

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 82 (1991)

Heft: 6

Artikel: Messresultate einer 28-kW-Windkraftanlage auf dem Jura

Autor: Horbaty, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902947>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Messresultate einer 28-kW-Windkraftanlage auf dem Jura

R. Horbaty

Seit zwei Jahren wurden mit der netzgekoppelten Windkraftanlage HSW-30 im Jura Messdaten erfasst und Betriebs Erfahrungen gesammelt. Die Produktion der im Automatikbetrieb laufenden, mit einem 28-kW-Asynchron-Generator ausgerüsteten Anlage schwankt in Abhängigkeit von den Windverhältnissen, was zu ebenfalls variierenden Stromgestehungskosten von 62 bis 82 Rp. pro kWh führt.

L'installation éolienne raccordée au réseau dans le Jura permet depuis deux ans d'enregistrer des données techniques et des expériences pratiques. La production de l'installation qui fonctionne automatiquement avec un générateur asynchrone de 28 kW varie en fonction du régime des vents. La conséquence en est que le prix de revient de l'électricité est également variable, allant de 62 à 82 ct. par kWh.

Adresse des Autors
Robert Horbaty, Mitarbeiter am Ökozentrum
Langenbruck, Schwengistrasse 12, 4438 Langenbruck

Überblick

Die Windkraftanlage HSW-30 des Ökozentrums Langenbruck ist auf dem Sool, einem 1000 m ü. M. gelegenen Höhenzug zwischen Langenbruck und Mümliswil, installiert. Die Anlage steht 170 m östlich vom Bauernhof «Sool» der Familie Kunz.

Bei der Anlage handelt es sich um eine blattregulierte Horizontalachs-Windturbine HSW-30 der Husumer Schiffswerft, mit einer Masthöhe von 18 m und einem Zweiblatt-Rotor von 12 m Durchmesser. Die nominelle Leistung des Asynchron-Generators beträgt 7,5 kW auf der kleinen und 28 kW auf der grossen Drehzahl. Die Installation und der Betrieb dieser Anlage wurden massgeblich durch das Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Baselland unterstützt.

Der Überschuss des mit der Anlage produzierten und nicht direkt vom Hof verbrauchten Stroms wird ins Netz der Elektra Baselland (EBL) eingespielen.

Betriebserfahrungen August 1988 bis Dezember 1990

Nach einigen Anfangsschwierigkeiten ist die HSW-30 seit dem 20.1.1989 nun 100 % verfügbar – mit Ausnahme der Wartungen und der Stillstandszeiten wegen zu starken Winden, welche teilweise ein manuelles Wiedereinschalten der Anlage nötig machen.

In der Messperiode war die Anlage 7705 Stunden (37 %) am Netz – 17 % auf der kleinen und 20 % auf der grossen Drehzahl – und produzierte netto 33 375 kWh. Rund 5 % der produzierten Energie wurde von der Hydraulik und der elektronischen Steuerung verbraucht, 17 % der Nettoerzeugung konnten im Bauernhof direkt verwendet werden und 83 % wurden ins Netz der EBL zurückgeliefert.

Energiepolitisch interessant ist die Tatsache, dass rund 32 % der erzeugten

Energie im Sommer und 68 % im Winter produziert wurde. Auch lag die Nettoproduktion der Anlage im Winter 64 % über dem Stromverbrauch des Hofes. Da Stromproduktion und -verbrauch jedoch zeitlich verschoben sind, kann der Hof auch im Winter effektiv nur 14 % der erzeugten Energie direkt verbrauchen.

Resultate

Die HSW-30 auf dem Sool hat ihre Bewährungsprobe bestanden. Seit Anfang 1989 läuft die Anlage ohne nennenswerte Schwierigkeiten im Automatikbetrieb. Sogar die orkanartigen Stürme im Februar 1990 verursachten keine Probleme – im Gegenteil: Vom 2.2.90 bis 2.3.90 produzierte die Windkraftanlage 4340 kWh Elektrizität aus der unerschöpflichen Energiequelle Wind.

Aufgrund der zu Beginn der Messperiode noch nicht optimal an die turbulenten Winde am Standort angepassten Regelung konnten nur 80 % des prognostizierten Energieertrags produziert werden.

Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass bei netzgekoppelten Windkraftanlagen mit konstanter Drehzahl aufgrund der aerodynamischen Vorgänge immer eine Diskrepanz zwischen theoretischer Vorhersage und effektivem Ertrag in der Grössenordnung von 10 bis 20 % auftreten wird.

Installation der HSW-30

Projekt

Von April 1986 bis Februar 1988 hatte das Ökozentrum Langenbruck auf dem Sool eine 18-kW-Windkraftanlage Aeolus 11 der Firma Aerodyn betrieben. Infolge eines Getriebeschadens musste die Gondel dieser Anlage ersetzt werden.

Um auf dem Gebiet der Windenergie in der Schweiz zusätzliche Erfahrungen

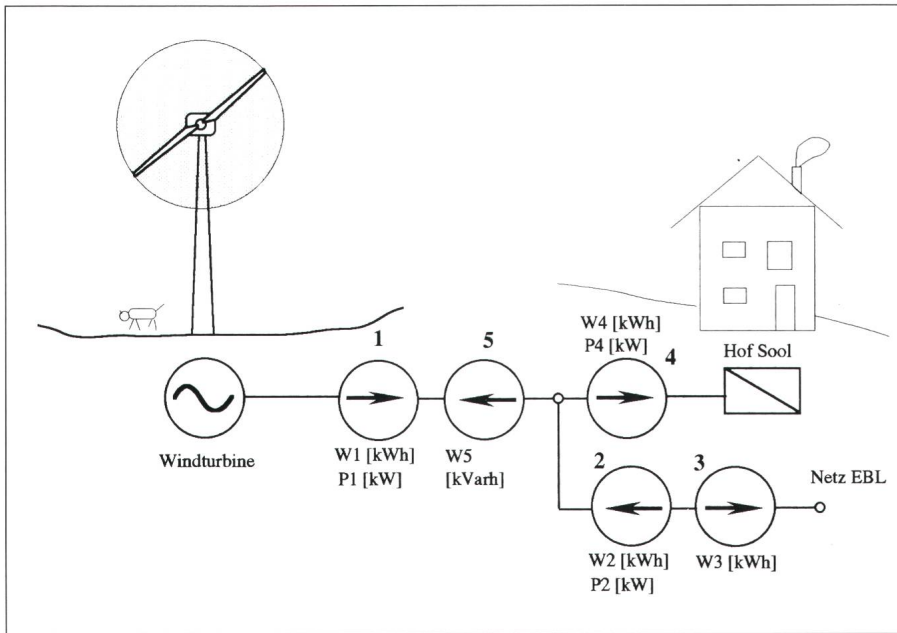


Bild 1 Schema der Netzeinbindung der Installation auf dem Sool

und Messdaten sammeln zu können, wurde der Kanton BL ersucht, den Ersatz der Gondel und die Messdatenerfassung der neuen Installation während sieben Jahren zu fördern. Folgende Erkenntnisse konnten mit dieser Anlage gewonnen werden:

- Ermittlung des Energieertrags einer optimierten Windturbine
- Quantifizierung des Einflusses der Windverhältnisse (Böen, Turbulenzen etc.) auf den Energieertrag einer Windturbine
- Ermittlung eines Korrekturfaktors für die Energieertragsberechnungen (theoretischer Ertrag aufgrund idealer Herstellerangaben / effektiv gemessener Energieertrag)
- Ermittlung des Anteils Windstrom in der Stromversorgung eines Jura-Bauernhofes
- Ermittlung des Beitrags einer Windturbine an die Stromversorgung allgemein
- Grundlage für weitere Untersuchungen über Standortfragen von Windkraftanlagen auf kantonaler und eidgenössischer Ebene.

Windenergieanlagen >10 kW zur schadstofffreien Produktion von elektrischer Energie stellen in der Schweiz eine wenig bekannte technische Möglichkeit dar, einzig eine 160-kW-Anlage in Martigny, die erwähnte Anlage auf dem Sool und eine Anlage gleichen Typs auf dem Simplon sind momentan in Betrieb. Im Rahmen der EGES (Expertengruppe Energieszenarien) wurde – aufgrund der mangelnden Grundlagen mit gewissen Unsicherheiten behaftet –

für Windenergie ein theoretisches Potential von 1 bis 2 % des heutigen Stromverbrauchs ermittelt [1]. Eine Aussage, welche auch durch eine Windenergiepotentialstudie des Kantons Berns bestätigt wurde [2]. Die Erforschung und praktische Anwendung dieser Systeme sind deshalb von allgemeinem energiepolitischem Interesse.



Bild 2 Montage der neuen Gondel auf den bestehenden Mast der Installation auf dem Sool

Netzeinbindung

In Bild 1 ist die Messanordnung der Stromzähler bei der Installation Soolhof dargestellt. Das Ökozentrum, als Betreiber der Anlage, stellt der Elektra Baselland (EBL) Rechnung für ins Netz zurückgelieferte Energie, verrechnet dem Bauer die direkt von der Anlage bezogene Energie und vergütet der EBL den aus dem Netz bezogenen Strom.

Windturbine HS-W-30

Diese von der Firma Aerodyn entwickelte und von der Husumer Schiffswerft gefertigte Windkraftanlage erfüllt die Anforderungen an eine kleine netzgekoppelte Anlage mit hohem Wirkungsgrad auf ideale Weise:

- Aktive elektrohydraulische Blattverstellung zur Leistungs- und Drehzahlregelung (auch optimal geeignet für Inselanlagen mit Dieselgenerator). Dies erlaubt ein Anlaufen bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten und ein Ausweichen von unnötigen Belastungen bei hohen Windgeschwindigkeiten – unter Beibehaltung der vollen Nennleistung.
- Leeseitig angeordneter Zweiblattrotor mit einem Durchmesser von 12,5 m. Passive Windrichtungsnachführung durch auf den Rotor wirkende Windkräfte.

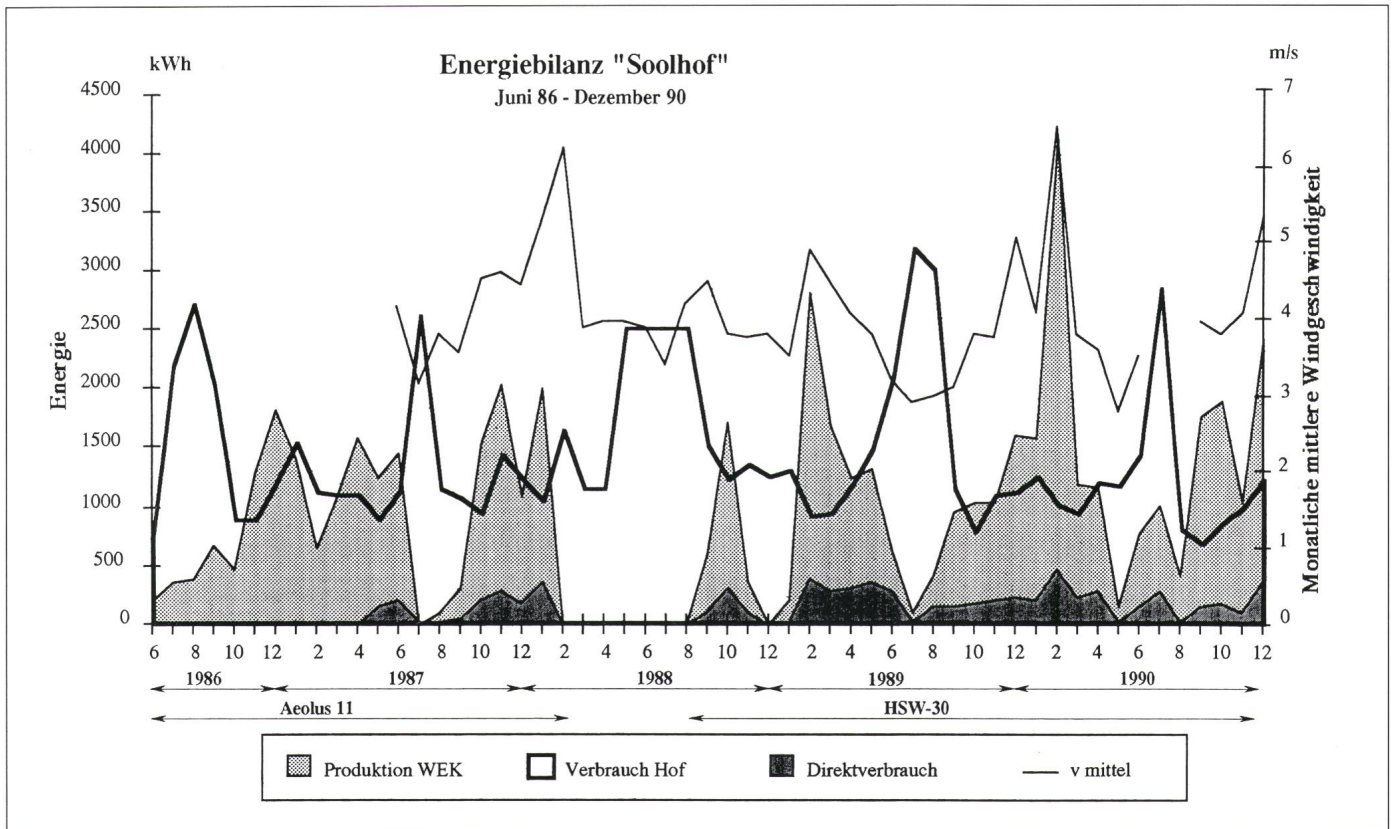


Bild 3 Energiebilanz «Aeolus 11» und HSW-30 auf dem Sool, mit Verbrauchskurve des Bauernhofes und der monatlichen mittleren Windgeschwindigkeit

- Zwei unabhängige Sicherheitssysteme durch Blattverstellung und hydraulischer Rotorbremse auf der Rotorwelle.

Die Anlage ist typengeprüft nach den Richtlinien des Landes Schleswig Holstein. Konstruktion und Sicherheitskonzept wurden vom germanischen Lloyd als Gutachter geprüft.

Montage

Am 18.8.1988 wurde die defekte Anlage demontiert und durch eine Serienanlage des Typs HSW-30 ersetzt (Bild 2). Mast, Rotorblätter, Fundament, elektrische Installationen und Hausinstallationen konnten weiterhin verwendet werden.

Probetrieb

In der Zeit vom 18.8. bis 30.9.1988 wurden verschiedene Anpassungsarbeiten an der Elektronik und an der frei programmierbaren Steuerung durchgeführt, um die Anlage an die am Standort herrschenden Windverhältnissen anzupassen.

Schadenfälle

Leider hat die Anlage nicht von Anfang an einwandfrei funktioniert. Nachfolgend die Chronik der laufenden Ereignisse:

- 13.9.88: Defektes Druckventil der Hydraulikversorgung.
- 14.10.88: Relais der Hydraulikpumpe defekt.
- 25.11.88: Wackelkontakt am Druckschalter.
- 29.11.88: Reibgeräusch am Generator. Abklärungen ergaben Lagerschaden, da der Generator nicht optimal ausgerichtet war. Der Lagerwechsel wurde von der Schiffswerft behoben und bezahlt.

Seit Wiederinbetriebnahme der Anlage am 20.1.1989 war die Anlage 100 % verfügbar – mit Ausnahme der Wartungen und der Stillstandszeiten wegen zu hohen Windgeschwindigkeiten, welche teilweise ein manuelles Wiedereinschalten der Anlage nötig machten (siehe auch Bild 3).

Betriebserfahrungen

Im folgenden sollen nun die Erfahrungen mit dem Betrieb dieser Anlage genauer analysiert werden. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Installation auf dem Sool die einzige netzgekoppelte Windkraftanlage der Schweiz ist, mit welcher – im Automatikbetrieb – mehr als 2 Jahre Erkenntnisse zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz gewonnen werden konnten. Dies fand auch seinen Niederschlag

in der Publikation «Meteonorm Wind» des Bundesamtes für Energiewirtschaft, in welcher sich die Erfahrungen mit der HSW-30 als roter Faden durch die einzelnen Kapitel ziehen [3].

Verfügbarkeit

Ein wesentliches Qualitätszeichen für eine Windkraftanlage ist die Verfügbarkeit. Sie sagt einerseits aus, wie häufig die Anlage wegen Pannen stillsteht, und andererseits wie schnell das Servicepersonal auf dem Platz ist. Sie sagt nicht aus, wieviel Energie produziert worden ist, sondern nur, wie oft die Anlage laufen könnte, wenn genügend Wind vorhanden wäre.

Aufgrund der Schwierigkeiten zu Beginn der Messperiode war die Anlage in der Zeit vom 19.8.88 bis 31.12.1990 (20 736 Std.) während 17 949 Stunden betriebsbereit. Ihre Verfügbarkeit betrug also 87 %.

Betriebszeit

Die HSW-30 setzt sich ab einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s selbstständig in Betrieb (siehe auch Bild 4). Bei kleinen Windgeschwindigkeiten mit einer Rotordrehzahl von 46 U/min, bei grösseren Windgeschwindigkeiten mit 92 U/min. Dies entspricht einer Generator-drehzahl von 750 bzw. 1500 U/min.

Messperiode (= 100 %)	750 U/min		1500 U/min		gesamt	
	Stunden	%	Stunden	%	Stunden	%
19. 8.88–31.12.90	3562	17,2	4143	20,0	7705	37,2
31.12.88–30.12.89	1517	17,3	1744	19,9	3261	37,2
30.12.88–31.12.90	1576	18,0	2112	23,0	3588	41,0
Sommer 89 und 90	1859	21,2	1514	17,3	3373	38,5
Winter 89 und 90	1237	14,1	2242	25,6	3476	39,7

Tabelle I Betriebszeit der HSW-30 auf dem Sool

Wie Tabelle I zeigt, war die Anlage während mehr als einem Drittel der Messperiode in Betrieb – im Sommer häufiger auf der kleinen und im Winter öfter auf der grossen Drehzahl.

Energieertrag

Die Windkraftanlage auf dem Sool verbraucht sowohl im Standby-Betrieb (bei Wind < 3,5–4 m/s) als auch bei kurzen Flauten, welche die Anlage als Motor laufen lässt, selbst Strom (siehe auch Bild 6–8). Nebst dem Energieertrag (Hoch- und Niedertarif, HT+NT) während den verschiedenen Messperioden ist in Tabelle II dieser Eigenverbrauch ebenfalls aufgeführt.

Aufgrund der häufigeren Flauten liegt der Eigenverbrauch der Anlage im Sommer deutlich über demjenigen des Winters.

Bemerkenswert ist, dass vom 31.12.88 bis 31.12.90 in den Sommerhalbjahren 32 % und in den Winterhalbjahren 68 % der Nettoenergie erzeugt wurde.

Über die gesamte Messperiode hinweg hat die Anlage gemäss Tabelle III je rund zur Hälfte im Hoch- und im Niedertarif Strom erzeugt, im Winter eher mehr im Hochtarif.

Die Gleichzeitigkeit des Verbrauchs des Hofes und der Produktion der Windkraftanlage ist relativ schlecht (siehe Tabelle IV). Nur gerade 17 % der produzierten Energie konnte vom Bauernhof direkt verwendet werden, 83 % wurden ins Netz der EBL zurückgeliefert. Dies ist bei den heutigen Rücknahmetarifen betriebswirtschaftlich schlecht, volkswirtschaftlich jedoch po-

Messperiode	Energieerzeugung		Eigenverbrauch (HT + NT)		Nettoerzeugung	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%
19. 8.88–31.12.90	35 322	100	1 947	5,5	33 375	94,5
31.12.88–30.12.89	13 882	100	790	5,7	13 092	94,3
30.12.89–31.12.90	18 504	100	852	4,6	17 652	95,4
Sommer 89 und 90	10 854	100	891	8,2	9 963	91,8
Winter 89 und 90	21 532	100	751	3,5	20 781	96,5

Tabelle II Energieertrag der HSW-30 auf dem Sool

definiert sowohl die Windverhältnisse am Standort als auch den Wirkungsgrad der eingesetzten Windenergieanlage:

$$C = \frac{\text{Jahresproduktion (kWh)} / 8760 \text{ Stunden}}{\text{Nennleistung in kW}}$$

$$C = \frac{P}{P_{\text{nom.}}}$$

sitiv zu bewerten. Energiepolitisch interessant ist zudem, dass in den Winterhalbjahren die Nettoproduktion der Anlage um 39 % höher liegt als der Gesamtverbrauch des Hofes.

Wäre die Anlage während der gesamten Messperiode mit 6,5 % ihrer Nennleistung gelaufen (1,6 kW), so hätte dieselbe Energieproduktion resultiert (Tab. V).

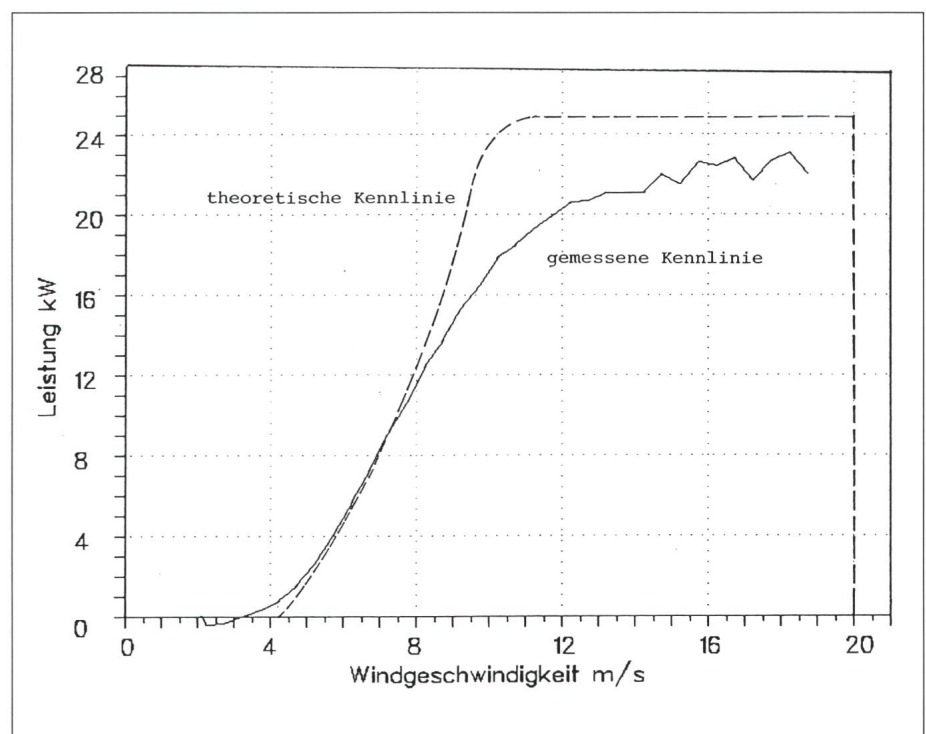


Bild 4 Theoretische und effektive Leistungskennlinie der HSW-30 auf dem Sool, vor Erhöhung der Leistung

Kapazitätsfaktor

Um den Standort einer Windkraftanlage charakterisieren und mit anderen vergleichen zu können, ist es notwendig, den Kapazitätsfaktor oder Vollastnutzungsgrad (engl. Capacity factor) «C» zu verwenden. Dieser Faktor «C»

Leistungskennlinien

Bild 4 zeigt den Vergleich der Leistungskennlinie nach Herstellerangaben und die am Standort Sool vom 18.3.89 bis 30.3.90 (auf der Basis von 85 875 5-Minuten-Mittelwerten) erfasste Kennlinie.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass nur Mittelwerte verwendet wurden, bei denen die Anlage während den gesamten 5 Minuten entweder auf der kleinen oder auf der grossen Drehzahl in Betrieb war (Statuszeile in Bild 5–8: kk oder gg). Das heisst, dass in der effektiven Kennlinie die Verluste durch abgebrochene Anfahrversuche (in der Periode vom 19.8.88 bis 31.12.90 = 1162 mal!), durch das Anfahren oder

Messperiode	Nettoenergieerzeugung		Verbrauch Hof Sool		Netzeinspeisung	
	Hochtarif	Niedertarif	Hochtarif	Niedertarif	Hochtarif	Niedertarif
19. 8.88–31.12.90	48,7 %	51,3 %	52,8 %	47,2 %	49,5 %	50,5 %
31.12.88–30.12.89	40,4 %	59,6 %	49,8 %	50,2 %	41,3 %	58,7 %
30.12.89–31.12.90	55,2 %	44,8 %	54,9 %	45,1 %	55,8 %	44,2 %
Sommer 89 und 90	40,4 %	59,6 %	50,2 %	49,8 %	41,8 %	58,2 %
Winter 89 und 90	53,0 %	47,0 %	55,1 %	44,9 %	53,4 %	46,6 %

Tabelle III Anteil Hoch- und Niedertarif (HT und NT)
 Hochtarif im Netz der Elektra Baselland: Montag bis Freitag 6.00 – 21.00 Uhr
 Samstag 6.00 – 12.00 Uhr
 In der übrigen Zeit gilt der Niedertarif.

Messperiode	Nettoerzeugung		Verbrauch Hof		Direktverbrauch Hof von HSW-30		Rückspeisung ins Netz der EBL	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
19. 8.88–31.12.90	33 375	100	38 644	115,8	5 552	16,6	27 823	83,4
31.12.88–30.12.89	13 092	100	18 522	141,0	2 629	20,1	10 463	79,9
30.12.89–31.12.90	17 652	100	14 692	83,2	2 470	14,0	15 182	86,0
Sommer 89 und 90	9 963	100	20 519	206,0	2 220	22,3	7 743	77,7
Winter 89 und 90	20 781	100	12 695	61,1	2 879	13,9	17 902	86,1

Tabelle IV Energiebilanz HSW-30 / Bauernhof

Umschalten von der kleineren auf die grössere Drehzahl nicht berücksichtigt sind.

Deutlich zu erkennen ist die leicht bessere Ausbeute bei kleinen und der massiv schlechtere Energieertrag bei hohen Windgeschwindigkeiten.

Gründe dafür sind:

- der sich mit den Turbulenzen ändernde aerodynamische Wirkungsgrad bei konstanter Rotordrehzahl
- Leistungsregler war zu tief eingestellt, am 28.9.90 wurde er auf 28 kW erhöht (siehe auch Bild 8)
- geringe Luftdichte auf 1000 m.ü.M.
- negativer Einfluss der Turbulenzen
- schnelle Windrichtungsänderungen (Schräganströmung am Rotor).

Messdatenerfassung

Nebst wöchentlichem Ablesen der Stromzähler werden auf dem Sool auf der Basis von Momentanwerten (10-Sekunden-Mittel) folgende Daten erfasst und ausgewertet:

- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Leistung der Anlage
- Standardabweichungen der mittleren Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Leistung
- Betriebszustand

Die in den Bildern 5–8 aufgeführten Statuszeilen bedeuten folgende Betriebszustände:

aa: Die Anlage war zu Beginn und am Ende der 5-Minuten-Messperiode abgestellt.

ak: Die Anlage war zu Beginn abgestellt, am Ende lief sie auf der kleinen Drehzahl.

kk: Die Anlage lief zu Beginn und am Ende auf der kleinen Drehzahl.

kg: Die Anlage lief zu Beginn auf der kleinen und am Ende auf der grossen Drehzahl.

gg: Die Anlage lief zu Beginn und am Ende auf der grossen Drehzahl usw.

Auf der Basis von 10-Sekunden-Mittelwerten zeigt Bild 5 sehr schön, wie sich die Anlage im zunehmenden Wind verhält:

Bei Wind < 4m/s befindet sich die Anlage in Standby-Position, die Hydraulikversorgung wird nur ganz kurzfristig in Betrieb genommen (2. und 6. Minute).

Liegt die Windgeschwindigkeit im 5-Minuten-Mittel über 4 m/s (3.–8. Minute), so wird ein Anfahrvorgang ausgelöst (8. Minute).

Dieser dauert rund 2 Minuten, während dieser Zeit läuft – aufgrund der Blattverstellung – die Hydraulikpumpe dauernd, was einen Mehrverbrauch zur Folge hat (8. Minute).

In der 9. Minute schaltet sich die Anlage mit der kleinen Drehzahl aufs Netz auf und läuft während den nächsten 10 Minuten mit 46 U/min. Sie gibt dabei max. 3 kW Leistung ab.

Da die Windgeschwindigkeit weiter zunimmt, löst sich die Anlage kurzfristig vom Netz, um auf die grössere

Messperiode	Kapazitätsfaktor «C»
19. 8.88 – 31.12.90	6,5
31.12.88 – 30.12.89	6
30.12.89 – 31.12.90	8,1
Sommer: 31.3.89 – 7.10.89 und 30.3.90 – 28.9.90	4,5
Winter: 31.12.88 – 31.3.89 und 7.10.89 – 30.3.90	14,6
Winter: 28.9.90 – 31.12.90	8,5 *

Tabelle V Kapazitätsfaktoren HSW-30 Sool
 *Ab 28.9.90 wurde der Leistungsregler auf 28 kW erhöht.

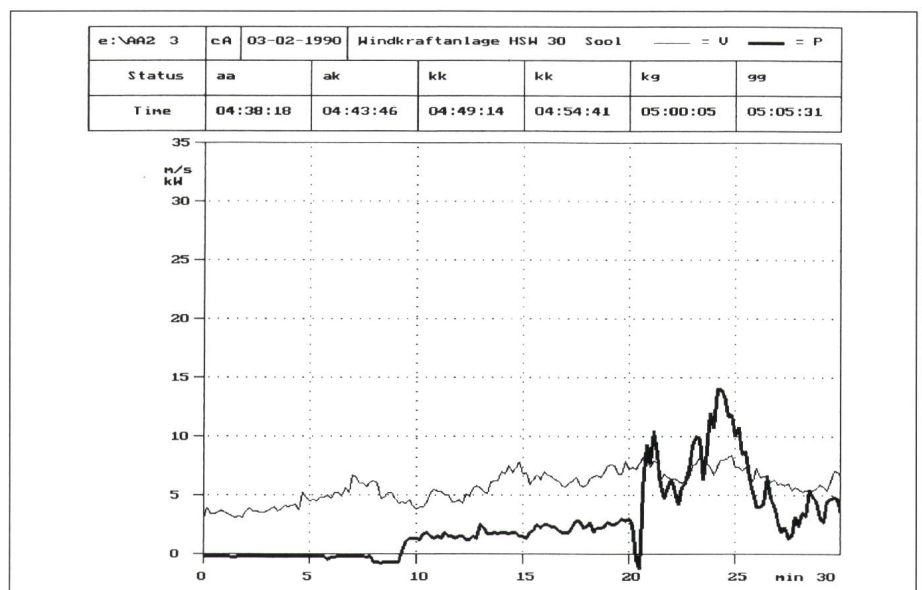


Bild 5 Windgeschwindigkeit und produzierte Leistung bei einem Anfahrvorgang

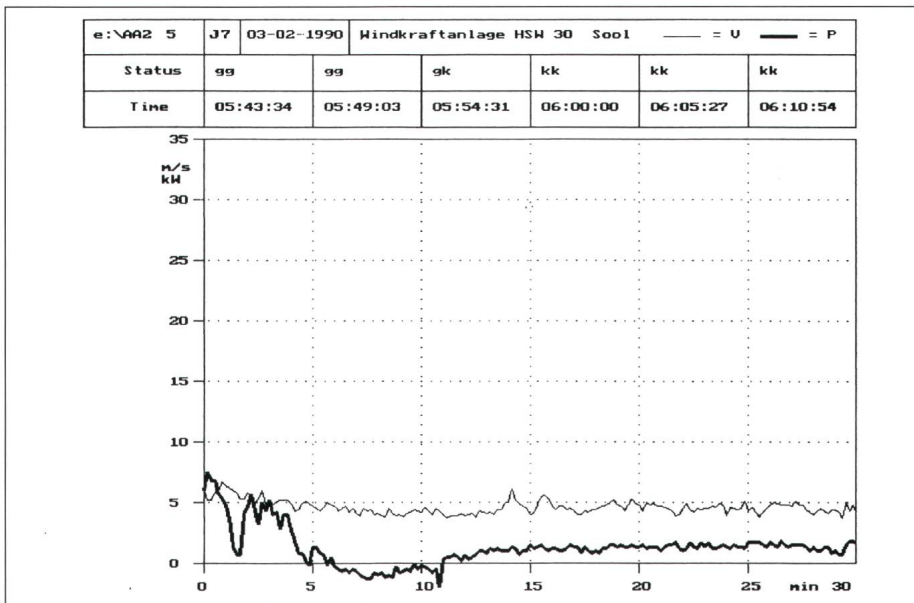


Bild 6 Umschalten von der grossen auf die kleine Drehzahl

Drehzahl hochzufahren (21. Minute), wobei dann bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s eine maximale Leistung von 14 kW produziert wird.

Offensichtlich ist die Anlage aerodynamisch nicht in der Lage, auf der kleinen Drehzahl die erwartete Leistung von 7,5 kW zu erbringen. Durch die relativ langen Mittelungszeiten bedingt, wird im Bereich von 6–7 m/s relativ viel Energie verschenkt, produziert die Anlage doch auf der grossen Drehzahl bei gleicher Windgeschwindigkeit fast die doppelte Leistung (22. Minute).

Dass das zu lange Verbleiben auf der grossen Drehzahl jedoch auch negative Folgen haben kann, zeigt Bild 6. Aufgrund des Absinkens der Windgeschwindigkeit unter 5 m/s geht die Anlage in Motorbetrieb über (6. Minute). Da der Wind in der Folge mehr oder weniger zwischen 4–5 m/s bläst, stellt die Anlage nicht ganz ab, sondern läuft auf der – in diesem Fall optimal ausgenutzten – kleinen Drehzahl weiter.

Ab rund 10 m/s Windgeschwindigkeit wird der Leistungsregler der Anlage aktiv, d.h. durch die Blattverstellung wird – um die Anlage zu schützen – Leistung wegreguliert. Bild 7 stellt dar, wie im unregulierten Bereich (0.–20. Minute) aufgrund der Turbulenzen im Wind die Leistung noch relativ stark variiert. Da ab der 20. Minute die Windgeschwindigkeit konstant über 11 m/s liegt, regelt die Anlage nun auf die – leider zu diesem Zeitpunkt zu tief eingestellten – 23 kW.

Am 28.9.90 wurde der Leistungsregler auf 28 kW erhöht. Bild 8 zeigt, dass nun die Anlage in Böenspitzen kurzzeitig bis zu 32 kW abgibt. Die Böe in der

24. Minute verursacht jedoch ein Ausschalten der Anlage aus Sicherheitsgründen.

Vergleich mit theoretischem Ertrag

Um die obigen Resultate zu verifizieren, wurde für eine Messperiode (4.2.89 bis 15.2.90), in welcher die Anlage mit Ausnahme der kurzen Wartungen und den Stillstandzeiten wegen zu viel Wind zu 100 % verfügbar war, aufgrund der Windmessungen und der vom Hersteller angegebenen Leistungskennlinie der theoretische Ener-

gieertrag ermittelt und mit der effektiven Produktion verglichen:

$$P_{\text{theor.}} = 23\,600 \text{ kWh}$$

(= 100 % , theoretischer Energieertrag auf Meereshöhe)

$$P_{\text{eff.}} = 16\,850 \text{ kWh}$$

(= 71 % des theoretischen Energieertrags auf Meereshöhe)

Woher diese Diskrepanz?

Der um 29 % geringere Energieertrag ist auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- Einfluss der geringeren Luftdichte (Kennlinie auf 0 m ü.M., Sool 1000 m ü.M.)
- Eigenverbrauch der Anlage in Stillstandszeiten
- Verlust auf der Leitung Anlage-Messtableau im Haus
- Einfluss der Turbulenzen, insbesondere der Windrichtungsänderungen
- Einfluss der Mittelungszeiten der Steuerung (z.B. 5 Minuten, bevor neuer Betriebszustand, siehe auch Bild 5–8)
- Grosse Anzahl abgebrochener Anfahrversuche (wegen Nachlassen des Windes). Diese Perioden werden zwar vom Windmessgerät erfasst, können aber nicht zur Energieproduktion genutzt werden.
- Geringe Leistung des Generators auf kleiner und grosser Drehzahl
- Stillstand der Anlage bei Wind ca. > 20 m/s.

Dies unterstreicht auch Bild 9, das den monatlichen Energieertrag der Anlage bei unterschiedlichen monatlichen mittleren Windgeschwindigkeiten

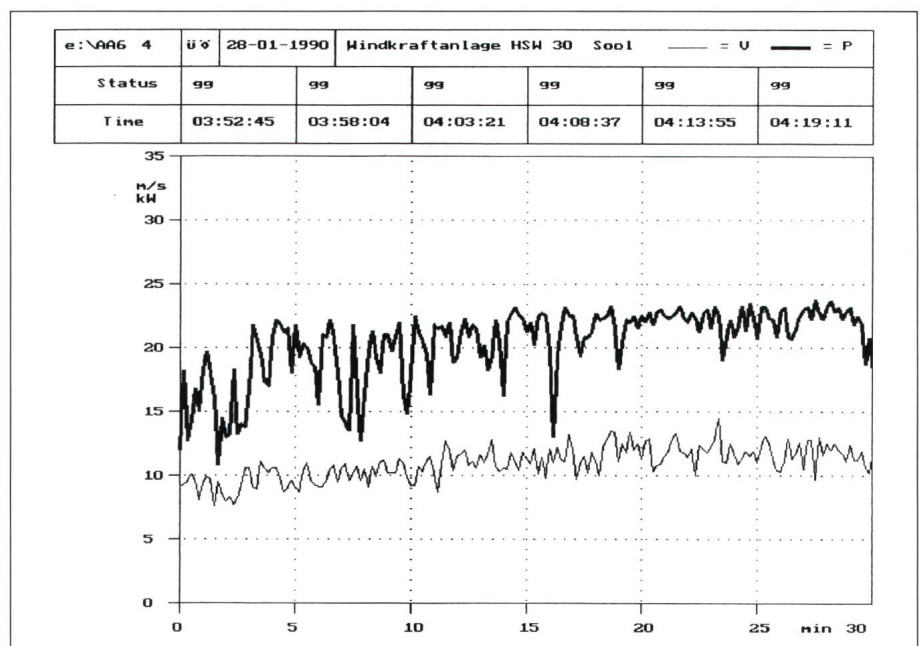


Bild 7 Anlage im Regelbetrieb mittels Blattverstellung

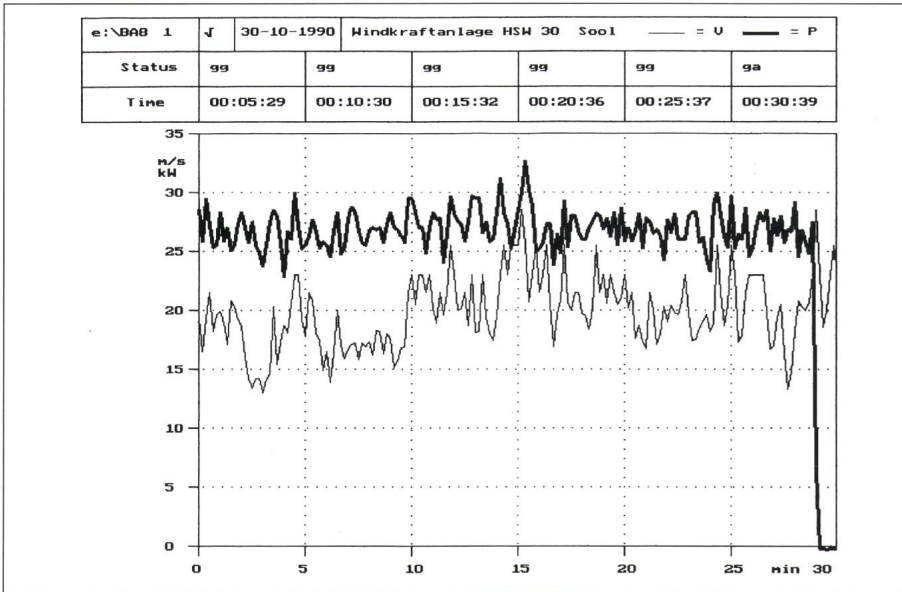


Bild 8 Verhalten der Anlage bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten mit höher eingestelltem Leistungsregler

zeigt. Weitere Gründe für das breite Streufeld der Resultate sind:

- Unterschiedlich turbulente Winde (Turbulenzen, v.a. bei hohen Windgeschwindigkeiten, haben einen negativen Einfluss [3])
- Die Anlage war unterschiedlich verfügbar (Pannen, Wartung, etc.)
- Im Winter kann die Anlage Strom produzieren, das Anemometer der Winddatenerfassung jedoch eingefroren sein, was Fehlmessungen der Windgeschwindigkeit verursacht.

Wirtschaftlichkeit

Betrieb, Unterhalt und Kapitalamortisation

Für die Jahre 1989/1990 liegen die Betriebs- und Unterhaltskosten vor. Die Wartung wurde nur einmal von der Werft durchgeführt, die Mitarbeiter des Ökozentrums Langenbruck sind heute in der Lage, die Wartung selbst durchzuführen. Da die komplexe Datenerfassung zudem einen grossen Aufwand bedeutet (wöchentliches Auslesen der Daten, Auswertungen etc.), sollen im folgenden nur die Kosten berücksichtigt werden, welche bei einem Automatikbetrieb, mit normalem Wartungsvertrag, jährlich anfallen würden:

Betrieb und Unterhalt:	
Wartung (Wartungsvertrag)	1 000.-
Versicherung	1 059.-
Total Betrieb und Unterhalt	2 059.-
Investitionskosten:	
Bestehende Installationen (Mast etc.)	30 300.-
Neuinstallation	56 710.-
Gesamtinvestition	87 010.-

Jahreskosten:	
Kapitalamortisation/ (6 % Zins, 15 Jahre)	8 960.-
Betrieb und Unterhalt	2 059.-
Total Jahreskosten	11 019.-

Energiekosten

Im Jahre 1989 wurden mit der HSW-30 auf dem Sool 13 093 kWh Strom erzeugt. Dazu muss erwähnt werden, dass es sich dabei um ein relativ windschwaches Jahr gehandelt hat. Beispielsweise ergab sich im Jahr 1990 eine Produktion von 17 652 kWh, was zu folgenden Unterschieden in den Energiegestehungskosten führte:

Kosten 1989:	84 Rp/kWh
Kosten 1990:	62 Rp/kWh.

Energiepolitische Bedeutung Stromproduktionskosten von Windkraftanlagen

Energieproduktionskosten von Windkraftanlagen variieren sehr stark mit den herrschenden Windverhältnissen. Die nachfolgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über die Energieproduktion und die Stromgestehungskosten einer HSW-30-Anlage an verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen jährlichen mittleren Windgeschwindigkeiten:

$\bar{v} = 3,8$ m/s (Sool 1989):	Fr. 11 019.-/ 13 093 kWh Jahresproduktion	= 84 Rp/kWh
$\bar{v} = 4,2$ m/s (Sool 1990):	Fr. 11 019.-/ 17 652 kWh Jahresproduktion	= 62 Rp/kWh
$\bar{v} = 5,6$ m/s (Gütsch):	Fr. 11 019.-/ 40 000 kWh* Jahresproduktion	= 28 Rp/kWh
$\bar{v} = 7,5$ m/s (Chasseral):	Fr. 11 019.-/ 70 000 kWh* Jahresproduktion	= 16 Rp/kWh

* Konservative Annahmen aus Herstellerangaben

Energieproduktionskosten von Photovoltaikanlagen

Als Vergleich sind untenstehend die Stromproduktionskosten von Solarzellenanlagen aufgeführt, die ja ebenfalls Strom aus einer unerschöpflichen Energiequelle generieren. Die Installationskosten betragen ca. Fr. 15.-/W. Im vorliegenden Beispiel einer 30-kW-Anlage auf einem Bauernhaus im Jura betragen die Gesamtkosten Fr. 430 000.-.

Beispiel einer Kostenberechnung für eine 30-kW-Photovoltaikanlage:

Versicherungsprämie pro Jahr	Fr. 1 500.-
Total Kapitalkosten/Jahr (Fr. 441 000.-, 6% Zins, 15 Jahre)	Fr. 44 423.-
Total Jahreskosten	Fr. 46 923.-

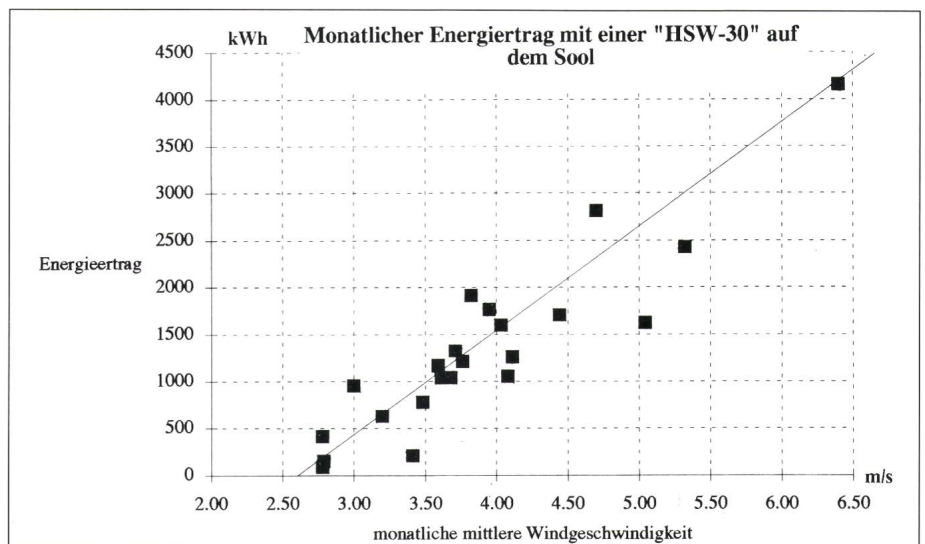


Bild 9 Streuung der monatlichen Energieerträge bei unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten / Monat

Energieproduktionskosten bei unterschiedlicher Sonneneinstrahlung:

Nebelgebiet (900 kWh/kW):

Fr. 46 923.-/ 27000 kWh Jahresproduktion
= 1.74 Fr./kWh

Nebelfreies Gebiet (1200 kWh/kW):

Fr. 46 923.-/ 36 000 kWh Jahresproduktion
= 1.30 Fr./kWh

Winterproduktion

In der Zeit vom 19.8.88 bis 31.12.90 wurden auf dem Sool insgesamt 33 375 kWh Elektrizität erzeugt, in den Jahren 1989 und 1990 wurden davon 32 % im Sommer und 68 % im Winter produziert. Bei der Photovoltaik dürften die Verhältnisse genau umgekehrt liegen.

Es geht hier nicht darum, die Stromerzeugung aus Solarzellen schlecht zu



Bild 10 Installation HSW-30 auf dem Sool

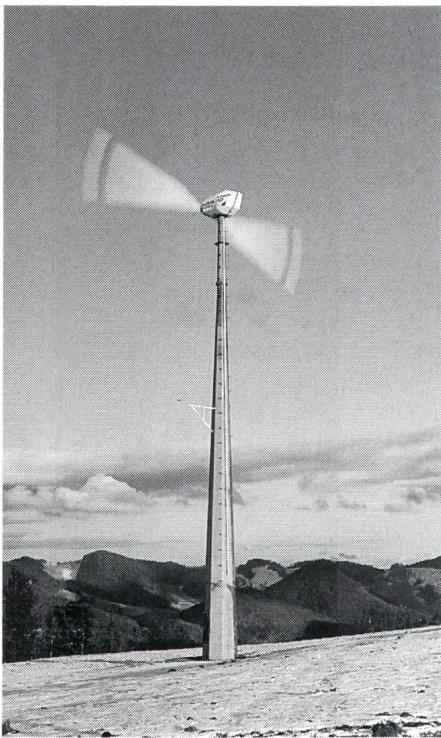


Bild 11 HSW-30 in voller Aktion

machen. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass die Energieproduktion mit Windkraftanlagen auch bei den im Jura herrschenden Windverhältnissen um einiges billiger ist und erst noch im Winter anfällt.

Generell

Netzgekoppelte Windkraftanlagen mit Asynchron-Generatoren sind billig und zuverlässig. Aufgrund konstanter Nenndrehzahl (im Falle HSW-30 zwei Nenndrehzahlen) läuft die Anlage nicht immer im optimalen Wirkungsgrad, wie die Bilder 5–8 zeigen, ändert sich doch die Windgeschwindigkeit dauernd. Auch wenn die Installation auf dem Sool noch weiter optimiert werden kann, sind die Möglichkeiten, mit einer intelligenten Steuerung diesen Nachteil zu kompensieren, beschränkt.

Windkraftanlagen, die mit variablen Drehzahlen betrieben werden können, müssen die erzeugte Elektrizität mit ei-

nem Wechselrichter in netzkonformen Strom umwandeln. Dies verursacht jedoch wieder Verluste – vor allem im Teillastbereich – und kann zudem zu unliebsamen Rückwirkungen aufs Netz führen.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen muss der Energieertrag, welcher auf der Basis von Windmessungen und den Anlagekennlinien der Hersteller errechnet wird, bei netzgekoppelten Anlagen mit Asynchrongeneratoren an turbulenten Standorten um 10–20 % reduziert werden.

Literatur:

- [1] Expertengruppe Energieszenarien, Dokument Nr. 25, «Studie Windenergie», 1988, EDMZ, Bern
- [2] Windenergienutzung im Kanton Bern, 1990, Wasser- und Energiewirtschaftsdepartement Bern, Reiterstr. 11, 3011 Bern
- [3] Meteonorm Wind, 1990, Infosolar, c/o HTL Windisch, Postfach, 5200 Brugg
Photos: H. Grieder, Langenbruck
Messdatenerfassung: K. Mertens, Alteno AG, Langenbruck