

# dossier.

## Bei der Energie- wende Gas geben

**Globale Studie** | Steht uns für die Transition zu einer nachhaltigen Energieversorgung überhaupt genügend Energie zur Verfügung? Empa-Forscher gingen dieser zentralen Frage nach – mit erstaunlichen Erkenntnissen.

## Il faut accélérer la transition

**Étude globale** | Avons-nous suffisamment d'énergie à disposition pour la transition vers un approvisionnement énergétique durable? Des chercheurs de l'Empa se sont penchés sur cette question essentielle – avec des résultats étonnants.



Bild | Figure: Radomir Novotný

RADOMÍR NOVOTNÝ

**D**ie Internationale Energieagentur IEA hat am 8. März 2022 mitgeteilt, dass die globalen, im Kontext der Energiebereitstellung entstandenen Kohlendioxidemissionen ein historisches Maximum erreicht haben: Gemäss der IEA-Analyse betrug im Jahr 2021 der Ausstoss 36,3 Gt. Die Emissionen stiegen um 6%. Der pandemiebedingte Rückgang schmolz also schnell dahin.

Diverse Faktoren trugen zu dieser rasanten «Erholung» des Energiemarkts bei: Höhere Erdgaspreise führten vor allem in China zur stärkeren Nutzung von Kohle zur Stromerzeugung und schlechteres Wetter liess den Verbrauch zusätzlich in die Höhe schnellen. Gleichzeitig erreichte auch die erneuerbare Stromproduktion einen Rekordwert, denn sie überstieg 8 PWh, bei einer Zunahme von 500 TWh. Fazit: Selbst ein massiver Ausbau der erneuerbaren Energien hat es nicht geschafft, den fossilen Verbrauch zu reduzieren.

Die kritische Situation der steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen motivierte Harald Desing und Rolf Widmer, Forscher der Empa St. Gallen, sich eine grundsätzliche Frage zu stellen. Rolf Widmer erläutert: «Wir haben uns überlegt, was die richtige Strategie ist, wenn man ein knappes Kohlenstoffbudget hat. Können sich die Erneuerbaren selber erzeugen? Oder nimmt man diese Energie aus dem Restbudget an fossilem Kohlenstoff?» Diese Frage, bei der gesellschaftliche, ökonomische und materialtechnische Aspekte bewusst ausgeblendet wurden, führte zu drei Papers: Paper [1] befasst sich mit der schnellstmöglichen Transition zu einem nachhaltigen Energiesystem. Paper [2] präsentiert ein Dreimaschinenmodell zur Wiederherstellung eines langfristig bewohnbaren globalen Klimas und Paper [3] geht der Frage nach, wie viele Speicher man sich bei einem nachhaltigen Energiesystem energetisch leisten kann, um Erzeugung und Verbrauch in Einklang zu bringen.

### Das Klimarisiko schnell reduzieren

Unter der Annahme, dass der globale Energieverbrauch stabil bleibt, wird im ersten Paper untersucht, wie potenziell dramatische und irreversible klimatische Auswirkungen mit einer möglichst schnellen Transition zu einem nachhaltigen Energiesystem vermieden werden können. Da ein Umbau des Energiesystems selbst Energie braucht, wird analysiert, ob dieser Umbau energetisch realisierbar ist. Die Simulationen lieferten ein erfreuliches Ergebnis: Ja, es ist genügend Energie für eine schnelle und vollständige Transition vorhanden, die die Wahrscheinlichkeit einer 1,5°C-Klimaerwärmung deutlich unter 50% senkt. Dieses Ziel ist ambitionierter als die Szenarien des Special Report der IPCC.

Für die Transition setzt die Studie auf den Ausbau der Photovoltaik auf bereits verbauten Flächen. Unverbautes Land muss nicht genutzt werden, um alle fossilen Energieträger durch PV zu ersetzen. Wüstenland könnte zur Not beigezogen werden, aber es geht auch ohne. Zudem wird der Strom durch das Bauen auf Häusern dort erzeugt, wo er

**L**e 8 mars 2022, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a annoncé que les émissions mondiales de dioxyde de carbone générées dans le contexte de l'approvisionnement énergétique avaient atteint un maximum historique: selon l'analyse de l'AIE, en 2021, les émissions se sont élevées à 36,3 Gt, ce qui correspond à une augmentation de 6%. Le recul dû à la pandémie est donc rapidement devenu de l'histoire ancienne.

Divers facteurs ont contribué à ce «rétablissement» rapide du marché de l'énergie: la hausse de prix du gaz naturel a entraîné, surtout en Chine, une utilisation accrue du charbon pour la production d'électricité et, de plus, le mauvais temps a fait grimper la consommation. Dans le même temps, la production d'électricité renouvelable a aussi atteint un niveau record, dépassant les 8 PWh, avec une augmentation de 500 TWh. Conclusion: même un développement massif des énergies renouvelables n'a pas réussi à réduire la consommation fossile.

La situation critique de l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> a motivé Harald Desing et Rolf Widmer, chercheurs à l'Empa de Saint-Gallen, à se poser une question fondamentale. Rolf Widmer explique: «Nous nous sommes demandé quelle était la meilleure stratégie à adopter lorsque le budget carbone est limité. Les énergies renouvelables peuvent-elles s'autoproduire? Ou bien est-il préférable de puiser l'énergie nécessaire à leur développement dans le budget restant de carbone fossile?» Cette question, dans laquelle les aspects sociaux, économiques et techniques (en termes de matériel) ont été délibérément occultés, a donné lieu à trois articles scientifiques: le premier article [1] traite de la transition la plus rapide possible vers un système énergétique durable. Le deuxième [2] présente un modèle à trois machines pour rétablir un climat global habitable à long terme, et le troisième [3] se penche sur la question relative à la quantité de stockage dont il est énergétiquement possible de disposer pour équilibrer la production et la consommation dans un système énergétique durable.

### Réduire rapidement le risque climatique

En supposant que la consommation mondiale d'énergie reste stable, le premier article examine comment des effets climatiques potentiellement dramatiques et irréversibles peuvent être évités avec une transition aussi rapide que possible vers un système énergétique durable. Comme une transformation du système énergétique a elle-même besoin d'énergie, il s'agit d'analyser si cette transformation est réalisable d'un point de vue énergétique. Les simulations ont abouti à un résultat encourageant: oui, il y a suffisamment d'énergie pour une transition rapide et complète qui réduit à une valeur nettement inférieure à 50% la probabilité d'un réchauffement climatique de 1,5°C. Cet objectif est plus ambitieux que les scénarios du rapport spécial du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Pour la transition, l'étude mise sur le développement du photovoltaïque (PV) sur les surfaces déjà construites. Les



#### Energie- und Materialwissenschaftler

Forscher der Critical Materials and Resource Efficiency Group in ihrem Labor an der Empa St. Gallen. Von links: Harald Desing, Rolf Widmer und Marcel Gauch.

#### Des scientifiques experts en énergie et matériaux

Les chercheurs du Critical Materials and Resource Efficiency Group dans leur laboratoire de l'Empa, à Saint-Gall. De gauche à droite : Harald Desing, Rolf Widmer et Marcel Gauch.

auch genutzt wird. So wird der Bedarf für neue Stromleitungen minimiert.

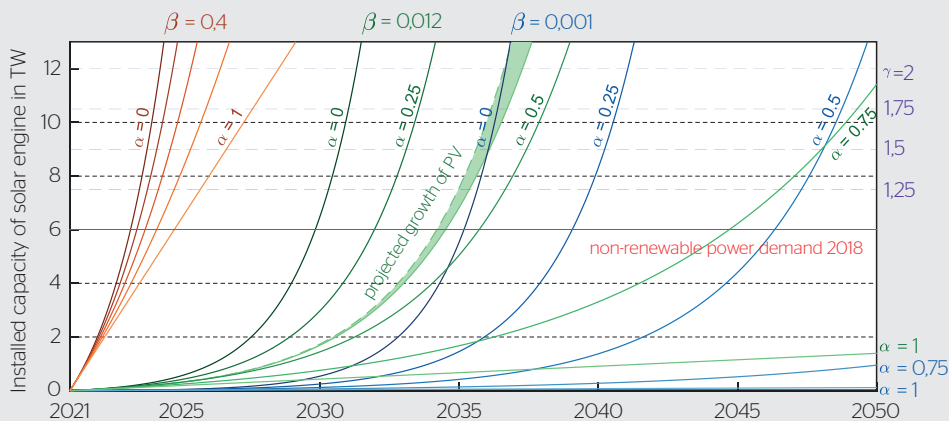
In den Simulationen werden zwar alle bestehenden Erneuerbaren wie Wasserkraft, Windkraft und Geothermie berücksichtigt, aber alle künftigen Investitionen gehen exklusiv in den Ausbau der Photovoltaik – mit dem heute verfügbaren Wirkungsgrad. Rolf Widmer begründet diesen Entscheid: «Mit PV ist man auf der sicheren Seite bei der Skalierung. Ob man Solarthermie oder Photovoltaik zum Aufbereiten des Warmwassers einsetzt, ist bezüglich Wirkungsgrad etwa gleich, deshalb haben wir PV angenommen.» Die anderen Erneuerbaren werden für den Ausbau nicht berücksichtigt, denn ihr Potenzial ist entweder fast ausgeschöpft (Wasserkraft) oder zu klein (Windkraft, Geothermie).

Gemäss der Studie würden 70% der global verbauten Flächen für die Transition ausreichen – bei einem Energy Return on Investment (EROI) von 20. Dieser für die Schweiz hohe Wert lässt sich gemäss Harald Desing für Dachinstallationen im Sonnengürtel, in dem 90% der Menschheit leben, gut erreichen. In Gegenden, die vom Äquator weiter entfernt sind, würde es sich auch lohnen, Fassaden zu nutzen, denn da ist der Winterertrag meist höher als beim Dach. Für Marcel Gauch, der im gleichen Team wie Harald Desing und Rolf Widmer forscht, ist dies ein willkommener Ausgleich von Sommer und Winter: «Die ästhetischen Bedenken zählen heute nicht mehr, denn man kann kaum unterscheiden, ob eine Hausverkleidung Strom produziert oder nicht».

terrains non construits ne doivent donc pas être utilisés pour remplacer toutes les sources d'énergie fossiles par du PV. Les terres désertiques pourraient être mises à contribution en cas de besoin, mais il est possible de s'en passer. De plus, en construisant ces installations sur les maisons, l'électricité est produite là où elle est utilisée. Le besoin en nouvelles lignes électriques est ainsi minimisé.

Les simulations tiennent compte de toutes les énergies renouvelables existantes telles que l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et la géothermie, mais tous les investissements futurs sont exclusivement dédiés au développement du photovoltaïque – avec le rendement disponible aujourd'hui. Rolf Widmer justifie cette décision: «Avec le PV, on est du bon côté pour l'expansion. Que l'on utilise le solaire thermique ou le photovoltaïque pour la préparation de l'eau chaude, le rendement est à peu près le même, c'est pourquoi nous avons opté pour le PV.» Les autres énergies renouvelables ne sont pas prises en compte pour l'expansion, car leur potentiel est soit presque épuisé (énergie hydraulique), soit trop faible (énergie éolienne, géothermie).

Selon l'étude, 70% des surfaces construites au niveau mondial suffiraient pour la transition – avec un taux de retour énergétique (EROI, energy return on investment) de 20. Selon Harald Desing, cette valeur, élevée pour la Suisse, peut être facilement atteinte pour les installations sur les toits réalisées dans la ceinture du soleil (Sun Belt), où



### Transitionsgeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit, mit der der Anteil der Erneuerbaren wächst, hängt auch davon ab, wie viel fossile Energie für ihren Aufbau eingesetzt wird:  $\alpha$  ist der Anteil der solaren Stromproduktion, der während der Transition fossilen Output ersetzt.  $\beta$  ist der fossile Investitionsfaktor, d. h. der Anteil der fossilen Förderung, der zusätzlich zum bestehenden fossilen Output nur für den Aufbau der Erneuerbaren investiert wird. Sobald die gestrichelte Linie mit dem gewünschten Überschussfaktor  $\gamma$  erreicht ist, ist die Transition abgeschlossen.

### Vitesses de transition

La vitesse à laquelle la part des renouvelables croît dépend aussi de la quantité d'énergie fossile utilisée pour leur implantation:  $\alpha$  est la part de la production d'électricité solaire qui remplace les émissions fossiles pendant la transition.  $\beta$  est le facteur d'investissement fossile, c'est-à-dire la part d'énergie fossile investie, en plus de la production fossile existante, uniquement pour le développement des renouvelables. La transition est terminée dès que la ligne en pointillés correspondant au facteur excédentaire  $\gamma$  souhaité est atteinte.



1

#### 1 Harald Desing

«Wir haben jetzt schon viel zu viel CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. Ohne negative Emissionen wird es nicht gehen.»

« Nous avons déjà beaucoup trop de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Sans émissions négatives, il ne sera pas possible d'atteindre les objectifs fixés. »



2

#### 2 Rolf Widmer

«Die Frage Nummer eins für eine schnelle Transition ist: Was können wir bei Solarpanels weglassen?»

« La question numéro un pour une transition rapide est la suivante: à quoi pouvons-nous renoncer dans les panneaux solaires ? »



3

#### 3 Marcel Gauch

«Die Fossilen müssen möglichst schnell durch erneuerbare Energiequellen ersetzt und später damit auch CCS betrieben werden.»

« Les énergies fossiles doivent être remplacées le plus rapidement possible par des sources d'énergie renouvelables et, plus tard, ces dernières devront également être utilisées pour le CCS. »

## Wie schnell geht es?

In den Simulationen wurde untersucht, wie schnell die Transition möglich wäre, wenn der PV-Zubau durch den Einsatz von fossilen Energieträgern beschleunigt würde. Das Überraschende: Ein «Aufdrehen» der Fossilen ausschliesslich zum Beschleunigen des Aufbaus der erneuerbaren Infrastruktur wirkt sich fürs Klima positiv aus. Wenn die ungenutzte Kapazität der fossilen Quellen für den Ausbau der PV-Installation genutzt würde, wäre die Transition in weniger als einem Jahrzehnt möglich und man könnte die fossilen Quellen abstellen. Der kumulierte CO<sub>2</sub>-Ausstoss ist dabei geringer als für eine graduelle Transition, welche den fossilen Output nur gering erhöht.

Eine so schnelle Umstellung des Energiesystems schien bisher nicht salonfähig. Dadurch, dass der Ukrainekrieg die geopolitischen Abhängigkeiten drastisch aufgezeigt hat, könnte es aber nun zum Umdenken kommen. Harald Desing betont: «Wenn man es schafft, vom Druckmittel der fossilen Energien wegzukommen – und die Studie zeigt, dass es zumindest energetisch in sehr kurzer Zeit geht –, würde man sich geopolitisch unabhängig machen. Nun sind die Leute plötzlich für einen schnellen Ausstieg empfänglich.»

## Die Kohle zurück in die Erde stecken

Will man das Klima in einen langfristig stabilen Bereich bringen, genügt aber eine Umstellung auf Erneuerbare alleine nicht, denn bereits heute liegt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre bei 420 ppm – statt bei 350 ppm, einem Wert, der als relativ ungefährlich betrachtet wird. Rolf Widmer: «Die grosse Aufgabe ist die Stabilisierung der Atmosphäre. Wir müssen den Kohlenstoff in die Erde bringen. Wenn man annimmt, dass man 350 ppm erreichen muss, damit die Arktis noch Sommer eis hat, müssen wir 1500 Gt aufräumen.»

Diesem Thema ist Paper [2] gewidmet. Es modelliert das Energiesystem mit drei Maschinen: einer «fossil engine», einer «solar engine» und einem «carbon scrubber» (Carbon Capture and Storage, CCS, und Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS – im Folgenden vereinfachend als CCS bezeichnet). Mit dem Modell wollen die Forscher herausfinden, mit welcher PV-Kapazität man möglichst schnell zu einer akzeptablen CO<sub>2</sub>-Konzentration kommt.

CCS-Technologien, die die nötigen Mengen bewältigen können, gibt es noch nicht. Zur weltweit grössten CCS-Anlage sagt Rolf Widmer: «Das, was ClimeWorks jetzt in Island macht, das CO<sub>2</sub> in einem Olivin oder Basalt zu speichern, kann man mal mit einer Megatonne probieren, das ist nicht einmal Proof-of-Concept. Die benötigten CCS-Infrastrukturen würden die Grösse der heutigen Öl- und Gasindustrie erreichen. Das baut man nicht über Nacht.» Klar ist, dass eine Reduktion des Energiebedarfs die Aufräumaktion beschleunigt und dazu beiträgt, dass die angepeilten 350 ppm – bei entsprechendem Ausbau der CCS-Infrastruktur – bis 2100 erreicht werden könnten.

Marcel Gauch schildert die Capture-Problematik so: «Man versucht, das stark verdünnte CO<sub>2</sub> wieder einzusammeln. Diese unglaubliche Verdünnung sorgt dafür, dass der

vit 90 % de l'humanité. Dans les régions plus éloignées de l'équateur, il vaudrait également la peine d'utiliser les façades, car le rendement hivernal y est généralement plus élevé que sur les toits. Pour Marcel Gauch, qui travaille dans le même groupe de recherche que Harald Desing et Rolf Widmer, il s'agit là d'un équilibre bienvenu entre l'été et l'hiver. «Les préoccupations esthétiques ne comptent plus aujourd'hui, car on peut à peine distinguer si un revêtement de maison produit de l'électricité ou non», ajoute-t-il.

## Combien de temps cela prendra-t-il?

Les simulations ont examiné à quelle vitesse la transition serait possible si la progression du PV était accélérée par l'utilisation de sources d'énergie fossiles. Ce qui est surprenant: une «montée en puissance» de la consommation d'énergies fossiles exclusivement pour accélérer la construction de l'infrastructure renouvelable exerce un effet positif sur le climat. Si la capacité inutilisée des sources fossiles était mise à contribution pour développer le photovoltaïque, la transition serait possible en moins d'une décennie et il serait alors possible de renoncer à l'exploitation des sources fossiles. Dans ce scénario, les émissions de CO<sub>2</sub> cumulées sont moins importantes que pour une transition progressive, qui n'augmente que faiblement les émissions d'origine fossile.

Une transition aussi rapide du système énergétique ne semblait pas envisageable jusqu'à présent. Mais la guerre en Ukraine ayant radicalement mis en évidence les dépendances géopolitiques, il se pourrait que les choses changent. Harald Desing souligne: «Si l'on parvient à s'affranchir de la pression liée aux énergies fossiles – et l'étude montre que cela serait réalisable au moins sur le plan énergétique – on deviendrait géopolitiquement indépendant. Désormais, les gens sont soudain plus sensibles à un abandon rapide des énergies fossiles.»

## Remettre le charbon dans la terre

Mais si l'on veut ramener le climat dans une zone stable à long terme, il ne suffit pas uniquement de passer aux énergies renouvelables, car aujourd'hui déjà, la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est de 420 ppm – au lieu des 350 ppm considérés comme une valeur relativement inoffensive. Rolf Widmer précise: «La principale tâche consiste à stabiliser l'atmosphère. Nous devons remettre le carbone dans la terre. Si l'on présume qu'il faut atteindre 350 ppm pour que l'Arctique ait encore de la glace en été, nous devons en capturer 1500 Gt.»

L'article [2] est consacré à ce sujet. Il modélise le système énergétique avec trois machines: un «fossil engine», un «solar engine» et un «carbon scrubber» (carbon capture and storage, CCS, et direct air carbon capture and storage, DACCS – ces deux technologies de séquestration du carbone sont dénommées toutes deux CCS dans la suite du texte). Avec ce modèle, les chercheurs veulent déterminer la capacité PV qui permettrait d'atteindre le plus rapidement possible une concentration de CO<sub>2</sub> acceptable.

Il n'existe pas encore de technologies CCS capables de gérer les quantités nécessaires. À propos de la plus grande installation CCS du monde, Rolf Widmer déclare: «Ce que

Energiebedarf, um es wieder rauszuholen, extrem hoch ist. Zudem ist es schwierig, an Informationen zum Energiebedarf von CCS zu kommen. Meistens sieht man nur einen Teilbereich, z. B. die Lüfter. Die Energie, um die Filter zu erhitzen, wird oft nicht erwähnt.» Das Publikum nimmt CCS als grosse Option wahr, Investoren stellen Firmen bereitwillig Geld zur Verfügung, aber man kann noch nicht abschätzen, ob es energetisch überhaupt aufgeht.»

Das Fazit der Studie: Es ist in diesem Jahrhundert aus energetischer Sicht zwar möglich, das Energiesystem weltweit nachhaltig zu machen und die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 350 ppm zu senken. Dies erfordert aber eine Reduktion des Durchschnittsverbrauchs pro Person auf rund 600 W, also rund einem Zehntel des Schweizer Verbrauchs, bis die gewünschte CO<sub>2</sub>-Konzentration erreicht ist. Sobald das Klima stabil ist, kann der Verbrauch wieder erhöht werden. Aber in dieser Transitionszeit ist eine Verbrauchsreduktion zentral. Man hat so mehr Energie für den Aufbau von PV zur Verfügung und beschleunigt so die Transition.

Zudem ist es wichtig, in der Transitionsphase möglichst wenig Energiespeicher zu bauen, denn sowohl ihr Bau als auch ihr verlustbehafteter Betrieb erfordern Energie. Verbrauchsmuster, die sich nach dem Tages- und Jahresgang der erneuerbaren Energiequellen richten, sollten etabliert werden, um den Bedarf an Speicher zu verringern. West-Ost- bzw. Nord-Süd-Übertragungsleitungen können den Tages- und Jahresgang ebenfalls ausgleichen und somit Speicher ersetzen.

### Die Sonnenblumengesellschaft als Optimum

Problematisch ist bei Energiespeichern, dass sie viel Energie brauchen – sei es für ihren Bau (Akkus, Speicherseen) oder für ihren Betrieb (schlechter Wirkungsgrad der Umwandlungsprozesse bei synthetischen Treibstoffen). Deshalb untersucht Paper [3] die energetische Situation der drei Speicher Lithium-Ionen-Batterien, Pumpspeicherkraftwerke und synthetischem Methan. Es kommt zum Schluss, dass eine Anpassung des Verbrauchsmusters an die erneuerbare Erzeugung die Transition erheblich beschleunigen kann und damit die kumulierten Emissionen reduziert. Daher sollten grosse Lasten so genutzt werden, dass der Nacht- und Winterverbrauch minimiert werden.

Marcel Gauch sagt: «Als Volkswirtschaft kann man es sich nicht leisten, auf eine weniger effiziente Technologie zu setzen, nur um weiterhin den Handel mit einem Stoff [wie synthetischen Treibstoffen] betreiben zu können. Die Gesellschaft muss sich gut überlegen, ob sie sich diese Ineffizienz leisten möchte.»

### Ein lenkendes Verteilnetz

Die Frage, wie denn künftig Angebot und Nachfrage bei einem hohen Anteil an fluktuierendem Solarstrom abgeglichen werden sollen, wird in den Papers nicht behandelt. Im Gespräch schlagen die Forscher ein Verteilnetz mit Packetized Energy Management (PEM) als einen möglichen Ansatz vor – ein Stromnetz, das ähnlich wie das Internet funktioniert. Dabei senden geeignete Verbraucher wie

ClimeWorks fait actuellement en Islande, stocker du CO<sub>2</sub> dans de l'olivine ou du basalte, même en y parvenant avec une mégatonne, cela ne constituerait pas encore une preuve de concept. Les infrastructures CCS nécessaires atteindraient la taille de l'industrie pétrolière et gazière actuelle. Cela ne se construit pas du jour au lendemain.» Ce qui est clair, c'est qu'une réduction de la demande d'énergie accélère le « nettoyage » et contribue à ce que les 350 ppm visés – avec une extension correspondante de l'infrastructure CCS – puissent être atteints d'ici 2100.

Marcel Gauch décrit le problème de la capture de la manière suivante: « On essaie de récupérer le CO<sub>2</sub> très dilué. Cette dilution extrême a pour conséquence que l'énergie utilisée est extrêmement élevée. De plus, il est difficile d'obtenir des informations sur les besoins énergétiques du CCS. La plupart du temps, seule une partie est connue, par exemple les ventilateurs. L'énergie pour chauffer les filtres n'est souvent pas mentionnée. » Le public perçoit le CCS comme une option de taille, les investisseurs mettent volontiers de l'argent à la disposition des entreprises, mais il n'est pas encore possible d'estimer si cela sera rentable du point de vue énergétique. »

La conclusion de l'étude: au cours de ce siècle, il est certes possible, d'un point de vue énergétique, de rendre le système énergétique durable à l'échelle mondiale et de réduire la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> en dessous de 350 ppm. Mais cela impliquerait une réduction de la consommation moyenne par personne à environ 600 W, soit environ un dixième de la consommation suisse, jusqu'à ce que la concentration de CO<sub>2</sub> souhaitée soit atteinte. Dès que le climat sera stable, la consommation pourra à nouveau être augmentée. Mais pendant cette période de transition, une réduction de la consommation est essentielle. Cela permet de disposer de plus d'énergie pour développer le PV et d'accélérer ainsi la transition.

De plus, il est important de construire le moins de systèmes de stockage d'énergie possible pendant la phase de transition, car autant leur construction que leur exploitation incluant des pertes nécessitent de l'énergie. Des modèles de consommation s'alignant sur les variations journalières et annuelles des sources d'énergie renouvelables devraient être établis afin de réduire les besoins en matière de stockage. Les lignes de transport ouest-est ou nord-sud peuvent également équilibrer ces variations, et remplacer ainsi des systèmes de stockage.

### Une société tournesol comme optimum

Le problème des accumulateurs d'énergie réside dans le fait qu'ils nécessitent beaucoup d'énergie, que ce soit pour leur construction (batteries, lacs de retenue), ou pour leur exploitation (faible rendement des processus de conversion des carburants synthétiques). C'est pourquoi le troisième article [3] examine la situation énergétique des trois types de stockage suivants: les batteries lithium-ion, les centrales de pompage-turbinage et le méthane synthétique. Il arrive à la conclusion qu'une adaptation du modèle de consommation à la production renouvelable peut accélérer considérablement la transition et réduire

Boiler oder Elektrofahrzeuge Anfragen ans Netz, ob eine gewisse Leistung für eine gewisse Zeit zu einem bestimmten Preis zur Verfügung steht. Je kritischer der Bedarf, desto häufiger werden die Anfragen geschickt. Der PEM-Koordinator berücksichtigt die Anfragen nach dem Zufallsprinzip so, dass die Gesamtlast in Echtzeit definiert wird, ohne das Verhalten einzelner Verbraucher verändern zu müssen. Sollte die Kommunikation bei gewissen Geräten einmal gestört sein, dass ihre Anfragen den Koordinator nicht erreichen, können solche Geräte auf ein allgemeines Signal des Koordinators warten, das ein Einschalten erlaubt.

Drei Aspekte werden dabei berücksichtigt: der Netzstatus, der Energiemarktzustand und der Zustand der Pakete. Je mehr Geräte an diesem System teilnehmen, desto genauer kann die Last der Erzeugung folgen. Das Packetized Energy Management würde Spitzen abschwächen, Lastprofile anpassen, die Nutzung erneuerbarer Energien optimieren und den Speicherbedarf minimieren.

### Kurz und schmerzvoll - aber möglich

Die vorgestellten Papers präsentieren ein Bild, bei dem mit existierenden Technologien eine weltweite Transition zu einem nachhaltigen Energiesystem aus energetischer Sicht möglich ist. Dafür ist aber eine Bereitschaft nötig, in dieser Übergangszeit den Verbrauch drastisch zu drosseln, um die Transition rasch abzuschliessen und um sich dann auf das «Aufräumen» der Atmosphäre machen zu können. Viele Fragen sind noch offen, aber das präsentierte Bild ist ein guter Ausgangspunkt für detailliertere Untersuchungen, für Effizienzoptimierungen bei der Photovoltaik – sowohl bei der Modulkonstruktion als auch beim Wirkungsgrad – und für Weichenstellungen bezüglich möglichst effizienter Energietechnologien, beispielsweise in der Mobilität durch die Wahl von Elektrizität statt synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff.

#### Referenzen | Références

- [1] Harald Desing, Rolf Widmer, «Reducing climate risks with fast and complete energy transitions: applying the precautionary principle to the Paris agreement», *Environ. Res. Lett.* 16, 2021.
- [2] Harald Desing, Andreas Gerber, Roland Hirschler, Patrick Wäger, Rolf Widmer, «The 3-machines energy transition model: exploring the energy frontiers for restoring a habitable climate», Empa, bisher unveröffentlicht, [www.doi.org/10.31219/osf.io/ftcwt8](http://www.doi.org/10.31219/osf.io/ftcwt8)
- [3] Harald Desing, Rolf Widmer, «How much energy storage can we afford? On the need for a sunflower society, aligning demand with renewable supply», Empa. Das Paper wurde durch das Journal «Biophysical Economics and Sustainability» akzeptiert und wird dort in Kürze erscheinen.



#### Autor | Auteur

**Radomir Novotný** ist Chefredaktor Electrosuisse |  
**Radomir Novotný** est rédacteur en chef Electrosuisse.  
 → [Electrosuisse, 8320 Fehraltorf](mailto:Electrosuisse, 8320 Fehraltorf)  
 → [radomir.novotny@electrosuisse.ch](mailto:radomir.novotny@electrosuisse.ch)

ainsi les émissions cumulées. Par conséquent, les charges importantes devraient être utilisées de manière à minimiser les consommations nocturnes et hivernales.

Marcel Gauch déclare: « En tant qu'économie nationale, on ne peut pas se permettre de miser sur une technologie moins efficace juste pour continuer à pouvoir compter sur le commerce d'une substance [comme les carburants synthétiques]. La société doit bien réfléchir et se demander si elle veut se permettre cette inefficacité. »

### Un réseau de distribution chef d'orchestre

La question consistant à savoir comment équilibrer à l'avenir l'offre et la demande avec une part élevée d'énergie solaire fluctuante n'est pas abordée dans ces articles. Lors de cet entretien, les chercheurs ont proposé un réseau de distribution avec une gestion de l'énergie «paquetisée» (PEM, packetized energy management) en tant qu'approche possible – un réseau électrique qui fonctionne de manière similaire à Internet. Dans ce cas de figure, des consommateurs appropriés tels que les chauffe-eau ou les véhicules électriques envoient des demandes au réseau pour savoir si une certaine puissance est disponible pendant un certain temps à un certain prix. Plus la demande est critique, plus les demandes sont envoyées fréquemment. Le coordinateur PEM prend en compte les demandes de manière aléatoire, de telle sorte que la charge totale soit définie en temps réel, sans avoir à modifier le comportement des consommateurs individuels. Si la communication de certains appareils devait être une fois perturbée et que leurs demandes n'atteignent pas le coordinateur, ces appareils peuvent attendre un signal général du coordinateur qui leur permet de s'allumer.

Trois aspects sont alors pris en compte: l'état du réseau, l'état du marché de l'énergie et l'état des paquets. Plus il y a d'appareils participant à ce système, plus la charge peut suivre la production avec précision. La gestion de l'énergie «paquetisée» atténuerait les pics, adapterait les profils de charge, optimiserait l'utilisation des énergies renouvelables et minimiserait les besoins en matière de stockage.

### Court et douloureux - mais possible

Les articles mentionnés plus haut présentent un tableau dans lequel une transition globale vers un système énergétique durable est possible du point de vue énergétique avec les technologies existantes. Mais pour cela, il faut être prêt à réduire drastiquement la consommation pendant cette période de transition, afin d'achever rapidement la transition et de pouvoir ensuite se lancer dans le «nettoyage» de l'atmosphère. De nombreuses questions restent ouvertes, mais le tableau présenté constitue un bon point de départ pour des études plus détaillées, pour l'optimisation de l'efficacité du photovoltaïque – tant au niveau de la construction des modules que du rendement – et pour montrer les voies à suivre en ce qui concerne les technologies énergétiques les plus efficaces possible, par exemple dans le secteur de la mobilité en choisissant l'électricité plutôt que les carburants synthétiques ou l'hydrogène.