



Bern, 12. Juni 2012

Energiestrategie 2050

Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)
Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)
Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Arten, Ökosysteme, Landschaften, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: METEOTEST, Bern

Autoren: René Cattin, Beat Schaffner, Tanja Humar-Mägli, Simon Albrecht, Jan Remund, Daniel Klauser, Jürg J. Engel

Begleitung BAFU: Andreas Stalder, Claire-Lise Suter

Begleitung BAK: Oliver Martin

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Mentions légales

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Espèces, écosystèmes, paysages, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: METEOTEST, Bern

Auteurs: René Cattin, Beat Schaffner, Tanja Humar-Mägli, Simon Albrecht, Jan Remund, Daniel Klauser, Jürg J. Engel

Accompagnement OFEV: Andreas Stalder, Claire-Lise Suter

Accompagnement OFC: Oliver Martin

Remarque: La présente étude a été réalisée sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Nota editoriale

Mandante: Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), divisione Specie, ecosistemi, paesaggi, CH-3003 Berna

L'UFAM è un Ufficio del Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC).

Mandatario: METEOTEST, Bern

Autori: René Cattin, Beat Schaffner, Tanja Humar-Mägli, Simon Albrecht, Jan Remund, Daniel Klauser, Jürg J. Engel

Consulenza UFAM: Andreas Stalder, Claire-Lise Suter

Consulenza UFC: Oliver Martin

Nota: il presente studio è stato redatto su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM). La responsabilità dei contenuti è interamente del mandataro.

Imprint

Commissioned by: Federal Office for the Environment (FOEN), Species, Ecosystems, Landscapes Division, CH-3003 Bern

The FOEN is an agency of the Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications (DETEC).

Contractor: METEOTEST, Bern

Authors: René Cattin, Beat Schaffner, Tanja Humar-Mägli, Simon Albrecht, Jan Remund, Daniel Klauser, Jürg J. Engel

FOEN support: Andreas Stalder, Claire-Lise Suter

FOC support: Oliver Martin

Note: This study was prepared under contract to the Federal Office for the Environment (FOEN). The contractor bears sole responsibility for the content.

Inhalt

Impressum	2
Mentions légales	2
Nota editoriale	2
Imprint	2
Vorwort des Auftraggebers	5
Avant-propos du mandant	6
Zusammenfassung	7
Résumé	8
Méthode	8
1 Einleitung	11
1.1 Ausgangslage.....	11
1.2 Methode	11
1.3 Grundlagen.....	12
1.4 Berücksichtigte Technologie	13
2 Potenzial Windenergie	15
2.1 Theoretisches Potenzial	15
2.2 Technisches Potenzial.....	16
2.3 Potenzial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte.....	17
2.4 Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten	18
2.5 Potenzial unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte	19
2.6 Nachhaltiges Potenzial	20
3 Potenzial Sonnenenergie	22
3.1 Theoretisches Potenzial	22
3.2 Technisches Potenzial.....	23
3.3 Potenzial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte.....	25
3.4 Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten	26
3.5 Potenzial unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte	27
3.6 Nachhaltiges Potenzial	28
4 Analyse	29
4.1 Windenergie	29
4.2 Sonnenenergie	32
4.3 Vergleich der Potenziale Wind- und Sonnenenergie	35
5 Literaturverzeichnis	37
A Anteile der einzelnen Schutzobjekte	38
B Denkmalpflege und Solaranlagen	40
C Liste der Natur- und Landschaftsschutzinventare	41

Vorwort des Auftraggebers

Bundesrat und Parlament haben 2011 den schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen und am 18. April 2012 die Stossrichtung der Energiestrategie 2050 konkretisiert. Mit dem Szenario "Neue Energiepolitik" soll der jährliche Gesamtenergieverbrauch der Schweiz gegenüber der Trendentwicklung bis 2050 von heute jährlich 253 TWh um 70 TWh sinken und der Stromverbrauch von heute rund 60 TWh um 21 TWh reduziert werden. Die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien soll gegenüber heute um einen Drittel oder 25.8 TWh (inkl. Wasserkraft, plus 7.5 TWh Pumpspeicher) erhöht werden.

Es wird verschiedentlich geltend gemacht, dass das Potenzial der erneuerbaren Energien aufgrund von Konflikten mit der Umweltpolitik eingeschränkt sei. Das BAFU beauftragte deshalb die Firma Meteotest mit einer Analyse des Potenzials von Windkraft und Photovoltaik unter Berücksichtigung von ökologischen und gesellschaftlichen Aspekten, namentlich des Arten-, Biotop- und Landschaftsschutzes sowie, mit Blick auf die gebäude- und anlagegebundene Photovoltaik, des Ortsbild- und des Denkmalschutzes.

Die vorliegende Studie ist eine grossmassstäbliche Einschätzung auf der Grundlage vorhandener wissenschaftlicher Daten zu den Energiedargeboten und vorhandener GIS-Grundlagen. Sie basiert auf relativ konservativen Einschätzungen und weist auf die Abhängigkeit von weiteren technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen (z.B. Einsparungen) hin. Die für die Berechnungen verwendeten Kriterien wurden in Absprache mit dem BAFU definiert.

Die Resultate der Studie stimmen zuversichtlich. Auch ohne massive Eingriffe in Natur und Landschaft, in Ortsbilder und geschützte Gebäude, ergibt sich namentlich im Bereich der Photovoltaik mit integrierten Anlagen auf Dächern und Fassaden ein beträchtliches Potenzial. Windenergieanlagen können ausserhalb geschützter Landschaften einen gewissen Beitrag an den Zubau erneuerbarer Energien leisten, auch wenn das Potenzial für Windenergie in der Schweiz insgesamt als relativ bescheiden bezeichnet werden muss. Dies auch im Hinblick auf Konflikte mit dem Arten- und Lebensraumschutz (Zugvögel, Fledermäuse), wo noch nicht alle Probleme gelöst sind. Wenn es gelingt, diese nachhaltige nutzbaren Potenziale von Wind und Sonne zu erschliessen (oder zuzubauen), kommt die Schweiz den Zielen der Energiestrategie einen grossen Schritt näher, nämlich um rund 13 TWh bei "Szenario heute" bis hin zu geschätzten 19 TWh bei einem "Szenario morgen" unter Berücksichtigung des erwarteten technischen Fortschritts.

Willy Geiger
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Avant-propos du mandant

En 2011, le Conseil fédéral et le Parlement ont décidé de sortir du nucléaire. Le 18 avril 2012, ils ont défini les grands axes de la stratégie énergétique 2050. D'ici à 2050, en suivant le scénario « Nouvelle politique énergétique », la consommation d'énergie totale de la Suisse (aujourd'hui 253 TWh) devra être réduite de 70 TWh et la consommation d'électricité (aujourd'hui 60 TWh) d'environ 21 TWh. La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables devra quant à elle être augmentée d'un tiers, soit de 25,8 TWh (force hydraulique comprise; à quoi s'ajoutent 7,5 TWh obtenus par pompage turbinage).

On entend fréquemment que le potentiel des énergies renouvelables est limité en raison de conflits avec la politique de l'environnement. C'est pourquoi l'OFEV a chargé l'entreprise Meteotest d'analyser le potentiel de l'énergie éolienne et de l'énergie photovoltaïque en tenant compte d'aspects écologiques et sociaux, notamment de la protection des espèces, des biotopes, du paysage et, pour ce qui est de la pose de panneaux solaires sur des bâtiments et des installations, également de la protection des sites et du patrimoine.

La présente étude est une évaluation à grande échelle à partir de données scientifiques existantes sur les ressources énergétiques et des données SIG disponibles. Elle se fonde sur des estimations relativement prudentes et mentionne également d'autres facteurs d'influence tels que le contexte technique, économique ou social (p. ex. oppositions). Les critères utilisés pour les calculs ont été définis en consultation avec l'OFEV.

Les résultats de l'étude sont rassurants. En effet, ils révèlent un potentiel important dans le domaine du photovoltaïque (installations intégrées aux toits et façades) sans atteintes significative à la nature, au paysage, aux sites ou aux bâtiments protégés. Si elles ne se trouvent pas sur un site protégé, les installations éoliennes peuvent quant à elles contribuer au développement des énergies renouvelables, même si, dans l'ensemble, le potentiel de l'éolien est relativement limité en Suisse. Cette énergie peut aussi être source de conflits avec la protection des milieux naturels et des espèces (oiseaux migrateurs, chauve-souris). Si la Suisse parvient à exploiter le potentiel durable de l'éolien et du solaire, elle pourra s'approcher considérablement des objectifs de la stratégie énergétique, à hauteur de quelque 13 TWh (scénario «aujourd'hui») ou 19 TWh (scénario «demain»), pour autant que les progrès techniques attendus se concrétisent.

Willy Geiger
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Zusammenfassung

Die folgenden Tabellen zeigen die berechneten Potenziale der Wind- und Sonnenenergie.

Szenario heute

Windenergie: Nennleistung 2 MW, Nabenhöhe 100 m, Rotordurchmesser 90 m
 Sonnenenergie: Modulwirkungsgrad 15%

Potenzial	Windenergie [TWh/Jahr]	Sonnenenergie [TWh/Jahr]
theoretisches Potenzial	4'800'000	41'318
technisches Potenzial	51.8	58.4
wirtschaftliches Potenzial	4.5 m/s 14.5 5.0 m/s 8.7	26.9
Berücksichtigung von Schutzobjekten	28.3	55.5
gesellschaftliches Potenzial	Lärm 25.4 Lärm/Akzeptanz 9.8	25.8
nachhaltiges Potenzial	4.5 m/s; Lärm 3.4 4.5 m/s; Lärm/Akz. 1.9 5.0 m/s; Lärm 2.3 5.0 m/s; Lärm/Akz. 1.5	11.6

Szenario morgen

Windenergie: Nennleistung 3 MW, Nabenhöhe 120 m, Rotordurchmesser 112 m
 Sonnenenergie: Modulwirkungsgrad 20%

Potenzial	Windenergie [TWh/Jahr]	Sonnenenergie [TWh/Jahr]
theoretisches Potenzial	4'800'000	41'318
technisches Potenzial	58.5	77.9
wirtschaftliches Potenzial	4.5 m/s 15.6 5.0 m/s 9.3	35.8
Berücksichtigung von Schutzobjekten	32.1	74.0
gesellschaftliches Potenzial	Lärm 28.3 Lärm/Akzeptanz 10.7	34.4
nachhaltiges Potenzial	4.5 m/s; Lärm 3.7 4.5 m/s; Lärm/Akz. 2.0 5.0 m/s; Lärm 2.4 5.0 m/s; Lärm/Akz. 1.6	15.5

Résumé

Méthode

Le méthode choisie est l'une des méthodes habituellement utilisée en économie énergétique. Elle consiste à concentrer les potentiels en plusieurs étapes selon des conditions-cadres de plus en plus restrictives. Le principe du développement durable à en outre également été pris en compte.

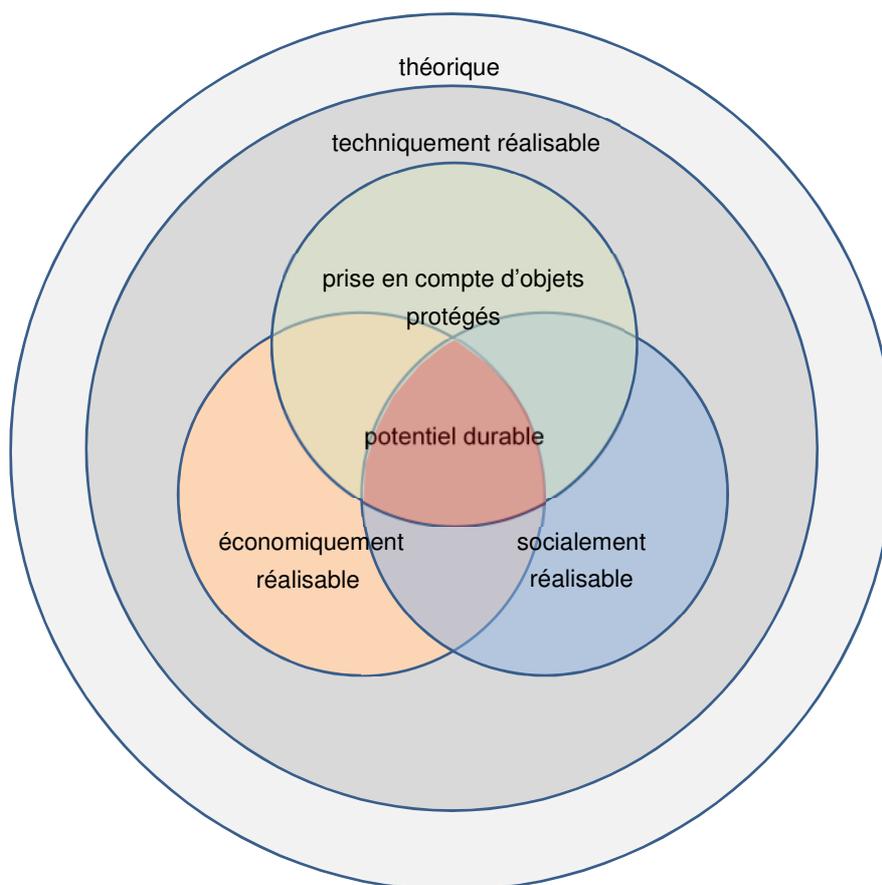


Figure 1: Schéma des différents potentiels.

Explication de la méthode utilisée:

- Le *potentiel théorique* indique la quantité d'énergie physiquement disponible.
- Le *potentiel techniquement réalisable* s'appuie sur le potentiel théorique et tient compte de l'état de la technique actuel (scénario «aujourd'hui») et dans un futur proche (scénario «demain»). L'étude examine donc les perspectives actuelles et celles d'un futur proche.

- Le potentiel techniquement réalisable a ensuite été réduit en tenant compte de trois types de contraintes indépendantes: aspects écologiques, culturels et historiques (prise en compte d'objets protégés), aspects économiques et aspects sociaux.
- Le *potentiel durable* se situe à l'intersection de ces trois domaines.

Les différents potentiels ont été calculés au moyen de critères élaborés en collaboration avec l'OFEV. Ces critères sont expliqués dans la présente étude. Ils ont été établis sur la base de travaux existants ou d'évaluations d'experts. L'objectif de cette étude a été de formuler des estimations plausibles et compréhensibles sur la base de données géographiques.

Résultats

Les tableaux ci-dessous montrent le potentiel de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire.

Scénario «aujourd'hui»

Energie éolienne: puissance nominale 2 MW, hauteur du moyeu 100 m, diamètre du rotor 90 m

Energie solaire: rendement 15%

Potentiel	Eolien [TWh/an]	Solaire [TWh/an]
théorique	4 800 000	41 318
techniquement réalisable	51,8	58,4
économiquement réalisable	4,5 m/s 5,0 m/s	14,5 8,7
en tenant compte d'objets protégés	28,3	55,5
socialement réalisable	bruit bruit/acceptation	25,4 9,8
potentiel durable	4,5 m/s; bruit 4,5 m/s; bruit/acc. 5,0 m/s; bruit 5,0 m/s; bruit/acc.	3,4 1,9 2,3 1,5
		11,6

Scénario «demain»

Energie éolienne: puissance nominale 3 MW, hauteur du moyeu 120 m, diamètre du rotor 112 m

Energie solaire: rendement 20%

Potentiel	Eolien [TWh/an]	Solaire [TWh/an]
théorique	4 800 000	41 318
techniquement réalisable	58,5	77,9
économiquement réalisable	4,5 m/s 5,0 m/s	15,6 9,3
en tenant compte d'objets protégés	32,1	74,0
socialement réalisable	bruit bruit/acceptation	28,3 10,7
potentiel durable	4,5 m/s; bruit 4,5 m/s; bruit/acc. 5,0 m/s; bruit 5,0 m/s; bruit/acc.	3,7 2,0 2,4 1,6
		15,5

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

METEOTEST wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, als Grundlage für die Erarbeitung und Diskussion der Energiestrategie 2050 des Bundes die Potenziale der Wind- und Sonnenenergie zu ermitteln. Die ausgewiesenen Potenziale sollen insbesondere umwelt- und raumplanungsrechtlichen Rahmenbedingungen Rechnung tragen und weitere gesellschaftliche Rahmenbedingungen berücksichtigen.

1.2 Methode

Es wurde nach einem in der Energiewirtschaft üblichen Ansatz vorgegangen, die Potenziale unter zunehmend restriktiven Rahmenbedingungen in mehreren Schritten einzugrenzen. Zudem wurde der Ansatz der Nachhaltigkeit berücksichtigt.

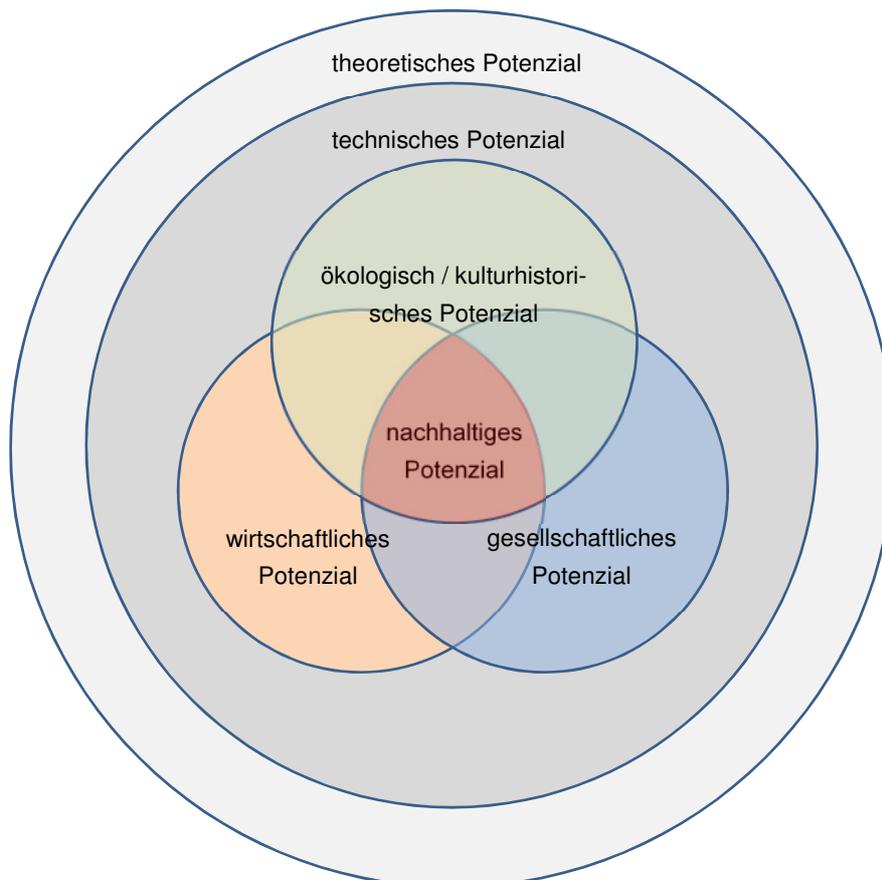


Abbildung 1: Schema der verschiedenen zu berechnenden Potenziale.

Abbildung 1 erläutert die Systematik:

- Das "theoretische Potenzial" zeigt die physikalisch vorhandene Energie auf.
- Das darauf basierende "technische Potenzial" berücksichtigt den Stand der Technik von heute (Szenario "heute") und der nahen Zukunft (Szenario "morgen"). Die Studie bezieht sich also auf die heutige Perspektive bzw. diejenige der nahen Zukunft.
- Weiter wurden die Potenziale unter Berücksichtigung von ökologischen und kulturhistorischen Aspekten (Berücksichtigung von Schutzobjekten), von wirtschaftlichen Aspekten sowie von gesellschaftlichen Aspekten unabhängig voneinander abgeschätzt.
- Die Schnittmenge dieser drei Potenziale bildet das "nachhaltige Potenzial".

Die für die Berechnung verwendeten Kriterien wurden in Zusammenarbeit mit dem BAFU erarbeitet und sind im vorliegenden Bericht erläutert. Sie berücksichtigen wo möglich vorhandene Studien. Wo entsprechende Quellen fehlten, wurden Einschätzungen von Experten verwendet. Ziel war es, unter Berücksichtigung bereits vorhandener räumlicher Grundlagendaten plausibilisierte und nachvollziehbare Schätzungen zu ermitteln.

1.3 Grundlagen

Die folgenden Studien und Daten spielten zur Ermittlung der Potenziale eine zentrale Rolle.

Windenergie

- Konzept Windenergie Schweiz (BFE, BUWAL, ARE 2004): Die im Windkonzept durch *METEOTEST* erarbeiteten Methoden bildeten die Basis zur Bestimmung der für die Windenergie geeigneten Flächen.
- Empfehlungen zur Planung von Windenergieanlagen (BFE, ARE, BAFU 2010): Zur Ermittlung des ökologischen und kulturhistorischen Potenzials wurden die Kriterien aus diesen Empfehlungen des Bundes übernommen.
- Windkarte der Schweiz (*METEOTEST* 2011): Die Windkarte der Schweiz wird durch *METEOTEST* periodisch aufdatiert. Sie diente als Datenbasis für die Berechnung des Windpotenzials.

Sonnenenergie

- Meteonorm (*METEOTEST* 2012): Die Meteonorm ist eine globale Klimadatenbank und Software. Auf Basis der enthaltenen Algorithmen wurde eine

Solarstrahlungskarte der Schweiz unter Berücksichtigung der Topografie erstellt, die als Datenbasis für die Berechnung des Potenzials der Sonnenenergie diente.

1.4 Berücksichtigte Technologie

Die Potenziale wurden hinsichtlich Technologie aus der heutigen Perspektive berechnet. Um aufzuzeigen, welche Auswirkungen der technische Fortschritt auf die Potenziale haben könnte, wurden dabei zwei Szenarien unterschieden:

- Szenario "heute": Es wird die heute standardmässig verbaute Technologie verwendet.
- Szenario "morgen": Es wird die hinsichtlich Energieausbeute beste heute verfügbare Technologie verwendet, die jedoch aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen erst in naher Zukunft in der Schweiz zum Einsatz kommen wird.

Windenergie

Für die Potenzialberechnungen (ab dem "technischen Potenzial") werden die folgenden Referenz-Windenergieanlagen berücksichtigt:

- Szenario "heute":
Nennleistung 2 MW, Nabenhöhe 100 m, Rotordurchmesser 90 m¹
Flächenbedarf² 230'000 m²
- Szenario "morgen":
Nennleistung 3 MW, Nabenhöhe 120 m, Rotordurchmesser 112 m³
Flächenbedarf 360'000 m²

Bei beiden Szenarien wird von einem Systemwirkungsgrad von 90% ausgegangen⁴. Der Systemwirkungsgrad ist der Anteil der durch die Technologie produzierten Energiemenge, die tatsächlich ins Stromnetz eingespeist wird und berücksichtigt bei der Windenergie u.a. die Anlagen-Verfügbarkeit, elektrische (Umwandlungs-) Verluste, Verluste durch hohe Turbulenz sowie Vereisungsverluste.

¹ Als Referenz-Leistungskurve wurde diejenige der Vestas V90, 2 MW verwendet.

² Der Flächenbedarf wurde aufgrund von Faustregeln zu den Abständen zwischen Windenergieanlagen abgeschätzt.

³ Als Referenz-Leistungskurve wurde diejenige der Vestas V112, 3 MW verwendet.

⁴ Dieser Wert beruht auf Erfahrungswerte von METEOTEST aus der Erstellung von Windgutachten für Windenergieprojekte.

Sonnenenergie

Für die Potenzialberechnungen der Photovoltaik (ab dem "technischen Potenzial") werden Referenz-Module mit folgenden Wirkungsgraden berücksichtigt:

- Szenario "heute": Modulwirkungsgrad 15%
- Szenario "morgen": Modulwirkungsgrad 20%

Bei beiden Szenarien wird von einem Systemwirkungsgrad von 85% ausgegangen⁵. Der Systemwirkungsgrad ist der Anteil der durch die Technologie produzierten Energiemenge, die tatsächlich ins Stromnetz eingespeist wird und berücksichtigt bei der Photovoltaik u.a. elektrische Verluste in Kabeln und Wechselrichtern, Ausfälle und Wartung sowie Minderproduktion z.B. bei hohen Temperaturen.

⁵ Reich et al 2011: Performance Ratio Revisited: Are PR > 90% Realistic? 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.

2 Potenzial Windenergie

2.1 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial ist die Summe des kinetischen Energiegehalts des Windes. Dazu wurde der kinetische Energiegehalt der Luft in jeder Säule von 1 m² Grundfläche und 0 bis 300 m Höhe über Grund berechnet.

Die Berechnungen wurden analog zum Bericht "Windenergiepotenziale der Schweiz" (METEOTEST, 2004) durchgeführt mit den folgenden Datengrundlagen:

- Die Windgeschwindigkeit auf 100 m über Grund in einem 100 m-Raster liegt aus der Windkarte der Schweiz (METEOTEST, 2011) vor.
- Die Windscherung α wurde höhenabhängig berücksichtigt⁶.
- Die Luftdichte wurde höhenabhängig berücksichtigt⁷.
- Die theoretisch verwertbare Maximalleistung durch einen idealen Rotor beträgt $\frac{16}{27}$ des Angebots (Theorie von Betz⁸).

Resultat

Theoretisches Potenzial Wind

4'800'000 TWh/Jahr

⁶ 0–1'000 m: Windscherung $\alpha = 0.14$; 1'000–2'000 m: $\alpha = 0.12$; 2'000–3'000 m: $\alpha = 0.10$; 3'000–4'000 m: $\alpha = 0.08$

⁷ gemäss Näherungsformel für die Schweiz (BFE 1999)

⁸ vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Betzsches_Gesetz

2.2 Technisches Potenzial

Das technische Potenzial ist die maximal mögliche Energiemenge, die produziert werden könnte, wenn alle Gebiete mit Windenergieanlagen bestückt würden, wo dies (mit vertretbarem technischem Aufwand) möglich wäre.

Von der Gesamtfläche der Schweiz als nutzbar bezeichnet sind diejenigen Flächen, die in keinem der folgenden Ausschlusskriterien vorkommen:

- Gebiete mit instabilem Baugrund (Geröll, Gletscher und Sümpfe)⁹
- Seeflächen¹⁰
- zu steile Gebiete (Neigung > 20%)
- bewohnte Gebiete (Gebiete mit mindestens einem ständigen Bewohner pro Hektare)¹¹
- nicht erreichbare Gebiete: keine Erschliessung mit einer Strasse von mindestens Klasse 4¹²

Auf den verbleibenden Gebieten wird aufgrund der Windkarte der Schweiz (*METEOTEST* 2011) das technische Potenzial für die Szenarien "heute" und "morgen" anhand der in Kapitel 1.4 getroffenen Definitionen berechnet.¹³

Resultat	
Szenario "heute": Technisches Potenzial Wind	51.8 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 49'623 Anlagen	
- 86% des heutigen Stromverbrauchs ¹⁴	
Szenario "morgen": Technisches Potenzial Wind	58.5 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 31'703 Anlagen	
- 97% des heutigen Stromverbrauchs	

⁹ Aus dem Datensatz VECTOR25 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo) wurden Flächen extrahiert für Z_Fluss, Z_Geroel, Z_GerGeb, Z_GerWaO, Z_GerGle, Z_Gle, Z_GerWa, Z_SumWa, Z_Sumpf, Z_SumWaO und Z_SumGeb.

¹⁰ Aus dem Datensatz VECTOR25 (Bundesamt für Landestopografie swisstopo) wurden Flächen extrahiert für Z_See.

¹¹ gemäss Volkszählung 2000

¹² Um jede Strasse bis zur 4. Klasse (aus VECTOR25, swisstopo) wurde ein Puffer von 500 m gelegt, um die erschlossene Fläche zu bestimmen.

¹³ Die Windkarte der Schweiz gibt die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit an. Für die Energieberechnung wird von einer Weibull-Verteilung mit einem k-Parameter von 2 ausgegangen.

¹⁴ Der heutige Stromverbrauch wird auf 60 TWh/Jahr angesetzt.

2.3 Potenzial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte

Um das wirtschaftliche Potenzial abzubilden, wird ein Mindestangebot an verfügbarer Energieproduktion vorausgesetzt, die für einen wirtschaftlichen Betrieb von Windenergieanlagen benötigt wird. Es werden kumulativ zu den Kriterien des technischen Potenzials die folgenden Kriterien verwendet.

- Variante 1:
Es werden nur Gebiete mit einer mittleren Windgeschwindigkeit ≥ 4.5 m/s berücksichtigt¹⁵.
- Variante 2:
Es werden nur Gebiete mit einer mittleren Windgeschwindigkeit ≥ 5.0 m/s berücksichtigt¹⁵.

Resultat	
<u>Variante 1:</u> Gebiete mit Windgeschwindigkeit ≥ 4.5 m/s	
Szenario "heute": Wirtschaftliches Potenzial Wind	14.5 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 5'304 Anlagen	
- 24% des heutigen Stromverbrauchs	
- 28% des technischen Potenzials "heute"	
Szenario "morgen": Wirtschaftliches Potenzial Wind	15.6 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 3'389 Anlagen	
- 26% des heutigen Stromverbrauchs	
- 27% des technischen Potenzials "morgen"	
<u>Variante 2:</u> Gebiete mit Windgeschwindigkeit ≥ 5.0 m/s	
Szenario "heute": Wirtschaftliches Potenzial Wind	8.7 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 2'675 Anlagen	
- 14% des heutigen Stromverbrauchs	
- 17% des technischen Potenzials "heute"	
Szenario "morgen": Wirtschaftliches Potenzial Wind	9.3 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 1'709 Anlagen	
- 15% des heutigen Stromverbrauchs	
- 16% des technischen Potenzials "morgen"	

¹⁵ auf Nabenhöhe der Referenzanlagen (100 bzw. 120 m) gemäss Windkarte der Schweiz (METEOTEST 2011)

2.4 Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten

Kumulativ zu den Kriterien des technischen Potenzials werden die folgenden Gebiete und Objekte, erweitert mit einem Pufferbereich, ausgeschlossen:

- Objekte aus nationale kulturhistorischen Inventaren wurden wie folgt berücksichtigt:
 - Bundesinventar schützenswerter Ortsbilder der Schweiz (ISOS) mit einem Puffer von 200 m
 - Inventar der historischen Verkehrswege der Schweiz (IVS) mit einem Puffer von 50 m
- Nationale Natur- und Landschaftsschutzinventare wurden mit 200 m gepuffert (die Liste der berücksichtigten Inventare befindet sich in Anhang C).
- Grundwasserschutz:
Zonen S1 und S2 (ohne Puffer)
- Wald (ohne Puffer)

Die wirtschaftlichen Aspekte gemäss Kapitel 2.3 sind in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

In Anhang A ist aufgelistet, welche Mehrpotenziale sich bei der Nicht-Berücksichtigung der einzelnen Schutzinventare sowie des Waldes ergeben.

Resultat

Szenario "heute":	
Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten Wind	28.3 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 28'223 Anlagen	
- 47% des heutigen Stromverbrauchs	
- 55% des technischen Potenzials "heute"	
Szenario "morgen":	
Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten Wind	32.1 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 18'031 Anlagen	
- 53% des heutigen Stromverbrauchs	
- 55% des technischen Potenzials "morgen"	

2.5 Potenzial unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte

Um gesellschaftliche Widerstände abzubilden, werden kumulativ zum technischen Potenzial die folgenden Ausschlusskriterien verwendet:

- Variante A:
Für die Berücksichtigung des Lärmschutzes nach der Umweltschutzgesetzgebung wird von einem Puffer von 300 m um jede Hektare mit ≥ 1 Einwohner¹⁶ ausgegangen, analog zum Konzept Windenergie Schweiz (BFE, BUWAL, ARE 2004).
- Variante B:
Der Lärmschutz wird wie in Variante A beschrieben berücksichtigt. Um die Akzeptanz für Windenergieanlagen abzubilden, wird ein Puffer von 1'000 m um Siedlungsgebiete¹⁷ ausgeschlossen. Dieser Puffer wird nur um Siedlungen definiert, nicht aber um alleinstehende Einzelgebäude oder -höfe.

Die wirtschaftlichen Aspekte gemäss Kapitel 2.3 sowie die Schutzobjekte gemäss Kapitel 2.4 sind in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Resultat	
<u>Variante A:</u> nur Lärmschutz	
Szenario "heute": Gesellschaftliches Potenzial Wind	25.4 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 19'415 Anlagen	
- 42% des heutigen Stromverbrauchs	
- 49% des technischen Potenzials "heute"	
Szenario "morgen": Gesellschaftliches Potenzial Wind	28.3 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 12'404 Anlagen	
- 47% des heutigen Stromverbrauchs	
- 48% des technischen Potenzials "morgen"	
<u>Variante B:</u> Lärmschutz und Akzeptanz	
Szenario "heute": Gesellschaftliches Potenzial Wind	9.8 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 5'363 Anlagen	
- 16% des heutigen Stromverbrauchs	
- 19% des technischen Potenzials "heute"	
Szenario "morgen": Gesellschaftliches Potenzial Wind	10.7 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 3'426 Anlagen	
- 18% des heutigen Stromverbrauchs	
- 18% des technischen Potenzials "morgen"	

¹⁶ gemäss Volkszählung 2000

¹⁷ Quelle: VECTOR25, Z_Siedl (Bundesamt für Topografie swisstopo)

2.6 Nachhaltiges Potenzial

Das nachhaltige Potenzial ist die aus heutiger Sicht unter Berücksichtigung aller oben aufgeführten Aspekte produzierbare Energie. Es ergibt sich aus der Schnittmenge der Potenziale unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte, von Schutzobjekten sowie gesellschaftlicher Aspekte.

ResultatVariante 1A: Windgeschwindigkeit ≥ 4.5 m/s, nur Lärmschutz

Szenario "heute": Nachhaltiges Potenzial Wind 3.4 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 1'222 Anlagen
 - 6% des heutigen Stromverbrauchs
 - 7% des technischen Potenzials

Szenario "morgen": Nachhaltiges Potenzial Wind 3.7 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 781 Anlagen
 - 6% des heutigen Stromverbrauchs
 - 6% des technischen Potenzials

Variante 1B: Windgeschwindigkeit ≥ 4.5 m/s, Lärmschutz und Akzeptanz

Szenario "heute": Nachhaltiges Potenzial Wind 1.9 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 646 Anlagen
 - 3% des heutigen Stromverbrauchs
 - 4% des technischen Potenzials

Szenario "morgen": Nachhaltiges Potenzial Wind 2.0 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 413 Anlagen
 - 3% des heutigen Stromverbrauchs
 - 3% des technischen Potenzials

Variante 2A: Windgeschwindigkeit ≥ 5.0 m/s, nur Lärmschutz

Szenario "heute": Nachhaltiges Potenzial Wind 2.3 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 703 Anlagen
 - 4% des heutigen Stromverbrauchs
 - 4% des technischen Potenzials

Szenario "morgen": Nachhaltiges Potenzial Wind 2.4 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 449 Anlagen
 - 4% des heutigen Stromverbrauchs
 - 4% des technischen Potenzials

Variante 2B: Windgeschwindigkeit ≥ 5.0 m/s, Lärmschutz und Akzeptanz

Szenario "heute": Nachhaltiges Potenzial Wind 1.5 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 447 Anlagen
 - 2% des heutigen Stromverbrauchs
 - 3% des technischen Potenzials

Szenario "morgen": Nachhaltiges Potenzial Wind 1.6 TWh/Jahr

Dies entspricht: - 286 Anlagen
 - 3% des heutigen Stromverbrauchs
 - 3% des technischen Potenzials

3 Potenzial Sonnenenergie

3.1 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial beinhaltet die ganze auf die Fläche der Schweiz auftreffende Solarstrahlung. Die Berechnung erfolgt auf der Grundlage der von *METEOTEST* erstellten Solarstrahlungskarte der Schweiz mit Berücksichtigung der Beschattung durch Topografie basierend auf der Periode 1981 bis 2000 (Raster von 250 x 250 m. Die Strahlungswerte wurden basierend auf den Daten und Algorithmen der Meteororm (*METEOTEST* 2012) berechnet.

Es sind diese Annahmen getroffen worden:

- Montage von Freiflächenanlagen auf der ganzen Fläche der Schweiz
- Theoretisch verwertbare Maximalleistung durch ein ideales Modul¹⁸: 85%

Resultat

Theoretisches Potenzial Sonnenenergie	41'318 TWh/Jahr
---------------------------------------	-----------------

Theoretisch-technisches Potenzial

Weiter wurde ein theoretisch-technisches mit folgenden zusätzlichen Annahmen berechnet:

- Die gesamte Fläche der Schweiz wird mit aufgeständerten Photovoltaik-Anlagen bebaut, die gegen Süden ausgerichtet sind und dadurch 15% mehr Einstrahlung erhalten. (Die Ausrichtung gegen Süden bedingt wegen des Schattenwurfs der Einzelmodule Abstände zwischen den einzelnen Modulreihen. Dadurch wird effektiv nur 50% der Fläche bebaut.)
- Ein heute maximal möglicher Modulwirkungsgrad von 20% bei einem Systemwirkungsgrad von 100% (also keine weiteren Verluste durch Stromeinspeisung ins Netz usw.) wird angenommen.

Resultat

Theoretisch-technisches Potenzial Sonnenenergie	4'931 TWh/Jahr
---	----------------

¹⁸ vgl. z.B. <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>

3.2 Technisches Potenzial

Die Ermittlung des technischen Potenzials erfolgt wiederum über die Strahlungskarte der Schweiz. Dabei wurde die gesamte Gebäudefläche der Schweiz aus dem Datensatz swissBuildings3D¹⁹ ermittelt. Darin enthalten sind 1'819'000 Gebäude mit einer Gesamtgebäudefläche von 545 km². Davon verteilen sich 405 km² auf Gebäude kleiner als 1'000 m² und 140 km² auf Gebäude grösser als 1'000 m².

Die folgenden Kriterien wurden bei der Berechnung des technischen Potenzials berücksichtigt:

- Alle Gebäude der Schweiz werden vollständig bebaut.
- Folgende Annahmen bezüglich der Dachstruktur werden aus Erfahrungswerten²⁰ getroffen:
 - Gebäude grösser 1'000 m²: 80% Flachdächer, 20% Schrägdächer
 - Gebäude kleiner 1'000 m²: 40% Flachdächer, 60% Schrägdächer
- Auf Flachdächern gelten die folgenden Annahmen aus Erfahrungswerten²⁰:
 - 50% der Dachfläche wird genutzt (weil die Anlagen aufgeständert werden, muss wegen des Schattenwurfs jeweils zwischen zwei Modulreihen eine Reihe leer gelassen werden).
 - 100% der horizontalen Einstrahlung ist verfügbar. Dies entspricht in etwa einer Ausrichtung der Panels von 30° S und beinhaltet Abschattungsverluste und die zusätzlich entstehende Fläche durch die Neigung der Panels.
- Auf Schrägdächern gelten die folgenden Annahmen aus Erfahrungswerten²⁰:
 - 100% der Dachfläche wird genutzt.
 - 100% der horizontalen Einstrahlung ist verfügbar. Dies beinhaltet die zusätzliche Fläche durch die Neigung der Dachflächen sowie Verluste durch teilweise schlechte Ausrichtung der Dachflächen und Verschattung.
- 2 m²/Person wird für Solarthermie "reserviert", auf der restlichen Fläche wird Photovoltaik installiert.
- Es werden keine Freiflächenanlagen gebaut.

¹⁹ aus dem Topografischen Landschaftsmodell der Schweiz (TLM, Bundesamt für Landestopografie swisstopo)

²⁰ Die Erfahrungswerte basieren insbesondere auf Studien von **METEOTEST** für die Stadt Bern und für den Kanton Waadt (nicht publiziert).

Resultat

Szenario "heute": Technisches Potenzial Photovoltaik	58.4 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 396 km ² Dachfläche	
- 97% des heutigen Stromverbrauchs	
Szenario "morgen": Technisches Potenzial Photovoltaik	77.9 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 396 km ² Dachfläche	
- 130% des heutigen Stromverbrauchs	

Solarthermie

Das technische Potenzial der Solarthermie wird unter folgenden Annahmen berechnet:

- 2 m² pro Person wird für Solarthermie reserviert²¹.
- Bei der Solarthermie wird ein Wirkungsgrad von 50% angenommen.

Resultat

Technisches Potenzial Solarthermie	8.8 TWh/Jahr _{therm}
Das entspricht: - 16 km ² Dachfläche	
- 10% des Heizenergie- und Warmwasserverbrauchs (2009) ²²	

Wir gehen von keinen weiteren Einschränkungen für die Solarthermie aus. Das technische Potenzial Solarthermie entspricht somit gleichzeitig auch dem nachhaltigen Potenzial Solarthermie.

²¹ Ziel der Swissolar bis 2035:
http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar/medientexte/120125_MM_Tagung_Solarw%C3%A4rme_Schweiz_2012.pdf

2 m² Fläche sollte auch auf Grund der technischen Machbarkeit (insbesondere Grösse der Warmwasserspeicher) gut umsetzbar sein.

²² Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2010 nach Verwendungszwecken. BFE, 2010.

3.3 Potenzial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte

Kumulativ zu den Kriterien des technischen Potenzials werden die folgenden Kriterien aufgrund von Erfahrungswerten²³ berücksichtigt:

- Schrägdächer: Dächer mit zu wenig Strahlung wegen schlechter Ausrichtung werden nicht berücksichtigt (z.B. Dächer die gegen Norden ausgerichtet sind): Pauschaler Abzug von 50% der Dachflächen.
- Flachdächer: kein Abzug
- Gebäude grösser als 1'000 m² weisen 20% störende Aufbauten auf (z.B. Liftaufbauten oder unterschiedliche Dachhöhen).
- Gebäude kleiner als 1'000 m² weisen 50% störende Aufbauten auf (z.B. Dachfenster, Lukarnen oder Kamine).

Resultat	
Szenario "heute": Wirtschaftliches Potenzial Photovoltaik	26.9 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 182 km ² Dachfläche	
- 45% des heutigen Stromverbrauchs	
- 46% des technischen Potenzials	
Szenario "morgen": Wirtschaftliches Potenzial Photovoltaik	35.8 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 182 km ² Dachfläche	
- 57% des heutigen Stromverbrauchs	
- 46% des technischen Potenzials	

²³ Die Erfahrungswerte basieren insbesondere auf Studien von *METEOTEST* für die Stadt Bern und für den Kanton Waadt (nicht publiziert).

3.4 Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten

Da bei der Photovoltaik auf Bauten keine nennenswerten ökologischen Nachteile auftreten, werden hier nur die kulturhistorischen Aspekte berücksichtigt.

Kumulativ zu den Kriterien des technischen Potenzials wird das folgende Kriterium berücksichtigt:

- Pauschaler Prozent-Abzug geschützter Dachflächen von 5%

Dieser Abzug entspricht einer Abschätzung des Bundesamtes für Kultur BAK. Eine Herleitung ist in Anhang B enthalten.

Die wirtschaftlichen Aspekte gemäss Kapitel 3.3 sind in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Resultat

Szenario "heute": Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten Photovoltaik	55.5 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 376 km ² Dachfläche - 93% des heutigen Stromverbrauchs - 95% des technischen Potenzials	
Szenario "morgen": Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten Photovoltaik	74.0 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 376 km ² Dachfläche - 123% des heutigen Stromverbrauchs - 95% des technischen Potenzials	

3.5 Potenzial unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte

Kumulativ zu den Kriterien des technischen Potenzials werden die folgenden Kriterien berücksichtigt:

- Gebäude grösser 1'000 m² werden zu 60% Wahrscheinlichkeit bebaut.
- Gebäude kleiner 1'000 m² werden zu 40% Wahrscheinlichkeit bebaut.

Diese Annahmen sind als sehr pauschale Schätzungen zu betrachten und sind somit die grössten Unsicherheitsfaktoren bei der Ermittlung des Potenzials der Sonnenenergie.

Die wirtschaftlichen Aspekte gemäss Kapitel 3.3 sowie die ökologischen und kulturhistorischen Aspekte gemäss Kapitel 3.4 sind in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Resultat	
Szenario "heute": Gesellschaftliches Potenzial Photovoltaik	25.8 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 175 km ² Dachfläche	
- 43% des heutigen Stromverbrauchs	
- 44% des technischen Potenzials	
Szenario "morgen": Gesellschaftliches Potenzial Photovoltaik	34.4 TWh/Jahr
Dies entspricht: - 175 km ² Dachfläche	
- 57% des heutigen Stromverbrauchs	
- 44% des technischen Potenzials	

3.6 Nachhaltiges Potenzial

Das nachhaltige Potenzial ist die aus heutiger Sicht unter Berücksichtigung aller oben aufgeführten Aspekte produzierbare Energie. Es ergibt sich aus der Schnittmenge der Potenziale unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte, von Schutzobjekten sowie gesellschaftlicher Aspekte.

Resultat	
Szenario "heute": Nachhaltiges Potenzial Photovoltaik Dies entspricht: - 79 km ² Dachfläche - 19% des heutigen Stromverbrauchs - 20% des technischen Potenzials	11.6 TWh/Jahr
Szenario "morgen": Nachhaltiges Potenzial Photovoltaik Dies entspricht: - 79 km ² Dachfläche - 26% des heutigen Stromverbrauchs - 20% des technischen Potenzials	15.5 TWh/Jahr

Solarthermie

In der Solarthermie entspricht nach unserer Definition das technische auch gleich dem nachhaltigen Potenzial.

Resultat	
Nachhaltiges Potenzial Solarthermie: Dies entspricht: - 16 km ² Dachfläche - 10% des Heizenergie- und Warmwasserverbrauchs 2009 - 100% des technischen Potenzials	8.8 TWh/Jahr _{therm}

4 Analyse

Potenzialberechnungen, wie sie hier vorgestellt werden, basieren auf einer Vielzahl von Annahmen und müssen auf eine oft beschränkte Datenbasis abstützen. In den folgenden Abschnitten werden die Annahmen und Resultate kritisch hinterfragt. Zum Abschluss werden die Potenziale der Wind- und Sonnenenergie gegenübergestellt.

4.1 Windenergie

Theoretisches Potenzial

Grundlage der Potenzialberechnungen ist die Windkarte der Schweiz (*METEOTEST 2011*). Diese weist eine mittlere empirische Standardabweichung von ca. 1 m/s auf. Diese Unterschiede gleichen sich über die gesamte Fläche der Schweiz betrachtet jedoch weitgehend aus.

Beim theoretischen Potenzial der Windenergie wird die kinetische Energie in jeder Luftsäule von 1 m² Grundfläche aufsummiert. Im Ergebnis wird dabei die Tatsache nicht berücksichtigt, dass bei vollständiger Nutzung der Energie in einer der oben beschriebenen Säulen diese Energie in der nächsten Säule nicht mehr zur Verfügung steht. Tatsächlich nutzbar wäre deshalb nur ein kleiner Bruchteil dieses ausgewiesenen theoretischen Potenzials.

Technisches Potenzial

Windenergieanlagen sind heute eine ausgereifte Technologie. In den letzten Jahren hat jedoch die Grösse der installierten Anlagen auch in der Schweiz stetig zugenommen. Ging man im Konzept Windenergie Schweiz (BFE, BUWAL, ARE 2004) noch von einer "Standardanlage" mit einer installierten Leistung von 1.25 MW bei einer Nabenhöhe von 70 m aus, so werden heute in der Schweiz Anlagen mit 2 MW oder mehr und Nabenhöhen von 100 m installiert. In einigen Projekten plant man bereits mit Anlagen mit 3 MW installierter Leistung und Nabenhöhen von 130 m. Dies reflektiert sich in der Wahl der Anlagentypen für die Szenarien "heute" und "morgen".

Eine grössere Anlage hat auch einen höheren Platzbedarf und beschränkt dadurch die Anzahl Anlagen, die auf einer vorgegebenen Fläche gebaut werden können. Trotzdem ergibt sich wegen der besseren Windgeschwindigkeiten auf höherer Nabenhöhe, der grösseren Fläche, die der Rotor überstreicht und der höheren installierten Leistung eine höhere Energieproduktion. Auf der anderen Seite sind an vielen Standorten durch die Platzverhältnisse und die Zufahrtsmöglichkeiten die Anlagengrössen beschränkt. Grundsätzlich gilt also: je grösser die Anlage, desto mehr produziert sie pro Fläche, wobei es technische und raumplanerische Hindernisse gibt, die die Grösse einschränken können.

Der Flächenbedarf pro Anlage wurde aufgrund von Faustregeln zu den Abständen zwischen Windenergieanlagen abgeschätzt. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass eine Einzelanlage keinen zusätzlichen "Pufferbereich" benötigt und dass eine Reihe von Anlagen (z.B. auf einer Krete) einen kleineren Flächenbedarf pro Anlage hat als ein Windpark mit mehreren Reihen. Der in den Potenzialberechnungen verwendete Flächenbedarf ist deshalb eine vorsichtige Annahme, die das Potenzial eher unterschätzt. Falls die Potenzialstudie weiter verfeinert werden soll, könnten die Annahmen für den Flächenbedarf mit beispielhaften Fallstudien für relevante Geländetypen noch optimiert werden.

Potenzial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte

Ob eine Anlage wirtschaftlich betrieben werden kann, hängt davon ab, ob der erzielbare Erlös aus dem Energieverkauf die Gestehungskosten deckt. Mit der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) hat der Bund ein Instrument eingeführt, um den Bau erneuerbarer Energien zu fördern. Neben der KEV gibt es auch andere Absatzmöglichkeiten, z.B. über den Verkauf des ökologischen Mehrwerts an Kunden. Die KEV wurde so ausgestaltet, dass mit besseren Windbedingungen auch eine bessere Rendite erzielt werden kann. Es gibt deshalb eine Untergrenze des Windangebots, das verfügbar sein muss, damit eine Anlage tatsächlich noch kostendeckend betrieben werden kann. Diese Untergrenze kann nicht pauschal bestimmt werden, da sie von den projektspezifischen Kosten für Planung, Installation, Betrieb und Unterhalt abhängt. Erfahrungswerte zeigen aber, dass sie heute eher bei 5.0 m/s als bei 4.5 m/s liegt. Die Untergrenze könnte sich gegen 4.5 m/s bewegen, falls die Bedingungen der KEV entsprechend angepasst würden oder die Anlagen- oder Planungskosten deutlich reduziert würden.

Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten

Bei der Berechnung des Windenergiepotenzials wurde auf die "Empfehlungen zur Planung von Windenergieanlagen" (BFE, ARE, BAFU 2010) abgestützt. Die Anteile der einzelnen Inventare an der Verminderung des Potenzials sind in Anhang A aufgeführt.

Nicht erstaunlich ist, dass der Ausschluss von Wald die grösste Auswirkung auf das Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten hat. Würde der Wald nicht ausgeschlossen, so wäre das entsprechende ökologische Potenzial um ca. einen Drittel höher.

Unter den Natur- und Landschaftsschutzgebieten hat der Ausschluss der BLN-Gebiete den grössten Einfluss auf das Potenzial. Ohne BLN-Gebiete würde das entsprechende ökologische Potenzial um ca. 10% zunehmen. Die Anteile aller anderen Inventare bewegen sich deutlich darunter.

Die Definition der Pufferbereiche von 300 m für die Natur- und Landschaftsschutzinventare hat einen etwas willkürlichen Charakter: Es gibt räumlich klar begrenzte

Schutzgebiete wie z.B. Amphibienlaichgebiete, die keinen solchen Puffer rechtfertigen, während sich bei BLN-Gebieten möglicherweise auch ein grösserer Puffer rechtfertigen liesse. Insgesamt macht aber eine Variierung des Puffers auf die Potenzialberechnung wenig aus.

Potenzial unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte

Die Lärmschutzverordnung (LSV) gibt keine festen Abstände sondern Lärmschutzgrenzwerte vor. Mit einem Mindestabstand von 300 m zu bewohnten Gebäuden werden diese in der Regel eingehalten. Dies ist deshalb ein vernünftiges Kriterium für die Potenzialberechnung.

Die Bestimmung eines Puffers von 1'000 m zu Siedlungen soll gesellschaftliche Vorbehalte gegen Windenergieanlagen in der Nähe von Siedlungen abbilden. Das Ergebnis der Potenzialberechnung hängt dabei stark von der Definition von Siedlungen ab. Wir gingen vom entsprechenden Layer des VECTOR25 Datensatzes des Bundesamts für Topografie aus. Einzelgebäude und Höfe sind darin nicht berücksichtigt (wohl aber im Lärmschutzkriterium). Gesellschaftliche Vorbehalte pauschal zu erfassen und genau abzubilden überstieg die Möglichkeiten dieser Studie. Deshalb ist die Annahme eines Puffers von 1'000 m sehr pauschal und höchst diskutabel. Dieses Kriterium hat zudem einen äusserst grossen Einfluss auf die Bestimmung des Potenzials unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte und vermindert es um ca. 62%.

Nachhaltiges Potenzial

Das nachhaltige Potenzial ist das Schluss- und Hauptergebnis der Potenzialberechnung. Während die technischen Annahmen und naturwissenschaftlichen Datengrundlagen, die zu diesem Resultat führen, ziemlich robust sind, kann eine Änderung der Kriterien einen sehr grossen Einfluss auf das Ergebnis haben, wie in den vorherigen Abschnitten dargelegt wurde.

Das ermittelte nachhaltige Potenzial von 1.5–3.7 TWh/Jahr bzw. 2%–6% des heutigen Stromverbrauchs (je nach Szenario und Variante) ist eine vorsichtige Schätzung, liegt aber gemäss den Kenntnissen der Autoren in der richtigen Grössenordnung. Suisse Eole²⁴ spricht von einem Potenzial von 6.8% des heutigen Stromverbrauchs mit Zeithorizont 2050. Der Verein Energie Trialog Schweiz ermittelte ein Potenzial von 2–3 TWh/Jahr im Jahr 2050²⁵. Die Axpo berechnete ein Potenzial von ca. 4.5% ohne Berücksichtigung der Raumplanung²⁶.

²⁴ Infoblatt "Ein Land mit Potenzial",
vgl. http://www.suisse-eole.ch/uploads/media/Infoblatt_Potenzial.pdf

²⁵ Grundlagenpapier für die Energie-Strategie 2050,
vgl. <http://www.energetrialog.ch/de/p52000134.html>

²⁶ Axpo, 2007: Strom für heute und morgen. Studie Stromperspektiven 2020.

Zusätzliche Potenziale der Windenergie

Das Potenzial von Klein-Windkraftanlagen, die z.B. auf Gebäuden installiert werden können, wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt. Aufgrund relativ tiefer Bauhöhen, tieferer Windgeschwindigkeiten in den oft eher geschützte Lagen von Siedlungen, der hohen Rauigkeit des Geländes in Siedlungen (die zu tieferen Windgeschwindigkeiten und erhöhter Turbulenz führt), Problemen mit Lärm und Baubewilligungen sowie den hohen spezifischen Kosten pro installierter Leistung erachten wir dieses Potenzial im Kontext der Energiestrategie 2050 als vernachlässigbar.

Es gibt Ansätze, Windenergie in grossen Höhen (z.B. mit Drachensystemen) für die Stromerzeugung zu nutzen. Diese sind aber noch in einer frühen Konzeptphase.

4.2 Sonnenenergie

Theoretisches Potenzial

Grundlage der Potenzialberechnungen ist die Solarstrahlungskarte der Schweiz. Diese weist eine mittlere Standardabweichung von wenigen Prozent auf. Diese Unterschiede gleichen sich über die gesamte Fläche der Schweiz betrachtet jedoch weitgehend aus.

Im Unterschied zur Windenergie wird bei der Sonnenenergie ein theoretisches Potenzial berechnet, das tatsächlich zur Verfügung steht. Das erklärt die Unterschiede im Bereich von Grössenordnungen.

Technisches Potenzial

Das technische Potenzial geht davon aus, dass alle Dächer der bestehenden Gebäude bedeckt werden können. In den nächsten 40 Jahren wird die Gebäudefläche höchstwahrscheinlich wachsen, was nicht berücksichtigt wurde.

Freiflächenanlagen wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, was das Potenzial massiv senkt. Das nachhaltige Potenzial könnte durch die Nutzung einer Fläche von 0.3% der Landfläche der Schweiz verdoppelt werden.

Seitens der Technologie wurde eine heutzutage bestehende ausgewählt (Wirkungsgrade von 15% bzw. 20% sind seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich). Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich sowohl die Wirkungsgrade der Module als auch der Systemwirkungsgrad in den nächsten Jahrzehnten weiter verbessern. Es muss aber auch davon ausgegangen werden, dass auch in Zukunft nicht nur Modultypen von höchsten Wirkungsgraden eingesetzt werden.

Insgesamt sind die Annahmen als eher konservativ zu bezeichnen.

Potenzial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte

Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind mit ausschlaggebend für die Höhe des Potenzials, was sich aber in der Studie nicht widerspiegelt: Dort wurde davon ausgegangen, dass alle Dachflächen mit geeigneten Ausrichtung und ohne Hindernisse bebaut werden. Ob dazu der (wirtschaftliche) Anreiz ausreicht, wurde im gesellschaftlichen Potenzial abgebildet.

Ein wichtiger Einflussfaktor der Berechnung des Solarpotenzials ist der Anteil der störenden Dachaufbauten oder der wenig geeigneten Flächen bei Schräg- und Flachdächern. Im Rahmen der Möglichkeiten dieser Studie mussten fixe Annahmen getroffen werden. Diese basieren grösstenteils auf räumlich hochaufgelösten (1 m) Solarkatastern der Stadt Bern und des Kantons Waadt, die Ende 2011 erstellt wurden.

Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzobjekten

Aufgrund von Schutzobjekten schätzt das Bundesamt für Kultur BAK eine Potenzialminderung (d.h. ein Anteil nicht benutzbarer Dachflächen) von 5%. Eine Anpassung dieses Abschlags hat keinen Einfluss auf die Grössenordnung des Solarpotenzials.

Potenzial unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte

Der Umsetzungsgrad (Annahme: 40% bei kleineren Dächern und 60% bei grösseren Dächern) ist der mit Abstand grösste Unsicherheitsfaktor der Berechnung des Solarpotenzials. Er basiert auf Schätzungen der Solarspezialisten des **METEOTEST** Teams.

Der zukünftige Umsetzungsgrad hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. den finanziellen Gegebenheiten (Lohnt es sich, eine Anlage auf dem Dach aufzustellen?), dem Strompreisniveau oder von bau- und planungsrechtlichen Aspekten (z.B. Zwang zu Photovoltaik-Anlagen auf Neubauten und bei Renovationen sowie Bewilligungsprozedur).

Nachhaltiges Potenzial

Insgesamt zeigt sich, dass sich mit zukünftiger Photovoltaik-Technologie rund 20–25% des Schweizer Stroms herstellen lassen. Swisssolar²⁷ nennt ein Potenzial von 35% des Stromverbrauchs während die Axpo in ihrer Studie²⁸ von nur knapp 6% ausgeht.

²⁷ http://www.swisssolar.ch/fileadmin/files/swisssolar/publikationen/Photovoltaik_neu2011.pdf

²⁸ Axpo, 2007: Strom für heute und morgen. Studie Stromperspektiven 2020.

Es zeigte sich, dass die im gesellschaftlichen Potenzial definierten Kriterien den grössten Einfluss auf das Potenzial hatten und zugleich auch mit der grössten Unsicherheit behaftet sind.

Die Produktion der Solarthermie liegt bei 9 TWh/Jahr_{therm} (2/3 der Photovoltaik). Die Nutzung von Solarthermie wirkt sich kaum auf die Photovoltaik aus, da dafür viel kleinere Flächen benötigt werden (ansonsten wären sehr grosse Wärmemengen mit entsprechenden Kosten saisonal zu speichern).

Zusätzliche Potenziale der Photovoltaik

Neben den Dachflächen wurden auch das Potenzial von Fassaden, Lärmschutzwänden entlang von Autobahnen, Lawinenverbauungen und Freiflächen geschätzt.

Bei den **Fassaden** wurde davon ausgegangen, dass Fassadenflächen von 10% im Verhältnis zu den (gesamten schweizerischen) Dachflächen gut genutzt werden könnten. Dabei wurde eine Einstrahlung von 66% der Horizontalstrahlung verwendet und die gleichen wirtschaftlichen, kulturhistorischen und gesellschaftlichen Faktoren berücksichtigt. Die Berechnung ergibt ein Potenzial von 0.6–1.0 TWh/Jahr.

Die Potenziale der **Lärmschutzwände** und **Lawinenverbauungen** sind klein und liegen um rund den Faktor 100 unter denjenigen der Dachflächen im Bereich von je 0.02–0.1 TWh/Jahr. Es wurde angenommen, dass rund 5% der beiden (linienförmigen Strukturen) verwendet werden könnten.

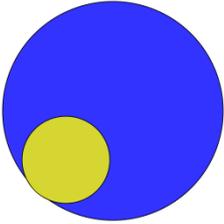
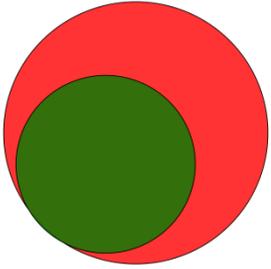
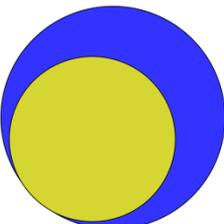
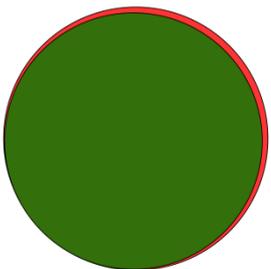
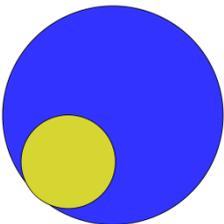
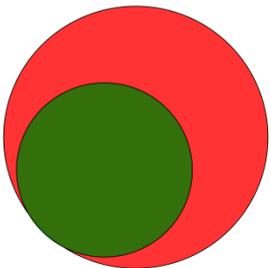
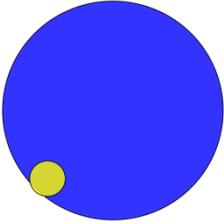
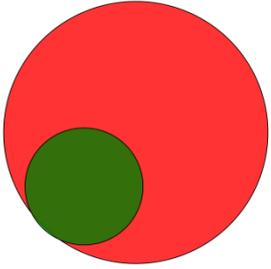
Das Potenzial **freistehender Anlagen** wäre hingegen deutlich höher, wie schon das theoretisch-technische Potenzial aus Kapitel 3.1 erahnen lässt. Um eine TWh/Jahr Strom zu produzieren wären bei 20% Zellenwirkungsgrad 0.2‰ der Landesfläche der Schweiz nötig. Bei der Verwendung von bloss 1‰ der Landesfläche (das entspricht 41 km² bzw. 1% der Fruchtfolgefleichen) könnten somit rund 5 TWh/Jahr Strom (entspricht 8% des heutigen Strombedarfs) erzeugt werden. Bei einer guten nationalen oder kantonalen Raumplanung wäre diese Grössenordnung in die Landschaft integrierbar (auch wenn diese Anlagen natürlich sichtbar wären).

Das gesamte Photovoltaik-Potenzial inkl. Fassaden, Lärmschutzwände, Lawinenverbauungen und freistehenden Anlagen beläuft sich bei einem Modulwirkungsgrad von 20% (Szenario "morgen") und einer Nutzung von 1‰ der Landesfläche für freistehende Anlagen auf rund 21 TWh/Jahr. Dieser Wert ist aber mit einer grossen Unsicherheit behaftet.

4.3 Vergleich der Potenziale Wind- und Sonnenenergie

Tabelle 1 setzt die verschiedenen Teilpotenziale des Szenarios "morgen" ins Verhältnis zum technischen Potenzial der Windenergie (≥ 5 m/s; Lärm/Akzeptanz) und Sonnenenergie. Der blaue Kreis bei der Windenergie bzw. der rote Kreis bei der Sonnenenergie entsprechen dem technischen Potenzial.

Tabelle 1: Teilpotenziale Wind und Sonne im Verhältnis zum technischen Potenzial.

	Potenzial Windenergie	Potenzial Sonnenenergie
wirtschaftlich		
ökologisch		
gesellschaftlich		
nachhaltig		

Interessant ist, dass die Wind- und Sonnenenergie je ein ungefähr gleich grosses technisches Potenzial aufweisen. Allerdings werden bei der Sonnenenergie freistehende Anlagen (die nicht auf Gebäuden installiert sind) bereits ausgeschlossen, während das technische Potenzial der Windenergie davon ausgeht, dass die Schweiz dort, wo es technisch machbar ist mit Windenergieanlagen "vollgepflastert" wird. Das technische Potenzial der Windenergie ist deshalb von den Annahmen her eher mit dem theoretisch-technischen Potenzial der Sonnenenergie zu vergleichen, welches um beinahe den Faktor 100 höher ist als das der Windenergie (4'931 zu 59 TWh/Jahr).

Diese Diskrepanz in der Potenzialberechnung wird bei der Berechnung des Potenzials unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Aspekte in gewisser Weise ausgeglichen, indem hier bei der Windenergie mit einem Mindestabstand von 1'000 m zu Siedlungen eine restriktive "Akzeptanz-Regel" berücksichtigt wird.

5 Literaturverzeichnis

BFE, BUWAL, ARE 2004: Konzept Windenergie Schweiz.

BFE, ARE, BAFU 2010: Empfehlungen zur Planung von Windenergieanlagen.

METEOTEST 2004: Windenergiepotenziale der Schweiz.

METEOTEST 2011: Windkarte der Schweiz (vgl. www.wind-data.ch/windkarte).

METEOTEST 2012: Meteonorm (vgl. www.meteonorm.com).

BFE 1999: Planung von Windenergieanlagen – Leitfaden für die Schweiz.

A Anteile der einzelnen Schutzobjekte

Tabelle 2 zeigt auf, welche Anteile die einzelnen Schutzobjekte an der durch sie ausgeschlossenen Potenziale insgesamt ausmachen. Lesebeispiele:

- BLN-Gebiete machen 73.3% der Fläche aller Inventare aus. 54.8% der Fläche aller Inventare sind ausschliesslich BLN-Gebiete ohne Überlappung mit anderen Inventaren.
- Falls die BLN-Gebiete nicht für die Windkraftnutzung ausgeschlossen würden, ergibt sich ein Zuwachs des ökologischen Potenzials (unter Berücksichtigung von Schutzobjekten) von 3.3 TWh/a oder 10.4%.
- Ohne Berücksichtigung von Wald als Ausschlussgebiet ergibt sich ein Zuwachs des ökologischen Potenzials (unter Berücksichtigung von Schutzobjekten) von 32.6%.

Tabelle 2: Anteile der verschiedenen Schutzobjekte.

Schutzobjekt	Fläche [km ²]	Anteil Gesamtfläche	Anteil ohne Überlappung	Zuwachs Potenzial ²⁹ [TWh/a]	Zuwachs relativ ²⁹
BLN	7'807	73.3%	54.8%	3.3	10.4%
UNESCO Heritage	2'257	21.2%	15.8%	0.3	1.0%
Jagdbanngebiete	1'631	15.3%	11.4%	0.1	0.3%
Moorlandschaften	874	8.2%	6.1%	0.3	1.0%
VAEW	295	2.8%	2.1%	0.0	0.0%
Wasser- und Zugvögel	228	2.1%	1.6%	0.2	0.7%
Auengebiete	226	2.1%	1.6%	0.1	0.4%
Trockenwiesen und -weiden	214	2.0%	1.5%	0.7	2.2%
Flachmoore	192	1.8%	1.3%	0.3	0.9%
Nationalpark GR	170	1.6%	1.2%	0.0	0.0%
RAMSAR	147	1.4%	1.0%	0.0	0.0%
Amphibienlaichgebiete	138	1.3%	1.0%	0.4	1.3%
Hochmoore	55	0.5%	0.4%	0.1	0.3%
Naturpark Sihl	11	0.1%	0.1%	0.0	0.0%
Total Schutzinventare	10'658	133.7%	100.0%	-	-
Wald	11'632	-	-	10.45	32.6%

²⁹ im "ökologischen" Potenzial auf Grundlage des Szenarios "morgen"

Tabelle 3 zeigt die Auswirkungen einer Nicht-Berücksichtigung von BLN-Gebieten oder Wald auf das nachhaltige Potenzial der Windenergie für verschiedene Varianten der Potenzialberechnung. Die Tabelle zeigt die Zahlen für das Szenario "heute". Für das Szenario "morgen" ist der relative Zuwachs jeweils beinahe identisch.

Sowohl bei den BLN-Gebieten als auch beim Wald zeigt sich ein über-proportionaler Zuwachs verglichen mit dem entsprechenden Zuwachs im "ökologischen" Potenzial. Der Grund liegt darin, dass sowohl Waldgebiete als auch BLN-Gebiete im Vergleich zur Gesamtfläche weniger von den "gesellschaftlichen" Ausschlussgebieten tangiert werden, da es im Wald keine bewohnten Gebiete gibt und BLN-Gebiete eher spärlich besiedelt sind. BLN-Gebiete liegen zudem meist in Regionen mit gutem Windangebot, weshalb die BLN-Flächen im Gegensatz zur Gesamtfläche weniger durch das "wirtschaftliche" Kriterium eingeschränkt werden. Bei den Waldgebieten, die tendenziell eher tiefer liegen, spielt es eine grosse Rolle, ob eine Untergrenze der mittleren Windgeschwindigkeit von 4.5 oder 5 m/s verwendet wird.

Die Potenzialsteigerung von rund 26% des nachhaltigen Potenzials durch Einbezug der BLN-Gebiete stellt allerdings eine bloss theoretische Maximalgrösse dar. Es müssten die jeweiligen Schutzziele der betroffenen Objekte berücksichtigt und damit von einer durchschnittlichen Realisierungswahrscheinlichkeit ausgegangen werden, die wohl massiv unter diesem theoretischen Wert liegen dürfte.

Tabelle 3: Zuwachs des nachhaltigen Potenzials der Windenergie durch die Nicht-Berücksichtigung von Wald bzw. der BLN-Gebiete für verschiedene Varianten der Potenzialberechnung (Szenario "heute").

Kriterien gesellschaftliches Potenzial	Kriterien "ökologisches" Potenzial	Kriterien wirtschaftliches Potenzial	Potenzial [TWh/a]	Zuwachs relativ ³⁰
Puffer für Lärm (300 m) und Akzeptanz (1'000 m)	Ausschluss alle Inventare und Wald	≥ 4.5 m/s	1.91	0%
		≥ 5 m/s	1.47	0%
	ohne Ausschluss von BLN-Gebieten	≥ 4.5 m/s	2.41	26.7%
		≥ 5 m/s	1.85	25.5%
	ohne Ausschluss von Wald	≥ 4.5 m/s	2.82	47.8%
		≥ 5 m/s	2.04	38.9%

³⁰ Zuwachs relativ zum entsprechenden Basisszenario (Ausschluss aller Inventare und Wald) des nachhaltigen Potenzials

B Denkmalpflege und Solaranlagen

Autor: Oliver Martin, Bundesamt für Kultur BAK

Eine Potenzialschätzung zu Solaranlagen kann hinsichtlich der zu berücksichtigenden kulturhistorischen Parameter aus der Sicht des Bundesamtes für Kultur (BAK) grundsätzlich nur grobe Aussagen über Grössenordnungen machen. Solaranlagen auf Dächern können oft auch in sensiblen Situationen erstellt werden, wenn sie sorgfältig geplant werden und architektonisch auf das jeweilige Objekt und das Ortsbild reagieren. Dabei geht es in der Regel nicht primär um denkmalpflegerische Werte, sondern allgemein um die hohe Qualität der gebauten Umwelt. Verschiedene Kantone haben dafür Wegleitungen entwickelt und stehen den Bauherren beratend zur Seite. Die bewilligungs- respektive beratungsfreie Erstellung von Solaranlagen lehnt das BAK daher ab. Erste Priorität bei standortunabhängigen Photovoltaikanlagen müssen grössere Anlagen auf grossen Dachflächen (Industriegebäude, Supermärkte, Verwaltungsgebäude) in den Industrie- und Gewerbezononen sowie alle Bauten in jungen Bauzonen haben, wodurch ein unproblematisches, beachtliches Potenzial als erstes ausgeschöpft wird. Einschränkungen aufgrund der Denkmalpflege gibt es nur in sehr begrenzten Fällen: Aufgrund der aus verschiedenen Kantonen verfügbaren Zahlen³¹ kann grundsätzlich geschätzt werden, dass bei 85–90% des gesamten Gebäudebestandes in der Schweiz Solaranlagen ohne mögliche Interessenskonflikte mit denkmalpflegerischen Fragen installiert werden können. Bei den restlichen 10–15% des Bestandes sind Anlagen bei guter Integration, gewährleistet durch eine Fachberatung und umsichtige Planung, auch in schützenswerten Ortsbildteilen in der Mehrheit der Fälle möglich. Aus denkmalpflegerischen Gründen dürfte bei höchstens 5% des Gesamtgebäudebestandes auf Solaranlagen zu verzichten sein.

³¹ Kanton Thurgau: Solaranlagen richtig gut, 2009; Kanton St. Gallen: Neujahrsblatt Denkmalpflege, 2010; Kanton Basel-Landschaft: Vorlage an den Landrat betreffend Solaranlagen im Kanton Basel-Landschaft, 2009; Kanton Solothurn: Archäologie und Denkmalpflege im Kanton Solothurn, 2011; Canton de Vaud: Capteurs solaires et préservation des sites bâtis, 2005; u. w.

C Liste der Natur- und Landschaftsschutzinventare

Die folgende Liste enthält die in der Potenzialberechnung Wind (Potenzial unter Berücksichtigung von Schutzinventaren) berücksichtigten nationalen Inventare für Natur- und Landschaftsschutz:

- Jagdbanngebiete:
 - Bundesinventar der Eidgenössischen Jagdbanngebiete
- BLN-Gebiete:
 - Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung
- Vogelschutzgebiete:
 - Bundesinventar der Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung (WZVV)
 - Ramsar-Konvention
- Feuchtgebiete:
 - Bundesinventar der Amphibienlaichgebiete von nationaler Bedeutung
 - Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung
 - Bundesinventar der Flachmoore von nationaler Bedeutung
 - Bundesinventar der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung
 - Bundesinventar der Moorlandschaften von besonderer Schönheit und von nationaler Bedeutung
- Trockenwiesen:
 - Inventar der Trockenwiesen und -weiden von nationaler Bedeutung
- Parks nationaler Bedeutung:
 - UNESCO-Welterben
 - Naturerlebnispark Zürich-Sihlwald
 - Nationalpark
- VAEW-Gebiete:
 - Verordnung über die Abgeltung von Einbussen der Wasserkraftnutzung