



# Road Map Erneuerbare Energien Schweiz

Eine Analyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050

**SATW**

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



## Inhalt

Kurzzusammenfassung .....	4
Vorwort .....	5
Erneuerbare Energien – ein Ausweg? .....	6
Was konkret berechnet wurde .....	7
Die Technologien im Überblick	
Wärmepumpen .....	8
Solarthermie .....	8
Tiefe Geothermie .....	9
Biomasse .....	10
Photovoltaik .....	12
Windkraft .....	12
Wasserkraft .....	13
Die Bilanz aus energetischer Sicht .....	14
Die Bilanz aus wirtschaftlicher Sicht .....	17
Die Chancen der Erneuerbaren aktiv nutzen .....	19
Anhang	
Weiterführende Literatur .....	22
Glossar .....	23
Impressum .....	23

## Kurzzusammenfassung

Eine nachhaltige Energieversorgung der Schweiz ist möglich. Sie ist aber weder kurzfristig noch einfach zu realisieren. Einheimische erneuerbare Energiequellen können dazu einen entscheidenden Beitrag liefern. Die vorliegende Schrift der SATW zeigt auf, inwieweit dies auf der Basis des technisch nutzbaren Potenzials möglich ist.

Limitierend ist dabei vielfach nicht das eigentliche Potenzial, sondern eine volkswirtschaftlich vertretbare Umsetzungsgeschwindigkeit, insbesondere bei der Gebäudeerneuerung. Eine mehrheitlich auf einheimischen erneuerbaren Energiequellen beruhende Versorgung bis zum Jahre 2050 verlangt eine Kombination der Umsetzung der hier aufgezeigten Potenziale mit der vom Bundesrat als strategisches Ziel deklarierten 2000-Watt-Gesellschaft.

## Über die SATW

### **Wer wir sind**

Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) vereinigt als nicht kommerziell orientierte, politisch unabhängige Dachgesellschaft Personen, Institutionen und Fachgesellschaften in der Schweiz, die in den technischen Wissenschaften, deren Anwendung und deren Förderung tätig sind. Sie hat rund 240 Einzelmitglieder und 60 Mitgliedsgesellschaften. Einzelmitglieder sind herausragende Persönlichkeiten aus Bildung, Forschung, Wirtschaft und Politik.

Die SATW ist Mitglied des Dachverbandes «Akademien der Wissenschaften Schweiz».

### **Was wir wollen**

Die SATW setzt sich für die Förderung der Technik zum Wohle der Gesellschaft und für die Stärkung des Verständnisses der Technik ein. Damit dient sie dem Forschungs-, Ausbildungs- und Produktionsstandort Schweiz und mithin der schweizerischen Öffentlichkeit, Volkswirtschaft und Kultur.

### **Was wir tun**

Die SATW führt Veranstaltungen durch, publiziert Studien und Periodika, lädt zu Besichtigungen ein, äussert sich zu aktuellen Fragen und unterstützt die Aktivitäten anderer Organisationen.

Detaillierte Informationen über die SATW finden sich unter: [www.satw.ch](http://www.satw.ch)



## Vorwort

Die Förderung von Erdöl und Erdgas wird in absehbarer Zeit ihr Maximum erreichen und anschliessend sinken. Zur Diskussion steht nur, ob dieses Maximum bereits in 10 oder erst in etwa 30 Jahren erreicht sein wird. Die Schweiz steht deshalb, wie die anderen Industrienationen, vor einem tiefgreifenden Umbruch in der Energieversorgung.

In dieser Situation ruhen viele Hoffnungen auf dem vermehrten Einsatz erneuerbarer Energiequellen. Die von der Energiekommission der SATW erarbeitete *«Road Map Erneuerbare Energien Schweiz»* untersucht, wieweit die Hoffnungen berechtigt sind, wenn die in der Schweiz vorhandenen technisch nutzbaren Potenziale erschlossen und genutzt werden. Die Studie zeigt, dass bei Realisierung der Road Map das Angebot an erneuerbaren Energieformen bis 2050 verdoppelt werden kann. Das Ergebnis ist gleichzeitig ernüchternd und ermutigend.

Ernüchternd ist, dass bei Verharren des Energiekonsums auf heutigem Niveau die erneuerbaren Energiequellen, Wasserkraft inbegriffen, nur gut ein Drittel des Bedarfs abdecken können. Auch im Vergleich mit den zurzeit erarbeiteten Energieperspektiven des Bundes ist die Situation nicht grundlegend besser, es bleibt je nach Szenario eine Bedarfslücke von 50 Prozent oder mehr.

Ermutigend ist die Situation hingegen in Kombination mit der Vision einer 2000-Watt-Gesellschaft, die sich der Bundesrat als strategisches Ziel gesetzt hat. Bei gleichzeitiger Realisierung der Road Map und der 2000-Watt-Gesellschaft würden drei Viertel der benötigten Energie aus erneuerbaren einheimischen Quellen zur Verfügung stehen. Eine langfristig stabile und damit nachhaltige Energieversorgung der Schweiz scheint somit machbar, und dies ohne futuristische Lösungen wie Fusionsreaktoren oder eine solar betriebene Wasserstoffwirtschaft.

Die SATW setzt sich konsequent ein für eine nachhaltige Energieversorgung der Schweiz. Sie hat bereits gezeigt, dass mittelfristig eine Halbierung des Verbrauchs an fossilen Energieträgern für die Schweiz ohne Wohlstandsverlust möglich ist. Aus den in der Road Map aufgeführten Gründen ist nur ein möglichst rasch beginnender, aber auf Jahrzehnte verteilter Umbau unserer Energieversorgung volkswirtschaftlich sinnvoll. Machen wir uns auf den Weg!

Prof. Dr. René Dändliker  
*Präsident der SATW*

Prof. Dr. Andreas Zuberbühler  
*Präsident des wissenschaftlichen  
Beirats der SATW*

# Erneuerbare Energien – ein Ausweg?

**Die heutige Energieversorgung lässt sich längerfristig nicht aufrechterhalten. Lässt sich die absehbare Energiekrise mit erneuerbaren Energien abwenden? Die vorliegende Road Map zeigt auf, inwieweit solche Hoffnungen berechtigt sind.**

Weltweit gesehen stützt sich die Energieversorgung heute zu über 80 Prozent auf Kohle, Erdöl und Erdgas ab. Der Verbrauch dieser Ressourcen hat in den letzten Jahren weiter zugenommen. Das Ausmass, in dem fossile Energieträger genutzt werden, lässt sich längerfristig nicht aufrechterhalten. Beim Erdöl wie beim Erdgas zeichnet sich ab, dass die Produktion mit der Nachfrage nicht Schritt halten kann. Sorgen bereitet auch die Tatsache, dass ein Grossteil der fossilen Energieträger in politisch instabilen Regionen gefördert wird. Dadurch entstehen nicht zuletzt für die westlichen Länder kritische Abhängigkeiten.

## **Fernziel Nachhaltigkeit**

*Es ist offensichtlich, dass eine nachhaltige Versorgung nur mit einem tiefgreifenden Wandel der heutigen Energieerzeugung, -umwandlung und -nutzung erreicht werden kann.*

Problematisch ist die Nutzung fossiler Energieträger zudem aus Sicht der Umwelt. Im Vordergrund steht hier die sich immer deutlicher abzeichnende globale Klimaveränderung als Folge des erhöhten Eintrags des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Auf internationaler Ebene werden inzwischen Anstrengungen unternommen, eine Trendwende herbeizuführen. So zielt das auch von der Schweiz ratifizierte Kyoto-Protokoll darauf ab, den weltweiten Ausstoss von sechs Treibhausgasen, darunter als wichtigstes CO<sub>2</sub>, bis 2012 um rund 5 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Wie die längerfristige Energie- und Klimapolitik auf internationaler Ebene aussehen soll, ist heute allerdings noch unklar.

Der Bundesrat empfiehlt in seiner 2002 formulierten Strategie zur nachhaltigen Energieversorgung, die Energie- und Klimapolitik der Schweiz am Ziel einer 2000-Watt-Gesellschaft und eines Pro-Kopf-Ausstosses von 1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Jahr auszurichten. Angesichts der Tatsache, dass heute in der Schweiz jährlich pro Kopf aus Primärenergie eine Leistung von 5200 Watt erzeugt und über 6 Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert werden, ist es offensichtlich,

dass die angestrebten Ziele nur mit einem tiefgreifenden Wandel der heutigen Energieversorgung, -umwandlung und -nutzung erreicht werden können. Anstrengungen sind dabei in drei Bereichen nötig: Erstens muss die eingesetzte Primärenergie bis zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen effizienter genutzt werden; zweitens muss sich die Energieversorgung stärker auf CO<sub>2</sub>-arme Energiequellen abstützen; drittens braucht es auf Seiten der Nutzer Verhaltensänderungen.

## **Auswirkungen abschätzen**

Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem zweiten Handlungsfeld, der Erschliessung CO<sub>2</sub>-armer Energieformen. Neben der Kernenergie erfüllen dieses Kriterium sämtliche erneuerbaren Energiequellen. In der Schweiz werden heute nur zwei von diesen in namhaftem Umfang genutzt: die Wasserkraft und das Holz. Andere erneuerbare Energiequellen wie Wind, Geothermie, Photovoltaik und die übrige Biomasse sind hingegen erst wenig erschlossen. Viele erhoffen sich von diesen oft als «neue Erneuerbare» bezeichneten Energiequellen einen wesentlichen Beitrag zum angestrebten Wandel der Energieversorgung.

Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) will mit der «Road Map Erneuerbare Energien Schweiz» aufzeigen, inwieweit diese Hoffnungen berechtigt sind. Der Bericht dokumentiert, wie gross das technisch nutzbare Potenzial der einheimischen erneuerbaren Energiequellen ist, wie weit dieses in den nächsten 50 Jahren sinnvoll erschlossen werden könnte und welche Auswirkungen dies auf die Energiegestehungskosten hätte.

Zweifellos muss aber mit der Entwicklung der erneuerbaren Energiequellen, wie sie hier dargestellt wird, eine massive Verbesserung der Energieeffizienz einhergehen. Die SATW-Studie «CH50% – Eine Schweiz mit halbiertem Verbrauch an fossilen Energien» hat bereits 1999 gezeigt, dass dies – ohne Reduktion der Energiedienstleistungen – mit energieoptimierten Gebäuden und Verkehrsträgern zu erreichen ist.



## Was konkret berechnet wurde

Die Schweiz besitzt als rohstoffarmes Land keinen direkten Zugriff auf fossile Energieträger, sondern ist auf Importe angewiesen. Sie kann hingegen in verschiedenen Bereichen im Land verfügbare erneuerbare Energiequellen nutzen. Im Wesentlichen geht es um drei Formen:

- > Wärme aus Wärmepumpen, Solarthermie, Geothermie und Biomasse;
- > Strom aus Wasserkraft, Wind, Photovoltaik, Geothermie und Biomasse;
- > Gas und flüssiger Treibstoff aus Biomasse.

Die Road Map skizziert, wie sich das Angebot an erneuerbaren Energien in den kommenden Jahrzehnten entwickeln würde unter der Annahme, das technisch nutzbare Potenzial der erneuerbaren Energiequellen in der Schweiz werde weitgehend erschlossen. Dabei wird die Möglichkeit des Imports erneuerbarer Energieträger bewusst ausgeklammert, zum Beispiel von Biotreibstoffen, von Strom aus Sonnen- oder Windenergie oder von solar erzeugtem Wasserstoff.

Erstmals wird hier aufgezeigt, wie viele Anlagen zur Erschliessung des Potenzials im Zeitverlauf konkret erstellt werden müssten, welche Investitionen damit verbunden wären und wie sich dies auf die Gestehungskosten von Wärme, Strom und Treibstoffen auswirken würde. Durch Vergleich mit bestehenden Nachfrageszenarien lassen sich zudem Aussagen ableiten zum Beitrag, welchen einheimische erneuerbare Energiequellen langfristig zur schweizerischen Energieversorgung leisten können.

### Veränderungen im Laufe der Zeit

Die Road Map basiert auf einem dynamischen Modell. Dieses berücksichtigt, dass die Anlagen charakteristische Merkmale aufweisen, die sich im Laufe der Zeit verändern können. Zu diesen Merkmalen gehören zunächst technische Aspekte wie die durchschnittliche Leistung bzw. die jährliche Energieproduktion der Anlagen, ihre durchschnittliche Lebensdauer, der Umwandlungswirkungsgrad sowie der Energiebedarf für Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Anlagen. Mit diesen Merkma-

len verbunden ist das technisch nutzbare Potenzial einer erneuerbaren Energiequelle. Dieses gibt das erwartete Ausmass an, in welchem eine erneuerbare Energiequelle technisch sinnvoll genutzt werden kann. Was dabei als technisch sinnvoll erachtet wird, beruht auch auf subjektiven Einschätzungen von Experten. Das Potenzial wird jeweils als produzierte Energiemenge oder als Anzahl Anlagen ausgedrückt. Der Aufbau des jeweiligen Anlagenparks soll harmonisch erfolgen, mit einem anfänglich progressiven Wachstum, einer Ausbauphase und einer Sättigungsperiode, wie dies in den Figuren 1 bis 3 (s. Seite 15) sichtbar wird. Damit können Überkapazitäten vermieden und die Kosten optimiert werden.

### Das Expertenwissen nutzen

Daneben berücksichtigt das Modell auch ökonomische Aspekte wie die Investitionskosten für die Erstellung sowie die Kosten für den Betrieb der Anlagen und deren Abnahme mit zunehmender Markterfahrung (Lernkurve). Das Modell berechnet aus diesen Vorgaben, wie viele Anlagen jährlich installiert werden müssen, wie viele Anlagen jeweils bereits installiert sind, wie viel Energie damit produziert wird und wie gross der jährliche Kapitalbedarf ist, um diesen Ausbau zu finanzieren.

Aussagen zu einer Entwicklung über einen derart langen Zeitraum sind naturgemäss mit Unsicherheiten behaftet. Die Road Map stützt sich auf das Wissen von Experten in Behörden, wissenschaftlichen Institutionen und Fachverbänden sowie auf Daten, die in der Fachliteratur publiziert wurden. Die verwendeten Daten wurden in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie (BFE), der Eidgenössischen Energieforschungskommission (CORE) und dem Paul Scherrer Institut (PSI) erarbeitet. Die Datenlage zu den einzelnen Energiequellen hat sich in den letzten Jahren stark verbessert. Mit Ausnahme der Geothermie werden heute die in der Road Map berücksichtigten Energiequellen bereits in einem Massstab genutzt, der es erlaubt, die künftige Entwicklung genauer abzuschätzen.

# Die Technologien im Überblick

Im Folgenden werden die für die Road Map getroffenen Annahmen zu den einzelnen Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen getrennt nach Nutzungsform beschrieben. Angegeben werden jeweils die im Jahr 2003 produzierte Energiemenge sowie die bei Ausschöpfung des Potenzials im Jahr 2050 produzierte Energiemenge und entsprechend die Zahl der installierten Anlagen, die Investitionskosten pro Leistungseinheit sowie die Betriebs- und Gestehungskosten pro produzierte Energieeinheit.

Eine Ausnahme hiervon gilt für den Bereich der Raumwärmeerzeugung mit Wärmepumpen, Holzheizungen und Sonnenkollektoren, wo die entsprechenden Werte für das Jahr 2070 angegeben sind. Da die Integration der Anlagen in bestehende Gebäude nicht selten mit aufwendigen baulichen Veränderungen verbunden ist, können die Potenziale dort nur im Rhythmus der Gebäudeerneuerungsrate ausgeschöpft werden. Eine vollständige Erschliessung der Potenziale ist daher nicht bereits 2050, sondern erst gegen 2070 zu erwarten.

## Wärmepumpen

Im Jahr 2003 waren in der Schweiz rund 80 000 Wärmepumpen installiert, die zusammen 1,4 TWh Wärme für Raumheizung und Warmwasser erzeugten. Der energetische Wirkungsgrad heutiger Anlagen – ausgedrückt durch die Jahresarbeitszahl – beträgt im Schnitt 2,8. Neuere Messungen zeigen, dass die Jahresarbeitszahl bei neuen Anlagen inzwischen deutlich über 3 liegt. In den nächsten Jahrzehnten dürfte sie nochmals markant ansteigen. Die Road Map geht davon aus, dass 2070 fünf Mal mehr Wärmepumpen installiert sein werden als heute, wobei die mittlere Leistung sich von heute rund 10 kW auf 20 kW verdoppelt, da zunehmend auch der Warmwasserbedarf mit Wärmepumpen gedeckt wird und grössere Bauten mit Wärmepumpen ausgerüstet werden.

Das Potenzial für die Wärmeproduktion aus Wärmepumpen wird auf 15,6 TWh geschätzt. Limitierend ist dabei weniger die Verfügbarkeit der Wärmequellen (Luft, Erde, Wasser) als der Bedarf: In einigen Jahrzehnten

	2003	2070
Wärmeproduktion [TWh]	1,4	15,6
Installierte Anlagen	80 000	400 000
Investitionskosten [Fr./kW]	1600	1200
Betriebskosten [Rp./kWh]	10,7	6,0
Gestehungskosten [Rp./kWh]	17,9	10,6

*Kennzahlen zur Wärmeproduktion mit Wärmepumpen*

werden die Gebäudehüllen bedeutend besser isoliert sein und die heute noch bestehenden Öl- und Gasheizungen werden nicht vollständig durch Wärmepumpen ersetzt, sondern teilweise durch Holzheizungen und Sonnenkollektoren.

Ein bedeutender Teil der Betriebskosten für Wärmepumpen entsteht durch den Bedarf elektrischer Antriebsenergie. Die Road Map geht von einem mittleren Einkaufspreis von 15 Rp./kWh aus. Nach heutiger Erkenntnis werden auch 2070 die meisten Wärmepumpen elektrisch betrieben. Der dazu nötige Strombedarf wird auf 3,9 TWh geschätzt. Allerdings wird dieser Mehrbedarf an Strom zumindest teilweise durch Einsparungen bei den konventionellen Widerstandsheizungen kompensiert, weil diese durch andere Technologien ersetzt werden.

## Solarthermie

Solarthermische Anlagen, häufig als Sonnenkollektoren bezeichnet, erzeugen in der Regel Warmwasser für den täglichen Gebrauch. Oft wird auch einfach warme Luft zur Raumheizung erzeugt. Die heute mengenmäs-

	2003	2070
Wärmeproduktion [TWh]	0,19	4,4
Installierte Anlagen	39 000	400 000
Investitionskosten [Fr./kW]	1600	1150
Betriebskosten [Rp./kWh]	4,2	2,7
Gestehungskosten [Rp./kWh]	25,2	11,4

*Kennzahlen zur Wärmeproduktion mit Sonnenkollektoren*



sig dominierenden Luftkollektoren für die Heutrocknung wurden für die Road Map nicht berücksichtigt, um die angestrebte Darstellung der induzierten industriellen Tätigkeit im Bereich der Haustechnik nicht zu verfälschen.

Die durchschnittliche Anlagengrösse wird von heute 12 auf 18 m<sup>2</sup> steigen, die durch Anlagen belegte Fläche von 0,5 auf 7 km<sup>2</sup>. Eine Verzehnfachung der Anlagenzahl auf 400 000 bis 2070 erscheint bei einem gegenwärtigen Gebäudebestand von rund 1,5 Millionen Häusern plausibel. Die Road Map geht deshalb von einem Potenzial zur Produktion von 4,4 TWh Wärme im Jahr 2070 aus. Die grosse Zahl neu zu installierender Anlagen wird sich auf die Investitionskosten günstig auswirken, da die heute noch weitgehend manuelle Produktion stark automatisiert werden wird.

## Tiefe Geothermie

Die Technologie für die Nutzung der tiefen Geothermie in der Schweiz beruht auf dem Prinzip des Deep Heat Mining (DHM). Daneben wird Erdwärme aus oberflächennahen Bodenschichten für Heizzwecke eingesetzt. Diese Nutzung ist im Kapitel Wärmepumpen berücksichtigt. Von allen Wandlern zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist das DHM der technologisch am wenigsten ausgereifte. Das theoretische Potenzial von DHM ist sehr gross, funktionierende Anlagen existieren in der Schweiz jedoch noch nicht. Eine erste Pilotanlage wird zurzeit in der Nähe von Basel gebaut. Aufgrund der un-

	Wärme	Strom
Energieproduktion [TWh]	2,4	2,1
Installierte Anlagen	Total 20	
Investitionskosten [Fr./kW]	2500	3500
Betriebskosten [Rp./kWh]	3,3	4,3
Gestehungskosten [Rp./kWh]	5,4	6,3

*Kennzahlen zur Wärme- und Stromproduktion aus der tiefen Geothermie im Jahr 2050*

gewissen Datenlage wurde in der Road Map für das Jahr 2050 eine konservative Schätzung vorgenommen. In der Schweiz könnten vermutlich jährlich im Endausbau bis zu 6,9 TWh Strom erzeugt werden, ohne die Ressource der tiefen Erdwärme zu erschöpfen.

Trotz der bescheidenen Betriebstemperaturen von weniger als 200 °C scheint die Kombination von Stromerzeugung mit Abwärmenutzung und entsprechender Fernwärmeverteilung die wirtschaftlichste Lösung für die tiefe Geothermie zu sein. Fraglich ist hingegen, ob angesichts des 2050 deutlich geringeren Wärmebedarfs in Gebäuden der Bau neuer Fernwärmenetze wirtschaftlich vertretbar ist. Neben der kombinierten Produktion von Wärme und Strom ist auch eine reine Stromproduktion denkbar, bei der die ungenutzte Wärme in ein Fließgewässer oder durch einen Kühlturm abgeführt wird. Die Stromgestehungskosten dürften in diesem Fall allerdings mehr als doppelt so hoch sein. Für die Road Map wird angenommen, dass je 5 Anlagen mit einer Leistung von 40 MW nur Wärme oder nur Strom und 10 Anlagen Wärme und Strom kombiniert mit einer Leistung von 50 MW produzieren.

## Biomasse

Biomasse ist von allen erneuerbaren Energiequellen die heterogenste. Biogene Abfälle, Altholz, Holz aus der Forstwirtschaft, Nutzpflanzen, Ackerbaurückstände oder Speisereste können verwertet werden. Ebenso vielfältig sind die Nutzungstechnologien: Verbrennen, Vergasen, Vergären. Biomasse kann zur Erzeugung von Wärme, Strom sowie gasförmigem oder flüssigem Treibstoff verwendet werden. In der Schweiz dient die Biomasse heute überwiegend zur Wärme- und Stromerzeugung. In geringen Mengen werden auch Ethanol, Rapsmethylester und Methan zu Treibstoffzwecken hergestellt.

Die Wirtschaftlichkeit wird wesentlich durch die Kosten der Biomasse bestimmt. Die Palette reicht von Gutschriften für vermiedene Entsorgungskosten über preiswerte Reststoffe aus Sägereien bis hin zu teuren Energiepflanzen. Wirtschaftlich günstig und erprobt ist die Vergärung biogener Abfälle zu Methan und Humus. Grossmassstäblich wird Biomasse in thermischen Kraftwerken und zur Herstellung von Biotreibstoffen genutzt. Durch die Vergasung fester Biobrennstoffe oder effizientere Verbrennungsvorgänge könnten wesentlich vielfältigere Einsatzbereiche erschlossen werden. Diese Optionen sind allerdings technisch noch nicht ausgereift und heute noch relativ kostspielig.

Da nicht vorausgesagt werden kann, in welchem Bereich 2050 bzw. 2070 am meisten Biomasse eingesetzt wird, wird hier eine einfache Annahme getroffen: Je ein Viertel des Potenzials auf der Ebene der unverarbeiteten Biomasse (33 TWh Primärenergie) wird für die Erzeugung von Wärme, Strom und flüssigem Treibstoff verwendet. Ein letztes Viertel entfällt auf die Produktion von Gas, welches wiederum zur Erzeugung von Wärme oder Strom oder als Treibstoff verwendet werden kann.

### Wärme aus Biomasse

Die Erzeugung von Wärme aus Biomasse (vorwiegend Holz) ist in der Schweiz verbreitet. Hinzu kommt die Erzeugung von Wärme aus Abfällen in Kehrlichtverbrennungs- und anderen Feuerungsanlagen. 2003 wurden auf diese Weise 3,0 bzw. 2,2 TWh Nutzwärme in rund 75

	2003	2070
Wärmeproduktion [TWh]	5,2	8,4
Installierte Anlagen	54 000	124 000
Investitionskosten [Fr./kW]	1500	1100
Betriebskosten [Rp./kWh]	11,2	9,1
Gestehungskosten [Rp./kWh]	16,1	12,8

*Kennzahlen zur Wärmeproduktion aus Biomasse*

grösseren Anlagen erzeugt. Es ist davon auszugehen, dass die heute knapp 54 000 installierten Heizkessel bis 2070 auf gegen 124 000 erweitert werden. Die Betriebskosten werden wesentlich durch die Brennstoffkosten geprägt.

Insgesamt ergibt sich für das Jahr 2070 ein Potenzial von 8,4 TWh. Nicht berücksichtigt ist dabei, dass die bei der Verstromung, aber auch bei der Herstellung von Gas und bei der Vergärung anfallende Abwärme genutzt werden könnte. Immerhin handelt es sich um eine Wärmemenge im Umfang von jährlich 2 TWh.

### Strom aus Biomasse

Strom kann auf vielfältige Weise aus Biomasse erzeugt werden. Je nach Technologie wird die Biomasse zuerst in Gas, Treibstoff oder Wärme und anschliessend über Turbinen oder Motoren in Strom umgewandelt. In Zukunft ist auch denkbar, dass Brennstoffzellen eingesetzt werden. Strom wird heute in grossem Massstab bereits in 28 Kehrlichtverbrennungsanlagen gewonnen.

Die Road Map unterscheidet nicht, ob Strom in thermischen Anlagen oder in Vergasungs- oder Vergärungsanlagen erzeugt wird. Es wird angenommen, dass der durch-

	2003	2050
Stromproduktion [TWh]	0,78	3,8
Installierte Anlagen	580	2350
Investitionskosten [Fr./kW]	2500	2000
Betriebskosten [Rp./kWh]	13,6	9,3
Gestehungskosten [Rp./kWh]	17,6	12,0

*Kennzahlen zur Stromproduktion aus Biomasse*



schnittliche Wirkungsgrad von heute 30 auf 45 Prozent gesteigert werden kann. Die Betriebskosten wurden pro Anlage auf rund 40 000 Franken (2003) bzw. 30 000 Franken (2050) geschätzt. Die Rohstoffkosten variieren je nach Herkunft zwischen einer Gutschrift für vermiedene Abfallkosten und Kosten von bis zu 10 Rp./kWh. Für die Studie wurde ein Mittelwert von 6 Rp./kWh angenommen.

### Gas aus Biomasse

Biogas erhält man durch Vergärung oder Vergasung. Ersteres wird in der Schweiz seit Jahren auf kommunaler Ebene im industriellen Massstab durch Kompogas und in der Erzeugung von Deponiegas getan. Klärgas wird in Kläranlagen und in landwirtschaftlichen Biogasanlagen erzeugt. Die Vergasung hingegen ist technisch noch nicht ausgereift, verspricht aber im industriellen Massstab Kostenvorteile bei der Nutzung verholzter, fester Biomasse. Heute wird der überwiegende Teil des erzeugten Biogases zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt; der Rest wird ins Gasnetz eingespeist sowie als Treibstoff eingesetzt.

Es wird angenommen, dass künftig neben vielen kleinen Anlagen auch Grossanlagen mit einer Leistung von einigen 10 MW realisiert werden. Dadurch wird die mittlere Leistung der Anlagen stark ansteigen. Auch bei der Gasherstellung sind die Rohstoffkosten ein entscheidender Faktor. Für Biogasanlagen fallen heute praktisch keine Kosten für die Biomasse an: Die Landwirte setzen ihre Gülle zum Nulltarif ein, Kompogas erhält eine Gutschrift für die abgenommene Biomasse, und Deponiegas

	2003	2050
Gasproduktion [TWh]	0,69	5,0
Installierte Anlagen	70	830
Investitionskosten [Fr./kW]	2000	1500
Betriebskosten [Rp./kWh]	10,0	11,7
Gestehungskosten [Rp./kWh]	15,2	12,7

*Kennzahlen zur Gasproduktion aus Biomasse*

ist auch gratis, weil es sonst abgefackelt werden muss. Auch Betreiber von Klärgasanlagen müssen für die eigentliche Biomasse keine Vergütung leisten, sondern erhalten Gutschriften für die Entsorgung. Deshalb wurde für die Berechnung ein Mittelwert von 1 Rp./kWh für die Brennstoffkosten angenommen. Bis 2050 dürften diese Kosten auf durchschnittlich 4 Rp./kWh ansteigen, da nicht die ganze Erzeugung von Biogas auf solchen günstigen Quellen beruhen wird. Dies wird insbesondere bei grossen Vergasungsanlagen der Fall sein.

### Flüssiger Treibstoff aus Biomasse

Aus Biomasse werden vor allem zwei Formen von flüssigem Treibstoff erzeugt: Biodiesel (vorwiegend Rapsmethylester) und Ethanol aus zuckerhaltigen Pflanzen. Die Herstellung von Rapsöl ist in Deutschland weit fortgeschritten, Ethanol wird vor allem in Brasilien, in den USA und in Frankreich hergestellt. Welche Technologien für die Herstellung von Biotreibstoffen verwendet werden, wurde in der Road Map offengelassen. Sie sind im Ausland erprobt und können in relativ kurzer Zeit in der Schweiz eingesetzt werden.

	2003	2050
Treibstoffproduktion [TWh]	0,021	5,8
Installierte Anlagen	1	50
Investitionskosten [Fr./kW]	2500	1500
Betriebskosten [Rp./kWh]	16,0	11,2
Gestehungskosten [Rp./kWh]	21,7	12,5

*Kennzahlen zur Produktion flüssiger Treibstoffe aus Biomasse*

## Photovoltaik

Photovoltaik bezeichnet die direkte Umwandlung von Solarstrahlung in Strom. Photovoltaikanlagen können in die Gebäudehülle integriert werden und werden damit zu einem Teil der Gebäudetechnik. Allerdings produzieren die Anlagen nur während eines kleinen Teils der Zeit Strom. Dieser ist zudem nicht frei abrufbar und kann nur indirekt über das Netz gespeichert werden.

Das Flächenpotenzial der Photovoltaik beschränkt sich in der Schweiz im Wesentlichen auf die Gebäudehülle. Freilandanlagen werden die Ausnahme sein und wurden deshalb nicht berücksichtigt. Unterstellt man als begrenzende Grösse die verfügbare Dachfläche mit geeigneter Orientierung zur Sonne, so liesse sich eine installierte Leistung von 14 000 MW realisieren. Limitierend ist jedoch nicht die verfügbare Fläche, sondern die Einbindung in das bestehende Stromnetz, da die Leistung bei fehlender Solarstrahlung durch andere Erzeuger kompensiert werden muss. Damit wird die Netzregelung für die Photovoltaik zum kritischen Faktor. Um das Potenzial korrekt abschätzen zu können, fehlen heute die Grundlagen. Unklar ist insbesondere, wie die Erträge der Photovoltaik zeitlich mit denjenigen anderer erneuerbarer Stromquellen korrelieren.

Variante 1	2003	2050
Stromproduktion [TWh]	0,017	1,9
Installierte Anlagen	1580	80 000
Investitionskosten [Fr./kW]	7500	2200
Betriebskosten [Rp./kWh]	5,7	3,4
Gestehungskosten [Rp./kWh]	78,6	13,4
Variante 2	2003	2050
Stromproduktion [TWh]	0,017	5,7
Installierte Anlagen	1580	240 000

*Kennzahlen zur Stromproduktion aus Photovoltaik: Bei Variante 1 wird die gesamte installierte Leistung auf 2000 MW ausgebaut, bei Variante 2 auf 6000 MW. Die Investitions-, Betriebs- und Gestehungskosten sind bei beiden Varianten gleich gross.*

Im Rahmen der Road Map wurden deshalb zwei Varianten berücksichtigt:

- > Variante 1: Die Photovoltaik wird auf eine Leistung von insgesamt 2000 MW ausgebaut. Dies kann mit der heutigen Regelkapazität und Netztechnik gerade noch als variabel anfallende Leistung absorbiert werden.
- > Variante 2: Die Photovoltaik wird auf eine installierte Leistung von 6000 MW ausgebaut. Berücksichtigt wird dabei, dass neue, frei abrufbare Quellen wie tiefe Geothermie und Biomasse sowie mögliche, sich zeitlich ergänzende Erträge aus Wasser und Wind zur Glättung der Schwankungen beitragen können.

Das angenommene maximale Potenzial von rund 5,7 TWh entspricht einer Dachfläche von 30 km<sup>2</sup>, also rund 10 Prozent der in der Schweiz vorhandenen Dachfläche. Die mittlere Leistung der Photovoltaikanlagen dürfte von rund 12 auf 25 kW ansteigen; einerseits werden bei der grossmasstäblichen Umsetzung vermehrt grössere Anlagen gebaut, andererseits wird der mittlere Modulwirkungsgrad im Verlauf der nächsten 50 Jahre von heute 13 auf 21 Prozent ansteigen.

## Windkraft

Die Windenergie hat in den letzten Jahren international einen unerwartet raschen Aufschwung erlebt. An sehr guten Standorten im Ausland kann bereits zu konkurrenzfähigen Bedingungen Strom produziert werden. Die Stromgestehungskosten sind schneller gesunken als angenommen. In der Schweiz wird Windenergie noch kaum genutzt. Vorteilhaft ist, dass die besten Bedingungen vorwiegend im Winterhalbjahr herrschen. Die Windenergie bietet sich damit als Ergänzung zur Wasserkraft und zum Solarstrom an.

Berücksichtigt man aus wirtschaftlichen Gründen nur Standorte, an denen Windgeschwindigkeiten von über 4,5 m/s im Jahresmittel herrschen und die eine gewisse Planungssicherheit gewährleisten, da sie sich in bebautem Gebiet befinden, resultiert ein Potenzial von 1500 Windkraftwerken. Dabei lassen sich zwei Anlagentypen



1 TWh. Höhere Anforderungen an die Restwassermengen könnten allerdings dazu führen, dass die Steigerung geringer ausfällt.

Die Road Map geht für die Grosswasserkraft von mittleren Gestehungskosten von 6 Rp./kWh aus, für die Kleinwasserkraft von 11,6 Rp./kWh. Langfristig werden die Kosten der Stromerzeugung aus Wasserkraft durch Faktoren bestimmt, die sich teilweise kompensieren. Die vollständige Abschreibung der Anlagen sowie der Einsatz effizienterer Anlagen werden sich günstig auf die Gestehungskosten auswirken. Dem stehen verschärfte

	2003	2050
Stromproduktion [TWh]	0,005	1,2
Installierte Anlagen	6	650
Investitionskosten [Fr./kW]	1900	1500
Betriebskosten [Rp./kWh]	6,7	3,8
Gestehungskosten [Rp./kWh]	27,2	12,5

*Kennzahlen zur Stromproduktion aus Windkraft*

unterscheiden: Windparks, die gesamthaft 1,2 TWh erzeugen, sowie Einzelanlagen an spezifischen Standorten, die gesamthaft weitere 2,8 TWh Strom pro Jahr liefern. Im Einklang mit dem für die Schweiz in einem breit abgestützten Konsultationsprozess erarbeiteten Konzept Windenergie wird hier lediglich das Potenzial der Windparks übernommen.

## Wasserkraft

Die Wasserkraft ist mit einer mittleren Produktions-erwartung von 34 TWh ohne Zweifel die am meisten genutzte erneuerbare Energiequelle. Allerdings ist das Potenzial in der Schweiz praktisch ausgeschöpft. Die vorliegende Studie geht von einer möglichen Steigerung von 3 TWh bis zum Jahr 2050 aus. Dies wird zum einen durch Effizienzsteigerungen der eingesetzten Maschinen erreicht (Erhöhung der mittleren Produktions-erwartung um 2 TWh), zum anderen durch den Ausbau insbesondere der Kleinwasserkraftwerke (< 300 kW) um

Grosskraftwerke	2003	2050
Stromproduktion [TWh]	34,0	36,0
Installierte Anlagen	500	500
Gestehungskosten [Rp./kWh]	6,0	6,0

Kleinkraftwerke	2003	2050
Stromproduktion [TWh]	0,3	1,3
Installierte Anlagen	1000	2000
Investitionskosten [Fr./kW]	1800	1800
Gestehungskosten [Rp./kWh]	11,6	11,6

*Kennzahlen zur Stromproduktion aus Wasserkraft*

Anforderungen an die Restwassermengen gegenüber. Die Road Map geht deshalb davon aus, dass die Gestehungskosten über den gesamten Zeitraum real konstant bleiben werden.

# Die Bilanz aus energetischer Sicht

**Die Berechnungen zeigen, dass die Strom-, Wärme- und Treibstoffproduktion aus erneuerbaren Energieträgern in den nächsten 50 Jahren deutlich gesteigert werden könnte. Allerdings erfordert dies markante jährliche Zuwachsraten.**

Welchen effektiven Beitrag zur Energieversorgung können die einheimisch verfügbaren erneuerbaren Energiequellen bis 2050 liefern, wenn sie im oben beschriebenen Umfang genutzt werden? Das für diese Studie verwendete Modell berechnet die zeitliche Dynamik dieses Ausbaus auf der Stufe einzelner installierter Anlagen pro Nutzungsform und Technologie. Im Folgenden ist graphisch dargestellt, wie sich die mit diesen Anlagen produzierte Energiemenge sowie deren Gestehungskosten entwickeln (s. Seite 15).

## Wenig graue Energie

*Der Energiebedarf für Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Anlagen ist – abgesehen von der Photovoltaik und den Wärmepumpen – in den meisten Fällen gering.*

Die für Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Anlagen benötigte Energie wird hier nicht explizit ausgewiesen. In den meisten Fällen ist dieser Bedarf klein und würde die Graphiken unübersichtlich machen. Markant sind der Bedarf an Energie zur Herstellung bei der Photovoltaik sowie der Bedarf an Betriebsenergie bei den Wärmepumpen. So werden bei Letzteren im Endausbau der Umwelt zwar 15,6 TWh erneuerbare Wärme entzogen; dafür müssen jedoch 3,9 TWh Strom eingesetzt werden, weshalb die Nettoenergieproduktion lediglich 11,7 TWh beträgt.

## Stromproduktion

Durch den in der Road Map beschriebenen Ausbau steigt die Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen in der Schweiz bis 2050 im Vergleich zu heute um 15 TWh (Fig. 1). Inklusive der Stromproduktion aus den bereits bestehenden Wasserkraftwerken resultiert eine Stromproduktion von 50,1 TWh. Die Wasserkraft wird unter den erneuerbaren Energien als Stromlieferantin mit einem Anteil von 75 Prozent dominant bleiben.

	2003	2050
Photovoltaik	0,017	5,7
Biomasse	0,78	3,8
Geothermie	-	2,1
Windenergie	0,005	1,2
Wasser Kleinkraftwerke	0,3	1,3
Wasser Grosskraftwerke	34,0	36,0
<b>Total</b>	<b>35,1</b>	<b>50,1</b>

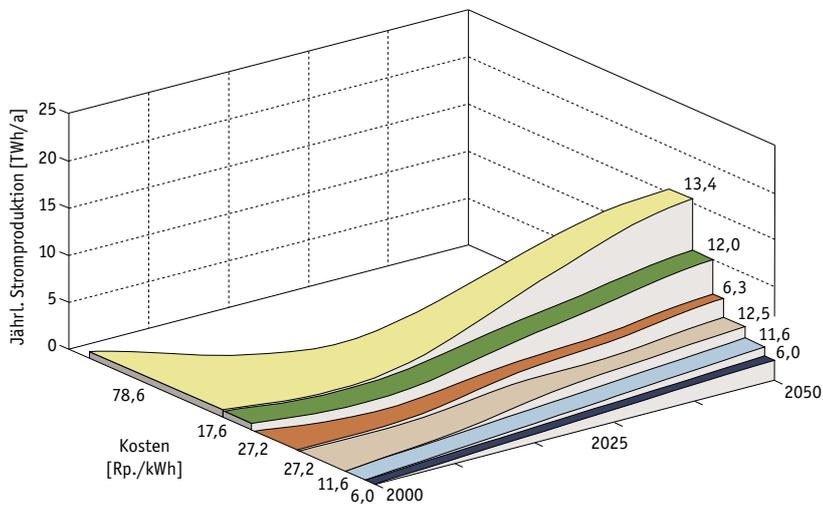
*Vergleich der Stromproduktion (in TWh) aus erneuerbaren Energiequellen in den Jahren 2003 und 2050. Die Zahlen zur Photovoltaik basieren auf dem Szenario 2 (Ausbau der installierten Leistung auf 6000 MW). Die Werte für die Wasserkraft entsprechen der mittleren erwarteten Produktion.*

	2003	2050
Wärmepumpen	1,4	11,3
Biomasse	5,2	7,2
Solarthermie	0,19	3,4
Geothermie	-	2,4
<b>Total</b>	<b>6,8</b>	<b>24,3</b>

*Vergleich der Wärmeproduktion (in TWh) aus erneuerbaren Energiequellen in den Jahren 2003 und 2050*

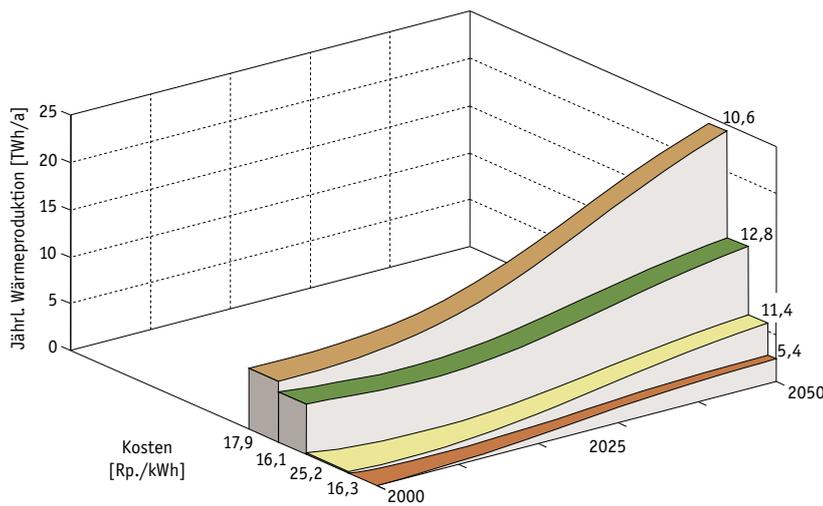
	2003	2050
Flüssige Treibstoffe	0,021	5,8
Gas	0,69	5,0
<b>Total</b>	<b>0,71</b>	<b>10,8</b>

*Vergleich der Gas- und Treibstoffproduktion (in TWh) aus erneuerbaren Energiequellen in den Jahren 2003 und 2050*



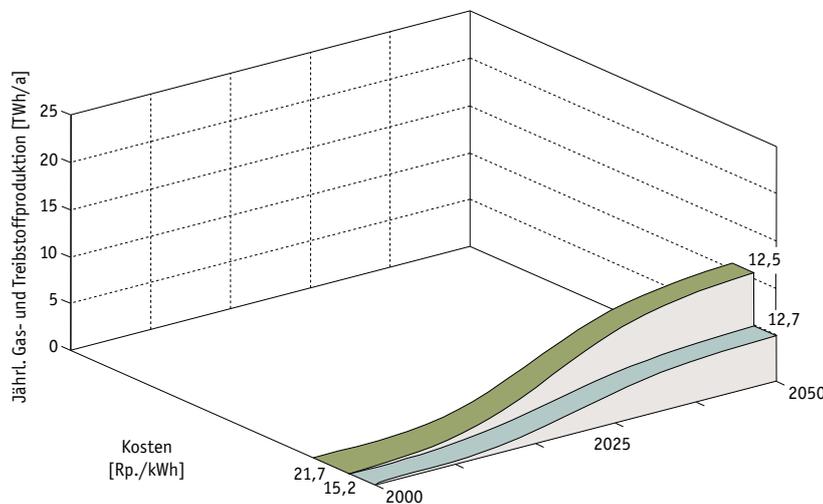
- Photovoltaik
- Biomasse
- Geothermie
- Windenergie
- Wasser Kleinkraftwerke
- Wasser Grosskraftwerke (Zubau)

Fig. 1: Zeitlicher Verlauf der Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen. Die Breite der Bänder entspricht den Gesteungskosten. Die dargestellte Stromproduktion erfolgt zusätzlich zu derjenigen der bestehenden Wasserkraftwerke.



- Wärmepumpen
- Biomasse
- Solarthermie
- Geothermie

Fig. 2: Zeitlicher Verlauf der Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energiequellen. Die Breite der Bänder entspricht den Gesteungskosten.



- Flüssiger Treibstoff
- Gas

Fig. 3: Zeitlicher Verlauf der Gas- und Treibstoffproduktion aus Biomasse. Die Breite der Bänder entspricht den Gesteungskosten.



Strom aus Biomasse, tiefer Geothermie, Photovoltaik und Windkraft liefern je Beiträge im einstelligen Prozentbereich. Die teuerste Variante Photovoltaik würde im Ausbauszenario mit 6000 MW gegen Ende des Beobachtungszeitraums 11 Prozent beitragen.

### **Wärmeproduktion**

Wie bereits beschrieben, ist eine vollständige Erschliessung der Potenziale bei Wärmepumpen, Holzheizungen und Sonnenkollektoren nicht bereits 2050,

#### **Ein ambitioniertes Ziel**

*Die Berechnungen zeigen, dass die Erschliessung der Potenziale in den nächsten 50 Jahren technisch machbar ist. Allerdings braucht es dazu grosse Anstrengungen.*

sondern erst gegen 2070 zu erwarten. Um eine Vergleichbarkeit der Werte herzustellen, wird hier davon ausgegangen, dass die Potenziale – und entsprechend die Zahl der installierten Anlagen – bis 2050 erst zu drei Vierteln realisiert sein werden.

Die Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energiequellen in der Schweiz nimmt somit der Road Map zufolge bis 2050 im Vergleich zu 2003 um 17,5 TWh auf 24,3 TWh zu (Fig. 2). Im Endausbau im Jahr 2070 wird die Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energiequellen 30,9 TWh betragen. Bei der Wärmebereitstellung leisten Wärmepumpen und Biomasse die grössten Beiträge, gefolgt von Sonnenkollektoren und tiefer Geothermie. Die heute bestehenden 170 000 Haustechnikanlagen werden bis 2050 auf 740 000 Anlagen erweitert. Zu den rund 430 000 Wärmepumpen und Biomassefeuerungen kommen 310 000 weitere Anlagen zur Wärmegewinnung hinzu, die in die Gebäudehülle integriert werden.

### **Treibstoffe**

Besonders attraktiv ist die Produktion chemischer Energieträger aus erneuerbaren Energiequellen, da diese sehr gut gespeichert und effizient genutzt werden können. 2050 ist eine Produktion von 5,8 TWh in Form

flüssiger Treibstoffe möglich, beim Gas eine Produktion von 5,0 TWh (Fig. 3). Der letzte Wert bezeichnet den Energiegehalt des Gases, welches direkt als Treibstoff genutzt oder allenfalls in Strom und Wärme umgewandelt wird, wie dies bereits heute bei dem zur Hauptsache in Klärgasanlagen produzierten Gas geschieht. Die in der Tabelle genannte Gasproduktion ist entsprechend in Fig. 1 und 2 im Anfangswert für Biomasse berücksichtigt. Direkt als Treibstoff genutzt wurde Biogas im Jahr 2003 lediglich im Umfang von 0,006 TWh.

Die längerfristige Option der Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen wurde nicht vertieft untersucht, da sie nach heutigem Kenntnisstand bis 2050 keinen bedeutsamen Beitrag zu liefern verspricht.

### **Keine Engpässe absehbar**

Die Berechnungen zeigen, dass die vollständige Erschliessung der Potenziale bis 2050 bzw. für den Bereich Wärme bis 2070 machbar ist. Kapazitätsengpässe bei der Herstellung und Montage von Anlagen, Energieaufwendungen und Nettokapitalbedarf sind keine limitierenden Faktoren. Die Berechnungen zeigen aber auch, dass der vorgeschlagene Ausbau ambitioniert ist und teilweise beträchtliche jährliche Zuwachsraten erfordert.

# Die Bilanz aus wirtschaftlicher Sicht

**Der in der Road Map vorgeschlagene Ausbau der erneuerbaren Energiequellen ist auch aus finanzieller Sicht machbar. Ein weiteres Zuwarten mit der Erschliessung könnte sich jedoch als volkswirtschaftlich problematisch erweisen.**

Die Road Map beschränkt sich darauf, die Entwicklung der Energieproduktion ab Anlage zu modellieren. Entsprechend werden im Modell die Gestehungskosten an der «Abgabeklemme» zum Verbraucher bzw. an das jeweilige Netz berechnet. Allfällige Mehrkosten für die Einbindung dieser Energie in bestehende oder noch zu bauende Netze werden nicht berücksichtigt. Ebenso wenig eingeschlossen sind Zusatzkosten für eventuelle Ausgleichsleistungen bei variabel anfallenden Stromlieferungen aus erneuerbaren Energiequellen sowie die Wärmeverteilungskosten bei der tiefen Geothermie.

Es wird zudem angenommen, die Energie aus erneuerbaren Energiequellen könne zu den jeweiligen Gestehungskosten abgesetzt werden, obwohl diese zumindest heute zum Teil beträchtlich höher sind als diejenigen nicht erneuerbarer Energiequellen. Unterstellt wird somit, die Endkonsumenten würden freiwillig oder aufgrund staatlicher Eingriffe zugunsten der erneuerbaren Energiequellen für die Mehrkosten aufkommen, indem sie einen höheren Energiepreis bezahlen.

Allerdings nehmen die Kosten für die Produktion von Energie aus erneuerbaren Quellen in den nächsten Jahren entsprechend der Lernkurve stark ab. So ist beim

Strom davon auszugehen, dass die Gestehungskosten im Jahr 2050 zwischen 6 Rp./kWh (Grosswasserkraft) und gut 13 Rp./kWh (Photovoltaik) liegen werden. Auch bei der Wärme ist mit stark abnehmenden Gestehungskosten zu rechnen. Im Jahr 2050 dürften sie zwischen 5 Rp./kWh (tiefe Geothermie) und 13 Rp./kWh (Biomasse) liegen.

## Photovoltaik als kritische Grösse

Aus den vorliegenden Daten lassen sich durchschnittliche Gestehungskosten für Strom aus erneuerbaren Energiequellen ermitteln (Fig. 4). Werden die Stromgestehungskosten aus Wasser-, Solar- und Windkraft sowie aus Geothermie- und Biomasseanlagen in einer Mischkalkulation an die Kunden weitergegeben, so verteuern sich diese bis zum Jahr 2035 maximal um 2 Rp./kWh oder rund ein Drittel. Aufgrund der weiter sinkenden Gestehungskosten wird der Zuschlag in der Mischkalkulation bis 2050 sogar noch auf 1,5 Rp./kWh abnehmen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Photovoltaik. Wird die Photovoltaik nicht auf eine Leistung von 6000 MW, sondern nur auf eine Leistung von 2000 MW ausgebaut, so werden die durchschnittlichen Gestehungskosten über den

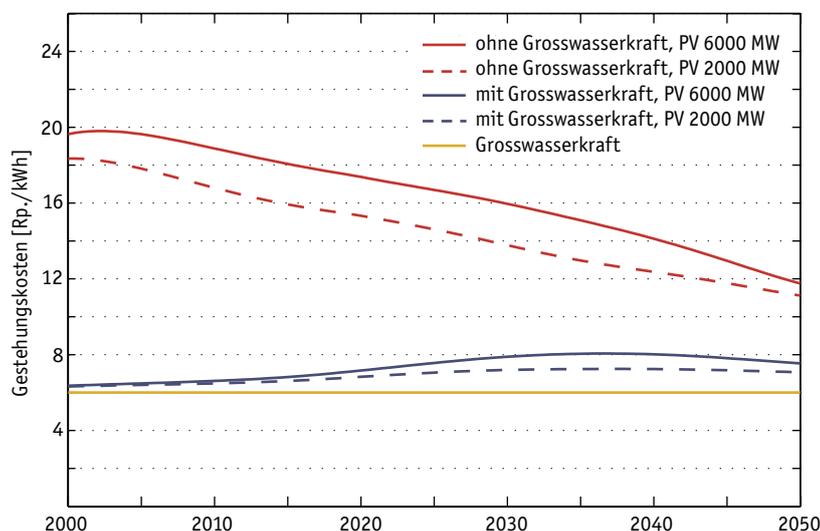


Fig. 4: Durchschnittliche Gestehungskosten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. Rot markiert sind die durchschnittlichen Gestehungskosten aus den bisher noch nicht erschlossenen erneuerbaren Energiequellen. Die blauen Linien zeigen die durchschnittlichen Gestehungskosten an, wenn man diesen Strom mit der Elektrizität aus der Grosswasserkraft (orange) verrechnet.



gesamten Beobachtungszeitraum hinweg nicht mehr als 1,5 Rp./kWh ansteigen.

Ein Teil der erneuerbaren Energiequellen steht nur unregelmässig zur Verfügung. Der Aufwand für die Einbindung dieser Energiequellen in das bestehende Stromnetz wurde hier nicht untersucht. Die Netzkosten, welche in Zukunft kaum wesentlich sinken werden, machen aber

### Finanzierung kein Hindernis

*Die Road Map geht davon aus, dass der Ausbau nicht schlagartig erfolgen wird. Deshalb bewegen sich die jährlich benötigten Nettoinvestitionen in einem volkswirtschaftlich vertretbaren Rahmen.*

heute bereits zwei Drittel der gesamten Stromgestehungskosten aus, weshalb die Umsetzung der Road Map den Strompreis nur unwesentlich erhöhen wird.

Die Road Map geht, wie die Fig. 1 bis 3 zeigen, davon aus, dass die Nutzbarmachung der erneuerbaren Energiequellen nicht schlagartig, sondern im Laufe eines halben Jahrhunderts erfolgt. Die jährlich notwendigen Nettoinvestitionen, welche für jede Nutzungstechnologie separat berechnet wurden, steigen in der Summe bis etwa

2025 kontinuierlich an. Im Jahr des grössten Zubaus beitragen sie für die Variante 1 mit 2000 MW Photovoltaik im Endausbau etwa 500 Millionen Franken, für Variante 2 mit 6000 MW sind es 750 Millionen Franken. Nach 2025 sinken die erforderlichen Nettoinvestitionen wieder.

### Überkapazitäten vermeiden

Die Finanzierung dürfte insgesamt volkswirtschaftlich kein limitierender Faktor sein, um die erneuerbaren Energiequellen entsprechend der Road Map bis 2050 nutzbar zu machen. Soll die Erschliessung der Erneuerbaren schneller erfolgen, als in der Road Map skizziert, entstehen jedoch gleichwohl volkswirtschaftlich problematische Folgen. Wird das Potenzial sehr schnell erschlossen, entstehen nach dem Aufbau in der entsprechenden Industrie Überkapazitäten, da die älteren Anlagen noch nicht ersetzt werden müssen. Vor diesem Hintergrund scheint es ratsam, mit den Investitionen in erneuerbare Energien nicht zuzuwarten, sondern diese voranzutreiben. Andernfalls müssten sie dann später umso forciert gebaut werden, was Probleme für das produzierende Gewerbe mit sich brächte.

		Anzahl installierte Anlagen		Maximal zu install. Anlagen pro Jahr	Max. jährl. Nettoinvest. [Mio. Fr.]
		2003	2050		
Wärmepumpen		80 000	320 000 <sup>1)</sup>	15 000	65
Solarthermie		39 000	310 000 <sup>1)</sup>	15 000	50
Tiefe Geothermie		–	20	1-2	20
Biomasse	Wärme	54 000	110 000 <sup>1)</sup>	2500	20
	Strom	580	2350	100	25
	Gas	70	830	65	18
	Treibstoff	1	50	3	30
Photovoltaik 2000 MW		1580	80 000	3500	100
Photovoltaik 6000 MW		1580	240 000	16 000	450
Windkraft		6	650	70	60
Kleinwasserkraft		1000	2000	20	5

*Erschliessung der erneuerbaren Energiequellen bis 2050. Die maximalen jährlichen Nettoinvestitionen fallen für die einzelnen Technologien zu unterschiedlichen Zeitpunkten an.*

<sup>1)</sup> *Bei der Wärmeerzeugung ist eine vollständige Erschliessung der Potenziale erst gegen 2070 zu erwarten. Wird die Road Map umgesetzt, werden dann zumal je 400 000 Wärmepumpen und solarthermische Anlagen sowie 124 000 Anlagen zur Wärmeproduktion aus Biomasse installiert sein.*



## Die Chancen der Erneuerbaren aktiv nutzen

**Die Schweiz verfügt zwar über ein beträchtliches Potenzial an erneuerbaren Energiequellen. Doch selbst wenn dieses vollständig erschlossen wird, benötigt das Land auch künftig nicht erneuerbare Energieträger, um seinen Energiebedarf zu decken.**

Die skizzierte Road Map erlaubt eine Reihe von Schlussfolgerungen, welche die langfristige schweizerische Energiepolitik beeinflussen könnten:

- > Die Schweiz verfügt über ein beträchtliches technisch nutzbares Potenzial an einheimischen erneuerbaren Energien. Bei Ausschöpfung dieses Potenzials erhöht sich die Produktion von Nutzwärme, Strom und Treibstoffen aus erneuerbaren Energiequellen von heute 42,6 TWh bis zum Jahr 2050 auf 85,2 TWh, im Endausbau im Jahr 2070 gar bis auf 91,8 TWh. Ohne Grosswasserkraftwerke wächst die Produktion von 7,9 TWh auf 49,2 TWh. Sofern der Energieverbrauch auf dem heutigen Niveau verharrt, könnte aber selbst mit diesem Wachstum lediglich gut ein Drittel der benötigten Energie aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung gestellt werden. Wenn der Energieverbrauch hingegen gar weiterhin wie im bisherigen Masse steigt, entspricht die zusätzlich erneuerbar produzierte Energiemenge nicht einmal dem Verbrauchszuwachs. Eine Verminderung der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energieträgern wäre dann nicht zu schaffen.

### Eine Lücke bleibt bestehen

- > Die neuen, vom Bundesamt für Energie (BFE) mit dem Zeithorizont 2035 erarbeiteten Energieperspektiven mit vier Szenarien (I - Weiter wie bisher; II - Verstärkte Zusammenarbeit; III - Neue Prioritäten; IV - Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft) zeigen, dass bei Realisierung der Road Map auch 2050 voraussichtlich über die Hälfte der verbrauchten Energie aus nicht erneuerbaren Quellen stammen wird.

Selbst im günstigsten, scharfe Massnahmen voraussetzenden Szenario IV geht der Energieverbrauch nämlich um nicht einmal ein Drittel zurück. Andererseits unterstellen die Perspektiven, dass selbst im Szenario IV der Einsatz erneuerbarer Energien in der Schweiz nur etwa die Hälfte dessen beträgt, was gemäss der Road Map möglich wäre.

### Erstes Sorgenkind Strom

- > Die Energieperspektiven rechnen mit einem langfristig wachsenden Stromverbrauch. Im Szenario IV geht der Stromverbrauch zwar bis 2035 um 5 Prozent

### Der Bedarf steigt weiter

*Die Energieperspektiven des Bundes zeigen, dass der Stromverbrauch weiter ansteigen wird. Eine vollständige Versorgung aus einheimischen erneuerbaren Energiequellen ist in absehbarer Zeit nicht realistisch.*

zurück, der Anteil des Stromverbrauchs am gesamten Energieverbrauch nimmt gleichwohl von etwa einem Viertel auf ein Drittel zu. Auch bei Umsetzung der Road Map wird es bis Mitte des Jahrhunderts nicht möglich sein, die Schweiz vollständig aus einheimischen erneuerbaren Stromquellen zu versorgen. Um die Versorgungssicherheit eigenständig zu gewährleisten, wird ein gewisser Anteil an Stromproduktion aus fossilen Energieträgern oder mit Kernkraft unvermeidbar sein.

- > Das gegenwärtig in der parlamentarischen Beratung befindliche Stromversorgungsgesetz sieht vor, bis 2030 den Anteil an Stromproduktion aus erneuerbaren



Energiequellen um 5,4 TWh zu erhöhen. Bezogen auf das heutige Stromverbrauchsniveau bedeutet das einen Zuwachs um 10 Prozent aus erneuerbaren Energiequellen. Die Road Map zeigt, dass diese 5,4 TWh machbar, aber bereits durchaus ambitioniert sind.

#### **Gute Aussichten bei der Wärme**

- > Der voraussichtlich höchste Versorgungsgrad mit einheimischen erneuerbaren Energiequellen ergibt sich im Bereich der Wärmeproduktion. Das liegt zunächst daran, dass bis 2050 der Gebäudepark wesentlich energieeffizienter sein wird. Der Wärmebedarf wird gemäss Szenario IV bis zum Jahr 2035 gegenüber heute trotz einer Zunahme der Gebäudeflächen um

#### **Abhängigkeiten beim Verkehr**

*Auch wenn die Energienachfrage im Verkehr in den nächsten Jahren sinken sollte, wird dieser noch auf lange Sicht stark von fossilen Energieträgern abhängig bleiben.*

ca. 40 Prozent abnehmen. Bei Umsetzung der Road Map können bis 2050 voraussichtlich gut 40 Prozent des Wärmebedarfs einheimisch erneuerbar zur Verfügung gestellt werden. Im Endausbau im Jahr 2070 ist es gar mehr als die Hälfte.

#### **Zweites Sorgenkind Mobilität**

- > Das zweite notorische Sorgenkind in der energiepolitischen Diskussion neben dem Strom ist der Verkehr bzw. der für die Mobilität erforderliche Energieeinsatz und hier in erster Linie die Verfügbarkeit flüssiger und gasförmiger Treibstoffe. Das bundesrätliche Szenario IV der Energieperspektiven berechnet eine Reduktion der Energienachfrage im Verkehr bis zum Jahr 2035 um ein Drittel, lediglich 16 Prozent dieses Energiebedarfs können erneuerbar gedeckt werden. Gemäss Road Map kann, bezogen auf das Verbrauchsniveau des Szenarios IV, ein Viertel einheimisch erneuerbar gedeckt werden, sofern das aus Biomasse erzeugte Gas vollständig im Verkehr eingesetzt wird. Der Ver-

kehr wird auch auf lange Sicht stark von der Verfügbarkeit fossiler Energieträger abhängig bleiben oder ein grundlegend neues Verkehrssystem erfordern.

#### **Fernziel 2000-Watt-Gesellschaft**

- > Würde der Energieverbrauch im Jahr 2050 der vom Bundesrat angestrebten 2000-Watt-Gesellschaft entsprechen, könnte der Bedarf zu etwa drei Vierteln aus einheimischen erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden. Nur ein Viertel wäre noch nicht erneuerbar zu produzieren, voraussichtlich aus Erdöl für flüssige Treibstoffe insbesondere im Flugverkehr, aus Erdgas sowie aus Kernbrennstoffen für Strom aus Kernenergie. Jede zusätzlich bereitgestellte TWh aus eigenen erneuerbaren Energiequellen ist ein Schritt von 16 Watt hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung. Eine nachhaltige Energieversorgung, die überwiegend auf einheimischen erneuerbaren Energiequellen beruht, ist also nur möglich bei einem viel tieferen Energieverbrauchsniveau als heute. Die Entwicklung der Nutzung der erneuerbaren Energiequellen, wie sie hier dargestellt wird, muss deshalb mit einer massiven Verbesserung der Energieeffizienz einhergehen.

#### **Import – eine Alternative?**

- > Die Möglichkeit des Imports erneuerbarer Energieträger wurde hier bewusst ausser Acht gelassen. Energieimporte aus erneuerbaren Quellen sind zum Teil günstiger als die Inlandproduktion. Das gilt insbesondere für Biotreibstoffe und mag auch für «grüne» Stromimporte aus Windkraftanlagen zutreffen. Das Potenzial zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist also eher höher als in der Road Map ausgewiesen.

#### **Klimaschutzziele werden nicht erreicht**

- > Wichtigste Kenngrösse für die Umweltauswirkungen der Road Map ist das Ausmass der Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Um dieses bestimmen zu können, ist eine Annahme über die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Referenzfall



zu treffen, in dem die Road Map nicht realisiert wird. Zwei Grenzfälle sind möglich: Entweder stammt der gesamte nicht erneuerbar produzierte Strom in der Schweiz im Jahr 2050 aus erdgasbetriebenen Gas- und Dampf-Kraftwerken (GuD) oder aus Kernkraftwerken (KKW).

Im ersten Fall werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei etwa 50 Millionen Tonnen liegen – sofern ebenso viel Energie verbraucht wird wie heute und eine leichte Umlagerung von Heizöl auf Strom stattfindet. Im zweiten Fall mit KKW liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2050 bei etwa 39 Millionen Tonnen. Bei Umsetzung der Road Map würden im GuD-Fall die CO<sub>2</sub>-Emissionen rund 38 Millionen Tonnen betragen, im KKW-Fall rund 32 Millionen Tonnen. Das entspricht einer Reduktion um 24 bzw. 18 Prozent, mithin also ein durchaus beachtlicher Beitrag. Dieser reicht jedoch nicht aus, um das erwähnte langfristige Klimaschutzziel von 1 Tonne CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf, d.h. rund 7 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050, zu erreichen. Das gilt auch für den Fall eines Energieverbrauchsrückgangs gemäss Szenario IV der Energieperspektiven in Kombination mit der Umsetzung der Road Map.

### **Dringender Handlungsbedarf gegeben**

- > Die Realisierung der Road Map ist mit Mehrkosten verbunden, die aus volkswirtschaftlicher Sicht als tragbar bezeichnet werden können. Einzelwirtschaftlich bleiben die erneuerbaren Energieträger aber im Vergleich mit herkömmlichen Energieträgern noch teuer. Selbst ein Szenario mit einem Rohölpreis von 100 US-Dollar pro Fass bringt hier keine fundamentalen Änderungen mit sich, wie im Rahmen der Perspektivarbeiten gezeigt wurde. Ohne flankierende politische Massnahmen wird das in der Road Map skizzierte Potenzial wohl nur zu einem kleinen Teil oder dann verzögert unter erhöhtem Zeitdruck und mit unerwünschten volkswirtschaftlichen Folgen genutzt werden.

### **Die Politik ist gefordert**

Die Road Map macht keine Aussagen dazu, welche politischen Rahmenbedingungen erforderlich oder auch nur hilfreich wären, damit die Potenziale zur Nutzung der inländisch verfügbaren erneuerbaren Energien tatsächlich in der skizzierten Weise bis 2050 ausgeschöpft werden könnten. Sie zeigt lediglich die technischen und wirtschaftlichen Konsequenzen auf, wenn die Schweiz die vorhandenen Möglichkeiten nutzen würde. Wie die Energieperspektiven des Bundes erwarten lassen, wird ein ganzes Bündel flankierender politischer Massnahmen geschnürt werden müssen, soll die hier vorgestellte Road Map Realität werden. Eine aktive, griffige Energiepolitik ist jetzt und in den kommenden Jahren vonnöten, um die sich bietenden Chancen für die langfristige Sicherstellung einer ausreichenden, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energiequellen zu nutzen.

## Datenbasis

Die vorliegende Broschüre basiert auf der Studie «Road Map für die erneuerbaren Energien in der Schweiz bis 2050 – Eine Analyse der Potenziale erneuerbarer Energien und ihrer Nutzung in der Schweiz» zuhanden der Energiekommission der SATW, verfasst von Dr. Markus Real, Zürich.

An dieser Studie haben folgende Personen mitgearbeitet:

- > Simulationen, Methodik der dynamischen Analyse und deren Auswertung: Dr. Hans-Peter Bader, Ruth Scheidegger, EAWAG, Dübendorf
- > Erarbeiten der kumulierten Energieaufwendungen: Dr. Mireille Faist Emmenegger, Dr. Rolf Frischknecht, esu Services, Uster
- > Fachliche Mitarbeit: Dr. Andreas Gut, Bundesamt für Energie, Bern; Prof. Dr. Alexander Wokaun, Paul Scherrer Institut, Villigen
- > Graphiken: Thomas Bosshard, ETH Zürich

Für einzelne Zahlenwerte kam die Energiekommission der SATW aufgrund interner Diskussionen mit weiteren Experten zu leicht abweichenden Ergebnissen.

## Weiterführende Literatur

- Bader, H.P., Scheidegger, R., Real, M.: Global renewable energies: A dynamic study of implementation time, greenhouse gas emissions and financial needs. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 6 (2), 73–148 (2004).
- Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2003. Bestellnummer 805.005.03D (2004).
- Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2003. Bestellnummer 805.520.7D (2004).
- Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R.: Anteil erneuerbarer Energien an einer zukünftigen Energieversorgung der Schweiz – KEA (nicht erneuerbar) und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Interner Bericht ESU-Services, im Auftrag des Projektes Road Map Erneuerbare Energien Schweiz der SATW (2004).
- Hirschberg, S. et al.: BFE-Energieperspektiven: Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen (2004).
- Jochem, E. et al.: Steps towards a 2000 Watt-Society: Developing a White Paper on Research & Development of Energy-Efficient Technologiess. CEPE/ETH and novatlantis, Zürich (2002).
- Kiener, E.: Nachhaltige Energieversorgung. Bericht zur SATW-Jahrestagung 2004. SATW-Schrift Nr. 38 (2005).
- Kunz, S. et al.: Konzept Windenergie Schweiz. Grundlagen für die Standortwahl von Windparks. Hrsg.: BFE, BUWAL, ARE (2004).
- Oettli, B. et al.: Potenziale zur energetischen Nutzung von Bio-masse in der Schweiz. Schlussbericht. BFE-Schriftenreihe (2004).
- Pabst, B.: Deep Heat Mining: Potenzialstudie für die Schweiz (2000).
- Real, M.: A methodology for evaluating the metabolism in the large scale introduction of renewable energy systems. Diss. ETH Zürich 12937 (1998).
- Rognon, F.: Energetische Potenziale von Wärmepumpen kombiniert mit Wärme-Kraft-Kopplung. Schlussbericht. BFE-Publikation 250044 (2005).
- SATW: CH50% – Eine Schweiz mit halbiertem Verbrauch an fossilen Energien. SATW-Schrift Nr. 30 (1999).

## Glossar

### > **Betriebskosten**

Jährliche für den Betrieb einer Produktionsanlage notwendige Aufwendungen (bezogen auf die durchschnittlich produzierte Energiemenge). Diese umfassen typischerweise die Kosten für Personal, den allfälligen Ersatz von Anlagekomponenten, Brennstoffe bzw. Hilfsenergien (z.B. Strom für Wärmepumpen) oder die Abgaben für die Nutzungsrechte einer Ressource (z.B. Wasserzinsen).

### > **Gestehungskosten**

Jährliche Produktionskosten einer Produktionsanlage (bezogen auf die durchschnittlich produzierte Nettoenergiemenge). Sie errechnen sich aus der Summe der Betriebskosten und der Kapitalkosten (jährliche Abschreibungen und Zinszahlungen) dividiert durch die produzierte Nettoenergiemenge. Gewinne sind in den Gestehungskosten nicht berücksichtigt.

### > **Investitionskosten**

Kosten der Erstellung einer Produktionsanlage (bezogen auf die Leistungseinheit). Diese umfassen die Kosten für Planung, Bau und Inbetriebnahme der Anlage.

### > **Nettoenergie**

Jährlich von einer Anlage erzeugte Energie abzüglich der vorgelagerten Energieaufwendungen für Ersatzkomponenten und Betrieb.

### > **Nettoinvestitionen**

Jährlicher Bedarf an Kapital für den Ausbau und die Erneuerung des Anlagenparks abzüglich des Erlöses, den jene Anlagen liefern, welche bereits abgeschrieben sind, aber ihre Lebensdauer noch nicht erreicht haben. Es wird davon ausgegangen, dass der Erlös vollumfänglich reinvestiert wird.

### > **Road Map**

Darstellung eines optimierten Wegs zur Erschliessung des technisch nutzbaren Potenzials der erneuerbaren Energien.

### > **Technisch nutzbares Potenzial**

Dieses gibt das erwartete Ausmass an, in welchem eine erneuerbare Energiequelle technisch sinnvoll genutzt werden kann. Was als technisch sinnvoll erachtet wird, beruht auch auf subjektiven Einschätzungen von Experten. Das Potenzial wird als produzierte Energiemenge oder als Anzahl installierte Anlagen ausgedrückt.

## Impressum

### **SATW-Schrift Nr. 39**

Zürich, Dezember 2006

#### Herausgeber

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW, Postfach, 8023 Zürich

#### Autoren

Dr. Marco Berg, Dr. Markus Real

#### Redaktion & Gestaltung

Dr. Felix Würsten, Zürich

#### Übersetzungen

Maud Capelle, The Language Studio, London

#### Druck

DAZ – Druckerei Albisrieden AG, 8047 Zürich

#### Bildnachweis

Titelseite: Montage Windturbine, Entlebuch (Suisse Eole); S. 5: Stauwehr Kraftwerk Wildegg-Brugg (Axpo Holding AG); S. 7 l.: Alterswohnheim Sur Falveng, Domat/Ems; S. 7 r.: Stade de Suisse, Bern (Solar Agentur Schweiz); S. 9 o.: KVA Thun; S. 9 u.: Blockheizkraftwerk ARA Werdhölzli, Zürich (EnergieSchweiz für Infrastruktur-anlagen); S. 11: Landwirtschaftliche Biogasanlage, Visp (BiomassEnergie); S. 13 o.: Windturbine Entlebuch; S. 13 u.: Windturbine Gütsch, Andermatt (Suisse Eole); S. 16: Wasserkraftwerk Oederlin, Obersiggenthal; S. 18: Holzkraftwerk Kleindöttingen (Proma Energie AG); S. 19: Tiefbohrung Geothermiekraftwerk Basel, Kleinhüningen (Geopower Basel AG); S. 20: Paralandwirtschaftliche Biogasanlage, Herisau (agrenum, Ing. Büro HERSENER, Wiesendangen); S. 21: Holzfeuerungsanlage, Wilderswil (Schmid AG Holzfeuerungen, Eschlikon); Rückseite l.: Stauwehr Panix; Rückseite r.: Zentrale Mapragg (Axpo Holding AG).

#### Auflage

3500 Ex. D, 1500 Ex. F, 500 Ex. E

Der Bericht kann als PDF-Datei von der Homepage der SATW heruntergeladen werden: [www.satw.ch](http://www.satw.ch)

ISBN: 3-908235-12-X



## SATW

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