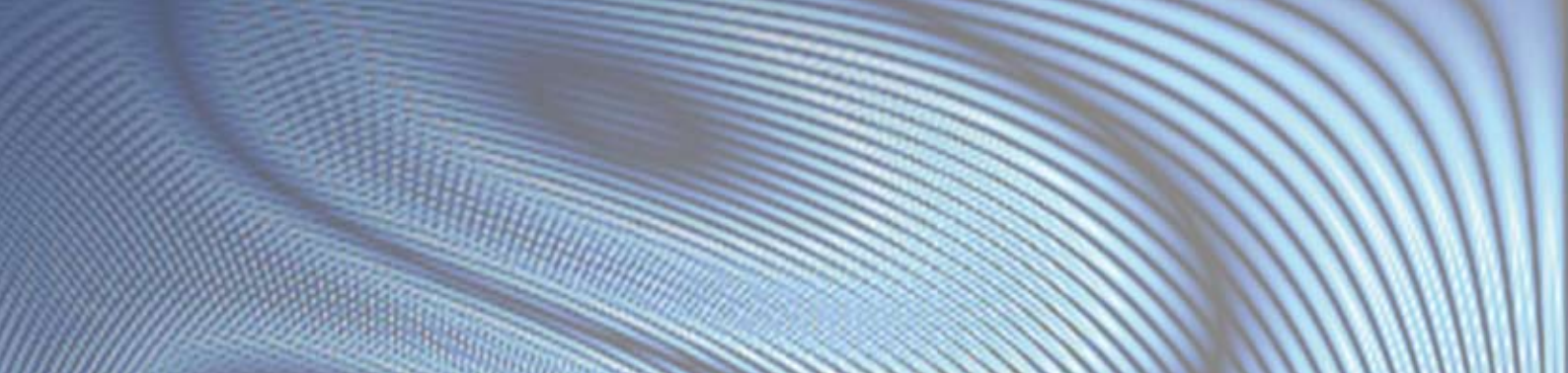




# Erneuerbare Energien Herausforderungen auf dem Weg zur Vollversorgung

**SATW**

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften  
Académie suisse des sciences techniques  
Accademia svizzera delle scienze tecniche  
Swiss Academy of Engineering Sciences



### Wissenschaft und Technik zum Wohle der Gesellschaft

Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) vereinigt Personen, Institutionen und Fachgesellschaften, die in den technischen Wissenschaften und deren Anwendung tätig sind. Sie fördert die Technik zum Wohle der Gesellschaft und stärkt das Verständnis der Gesellschaft für die Technik. Die SATW ist politisch neutral und nicht kommerziell orientiert. Zurzeit hat sie rund 240 Einzelmitglieder und 60 Mitgliedsgesellschaften.

In verschiedenen Fachbereichen setzt die Akademie Arbeitsgruppen ein. Diese erarbeiten Studien sowie Empfehlungen und führen interaktive Veranstaltungen durch. Die SATW unterhält ständige Fachkommissionen auf den Gebieten angewandte Biowissenschaften, Energie, Informations- und Kommunikationstechnologie, Nanotechnologie sowie Ethik und Technik.

# Inhaltsverzeichnis

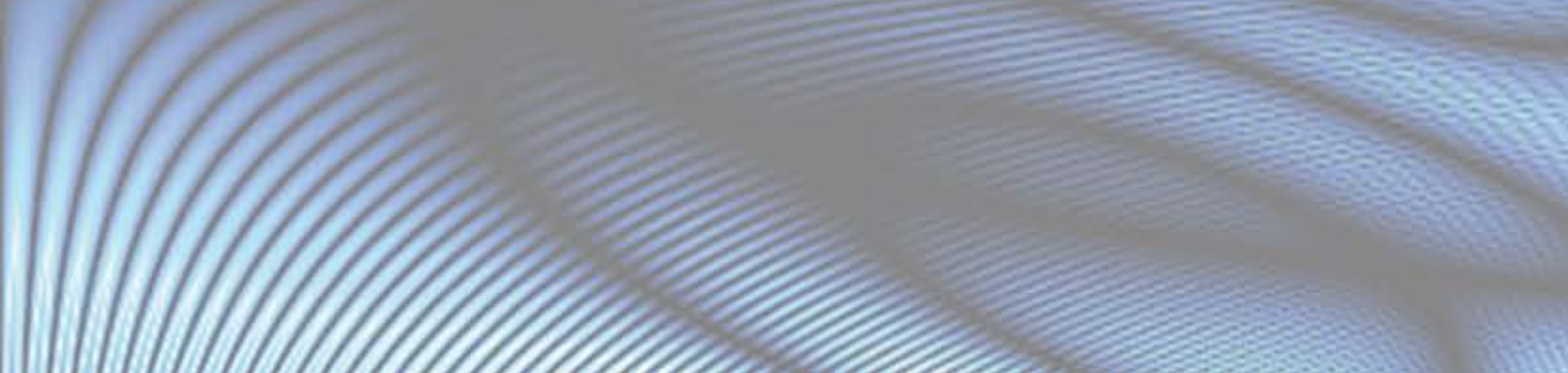
4	<b>Zusammenfassung/Résumé</b>
7	<b>Vorwort</b>
8	<b>Ein Wandel tut not</b>
11	<b>Ein langer Weg</b>
13	<b>Erneuerbare Energien fördern</b>
16	<b>Die richtigen Rahmenbedingungen schaffen</b>
20	<b>Verkraftbare Mehrkosten</b>
21	<b>Anspruchsvolle Integration</b>
23	<b>Anforderungen an Energiewirtschaft steigen</b>
24	<b>Umwelt- und Klimaauswirkungen</b>
25	<b>Gesellschaftliche Aspekte</b>
26	<b>Importe sind kurzfristig kaum realistisch</b>
28	<b>Den langen Weg in Angriff nehmen</b>
30	<b>Weiterführende Literatur</b>
31	<b>Impressum</b>

# Zusammenfassung

Langfristig ist es unausweichlich, dass die weltweite Energieversorgung weitgehend oder gar vollständig mit erneuerbaren Energiequellen sichergestellt wird. Die fossilen Energieträger sind begrenzt und müssen aus Gründen des Klimaschutzes abgelöst werden. Der Ausbau der erneuerbaren Energien muss daher zügig vorangetrieben werden. Der bevorstehende Umbau der Energieversorgung kann aus heutiger Sicht frühestens gegen Ende dieses Jahrhunderts vollendet werden. Dieser Umbau ist umso schwieriger, je höher der Energieverbrauch ist. Die Steigerung der Energie- und Materialeffizienz und die Entwicklung der erneuerbaren Energien sind dabei komplementäre Stossrichtungen, die gleichwertig verfolgt werden müssen.

Für die Wirtschaft und die Gesellschaft ist es entscheidend, dass stets genügend Energie zur Verfügung steht. Grundsätzlich ist das Potenzial der erneuerbaren Energien auch in der Schweiz genügend gross, um den Bedarf zu decken. Die Energiedichte dieser Energiequellen ist allerdings meist gering; dazu kommt, dass insbesondere die Sonnen- und Windenergie unregelmässig anfallen. Die Potenziale der verschiedenen Energiequellen lassen erwarten, dass ein überwiegender Teil des künftigen Energieangebots als (fluktuierender) Solar- und Windstrom vorliegen wird. Dies erfordert anspruchsvolle Anpassungen bei der Energiebereitstellung. Technische Verbesserungen sind jedoch nur eine notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung für die erfolgreiche Marktdurchsetzung der neuen erneuerbaren Energien. Die Finanzierung von Forschungsprojekten bis hin zu Demonstrationsanlagen muss daher verstärkt werden.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien kann nicht dem Markt überlassen werden, sondern es braucht auch staatliche Unterstützung. Wegen der hohen Investitionen erfordert der Aufbau von Energiesystemen viel Zeit und setzt einen Anpassungsprozess voraus, der von den Marktkräften alleine nicht rechtzeitig eingeleitet würde. Die Investoren (Energiewirtschaft, Hausbesitzer und Industrie) und der Staat müssen dabei bedeutende Mittel bereitstellen. Damit kostspielige Fehlentwicklungen vermieden werden können, braucht es eine wirtschaftlich und ökologisch optimale Förderstrategie. Dazu müssen die Förderinstrumente (Subventionen, Einspeisevergütungen, Quoten, Anwendungsvorschriften etc.) periodisch auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden.

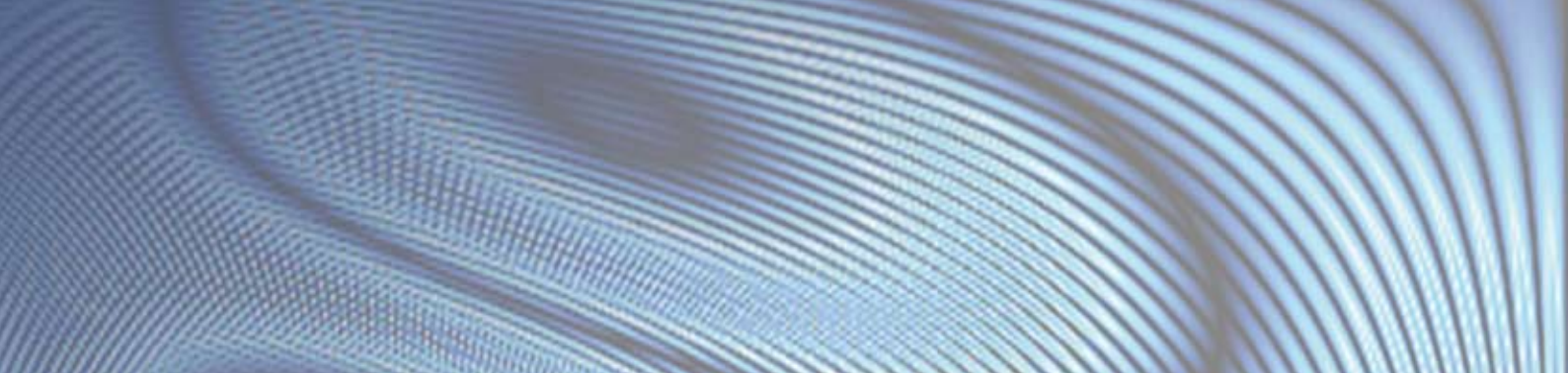


Mit Ausnahme von grossen Windparks und Wasserkraftwerken wird erneuerbare Energie heute überwiegend dezentral erzeugt und dient primär der lokalen und regionalen Versorgung. Ein ins Gewicht fallender kontinentaler oder gar globaler Markt existiert noch nicht. Ein nennenswerter Import von Strom aus erneuerbaren Energien sowie von Biotreibstoffen ist bestenfalls in einigen Jahrzehnten zu erwarten.

Die Entwicklung der erneuerbaren Energien ist nicht nur eine technische und wirtschaftliche Aufgabe, sondern auch eine gesellschaftliche. Ohne aktive Beteiligung der Bevölkerung ist der Weg zur Vollversorgung mit erneuerbaren Energien nicht gangbar. Die Bürger entscheiden als Stimmende, Konsumenten und Investoren über die Energiezukunft. Erforderlich sind glaubwürdige und nachvollziehbare Informationen, welche die Möglichkeiten, aber auch die Probleme aufzeigen.

## Résumé

A long terme, il est inéluctable que l'approvisionnement mondial en énergie soit assuré dans une large mesure ou même intégralement par des sources d'énergie renouvelables. Les agents énergétiques fossiles sont limités et il nous faut en assurer la relève afin de protéger le climat. Le développement des énergies renouvelables doit donc être mené sans perte de temps. En l'état actuel des connaissances, le remaniement de l'approvisionnement énergétique qui nous attend peut être mené à bien au plus tôt vers la fin du siècle en cours. Ce remaniement est d'autant plus difficile que la consommation d'énergie est élevée. L'augmentation de l'efficacité énergétique et matérielle et le développement des énergies renouvelables forment dans ce contexte des axes d'action complémentaires, auxquels il s'agit d'accorder une importance équivalente.



Pour l'économie et la société, il est décisif que l'énergie soit disponible en quantité suffisante à tout moment. En principe, en Suisse aussi le potentiel des énergies renouvelables est assez important pour couvrir les besoins. Cependant, la densité d'énergie de ces sources d'énergie est le plus souvent faible; par ailleurs, les énergies solaire et éolienne en particulier sont de production irrégulière. Les potentiels des différentes sources d'énergie laissent présager qu'une part prédominante de l'offre énergétique future prendra la forme d'électricité (fluctuante) solaire et éolienne. Ceci nécessite des ajustements ambitieux de la mise à disposition d'énergie. Cependant, les améliorations techniques ne sont qu'une condition nécessaire mais non suffisante pour que les nouvelles énergies renouvelables s'imposent sur le marché avec succès. Il faut donc renforcer le financement de projets de recherche, jusqu'à des installations de démonstration.

On ne peut pas s'en remettre au marché pour le développement des énergies renouvelables; celui-ci requiert aussi un soutien public. En raison des importants investissements requis, la mise en place de systèmes énergétiques nécessite beaucoup de temps et suppose un processus d'adaptation qui ne serait pas enclenché à temps par les seules forces du marché. Dans ce contexte, les investisseurs (secteur de l'énergie, propriétaires immobiliers et industrie) et l'Etat doivent mettre à disposition des moyens considérables. Afin d'éviter des erreurs de développement coûteuses, il nous faut une stratégie d'encouragement optimale tant au niveau économique qu'écologique. A cet effet, les instruments d'encouragement (subventions, rétributions de l'injection, quotas, prescriptions d'utilisation etc.) doivent périodiquement être contrôlés quant à leur efficacité.

A l'exception de parcs éoliens et de centrales hydroélectriques d'envergure, l'énergie renouvelable est aujourd'hui majoritairement produite de manière décentralisée et assure principalement un approvisionnement local et régional. Il n'existe pas encore de marché conséquent à l'échelle continentale ou globale. Au mieux, ce n'est que dans quelques décennies qu'on peut s'attendre à des importations notables d'électricité issue d'énergies renouvelables ainsi que de biocarburants.

Le développement des énergies renouvelables est une tâche non seulement technique et économique, mais aussi sociale. En l'absence d'une participation active de la population, le chemin vers un plein approvisionnement en provenance d'énergies renouvelables n'est pas praticable. Les citoyens décident de l'avenir énergétique en tant que votants, consommateurs et investisseurs. Il est nécessaire de proposer des informations crédibles et compréhensibles, qui indiquent les possibilités, mais aussi les problèmes.



# Vorwort

Wie die Menschen in den meisten Industriestaaten haben auch wir uns daran gewöhnt, Leistung von Motoren aller Art beziehen zu können, wann immer wir es wollen und dazu noch zu günstigen Preisen. Die Folge davon ist eine weltweite Kopplung: eine Zunahme im Bruttoinlandprodukt scheint immer von einer Erhöhung des Energieverbrauchs begleitet zu werden. Dieses ungezügelte Wachstum ist nicht ohne Folgen.

Drei grosse Themen beschäftigen auch die Schweiz: der Anspruch auf stetig steigenden Energieverbrauch, der Schutz des Klimas mit der Notwendigkeit, fossile Brennstoffe zu ersetzen, und die Versorgungssicherheit mit nutzbarer Energie. Dies sind scheinbar sich widersprechende Anforderungen an unser Energiesystem. Sie sind aber alle von Bedeutung und müssen berücksichtigt werden. Das System muss darum zwingend – und unter Zeitdruck – umgebaut werden. Es ist wichtig, auf die Vollversorgung aus erneuerbaren Energiequellen hin zu arbeiten.

Auch mit den stärksten Anstrengungen wird die Umstellung auf hinreichende Versorgung mit erneuerbarer Energie aber viele Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Dabei müssen enorme technische und finanzielle Leistungen erbracht werden. Es gilt damit deshalb, Energieszenarien zu beschreiben, die längerfristig als üblich ausgerichtet sind. Die Umstellung ist eine gewaltige Herausforderung und kommt einer neuen industriellen Revolution gleich.

Dieser Bericht ist ein Beitrag zur Früherkennung der technischen und wirtschaftlichen Herausforderung bei der Entwicklung der erneuerbaren Energien. Er konkretisiert damit einige wichtige Punkte der «Road Map erneuerbare Energien Schweiz», welche die SATW 2007 herausgegeben hat. Weitergehende Fragen untersuchen die Akademien der Wissenschaften Schweiz im Projekt «Stromversorgung Schweiz» und die SATW Energiekommission in mehreren Projekten.

**Ulrich W. Suter**  
Vizepräsident SATW

# Ein Wandel tut not

Die erneuerbaren Energien spielen heute noch eine untergeordnete Rolle. Dies muss sich in den kommenden Jahrzehnten grundlegend ändern, ist doch die intensive Nutzung von fossilen Energieträgern längerfristig nicht mehr tragbar.

Die Energieversorgung, wie wir sie heute kennen, wird in den kommenden Jahrzehnten einen tiefgreifenden Wandel erleben. Der weltweit steigende Energiebedarf, der absehbare Rückgang der Erdöl- und Erdgasproduktion sowie der fortschreitende Klimawandel erfordern neue Ansätze für unsere Energieversorgung. Ziel muss sein, erneuerbare Energien soweit als möglich zu nutzen und damit das Energiesystem auf eine langfristig verträgliche Basis zu stellen.

Die vorliegende SATW Schrift zeigt auf, ob und wenn ja in welchem Zeitraum eine Energieversorgung realisiert werden kann, die sich fast vollständig auf erneuerbare Quellen abstützt, und welche Herausforderungen dabei zu bewältigen sind. Dazu sind die Potenziale der erneuerbaren Energiequellen ebenso zu betrachten wie Fragen der Klima- und Umweltverträglichkeit, der Materialverfügbarkeit, der Wirtschaftlichkeit, der Einbindung in das bestehende Energiesystem und der gesellschaftlichen Akzeptanz. Ziel ist es, die wesentlichen Aspekte anzusprechen, die beim Aufbau einer solchen Energieversorgung berücksichtigt werden müssen, nicht jedoch alle denkbaren Optionen für eine langfristige Energieversorgung darzulegen. Die erneuerbaren Energien sind aus heutiger Sicht zentrale Elemente der künftigen Energieversorgung, aber sie sind nicht die einzig möglichen langfristigen Energieressourcen.

Auch wer künftig vollständig auf fossile und nukleare Energie verzichten will, muss anerkennen, dass unsere Gesellschaft zumindest während einer Übergangszeit auf konventionelle Energien angewiesen bleibt. Gleichzeitig ist unbestritten, dass Erdöl und Erdgas nur noch für eine verhältnismässig kurze Zeit, von schätzungsweise einigen Jahrzehnten zur Verfügung stehen werden (siehe dazu auch die SATW Schrift «Erdölknappheit und Mobilität in der Schweiz»). Unterschiedliche Ansichten bestehen nur darüber, wann die Maxima der Förderung erreicht werden und wie schnell sich danach die Produktion rückläufig entwickeln wird.

Im Gegensatz zu Erdöl und Erdgas ist Kohle noch in grossen Mengen vorhanden. Ihre Verbrennung ist aber aus Sicht des Klimaschutzes nur verantwortbar, wenn das dabei entstehende CO<sub>2</sub> abgeschieden und dauerhaft gelagert werden kann. Falls diese so genannte CO<sub>2</sub>-Sequestrierung hinreichend sicher realisiert werden kann, ist Kohle ein valabler Energieträger, bis die erneuerbaren Energien die globale Energieversorgung umfassend sicherstellen können – unterstützt von der Kernenergie in Ländern, in denen sie akzeptiert wird.

Erneuerbare Energien werden für die Energieversorgung immer wichtiger. Langfristig müssen sie – je nach politischen Präferenzen – den überwiegenden Teil des Energieangebots leisten oder gar den Bedarf vollständig decken. Ohne erneuerbare Energien ist kein nachhaltiges Energiesystem denkbar. Wie schnell sich die Energieversorgung hin zu erneuerbaren Energien entwickeln wird, hängt letztlich von der Entwicklung des Energiebedarfs und von der Verfügbarkeit der konventionellen Energien ab – und damit auch von der gewählten Energie- und Klimapolitik.





Heute leisten die erneuerbaren Energien allerdings erst einen bescheidenen Beitrag zur Energieversorgung: Im Jahr 2008 trugen sie 12,9 Prozent zur Deckung des weltweiten Primärenergiebedarfs bei (IEA Key World Energy Statistics 2010). Beim Endenergiebedarf lag ihr Anteil 2008 bei 19 Prozent. Davon entfielen 13 Prozent auf die Nutzung der traditionellen Biomasse, 3,9 Prozent auf die Stromerzeugung (davon 3,2 Prozent auf die Wasserkraft), 1,4 Prozent auf die Warmwassererzeugung und Heizung sowie 0,6 Prozent auf Biotreibstoffe (REN21 Renewables 2010 Global Status Report).

In der EU-27 betrug der Anteil der Erneuerbaren am Primärenergieverbrauch 2006 7 Prozent; er stieg 2008 auf 8,2 Prozent (EurObserv'ER 2008). Das für 2010 formulierte Ziel, erneuerbare Energien müssten einen Beitrag von 12 Prozent an den Gesamtverbrauch leisten, wird gemäss einer Mitteilung der EU-Kommission vom Januar

2007 nicht erreicht. Gleiches gilt auch für den verlangten Anteil der erneuerbaren Quellen von 21 Prozent an der Stromerzeugung; dieser belief sich 2008 auf 16,4 Prozent (EurObserv'ER 2009). Für das Jahr 2020 hat sich die EU im Jahr 2007 das bindende Ziel von einem Anteil von 20 Prozent der erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch gesetzt. Es wird trotz des in vielen Ländern zu verzeichnenden Booms bei der Windkraft und der Photovoltaik nur schwierig zu erfüllen sein.

In der Schweiz belief sich der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch im Jahr 2009 auf 18,9 Prozent (s. Abb. 1). Die Wasserkraft erbrachte dabei mit 53,3 Prozent der Stromerzeugung den Hauptanteil. Die im Stromversorgungsgesetz verlangte zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 5400 GWh bis 2030 entspricht 8,7 Prozent des schweizerischen Landesverbrauchs 2009. Der Beitrag der Photovoltaik und des Winds, die längerfristig

**Total 877 560 TJ**

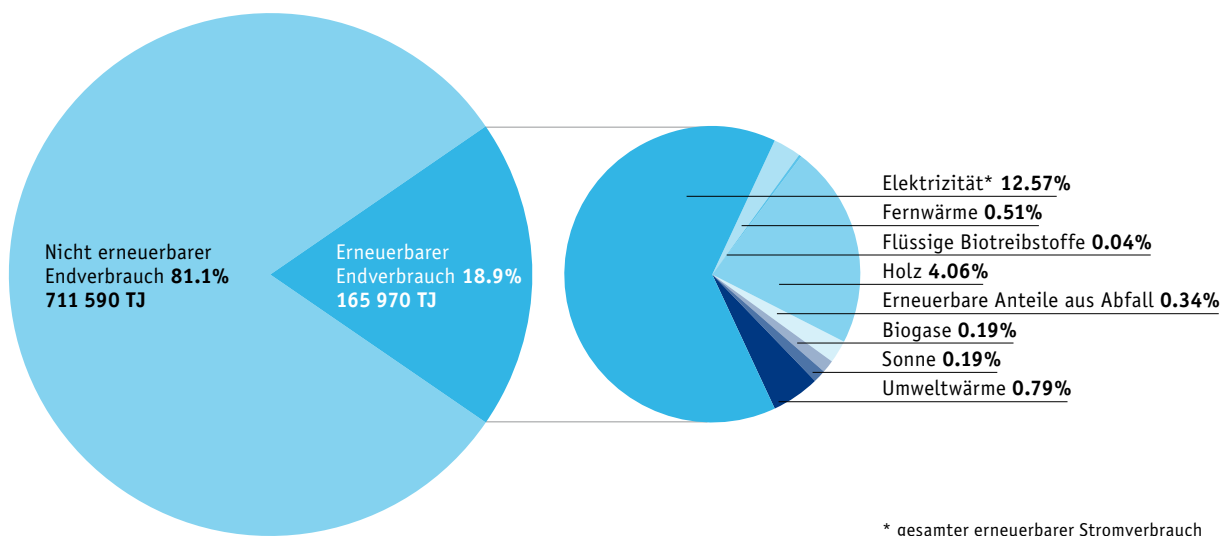


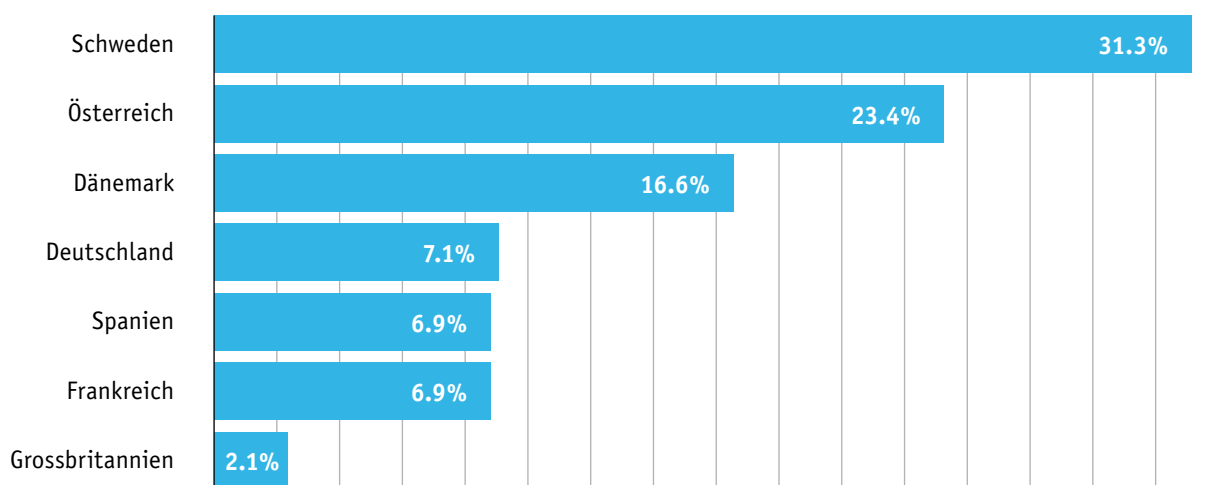
Abb. 1: Endverbrauch der erneuerbaren Energien in der Schweiz im Jahr 2009 (BFE: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2009)



wesentliche Säulen des Energieangebots sein werden, betrug 2008 erst 1,17 Promille des Landesverbrauchs.

Die erneuerbaren Energien erfahren seit einigen Jahren eine erfreuliche Entwicklung. In einzelnen Ländern ist der Beitrag der erneuerbaren Energien bereits sehr beachtlich (s. Tab. 1). Die Investitionen steigen rasant an, staatliche Massnahmen wie Subventionen und Einspeisevergütungen führen in Europa vor allem zu stark wachsenden Wind- und Sonnenenergiemärkten. In den USA werden Biotreibstoffe stark subventioniert, leider mit fragwürdigen Auswirkungen auf die Umwelt und die Nahrungsmittelproduktion. Auch in den Entwicklungs- und Schwellenländern wächst die Nutzung der erneuerbaren Energien. So ist beispielsweise China der weitaus grösste Solarwärmenutzer. Brasilien erhöht laufend die Ethanolproduktion aus Zuckerrohr.

Die Ausgangslage für die erneuerbaren Energien ist naturgemäss sehr unterschiedlich. Wo günstig nutzbare Wasserkraft vorhanden ist, wie etwa in der Schweiz, ist die hydraulische Stromerzeugung die bedeutendste erneuerbare Energiequelle. In anderen Gegenden sind es die Windenergie oder die Biomasse. Neben der Wasserkraft, die in verschiedenen Ländern ausgebaut werden kann, werden vor allem die neuen erneuerbaren Energien – dazu gehören Wind, Sonnenenergie, neue Nutzungsformen der Biomasse sowie Erdwärme – eine immer wichtigere Rolle spielen. Da aber nicht nur die Produktion aus erneuerbaren Energien um beachtliche Beträge zunimmt, sondern auch der weltweite Energieverbrauch, wird es mindestens bis in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts dauern, bis die erneuerbaren Energien die fossilen Energien als dominierende Säule der Energieversorgung ablösen.



Tab. 1: Anteile aller erneuerbarer Energiequellen am Primärenergieverbrauch in ausserwählten EU-Staaten im Jahr 2007 (EurObserver'ER2008)

## Ein langer Weg

Der Energiebedarf der Menschheit kann grundsätzlich mit erneuerbaren Energien gedeckt werden. Der Umbau der heutigen Energieversorgung hin zu einem System, das sich hauptsächlich auf erneuerbare Energien abstützt, wird aber etliche Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

Der steigende Beitrag der erneuerbaren Energien an die Energieversorgung und die ambitionösen Zielsetzungen für die nächsten Jahrzehnte dürfen nicht darüber hinweg täuschen, dass wir erst am Anfang eines langen Prozesses stehen. Welche Technologien und staatlichen Massnahmen in den nächsten Jahrzehnten zum Tragen kommen können, ist im Prinzip recht gut bekannt. Daraus lässt sich abschätzen, wie die künftige Entwicklung aussehen könnte. Ein Beispiel dafür ist die SATW Schrift «Road Map Erneuerbare Energien Schweiz». Sie zeigt auf, dass auch in der Schweiz die Strom-, Wärme- und Treibstoffproduktion aus erneuerbaren Energieträgern deutlich gesteigert werden kann.

Wie hoch der Anteil der Erneuerbaren an der Versorgung sein wird, hängt von der Entwicklung der gesamten Energienachfrage ab. Bis jetzt war in den meisten Ländern der Anstieg des Verbrauchs grösser als die Zunahme der Produktion aus erneuerbaren Energiequellen. Dies darf auf Dauer nicht so bleiben. Eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien wird nur wirtschaftlich tragbar sein, wenn die Energie wesentlich effizienter genutzt wird. Die Förderung der erneuerbaren Energien und die rationelle Energienutzung müssen daher Hand in Hand gehen: Sie sind nicht konkurrierende energiepolitische Stossrichtungen, sondern beide gleichermaßen notwendig.

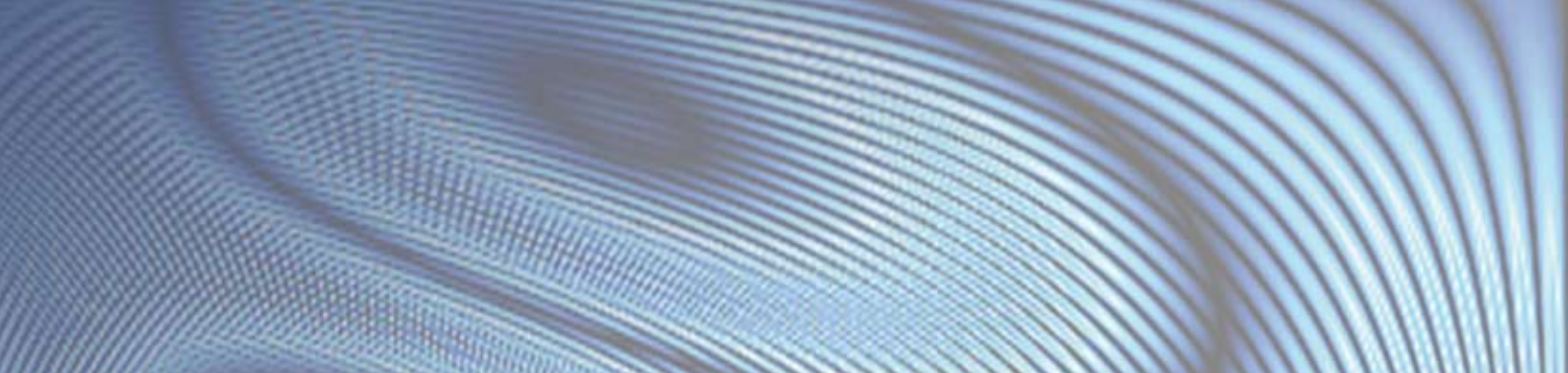
Dabei gilt es im Auge zu behalten, dass der bevorstehende Umbau flexibel angegangen werden muss. Was heute als richtige Massnahme erscheint, muss es später nicht mehr sein. Es sind insbesondere zwei Faktoren, welche darüber bestimmen, ob sich die Erneuerbaren auf dem Markt durchsetzen werden: Zum Einen die Kos-

tensenkungen, welche durch den technischen Fortschritt ermöglicht werden, sowie die Kostenentwicklung bei den benötigten Materialien und den Konkurrenzenergien; zum Anderen die Weiterentwicklung der Energieinfrastruktur. Beide Faktoren sind heute nur in der Tendenz erfassbar.

Es gibt aber Fakten, die gegeben sind: 1. Die meisten erneuerbaren Energien haben eine geringe Energiedichte; dies führt zu einem hohen spezifischen Investitionsaufwand. 2. Bei der Wind- und Sonnenenergie fällt der Energieertrag unregelmässig an. Dies erfordert nicht zu unterschätzende Reserveenergien sowie einen erheblichen Aufwand für Speicherung und Regulierung. 3. Positiv sind die vergleichsweise tiefen Betriebskosten der meisten erneuerbaren Energien. Andere wesentliche Elemente werden sich im Verlauf der Zeit stark wandeln, nicht zuletzt dank der technischen Entwicklung. Die Umsetzung neuer Technologien am Markt erfordert aber Zeit; technische Verbesserungen führen nicht unmittelbar zu hohen Zuwächsen bei der Energiebereitstellung.

### Potenziale der erneuerbaren Energien

Die längerfristig entscheidende Feststellung ist, dass das theoretische (physikalische) Potenzial der erneuerbaren Energien praktisch unbegrenzt ist. Die jährlich auf die Erdoberfläche treffende Sonnenenergie ist etwa 10 000 Mal grösser als der heutige Jahresweltenergieverbrauch. Sehr hohe theoretische Potenziale weisen auch die Windkraft und die Geothermie auf. Aufgrund der vorhandenen Ressourcen ist es deshalb grundsätzlich möglich, die Menschheit langfristig vollständig mit erneuerbaren Energien zu versorgen. Auch für die



Schweiz gilt, dass das theoretische Potenzial der erneuerbaren Energien um mehr als einen Faktor 100 grösser ist als der aktuelle Energieverbrauch.

Für die Energieversorgung eines Landes ist jedoch nicht das theoretische, sondern das technisch-wirtschaftliche Potenzial massgebend. Das technische Potenzial gibt zunächst an, in welchem Umfang sich eine erneuerbare Energiequelle technisch nutzen lässt, welche Energiemenge also durch eine bestimmte Technologie bereitgestellt werden könnte. Eingeschränkt wird das technische Potenzial durch das wirtschaftliche, das ökologische (keine permanente Beeinträchtigung des Lebensraumes) und das soziale Potenzial (Akzeptanz bei der Bevölkerung). Für das technische Potenzial sind Aspekte wie verfügbare Flächen, Wirkungsgrade und Erträge pro Quadratmeter zu einem bestimmten Zeitpunkt relevant. Beispielsweise werden bei der Photovoltaik in der Regel nur die Gebäudeoberflächen berücksichtigt, die sich für die Nutzung eignen. Würde man auch andere Flächen einbeziehen, wäre das technische Potenzial höher. Bei der Windenergie werden die geeigneten Standorte auf Grund einer Reihe von Kriterien wie Ausschluss von Schutzgebieten und Wald, Mindestabstände zu Siedlungen und einzelnen Gebäuden und mittlere jährliche Windgeschwindigkeit festgelegt.

Das technisch-wirtschaftliche Potenzial einer Technologie beschreibt sodann, wie viel Energie bei einem gegebenen Preisniveau der Konkurrenzenergien wirtschaftlich bereitgestellt werden kann. Ein Mass sind die vermiedenen Kosten der konventionellen Energiebereitstellung. Bei der Elektrizität wäre die Vergleichsgrösse der Beschaffungspreis von gleichwertigem Strom. Bei der gegenwärtigen Preissituation sind die neuen erneuerbaren Energien in der Regel unwirtschaftlich. Die Wirtschaftlichkeitsgrenze kann jedoch durch staatliche Fördermassnahmen wie Subventionen und Einspeisevergütungen entscheidend verschoben werden. Das tech-

nisch-wirtschaftliche Potenzial ergibt sich deshalb nicht allein aus den Preisen der Konkurrenzenergien und den Kosten der betrachteten erneuerbaren Energien, sondern in ebensolcher Masse aus der Höhe der staatlichen Fördervorgaben.

Die technischen Potenziale der Stromerzeugung durch neue erneuerbare Energie wurden vom Paul Scherrer Institut (PSI) eingehend ermittelt (Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten, Mai 2005). Potenzialannahmen finden sich auch in den Energieperspektiven des Bundesamtes für Energie (BFE 2007). Die Frage ist, wie gross der Versorgungsanteil sein kann, wenn diese Potenziale auch ausgeschöpft werden. Hier gibt die «Road Map Erneuerbare Energien Schweiz» (SATW 2006) eine Antwort: Sie zeigt, dass selbst dann, wenn die beachtlichen ausgewiesenen Potenziale bis 2070 vollständig ausgeschöpft werden, die erneuerbaren Energien lediglich einen Drittel des heutigen Energieverbrauchs decken können. Höhere Anteile wären denkbar, wenn die politischen Weichen in Richtung verstärkter Energieeffizienz und Förderung erneuerbarer Energien gestellt würden. Wächst der Energiekonsum jedoch weiterhin so stark an wie heute, würde der Zubau der erneuerbaren Energien gemäss Road Map nicht einmal zur Deckung des Mehrverbrauchs genügen. Die erneuerbaren Energien werden also umso eher zur tragenden Säule der Energieversorgung, je geringer der Gesamtenergieverbrauch ist.

# Erneuerbare Energien fördern

Die meisten neuen erneuerbaren Energien sind heute wirtschaftlich noch nicht konkurrenzfähig. Mit einer breiten Palette von Förderinstrumenten versucht der Staat, diesen Energien zum Durchbruch zu verhelfen.

Die verschiedenen erneuerbaren Energien – Wasserkraft, Sonnenenergie, Windenergie, Erdwärme, Biomasse – sind technisch und wirtschaftlich auf einem unterschiedlichen Stand. Alle sind sie heute fähig, in der Praxis Energiedienstleistungen zur Verfügung zu stellen, aber mit unterschiedlicher Wirtschaftlichkeit. Da für die künftige Energieversorgung alle Energiequellen benötigt werden, müssen einerseits die bereits heute genutzten erneuerbaren Energiequellen erhalten und ausgebaut werden, andererseits aber auch neue Technologien zur Marktreife gebracht werden. Dabei müssen die stark divergierenden Energiebereitstellungskosten längerfristig angeglichen werden.

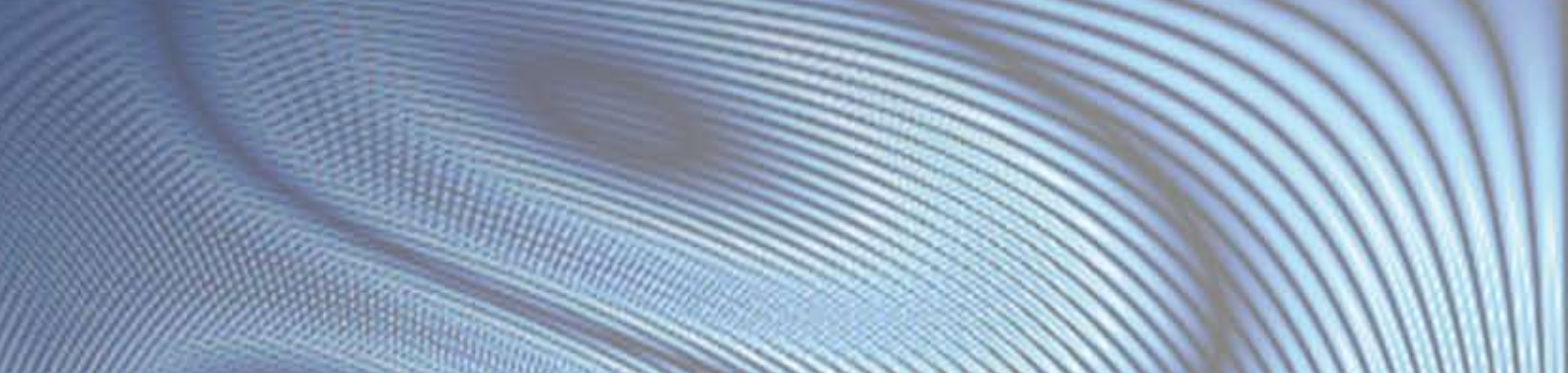
Die Wirtschaftlichkeit einer bestimmten Energie hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Wirtschaftlichkeit ist nicht eine absolute Grösse, sondern bemisst sich am Preisniveau der konventionellen Energien. Sie variiert auch je nach angestrebter Energiedienstleistung. Sonnenenergie ist heute in der Regel noch unwirtschaftlich, aber zur Bereitstellung von Wärme und Strom in Inselanwendungen in gewissen Fällen bereits wirtschaftlich. Erdwärme rechnet sich für Heizung und Warmwasserbereitung, aber noch nicht für die Stromerzeugung.

Die Wirtschaftlichkeit und damit die Konkurrenzfähigkeit verbessern sich dank technischem Fortschritt und Mengenausweitung («economy of scale»). Zudem werden die Preise der konventionellen Konkurrenzenergien tendenziell ansteigen. Vorübergehende konjunkturbedingte Preissenkungen ändern nichts an dieser grundsätzlichen Entwicklung; ein Rückgang auf das Preisniveau der 1990er-Jahre ist sehr unwahrscheinlich. Die Preisschere zwischen erneuerbaren und konventionellen Energien verengt sich deshalb.

Die neuen erneuerbaren Energien sind allerdings materialintensiver als die konventionellen und damit stärker von höheren Materialpreisen betroffen. So sind beispielsweise die Investitionskosten für Windkraftanlagen in den letzten Jahren gestiegen. Alleine schon aus Kostengründen ist es daher wichtig, eine hohe Materialeffizienz anzustreben. Grundsätzlich sind die Materialien, die zum Aufbau einer weitgehend erneuerbaren Energieversorgung benötigt werden, vorhanden. Es lässt sich aber nicht ausschliessen, dass es bei bestimmten Technologien längerfristig zu Engpässen bei der Materialversorgung kommen könnte.

Die neuen erneuerbaren Energien unterliegen wie andere Produkte Marktzyklen. Die hohe Nachfrage nach Photovoltaikanlagen führte in den letzten Jahren zu steigenden Preisen der Paneele. Erst seit kurzem können auf Grund der wirtschaftlichen Entwicklung und des technischen Fortschritts sinkende Preise beobachtet werden; neue Fabriken für Solarmodule und Technologien lassen in der nächsten Zeit weitere Preissenkungen erwarten. Auch die Preise für Solarwärmeanlagen erfahren derzeit kaum Senkungen, und die Holzpreise sind in den letzten Jahren gestiegen.

Die erneuerbaren Energien werden sich in den verschiedenen Anwendungsbereichen unterschiedlich schnell durchsetzen. Im Gebäudebereich kann davon ausgegangen werden, dass nach der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes – die allerdings Jahrzehnte erfordern wird – der verbleibende Wärmebedarf weitgehend durch erneuerbare Energien (Sonne, Holz, Umweltwärme) bereitgestellt werden kann. Schwieriger ist die Substitution bei der Mobilität, wo in gewissen Bereichen flüssige



Treibstoffe kaum ersetzt werden können. Elektrofahrzeuge dürften künftig zwar vermehrt eingesetzt werden; damit sie sich wirklich durchsetzen, sind aber noch wesentliche Fortschritte nötig, vor allem bei den Batterien. Die Industrie schliesslich kann bei einer erneuerbaren Vollversorgung ihren Bedarf an Prozessenergie im Niedrigwärmebereich durch Sonnen- oder Umweltwärme decken. Für den Kraft- und den Hochtemperaturbedarf wird sie Elektrizität oder synthetisch hergestelltes Gas nutzen.

Die Entwicklung hin zu einer vollständigen Versorgung mit erneuerbaren Energien ist anspruchsvoll und erfordert grosse Zuwachsraten. Nötig sind Forschung und Entwicklung, die in kostensenkende Innovationen münden. Zur raschen Marktdurchsetzung sind Fördermassnahmen unentbehrlich. Das Prinzip «economy of scale» ist auch für die erneuerbaren Energien eine wichtige Triebfeder: Marktvolumen, Anlagegrössen und Materialaufwand beeinflussen die Kosten der produzierten Energie wesentlich.

### Angepasste Förderinstrumente

Um erneuerbare Energien zielgerichtet zu fördern, müssen je nach Anwendungsbereich angepasste Instrumente eingesetzt werden. Heute wird die Förderung durch die politischen Gegebenheiten bestimmt und sie orientiert sich nicht am Ziel einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung.

Die Situation bei den verschiedenen erneuerbaren Energien sieht wie folgt aus:

- Die Wasserkraft ist eine bewährte, sehr wirtschaftliche und vielfach genutzte Technologie. Aufgrund von technischen Neuerungen steigen die Wirkungsgrade weiterhin an, aber nur um geringe Beträge.

Für die Wasserkraftnutzung sind vor allem die staatlichen Rahmenbedingungen und die Akzeptanz der bestehenden und insbesondere der geplanten Anlagen massgebend. Obwohl Politik und Öffentlichkeit sich scheinbar einig sind, dass die Wasserkraft weiter ausgebaut, mindestens aber erhalten werden soll, stossen Neubauten und Erweiterungen regelmässig auf Widerstände. Dies trifft vermehrt auch für Kleinwasserkraftwerke zu. Die bevorstehende Erhöhung der Restwassermengen wird sich negativ auf die Nutzung der Wasserkraft auswirken. Es genügt nicht, auf Gesetzesebene quantitative Ausbauziele zu formulieren, es müssen dazu auch die erforderlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

- Holz wird immer noch weniger genutzt, als es möglich wäre, obwohl Holz heute gegenüber Heizöl konkurrenzfähig ist. In unseren Wäldern wächst zurzeit mehr Holz nach, als für die verschiedenen Verwendungszwecke (Bau, Industrie, Gewerbe und Energie) benötigt wird. Es steht demnach ein zusätzliches Potenzial für die energetische Nutzung zur Verfügung. Dazu muss aber die Holzgewinnung vorangetrieben werden. Auch technische Anstrengungen sind erforderlich, um den Verbrennungsprozess zu optimieren und die Umwandlung von Holz in flüssige und gasförmige Brenn- und Treibstoffe zu ermöglichen.
- Die energetische Nutzung der übrigen Biomasse benötigt zusätzliche Forschung und Entwicklung, aber auch finanzielle Förderung durch Subventionen (Wärme) oder Einspeisevergütungen (Strom). Die Förderung muss auf Grund von ökologischen und sozialen Kriterien (keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion) erfolgen.
- Die Solarwärme ist heute in verschiedenen Bereichen wirtschaftlich. Steigen die Preise von Erdöl und Erdgas weiter, wird sie mehr und mehr konkur-



renzfähig. Damit die Sonnenwärme einen gewichtigen Beitrag zur Substitution der fossilen Heizenergie liefern kann, muss sie durch Baubeiträge und einfache, flexible Bewilligungsverfahren gefördert werden.

- Die Photovoltaik liegt mit Abstand am unteren Ende der Wirtschaftlichkeitsskala; ihr Kostenniveau muss noch wesentlich gesenkt werden, wenn sie in grosser Masse zur Energieversorgung beitragen soll. Erforderlich sind Forschung und Entwicklung sowie eine kostendeckende Einspeisevergütung, welche eine Industrialisierung der Solarstromerzeugung ermöglicht.
- Die Produktionskosten des Windstroms dürften in unserem Land auch künftig über jenen der traditionellen Stromerzeugung liegen. Die technisch reife Windstromproduktion wird durch die Einspeisevergütung gefördert.
- Die Nutzung der Umgebungs- und oberflächennahen Erdwärme durch Wärmepumpen ist in unserem Land weit entwickelt und muss dank ihrer Konkurrenzfähigkeit nicht mehr staatlich gefördert werden.
- Die Zukunft der Stromerzeugung aus Geothermie ist zu klären. Bevor neue Grossprojekte angegangen werden, müssen die Risiken bezüglich Wirtschaftlichkeit und Erdbeben ermittelt werden. Förderinstrumente sind die Risikodeckung bei Tiefbohrungen und die Einspeisevergütungen für den erzeugten Strom. Da der Wirkungsgrad der Stromproduktion aufgrund der in realistischen Bohrtiefen verhältnismässig geringen Temperaturen bescheiden bleiben wird, stellt sich – auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit – vor allem die Frage der Wärmenutzung.

Zweck der verschiedenen Förderinstrumente ist es, die Kostendifferenz zu den traditionellen Energien aus- oder mindestens anzugleichen. Neben den erwähnten Instrumenten könnten auch Quotenvorgaben, Nutzungsvorschriften und baurechtliche Anreize einen wichtigen Beitrag leisten. Die Höhe der Kostendifferenz ist am besten bei der Stromerzeugung dokumentiert, und zwar durch die Einspeisevergütungen in der Stromversorgungsverordnung. Diese Einspeisevergütungen zeigen, welche wirtschaftlichen Verbesserungen für die einzelnen erneuerbaren Energien aus heutiger Sicht in den nächsten 20 Jahren noch erreicht werden müssen.

Die heute eingesetzten Förderinstrumente, vor allem die Einspeisevergütungen, entfalten eine hohe Anschlagwirkung. Damit können die Marktvolumina massgeblich erhöht und die Kosten vor allem dank der «economy of scale» und dem dadurch möglichen zusätzlichen technischen Fortschritt gesenkt werden. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass die einzelnen Anlagebesitzer nicht unangemessene Gewinne erzielen, denn die Mehrkosten der Förderung sind von den Stromkonsumenten zu berappen. Allenfalls könnten Auktionen das Risiko von Fehlallokationen mindern. Zudem sollte die Einspeisevergütung auch die Qualität der erzeugten Energie (Möglichkeit zur bedarfsgerechten Erzeugung) und die Kosten der Netzintegration berücksichtigen.

Die Förderung der erneuerbaren Energien ist weiterzuführen, ihre Effektivität jedoch periodisch zu evaluieren. Wichtig sind Kontinuität und Vorhersehbarkeit. Der Umstand, dass die neuen Energietechnologien einsatzfähig sind, darf nicht dazu führen, dass Forschung und Entwicklung vernachlässigt werden. Wesentliche technische Fortschritte sind notwendig.

# Die richtigen Rahmenbedingungen schaffen

Damit sich die erneuerbaren Energien auf dem Markt durchsetzen können, reicht es nicht, die technische Entwicklung zu fördern. Der Staat muss auch die Rahmenbedingungen so anpassen, dass Marktverzerrungen behoben werden.

Die Förderung der erneuerbaren Energien muss in zwei Schritten erfolgen: In einem ersten Schritt sind adäquate Rahmenbedingungen zu schaffen. Dazu gehören insbesondere der Abbau von Behinderungen (etwa Bestimmungen in Baugesetzen) sowie die Beseitigung von Subventionierungen und nicht berücksichtigten externen Effekten bei den konventionellen Energien. Dabei geht es um eine wichtige Akzentverschiebung. Bisher ging es primär darum, die technische Entwicklung zu fördern. Nun ist zunehmend die Marktdurchdringung sicherzustellen. Alle erneuerbaren Energien müssen die Chance haben, sich ihren Platz im Energiesystem entsprechend ihrer ökonomischen, technischen und ökologischen Potenziale zu erarbeiten.

Genügt dieser erste Schritt nicht, braucht es als zweiten Schritt eine gezielte Förderung. Dazu müssen die bisherigen Instrumente (Forschung und Entwicklung, Ausbildung und Information, Subventionen, Einspeisevergütungen usw.) optimiert werden. Wichtig ist, nicht nur die Angebotsseite im Auge zu behalten, sondern auch die Nachfrageseite. Eine Marktdurchdringung erfordert Lernprozesse und Innovationen auf beiden Seiten des Marktes und von allen Akteuren. Sie kann nicht alleine mit Massnahmen der direkten Förderung erreicht werden, sondern bedarf der Unterstützung durch die Marktkräfte.

Der Förderung kommt eine grosse volkswirtschaftliche und ordnungspolitische Bedeutung zu. Es ist zu verhindern, dass gut gemeinte, aber unzweckmässige Fördermassnahmen marktgerechte Innovationen stören und zu Fehlentwicklungen führen. Ebenso zu vermeiden ist ein naives Marktvertrauen, das Unvollkommenheiten des Marktes ignoriert und dazu führt, dass über die Rahmenbedingungen nicht nachgedacht wird.

## Der Markt richtet es nicht allein

Würde man den Ausbau der einzelnen Technologien dem Markt überlassen, also darauf vertrauen, dass sie sich durchsetzen, sobald ihre Wirtschaftlichkeit gegeben ist, würde dies zu volkswirtschaftlich suboptimalen Entwicklungen führen. Der Grund liegt im so genannten Marktversagen. Damit sind Situationen gemeint, in denen die Marktkräfte alleine nicht in der Lage sind, eine ökonomisch effiziente Lösung hervorzubringen. Die ökonomische Literatur nennt mehrere Gründe, warum der Markt beim Einsatz von neuen Energieerzeugungstechnologien versagt und die öffentliche Hand somit regulierend eingreifen muss (s. Tab. 2).

In die Kategorie «Marktversagen, Marktunvollkommenheiten» würden beispielsweise Energiemärkte fallen, in denen gesetzliche Bestimmungen den Marktzugang für neue Technologien erschweren, etwa durch restriktive Bedingungen für die Einspeisung von Strom ins Netz. Hohe Anfangsinvestitionen stellen ebenfalls Markthemmnisse dar. Sie verfälschen den Wettbewerb, wenn wegen





hohen Kapitalkosten und von Investoren verlangten kurzen Pay-Back-Fristen auf den Bau von grossen, möglicherweise effizienteren Produktionsanlagen verzichtet wird. Zwischen den einzelnen Markthemmnissen bestehen zudem Wechselwirkungen: Zum Beispiel führt fehlende Akzeptanz zu einem geringen Marktanteil einer Technologie, wodurch Kostendegressionen aufgrund von Skalenerträgen nicht realisiert werden. Markthemmnisse können die Verbreitung von erneuerbaren Energien bedeutend verlangsamen. In diesem Fall kann es volkswirtschaftlich sinnvoll sein, dass die öffentliche Hand handelt, bevor die gestiegenen Energiepreise die Durchsetzung neuer Technologien erzwingen.

Die erneuerbaren Energien müssen sich auf einem Markt behaupten, der durch vielfältige Markthemmnisse charakterisiert ist. Ohne eine Intervention der öffentlichen Hand werden sich die neuen Technologien nur langsam durchsetzen. Es ist somit sinnvoll und effizient, dass der Staat diese Technologien mit Förderinstrumenten und Anpassungen bei den Rahmenbedingungen unterstützt.

Kategorie	Markthemmnisse
Marktversagen, Marktunvollkommenheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoch regulierter Energiesektor</li> <li>• Informationslücken; asymmetrische Informationen</li> <li>• Erschwerter oder beschränkter Zugang zur Technologie</li> </ul>
Marktverzerrungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begünstigung (Subventionierung) ausgewählter Technologien</li> <li>• Nicht internalisierte externe Kosten</li> </ul>
Ökonomische und finanzielle Hemmnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Zugang zum Kapitalmarkt</li> <li>• Hohe Anfangsinvestitionen</li> <li>• Hohe Diskontraten</li> <li>• Lange Pay-Back-Perioden</li> <li>• Kleiner Marktanteil, fehlende Wirtschaftlichkeit</li> </ul>
Institutionelle Hemmnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlende Institutionen zur Informationsvermittlung</li> <li>• Unsicherheiten bezüglich Staatsinterventionen</li> </ul>

Tab. 2: Marktbarrieren und Markthemmnisse (in Anlehnung an Painuly, JP., (2001) Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis, Renewable Energy 24)



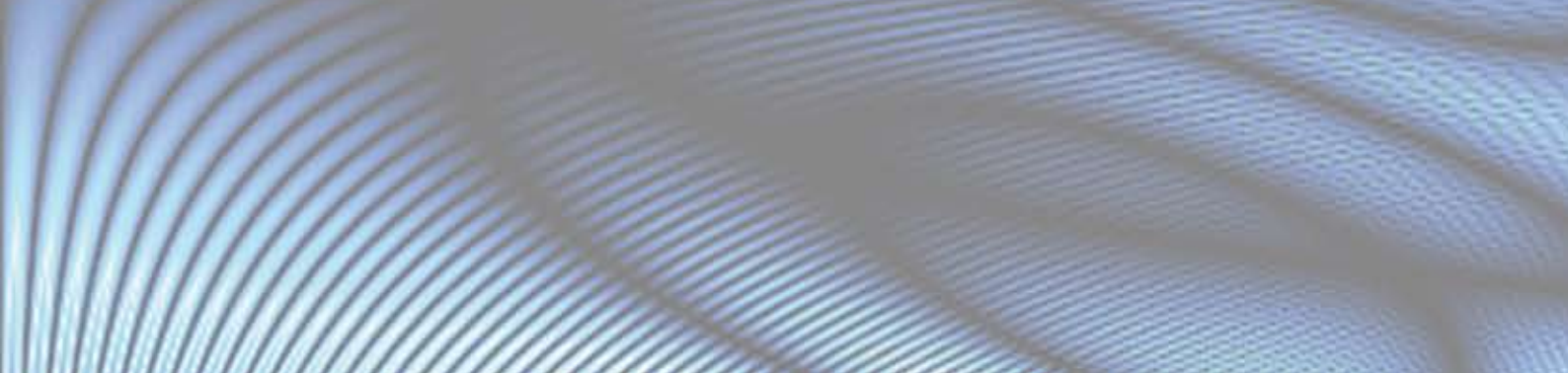
## Fehlentwicklungen vermeiden

Wenn der Staat regulierend in den Markt eingreift, sind Fehlentwicklungen mit hohen gesamtwirtschaftlichen Kosten nicht auszuschliessen. Diese Gefahr ist besonders gross, wenn eine Förderpraxis ohne vertiefte Überprüfung weitergeführt oder verstärkt wird. Die Unterstützung neuer erneuerbarer Energien wird voraussichtlich noch während längerer Zeit nötig sein. Es gilt wenn immer möglich zu verhindern, dass zu viele oder zu wenige Fördermittel zu früh oder zu spät, zu lange oder für die falschen Technologien eingesetzt werden. Eine starke Förderung und ein schneller Aufbau sind dabei ökonomisch nicht unbedingt sinnvoll. Insbesondere besteht die Gefahr, dass Technologien, die zwar technisch einsatzfähig, aber noch weit von der Wirtschaftlichkeit entfernt sind, gefördert werden, während kostengünstigere Verfahren, Massnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz oder weitergehende Produktinnovationen zu kurz kommen.

Die Optimierungsproblematik lässt sich am Beispiel Photovoltaik exemplarisch erläutern. Die Photovoltaik ist technisch zwar noch nicht voll ausgereift, wird aber bereits in erheblichem Umfang genutzt. Die steigende Nachfrage täuscht über die technischen und ökonomischen Realitäten hinweg. Sie ist die Folge von Markteingriffen durch Abnahmeverpflichtungen (Einspeisegesetzgebung), Subventionen und weiteren Massnahmen. Dies wurde vom schweizerischen Gesetzgeber erkannt, der im Stromversorgungsgesetz die Fördermittel für die Photovoltaik beschränkt hat. Wirtschaftlich vermag die Photovoltaik gegenüber anderen erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie und erst recht gegenüber der konventionellen Stromerzeugung, noch nicht zu bestehen. Gleichzeitig ist unbestritten, dass die Photovoltaik künftig eine grosse Bedeutung erlangen muss. Zwar fallen die Stromgestehungskosten seit längerem, doch sie müssen noch weiter sinken. Der Wirkungsgrad der Zellen muss erhöht, die Produktionskosten reduziert werden.

Dazu braucht es einerseits Forschung und Entwicklung, andererseits auch einen vermehrten Einsatz im Markt, um die industrielle Weiterentwicklung anzuregen. Das Beispiel zeigt den Widerstreit zwischen der Notwendigkeit, eine heute noch teure Technologie marktfähig zu machen, und der Erfordernis, die knappen finanziellen Mittel wirtschaftlich optimal einzusetzen.

Die Grundlagen für eine optimale Förderstrategie für erneuerbare Energien und analog auch für die rationelle Energienutzung zu erarbeiten, ist eine sehr anspruchsvolle Forschungsaufgabe, bei der Innovationsforschung, Ökonomie und Energiesystemforschung zusammenarbeiten müssen. Die Energiekommission der SATW erarbeitet gegenwärtig eine Förderstrategie für die Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen. Generell gilt, dass es nicht sinnvoll ist, in eine einzige Technologie zu investieren, wenn die Entwicklung der Kosten und Preise zu wenig genau bekannt ist, sondern den gesamten Mix an Technologien im Auge zu behalten. Die Förderinstrumente müssen dabei so eingesetzt werden, dass die neuen Technologien mit möglichst minimalem Förderaufwand zur richtigen Zeit, nämlich wenn sie marktfähig sind, im industriellen Massstab zur Verfügung stehen. Wie wichtig es aus volkswirtschaftlicher Sicht ist, diese Förderung zu optimieren, zeigt eine Untersuchung des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung (*Economic Impacts from the Promotion of Renewable Energy Technologies. The German Experience*, RWI 2009), die das deutsche Vorbild der schweizerischen kostendeckenden Einspeisevergütung kritisch hinterfragte. Beispielsweise ermittelte das RWI, dass 2008 jeder deutsche Arbeitsplatz in der Photovoltaik-Branche mit 175 000 Euro unterstützt wurde. Da die Förderinstrumente öffentliche finanzielle Ressourcen beanspruchen, stellt sich zudem die Frage, wie der Entwicklungs- und Umwandlungsprozess finanziert werden soll (zum Beispiel durch eine allgemeine Steuererhöhung, durch Umlagerungen



bei den Ausgaben der öffentlichen Hand oder durch Abgaben auf nicht-erneuerbare Energien) und wie sich dies volkswirtschaftlich auswirkt.

So wichtig die direkte Förderung als Starthilfe ist: Für die breite Marktdurchdringung ist sie nicht adäquat, obwohl politisch beliebt. Sie begünstigt nicht nur kostspielige Fehlentwicklungen, sondern trägt auch dazu bei, dass ein Regime mit immer intransparenteren Detailregulierungen entsteht. Erneuerbare Energien brauchen adäquate Rahmenbedingungen, damit sie sich durchsetzen können. Werden bei allen Energieträgern die externen Kosten über Abgaben, ökologische Steuern oder Zertifikate in die Preise eingeschlossen, sind die notwendigen Leitplanken für die Marktdurchdringung gesetzt.

In der heutigen politischen Diskussion werden zwei Stossrichtungen gleichwertig verfolgt: Einerseits setzt sich die Energiepolitik zum Ziel, dass neue, teilweise noch nicht voll entwickelte Energietechnologien einen möglichst hohen Beitrag zur Energieeffizienz oder zur Energieversorgung liefern. Andererseits strebt die Industriepolitik eine möglichst hohe inländische Wertschöpfung an. Es wird argumentiert, für die Schweiz sei es sinnvoll, sich an der Entwicklung zukunftsorientierter Technologien zu beteiligen. Für diese Position spricht nicht nur die bereits relativ

kurzfristig zu erzielende Wertschöpfung und die Schaffung von Arbeitsplätzen, sondern auch die Tatsache, dass die Schweiz eine wissensbasierte Volkswirtschaft ist. Es gibt also gute Gründe, die Entwicklung erneuerbarer Energien als strategischen Bereich zu bezeichnen. Eine energie- und industriepolitisch motivierte Förderpolitik operiert dabei im Spannungsfeld zwischen dem Wunsch, teilweise noch unwirtschaftliche Technologien möglichst schnell auf dem Markt einzuführen, und der Tatsache, dass die finanziellen Mittel beschränkt sind.

Der Aufbau einer Energieversorgung, die weitgehend auf erneuerbaren Energien beruht, ist eine sehr langfristige Aufgabe. Sie erfordert grosse Investitionen, die durch adäquate Rahmenbedingungen und optimierte Fördermassnahmen unterstützt werden müssen. Um wirtschaftliche Fehlentwicklungen zu vermeiden, ist eine wissenschaftlich fundierte Förderstrategie zu entwickeln. Diese stellt sicher, dass sich die erneuerbaren Energien entsprechend ihrer technischen, ökonomischen und ökologischen Potentiale durchsetzen können. Dabei sollen kostengünstige und materialeffiziente Technologien bevorzugt werden.

# Verkraftbare Mehrkosten

Die Energiepreise werden ansteigen. Die zusätzliche Belastung für Wirtschaft und Gesellschaft ist aber tragbar. Entscheidend ist die Erkenntnis, dass Energie ein wertvolles Gut ist, das es effizient zu nutzen gilt.

Neue erneuerbare Energie ist heute in der Regel noch teurer als konventionelle Energie; wäre dies nicht so, bräuhete es keine Förderung. Dieser relative Nachteil reduziert sich, wenn erstens die externen Effekte sowie die Knappheiten der konventionellen Energien in deren Preisen berücksichtigt und zweitens die Produktionskosten der erneuerbaren Energien gesenkt werden. Auch wenn die neuen Erneuerbaren mit der Zeit ihre Kostennachteile gegenüber den herkömmlichen Energien verlieren, führt der Umbau der Energieversorgung doch zu einer Verteuerung der Energie. Diese generelle Aussage gilt zumindest für eine überschaubare Periode von wenigen Jahrzehnten. Fortschritte in der Energieverwendung wie Effizienzerhöhungen, dienstleistungsorientierte Innovationen oder ein Produktdesign, das Komfort, Gesundheit, Ökologie und Wertbeständigkeit integriert, relativieren diese Aussage bereits heute, wie das Beispiel Passivhaus zeigt.

Der Anteil der Energiekosten am Bruttoinlandsprodukt betrug 1981 noch 8,4 Prozent, fiel bis 2002 auf 5,2 Prozent, stieg 2008 auf 6,0 Prozent und sank 2009 wieder auf 5,1 Prozent. Diese Schwankungen sind in erster Linie auf Energiepreisänderungen zurückzuführen. Die Energiekosten und ihr Anteil am Bruttoinlandsprodukt werden mit der wirtschaftlichen Erholung tendenziell steigen, dürften aber in einem verkraftbaren Rahmen bleiben. Die Preiserhöhungen wirken sich auf energieintensive Branchen stärker aus und setzen einen – durchaus erwünschten – Strukturwandel in Gang. Grundsätzlich ist ein international koordiniertes Vorgehen anzustreben, damit global tätige Unternehmen nicht benachteiligt werden.

Die kurzfristigen negativen Auswirkungen werden umso geringer sein, je schneller akzeptiert wird, dass Energie

ein wertvoller Produktionsfaktor und Grundlage für die Wohlfahrt ist. Es lohnt sich daher, in die intelligente Produktion und den sparsamen Verbrauch zu investieren. Höhere Energiekosten sind tragbar, weil der Nutzen der Energiedienstleistungen grösser ist als der heute dafür zu bezahlende Preis. Für die Wirtschaft ist wichtig, dass Preiserhöhungen voraussehbar erfolgen und Konkurrenten in gleicher Weise treffen. Ökonomisch viel schwerwiegender – und daher keine Alternative – wäre es, infolge akuter Knappheit oder ökologischer Grenzen einen Energiemangel oder enorm hohe Preise in Kauf zu nehmen. Jede fehlende Kilowattstunde kostet mehr als ihre Bereitstellung durch erneuerbare Energien.

Die Förderung der erneuerbaren Energien bringt neue wirtschaftliche Aktivitäten und damit Arbeitsplätze. Fördermittel sind also eine notwendige und – wenn zweckmässig eingesetzt – effiziente Investition in die Zukunft: Notwendig, weil die umfassende Nutzung der erneuerbaren Energien nicht zu umgehen ist, effizient, weil es ökonomisch sinnvoll ist, den Umbauprozess rechtzeitig anzugehen und nicht erst unter dem Druck drohender Probleme zu handeln.

Der notwendige Umbau der Energieversorgung ist wirtschaftlich tragbar, wenn er rechtzeitig in Angriff genommen wird. Es wäre sachgerecht, die gesamtwirtschaftlichen Kosten und den Nutzen der Förderung der erneuerbaren Energien zu ermitteln und in den Kostenüberlegungen zu berücksichtigen, unter Einbezug der externen Effekte, der Möglichkeiten und Grenzen des technischen Fortschritts und der Ressourcenknappheiten.

# Anspruchsvolle Integration

Wichtige erneuerbare Energien wie Solarenergie oder Windkraft weisen eine kurzfristig schwankende Produktion auf. Diese Energieformen in das Gesamtsystem so zu integrieren, dass das Angebot der Nachfrage gerecht wird, erfordert einen erheblichen technischen Aufwand.

Aufgabe der Energieversorgung ist es, den Konsumenten die Energie dann zu liefern, wenn Wärme, Kraft, Mobilität oder Kommunikation verlangt werden. Die neuen erneuerbaren Energien erfüllen diese Anforderungen nur teilweise. Je grösser ihr Anteil am Energieangebot wird, desto wichtiger wird es, das fluktuierende Angebot an den Konsum anzupassen. Sollen die neuen erneuerbaren Energien die Versorgung zu einem erheblichen Teil decken, müssen sie durch Umwandlungs- und Speicherprozesse so transformiert werden, wie die Konsumenten sie nachfragen. Die installierten Leistungen oder erzeugten Energiemengen sagen daher wenig aus über den Versorgungsbeitrag der erneuerbaren Energien. Entscheidend ist vielmehr, dass die benötigte Energie jederzeit mit der geforderten Leistung zur Verfügung steht.

Kleine Mengen an fluktuierenden erneuerbaren Energien können heute mit relativ geringem Aufwand aufgenommen werden. Die erwünschte Steigerung der erneuerbaren Energien setzt jedoch einen Ausbau der Energieinfrastruktur voraus. Dabei sind naturgemäss für die einzelnen Energien unterschiedliche Lösungen anzustreben. In einer ersten Phase können die neuen erneuerbaren Energien in der Form in das Energiesystem integriert werden, in der sie erzeugt werden, also als Wärme, Strom und Biotreibstoffe. In einer zweiten Phase sind Umwandlungsprozesse erforderlich. Auch diese müssen weiter entwickelt werden. Die Anpassung des Energiesystems an eine zunehmend fluktuierende Energieproduktion kann teilweise auch nachfrageseitig erfolgen. Das «Demand Side Management» ergänzt die angebotsseitige Anpassung und mindert deren Aufwand. Sollen sich erneuerbare Energien auf dem Markt durchsetzen, ist eine Kombination von angebots- und nachfrageseitigen Massnahmen unabdingbar.

## Wärme

Für die Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien stellt sich das Problem der Bedarfsanpassung nur bei der Sonnenenergie. Die Lösung dafür heisst Speicherung, wobei heute überwiegend Wasser als Speichermedium verwendet wird. Genügt die Speicherkapazität nicht, erfolgt die Bedarfsanpassung meist durch Strom oder Holz. Gleiches gilt, wenn Wärmepumpen den erforderlichen Wärmebedarf nicht voll erbringen.

## Elektrizität

Für die Elektrizitätswirtschaft ist der Ausgleich des variierenden Stromverbrauchs eine Kernaufgabe. Es müssen stets genügend Kraftwerke zur Verfügung stehen, um den Bedarf zu decken und die Netzstabilität zu gewährleisten. Die Schweiz hat den Vorteil, dass sie dank den Speicherkraftwerken über die nötigen Regel- und Reserveleistungen verfügt. Andere Länder müssen thermische Kraftwerke auf Abruf bereitstellen. Die Leistung dieser Kraftwerke entspricht im Extremfall jener der installierten Leistung der Wind- und Photovoltaikanlagen. Mit dem Ausbau von Windkraft und Photovoltaik stellt sich auch bei uns die Frage, ob die Leistungsreserven der bestehenden Wasserkraftwerke genügen.

Für die Integration fluktuierender Stromerzeugung gibt es erste Untersuchungen, die aber nur die nächsten Jahrzehnte abdecken. Wie für Deutschland durch die Deutsche Energie-Agentur (2005 und 2010), die einen Anteil der Stromerzeugung aus Wind und anderen erneuerbaren Quellen von 20 Prozent für 2015 und von 39 für 2020/25 berücksichtigt. Für 2015 wurde in der dena-Netzstudie I ein Ausbaubedarf von 850 Kilometer Übertragungsleitungen ermittelt, von denen bisher nur 90 fertig gestellt wurden. Die dena-Netzstudie II zeigt, dass bis 2020 Leitungen mit



einer Gesamtlänge von 3400 bis 7400 Kilometer neu erstellt oder umgebaut werden müssen, mit Investitionskosten zwischen 9,7 und über 20 Milliarden Euro.

Steigt der Anteil an stochastisch erzeugtem Strom, werden die Netzregelung und die Bereitstellung von Reserveleistung immer anspruchsvoller. Dabei sind verschiedene Aspekte zu beachten:

- Die Integration von Wind- und Photovoltaikstrom ist in räumlich ausgedehnten Netzen einfacher als in kleinen, weil die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass irgendwo im Netzgebiet der Wind bläst oder die Sonne scheint. Dazu müssen die Netze auf allen Spannungsebenen genügend leistungsfähig sein.
- Je besser die Prognosen zur Sonneneinstrahlung und zum Wind sind, desto geringer ist der Bedarf an Regel- und Reserveleistung.
- Die in der Schweiz für Netzregelung und Reservehaltung verfügbare Leistung genügt vorläufig noch, muss aber wegen der steigenden Wind- und Solarstromproduktion erhöht werden. Am effizientesten ist es, die Leistung der Speicherkraftwerke zu erhöhen und die Pumpspeicherung auszubauen. Es zeichnet sich ab, dass die Bewirtschaftung der Speicherkraftwerke vermehrt durch die gesamtschweizerischen Bedürfnisse bestimmt wird. Damit öffnet sich ein Spannungsfeld zwischen der Förderung der einheimischen erneuerbaren Energien und den kommerziellen Interessen der Elektrizitätsunternehmen. Es braucht ein gesamtschweizerisches Speicherbewirtschaftungskonzept, das von der Schweizerischen Netzgesellschaft zu vollziehen ist.
- Zu prüfen ist auch, wie die schweizerische Wasserkraft im europäischen Rahmen eingesetzt werden könnte. Die Schweiz wird künftig stärker als heute auf die internationale Zusammenarbeit angewiesen sein und muss ihrerseits marktfähige Angebote bereitstellen. Verfügbare

Spitzenleistung aus Wasserkraftwerken ist neben der Durchleitungskapazität der wohl wertvollste schweizerische Beitrag. Angesichts des europäischen Leistungsbedarfs darf er jedoch nicht überbewertet werden.

- Es ist notwendig, Akkumulatoren zu entwickeln, die eine wirtschaftliche Stromspeicherung in grossem Massstab ermöglichen. Projekte zur Nutzung von Autobatterien bestehen bereits. Dafür kommen wohl nur Batterien von Hybridfahrzeugen in Frage, die an das Netz angeschlossen werden können. Der Aufwand für die Bewirtschaftung dieser Speicher darf nicht unterschätzt werden.
- Schliesslich bleibt noch die Möglichkeit, Überschussstrom über weitere physikalisch-chemische Prozesse zu verwerten, zum Beispiel indem aus diesem Strom Wasserstoff erzeugt wird.

#### Biogas und Biomasse

Biogas kann in komprimierter Form gespeichert oder in bestehende Gasleitungen eingespeist werden. Biomasse, die nicht direkt verbrannt wird, lässt sich in flüssige oder gasförmige Treib- und Brennstoffe umwandeln. Die Potenziale sind jedoch beschränkt und können den Bedarf an Treib- und Brennstoffen nicht befriedigen. Eine Möglichkeit ist, mit Hilfe von Strom aus Sonnenenergie, Wind und Erdwärme flüssige oder gasförmige Energieträger herzustellen. Dies könnte auch ein Beitrag zur Lösung des Stromspeicherproblems sein. Der Bedarf an künstlichen Treibstoffen hängt von der Entwicklung auf dem Fahrzeugmarkt ab.

Ein steigender Anteil der erneuerbaren Energien an der Versorgung, macht aufwändige Regel-, Speicher- und Umwandlungsprozesse notwendig, damit die Anpassung an den Konsum möglich wird. Die entsprechenden Prozesse müssen durch Forschung und Entwicklung verbessert werden.

# Anforderungen an Energiewirtschaft steigen

Mit dem Umbau des Energiesystems verändern sich auch die Aufgaben der Energiewirtschaft. Gleichzeitig kommen neue Marktteilnehmer ins Spiel.

Die heutige Energieversorgung hat einen stark zentralen Charakter. Zwar ist die Stromversorgungsbranche zersplittert, die Gasversorgung wird von den Gemeinden getragen, die Brenn- und Treibstoffversorgung erfolgt durch eine Vielzahl von Händlern. Doch die Mitwirkung der Energiekonsumenten beschränkt sich, wenn überhaupt, auf den Entscheid, ob und in welchem Ausmass ein bestimmter Energieträger genutzt werden soll. Durch die neuen erneuerbaren Energien wird das Energiesystem dezentraler und sein versorgungstechnischer Stellenwert steigt. Die durchschnittliche Grösse der Energieerzeugungsanlagen wird eher sinken, jene der Energieversorger eher steigen. Neben Grossanlagen wird eine zunehmende Anzahl Kleinanlagen die Versorgungsstruktur bestimmen. Die Energiekonsumenten werden, wenn sie eigene Produktionseinrichtungen wie Windturbinen, Photovoltaikanlagen, Biomassekraftwerke, Biotreibstoffanlagen und dergleichen betreiben, selber zu Akteuren der Energieversorgung.

Die neuen erneuerbaren Energien führen jedoch nicht dazu, dass die bestehende Infrastruktur an Nutzen verliert, im Gegenteil: Auch Konsumenten mit eigenen Erzeugungskapazitäten bleiben für die Beschaffung des Restbedarfs, für die Verwertung von Überschüssen, für die Einspeisung ins Netz und für die Netzregelung auf die Energiewirtschaft angewiesen. Nur wenige Selbstversorger sind vom Netz unabhängig. Dies gilt insbesondere für den Strom: Die Netzgesellschaft als Betreiberin des Übertragungsnetzes erbringt die Netzregelung, stellt die Ausgleichsenergie zur Verfügung und übernimmt wesentliche Aufgaben bei der Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

Auch die Verteilnetze behalten ihre Funktion. Die dezentrale Stromerzeugung kann zwar dazu führen, dass örtliche und regionale Netzbelastungen reduziert werden. Insgesamt stellen aber die neuen erneuerbaren Energien zusätzliche Anforderungen an die Elektrizitätswirtschaft. Die gewichtigste ist die bereits erwähnte Netzregelung aufgrund der fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind und Sonnenenergie. Eine weitere Anforderung ist der Netzausbau, bedingt durch die vermehrte Einspeisung. In Deutschland ist der notwendige Netzausbau bereits ein wesentliches Problem. Auch in der Schweiz könnten wegen der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien gewisse zusätzliche Netzausbauten nötig werden. Das Stromversorgungsgesetz sieht zudem vor, dass die Elektrizitätsversorgungsunternehmen in die Pflicht genommen werden können, wenn die im Gesetz verlangte zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht erreicht wird. Die Aufgaben der Elektrizitätswirtschaft (und der übrigen energiewirtschaftlichen Branchen) werden mit dieser Entwicklung nicht einfacher.

Der steigende Versorgungsbeitrag der erneuerbaren Energien verlangt höhere Ausgleichs- und Regelleistungen durch die Energiewirtschaft, obwohl sie nur mehr für einen Teil der Versorgung direkt zuständig bleibt. Dies betrifft speziell die Elektrizitätswirtschaft. Ohne starkes Netz und ohne genügende Produktionsleistung für Grund-, Mittel- und Spitzenlast kann eine stark fluktuierende Stromerzeugung nicht aufgenommen werden.

# Umwelt- und Klimaauswirkungen

Erneuerbare Energien haben ein positives Image. Dabei geht leicht vergessen, dass auch sie die Umwelt belasten. Dies ist auch bei der Nutzung erneuerbarer Energien zu berücksichtigen.

Erneuerbare Energien sind in Bezug auf die Umweltbelastung den übrigen Energien nicht per se überlegen. Die meisten erneuerbaren Energien verursachen zwar keine direkten Schadstoff- und Treibhausgasemissionen; trotzdem weisen auch sie wegen des erforderlichen Materialverbrauchs ein bestimmtes Mass an Umwelt- und Klimabelastung auf. Zudem können sie Landschaft, Gewässer und Untergrund belasten und Lärm verursachen. Um die Belastung korrekt zu ermitteln, sind für jede Technologie Lebenszyklusanalysen (LCA) zu erstellen, welche die einzelnen Produkte von der Materialgewinnung bis zur Entsorgung abbilden. So erlaubt die ecoinvent-Datenbank des Schweizerischen Zentrums für Ökoinventare ([www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)), einzelne Technologien und ganze Energiesysteme unter die Lupe zu nehmen und auf einer gesicherten Datenbasis miteinander zu vergleichen.

Das Paul Scherrer Institut (PSI) hat auf dieser Grundlage die Umwelt- und Treibhausgasbelastung für die Strom- und Wärmeerzeugung in Form von Kennzahlen und Indikatoren ermittelt (Energie-Spiegel 1/1999, Energie-Spiegel 3/2000, Energie-Spiegel 9/2003, Energie-Spiegel 11/2004, Energie-Spiegel 20/2010). Es zeigt sich, dass beim CO<sub>2</sub>-Ausstoss die Wasserkraft stets am besten abschneidet, dicht gefolgt von der Kernenergie. Die neuen erneuerbaren Energien sind etwas schlechter, aber um mindestens eine Grössenordnung besser als die fossile Stromerzeugung.

Bei der Wärmeerzeugung ist Holz bezüglich den CO<sub>2</sub>-Emissionen am günstigsten vor der mit Kernenergiestrom betriebenen Wärmepumpe und der Solarwärme. Deutlich schlechter schneiden Wärmepumpen ab, die mit Strom aus modernen Gaskraftwerken angetrieben werden, und erst recht die Wärmeerzeugung aus Erdgas und Erdöl (vgl. Energie-Spiegel 1/1999).

Dass erneuerbare Energien zu negativen Umwelt- und Treibhausgasbilanzen führen können, zeigte die Empa-Studie «Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen» (2007). Eine ganze Reihe von Treibstoffen aus Biomasse schneidet bezüglich den Treibhausgasemissionen oder der gesamten Umweltbelastung schlechter ab als Benzin. Es ist nicht ausgeschlossen, dass unter ungünstigen Umständen insgesamt mehr Energie in die Erzeugung der Biotreibstoffe gesteckt werden muss als schliesslich zur Verfügung steht. Das Bestreben, unbesehen der ökologischen Grenzen möglichst viel Energie aus Biomasse bereitzustellen, führt nicht nur zu einer ökologischen Fehlentwicklung, sondern beeinträchtigt auch die Nahrungsmittelerzeugung, die Vorrang haben muss. Zum gleichen Schluss kommt auch die SATW Studie «Biotreibstoffe – Chancen und Grenzen» (2009).

Die Nutzung erneuerbarer Primärenergien ist auf Grund des damit verbundenen Materialaufwands mit einer nicht unerheblichen Klima- und Umweltbelastung verbunden. Forschung und Entwicklung müssen dafür sorgen, dass die Wirkungsgrade der Nutzungstechniken erhöht, der spezifische Materialaufwand reduziert und ökologisch vorteilhafte Materialien eingesetzt werden. Erneuerbare Energien dürfen nur dann staatlich gefördert werden, wenn sie Mindestanforderungen bezüglich Umweltschutz und Klimabelastung erfüllen.



## Gesellschaftliche Aspekte

Neben den bereits erwähnten negativen Auswirkungen hat die Nutzung von erneuerbaren Energien auch noch eine Reihe von weiteren gesellschaftlich relevanten Konsequenzen. Dazu gehören etwa die Folgen von Unfällen oder gar Katastrophen, beispielsweise bei Staudammbrüchen, die Verteuerung von Lebensmitteln oder die Veränderung der Landschaft.

Heute wird viel Energie verschleudert, da Energiedienstleistungen mit zu geringen Wirkungsgraden erbracht werden. Es scheint aus heutiger Sicht schon aus ökonomischen Gründen unwahrscheinlich, dass künftig, auch bei einer weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhenden Versorgung, der gegenwärtige Energieeinsatz pro Einheit Bruttoinlandsprodukt aufrechterhalten werden kann. Damit werden Lebensstil und Konsumverhalten der Bevölkerung tangiert, aber nicht zwingend die Lebensqualität. Dank höherer Energieeffizienz dürfte es beispielsweise im Wohnbereich sogar möglich sein, den heutigen Wohnkomfort bei einem wesentlich tieferen Energieeinsatz zu übertreffen. Gewisse Konsumanpassungen, besonders bei der Mobilität, sind allerdings nicht auszuschliessen.

Wie bereits erwähnt werden die Energiekosten künftig einen höheren Anteil des Bruttoinlandsprodukts ausmachen. Auch wenn dies gesamtwirtschaftlich gesehen sehr wohl verkraftbar ist, werden die einkommensschwachen Bevölkerungsschichten sowie einzelne Branchen wie etwa das Transportgewerbe davon verhältnismässig stark belastet. Es ist zu erwarten, dass die betroffenen Kreise auf diese Entwicklung reagieren werden. Abfederungsmassnahmen könnten sich daher aufdrängen, lange bevor der Hauptanteil der Energiekosten auf die erneuerbaren Energien entfällt.

Steigende Energiepreise werden sich bis zu einem gewissen Grad auf das Verhalten der Konsumenten auswirken. Die Bürger entscheiden über die Energienutzung und über die Investitionen und damit über die Energiezukunft – in einzelnen Fällen in Volksabstimmungen. Eine auf erneuer-

baren Energien beruhende Versorgung benötigt gesellschaftliche Akzeptanz. Diese ist zwar heute meist gegeben, werden doch grosse Hoffnungen in die erneuerbaren Energien gesetzt, nicht zuletzt wenn es um den Ersatz der Kernkraftwerke oder der fossilen Energien geht. Die Bereitschaft zum Einsatz erneuerbarer Energien durch die einzelnen Konsumenten war bisher jedoch kaum entsprechend; erst mit der Einführung der kostendeckenden Einspeisevergütung änderte sich die Situation. Die Geschichte anderer Technologien zeigt, dass die heutige Akzeptanz längerfristig auch abnehmen könnte. Erste Beispiele sind Widerstände gegen Windanlagen, Solaranlagen oder Kleinwasserkraftwerke. Auch Geothermiekraftwerke müssen nach den ersten negativen Erfahrungen in Basel die Akzeptanz neu erwerben.

Das Verständnis der Bevölkerung und der Wirtschaft, dass nicht-erneuerbare durch erneuerbare Energien ersetzt werden müssen, ist für deren Durchsetzung entscheidend. Dazu braucht es eine Bewusstseinsbildung durch Politik, Wissenschaft und Wirtschaft. Fünf Botschaften sind zentral:

1. Die Energiepreise werden steigen.
2. Nicht die Energiepreise sind relevant, sondern die Preise der Energiedienstleistungen.
3. Diese sind umso günstiger, je effizienter die Energie eingesetzt wird.
4. Ein Energiemangel ist viel schwieriger zu bewältigen als höhere Energiepreise.
5. Der Beitrag der Erneuerbaren an die Versorgung und der Zeitbedarf für den Umbau des Energiesystems müssen realistisch eingeschätzt werden.

# Importe sind kurzfristig kaum realistisch

Verschiedene energiepolitische Akteure setzen grosse Hoffnungen in einen möglichen Import von erneuerbaren Energien. Die Chancen dazu erscheinen bei näherer Betrachtung gering.

Einheimische erneuerbare Energien haben mehrere Vorteile: Sie sind im Inland verfügbar, sie erhöhen die Versorgungssicherheit, ihr Ausbau führt zu einer tendenziell breiter abgestützten Energieversorgung und die Wertschöpfung kommt hauptsächlich der eigenen Volkswirtschaft zugute. Es macht deshalb Sinn, die eigenen erneuerbaren Energien möglichst umfassend zu nutzen.

Die Ausbaupotenziale der verschiedenen erneuerbaren Energien sind geographisch allerdings sehr ungleich verteilt. Die Schweiz, deren wirtschaftliche Potenziale zum Ausbau der erneuerbaren Energien vergleichsweise beschränkt sind, muss sich deshalb die Frage stellen, ob erneuerbare Energien nicht importiert werden könnten. Dies ist grundsätzlich dann denkbar, wenn die Produzentenländer Überschüsse aufweisen, die sie nicht ökonomisch günstiger für ihre eigene Versorgung einsetzen können. Mit Ausnahme der Erdöl und Erdgas exportierenden Staaten sind jedoch alle Länder darauf angewiesen, ihre eigene Energieversorgung möglichst rasch vermehrt auf erneuerbare Energien abzustützen. Sie werden deshalb gezwungenermassen ihre erneuerbaren Energien primär zur Deckung der eigenen Bedürfnisse verwenden. Dies gilt auch für die EU-Länder, welche anspruchsvolle Ausbaumassnahmen zu erfüllen haben.

Global handelbar sind für einen absehbaren Zeitraum einzig Holz sowie Brenn- und Treibstoffe aus Biomasse. Allerdings dürfte es zum Beispiel weder ökonomisch noch energetisch sinnvoll sein, Holz für die Energiegewinnung aus Sibirien zu importieren. Als Lieferant von Biotreibstoffen kommt heute in erster Linie Brasilien in Frage, das einen weiteren Ausbau der Ethanolherzeugung plant. An diesem Ausbau sind aber bereits die energiehungrigen USA interessiert. Zudem sind die Potenziale auch dort beschränkt.

In der Schweiz wurde in der politischen Diskussion die Hoffnung geäussert, zur Deckung der absehbaren Stromlücke könne Windstrom aus der Nord- und Ostsee importiert werden. Ob derartige Importe möglich werden, bleibt offen, denn die betreffenden Staaten benötigen die günstigen Windfarmstandorte zur Erfüllung ihrer Zielvorgaben selber. Dazu käme das Problem des Stromtransports, unabhängig davon, ob Schweizer Unternehmen eigene Windfarmen in Küstengebieten erstellen oder diese durch die betreffenden Staaten betrieben werden. Der Bau der erforderlichen Leitungen wäre in den Transitländern kaum einfacher als in der Schweiz; zudem könnte unser Land auf Grund des EU-Rechts die Transportkapazitäten nicht autonom nutzen.

Es wurde auch vorgeschlagen, die Schweiz könnte Leistungsreserven als Gegenleistung für die Nutzung von Windkraftstandorten anbieten. Die schweizerische Leistungsreserve ist jedoch beschränkt und sie würde noch wesentlich reduziert, wenn die vorhandenen Kernkraftwerke nach Ablauf ihrer Lebensdauer nicht ersetzt würden.



Eine ähnlich zurückhaltende Einschätzung ergibt sich bezüglich der Möglichkeiten, Solar- oder Windstrom aus südeuropäischen Ländern einzuführen. Beispielsweise verfügt Spanien über grosse nutzbare Flächen, wo Solarstrom mit höherem Ertrag als bei uns erzeugt werden kann. Aber auch für dortige Grossprojekte besteht das Problem fehlender Übertragungskapazitäten zum Transport des Stroms in die europäischen Konsumzentren; seit langem hängige Projekte für Hochspannungsleitungen über die Pyrenäen scheiterten bisher an politischen Widerständen.

Schon vor etwa 30 Jahren wurde zudem die Nutzung der Sonnenenergie in Nordafrika vorgeschlagen. Dabei würde entweder Solarstrom über Hochspannungs-Gleichstromübertragungsanlagen in das europäische Netz ein-

gespeist oder Wasserstoff über Rohrleitungen in die europäischen Verbrauchsgebiete transportiert. Denkbar wäre auch die Herstellung von flüssigen Brenn- und Treibstoffen an Ort und Stelle. Die Verknappung der fossilen Energien und die Klimaproblematik führen dazu, dass diese Projekte wieder auf den Tisch kommen. Um sie zu realisieren, müssten jedoch nicht nur technische und wirtschaftliche, sondern auch gewichtige politische Probleme gelöst werden.

Ein Import von Strom aus erneuerbaren Energien sowie von Biobrenn- und -treibstoffen ist grundsätzlich nicht ausgeschlossen, aber bestenfalls in einigen Jahrzehnten zu erwarten.

# Den langen Weg in Angriff nehmen

Der Umbau des Energiesystems ist eine langfristige Herausforderung. Sie kann nur bewältigt werden, wenn alle Akteure – von den Forschungsinstitutionen bis hin zu den Konsumentinnen und Konsumenten – tatkräftig mitwirken. Erforderlich ist rasches und dezidiertes Handeln, und zwar in Forschung, Entwicklung und Umsetzung.

Von den neuen erneuerbaren Energien wird zu Recht erwartet, dass sie langfristig zur wichtigsten Säule der Energieversorgung werden. Eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist grundsätzlich möglich, doch stehen diese erst am Anfang ihrer Entwicklung. Es sind noch viele Anstrengungen notwendig, bis die steigende Nachfrage der wachsenden Weltbevölkerung vollumfänglich oder weitgehend durch erneuerbare Energiequellen befriedigt werden kann. Dies ist aus heutiger Sicht nur bei geringerer Energieintensität wirtschaftlich möglich. Hohe Energie- und Materialeffizienz sind dabei unabdingbar.

Der Weg zu einer weitgehenden Versorgung durch erneuerbare Energien ist lang; der Zeithorizont beträgt viele Jahrzehnte und es wäre fahrlässig, die Herausforderungen auf diesem Weg zu unterschätzen. Wohl oder übel muss akzeptiert werden, dass die konventionellen Energien noch während Jahrzehnten die Hauptlast der Energieversorgung zu tragen haben und nur sukzessive ersetzt werden können. Die Versorgung mit Energie wird teurer, unabhängig davon, ob sie auf konventionellen oder neuen erneuerbaren Energien beruht.

Damit der Umbau der heutigen Energieversorgung gelingen kann, ist eine Reihe von Schritten nötig:

- Die Technologien zur Gewinnung und Nutzung erneuerbarer Energien müssen weiter verbessert und erweitert werden. Mit der langfristigen Ausrichtung seines Energieforschungskonzepts auf die nachhaltige Entwicklung mit einem Zeitrahmen bis 2050 setzt der Bund die richtigen Prioritäten. Wesentlich ist,

dass die Forschungsmittel der öffentlichen Hand erhöht und vermehrt auch Pilot- und Demonstrationsanlagen gefördert werden.

- Die Energieforschung sollte sich im Rahmen des Programms «Energiewirtschaftliche Grundlagen» des Bundesamts für Energie vermehrt sozialen und gesellschaftlichen Fragen widmen. Der Umbau der Energieversorgung erfordert grundsätzliche Änderungen im Energiesystem und im Konsumentenverhalten. Wenn äussere Zwänge fehlen und die Bevölkerung diesen Wandel nicht mitträgt, wird sich der notwendige Transformationsprozess nur zögerlich und mit deutlich grösseren Schwierigkeiten und Kosten durchsetzen.
- Mit der Einspeisevergütung erhält die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien einen wesentlichen Impuls. Es muss jedoch evaluiert werden, ob die eingesetzten Instrumente zweckmässig sind. Da eine weitgehende Versorgung durch erneuerbare Energien eine Förderung über Jahrzehnte voraussetzt, muss eine wirtschaftlich optimale Förderstrategie entwickelt und umgesetzt werden. Dies liegt nicht zuletzt im Interesse der Politik, welche über die Art der Förderung, die Mittel und die Umsetzung entscheidet. Die Erarbeitung dieser Förderstrategie ist eine anspruchsvolle, interdisziplinäre Forschungsaufgabe.



- Elektrizität spielt im künftigen Energiesystem eine tragende Rolle. Steigt der Anteil der Wind- und Sonnenenergie an der Versorgung, braucht es vermehrt Vorkehrungen, damit die fluktuierende Produktion an den Bedarf angepasst werden kann. Dazu sind weiterentwickelte Speicher- und Umwandlungstechnologien nötig und die Speicherkraftwerke müssen im Verbund auf eine Weise eingesetzt werden, die sich am Regel- und Ausgleichsleistungsbedarf des Gesamtnetzes orientiert. Die steigende Notwendigkeit zur Konsumanpassung verlangt nicht nur nach technischen Vorkehrungen und den entsprechenden Investitionen, sondern auch nach organisatorischen Änderungen des Versorgungssystems. Die damit verbundenen Aufgaben sind anspruchsvoll und bedingen Gesamtlösungen, die alle Akteure einbeziehen. In einer Versorgung, die sich wesentlich auf erneuerbare Energien abstützt, kann die Energiewirtschaft nicht alleine für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit zuständig sein. Die dezentralen Energieerzeuger und die Konsumenten haben ebenfalls ihre Beiträge zu leisten.
  - Die Schweiz kann kaum darauf hoffen, dass sie ihren Bedarf in grösserem Umfang durch Importe von erneuerbaren Energien decken kann. Es gibt zwar Länder mit wesentlich günstigeren Bedingungen zur Nutzung beispielsweise der Sonnen- oder Windenergie. Diese benötigen die erneuerbaren Energien aber primär für die eigene Versorgung. Ob allenfalls in einigen Jahrzehnten Grossprojekte wie Solarfarmen in der Sahara realisiert werden können, welche dann Energie nach Europa liefern, ist offen. Die Schweiz sollte sich deshalb in erster Linie auf die möglichst weitgehende Entwicklung der erneuerbaren Energien im Inland konzentrieren.
- Die absehbare Verknappung der fossilen Energien und die Klimaproblematik machen den Umstieg auf erneuerbare Energien notwendig. Wie schnell dieser Umstieg erfolgen muss, hängt einerseits von der globalen Entwicklung des Energieverbrauchs ab, andererseits aber auch davon, ob die Kernenergie weiter genutzt werden kann und CO<sub>2</sub>-freie Kohletechnologien (Sequestrierung) verfügbar sein werden. Der Umbauprozess des Energiesystems erfordert die Mitwirkung aller Akteure: Forschung und Industrie sind für die Entwicklung von wirtschaftlich konkurrenzfähigen Energietechnologien zuständig; der Staat definiert eine volkswirtschaftlich optimale und verlässliche Förderpolitik und stellt die dafür erforderlichen Mittel bereit; die Energiewirtschaft produziert selber erneuerbare Energien und übernimmt Ausgleichs- und Regulierfunktionen; und schliesslich sind die Wirtschaft und die Haushalte dafür verantwortlich, dass sie die erneuerbaren Energien für ihre Energiedienstleistungen möglichst effizient nutzen.

# Weiterführende Literatur

Akademien der Wissenschaften Schweiz: Denk-Schrift Energie, Energie effizient nutzen und wandeln, ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in der Schweiz (2007)

Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008

Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2008

Bundesamt für Energie (BFE): Die Energieperspektiven 2035 (2007)

Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2008 (2009)

Bundesamt für Energie (BFE): Windenergie und schweizerischer Wasserkraftpark (2004)

Deutsche Energie-Agentur (dena): Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020 (dena-Netzstudie I, 2005)

Deutsche Energie-Agentur (dena): Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025 (dena-Netzstudie II, 2010)

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA): Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen (2007)

von Hayek, A.F., (1968): Der Wettbewerb als Entdeckungsverfahren, in: von Hayek (1969): Freiburger Studien, Tübingen, 2. Aufl. 1994

Internationale Energieagentur (IEA): Design and operation of power Systems with large Amounts of wind power, State-of-the-art report (IEA Wind Task 25, VTT Working Papers 82, 2007)

Painuly, J.P.: Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis, Renewable Energy 24 (2001)

REN21 Renewable Energy Policy Network: Renewables 2007 Global Status Report (2007)

Paul Scherrer Institut: Energie-Spiegel 1/1999, 3/2000, 5/2001, 9/2003, 11/2004, 14/2004, 16/2006, 20/2010

Paul Scherrer Institut (Stefan Hirschberg et.al.): Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten (2005)

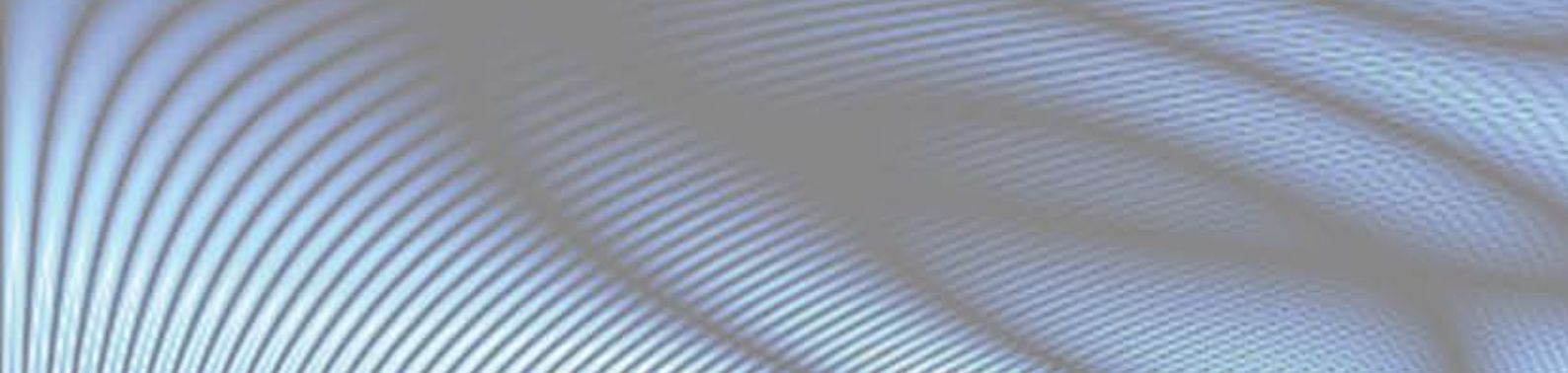
Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW): CH50% – Eine Schweiz mit halbiertem Verbrauch an fossilen Energien, SATW Schrift Nr. 30 (1999)

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW): Road Map Erneuerbare Energien Schweiz – Eine Analyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050, SATW Schrift Nr. 39 (2006)

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW): Erdölknappeheit und Mobilität in der Schweiz, SATW Schrift Nr. 40 (2008)

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW): Biotreibstoffe – Chancen und Grenzen (2009)

World Energy Council (WEC): Renewable Energy Projects Handbook (2004)



### Impressum

**SATW Schrift Nr. 42**

Erneuerbare Energien – Herausforderungen auf dem Weg zur Vollversorgung, Februar 2011

SATW Geschäftsstelle

Seidengasse 16, 8001 Zürich

Tel. +41 (0)44 226 50 11

E-Mail [info@satw.ch](mailto:info@satw.ch)

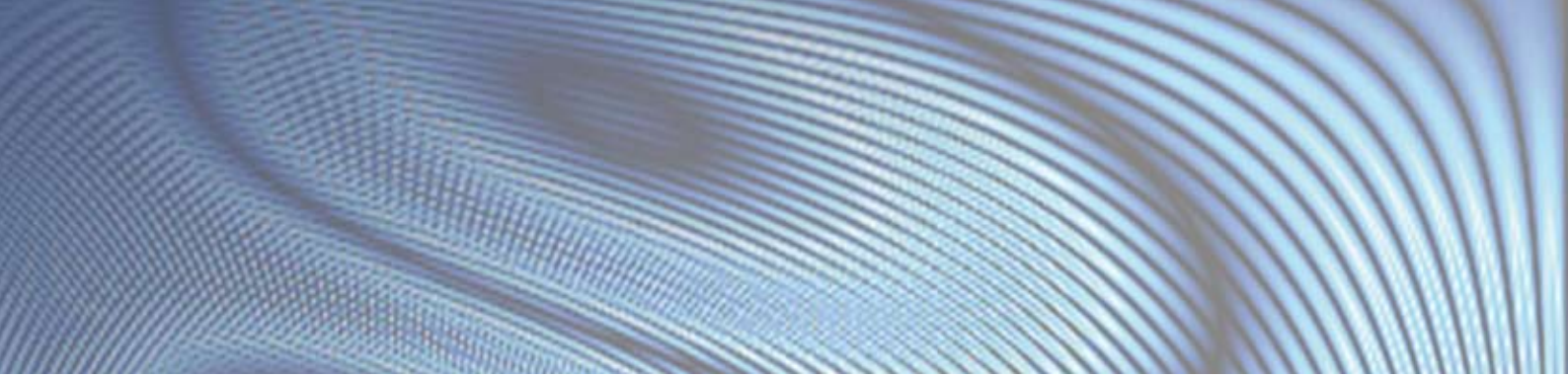
**Autoren** Silvia Banfi Frost, Marco Berg, Jean-François Dupont, Matthias Gysler, Eduard Kiener, Jürg Minsch, Alexander Wokaun

**Review** Irene Aegerter, Hans Hänni, Stefan Nowak, Christoph Ritz, Ulrich W. Suter, Andreas Zuberbühler

**Redaktion** Felix Würsten, Béatrice Miller

**Bilder** Fotolia

**ISBN** 3-908235-18-9



# SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften  
Académie suisse des sciences techniques  
Accademia svizzera delle scienze tecniche  
Swiss Academy of Engineering Sciences



Mitglied der  
Akademien der Wissenschaften Schweiz