
	Energy produced by PV system, kWh/m ²	2203	2827
Energy investments	CED (cumulative energy demand), kWh/m ²	1300	290
	Faulty equipment, kWh/m ²	90	2,9 to 20
	Energy storage, kWh/m ²	349	0
	Labour and capital, kWh/m ²	505+420=925	54 to 100
	EROI (Energy Returned on Energy Invested)	1,7	9,1 to 9,7
	EROI extended	0,8	6,9 to 8,1

1 Vergleich der in [1] (Ferroni und Hopkirk) und [3] (Raugei et al.) präsentierten Zahlen.

Comparaison des chiffres présentés dans [1] (Ferroni et Hopkirk) et [3] (Raugei et al.).

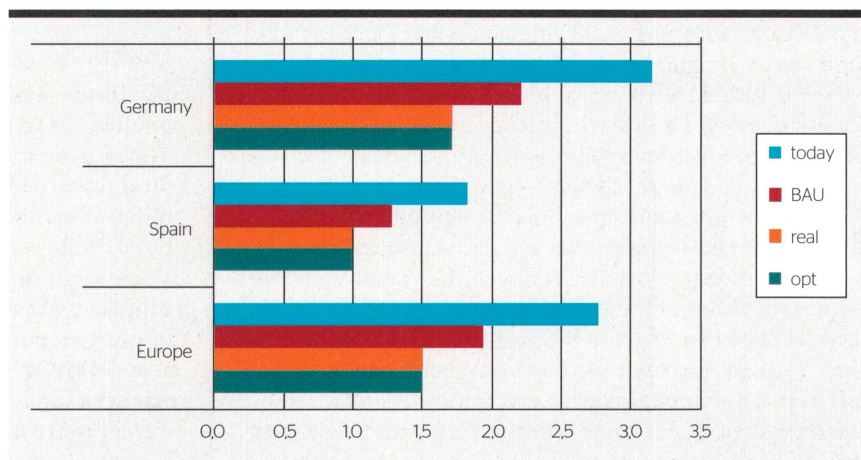


2 Entwicklung des Modulwirkungsgrades von monokristallinen Silizium-Zellen im Zeitraum von 2000 bis 2012.[4] (S. 12)

Évolution de 2000 à 2012 de l'efficacité énergétique des modules dotés de cellules en silicium monocristallin. [4] (p. 12)

3 Gesamtenergie-Amortisationszeit in Jahren einer Si-3-kW-PV-Anlage. Szenarien: heute, Business-as-Usual, realistische sowie optimistische Verbesserungen. Gemäss [4] (S. 79).

Durée d'amortissement (en années) de l'énergie totale d'une installation PV de 3 kW à base de silicium. Scénarios: aujourd'hui, business as usual, améliorations réalistes et optimistes. Selon [4] (p. 79).



spielsweise in den USA gebaut werden. Die Fassadenlösungen mit Dünnschichttechnologien wie CIGS gingen auch nicht über einige 100 kW Nennleistung hinaus, da sie heute kaum Kostenvorteile böten.

Wegen der Marktdominanz können wir uns hier also auf Silizium-PV konzentrieren. Die IEA-Studie gibt als Energy Payback Time, die energetische Amortisationszeit, bei einer in Europa auf einem Hausdach installierten Solaranlage mit monokristallinem Silizium und einer Nennleistung von 3 kW 2,8 Jahre an (Bild 3).¹⁾ Beim System wurden die Montage, Verkabelung, die Umrichter und der Unterhalt berücksichtigt. Umgerechnet ergibt dies bei einer Lebensdauer von 25 Jahren einen EROI von 9. Bei polykristallinem Silizium ist die Amortisationszeit laut Rolf Frischknecht, einem Co-Autoren [4], noch ein wenig kürzer: Sie liegt bei 2,2 Jahren (gesamte Primärenergie) bzw. 2,0 Jahren (Anteil der nicht erneuerbaren Primärenergie).

Künftige Optimierungen

Die Situation dürfte künftig noch besser werden. Optimierungen des Produktionsprozesses, neue Forschungserkenntnisse, Anwendererfahrungen, Skaleneffekte und technologische «Spillovers» könnten sich positiv auf EROI-Werte auswirken. Die sinkenden Kosten bei Solaranlagen sprechen diesbezüglich eine klare Sprache. Bei den technischen Aspekten wie Wirkungsgrad und Primärenergieverbrauch bei der Herstellung sind die Fortschritte zwar nicht so ausgeprägt, aber auch hier trifft man auf Optimierungen. Nebst den erwähnten Verbesserungen ist auch wahrscheinlich, dass die Nachhaltigkeit des Primärenergiemixes steigt, da für die Herstellung künftig vermehrt erneuerbare Energien eingesetzt werden dürften.

Konkretere Zahlen bzw. Prognosen zu den Optimierungen erhält man in der IEA-Studie. Da geht man beispielsweise davon aus, dass die Waferdicke von heute 190 µm auf 120 µm, im optimalen Fall auf 100 µm reduziert wird. Diese Reduktion gilt analog auch für den Kerf Loss, d.h. für die durch das Sägen verursachten Materialverluste. Dies senkt den Primärenergiebedarf spürbar. Zudem sollte der für die Kontakte benötigte Silberanteil pro Zelle von heute 9,6 g/m² etwa um die Hälfte sinken. Auch die Glasdicke dürfte von 4 mm auf 3 mm, im besten Fall auf 2 mm sinken, was weitere energetische Einsparungen bringen würde.

Die Studie schätzt zudem, dass sich die heutige dreissigjährige Lebensdauer um rund 5 Jahre verlängern liesse, im Maximalfall um 10 Jahre. Alle diese Optimierungen würden zu einer Reduktion der energetischen Amortisationszeit führen. Die Studie prognostiziert für im Jahr 2050 in der Schweiz eingesetzte Si-Module eine Amortisationszeit von 1,5 Jahren. Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren käme man somit auf einen Erntefaktor von 20.

Dass diese Prognosen nicht unbegründet sind, sieht man an bisherigen Fortschritten: Gemäss Franz Baumgartner wurde die industrielle Produktion so verbessert, dass man die Verwendung von hochreinem Silizium um den Faktor 4 reduzieren konnte. Baumgartner präzisiert: «Auch die Dicke der Siliziumwafer konnte in den letzten zwei Jahrzehnten um den Faktor 3 reduziert werden.»

concentre aujourd'hui sur les applications et la fiabilité des systèmes photovoltaïques. Selon lui, si la part de PV à couches minces est aussi faible en Suisse, cela tient au fait qu'aucune centrale électrique de la taille d'un terrain de football n'y est construite comme c'est le cas, par exemple, aux États-Unis. Les façades équipées de technologies à couches minces comme les cellules CIGS ne dépassent pas non plus une puissance nominale de quelques centaines de kW dans la mesure où elles n'apportent de nos jours que très peu d'avantages financiers.

En raison de leur position dominante sur le marché, nous pouvons donc nous concentrer ici sur les cellules PV en silicium. L'étude IEA indique un Energy Payback Time (la durée d'amortissement énergétique) de 2,8 années (figure 3) pour une installation solaire en silicium monocristallin d'une puissance nominale de 3 kW installée sur le toit d'une maison en Europe.¹⁾ Les frais pour le montage, le câblage, les onduleurs et l'entretien du système ont été pris en compte. Il en résulte un EROI de 9 pour une durée de vie de 25 ans. Selon Rolf Frischknecht, un co-auteur de [4], la durée d'amortissement est encore un peu plus courte avec le silicium polycristallin: elle est de 2,2 ans (énergie primaire totale) ou de 2,0 années (part d'énergie primaire non renouvelable).

Optimisations futures

La situation devrait encore s'améliorer à l'avenir. Les optimisations des processus de production, les nouvelles découvertes, l'expérience des utilisateurs, les effets d'échelle et les «spillovers» technologiques pourraient influencer positivement les valeurs d'EROI. La baisse des coûts des installations solaires en est un indicateur évident. Concernant les aspects techniques tels que l'efficacité énergétique et la consommation d'énergie primaire lors de la fabrication, les progrès sont moins marquants, malgré les optimisations réalisées. En plus des améliorations mentionnées, il est également probable que la durabilité du mix d'énergies primaires augmente dans la mesure où à l'avenir une part croissante d'énergies renouvelables devraient être utilisées pour la fabrication.

L'étude IEA présente des chiffres concrets et des pronostics concernant les optimisations. On part, par exemple, du principe que l'épaisseur actuelle des wafers de 190 µm sera réduite à 120 µm, voire à 100 µm dans le meilleur des cas. Cette réduction est valable de manière analogue dans le cas du kerf loss, c'est-à-dire pour les pertes de matériau dues au sciage. Cela réduit sensiblement les besoins en énergie primaire. De plus, la quantité d'argent par cellule indispensable pour les contacts, aujourd'hui de 9,6 g/m², devrait environ être réduite de moitié. L'épaisseur du verre devrait également passer de 4 à 3 mm, et même à 2 mm dans le meilleur des cas, ce qui permettrait de réaliser des économies d'énergie supplémentaires.

L'étude estime en outre que la durée de vie, actuellement de trente ans, pourrait être prolongée de 5 ans ou, au maximum, de 10 ans. Toutes ces optimisations pourraient contribuer à réduire la durée d'amortissement

Methodische Fehler, falsche Zahlen

Wenn man nach Gründen sucht, wieso die Ergebnisse der Veröffentlichungen so stark voneinander abweichen, wird man in den genannten Artikeln selber fündig. Beispielsweise werden unsachgemässe Vergleiche mit anderen Energiesystemen angestellt, da unterschiedliche Systemgrenzen angenommen werden. Bei Ferroni [1] ist es unter anderem die Annahme, dass bei der Berechnung des Erntefaktors auch ein gewisser Anteil an Energiespeichern mit einbezogen werden muss. Konkret berücksichtigt sie eine Speicherung von 25% der Solarenergie mittels Pumpspeicherkraftwerken. Ihre Fragestellung geht also bereits über die Frage hinaus, wie viel Energie netto mit den PV-Systemen erzeugt bzw. verbraucht wird, sondern zielt darauf ab, ein PV-System zu gestalten, das alle Bedürfnisse der Stromverbraucher kontinuierlich abdecken kann. Bei anderen Energiequellen – Bandenergieerzeugern wie Kernkraft –, die alleine auch nicht über die nötige Flexibilität verfügen, um Verbrauchsfuktuationen komplett aufzufangen, werden solche Speicher beim Vergleich interessanterweise nicht vorausgesetzt. Unterschlagen wird auch, dass die Situation in der Schweiz momentan so stabil ist, dass ein weiterer PV-Ausbau mit Netzintegration auch ohne zusätzliche Energiespeicher möglich wäre.

Im Beitrag von Raugéi [3] werden Ferroni weitere Fehler vorgeworfen: die Verwendung falscher oder veralteter Daten und die doppelte Berücksichtigung gewisser Energieaufwendungen, die bereits in den Energiezahlen enthalten sind. Beispielsweise wird in [1] auf eine Studie Bezug genommen, bei der die Waferdicke 350 µm und der Sägeverlust 300 µm betragen, was etwa 16 g Silizium pro Watt Nennleistung entspricht. Seit 2013 liegt der Durchschnittswert aber unter 6 g/W. Mit dem gleichen Material liesse sich somit 2,7 Mal mehr Energie erzeugen, was den entsprechenden CED (kumulativen Energieverbrauch) um rund 30% senken würde.

Verhärtete Fronten

Auf die Einwände von Raugéi gehen Ferroni und Hopkirk in ihrer Antwort [2] nicht wirklich ein, sondern bekräftigen (auf Seite 499) erneut ihren ursprünglichen Standpunkt, der die Ergebnisse der International Energy Association nicht akzeptiert: «The IEA guidelines reflect rather the position of the PV industry and offer false and misleading results through erroneous calculation of the energy invested ... As a consequence, the societal benefits of PV turn out to be wrongfully amplified.»

Aber Unverständnis weht Ferroni und Hopkirk nicht nur von IEA-Sympathisanten beziehungsweise Anhängern des dort eingesetzten Life Cycle Assessments entgegen. Man stösst im Internet auf Blogs wie den von Maury Markowitz auf www.resilience.org mit dem Titel «Another failure of scientific peer-review: A completely wrong paper on the energy return of photovoltaic energy». Dabei geht Markowitz nicht nur unterhaltsam auf die zahlreichen Fehler des Ferroni-Artikels ein, sondern gibt nebenbei einen Einblick in die Mechanismen und Schwachstellen des wissenschaftlichen Publizierens. Zudem gibt er nützliche Tipps, bei-

energetische. Pour les modules en silicium utilisés en Suisse en 2050, l'étude prévoit une durée d'amortissement de 1,5 an. Sur une durée de vie de 30 ans, le taux de retour énergétique serait ainsi de 20.

Les progrès réalisés jusqu'à présent montrent que ces pronostics ne sont pas injustifiés: selon Franz Baumgartner, la production industrielle a été améliorée à tel point que l'utilisation de silicium pur a pu être réduite d'un facteur 4. Il précise: «L'épaisseur du wafer de silicium a également pu être réduite d'un facteur 3 au cours des deux dernières décennies.»

Erreur méthodique, chiffres erronés

Si l'on cherche à comprendre pourquoi les résultats des publications divergent autant, il suffit de consulter les articles cités. Par exemple, des comparaisons inappropriées sont effectuées avec d'autres systèmes énergétiques, des limites différentes ayant été prises pour les divers systèmes. Chez Ferroni [1], il s'agit, entre autres, du fait qu'une certaine part de l'accumulation d'énergie doit être prise en considération dans le calcul du taux de retour énergétique. Concrètement, ils tiennent compte d'un stockage de 25% de l'énergie solaire à l'aide de centrales de pompage-turbinage. Leur étude s'étend ainsi déjà au-delà de la question de la quantité d'énergie nette produite ou consommée avec les systèmes PV et vise à concevoir un système PV de telle sorte qu'il puisse couvrir continuellement tous les besoins des consommateurs d'électricité. Il est intéressant de constater que de tels accumulateurs ne sont pas pris en compte lors de la comparaison avec d'autres sources d'énergie – des producteurs d'énergie de ruban tels que le nucléaire – qui ne disposent pas non plus elles-mêmes d'une flexibilité suffisante pour amortir complètement les fluctuations de consommation. Le fait que la situation en Suisse est actuellement si stable qu'une extension du photovoltaïque avec intégration au réseau serait aussi possible sans accumulateur supplémentaire, est également tu.

L'article de Raugéi [3] reproche d'autres erreurs à Ferroni: l'utilisation de données erronées ou obsolètes et la double comptabilisation de certaines dépenses en termes d'énergie déjà prises en compte dans les chiffres énergétiques. L'article [1] fait, par exemple, référence à une étude dans laquelle l'épaisseur des wafers est de 350 µm et la perte due au sciage de 300 µm, ce qui correspond environ à 16 g de silicium par watt de puissance nominale. Or, depuis 2013, la valeur moyenne est inférieure à 6 g/W. La même quantité de matériau permettrait ainsi de produire 2,7 fois plus d'énergie, ce qui réduirait la CED (consommation cumulative d'énergie) correspondante d'environ 30%.

Durcissement des fronts

Ferroni et Hopkirk n'abordent pas vraiment les objections de Raugéi dans leur réponse [2], mais réaffirment leur point de vue d'origine (à la page 499) qui n'accepte pas les résultats de l'International Energy Association: «The IEA guidelines reflect rather the position of the PV

spielsweise zur Berechnung des lokalen PV-Ertrags mittels des Online-Rechners des U.S. Department of Energy, pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php, der über genaue Wetterdaten der letzten 30 Jahre verfügt. In diesem Kontext ist auch die Website der EU, re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP, empfehlenswert.

Vielversprechende Aussichten

Das Thema Energiebilanz der Photovoltaik zeigt auf, dass es sich lohnt, auch Publikationen in wissenschaftlichen Journals kritisch zu lesen. Es ist zwar verständlich, dass bei solch umfangreichen Systembetrachtungen je nach Datenbasis und Annahmen die Resultate eine gewisse Streuung aufweisen. Aber dass man um eine Grössenordnung daneben liegt, zeugt nicht von einer wissenschaftlichen Einstellung, die neuen Erkenntnissen und Daten gegenüber offen ist, sondern davon, dass im Hintergrund andere Motivationen wirksam sind, die sich dann in Zeitungsartikeln mit reisserischen Titeln und einer spezifischen politischen Botschaft entladen.

Vernachlässigt man die «Ausreisser», kommt man zum Schluss, dass bereits heute PV-Anlagen in der Schweiz nach weniger als 3 Jahren energetisch amortisiert sind und bis zu ihrem Lebensende von mindestens 25 Jahren erneuerbare Energie produzieren. Die kontinuierliche Optimierung der Herstellungsprozesse wird erfreulicherweise künftig zu noch höheren Solarstromerträgen führen.

Referenzen | Références

- [1] Ferruccio Ferroni, Robert J. Hopkirk, «Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation», *Energy Policy* 94, 2016, S. 336 - 344.
- [2] Ferruccio Ferroni, Alexandros Guekos, Robert J. Hopkirk, «Further considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation», *Energy Policy* 107, 2017, S. 498 - 505.
- [3] Marco Raugel, et al., «Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response», *Energy Policy* 102, 2017, S. 377 - 384.
- [4] Rolf Frischknecht, René Itten, Franziska Wyss, Isabelle Blanc, Garvin Heath, Marco Raugel, Parikhit Sinha, Andreas Wade, «Life Cycle Assessment of Future Photovoltaic Electricity Production from Residential-scale Systems Operated in Europe», Report IEA-PVPS T12-05:2015, IEA, 2015.

Literatur | Littérature complémentaire

→ Arnulf Jaeger-Waldau, PV Status Report 2017, European Union, 2017.



Autor | Auteur

Radomir Novotný ist Chefredaktor Electrosuisse.
Radomir Novotný est rédacteur en chef Electrosuisse.
 → Electrosuisse, 8320 Fehraltorf
 → radomir.novotny@electrosuisse.ch

¹⁾ Dabei geht man von folgenden Zahlen aus: Si-Zelleneffizienz: 16,5%; PV-Moduleffizienz: 15,1%; jährliche Stromerzeugung pro kW Nennleistung: 975 kWh/kW inklusive Alterung von durchschnittlich 10,5% über die gesamte Lebensdauer; jährliche Sonneneinstrahlung: 1331 kWh/m². Die Lebensdauer der PV-Anlage wird mit 30 Jahren angegeben.

industry and offer false and misleading results through erroneous calculation of the energy invested ... As a consequence, the societal benefits of PV turn out to be wrongfully amplified.»

Ferroni et Hopkirk ne se heurtent pas uniquement à l'incompréhension des sympathisants de l'IEA ou aux partisans du Life Cycle Assessment qui y est appliqué. Sur Internet, on tombe également sur des blogs tels que celui de Maury Markowitz sur www.resilience.org intitulé «Another failure of scientific peer-review: A completely wrong paper on the energy return of photovoltaic energy». Maury Markowitz n'y aborde pas seulement avec humour les nombreuses erreurs de l'article Ferroni, mais il donne également un aperçu des mécanismes et des points faibles de cette publication scientifique. En outre, il prodigue des conseils utiles, par exemple pour le calcul du rendement PV local à l'aide du calculateur en ligne du U.S. Department of Energy, pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php, qui dispose des données météorologiques précises des 30 dernières années. Dans ce contexte, le site Internet de l'Union Européenne, re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP, est également recommandé.

Des perspectives prometteuses

Le thème du bilan énergétique du photovoltaïque démontre qu'il vaut la peine de lire les publications de manière critique, et ce, même si elles ont paru dans des revues scientifiques. Il est certes compréhensible que lorsque des systèmes aussi vastes sont considérés, les résultats présentent une certaine dispersion liée aux hypothèses et à la base de données utilisées. Se tromper d'un ordre de grandeur ne témoigne cependant pas d'une attitude scientifique ouverte aux nouvelles connaissances et données, mais démontre qu'en arrière-plan, il existe d'autres motivations qui éclatent dans des articles de journaux aux titres racoleurs, dotés d'un message politique spécifique.

Si l'on ignore les « aberrations », on arrive à la conclusion qu'aujourd'hui déjà, en Suisse, les installations PV sont amorties du point de vue énergétique en moins de 3 ans et qu'elles produisent de l'énergie renouvelable sur une durée de vie d'au moins 25 ans. L'optimisation continue des processus de fabrication permettra, de plus, à l'avenir des rendements photovoltaïques encore plus élevés.

¹⁾ Ces calculs sont basés sur les chiffres suivants : efficacité des cellules Si : 16,5 % ; efficacité des modules PV : 15,1 % ; production annuelle de courant par kW de puissance nominale : 975 kWh/kW en tenant compte d'un vieillissement moyen de 10,5 % sur toute la durée de vie ; rayonnement solaire annuel : 1331 kWh/m². La durée de vie indiquée de l'installation PV est de 30 ans.