

## CO<sub>2</sub>-neutraler Ersatz der Atomenergie

### Zusatzbericht

5. April 2002

---

#### 1. Ziel und Ausgangslage

Das BFE wurde am 19. Februar 2002 in der UREK-N beauftragt, einen Kurzbericht zu erstellen über den Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke durch Strombezüge im europäischen Ausland, namentlich aus Windenergie (s. Anhang 1). Zu klären sind insbesondere die Beschaffungsmöglichkeiten und –kosten sowie die Auswirkungen auf die Stromnetze und die Arbeitsplätze in der Schweiz.

Zur Unterstützung dieser Abklärungen hat das BFE die beiden Beratungsunternehmen INFRAS, Zürich und Prognos AG, Basel beigezogen (s. beiliegende Berichte). Ferner wurde ein externer Netzspezialist konsultiert (Dr. K. Werlen, Cygnus Engineering, Brig). Wertvolle Quellenhinweise hat Herr Nationalrat Dr. R. Rechsteiner vermittelt, wofür ihm das BFE bestens dankt.

Zur Ermittlung der "Versorgungslücke", die durch die Begrenzung der Betriebsdauer der Kernkraftwerke entsteht, sind verschiedene Annahmen erforderlich (s. Anhang 2). Diese basieren im wesentlichen auf den bereits in der Botschaft zu den Atominitiativen vom 28. Februar 2001 dargestellte Rahmendaten:

- Die Stromnachfrage nimmt bis 2020 massvoll zu und stabilisiert sich anschliessend.
- Die Betriebsdauer der bestehenden Kernkraftwerke wird auftragsgemäss auf 40 Jahre begrenzt. Ab 2024 (Ausserbetriebnahme KKW Leibstadt) wird auf die bestehenden langfristigen Bezugsverträge aus Frankreich verzichtet<sup>1</sup>.
- Die nicht-nukleare Stromerzeugung in der Schweiz nimmt aufgrund der unterstellten Rahmenbedingungen nur massvoll zu.
- Im Interesse der Klarheit der Darstellung wird davon ausgegangen, dass die „Versorgungslücke“ ausschliesslich mit importiertem Windstrom (je hälftig aus Onshore- und Offshore-Anlagen) geschlossen wird<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Die hängige Volksinitiative MoratoriumPlus sieht eine Betriebsdauer der KKW von 40 Jahren vor. Die von der Initiative vorgesehene Möglichkeit einer Verlängerung der Betriebsdauer um jeweils 10 Jahre aufgrund eines referendumspflichtigen Bundesbeschlusses wird in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt. In den in der Botschaft zu den Atominitiativen dargestellten Szenarien wird - im Unterschied zur vorliegenden Untersuchung - davon ausgegangen, dass die bestehenden langfristigen Bezugsverträge aus Frankreich bis zu deren Ablauf beibehalten werden und ab 2020 etwa im bisherigen Umfang neue Bezugsverträge möglich sind.

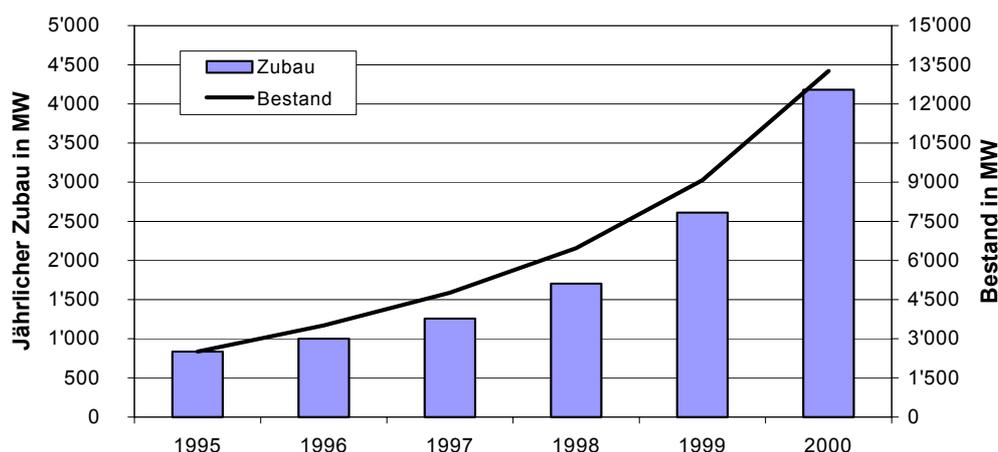
<sup>2</sup> Der Einbezug zusätzlicher nicht-nuklearer Strombeschaffungsmöglichkeiten würde weitere Annahmen und Optimierungsrechnungen erfordern.

## 2. Windenergie in Europa

### 2.1 Aktueller Stand

Ab Mitte der Neunziger Jahre hat ein starker Aufschwung der Windenergienutzung vor allem in Deutschland, Dänemark und Spanien eingesetzt. Die wesentlichen Ursachen liegen in den staatlichen Fördermassnahmen und in der erreichten Kostendegression der Windenergieanlagen. Beide Effekte haben dazu geführt, dass die Anlagen an guten Standorten heute wirtschaftlich betrieben werden können und die günstigsten Techniken sind, die eine neue erneuerbare Energie nutzen. In der EU beträgt Ende 2001 die installierte Kapazität 17'240 MW (Zuwachs im Jahr 2001 4'470 MW).

Abbildung 1: Installierte Leistung von WEA's in Europa



Quelle: Bundesverband Windenergie e.V.

prognos 2002

Der potentielle Jahresertrag einer Windenergieanlage hängt von der Standortqualität und den Windverhältnissen ab. Die Nutzung von Windenergie erfordert erhebliche Flächen. Die Verfügbarkeit von Windenergie unterliegt ferner starken Schwankungen. Mit einem entsprechenden Netzmanagement und -ausbau sowie den vorhandenen konventionellen Produktionsreserven ergaben sich daraus bisher keine unüberwindlichen Probleme.

### 2.2 Zukunftspotential

Bis 2005 wird gemäss Prognos im EU-Raum eine Verdreifachung der im Jahr 2000 installierten Leistung erwartet. Insbesondere in den Ländern mit heute noch wenigen Windanlagen aber günstigen klimatischen Bedingungen, wie Frankreich, Grossbritannien oder den Niederlanden dürften in naher Zukunft die Zahl der realisierten Projekte markant ansteigen.

Die landgestützte Windenergienutzung ist ausgereift und bietet keine wesentlichen technischen Probleme mehr. Aus technischer Sicht kann im EU-Raum gemäss Prognos die Gesamtleistung der landgestützten Windenergie

längerfristig gegenüber 2000 noch um mehr als das 30-fache gesteigert werden. In Regionen mit bereits vielen installierten Windturbinen wird es aber immer schwieriger neue Standorte zu finden. Die negativen Effekte, wie Lärm, Lichtreflexe sowie Aspekte des Landschaftsschutzes können Projekte verhindern.

Eine starke Entwicklung der Windenergie wird deshalb von Offshore-Anlagen erwartet, wobei die Potenzialschätzungen stark auseinandergehen. Die Offshore-Anlagen können die grösseren Windgeschwindigkeiten auf dem Meer nutzen und sind eine geringere Belastung für Landschaft und Bevölkerung. Heutige Offshore-Anlagen sind allerdings lediglich angepasste Versionen der Onshore-Technik. Infras erwartet, dass neue Anlagekonzepte die Kosten gegenüber heute wesentlich senken und die Zuverlässigkeit erhöhen werden.

Insgesamt – onshore und offshore – reicht das technische Windenergiepotenzial aus, um mehr als den aktuellen Strombedarf in Europa zu decken. Für die Nutzung dieses Potenzials gibt es jedoch Unsicherheiten, wie die noch fehlenden Erfahrungen mit Offshore-Windparks und die zum Teil noch ungeklärten Möglichkeiten und Kosten der zusätzlichen Reservekapazitäten, die mit zunehmender Windenergienutzung an Bedeutung gewinnen werden. Durch den, gegenüber konventionellen Kraftwerken, höheren Bedarf an Regelenergie würde bei einer starken Zunahme der Windenergienutzung in Europa die Schweizer Wasserkraft aufgewertet, wobei der Betrieb der Speicherkraftwerke vermehrt auf die Deckung von Lastspitzen ausgerichtet werden müsste und mit den Gasturbinenkraftwerken zur Zeit kostengünstige Konkurrenztechniken vorhanden sind.

Gemäss der EU-Richtlinie zur Förderung der erneuerbaren Energien soll der Anteil der regenerativen Elektrizität bis 2010 auf 22 % steigen (14 % in 1997). Es ist deshalb davon auszugehen, dass Windenergie bereits ab 2010 einen nennenswerten Anteil an der europäischen Stromproduktion haben wird. Der Umfang von europaweiten staatlichen Fördermassnahmen und die Beteiligung der Schweiz am europäischen Strombinnenmarkt auf der Grundlage des Elektrizitätsmarktgesetzes sind auch für schweizerische Windstromimporte von Bedeutung.

### **2.3 Gestehungskosten**

Die Gestehungskosten von Windenergie hängen stark von den klimatischen Bedingungen, der Qualität des Standorts, der eingesetzten Technik und der Projektfinanzierung ab. Eine aktuelle Studie im Auftrag der britischen Regierung prognostiziert Gestehungskosten im Jahre 2020 aus Onshore-Anlagen zwischen 3,5 und 6 Rp./kWh und aus Offshore-Anlagen zwischen 4,8 und 7,2 Rp./kWh. Eine andere Studie kommt für Offshore-Anlagen bei konservativen Annahmen zu Kosten im Jahr 2020 von 9,5 Rp./kWh. Prognos schätzt aufgrund verschiedener Quellen die Gestehungskosten auf 6,5 bis 10 Rp./kWh, wobei für Offshore-Anlagen ähnliche Kosten wie für Onshore-Anlagen erwartet werden. Bei Offshore-Anlagen stehen dem höheren Energieertrag höhere Investitions- und Betriebskosten gegenüber. Gemäss Infras wird heute sowohl bei Onshore- als auch Offshore-Anlagen bei günstigen Standorten mit Gestehungskosten von 5 bis 8 Rp./kWh gerechnet. Für das Jahr 2020 erwartet Infras Gestehungskosten von 6 bis 7 Rp./kWh. Bis 2020 sind noch bedeutende technische Verbesserungen zu erwarten - andererseits müssen vermehrt ungünstige Standorte erschlossen werden.

### **3. Windenergieimporte**

Ausgehend von den im Abschnitt 1 erwähnten Rahmendaten müssten 10 (2020) bis gegen 26 TWh (ab 2025) durch den Import von Windstrom aus dem europäischen Ausland bereitgestellt werden. Prognos rechnet für die Onshore-Anlagen (50 %) mit einer Vollast-Stundenzahl (kWh/kW) von 2'000 h, für die (50 %) Offshore-Anlagen mit 3'500 h. Unter diesen Annahmen müssten im Jahr 2020 Windenergieanlagen mit einer Leistung von 3'900 MW (2030: 10'000 MW) für die Deckung des Schweizerischen Importbedarfs betrieben werden. Dies entspricht 23 Prozent (58 %) der heute in Europa installierten Windenergieleistung jedoch nur wenigen Prozenten des längerfristigen technischen Potenzials.

### 3.1 Sicherstellung der Windenergiebezüge

Grundsätzlich sind gemäss Infras zwei Optionen zur Sicherung solcher Windstrombezüge denkbar:

**Langfristige Bezugsverträge:** Der Käufer schreibt eine bestimmte Leistung an Kraftwerkskapazität aus und wählt die besten Angebote aus. Als Gegenleistung werden fixe Abnahmebedingungen über längere Zeit garantiert. Das Modell hat den Vorteil, dass die Kapazitäten und Bezugsbedingungen (u.a. Preise) langfristig gesichert werden. Dies macht diese Option attraktiv für den Anlagenbetreiber, da sein Risiko klein wird. Damit können die Margen in den Angeboten knapp kalkuliert werden. Ein Nachteil ist, dass die Marktkräfte nur im Moment der Ausschreibung spielen und nachher der technische Fortschritt und allenfalls Preissenkungen keinen Einfluss mehr haben. Wie in anderen Ländern müssten die Stromlieferanten durch staatliche Eingriffe zum Abschluss entsprechender Bezugsverträge verpflichtet werden.

**Zertifikate für Windstrom:** Der Strom wird aus zertifizierten Anlagen bezogen, die festgelegten Kriterien genügen und in ein Abrechnungssystem eingebunden sind. Jede ins Netz eingespiesene Energieeinheit aus einem Windkraftwerk wird erfasst und der Produzent hat entsprechend Anrecht auf eine Anzahl von Zertifikaten, welche er über eine Börse im Markt verkaufen kann. Damit wird der Preis durch Angebot und Nachfrage bestimmt und ist nicht genau vorhersehbar. Die schweizerische Elektrizitätswirtschaft müsste aufgrund einer gesetzlichen Bestimmung neben dem Einkauf "normaler" Elektrizität zusätzlich die benötigten "grünen" Zertifikate kaufen.

### 3.2 Kosten der Windenergieimporte

Die Kosten für den Import von Windenergie setzen sich aus den Energiegestehungs-, Transport- und Reservehaltungskosten zusammen.

Wie unter Abschnitt 2.3 ausgeführt, könnten sich die Gestehungskosten im Jahr 2020 im Bereich von 6 bis 10 Rp./kWh bewegen.

Die Transportkosten hängen von den nötigen Netzinvestitionen ab. Zu berücksichtigen ist, dass neue Produktionskapazitäten in der Regel eine Netzverstärkung in der direkt betroffenen Produktionsregion erfordern, und zwar unabhängig davon, welchem Land diese Produktion vertraglich zugerechnet wird. Die Kosten der Netzverstärkung tragen entweder die Stromeinspeiser oder die Netzbetreiber der Region. Die Frage in welchem Mass im Rahmen der Marktöffnung für den Stromtransit und -export Einspeiseentgelte eingeführt werden, und wie weit Windparks davon betroffen sind, wird zur Zeit in der EU diskutiert. Mit wachsender Stromnachfrage und veränderten Standorten von Grosskraftwerken verstärkt sich generell die Notwendigkeit, bestehende Engpässe im Hochspannungs-Übertragungsnetz zu beseitigen. Die Erstellung von neuen Hochspannungsleitungen über grosse Distanzen allein aufgrund der hier untersuchten Windstromimporte in die Schweiz ist unnötig. Dafür spricht auch, dass die Übertragungsverluste in Europa im Vergleich zu den Verlusten in den Verteilnetzen und bei der Stromproduktion sehr gering sind<sup>3</sup>. Aufgrund der noch bestehenden Unsicherheiten gehen die Schätzungen von Infrastark oder Prognos stark auseinander. Infrastark rechnet für Übertragung, Netzverstärkung, eventuelle Einspeisebeschränkungen mit 1,2 - 1,4 Rp./kWh (20 % der Gestehungskosten), Prognos mit 2,0 Rp./kWh.

Weil bei schwachem und sehr starkem Wind die Windenergie nicht zur Verfügung steht, müssten im Vergleich zu einem konventionellen Kraftwerkpark zusätzliche Reservekapazitäten bereitgestellt werden, um die Stromversorgung sicherzustellen. Eine geografisch optimierte Verteilung der Windenergieanlagen in Europa würde dieses Problem entschärfen, setzt aber internationale Zusammenarbeit voraus. Die Reserveleistung könnte teils durch Speicherkraftwerke in der Schweiz, teils durch entsprechende Gestaltung der Windstrom-Importverträge gesichert werden. Aussagen über die benötigte Reservekapazität sind unsicher und hängen von den getroffenen Annahmen ab. Prognos rechnet mit einem Bedarf an Reservekapazitäten von 0,3 MW bei einer für Importe benötigten Kapazität der Windenergieanlagen von 1 MW. Der VSE weist darauf hin, dass gemäss Angaben des VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft) für jedes MW Windkraftleistung knapp 0,9 MW Reserveleistung benötigt würden. Prognos rechnet mit Kosten von 0,3 Rp./kWh Windstrom, Infrastark mit 0,5 Rp./kWh.

Insgesamt kann mit Gesamtkosten für Windenergieimporte von rund 8 - 9 Rp./kWh (Infrastark) oder von 9 bis 12 Rp./kWh (Prognos) gerechnet werden. Prognos begründet den relativ hohen Schätzwert damit, dass in Deutschland heute 10,5 Rp./kWh bezahlt werden, mit den Transportkosten also mindestens 12 Rappen. Für die

<sup>3</sup> Je nachdem, wo neue grössere Stromproduktionsanlagen, wie etwa Windparks, erstellt oder bestehende Grossanlagen, wie etwa Kernkraftwerke, ersatzlos ausser Betrieb gehen, verändern sich die Stromflüsse und physikalischen Engpässe. Wo und in welchem Ausmass Verstärkungen nötig sind, kann nur mit gesamteuropäischen Simulationsrechnungen unter bestimmten Szenarioannahmen (z.B. der Kernenergiepolitik in den verschiedenen Ländern) berechnet werden. Die gezielte Netzverstärkung verspricht Vorteile gegenüber neuen Punkt-zu-Punkt-Leitungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, die Zuverlässigkeit, die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit.

Schweiz dürfte es aufgrund der auch bei erneuerbaren Energien wirksamen Marktkräften nach Ansicht von Prognos kaum möglich sein, Windenergie billiger als die Kunden in den Produktionsregionen zu beschaffen.

Prognos hat anhand einer tiefen (Kosten von 8,5 Rp./kWh) und hohen Variante (Kosten von 12 Rp./kWh) die gesamten von 2000 - 2030 kumulierten Nettokosten des Ersatzes der bestehenden Kernkraftwerke durch Windstromimporte ermittelt. Berücksichtigt werden Ersparnisse durch die KKW-Stilllegung, die Streichung der Bezugsrechte aus Frankreich einerseits und die Zusatzkosten durch entgangene Exporterlöse sowie den Windstromimport andererseits. Die von 2004 bis 2030 kumulierten Mehrkosten der Windstrom-Import-Strategie gegenüber dem Referenzszenario gemäss Botschaft (Betriebsdauer der KKW 50 - 60 Jahre) betragen bei der tiefen Variante ca. 11,5 Mia. Fr. Im Falle der Variante hoch betragen die Mehrkosten gemäss Prognos ca. 18,6 Mia. Fr. Unter der günstigen Annahme könnte der Windstromimport geringere Mehrkosten verursachen als die in der Botschaft zu den Atominitiativen dargestellte, das CO<sub>2</sub>-Gesetz einhaltende, Strategie mit inländischen Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (Moratorium mit 40 Betriebsjahren der KKW). Nicht berücksichtigt sind die schwer erfassbaren und subjektiv zu bewertenden externen Kosten und Nutzen.

#### **4. Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Windindustrie und Beschäftigungswirkung**

Der heutige Markt für Windenergieanlagen entwickelt sich vorwiegend im Ausland. Es gibt jedoch einige Schweizer Unternehmen, die als Zulieferer der europäischen Windindustrie tätig sind. Dies betrifft insbesondere Anbieter von Leistungselektronik, Generatoren, Übertragung und Verteilung, Rotorblätter, Rückversicherung und Finanzierung sowie Planung, Projektmanagement und Systemintegration. Im Bereich der Leistungselektronik hat die Schweiz eine Führungsposition.

Der sehr begrenzte Inlandmarkt ist ein schwerwiegender Nachteil für die Entwicklung einer schweizerischen Windindustrie<sup>4</sup>. Aufgrund der schwachen Position wären Massnahmen nötig, um die Wertschöpfung zumindest teilweise in die Schweiz umzuleiten. Grundsätzlich gibt es gemäss Infrac drei Möglichkeiten:

- Falls der Strom über langfristige Bezugsverträge beschafft wird, könnte die Ausschreibung vorsehen, dass das Projekt einen schweizerischen Lieferanteil umfasst.
- Falls der Strom über Zertifikate beschafft wird, könnten spezielle Zertifikate sicherstellen, dass eine Produktionsanlage einen schweizerischen Lieferanteil aufweist.
- In bilateralen Abkommen könnten mit wichtigen Standortländern gezielt Kompensationsgeschäfte vereinbart werden.

Inwieweit diese Ansätze WTO / GATT kompatibel sind, müsste im Detail noch geklärt werden.

Die Auswirkungen auf die Beschäftigung in der Schweizer Windindustrie würde davon abhängen, wie viel der Wertschöpfung effektiv in der Schweiz realisiert werden kann. Unter der Annahme, dass für den Aufbau von rund 9'000 MW Windleistung zwischen 2015 und 2030

---

<sup>4</sup> Für die Schweiz wurde (1996) das landschaftskompatible Windpotenzial auf rund 3,5 Prozent der schweizerischen Stromnachfrage geschätzt. Die Gestehungskosten betragen heute rund 20 - 25 Rp./kWh (Mont Crosin).

- insgesamt 15 Mrd. CHF Umsatz generiert werden,
- 20 bis 40 % der Wertschöpfung in der Schweiz realisiert werden,
- 30 % der hierzu notwendigen Vorleistungen aus dem Ausland stammen,
- eine Multiplikatorenwirkung von 1,3 erreicht wird
- und die spezifische Wertschöpfung pro Arbeitsplatz 150'000 CHF beträgt,

ergäben sich gemäss den Berechnungen von Infras während 15 Jahren 1'300 bis 2'300 Arbeitsplätze, die direkt mit der Windindustrie in Verbindung stehen.

## 5. Fazit

Der Ersatz der bestehenden KKW's nach 40-jähriger Betriebsdauer durch importierte erneuerbare Energien scheint technisch und mit wirtschaftlich vertretbaren Mehrkosten möglich. Zur Durchsetzung einer solchen Strategie wären jedoch staatliche Massnahmen nötig, z.B. ein international harmonisierter Zertifikatehandel mit verpflichtenden Lieferquoten. Zum Teil gibt es, wie bei anderen Zukunftstechnologien, noch grosse Unsicherheiten, insbesondere bezüglich der Entwicklung der Marktpreise für Strom aus erneuerbaren Energien oder der Kooperationsbereitschaft der europäischen Staaten. Die Windenergie ist für die EU-Länder ein Teil der Strategie zur Erreichung ihrer Kyoto-Ziele - bei steigender Nachfrage können sich zunächst günstige Windstrompreise dem durchschnittlichen Strommarktpreis annähern. Unsicher sind auch die technische Entwicklung sowie die Kostensenkungsmöglichkeiten der Windenergie und der sie ergänzenden und konkurrierenden Techniken.

Die Entwicklung auf dem Windenergiesektor ist genau zu verfolgen, um den Anschluss an eine vielversprechende Technik nicht zu versäumen. Daneben sind im Rahmen von EnergieSchweiz auch die Verstromung einheimischer Biomasse und anderer erneuerbarer Energieträger sowie der Einsatz von Brennstoffzellen weiter zu fördern. Durch das Elektrizitätsmarktgesetz würden Rahmenbedingungen geschaffen, wie die Reziprozität im Stromaussenhandel oder die Kennzeichnung der Herkunft und Produktionsart der Elektrizität, die den Einsatz dieser Techniken erleichtern. Im Falle einer Annahme einer der Atominitiativen wären Windstromimporte eine der vielversprechenden Alternativen zu Kernenergie, zusammen mit der rationellen Stromverwendung und den übrigen erneuerbaren Energien. Weitergehende Massnahmen wären nötig, um den Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke durch fossil-thermische Kraftwerke zu vermeiden.

### Im Auftrag des BFE durchgeführte Abklärungen:

- INFRAS: CO2-neutraler Ersatz der Atomenergie – Inputs zu forcierter Windenergienutzung, 3.4.02
- Prognos AG: Ersatz der Kernenergie durch importierten Windstrom? 23.3.02