

Die Entwicklung der Photovoltaik

Hintergrundbericht zur Cleantech Energiestrategie

Beim Potenzial der Photovoltaik gehen die Meinungen in der Diskussion um die Energiestrategie 2050 weit auseinander (siehe Tabelle 1). Mit dem vorliegenden Hintergrundbericht will swisscleantech Transparenz schaffen und einen konstruktiven Beitrag zur Debatte leisten. Dieser Hintergrundbericht dient als Vertiefung zur Cleantech Energiestrategie von swisscleantech und enthält detaillierte Informationen über die Annahmen und Parameter, die dem Basisszenario der Strategie zu Grunde liegen. Eine Gegenüberstellung der jeweiligen Parameter und prognostizierten Daten mit denjenigen anderer Institutionen dient sowohl der Legitimierung, als auch der Einordnung des Szenarios im schweizerischen sowie internationalen Kontext.

swisscleantech nimmt eine **industrieneutrale Sicht** in Bezug auf die Photovoltaik oder andere Technologien ein. Es werden Technologien nur in dem Masse unterstützt, als dass sie die Versorgungssicherheit der Schweiz gewährleisten und zum Aufbau eines **wirtschaftlich attraktiven und nachhaltigen Energieversorgungssystems** beitragen (inkl. Einhaltung der Klimaziele).

Auf den Punkt gebracht...

- Der Bund geht von einer Entwicklung der Photovoltaik aus, welche der historischen Marktentwicklung sowie dem Marktpotenzial der Branche in keiner Weise entspricht. swisscleantech fordert den Bund auf, das hohe Potenzial der Photovoltaik anzuerkennen und adäquate Rahmenbedingungen zu schaffen.
- Für 2050 berechnet swisscleantech eine **Solarstromproduktion von 22.7 TWh**. Unter Berücksichtigung der Effizienzentwicklung von Solarmodulen entspricht dies einer **Gesamtfläche der Photovoltaik von 113 km²**. Der heutige schweizerische Gebäudepark weist eine Grundfläche von rund 400 km² Dachflächen auf. Davon wird bereits heute 1/3 als für die Photovoltaik geeignet eingestuft. **Die benötigte Dachfläche ist demnach bereits heute vorhanden** und stellt somit nicht den limitierenden Faktor der Solarenergie dar.
- Um eine Überhitzung der Solarbranche zu verhindern (Beispiel Deutschland, Spanien und Italien), setzt sich swisscleantech für ein **natürliches und moderates, aber engagiertes Wachstum der Solarindustrie** ein. Langfristig kann das hohe Potenzial der Photovoltaik nur auf der Basis einer gesunden Entwicklung der Solarindustrie ausgeschöpft werden.
- Gemäss dem Basisszenario von swisscleantech belaufen sich die **Gesamtausgaben der KEV für die Photovoltaik auf 15.78 Mrd. CHF** (bis 2053). Im Vergleich zu den jährlichen Ausgaben der Schweiz für den Import fossiler Brennstoffe im Wert von 10.22 Mrd. CHF (2011) ist dies eine verkraftbare Summe.
- Die KEV stellt für swisscleantech einen **kurzfristigen Anschubs-Mechanismus** für erneuerbare Energien dar. Mit der Einführung einer **umfassenden Lenkungsabgabe ab 2021** kann die KEV allmählich abgebaut werden. Durch KEV und Lenkung kann der Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik strategisch vorgezogen werden.
- Aufgrund der wetter- und saisonbedingten Schwankungen der Produktion von Solarstrom stellt dessen Speicherung eine essentielle Voraussetzung für ein stabiles Stromversorgungssystem dar. Mit der Anwendung von **dezentralen Kurzzeitspeichern** und **Pumpspeicherkraftwerken**, ergänzt durch **Grünstromimporte**, kann die Versorgungssicherheit insgesamt gewährleistet werden.

Tabelle 1: Szenarienvergleich der Solarstromproduktion bis 2050 (in GWh/Jahr)

Eckdaten	2020	2025	2035	2050
Institutionen				
swisscleantech	2'600	6'278	14'715	22'718
Bund E-Strat. 2050	520	-	4'440	11'120
ETH Zürich	1'400	-	6'000	14'000
VSE	-	-	800-2'000	3'500-14'000
Umweltallianz	3'119	12'000	16'221	-
Swissolar	6'000	12'000	-	25'000

Einführung

Der vorliegende Bericht ist in drei Abschnitte gegliedert. In einem ersten Schritt werden das Szenario zur **Entwicklung der Solarstromproduktion** sowie alle zugrundeliegenden Parameter vorgestellt. In einem zweiten Schritt wird eine Brücke zwischen der Solarstromentwicklung und der **Entwicklung der Gesteungskosten und der staatlichen Förderung (KEV)** geschlagen. Der letzte Abschnitt widmet sich der **Speicherung des Solarstroms**, die eine Voraussetzung für ein stabiles Versorgungssystem darstellt.

1. Entwicklung der Solarstromproduktion

Die Gewährleistung eines gesunden und nachhaltigen Wachstums der Solarindustrie steht für swisscleantech im Vordergrund. Trotz einer jährlichen Erhöhung der Solarstromproduktion soll eine Überhitzung der Solarindustrie verhindert werden, indem ein Wachstum von über 50% über mehrere Jahre ausgeschlossen wird. Das Gesamtpotenzial der Photovoltaik wird deshalb auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden Fläche im schweizerischen Gebäudepark sowie einem moderaten aber entschiedenen Ausbau der Photovoltaik berechnet. Zusätzlich zum daraus resultierenden **jährlichen Neufächenwachstum** der Photovoltaik sind auch die **mittlere Lebensdauer von Photovoltaikanlagen** und deren **Technologie- und Effizienzentwicklung** als weitere Bestimmungsfaktoren der jährlichen Solarstromproduktion zu berücksichtigen.

2. Entwicklung der Gesteungskosten und der staatlichen Förderung

Für die Entwicklung der Solarindustrie spielen auch die Gesteungskosten sowie die staatlichen Fördermassnahmen eine Rolle. In einem ersten Schritt werden die Entwicklungen der Gesteungskosten und der Strommarktpreise prognostiziert. Diese ermöglichen es in einem zweiten Schritt Rückschlüsse auf die Investitionskosten sowie auf die notwendigen jährlichen KEV-Beiträge zu ziehen. Damit wird auch der Zeitpunkt ersichtlich, ab welchem die Photovoltaik Wirtschaftlichkeit erreicht.

3. Speicherung von Solarstrom

Die Frage der Speicherung von Solarstrom nimmt eine zentrale Rolle in der Debatte rund um das Potenzial der Photovoltaik ein. Im dritten Teil dieses Hintergrundberichts werden deshalb wichtige Überlegungen zu **dezentralen Kurzspeichern** und **Pumpspeicherkraftwerken** dargestellt. Deren Einsatz wird in Zukunft von eminenter Wichtigkeit für die Gewährleistung einer stabilen Stromversorgung sein. Im Detail werden diese Aspekte im Rahmen weiterer Hintergrundberichte aufgearbeitet, die swisscleantech zu einem späteren Zeitpunkt publizieren wird.

1. Entwicklung der Solarstromproduktion

1.1 Maximales Potenzial von Solarstrom

Die Entwicklung der Solarstromproduktion muss stets in einem Gesamtkontext betrachtet werden. Es geht nicht nur ausschließlich um die Produktion von Solarstrom, sondern auch um dessen zeitgerechte Bereitstellung im Tages- und Jahresrhythmus. Dabei müssen auch stets wirtschaftliche Überlegungen miteinbezogen werden. In Anbetracht dessen berücksichtigt swisscleantech für die Potenzialberechnung der Photovoltaik folgende Faktoren:

- **Die zur Verfügung stehende Gebädefläche**
 - Gebädeflächen (Dächer und Fassaden)
 - Infrastrukturflächen
 - Geeignete Freiflächen (vereinzelte, unter Einbezug der Vollkostenrechnung)
- **Den Markt für Solarenergie:** Da die Solarenergie aufgrund täglicher und saisonaler Zyklen variiert, wird das Marktpotenzial sowohl von der Nachfrage, wie auch von den Möglichkeiten der effizienten Speicherung und Verteilung bestimmt.

Aufgrund verschiedener Optimierungsüberlegungen geht swisscleantech von einem **langfristigen Potenzial für Solarstrom im schweizerischen Netz von rund 25 TWh** aus. Dies entspricht einer Kraftwerksleistung von etwa 25 GW¹. Nimmt man einen mittleren Ertrag von 200 kWh/m² für das Jahr 2050² an, ergibt dies eine **Photovoltaikfläche von 125 km²**.

Für swisscleantech sollen **vorwiegend Gebädeflächen** für den Bau von Photovoltaikanlagen genutzt werden. Ausnahmen werden nur für Flächen vorgesehen, auf denen sich ein besonders guter Ertrag erreichen lässt. Dies ist beispielsweise in den Bergen der Fall, wo die Sonneneinstrahlung insbesondere im Winter sehr hoch ausfällt, was zu einem höheren Anteil der Winterproduktion von Solarstrom führt.

¹ Im Weiteren wird von einem mittleren Verhältnis von 1000h Vollast ausgegangen. Dies bedeutet, dass für ein kWp Leistung, 1000 kWh Strom produziert werden. Dies entspricht einem mittleren Ertrag, der aber je nach Ort, Exposition und Neigung variieren kann.

² siehe dazu Kapitel 1.3

Im heutigen schweizerischen Gebäudepark (2012) sind **ca. 400 km² Dachflächen** vorhanden, wovon etwa 30% für die Photovoltaik geeignet sind³. Langfristig ist außerdem mit einer Optimierung der Dach- und Gebäudestruktur für die Nutzung der Solarenergie durch Architekten und Planer zu rechnen. Die **Fläche**, die sich für Photovoltaik eignet, ist somit **nicht der limitierende Faktor** für die Solarenergie, auch wenn Freilandflächen nur zurückhaltend für die Produktion von Solarstrom eingesetzt werden (nur unter der Berücksichtigung der Vollkostenrechnung, z.B. bezüglich bioproduktiver Flächen).

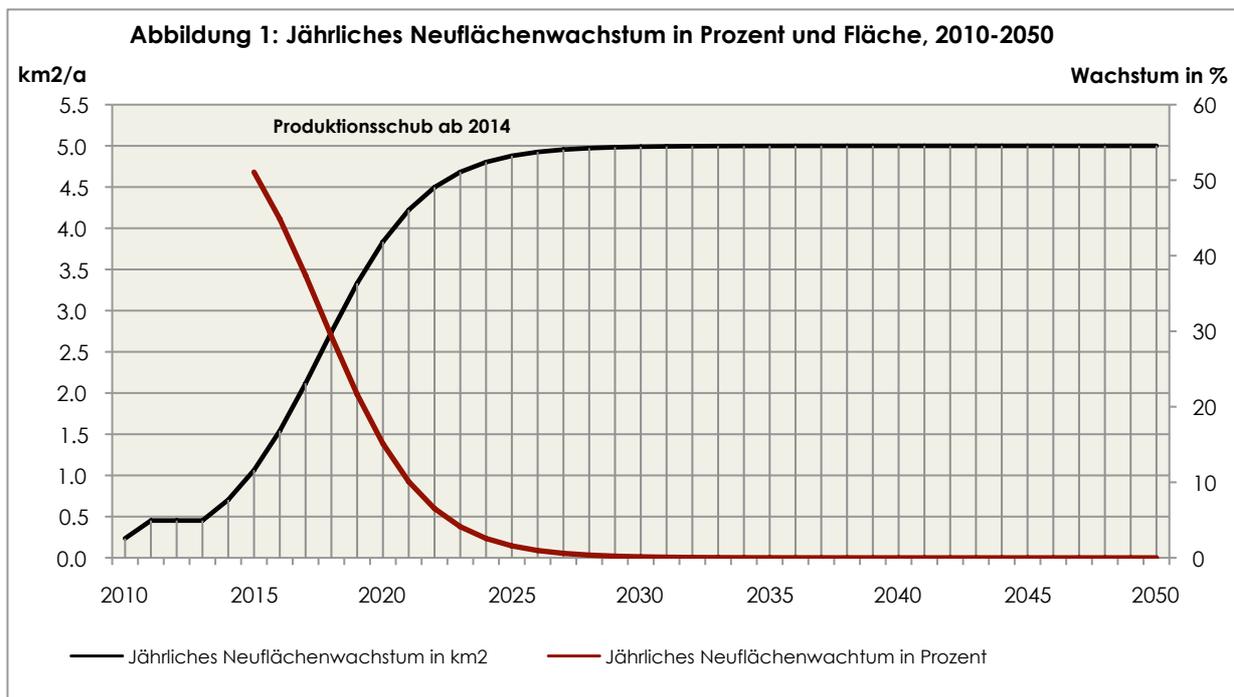
1.2 Entwicklung der installierten Fläche von Photovoltaik-Anlagen

Um ein anschauliches Maß für das Wachstum der Solarindustrie für die nächsten Jahre darstellen zu können, beschreibt swisscleantech dieses Wachstum über die installierte Fläche. Diese Größe wird von swisscleantech als **Neufläche** bezeichnet und definiert die Leistung der jährlich installierten Anlagen.

Um ein **organisches und natürliches Wachstum** der Solarbranche und insbesondere der Montagefirmen zu gewährleisten, stellt swisscleantech das jährliche Wachstum der Neuflächen durch die **Wachstumskurve nach Verhulst**⁴ dar. Diese setzt sich aus drei Parametern zusammen:

- **Startpunkt des Wachstums** ist der Istzustand der Montageindustrie und entspricht dem aktuellen jährlichen Flächenzubau. Dieser wird auf rund 0.5 km² gesetzt (Stand 2011).
- Die **Wachstumskonstante r** definiert die Wachstumsgeschwindigkeit in der Anfangsphase. swisscleantech setzt eine Wachstumskonstante voraus, die ein Wachstum von 50% über mehrere Jahre hinweg verhindert und damit einer **Überhitzung der Solarindustrie** zuvorkommt.
- **Der Endzustand** der Branche wird auf rund 5 km² neuinstallierte Photovoltaikflächen pro Jahr gesetzt. Mit dieser Kapazität kann nach 2050 sichergestellt werden, dass Anlagen nach Ablauf ihres typischen Lebenszyklus von 25 Jahren periodisch erneuert werden können.

swisscleantech erwartet, dass ein starkes Wachstum der Neuflächen parallel zur Implementierung der Fördermassnahmen erst ab 2014 einsetzt (siehe Sockel). Dies entspricht der Forderung der parlamentarischen Initiative 12.400 (UREK-N) die eine Erhöhung der maximalen KEV-Abgabe auf 1.5 Rp./kWh ab 2014 vorsieht.



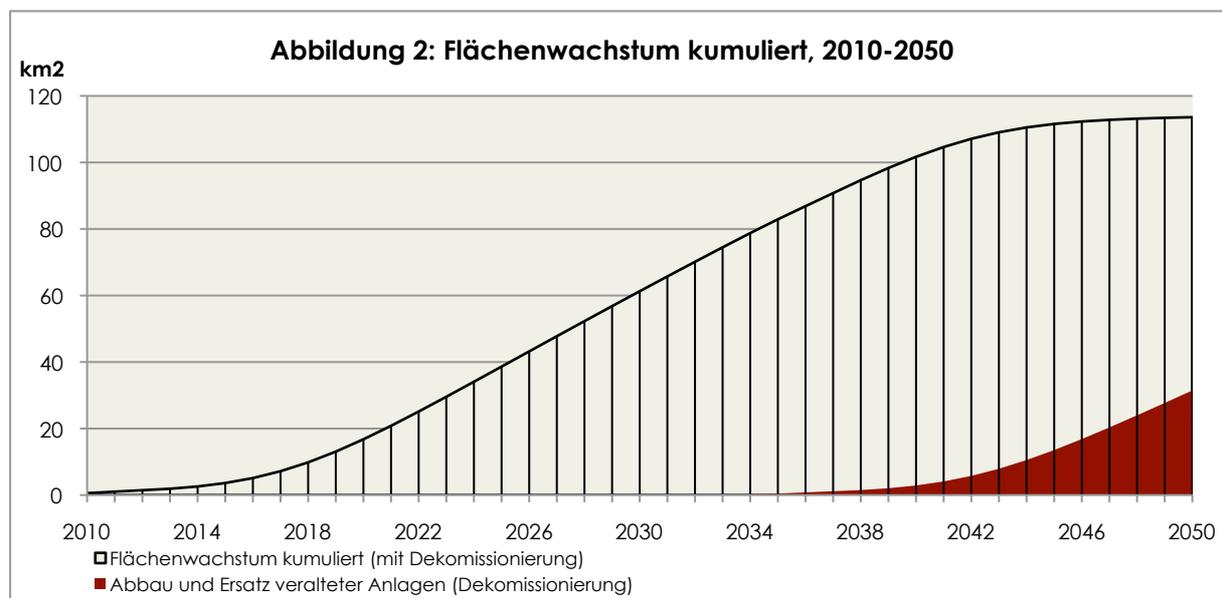
Obwohl das anfängliche Wachstum im Modell von swisscleantech eher gering ist stellt es für die Solarindustrie eine Herausforderung dar, da die Montagekapazität von 2014 bis 2018 rund vervierfacht werden muss. Ein direkter Vergleich zum anliegenden **Bayern** zeigt auf, dass sogar eine deutlich schnellere Entwicklung möglich wäre. Bayern hat seine installierte Leistung von 63 MW im Jahr 2001 bis auf 8 GW Ende 2011 mehr als verhundertfacht. Bereits 2011 produzierte Bayern trotz schlechterer

³ Gemäß der IEA wird eine Dachfläche als „geeignet“ eingestuft, wenn sie die architektonischen Anforderungen erfüllt (Baubarkeit, Schattenwürfe, historische Gegebenheit) und über ausreichend Sonneneinstrahlung verfügt (stündlich, täglich, jährlich). Üblicherweise liegt dieser Wert bei 40%. Auf dieser Grundlage errechnete die IEA bereits 2002 eine geeignete Fläche von 138 km² für die Schweiz (IEA, Potential for Building Integrated Photovoltaic, 2002).

⁴ vgl. Z.B. http://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_function

Einstrahlungsverhältnisse als die Schweiz pro Einwohner jährlich 29-mal mehr Solarstrom⁵ (insgesamt 7 TWh) und möchte die Solarstromproduktion bis 2021 auf 14.1 TWh erhöhen. Im Vergleich dazu ist das für die Schweiz empfohlene Wachstum langsamer. Mit den durch swisscleantech vorgeschlagenen Wachstumsparametern würde ein vergleichbares Wachstum in 16 Jahren erreicht. Damit können allfällige Überhitzungsphänomene insbesondere auch im Netzausbau vermieden werden. Trotzdem verlangt ein solches Tempo, dass der Ausbau von Netz und Speichern zügig vorangebracht wird.

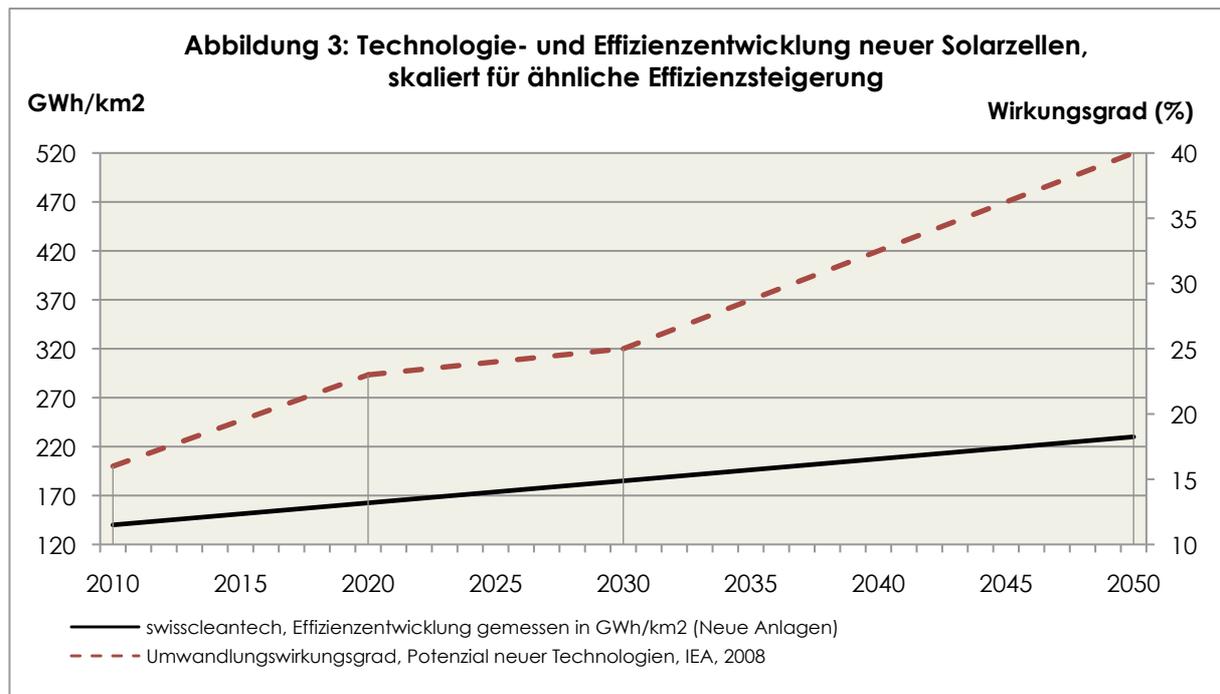
Mit diesen Angaben kann nun das Wachstum der installierten Fläche bis 2050 errechnet und dargelegt werden. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, flacht dieses Wachstum ab 2045 deutlich ab. Da alte Module durch effizientere Technologien ersetzt werden, steigt der Ertrag dennoch weiter an (vgl. Kapitel 1.3) und ergibt eine **gesamte Photovoltaikfläche von 113 km²** für das Jahr 2050.



1.3 Technologie und Effizienzentwicklung der Photovoltaik

Die Effizienzentwicklung bemisst swisscleantech direkt an der Veränderung der produzierten Menge Solarstrom einer gegebenen Fläche. Dabei wird von einer **mittleren Produktion des gegenwärtigen Produktionsparks von 140 kWh/m²** ausgegangen, welche sich aus dem durchschnittlichen Jahresertrag unterschiedlicher Solarzellentechnologien mit unterschiedlichen Leistungen zusammensetzt. Dies entspricht einem Umwandlungswirkungsgrad von etwa 11%. Für 2050 wird eine mittlere Produktion **von 200 kWh/m²** prognostiziert, was einem Produktionszuwachs von rund 43% pro m² entspricht. Werden neue Anlagen separat betrachtet, dann geht swisscleantech für 2050 von einem Effizienzwert von 230 kWh/m² aus, was einem eher konservativen Effizienzzuwachs von 64% pro m² gleichkommt. Die IEA, welche die Effizienz der Photovoltaik direkt am Umwandlungswirkungsgrad der Zellen bemisst, sieht bis 2050 sogar einen potenziellen Leistungszuwachs von 250% für neue Technologien voraus. Dies entspräche einem Umwandlungswirkungsgrad von rund 40%.

⁵ Bayern hat 1.58-mal mehr Einwohner und eine 1.7-mal größere Fläche als die Schweiz. Die Fläche pro Einwohner ist demnach praktisch identisch (Bayern: 5597 m²/Einwohner; Schweiz: 5191 m²/Einwohner). (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, 2012)



Diese konservative Annahme ist dadurch gerechtfertigt, dass zunehmend steilstehende Anlagen zur **Optimierung der winterlichen Solarstromproduktion** zum Einsatz kommen werden. Diese weisen üblicherweise pro m² einen etwas tieferen Produktionsertrag auf. Im Rahmen des gegebenen Flächenpotenzials ist es auch denkbar, dass günstigere Zellen mit schlechterem Wirkungsgrad zum Einsatz kämen. Entsprechend würde ein größerer Anteil des Flächenpotenzials ausgenutzt. Wie oben dargestellt, ist der **limitierende Faktor für die Entwicklung der Solarenergie nicht die vorhandene Fläche**, sondern der Bedarf an Energie und die Möglichkeit, diese Energie zeitgerecht und auf wirtschaftlich sinnvolle Weise zur Verfügung zu stellen.

1.4 Entwicklung der Solarstromproduktion im Vergleich

Unter Berücksichtigung des Wachstums der Neuf Flächen, der Lebensdauer von Photovoltaik-Modulen und der technologischen Entwicklung prognostiziert swisscleantech für 2050 eine **Stromproduktion aus Photovoltaik-Anlagen von 22.7 TWh**, respektive einen **Anteil von 15.1%** am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz (ca. 122 TWh)⁶.

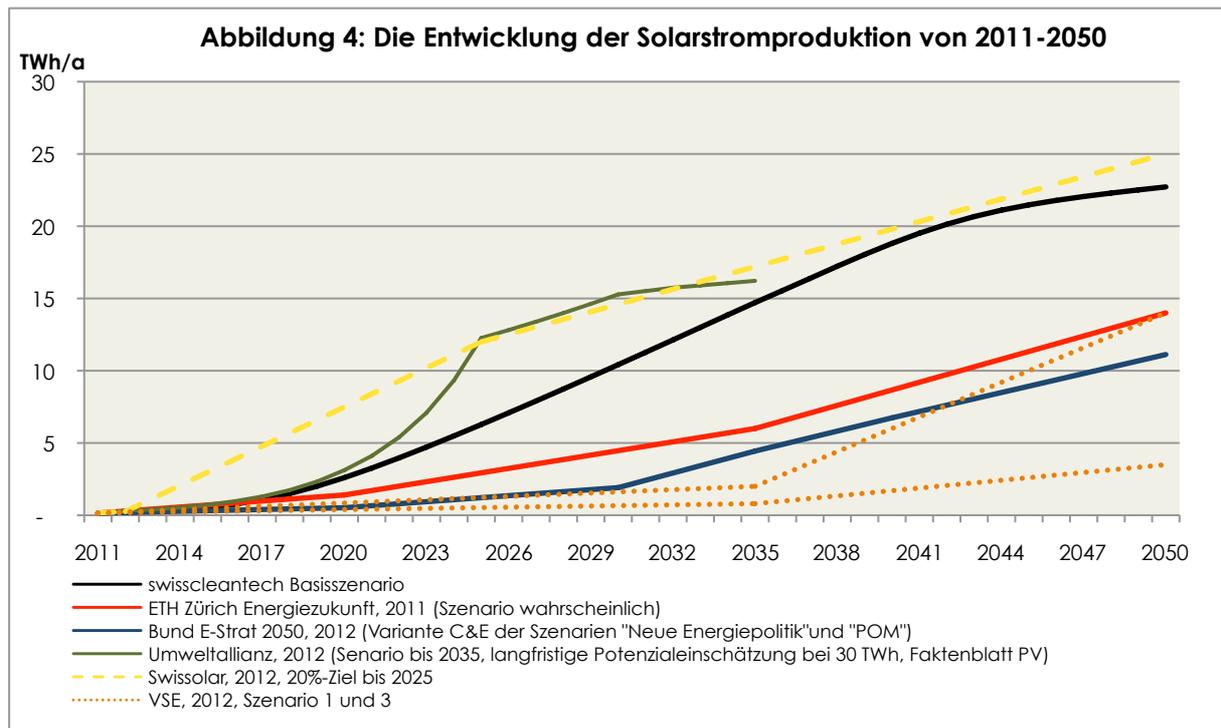
Im **schweizweiten Vergleich** geht swisscleantech von einer Kapazitätsentwicklung der Photovoltaik aus, die diejenige des Bundes, des VSE und der ETH bis 2050 übersteigt. Die Unterschätzung des Bundes und des VSE bezüglich dem Potenzial der Photovoltaik wird insbesondere dann ersichtlich, wenn folgende Zahlen einander gegenübergestellt werden: Die von der Solarbranche erwarteten 300 GWh **für 2012** stehen einer Prognose des VSE von bescheidenen 400 GWh und des Bundes von 375 GWh **für 2020** gegenüber.

Im Gegensatz dazu sind Swissolar⁷ sowie die Umweltallianz⁸ in ihren Prognosen zuversichtlicher als swisscleantech und rechnen bereits für 2025 mit einer jährlichen Produktion von 12 TWh. swisscleantech zweifelt nicht das Potenzial, sondern den zeitlichen Verlauf der beiden Szenarien an. Ein derart forciertes Wachstum birgt die **Gefahr einer Überhitzung** und entspricht kaum einem gesunden und nachhaltigen Branchenwachstum. Daher geht swisscleantech, trotz hoher Potenzialberechnung für 2050, in der Zeitperiode bis 2035 von einem vergleichsweise konservativen Wachstum der Solarindustrie aus (siehe Abbildung 4).

⁶ Siehe Cleantech Energiestrategie (v3.0), S. 26

⁷ Zahlen aus: Rede von Nationalrat Roger Nordmann, Präsident Swissolar, anlässlich der 10. Nationalen Photovoltaik-Tagung

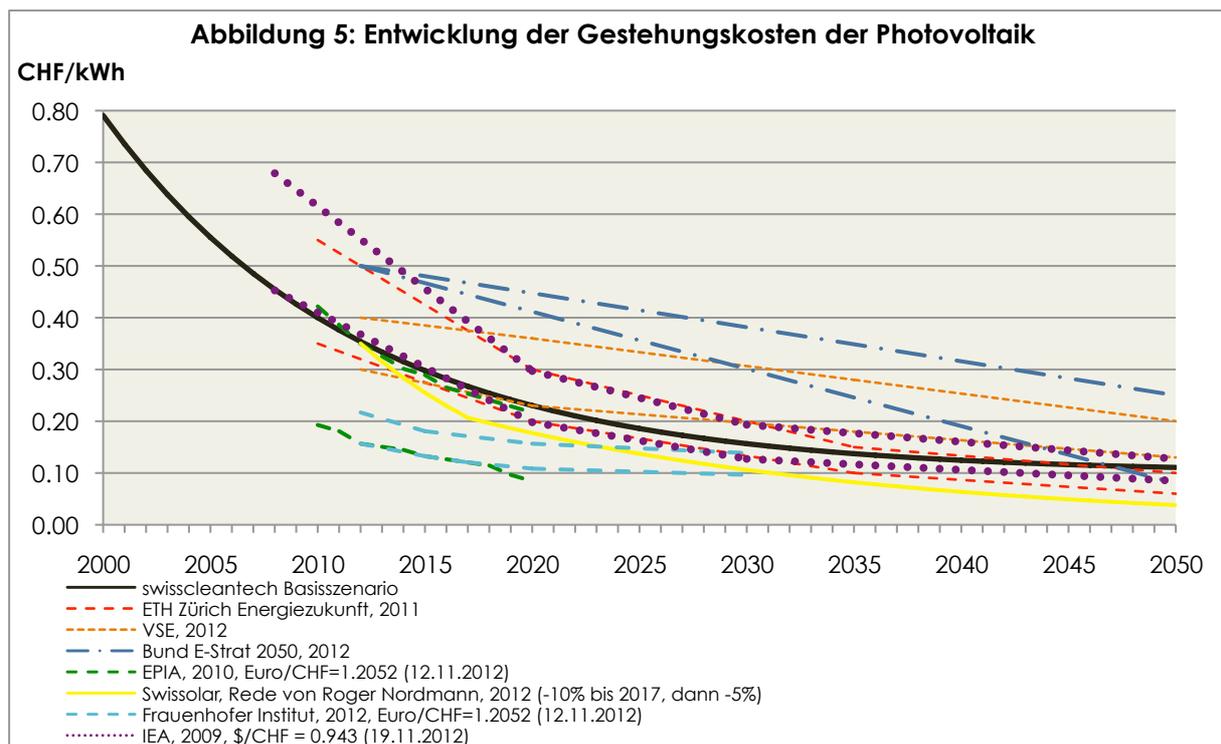
⁸ Zahlen aus: Szenario der Umweltverbände wurde im Mai 2011 nur bis 2035 erstellt.



2. Entwicklung der Kosten und der staatlichen Förderung

2.1 Entwicklung der Gestehungskosten

swisscleantech geht von einer Entwicklung der Gestehungskosten aus, die sich aus einem fixen und einem variablen Teil zusammensetzt. Einerseits wird angenommen, dass die Produktionskosten der Solarenergie in der Schweiz, inkl. eines Anteils für die Stromspeicherung, einen **Basiswert von 0.10 CHF/kWh** nie unterschreiten werden. Andererseits wird ausgehend von einem Durchschnittspreis von **0.4 CHF/kWh** für das Jahr 2010 eine jährliche **Kostendegression von 8%** vorausgesetzt. Auf Basis dieser Berechnung prognostiziert swisscleantech Gestehungskosten **von 0.11 CHF/kWh⁹ für das Jahr 2050** (siehe Abbildung 5).



⁹ Die Entwicklung der Gestehungskosten wurde nicht inflationsbereinigt.

In den von swisscleantech vorgeschlagenen Produktionskosten ist bereits ein progressiv steigender **Betrag für eine anteilmäßige Speicherung und Zeitverschiebung** der Solarstromproduktion eingerechnet (2 Rp./kWh in 2050). Konkret wird davon ausgegangen, dass 2050 ca. 30% des Solarstroms über einige Stunden vom Tag in den Abend und in die Nacht verschoben werden. Zudem nimmt swisscleantech an, dass eine Kostendegressionen nicht nur im Modulbereich erfolgen wird, sondern auch in der gesamten Planung und Ausführung. So beträgt beispielsweise der **Anteil der Planungs- und Montagekosten an den Gesamtkosten mehr als 50%**. Wie auch von der Industrie bestätigt, sind hier erhebliche Effizienz- und Kostensenkungspotenziale vorhanden. Idealerweise würde die Montage von Solaranlagen in Zukunft integral in die Arbeit des Dachdeckers integriert werden.

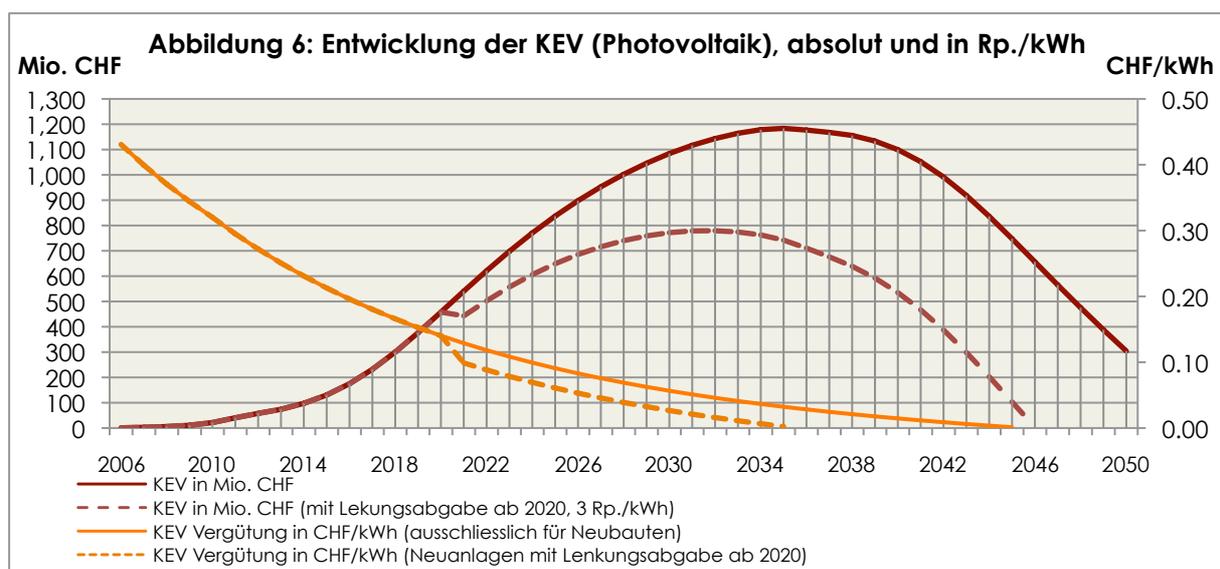
Im **schweizerischen Vergleich** liegt swisscleantech mit dieser Prognose im Mittelfeld. Die ETH, wie auch Swissolar gehen von tieferen Kosten aus, welche die Baseline von 0.10 CHF/kWh unterschreiten. Im Vergleich dazu liegt die Prognose von swisscleantech noch innerhalb der vom Bundesrat vorgeschlagenen Kostenspannweite von 0.08-0.25 CHF/kWh. Ausschließlich der VSE sagt eine Kostenentwicklung voraus, die über derjenigen von swisscleantech verläuft.

Ein Blick auf unsere **Nachbarstaaten** verrät eine noch markantere Kostenentwicklung. Gemäß dem Fraunhofer Institut liegen die Gestehungskosten in Deutschland bereits heute tiefer als in der Schweiz. Selbst norddeutsche Anlagen weisen Gestehungskosten von unter 0.2 Euro/kWh auf und dies bei durchschnittlichen Stromkosten für Haushalte von 0.253 Euro/kWh (Stand 2012). In Südfrankreich oder Italien wird eine Kilowattstunde bereits zu Gestehungskosten von 0.1–0.13 Euro/kWh produziert¹⁰. Dabei handelt es sich jedoch um Freiland-Grossflächenanlagen, die swisscleantech als solche nicht unterstützt. Auch der Verband der Europäischen Photovoltaik Industries (EPIA) sagt eine Senkung der Gestehungskosten von 36-51% in den nächsten 10 Jahren voraus. Gemäß EPIA wird die Photovoltaik vor 2020 in den 5 grössten Strommärkten der EU (Deutschland, UK, Frankreich, Italien und Spanien) Wirtschaftlichkeit erreicht haben¹¹.

2.2 Entwicklung der KEV

Für die kurzfristige Finanzierung und den notwendigen engagierten Anstoss der Energiewende stellt der etablierte KEV Mechanismus für swisscleantech eine angemessene Lösung dar. Langfristig hingegen sollen staatliche Förderungen durch ein Lenkungssystem schrittweise ersetzt werden. Abbildung 6 zeigt eine Entwicklung der KEV auf, wie sie ohne und mit Lenkungsabgaben ab 2020 zu erwarten ist.

In der Modellrechnung geht swisscleantech gemäß geltender Regelung von einer **KEV-Dauer von 25 Jahren** aus. swisscleantech begrüsst hingegen die vom Bund angestrebte kürzere KEV-Dauer von 15-20 Jahren, die mit der vorherrschenden Dynamik der Solarbranche besser übereinstimmt. Ausgehend von Strommarktpreisen von 0.08 CHF/kWh in 2010, respektive 0.12 CHF/kWh in 2050 errechnet swisscleantech **Ausgaben der KEV von insgesamt 15.78 Mrd. CHF**¹² (diskontiert, 3% Zinssatz). Die jährlichen KEV-Beiträge ergeben sich aus der Differenz der kumulierten Produktionskosten und den Produktionserträgen, die sich wiederum aus dem Produkt der kumulierten Produktion und den Marktpreisen zusammensetzen¹³.



¹⁰ Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE, 2012

¹¹ European Photovoltaic Industry Association, 2011

¹² Dieser Wert entspricht gleichzeitig den nicht-amortisierten Investitionen bis 2050

¹³ KEV = Produktionskosten kumuliert (Mio.) – (Produktion kumuliert (GWh) x Strommarktpreis (CHF))

Gleichläufig zu den sinkenden Gestehungskosten wird die durchschnittliche Vergütung pro kWh kontinuierlich herabgesetzt. In absoluten Zahlen ist jedoch bis 2035 mit einem Anstieg der jährlichen Vergütungen zu rechnen (max. 1'183 Mio. CHF, 2035). Zahlungen im Rahmen der KEV fallen solange an, bis die letzte vertraglich eingebundene Anlage ihre geschätzte Lebensdauer von 25 Jahren erreicht hat und Neuanlagen unterhalb des durchschnittlichen Strommarktpreises produzieren. Alternativ dazu könnte man sich entschliessen, die Anlagen schrittweise durch eine **einmalige Entschädigung** aus der KEV zu entlassen.

Eine separate Betrachtung der Entwicklung der KEV für Neuanlagen zeigt auf, dass die Gestehungskosten der Photovoltaik ab 2046 den Strommarktpreis (nur Produktion ohne Verteilkosten) von 0.11 CHF/kWh unterschreiten und damit nicht mehr unter das KEV Regime fallen werden. Falls ab 2021 im Rahmen der **ökologischen Steuerreform** eine zusätzliche Lenkungsabgabe von beispielsweise 3 Rp./kWh im Szenario berücksichtigt wird, fällt der Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeit bereits auf das Jahr 2035 zurück. Die jährlichen **Ausgaben der KEV würden damit auf 10 Mrd. CHF** reduziert werden.

Weitere Veränderungen der Rahmenbedingungen sind hinsichtlich der vom Bundesrat vorgeschlagenen **Eigenverbrauchsregelung**¹⁴ und **Investitionshilfen für Kleinanlagen**¹⁵ zu erwarten. Wird eine Eigenverbrauchsregelung erlassen, trifft aus Sicht des privaten Solarstromproduzenten die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik bereits früher ein. Sobald der Zeitpunkt seines Konsums mit demjenigen der Produktion zusammenfällt (ca. 50% der Zeit) kann er die Netzgebühren (ca. 50% des Strompreises) ebenfalls von seinen Kosten abziehen.

3. Speicherung von Solarstrom

Auch bei zunehmendem Anteil der Photovoltaik am Energieversorgungssystem steht die Schweiz vor der Herausforderung, eine ausgeglichene Energie- und Leistungsbilanz zu gewährleisten. Um dies zu bewerkstelligen ist es wichtig, über angepasste Speicherkapazitäten zu verfügen. swisscleantech unterscheidet dabei zwischen **dezentralen Kurzzeitspeichern** die Strom über wenige Stunden speichern können, mittelfristig wirksamen Speichern wie **Pumpspeicherkraftwerken/Speicherseen**, die Strom über Tage bis Wochen lagern und **saisonalen Speichern**.

3.1 Saisonalität, Pumpspeicherwerke und Speicherseen

Die wetter- und saisonbedingten Schwankungen in der Produktion von Solarstrom führen zu Spitzen im Sommer und einer reduzierten Produktion im Winter. Auch innerhalb eines Tages treten **zeitliche Unterschiede in der Produktion auf**. Für den saisonalen Ausgleich müssten idealerweise allfällige Produktionsüberschüsse aus dem Sommer im Winter zur Verfügung gestellt werden.

Da die Speicherbecken in den Sommermonaten aufgrund natürlicher Zyklen (Schneesmelze und Witterung) gefüllt werden und Ende September weitgehend voll sind, ist eine saisonale Verlagerung von Solarstrom kaum möglich, ohne dass separate Speichervolumen zugebaut werden müssen. Trotzdem spielt die Solarenergie auch im Winter eine wichtige Rolle. **Neue Anlagentypen** erlauben eine bessere saisonale Übereinstimmung von Produktion und Bedarf. Das Projekt Quinten der EKZ beispielsweise sieht den Bau einer **vertikalen Photovoltaik-Anlage** am Ufer des Walensees vor. Ähnlich wie Fassadenanlagen gewährleistet die vertikale Neigung höhere Produktionserträge im Herbst und Frühling aufgrund günstigerer Einstrahlungsverhältnisse¹⁶. Dementsprechend wirkt diese Anlage ergänzend zu konventionellen Dachanlagen. Ferner kann der Winteranteil der Photovoltaik auch mit dem **Bau von Anlagen im Gebirge** beträchtlich erhöht werden, da die jährliche Sonneneinstrahlung in den Alpen deutlich höhere Werte als im Mittelland erreicht¹⁷. Mit solchen Anlagen wäre ein Winteranteil der produzierten Energie der Photovoltaik von über 40% möglich.

Allerdings bleibt auch bei einer optimalen Integration der Solarenergie der **Import von Grünstrom** im Herbst, Winter und Frühling erforderlich (siehe Abbildung 7). Dabei geht swisscleantech davon aus, dass dieser Import zu attraktiven Preisen möglich ist. Sobald eine internationale Anbindung des Schweizer Stromnetzes gegeben ist, kann das wetterbedingte **Überangebot an Windenergie** im europäischen Netz im späten Herbst, Winter und Frühling aufgenommen und zeitversoben zur Verfügung gestellt werden. So werden die neu-ausgebauten Speicherseen zu einem wichtigen Teil eines attraktiven Businessmodells.

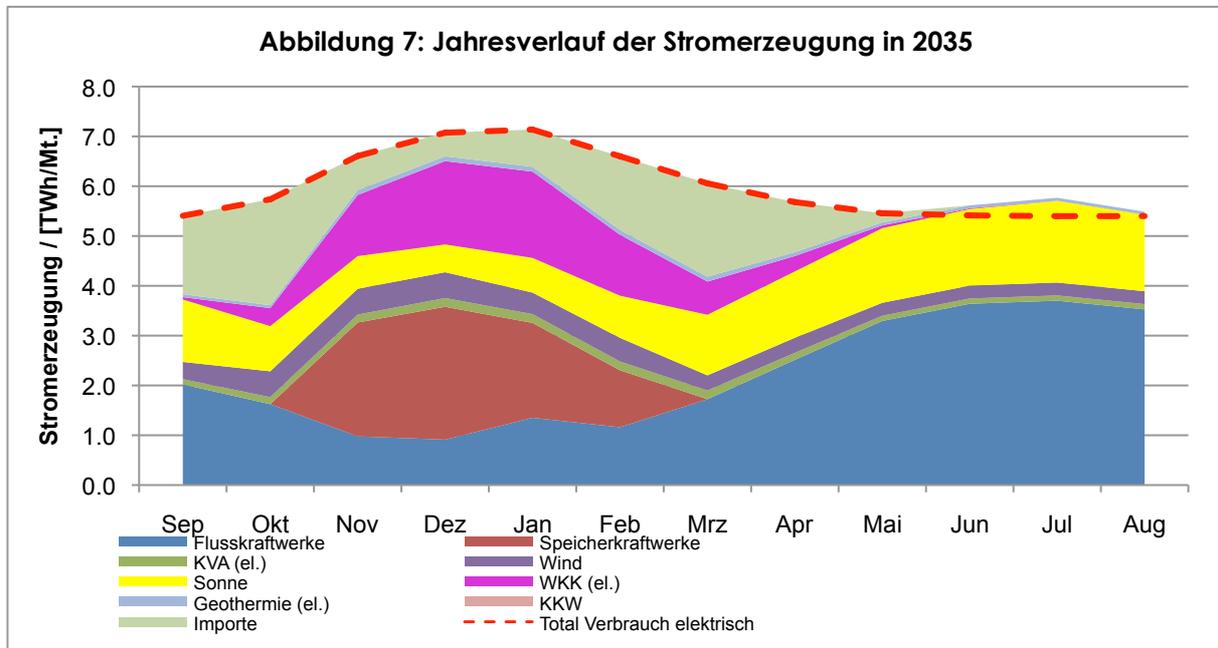
¹⁴ Ein privater Produzent soll den produzierten Solarstrom für den Selbstgebrauch verwenden dürfen, statt ihn in das Netzsystem einzuspeisen. (Massnahmenpaket des Bundesrates zur Energiestrategie 2050)

¹⁵ Betreiber von Kleinanlagen sollen künftig statt der KEV eine einmalige Investitionshilfe erhalten. (Massnahmenpaket des Bundesrates zur Energiestrategie 2050)

¹⁶ Weitere Informationen zum Projekt sind auf der Webseite der EKZ zu finden.

¹⁷ An günstigen Orten liegt die Strahlungsintensität bei ca. 2000 kWh/m²/a verglichen mit 1'100 kWh/m²/a im Mittelland. Dies entspricht demselben Wert wie in Spanien.

Da die definitive Größe des Endausbaus der Solarenergie weniger durch die zur Verfügung stehende Fläche definiert ist, als durch die zeitgerechte Abnahme, werden um 2045 auch **neue Speichertechnologien** eine Rolle spielen. swisscleantech beobachtet deshalb mit Interesse die Entwicklungen von **Power-to-Gas** und **Power-to-Liquid**¹⁸ Technologien. Gelingt es zu akzeptablen Kosten Solarenergie in Form eines chemisch-gebundenen Energieträgers zu speichern, werden zusätzliche, vielversprechende Möglichkeiten für die Photovoltaik und andere erneuerbare Energien eröffnet. swisscleantech vertritt allerdings die Meinung, dass solche Lösungen erst ab Mitte des 21. Jahrhunderts eine bedeutende Rolle spielen werden.



3.2 Dezentrale Kurzzeitspeicherung

Innerhalb eines Tageszyklus fallen bei der Photovoltaik die höchsten Erträge mit dem Verbrauchspeak zur Mittagszeit zusammen. Sobald jedoch größere Anlagenflächen installiert werden und die Bandlast aus Kernkraftwerken und Kohlekraftwerken wegfällt, entstehen an sonnigen Tagen Überschüsse zur Mittagszeit und Defizite während des zweiten Verbrauchspeaks am Abend. Die **dezentrale Zwischenspeicherung** wird deshalb einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Photovoltaik haben. swisscleantech ist überzeugt, dass sich eine dezentrale Zwischenspeicherung nicht nur **stabilisierend auf das Netz** auswirkt, sondern auch dazu führt, dass bei der Photovoltaik **keine Margen-Erosion** stattfindet. Bereits heute sinkt der Spotmarktpreis für Strom zur Mittagszeit aufgrund der Einspeisung von Solarstrom. Da die zeitliche Differenz zwischen Überangebot und Knappheit nur 6 bis höchstens 18 Stunden beträgt, können aus volkswirtschaftlichen Gründen kleine, dezentrale und schnelle Speicher sehr lukrativ sein.

swisscleantech hat dazu bereits erste Berechnungen unternommen. Als Benchmark-Technologie wurde dabei die **Batterien-Technologie** gewählt, wobei nicht auszuschließen ist, dass sich andere, günstigere Kurzzeitspeicher oder die Kombination von verschiedenen Technologien langfristig durchsetzen werden (z.B. Druckluftspeicher).

swisscleantech rechnet mit folgenden Kosten für die kurzfristige Speicherung:

Kategorie ¹⁹	Einheit	2010	2050
Batterie pro Ladekapazität	[Fr/kWh]	500	120
Anteil des PV- Stroms, der gespeichert werden soll	[%]	1	33
Zyklen bis zur Erschöpfung der Batterie	[1]	3000	8000
Zyklen pro Jahr (Annahme)	[1/a]	150	200
Optimale Lebensdauer	[J]	20	40

¹⁸ Sommerlicher Überschussstrom wird zur Speicherung in synthetisches Erdgas oder Methanol umgewandelt.

¹⁹ Angaben zur Entwicklung der Batteriekosten und zur Performance wurden in einem Experteninterview mit Max Ursin (KWO) eingeholt. Die resultierenden Kosten basieren auf einem Businessmodel von swisscleantech.

realistische Lebensdauer	[J]	20	20
Anzahl Zyklen aus Lebensdauer	[1]	3000	4000
Amortisationsfaktor/J (4.5% 20J) Batterie	[1]	0.077	0.077
Amortisation Batterie pro Jahr	[Fr/kWh]	38.5	9.24
Kosten gespeicherte kWh	[Fr/kWh]	0.257	0.046
Basiskosten Produktion	[Fr/kWh]	0.400	0.080
Kosten Produktion inkl. Anteil Speicherung	[Fr/kWh]	0.403	0.099

Damit die Erträge der PV möglichst vollständig genutzt werden können, müssen die Rahmenbedingungen so angepasst werden, dass es für Private attraktiv ist, in dezentrale Speicher zu investieren. Maßnahmen dazu sind die **Eigenverbrauchsregelung** und eine **Differenzierung der Einspeisetarife** bei gleichzeitig fixer KEV. Letztere soll einem Produzenten als Anreiz dienen, dann seinen Solarstrom einzuspeisen, wenn die Netzauslastung gering ist. Da die Strompreise in dieser Zeitspanne ohnehin am höchsten sind, können höhere Erträge erzielt werden.

Tabelle 2: Übersicht der Parameter

Parameter		swiss- cleantech	Vergleichswerte	Institution
Neuflächen- wachstum	Jährlicher Flächenausstoss km ² /annum	0.452 (2011) 5 (nach 2050)	7 (jährlich)	Swissolar
Flächen- entwicklung	Gesamtfläche zum Zeitpunkt t: km ²	113 (2050)	90 (2025) 92 (2035)	Swissolar Umweltallianz
	Mittlere Lebensdauer von Photovoltaik Modulen: Jahre	25	25 25 (2008), 30 (2020), 35 (2035), 40 (2050)	Fraunhofer Institut IEA
Effizienz- entwicklung	Effizienz heute: GWh/km ² /annum	140	Kristalline Module: 140-170 Dünnschichtmodule: 70-90 Mittelland: 55-209 Alpen: 80-304 16% Wirkungsgrad (2010)	Swissolar Umweltallianz IEA
	Effizienz morgen: GWh/km ² /annum	230 (2050)	133.2 ²⁰ (2025) 40% Wirkungsgrad (2050)	Swissolar IEA
Produktions- entwicklung	Gesamtpotenzial: TWh	25	12 30	Swissolar Umweltallianz
	Jährliche Produktion 2050: (TWh)	22.7	10-20 0.2-9.7 1.9-5.7 5.7-11.12 12 18.83 8-12	ETH VSE SATW Bund Swissolar Umweltallianz Energie Dialog
Entwicklung der Kosten und Förderung	Gestehungskosten heute: CHF/kWh	0.40 (2010)	0.35-0.55 (2010) 0.30-0.40 (2012) 0.50 (2012) 0.35 (2012) 0.16-0.22 (2012) 0.45-0.55 (2008) 0.19-0.42 (2010)	ETH VSE Bund Swissolar Fraunhofer Institut IEA EPIA
	Gestehungskosten morgen: CHF/kWh (inklusive Kostenanteil Speicherung)	0.11 (2050)	0.06-0.1 (2050) 0.13-0.20 (2050) 0.08-0.25 (2050) 0.038 (2050) 0.096-0.14 (2030) 0.13-0.16 (2030) 0.08-0.22 (2020)	ETH VSE Bund Swissolar Fraunhofer Institut IEA EPIA
	Jährliche Kostendegression:	8% mit Basiswert 0.10 kWh/	10% bis 2017, danach 5%	Swissolar

²⁰ Rechnung: 12'000 GWh / 90km² = 133.2 GWh/km²