

## Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben

### Lohnt sich eine Investition?

Thomas Zumbühl, Christian Gazzarin, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: christian.gazzarin@art.admin.ch  
Reto Rigassi, Suisse Eole c/o Enco AG, Wattwerkstr. 1, CH-4416 Bubendorf

Mit Windkraftanlagen auf Landwirtschaftsbetrieben lassen sich regelmäßige Erlöse bei einem vernachlässigbaren Arbeitsaufwand erzielen. Dem steht jedoch ein sehr hoher Investitionsaufwand gegenüber. Mit der neuen Einspeisevergütung für Windstrom stellt sich die Frage, ob Landwirtschaftsbetriebe in Windkraftanlagen investieren sollen. Zur Beantwortung dieser Frage wurde anhand eines Kalkulationsmodells die Rentabilität von vier Modellanlagen berechnet. Darunter eine Kleinwindanlage von 6,5 kWp und drei Grosswindanlagen in der Grösse von 900, 1300 und 2000 kWp. Unter den gegenwärtigen Einspeisevergütungen lässt sich die berechnete

Kleinwindanlage an keinem Standort wirtschaftlich betreiben. Die betreffenden Grosswindanlagen können trotz Ausschöpfung des günstigen Investitionskredits von 200000 Franken erst ab einer mittleren Windstärke von gut 6 m/s rentabel betrieben werden. Diese Standorte sind im Landwirtschaftsgebiet kaum vorhanden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist «Windstrom vom Bauernhof» momentan keine lohnende Investition. Erst mit einer deutlichen Anhebung der Einspeisevergütung oder mit dem Stromverkauf über private Stromlabels könnten die hohen Anlagepreise kompensiert und die Potentiale der vorhandenen Standorte auch rentabel genutzt werden.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Einleitung	2
Übersicht und technische Grundlagen	2
Annahmen für vier verschiedene Modellanlagen	3
Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung	4
Ergebnisse	5
Schlussfolgerungen	6



Abb. 1: Windkraftanlagen können nur an besten Standorten rentabel betrieben werden (Foto: Suisse Eole)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD  
Forschungsanstalt  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

## Problemstellung

Die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Quellen stösst in der Landwirtschaft auf zunehmendes Interesse. Gemäss dem energiepolitischen Ziel, erneuerbare Energien verstärkt zu fördern, werden garantierte Einspeisevergütungen über mehrere Jahre entrichtet. Der Bau von Windkraftanlagen ist, je nach Grösse und Standort, mit hohen Investitionen verbunden, womit auch bei garantierter Einspeisevergütung ein unternehmerisches Risiko besteht. Wie steht es mit der Rentabilität solcher Anlagen und wie wirkt sich die wichtigste Einflussgrösse, der Standort, auf den wirtschaftlichen Erfolg aus?

## Einleitung

Energieeffizienzmassnahmen und die Förderung von erneuerbaren Energien zählen in der künftigen Schweizer Energiepolitik zu den Schwerpunkten. In der Stromversorgungs- und der revidierten Energieverordnung wurden mit der Einführung von garantierten Einspeisevergütungen politische Weichen gestellt (BFE 2007). Im Bereich der erneuerbaren Energien bietet sich für die Landwirtschaft ein beträchtliches Potenzial. Im Vordergrund steht dabei die energetische Nutzung von Biomasse. Die Wirtschaftlichkeit von Biogas- und Photovoltaikanlagen wurden bereits untersucht (Gubler et al. 2007; Gazzarin und Zumbühl

2008). Der vorliegende ART-Bericht möchte die Analysen nun auf Windkraftanlagen erweitern.

Durch die dezentrale Lage ergeben sich für landwirtschaftliche Betriebe grundsätzlich gute Voraussetzungen für Windkraftanlagen. Im Unterschied zum Betrieb einer Biogasanlage verursacht die Nutzung von Windenergie keinen nennenswerten zusätzlichen Arbeitsaufwand. Ausserdem fällt auch keine Prozesswärme ab, die meistens schlecht verwertbar ist. Deshalb eignet sich diese Art der Energieerzeugung vor allem für Betriebe mit hoher Arbeitsauslastung oder geringem Flächenangebot – Merkmale, die für viele landwirtschaftliche Betriebe in der Schweiz zutreffen. Damit besteht die Möglichkeit, über einen neuen arbeitsexensiven Betriebszweig ein Zusatzeinkommen zu generieren.

## Übersicht und technische Grundlagen

Eine Windkraftanlage nutzt die in den strömenden Luftmassen enthaltene Bewegungsenergie und wandelt sie in elektrische Energie um. Die Bewegungsenergie der Windströmung wirkt auf die Rotorblätter und versetzt diese in eine Drehbewegung. Die Rotationsenergie wird von einem Generator aufgenommen und in elektrische Energie umgewandelt, die ins Stromnetz eingespeist wird. Während bei Photovoltaikanlagen tagsüber und vor allem im Sommerhalbjahr Strom erzeugt wird, fallen die Erträge von Windkraftanlagen auch nachts und vermehrt ausserhalb des Sommerhalbjahres an.

In der Schweiz sind zurzeit (Stand, 1.5.2008) rund 12 Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von über 100 kW in Betrieb (Suisse Eole, 2007). Gemeinsam haben sie eine installierte Leistung von 11,25 MW, was einer durchschnittlich installierten elektrischen Leistung von knapp 1 MW entspricht. Dazu kommen fünf Windkraftanlagen zwischen 10 und 100 kW und 14 Anlagen mit weniger als 10 kW Leistung. Die gesamte Stromproduktion beträgt zirka 14 bis 15 GWh/a und deckt den Strombedarf von ungefähr 4000 bis 4300 Haushalten (Suisse Eole, 2007). Im Moment sind zahlreiche Anlagen mit einer Gesamtleistung, die den heutigen Bestand um ein Mehrfaches übertrifft, in Planung. Das Potenzial ist damit aber noch lange nicht ausgeschöpft, sodass in Zukunft wohl weitere grössere Windpärke projektiert werden. Nach den Zielen von Energie Schweiz soll bis 2010 eine Produktion von 50 bis 100 GWh Strom aus Windkraft angepeilt werden, was etwa dem Verbrauch von 15000 bis 30000 Haushalten entspricht (Suisse Eole 2007). Gemäss Suisse Eole, der Vereinigung zur Förderung der Windenergie in der Schweiz, besteht bis 2025 ein Potenzial von 600 GWh, was dem Verbrauch von rund 170000 Haushalten entspricht. Der Trend geht weltweit zu grösseren Anlagen. Bereits bestehende Windpärke werden durch «Repowering» erweitert. Dies bedeutet, dass bestehende Anlagen durch leistungsstärkere Anlagen ersetzt werden.

## Leistung und Grösse in Entwicklung

Das Wachstum der in Serie hergestellten Windkraftanlagen war in den vergangenen 25 Jahren enorm. 1983 betrug der Rotordurchmesser einer typischen Anlage 15 m und die Nennleistung des Generators 55 kW, im Jahr 2005 standen bereits ausgereifte Serienmaschinen mit einem Rotordurchmesser von 90 m und einer Nennleistung von 2,5 MW im Einsatz. Die grössten heute betriebenen Windkraftanlagen besitzen eine Nennleistung von bis zu 6 MW und einen Rotordurchmesser von bis zu 125 m. Anlagen mit einer Leistung von 2 MW können heute als Standard betrachtet werden. Die grösste in der Schweiz betriebene Anlage in Collonges von der RhônEole SA hat eine Nennleistung von 2 MW und einen Rotordurchmesser von 71 m.

## Leichtwindanlagen

Von einer Schweizer Firma werden Leichtwindanlagen entwickelt, die für die Nutzung

Abkürzungen & Glossar	
BK	Bankkredit (in der Regel Hypothek)
IK	Investitionskredit (zinslos)
WKA	Windkraftanlage
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt-Peak, Nennleistung
MWp	Megawatt-Peak
Weibull-Formparameter	Die Weibull-Verteilung zeigt, wie der Wind an einem Standort über eine gewisse Zeit auftritt. Der Formparameter gibt Auskunft über die Form dieser statistischen Verteilung, die als Kurve dargestellt wird.
Rauigkeitslänge	Wert in Meter, der die Höhe über Boden angibt, wo der Wind theoretisch gleich Null ist. Beschreibt den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit einer Landschaft auf die Windverhältnisse.
Rauigkeitsklasse	Die Rauigkeitsklasse wird auf Basis der Rauigkeitslänge definiert. z. B. Rauigkeitslänge = 0,1 m entspricht Rauigkeitsklasse = 2 (Landwirtschaftliches Gelände mit einigen Häusern und 8 m hohen Hecken im Abstand von zirka 500 Meter).
mittlere Windgeschwindigkeit	Durchschnittliche Windgeschwindigkeit an einem Standort.

von leichten, variablen Winden konzipiert ist und durch eine Masthöhe von 18 m und einen Rotordurchmesser von 12,8 m das Landschaftsbild weniger beeinträchtigt als eine konventionelle Starkwindanlage. Als Vertreterin dieser Gruppe hat die Leichtwindanlage Aventa AV-7 eine Nennleistung von 6,5 kW und produziert ab einer Windstärke von 2 m/s bereits elektrische Energie. Diese Anlage eignet sich für Standorte mit einer maximalen mittleren Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s.

Leichtwindanlagen lassen sich nicht direkt mit Starkwindanlagen vergleichen. Sie stellen vielmehr eine Ergänzung oder Alternative zu Solarstromanlagen dar. Ihre Leistung ist viel geringer, dafür können sie breiter eingesetzt werden, das heisst auch an Standorten, wo eine Starkwindanlage aufgrund geringer Windgeschwindigkeiten keinen Sinn macht. Sie beeinträchtigen die Umgebung dank der geringen Grösse und Geräuschlosigkeit weniger. In Bezug auf die produzierte Strommenge ist die Beeinträchtigung im Vergleich zu den Grosswindanlagen jedoch deutlich grösser. Werden solche



Abb. 2: Windkraftanlage mit offener Maschinengondel (siehe Anhang; Quelle: [www.stromonline.ch](http://www.stromonline.ch))



Abb. 3: Montage der Anlage mit zwei Kränen. Zu einem geeigneten Standort gehört unter anderem, dass er mit schweren und langen Transportfahrzeugen zugänglich ist (Foto: Bundesverband Windenergie, Deutschland)

**Tabelle 1: Technische Annahmen**

WKA-Typ	WKA-1	WKA-2	WKA-3	Aventa AV-7
Nabenhöhe (m)	60	80	100	18
Rotordurchmesser (m)	52	62	76	12,8
Nennleistung (kWp)	900	1300	2000	6,5
Rotorfläche (m <sub>2</sub> )	2124	3019	4536	129
Nutzungsdauer (Jahre)	20	20	20	20

Anlagen auf Landwirtschaftsbetrieben an geeigneten Standorten erstellt, könnten sie sich eventuell als gute Image- und Werbeträger eignen und dementsprechend eine Breitenwirkung erzielen.

### Bestandteile und Aufbau einer Windkraftanlage

Eine Windkraftanlage wird durch ein aufwändiges Fundament im Untergrund befestigt, um die nötige Standsicherheit herzustellen. Auf das Fundament wird ein Stahlurm aufgesetzt, an dessen Spitze die Maschinengondel mit Generator, Antriebswelle, Windnachführungseinrichtung und Steuerung drehbar gelagert wird (Abb. 2). An der Nabe befinden sich meist drei Rotorblätter, die für den nötigen Antrieb sorgen. Dazu kommen Überwachungs-, weitere Steuerungs- und Regelsysteme, die für einen optimalen Betrieb sorgen. Der erzeugte Strom fliesst über einen Transformator respektive die Netzanschlussstechnik in der Maschinengondel, im Mast oder ausserhalb in einem Betriebsgebäude auf Grund in das Elektrizitätsnetz. Insbesondere an dezentralen Standorten ist die Transportzufahrt zu berücksichtigen, die je nach Grösse der Anlage mehr oder weniger grosse Probleme verursachen kann (Abb. 3). Weitere technische Angaben sind im Anhang enthalten.

### Annahmen für vier Modellanlagen

#### Anlagegrössen und technische Annahmen

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden vier verschiedene Modellanlagen betrachtet – drei Starkwindanlagen mit je 900 kW, 1,3 MW und 2 MW und eine Leichtwindanlage mit 6,5 kW installierter elektrischer Leistung (Tab. 1). Ein direkter Vergleich der Leichtwindanlage mit den grösseren Anlagen macht wenig

Sinn, denn die unterschiedliche Auslegung der Anlagen in Bezug auf Windverhältnisse und zusätzlich versprochenen Nutzen als Werbe- respektive Imageträger kann nicht eindeutig berechnet werden. Da aber dieses Konzept eine gewisse Verbreitung aufweist, wurde es in die Betrachtung aufgenommen.

Für die Leichtwindanlage stammen die Annahmen aus aktuellen Angaben der Firma Aventa AG.

#### Windstromerträge

Zur Berechnung der erwarteten Stromerträge für die vier verschiedenen Windkraftanlagen wurde der so genannte Leistungs-Calculator auf der Website der Danish Wind Industry Association verwendet ([www.windpower.org](http://www.windpower.org)). Der Leistungs-Calculator enthält bereits vorgegebene Leistungskurven und Angaben für verschiedene Anlagen, die sich beliebig verändern lassen. Für die drei Starkwindanlagen wurden vorgegebene Anlagen im Leistungs-Calculator in angepasster Form verwendet (Tab. 2). Da keine aufgeführte Anlage mit der Leichtwindanlage übereinstimmte, wurde mit den entsprechenden Herstellerdaten ein benutzerdefiniertes Profil erstellt (Tab. 3). Als Höhe für alle Standorte und berechneten Fälle wurden 1000 m ü.M. angenommen.

Für die drei Starkwindanlagen gilt ein Referenzstandort, wie er aus der Erläuterung der Stromversorgungsverordnung definiert ist (BFE 2008). Dabei handelt es sich um einen Standort mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s auf 50 m über Grund mit einem Weibull-Formparameter  $k=2$ , einer Rauigkeitslänge von 0,1 und einer Rauigkeitsklasse von 2 (siehe Glossar). Abbildung 4 zeigt eine Übersichtskarte der durchschnittlichen Windstärken in der Schweiz auf 50 m über Grund. Die guten Windlagen beschränken sich auf die höheren Lagen des Alpenraums, den Jura und Hügellagen südwestlich von Luzern. Eine rentable Windstromproduktion auf Landwirtschaftsbetrieben dürfte somit vorwiegend in letzteren beiden Regionen möglich sein.

Für die Leichtwindanlage wurde zusätzlich eine weitere Variante gerechnet mit einer Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe (18 m) statt 50 m über Grund. Wird die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort auf Nabenhöhe angenommen – womit grundsätzlich eine höhere Windstärke benötigt wird –, steigen die Erträge markant an.

## Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung

### Erlös

Der Erlös aus dem Stromverkauf ist das Produkt aus der verkauften Strommenge (kWh) und dem Strompreis pro kWh. Der Strompreis pro kWh richtet sich nach der Einspeisevergütung gemäss Stromversorgungsverordnung (StromVV, SR 734.71) vom 1.4.2008. Dabei unterscheiden sich die Regelungen für Klein- und Grosswindanlagen. Für Kleinwindanlagen beträgt die Vergütung für die ganzen 20 Jahre 20 Rp./kWh. Bei Grosswindanlagen ist für die ersten fünf Jahre ebenfalls eine Vergütung von 20 Rp./kWh vorgesehen. Danach hängt die Vergütung von zwei Einflussfaktoren, nämlich der effektiven Stromproduktion der Anlage und dem Referenzertrag, ab. Der Referenzertrag leitet sich vom Referenzstandort (BFE 2008) ab. Falls die Anlage mehr als 150 % des Referenzertrages produziert, erfolgt ab dem 6. Betriebsjahr eine Senkung der Vergütung auf 17 Rp./kWh. Werden die 150 % des Referenzertrags nicht erreicht, wird weiterhin 20 Rp./kWh ausbezahlt, wobei dies nur für eine begrenzte Zeitdauer gilt. Die Zeitdauer wiederum wird folgendermassen berechnet: Pro 0,75 % Unterschreitung von 150 % des Referenzertrages erfolgt die Anrechnung von 2 Monaten. Nach dieser Zeitdauer beträgt die Entschädigung 17 Rp./kWh für den Rest der 20 Jahre. Zur besseren Verständlichkeit der Erlösberechnung für Grosswindanlagen soll folgendes Beispiel dienen: Der effektive Stromertrag einer Anlage in den ersten fünf Jahren sei 1 Mio. kWh/a, während der entsprechende Referenzertrag 0,8 Mio. kWh/a beträgt. 150 % des Referenzertrags würden demnach 1,2 Mio. kWh/a ergeben. Somit erreicht die betrachtete Anlage 83,3 %, bzw. es fehlen 16,7 %, um die 150 % des Referenzertrages zu erreichen. Diese 16,7 % werden nun durch 0,75 % dividiert und anschliessend mit 2 Monaten multipliziert, was 46,7 Monate ergibt. Während dieser Zeit werden 20 Rp./

**Tabelle 2: Erwartete Stromerträge der Starkwindanlagen (in kWh pro Jahr)**

Fall 1	WKA-1	WKA-2	WKA-3
Windstärke Standort (m/s)	erwarteter Ertrag (kWh/a)	erwarteter Ertrag (kWh/a)	erwarteter Ertrag (kWh/a)
4	539 878	899 816	1 431 598
4,5	781 893	1 270 328	2 028 097
5	1 042 524	1 693 771	2 743 896
5,5	1 340 388	2 143 679	3 499 461
6	1 638 252	2 620 052	4 255 027
6,6	1 954 732	3 069 960	5 010 592
7	2 252 596	3 546 333	5 726 391

**Tabelle 3: Erwartete Erträge Leichtwindanlage**

Standort (m/s)	Fall 1a (18 m): Ertrag (kWh/a)	Fall 1b (50 m): Ertrag (kWh/a)
2,5	5640	3384
3	9024	5640
3,5	13 536	9024
4	16 920	12 408
4,5	21 432	15 792
5	24 816	19 176

**Tabelle 4: Angenommene Investitionsbeträge für die Modellanlagen**

WKA-Typ	WKA-1	WKA-2	WKA-3	Aventa AV-7
Gesamtinvestition 2008 (CHF)	2 362 500	3 400 000	5 500 000	140 000
Investition pro kWp (CHF/kWp)	2625	2615	2750	21 538

kWh ausbezahlt, danach sinkt die Entschädigung auf 17 Rp./kWh.

Bezogen auf eine Nutzungsdauer von 20 Jahren kann nun die durchschnittliche Vergütung berechnet werden. Während der ersten 5 Jahre (60 Monate) sowie der errechneten 46,7 Monate, also während 106,7 Monaten, werden 20 Rp./kWh ausbezahlt.

Für die Restdauer werden nun die 106,7 Monate von 20 Jahren (240 Monaten) abgezogen, was 133,3 Monate ergibt. Die durchschnittliche Vergütung beträgt demnach 18,3 Rp.:

$$\frac{(106,7 \text{ Monate} \times 20 \text{ Rp.}) + (133,3 \text{ Monate} \times 17 \text{ Rp.})}{240 \text{ Monate}} = 18,3 \text{ Rp.}$$

### Investitionsbetrag

Die Investitionen betragen je nach Anlage gut 140 000 bis 5,5 Mio. Franken (Tab. 4). Berücksichtigt sind die Anlage (Turm, Gondel, Generator, Mast etc.), das Fundament, die Erschliessung, der Netzanschluss und die

Planung. Je nach Standortbedingungen können die Investitionen für das Fundament, die Erschliessung und den Netzanschluss stark variieren. Für die Modellberechnungen wurden eher günstige Voraussetzungen unterstellt. Es gilt darauf hinzuweisen, dass aufgrund der stark gestiegenen Nachfrage und der höheren Rohstoffpreise die Investitionen für die Anlagen WKA-1 bis WKA-3 seit 2005 stark gestiegen sind. Ein WKA-Projekt beansprucht bis zur Inbetriebnahme je nach Standort und Bedingungen einen Zeitraum von bis zu 5 Jahren oder länger, was insbesondere auf die Windmessungen und zunehmende Lieferfristen zurückzuführen ist. Deshalb wurden mittelfristige Annahmen getroffen und die Kosten angepasst.

### Abschreibungen, Kapitalkosten, Unterhalt

Die Lebensdauer der einzelnen Anlagebestandteile wurde als einheitlich angenommen und für die Abschreibungen eine Zeitspanne von 20 Jahren angesetzt.



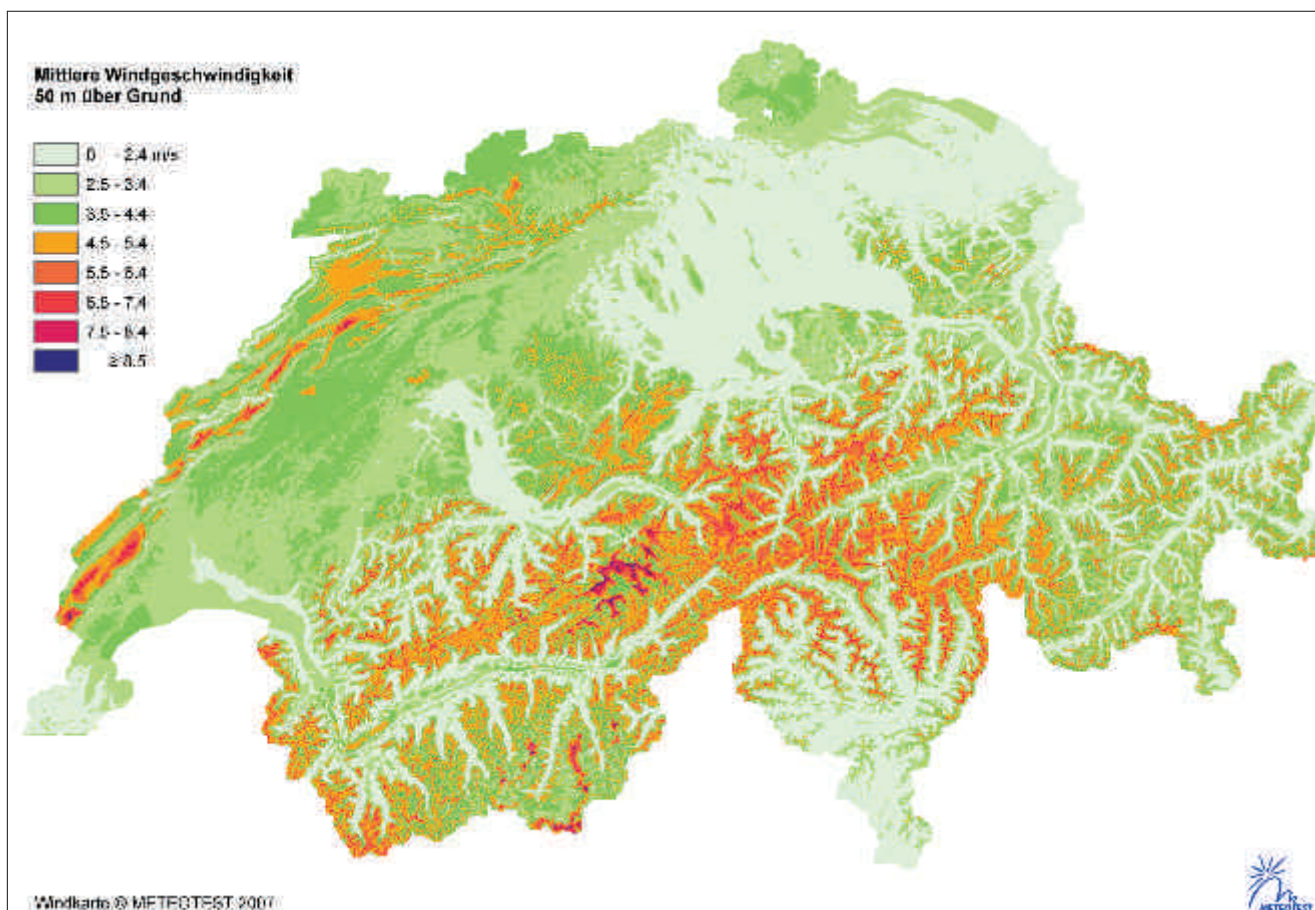


Abb. 4: Windstärken in der Schweiz (Quelle: Meteotest 2007, Bern)

Bei der Finanzierung werden 20 % Eigenkapital mit einem Zinsanspruch von 3 % angenommen, was annähernd dem Zinssatz für Bundesobligationen mit 10 Jahren Laufzeit entspricht (3,03 %, Stand März 2008). Als weitere Vorgabe gilt ein zinsloser Investitionskredit (IK) in der Höhe von maximal CHF 200 000 oder 50 % der Gesamtinvestition. Der Restbetrag wird über einen Bankkredit (BK) mit einem durchschnittlichen Zins von 5 % fremdfinanziert. Die jährlichen Betriebs- bzw. Unterhaltskosten werden mit durchschnittlich 5,7 % der Gesamtinvestition angenommen (Riggassi 2005). Eigenleistungen bei Unterhalts- und Wartungsarbeiten sind grundsätzlich möglich, wurden hier aber nicht berücksichtigt.

## Erfolgsgrößen

Die Wirtschaftlichkeit wird mit folgenden vier Erfolgsgrößen gemessen:

1. Der kalkulatorische Gewinn bzw. Verlust ist die Differenz aus dem Erlös sowie den Totalen Kosten. Ein Gewinn entspricht einer Entschädigung für Management und Risiko.

2. Die Gesamtkapitalrentabilität bzw. Kapitalrendite (entspricht annähernd dem Return on Investment, ROI) ist ein Mass für die Rentabilität einer Investition, indem der Gewinn bzw. der Verlust mit dem investierten Kapital ins Verhältnis gesetzt wird. Von den Totalen Kosten werden die Zinskosten sowohl für Fremdas auch für Eigenkapital abgezogen. Die Differenz zum Gesamterlös wird dann durch die Investitionssumme dividiert. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass allfällige Investitionskredite zwar zum investierten Kapital gehören, jedoch keinen Zins aufweisen.

3. Die Eigenkapitalrentabilität oder Eigenkapitalrendite ist der Gewinn bzw. der Verlust im Verhältnis zum eingesetzten Eigenkapital. Von den Totalen Kosten werden die Zinskosten des Eigenkapitals (Zinsanspruch) abgezogen. Die Differenz zum Gesamterlös wird dann durch das eingesetzte Eigenkapital dividiert. Die Eigenkapitalrentabilität kann mit alternativen Kapitalanlagen verglichen werden. Ein Zinsanspruch von 3 % bei einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren gilt als erreicht, wenn die Eigenkapitalrentabili-

tät mindestens 1,72 % beträgt (mittlerer Zinssatz des gebundenen Kapitals).

4. Die Stromgestehungskosten (Rp./kWh) ergeben sich, indem man die Totalen Kosten durch die produzierte Strommenge dividiert. Dabei handelt es sich um den Break-Even-Point oder die Gewinnschwelle, also jenen Strompreis, der für eine Kostendeckung nötig ist (Gewinn=0). Diese Grösse ist hilfreich für den Quervergleich mit anderen Verfahren der Stromproduktion.

## Ergebnisse

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 5 m/s auf 50 m über Grund. Gemäss Übersichtskarte (Abb. 4) werden bei dieser Windstärke doch einige landwirtschaftsrelevante Standorte, insbesondere in der Jura-Region und Hügellagen südwestlich von Luzern, erfasst. Die Ergebnisse weisen jedoch bei allen Anlagen einen Verlust auf. Bei den Starkwindanlagen betragen Abschreibungen und Zinskosten 57 % der

Gesamtkosten, während 43 % auf die Betriebskosten fallen. Dabei wurden wie erwähnt keine Eigenleistungen des Landwirtes eingerechnet. Bei der Leichtwindanlage wurde der Betriebskostenanteil mit 8 % der Gesamtkosten deutlich geringer berechnet. Die Gestehungskosten widerspiegeln den Strompreis, der für eine Kostendeckung bei einer mittleren Windstärke von 5 m/s nötig wäre. Sie liegen mit 27–30 Rappen für Starkwindanlagen bzw. mit 51 Rappen für die Leichtwindanlage doch deutlich über den Tarifen der kostendeckenden Einspeisevergütung.

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Gewinns bzw. Verlusts in Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit. Die Leichtwindanlage ist bei allen Windstärken bei der gegenwärtigen Einspeisevergütung von 20 Rp./kWh nicht kostendeckend und verbucht jährliche Verluste zwischen 5000 und 10 000 Franken. Die Grosswindanlagen erreichen die Gewinnzone erst bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von knapp unter bzw. über 6 m/s.

Analog dazu sind in Tabelle 6 die Rentabilitäten für die Grosswindanlagen aufgeführt. Auch hier beginnen die Anlagen erst ab einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6 m/s zu rentieren.

Ein Blick auf die Karte (Abb.4) zeigt, dass somit nur an äusserst wenigen Standorten in der Schweiz eine kostendeckende Windstromerzeugung möglich ist (dunkelorange/rote Gebiete).

## Schlussfolgerungen

Anhand von vier Windkraft-Modellanlagen erfolgte mit einem Kalkulationsmodell eine Rentabilitätsberechnung aufgrund der aktuell gültigen Einspeisevergütung. Die Kalkulationen lassen, unter Vorbehalt der getroffenen Annahmen, folgende Schlussfolgerungen zu:

- Der Standort ist für die Rentabilität einer Windkraftanlage entscheidend. Erst in zweiter Linie folgen übrige, kostensenkende Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Finanzierung oder bei der Senkung der Investitionssumme. Für Letzteres gibt es hingegen bei der gegenwärtigen Nachfragesituation kaum Spielraum.
- Windkraftanlagen können nur an sehr wenigen Standorten der Schweiz rentabel betrieben werden. In Landwirtschaftsgebieten sind allenfalls ein paar wenige Standorte im Jura betroffen, die mittlere

**Tabelle 5: Erlöse, Kosten und Gewinne bei durchschnittlicher Windgeschwindigkeit von 5 m/s auf 50 m über Grund**

WKA-Typ	WKA-1	WKA-2	WKA-3	Aventa AV-7
Erlöse	190 840	310 054	500 492	3835
Kosten	311 352	451 015	733 733	9865
Gewinn/Verlust	-120 512	-140 961	-233 241	-6030
Gestehungskosten in Rappen	29,9	26,6	26,7	51,4

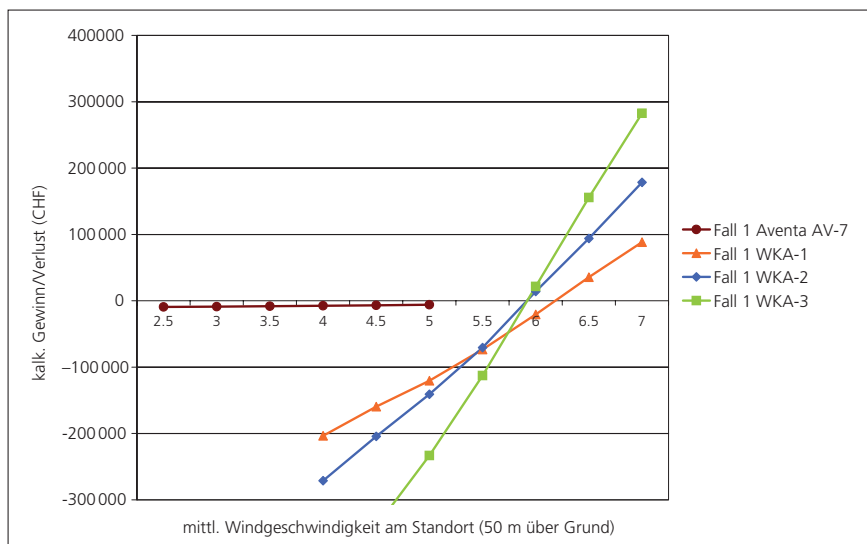


Abb. 5: Gewinn/Verlust in Abhängigkeit von verschiedenen Windgeschwindigkeiten

**Tabelle 6: Rentabilität der Grosswindanlagen in Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit**

Kapitalrendite (gesamtes Kapital)	WKA-1	WKA-2	WKA-3
4 m/s	-6,1 %	-5,4 %	-5,5 %
4,5 m/s	-4,3 %	-3,4 %	-3,5 %
5 m/s	-2,6 %	-1,6 %	-1,6 %
5,5 m/s	-0,6 %	0,5 %	0,6 %
6 m/s	1,6 %	3 %	3 %
6,5 m/s	4 %	5,3 %	5,5 %
7 m/s	6,2 %	7,8 %	7,8 %
Eigenkapitalrendite			
4 m/s	-41 %	-38 %	-39 %
4,5 m/s	-32 %	-28 %	-29 %
5 m/s	-24 %	-19 %	-19 %
5,5 m/s	-14 %	-9 %	-9 %
6 m/s	-2,6 %	3,8 %	3,7 %
6,5 m/s	9,3 %	15,5 %	15,9 %
7 m/s	20,4 %	28 %	27,4 %

- Windgeschwindigkeiten von mehr als 6 m/s aufweisen.
- An den eher verbreiteten Standorten mit mittleren Windgeschwindigkeiten von rund 5 m/s ist mit den gegenwärtigen Einspeisevergütungen keine Kostendeckung

zu erzielen. Die Stromgestehungskosten der Modellanlagen liegen dort über 50 % über den Einspeisevergütungen bei Starkwindanlagen bzw. über 150 % über den Einspeisevergütungen bei Kleinwindanlagen.

## Anhang

### Technische Grundlagen

Moderne Windkraftanlagen nutzen zur Stromerzeugung das Auftriebsprinzip und werden dadurch zu aerodynamisch angetriebenen Anlagen. Die Rotorblätter haben ein aerodynamisches Profil, das ähnlich wie bei einer Flugzeugtragfläche durch Druckunterschied Auftrieb erzeugt. Der Druckunterschied entsteht durch den Geschwindigkeitsunterschied zwischen der Saug- und der Druckseite des Flügels. Der Auftrieb lässt die Rotoren eine Drehbewegung ausführen, diese Rotordrehzahl lässt sich durch zwei Arten regeln, um eine Überlastung des Generators und der restlichen Maschinenteile zu verhindern.

Es wird zwischen dem Stall- und Pitch-Konzept unterschieden. Beim Stall-Konzept wird die Anströmrichtung verändert, der Anstellwinkel vergrößert sich und an der Saugseite der Rotorblätter kommt es zu einer Strömungsablösung (engl. stall), der Auftrieb wird vermindert und der Widerstand erhöht. Das Pitch-Konzept basiert auf einer stärkeren Verstellung des Blattwinkels (engl. to pitch=neigen). Wird die Windgeschwindigkeit zu hoch, wird das Rotorblatt mit der Vorderkante aktiv in den Wind gedreht, dadurch verringert sich der Anstellwinkel, Leistung und Belastung werden begrenzt. Am Markt haben sich heute die pitch-geregelten, drehzahlvariablen Leichtbauanlagen durchgesetzt und die einfachen, robusten Stall-Anlagen praktisch verdrängt. Durch den Einsatz moderner Regelungstechnik geht die Anlage gleitend ans Netz und bei zu starkem Wind wird die Leistung herabgeregelt und eine gleichmässige Einspeisung gewährleistet. Bei Sturm fährt die Anlage sanft hinunter und verhindert so einen abrupten Leistungsanfall. Damit werden Störungen im Übertragungsnetz verhindert und die Netzverträglichkeit der Anlage erhöht sich.

## Literatur

Bührke T., Wengenmayr R. (Hrsg.), 2007, Erneuerbare Energie: Alternative Energiekonzepte für die Zukunft, 1. Auflage, WILEY-VCH, Weinheim.

Gazzarin Ch. und Zumbühl Th. 2008: Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben – lohnt sich die Investition? ART-Bericht Nr. 694, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, Ettenhausen.

Gubler N., Gazzarin Ch., Dux D. und Engeli H. 2007: Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen – wichtige Einflussfaktoren am Beispiel von zwei Modellanlagen. ART-Bericht Nr. 676, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, Ettenhausen.

KTBL, Kuratorium für Landtechnik und Bauwesen in der Landwirtschaft, KTBL-Schrift 420, 2004, Die Landwirtschaft als Energieerzeuger, Darmstadt.

Kaltschmitt M., Streicher W. und Wiese A. (Hrsg.), 2006. Erneuerbare Energien Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Suisse Eole 2007. Windenergie in der Schweiz – Zahlen und Fakten, Informationsblatt Stand 12.01.2007, Bubendorf.

## Weitere Quellen

- Revision der Energieverordnung & Stromversorgungsverordnung (StromVV) – Eröffnung des Vernehmlassungsverfahrens, erschienen: 27.6.2007, Institution: Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
- Paul Scherrer Institut (PSI) für das Bundesamt für Energie (BFE), Final Draft 24 September 2004, BFE Energieperspektiven: Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen, Kapitel 5: Windenergie.
- Rigassi R. für Suisse Eole, Schlussbericht November 2005, Sicherheit von Windkraftanlagen in der Schweiz (Hauptbericht), im Auftrag des BFE.
- Millais C., Teske S., Mai 2004, Windstärke 12 (Wind Force 12), Wie es zu schaffen ist, bis zum Jahr 2020 12 % des weltweiten Elektrizitätsbedarfs durch Windenergie zu decken, European Wind Energy Association & Greenpeace.
- <http://www.windpower.org/de/tour/wres/pow/index.htm>

Anfragen über andere landtechnische Probleme sind an die unten aufgeführten Berater für Landtechnik zu richten.

Weitere Publikationen und Prüfberichte können direkt bei der ART, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen angefordert werden, Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90, E-Mail: [doku@art.admin.ch](mailto:doku@art.admin.ch), Internet: <http://www.art.admin.ch>

<b>ZH</b>	Mayer Gerd, Strickhof, 8315 Lindau, Telefon 052 354 98 11 Blum Walter, Strickhof, 8315 Lindau, Telefon 052 354 99 60	<b>FR</b>	Kilchherr Hansruedi, Landw. Schule Grangeneuve 1725 Posieux, Telefon 026 305 58 50
<b>BE</b>	Jutzeler Martin, Inforama Berner Oberland, 3702 Hondrich, Telefon 033 654 95 45 Marti Fritz, Inforama Rütli und Waldhof, 3052 Zollikofen, Telefon 031 910 52 10 Hofmann Hans Ueli, Inforama Rütli und Waldhof, 3052 Zollikofen, Telefon 031 910 51 54	<b>SO</b>	Ziörjen Fritz, Landw. Bildungszentrum Wallierhof, 4533 Riedholz, Telefon 061 976 21 21
<b>LU</b>	Moser Anton, LBBZ Schüpfheim, 6170 Schüpfheim, Telefon 041 485 88 00 Widmer Norbert, LBBZ, Sennweidstrasse, 6276 Hohenrain, Telefon 041 914 30 77	<b>BL</b>	Ziörjen Fritz, Landw. Zentrum Ebenrain, 4450 Sissach, Telefon 061 976 21 21
<b>UR</b>	Landw. Beratungsdienst, Aprostr. 44, 6462 Seedorf, Telefon 041 871 05 66	<b>SH</b>	Landw. Beratungszentrum Charlottenfels, 8212 Neuhausen, Telefon 052 674 05 20
<b>SZ</b>	Landolt Hugo, Landw. Schule Pfäffikon, 8808 Pfäffikon, Telefon 055 415 79 22	<b>AI</b>	Landw. Beratungsdienst AI, Gaiserstrasse 8, 9050 Appenzell, Telefon 071 788 95 76
<b>OW</b>	Müller Erwin, BWZ Obwalden, 6074 Giswil, Telefon 041 675 16 16 Landwirtschaftsamt, St. Antonistr. 4, 6061 Sarnen, Telefon 041 666 63 58	<b>AR</b>	Vuilleumier Marc, Landwirtschaftsamt AR, 9102 Herisau, Telefon 071 353 67 56
<b>NW</b>	Scheuber Roland, Landwirtschaftsamt, Kreuzstr. 2, 6371 Stans, Telefon 041 618 40 01	<b>SG</b>	Lehmann Ueli, Landwirtschaftliches Zentrum SG, 9465 Salez, Telefon 081 758 13 19 Steiner Gallus, Landwirtschaftliches Zentrum SG, 9230 Flawil, Telefon 071 394 53 94
<b>GL</b>	Amt für Landwirtschaft, Postgasse 29, 8750 Glarus, Telefon 055 646 67 00	<b>GR</b>	Merk Konrad, LBBZ Plantahof, 7302 Landquart Telefon 081 307 45 25
<b>ZG</b>	Gut Willi, LBBZ Schluechthof, 6330 Cham, Telefon 041 784 50 54 Furrer Jules, LBBZ Schluechthof, 6330 Cham, Telefon 041 784 50 50	<b>AG</b>	Müri Paul, LBBZ Liebegg, 5722 Gränichen, Telefon 062 855 86 27
		<b>TG</b>	Baumgartner Christof, Fachstelle Beratung und Landtechnik, Amriswilerstr. 50, 8570 Weinfelden, Telefon 071 622 10 23
		<b>TI</b>	Müller Antonio, Ufficio consulenza agricola, 6501 Bellinzona, Telefon 091 814 35 53
		<b>AGRIDEA</b>	Abteilung Landtechnik, 8315 Lindau, Telefon 052 354 97 00

## Impressum

Herausgeber: Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART,  
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen

Die ART-Berichte erscheinen in rund 20 Nummern pro Jahr. – Jahresabonnement  
Fr. 60.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: ART, Bibliothek,  
CH-8356 Ettenhausen. Telefon +41 (0)52 368 31 31, Fax +41 (0)52 365 11 90,  
[doku@art.admin.ch](mailto:doku@art.admin.ch), <http://www.art.admin.ch>

Die ART-Berichte sind auch in französischer Sprache als «Rapports ART» erhältlich.  
ISSN 1661-7568.

Die ART-Berichte sind im Volltext im Internet ([www.art.admin.ch](http://www.art.admin.ch))