

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: 86 (1995)

Heft: 4

Artikel: Netzgekoppelte Solarzellenanlage in Giubiasco

Autor: Keller, Max

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902427>

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: 15.02.2026

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

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) haben auf dem Fahrleitungsgebäude in Giubiasco mit Finanzierung des Bundesamtes für Energiewirtschaft eine Solarzellenanlage erstellen lassen. Die Solarzellenanlage wurde im Rahmen des Programms Pilot- und Demonstrationsanlagen bei bundeseigenen Bauten realisiert. Sie soll den SBB Erfahrungen bezüglich Photovoltaikanlagen mit Netzeinspeisung vermitteln. Von besonderem Interesse waren beim gewählten Standort die zu erwartenden Effekte bezüglich Verschmutzung und Beschattung. Dem Pilotcharakter entsprechend wurde die Anlage mit einer umfangreichen Instrumentierung zur Erfassung der Meteo- und Betriebsdaten ausgestattet. Die Anlage wurde Ende September 1991 in Betrieb genommen und während der Jahre 1992 und 1993 durch die Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG ausgewertet. Der vorliegende Artikel enthält die wichtigsten Ergebnisse dieser zweijährigen Messkampagne.

Netzgekoppelte Solarzellenanlage in Giubiasco

■ Max Keller

Standort

Die Photovoltaikanlage befindet sich auf dem Dach des SBB-Fahrleitungsgebäudes im Nordwesten des Bahnhofes von Giubiasco auf einer Höhe von 240 m ü.M. Dank der besonderen Deckenkonstruktion dieses Gebäudes mit Betonüberzügen konnten die Solarzellenmodule sehr einfach, ohne Durchdringung der Dachhaut

und ohne schwere Betonelemente zur Aufnahme der Windkräfte, aufgeständert und so eine kostengünstige Tragkonstruktion realisiert werden (Bild 1).

Das Fahrleitungsgebäude ist leider nicht optimal nach Süden orientiert, sondern weist eine Azimutabweichung von $43,4^\circ$ nach Osten auf. Um die Solarzellenanlage trotzdem möglichst gut ins Gebäude zu integrieren, wurden die Solarmodule parallel zur Gebäudeflucht ausgerichtet. Dies ergibt im Vergleich zu einer exakten Südausrichtung eine gewisse Ertragseinbusse. Weitere

Adresse des Autors:

Max Keller, Dipl. Bauing. ETH, M. Sc. Mech. Eng.
CSU, Projektleiter Projektbereich Alternativenenergie,
Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG,
Bellerivestrasse 36, 8034 Zürich.



Bild 1 Photovoltaikanlage auf dem Dach des Fahrleitungsgebäudes.

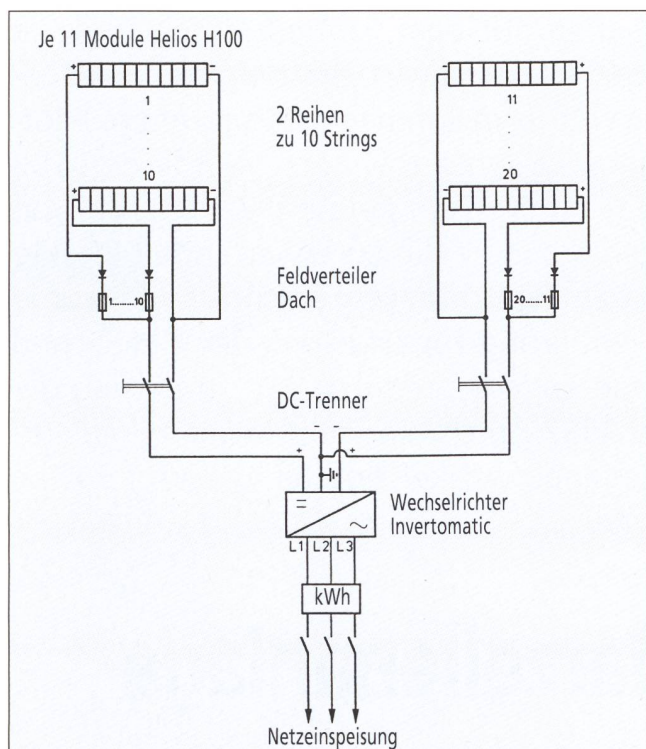


Bild 2 Prinzipschema der netzgekoppelten Solarzellenanlage.

Die Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom erfolgt mit einem Wechselrichter Typ Invertomatic Ecopower mit 20 kW Nennleistung. Dies ist ein selbstgeführter Inverter mit IGBTs als Schaltelementen und Pulsweitenmodulation. Die dreiphasige Inverterbrücke wird mit 6/12 kHz getaktet. Selbstgeführte Wechselrichter, die IGBTs als elektronische Schalter verwenden, haben gegenüber den einfacheren und billigeren Thyristor-Wechselrichtern den Vorteil, dass Blindleistungsaufnahme und Stromoberschwingungen stark reduziert werden können. Der Inverter verfügt über eine Fernsteuerung, die seine Bedienung auch vom benachbarten SBB-Unterwerk aus erlaubt, wo die Einspeisung ins 380-V-Drehstromnetz erfolgt. Das Prinzipsystem ist in Bild 2 dargestellt.

Messtechnische Installation

Zur Erfassung des Betriebsverhaltens wurde die Solarzellenanlage mit diversen Messsensoren ausgerüstet. Neben meteorologischen Daten (Einstrahlung und Temperatur) wurden alle massgebenden elektrischen Grössen sowie auch Statussignale des Wechselrichters aufgezeichnet (Störung, Stand-by, Ein-/Ausschaltvorgang, Wechselrichter eingeschaltet). Zu Kontrollzwecken wurde zusätzlich die ins Netz zurückgespeiste Energie mit einem externen kWh-Zähler gemessen. Die erfassten Messgrössen sind in Tabelle I gezeigt.

Die Datenerfassung besorgte ein Data-Logger Modell CR 10 von Campell. Bei einer Abtastrate von drei Sekunden wurden

Einbussen ergeben sich auch infolge Einschränkung des freien Horizonts durch die umliegenden Berge sowie durch zeitweise Beschattung der Panele durch einen nahegelegenen Hochspannungsmast. Trotz dieser Nachteile kann der Standort aber als gut bezeichnet werden.

Die einzelnen Stränge sind mit Radoxkabeln 2,5 mm² mit den Feldverteilern verbunden, wo Blockdioden, Schmelzsicherungen und Überspannungsableiter untergebracht sind. Von den beiden Feldverteilern führt je ein Ceanderkabel zum DC-AC-Schrank im Untergeschoss des Fahrleitungsgebäudes, wo sich die Gleichstromschaltelemente und der Wechselrichter befinden.

Photovoltaikgenerator und Wechselrichter

Der Photovoltaikgenerator besteht aus zwei Solarmodulreihen mit 30° Neigung. Der Abstand der beiden Reihen ist so bemessen, dass keine Verluste durch gegenseitige Beschattung auftreten (Beschattungswinkel 12,5°). Insgesamt sind 224 Solarzellenmodule montiert, von denen 220 für die photovoltaische Stromerzeugung genutzt werden. Die restlichen vier sind «Dummy»-Module mit rein ästhetischer Funktion. Dies war notwendig, um die Generatorspannung optimal an diejenige des Wechselrichters anpassen zu können. Verwendet wurden gerahmte, monokristalline Module des Typs Helios H 100.

Die ganze Anlage ist elektrisch in zwei Felder mit je zehn parallel geschalteten Strängen aufgeteilt. Diese sind wiederum aus je elf in Serie geschalteten Modulen zusammengesetzt. Unter Normalbedingungen beträgt die Betriebsspannung 760 VDC, mit geerdetem Mittelpunkt, entsprechend ± 380 V.

Kanal	Messgrösse	Bedeutung
1	Header	Kopfzeile
2	Tag	Tag im Jahr (1–365)
3	Zeit	Tageszeit (0–24)
4	Statinv	Status Inverter
5	Tempcamp	Temperatur Datalogger
6	GH	Globalstrahlung horizontal
7	PDC	DC-Leistung Solargenerator
8	PAC	AC-Leistung Solargenerator
9	UDC+	DC-Spannung Feld 1 gegen Erde
10	UDC–	DC-Spannung Feld 2 gegen Erde
11	IDC+	DC-Strom Feld 1
12	IDC–	DC-Strom Feld 2
13	URS	AC-Spannung zwischen Phase R und S
14	UST	AC-Spannung zwischen Phase S und T
15	UTR	AC-Spannung zwischen Phase T und R
16	IR	AC-Strom Phase R
17	IS	AC-Strom Phase S
18	IT	AC-Strom Phase T
19	GN	Globalstrahlung geneigt
20	TL	Lufttemperatur
21	TZ	Zellentemperatur
22	KWH	Externer Kilowattstundenzähler

Tabelle I Erfasste Messgrössen.

	I_{sc} (STC) (A)	V_{oc} (STC) (V)	I_{mp} (STC) (A)	V_{mp} (STC) (V)	P_{mp} (STC) (W)	FF (STC) (%)
Messung***	2,84	41,0	2,46	32,9	80,9	69,5
Hersteller	$3,10 \pm 5\%$	$42,0 \pm 5\%$	$2,94 \pm 5\%$	$34,0 \pm 5\%$	$100 \pm 10\%$	$73 \pm 5\%$
Abweichung vom Sollwert	-8,4	2,4	-16,3	-3,2	-19,1	-4,8

*** Zum Zeitpunkt der Messung waren die Panele leicht verschmutzt. Im Neuzustand ist die Leistung deshalb effektiv 4% grösser.

Tabelle II Vergleich der gemessenen Leistungen mit den Herstellerangaben.

I_{sc} = Kurzschluss-Strom

V_{oc} = Leerlaufspannung

I_{mp} = Strom im «Maximum power point»

V_{mp} = Spannung im «Maximum power point»

P_{mp} = Leistung im «Maximum power point»

jeweils 200 Messwerte nacheinander erfasst und aus diesen dann ein 10-Minuten-Mittelwert gebildet. Damit konnte die Datenmenge im Rahmen gehalten und trotzdem eine gute Auflösung des Tagesgeschehens erhalten werden. Die eigentliche Datenauswertung und Überprüfung erfolgte mit dem Programm Systat, das sich nicht nur sehr gut für statistische, sondern ebenso auch für grafische Darstellungen eignet.

Abnahmemessung Solargenerator und Vergleich mit Herstellerangaben

Zur Bestimmung der effektiven DC-Leistung des Solargenerators wurden in Giubiasco für jeden Strang am Standort der Anlage Leistungsmessungen durchgeführt. Eine solche Abnahmemessung war notwendig, weil der zu bezahlende Preis für die Solarmodule von der effektiv vorhandenen Modulleistung abhängig gemacht wurde. Mit der Leistungsmessung beauftragt wurde das European Solar Test Institute (ESTI), welches sich nicht allzuweit vom Standort der Anlage in Ispra befindet.

Gemäss Ispra-Messung weist die Solarzellenanlage Giubiasco eine DC-Leistung unter Standardtestbedingungen (1000 W/m² Einstrahlung, 25°C Zelltemperatur) von 17,8 kW (Standard Testing Condition, STC) auf. Der Beitrag der insgesamt 20 Stränge zu dieser Gesamtleistung ist dabei recht ähnlich und variiert zwischen minimal 867 W und maximal 910 W (Mittelwert 890 W). Wird die Gesamtleistung auf ein durchschnittliches Modul umgerechnet, so ergibt sich der in Tabelle II dargestellte Vergleich zwischen Messung und Herstellerangaben.

Wie die Tabelle II zeigt, wurden vom Hersteller eindeutig zu optimistische Angaben zu den einzelnen elektrischen Modulkenngrößen gemacht. Die Leerlaufspannung, die MPP-Spannung und auch der Füllfaktor unterschreiten zwar nur den Mit-

telwert und liegen noch innerhalb des Toleranzbereiches von $\pm 5\%$. Der Kurzschlussstrom und vor allem der Strom im «Maximum Power Point» erreichen dagegen auch den spezifizierten Minimalwert bei weitem nicht. Dies führt dazu, dass die STC-Leistung des Solarmoduls statt wie ursprünglich angenommen im Durchschnitt nicht 100 W, sondern lediglich 81 W beträgt. Dabei muss allerdings noch berücksichtigt werden, dass die Panele zum Zeitpunkt der Feldmessung bereits etwas verschmutzt waren (siehe Kapitel «Verschmutzung») und die Panelleistung im unverschmutzten Zustand daher effektiv etwa 4% grösser war. Die Minderleistung im Vergleich zu den Herstellerangaben liegt aber auch bei Berücksichtigung der Verschmutzung noch bei etwa 16%. Nach Angaben des Herstellers hängt diese Differenz mit Problemen bei der Zellenherstellung zusammen.

Da der vom Kunden zu bezahlende Preis von der effektiv vorhandenen Leistung der Solarpanele abhängig gemacht wurde, konnte die Einbusse infolge Minderleistung durch einen günstigeren Preis kompensiert werden. Für die definitive Abrechnung musste allerdings auch die Unsicherheit der Feldmessung (typischerweise $\pm 3\%$) berücksichtigt werden, wodurch der Preisabzug etwas geringer ausfiel. Trotzdem kann gesagt werden, dass sich dieses Vorgehen mit einem von der Leistung abhängigen Preis bewährt hat und eigentlich im gegenseitigen Interesse von PV-Hersteller, Planer und Kunde liegen sollte.

Energetisches Verhalten der Anlage

Bild 3 zeigt die DC-Leistung des Solargenerators in Abhängigkeit der auf die Module einfallenden Globalstrahlung. Diese Darstellung, bei der die gemessene DC-Leistung auf eine Zelltemperatur von 25°C umgerechnet wird, ist praktisch unabhängig von der Jahreszeit und daher repräsentativ für das Verhalten der Anlage.

Die Extrapolation der 10-Minuten-Messwerte auf Standardtestbedingungen (1000 W/m²) ergibt eine gute Übereinstimmung mit dem vom ESTI gemessenen Wert von 17,8 kW. Dies bedeutet, dass die kontinuierliche Messdatenerfassung korrekt ist und dass der Solargenerator aber tatsächlich bedeutend weniger leistet als ursprünglich erwartet. Die Einschaltsschwelle von 50 W/m² entspricht dagegen etwa den Erwartungen.

Eine ebenfalls wichtige Komponente bei einer Solarzellenanlage stellt der Wechselrichter dar. Neben einer hohen Verfügbarkeit ist hier vor allem der Wechselrichterwirkungsgrad von Bedeutung.

Bei der Anlage Giubiasco liegen die Umwandlungswirkungsgrade bei Nennlast bei etwa 95%. Im Teillastbereich fallen die Werte entsprechend ab, erreichen aber selbst bei einem AC-Output von 2 kW (entspricht ungefähr 10% der Nennleistung) noch einen respektablen Wert von 80%. Die gemessenen Wirkungsgrade liegen damit erfreulich hoch und decken sich auch sehr gut mit den vom Hersteller gemachten Angaben (Bild 4). Die im ersten Betriebsjahr noch vorhandenen Probleme (Ausfälle und Störungen) konnten in der Zwischen-

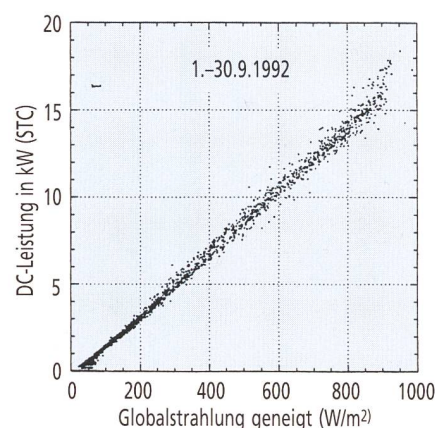


Bild 3 DC-Leistung (STC) versus Globalstrahlung geneigt.

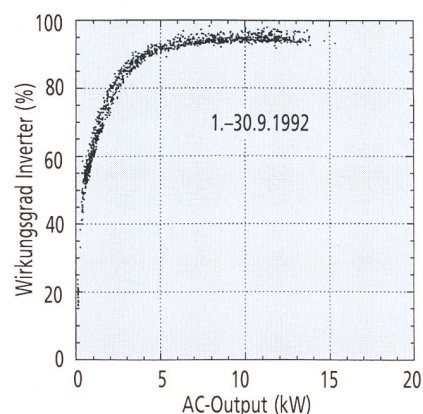


Bild 4 Wechselrichterwirkungsgrad versus AC-Leistung.

Monat	Globalstrahl, horizontal (kWh/m ²)		Globalstrahl, geneigt (kWh/m ²)		DC-Energie PV-Array (kWh)		AC-Energie PV-Array (kWh)	
	1992	1993	1992	1993	1992	1993	1992	1993
Januar	26,4	32,2	31,2	44,5	328,5	597,6	305,6	520,9
Februar	61,5	54,3	76,8	71,3	960,9	1070,5	957,7	973,9
März	93,2	89,3	99,3	107,8	1135,1	1707,3	1125,5	1573,1
April	108,4	111,6	104,9	117,3	1225,8	1676,5	1205,2	1539,3
Mai	142,2	123,4	140,0	128,0	1778,2	1757,8	1660,8	1586,8
Juni	129,7	141,9	126,7	142,5	1371,0	1885,2	1226,7	1737,8
Juli	153,6	170,5	153,6	169,8	1863,2	2566,7	1701,2	2371,0
August	147,3	158,8	156,4	165,7	2271,0	2510,7	2109,6	2316,4
September	96,9	81,5	110,3	87,7	1703,3	1221,9	1547,7	1111,4
Oktober	44,3	44,2	52,6	56,1	686,0	791,1	604,8	721,4
November	32,9	31,1	44,7	40,1	531,0	530,6	470,7	473,5
Dezember	22,1	27,5	30,8	40,1	381,9	490,5	326,3	441,6
Jahr	1058,5	1066,3	1127,3	1170,9	14235,9	16806,4	13241,8	15367,1

Tabelle III Energieertrag der Anlage für die Jahre 1992 und 1993.

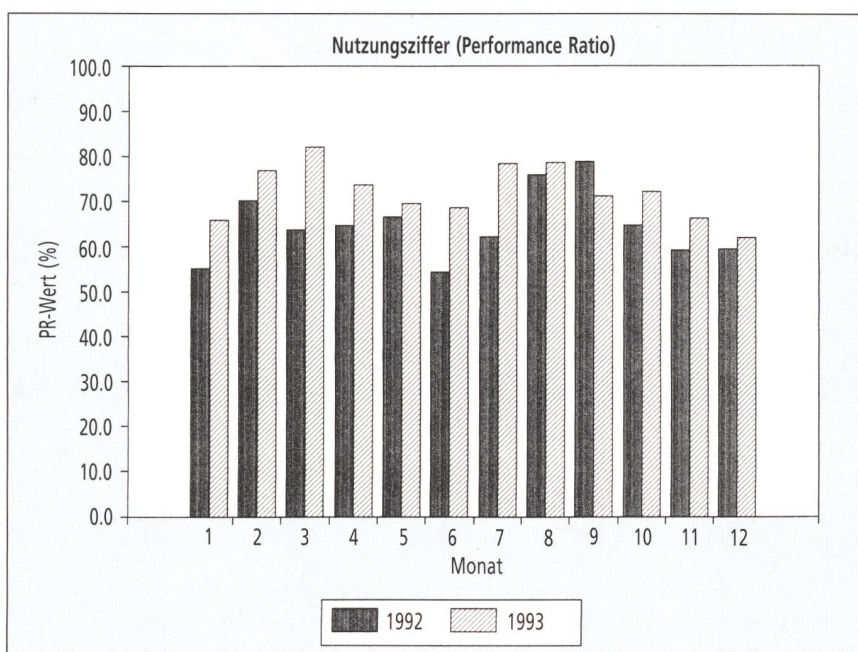


Bild 5 Monatliche PR-Faktoren.

zeit weitgehend behoben werden, so dass der Wechselrichter heute zur vollen Zufriedenheit funktioniert.

Für den Betreiber einer Solarzellenanlage letztlich von Bedeutung sind nicht momentane, sondern jährliche oder allenfalls monatliche Ertragswerte der Anlage.

Wie die Zusammenstellung in Tabelle III zeigt, war das Strahlungsangebot in der Modulebene im Jahre 1993 mit 1170,9 kWh/m²a etwa 4% grösser als im Vorjahr, während in derselben Periode ein Mehrertrag von 16% (15 367 kWh im Vergleich zu 13 242 kWh) erzielt werden konnte. Diese Ertragssteigerung ist primär durch die bessere Verfügbarkeit des Wechselrichters im zweiten Messjahr bedingt und ist teilweise

auch dadurch zu erklären, dass die Panele Anfang 1993 gereinigt wurden. Die Wechselrichter-Nutzungsgrade waren in beiden Auswertungsjahren ähnlich und erreichten im Jahresdurchschnitt einen Wert von etwa 91%.

Es ist heute üblich, das energetische Verhalten von Solarzellenanlagen mit speziellen Kenngrössen zu beurteilen, die in grober Näherung unabhängig von Standort und Grösse der Anlage sind. Eine wichtige solche Kenngrösse stellt der vom ESTI definierte PR-Faktor (Performance Ratio) dar. Er stellt den eigentlichen Gütegrad einer Anlage dar und entspricht dem Quotient der erzeugten AC-Energie im Vergleich zu der, welche ohne Verluste hätte erzeugt

werden können. Der Jahresverlauf dieser Kenngrösse ist in Bild 5 dargestellt.

Bei der Solarzellenanlage Giubiasco wurden im Frühling und Herbst höhere Nutzungsziffern gemessen als im Winter und Sommer. Dieser Effekt hängt vermutlich damit zusammen, dass im Frühling und Herbst die Zelltemperatur noch nicht allzu hoch ist und gleichzeitig die von der Einstrahlung abhängigen Solarzellen- und Wechselrichterwirkungsgrade schon gute Werte erreichen. Demgegenüber überwiegt in der warmen Jahreszeit offensichtlich der Temperatur- und in der kalten Jahreszeit der Strahlungseinfluss vergleichsweise stärker.

Als Durchschnitt wurde in Giubiasco im 1. Messjahr ein PR-Wert von 64,5% und im zweiten Messjahr ein solcher von 72% erreicht. Heute wird davon ausgegangen, dass jährliche PR-Werte von 85% etwa das bei Solarzellenanlagen erreichbare Maximum darstellen, während Anlagen mit PR-Werten von 70 bis 75% als gut bezeichnet werden können. Dank der Steigerung der Verfügbarkeit des Wechselrichters im 2. Messjahr darf das Funktionieren der Anlage damit heute als gut bezeichnet werden.

Zum gleichen Resultat kommt auch der Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE). Gemäss dessen Auswertung entspricht die Anlageproduktion den Erwartungen und liegt im Vergleich zu anderen Anlagen leicht über dem Durchschnitt (guter Mittelwert).

Vergleich mit Simulationsprogramm PVSIM1

Für Ertragsberechnungen von neuen, aber auch zur Nachsimulation von bestehenden photovoltaischen Anlagen wurde von der Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG in Zusammenarbeit mit der Ingenieurschule Burgdorf ein Simulationsmodell namens PVSIM1 erstellt. Es handelt sich um ein modular aufgebautes Programm das erlaubt, eine Anlage über eine Periode von einem Jahr quasi-dynamisch in Stundenschritten zu simulieren, nachdem eine Reihe von standort- und anlagespezifischen Grössen eingegeben worden sind. Im Falle der Simulation werden vom Programm die durchschnittlich am betreffenden Standort zu erwartenden Klimadaten gemäss Meteonorm berechnet und daraus für jede Stunde der Solarzellenertrag DC- und AC-seitig berechnet.

Im Falle einer Nachsimulation dagegen werden für die Klimadaten die effektiv im betreffenden Jahr gemessenen Strahlungsdaten und Lufttemperaturen eingesetzt und daraus der Energieertrag bestimmt, der

dann mit dem gemessenen Ertrag verglichen wird.

Die Übereinstimmung zwischen Messung und Nachsimulation für den Monat September 1992 ist recht gut (Bild 6). Es muss jedoch gesagt werden, dass in gewissen Monaten der Energieertrag mit dem Simulationsmodell auch überschätzt wurde. Abweichungen ergaben sich vor allem dann, wenn die Anlage nicht 100%ig verfügbar war (Störungen oder sonst ausser Betrieb). Weitere Gründe für Unterschiede zwischen Messung und Nachsimulation waren auch die Verschmutzung der Panele, was mit dem Programm nicht zeitabhängig simuliert werden konnte.

Unter Voraussetzung korrekter Inputparameter (effektive Charakteristik der Solarmodule und nicht Herstellerangaben) kann deshalb gesagt werden, dass das Simulationsmodell zuverlässige Resultate ergibt, die unter optimalen Bedingungen (100%ige Verfügbarkeit) durchaus erreicht werden.

Vergleich der Strahlungsdaten mit der Meteoronorm

Bei der Planung von Solarzellenanlagen für einen spezifischen Standort sind normalerweise keine detaillierten Strahlungsdaten vorhanden. Der Planer von solchen Anlagen stützt sich deshalb im allgemeinen auf Daten ab, wie sie in der Meteoronorm publiziert sind.

Gemäss Meteoronorm ist in Giubiasco bei freiem Horizont ein horizontales Strahlungsangebot von 1360 kWh/m²a und in

der Ebene der Module (30 Neigung, 43,4° Azimut) ein solches von 1493 kWh/m²a zu erwarten. Bei Berücksichtigung des Horizonts durch die umliegenden Berge wird das Strahlungsangebot gemäss PVSIM1 in der Horizontalebene um etwa 2% und in der Modulebene um 6% reduziert und erreicht damit in der Horizontalebene noch einen Wert von 1328 kWh/m²a.

Im Vergleich dazu betrug der in den zwei Auswertungsjahren gemessene Wert im Jahre 1992 1058 kWh/m² und im Jahre 1993 1066 kWh/m². Wie durch Korrelation der Strahlungsdaten mit der zum Standort Giubiasco nächstgelegenen Station Locarno Magadino gezeigt werden kann, entsprechen die in den Jahren 1992 und 1993 gemessenen Werte 97,7% bzw. 100,8% des langjährigen Mittel (Periode 81–91) und stellen deshalb in erster Näherung durchschnittliche Einstrahlungswerte dar.

Aufgrund der Messungen kann deshalb gesagt werden, dass das effektive Strahlungsangebot in Giubiasco deutlich unter dem für diesen Standort prognostizierten Wert liegt (im Vergleich zur Meteoronorm 20% tiefer). Um das Strahlungsangebot in dieser Region nicht massiv zu überschätzen, ist es deshalb empfehlenswert, sich nicht nur auf die Meteoronorm zu verlassen, sondern wenn möglich noch andere Strahlungsmessungen beizuziehen.

Verschmutzung

Die vom ESTI im Oktober 1991 durchgeführte Feld-Abnahmemessung ergab bei der Anlage Giubiasco eine DC-Leistung un-

ter Standard-Testbedingungen von 17,8 kW. Da dieser Wert beträchtlich unter dem vom Hersteller spezifizierten Wert lag, wurde damals beschlossen, einen Strang der Anlage zu demontieren und in Ispra unter «Indoor»-Test-Bedingungen separat auszumessen. Diese Messungen wurden sowohl an den ungereinigten als auch an den gereinigten Modulen vorgenommen und ergaben eine Einbusse infolge Verschmutzung von 4%. Damit konnte belegt werden, dass die bei der Abnahmemessung festgestellte Leistung nicht der effektiven Leistung im unverschmutzten Zustand entsprach, sondern bei Lieferung effektiv 18,5 kW (1,04 × 17,8 kW) betrug. Innerhalb von nicht einmal ganz zwei Monaten wurde die DC-Leistung infolge Verschmutzung also um etwa 4% reduziert.

In diesem Zusammenhang von besonderem Interesse war die Frage, ob der Einfluss der Verschmutzung auf den Ertrag der Anlage immer grösser werde, oder ob sich die Pannelleistung irgendwann auf einen konstanten Wert einpendeln wird.

Zur Klärung dieser Frage wurde anfangs Juni 1993 an der Anlage selber nochmals eine detaillierte Messung durchgeführt. Eine erste Messung fand am 7. Juni in verschmutztem Zustand statt, während am darauffolgenden 8. Juni sämtliche Panele mit gewöhnlichem Haushaltreiniger und Hochdruck gereinigt wurden und dann eine zweite Leistungsmessung vorgenommen wurde (Tabelle IV).

Der Vergleich der ESTI-Messung vor und nach Reinigung der Panele zeigt eine Leistungszunahme von 16,4 kW auf 17,5 kW (+7%). Durch die Reinigung konnte damit nach eineinhalb Jahren Betrieb fast wieder der Wert erreicht werden, wie er bei der Abnahmemessung im Jahre 1991 gemessen wurde (17,8 kW). Ob diese kleine Differenz (17,5 bzw. 17,8 kW) auf Messungenauigkeiten oder auf eine nicht ganz perfekte Reinigung der Panele zurückzuführen ist, ist unbekannt. Eindeutig ist jedoch, dass der Einfluss der Verschmutzung bei der Anlage Giubiasco unverhältnismässig gross ist und unseres Wissens bei keiner anderen Solarzellenanlage solche Ertrags-einbussen festgestellt wurden.

Wie die Untersuchung des Schmutzfilms ergeben hat, hängt die starke Verschmutzung mit folgendem Umstand zusammen: Die Solarzellenanlage befindet sich in unmittelbarer Nähe des Bahnhofs Giubiasco an der Bahnlinie Bellinzona–Locarno. In Bahnhöfen dieser Art fallen durch den Regionalzugverkehr (Bremsen bis zum Stillstand) grössere Mengen Bremsstaub an, die durch die mit grosser Geschwindigkeit passierenden Schnellzüge aufgewirbelt und in Distanzen bis zu einigen 10 m Entfernung wieder abgelagert wer-

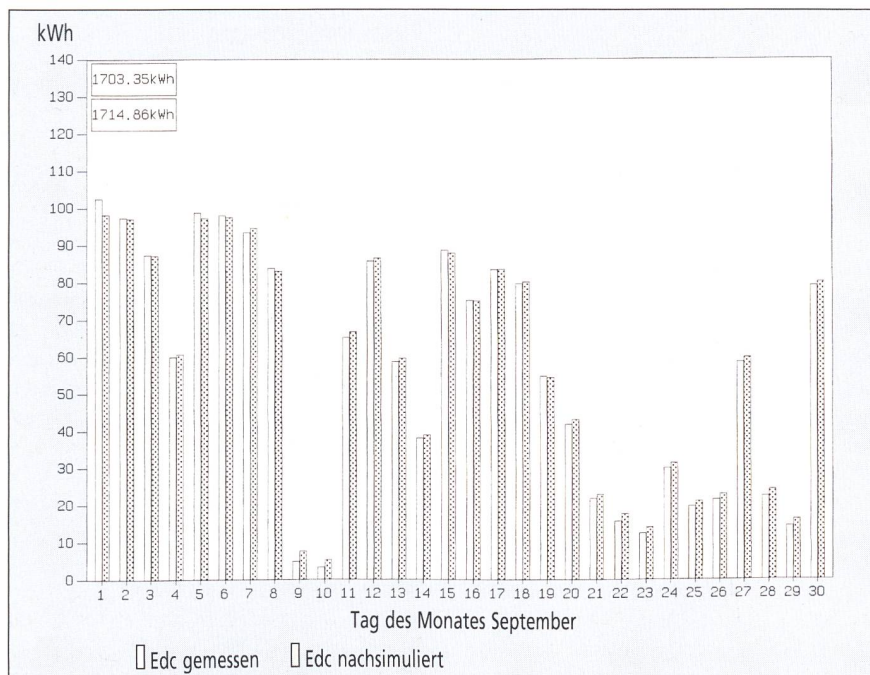


Bild 6 Vergleich von gemessenem und nachsimuliertem Energieertrag.

Strang-Nr.	P_{mp} (STC) verschmutzt (W)	P_{mp} (STC) gereinigt (W)
A01	841	871
A02	841	892
A03	833	876
A04	826	882
A05	820	874
A06	823	874
A07	830	898
A08	817	858
A09	825	884
A10	826	893
A1-A10	8282	8802
B01	803	858
B02	811	880
B03	802	856
B04	813	874
B05	806	863
B06	800	853
B07	821	879
B08	812	873
B09	807	860
B10	807	860
B1-B10	8082	8656
A1-B10	16364	17458

Tabelle IV Ertragseinbusse infolge Verschmutzung der Panele.

den. Der bei der Anlage Giubiasco festgestellte höhere Verschmutzungsgrad hängt eindeutig mit diesem Bremsstaub zusammen. Zusätzlich enthält der dunkelbraune, leicht schmierige Belag auf den Modulen aber auch Russ aus nahegelegenen Feuerungsanlagen. Wegen sehr geringer Niederschläge konnte dieser nicht aus der Luft ausgewaschen werden und lagerte sich überall, so auch auf den Flächen der Solarzellenanlage, ab.

Aus den Erfahrungen mit der Solaranlage Giubiasco kann deshalb gesagt werden, dass die Verschmutzung von Modulen ein Problem darstellen kann. Beim Bau von zukünftigen Anlagen sollte diesem Problem je nach Standort Beachtung geschenkt werden.

Hochspannungsmast

Am Standort der Solarzellenanlage befindet sich in unmittelbarer Nähe ein Hochspannungsmast, der zu gewissen Zeiten des Jahres (Wintermonate) zu einer Teilbeschattung der Panele führt. Der Mast ist 28 m hoch und weist vier Ausleger von 5 m, 7,2 m und je 3,4 m auf. Am Boden hat er einen Durchmesser von 1,05 m und ver-

jüngt sich dann kontinuierlich bis auf 0,32 m an der Spitze. Um die Zeiten zu bestimmen, während denen die Sonnenbahn vom Mast verdeckt wird, wurden mit einem Fischaugobjektiv (Typ Nikon f = 8 mm) Horizontaufnahmen gemacht. Diese dienten gleichzeitig auch zur Bestimmung des Fernhorizonts.

Die Auswirkungen des Hochspannungsmastes auf den Ertrag der Anlage sind in Bild 7 beispielhaft für den 1. Februar 1993, einen klaren Wintertag, dargestellt.

Der Einfluss des Mastes ist vor allem an solchen schönen Tagen mit hoher Direktstrahlung deutlich erkennbar, während bei hauptsächlich Diffusstrahlung, wie sie typisch für die Wintermonate ist, praktisch keine Ertragseinbusse festzustellen ist.

In der Zeit, wo Teilbeschattung aufgetreten ist (11.30–14.00 Uhr), wurde die I-U-Kennlinie des Solargenerators stark deformiert. Als Folge des Rückganges von Strom und Spannung ist es zu einer Ertragseinbusse von etwa 12 bis 15% im Vergleich zum unbeschatteten Fall gekommen (entspricht schraffierter Fläche in Grafik). Diese Einbusse ist sicher einen Extremfall, indem die Sonne an diesem Tag hinter einem Ausleger des Hochspannungsmastes verlief und dadurch die Panele während längerer Zeit beschattet waren. Über ein ganzes Jahr betrachtet, dürfte die Ertragseinbusse bedeutend kleiner sein, aber doch im Prozentbereich liegen.

Kosten und Wirtschaftlichkeit

Für Vergleiche mit anderen Energieerzeugungsanlagen ist es nützlich, auch bei einer Solarzellenanlage die Kosten anzugeben, obwohl natürlich bekannt ist, dass photovoltaisch erzeugte Energie heute noch nicht wirtschaftlich ist.

Gemäss Tabelle V liegen die Investitionskosten der PV-Anlage in Giubiasco bei Fr. 412 400.–. Interessant ist, dass die Solarpaneele, das heisst der eigentliche Kern der Anlage, von diesen Gesamtaufwendungen etwa 41% ausmachen. Dieser Prozentsatz deckt sich ungefähr mit dem anderer Solarzellenanlagen und zeigt, dass neben einer weiteren Verbilligung der Solarzellen auch die Kosten der übrigen Systemteile reduziert werden müssen, um in die Nähe der Wirtschaftlichkeit zu kommen.

Anlagekosten	412 400 Fr.
Kapitaldienst (5% Zins, 20 Jahre Amortisation)	33 074 Fr./a
AC-Stromproduktion 1992	13 242 kWh/a
AC-Stromproduktion 1993	15 367 kWh/a
Stromgestehungskosten 1992	2.50 Fr./kWh
Stromgestehungskosten 1993	2.15 Fr./kWh

Tabelle VI Wirtschaftlichkeit der Solarzellenanlage Giubiasco.

Fr.	
Solarzellen	168 000
Tragkonstruktion	43 900
Wechselrichter	61 000
Elektrotechnik DC-seitig	41 300
Elektrotechnik AC-seitig	28 700
Engineering	69 500
Total Anlage	412 400
Diverse Studien sowie Datenerfassung und Auswertung während zwei Jahren	139 600
Total Anlage und Forschung	552 000

Tabelle V Kostenzusammenstellung der Solarzellenanlage Giubiasco.

Gemäss Wirtschaftlichkeitsrechnung (Tabelle VI) lagen die Stromgestehungskosten 1992 bei 2.50 Fr./kWh und 1993 als Folge der besseren Verfügbarkeit des Wechselrichters noch bei 2.15 Fr./kWh.

Auch der Wert von 2.15 Fr./kWh liegt deutlich über dem ursprünglich prognostizierten kWh-Preis von Fr. 1.50. Dies ist primär die Folge einer weit unter der Erwartung liegenden Modulleistung, eines bedeutend geringeren Strahlungsangebots sowie einer stärkeren Verschmutzung als angenommen.

Um Photovoltaik auch in Zukunft erfolgreich einsetzen zu können, ist es deshalb notwendig, alle Anstrengungen zu unternehmen, einerseits die Anlagekosten zu senken und andererseits auch den Ertrag von Solarzellenanlagen zu steigern.

Zusammenfassung

Dank der detaillierten Datenauswertung der Solarzellenanlage Giubiasco über eine Periode von zwei Jahren konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die im folgenden kurz zusammengefasst sind.

- Das Strahlungsangebot in Giubiasco liegt 20% unter dem für diesen Standort auf der Basis von Meteonorm prognostizierten Wert. Für Standortevaluationen im Tessin ist deshalb bei der Anwendung der Meteonorm Vorsicht geboten (eine verbesserte Meteonorm ist in Bearbeitung).

- Der mit dem Simulationsmodell PVSIM1 berechnete Energie-Ertrag deckt sich gut mit den Messdaten. Voraussetzung ist allerdings, dass die Kennlinien der verschiedenen Komponenten (Solarzellen, Wechselrichter) richtig eingegeben werden und bei der Anlage keine Störungen auftreten (100%ige Verfügbarkeit des Wechselrichters).
- Die Erfahrung hat gezeigt, dass Herstellerangaben oft zu optimistisch sind und Solarzellenanlagen vor allem im ersten Betriebsjahr noch nicht 100%ig verfügbar sind. In diesen Fällen wird der Energieertrag mit dem Simulationsmodell stark überschätzt.
- Die vom Solargenerator erzeugte DC-Leistung erreicht bei der Anlage Giubiasco unter Standard-Testbedingungen und unter Berücksichtigung einer Strahlungseinbusse durch Panelverschmutzung von 4% einen Wert von 17,8 kW. Umgerechnet auf die Verhältnisse im Neuzustand entspricht dies einer effektiven Solarzellenleistung von max. 18,5 kW oder im Vergleich zu den Herstellerangaben (22 kW) einer Minderleistung von 16%.
- Der Wechselrichter weist unter Nennbedingungen einen Wirkungsgrad von 95% auf. Auch im Teillastbereich liegen die Umwandlungswirkungsgrade erfreulich hoch und decken sich weitgehend mit den Herstellerangaben. Die im ersten Betriebsjahr noch vorhandenen Probleme (Ausfälle und Störungen) konnten weitgehend gelöst werden, so dass der Wechselrichter heute zur vollen Zufriedenheit funktioniert.
- Die Solarzellenanlage Giubiasco liegt an der Bahnlinie Bellinzona–Locarno. Beim Bremsen der Züge entsteht Bremsstaub, der sich wegen der unmittelbaren Nähe zum Geleise auf den Paneelen niederschlägt. Dies führte nach nur eineinhalbjährigem Betrieb zu einer Leistungsreduktion von 7%.
- Ebenfalls ungünstig für den Ertrag der Solaranlage ist ein Hochspannungsmast, der in den Wintermonaten zu einer Teilbeschattung der Panele führt. Es ist schwierig, die dadurch verursachte Einbusse genau zu quantifizieren. Sie dürfte aber auch im Prozentbereich liegen.
- Ertragsmindernd wirken sich weiter auch die umliegenden Berge aus, weil der Direktstrahlungsanteil bei tiefem Sonnenstand reduziert wird. Im Vergleich zu einem freien Horizont dürfte diese Einbusse etwa 6% betragen.
- Der spezifische Ertrag der Anlage (bezogen auf eine STC-Leistung von 18,5 kW_p) lag 1993 bei 830 kWh/kW_p und damit etwas über dem Durchschnitt der von der VSE-Statistik erfassten

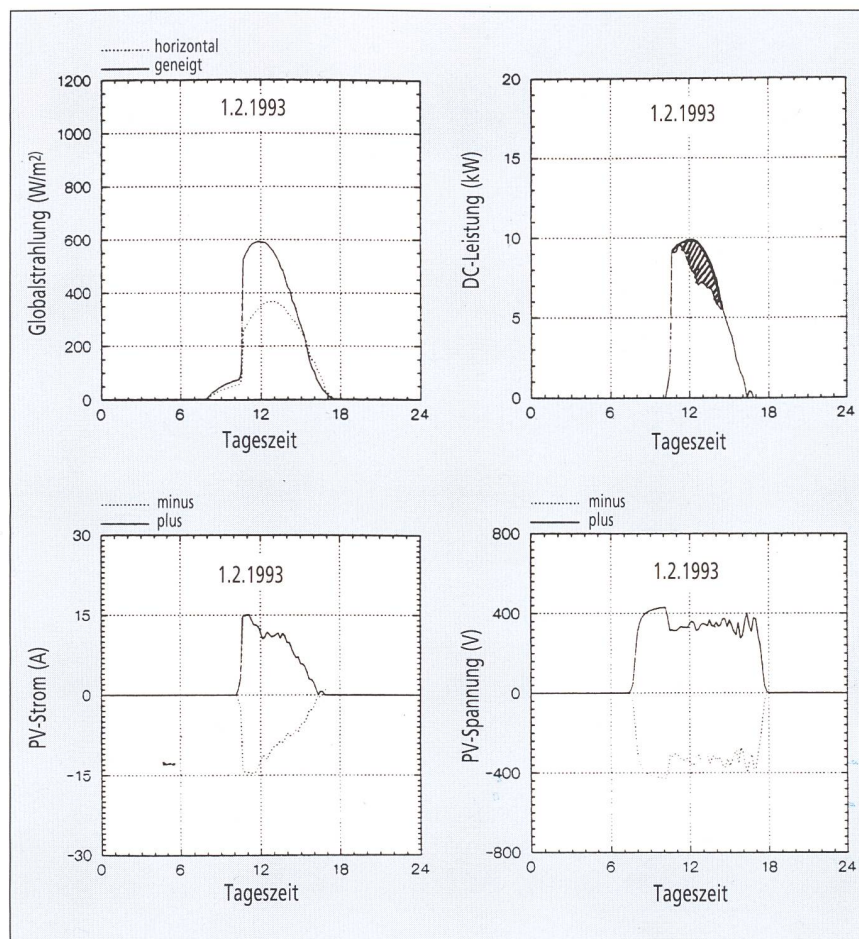


Bild 7 Einfluss einer Teilbeschattung durch Hochspannungsmast.

PV-Anlagen, welcher 810 kWh/kW_p betrug.

Bei einer grossmassstäblichen Nutzung der Sonnenenergie kann man sich nicht auf die wenigen idealen Standorte beschränken. Die Erkenntnisse aus dem Betrieb der

Anlage Giubiasco sind deshalb besonders wertvoll, weil sie die Einflüsse verschiedener störender Faktoren aufzeigen. Das Hauptziel dieses Projekts – Erkenntnisse für die Planung und den Bau zukünftiger Anlagen zu gewinnen – wurde damit erfüllt.

Installation photovoltaïque connectée au réseau à Giubiasco

Les Chemins de fer fédéraux (CFF) ont installé des capteurs solaires sur le toit d'un de leurs bâtiments à Giubiasco. Financée par l'Office fédéral de l'énergie, cette installation solaire a été réalisée dans le cadre du programme d'installations pilotes et de démonstration prévues pour des bâtiments appartenant à la Confédération. Elle permettra aux CFF d'acquérir des connaissances en matière d'installations photovoltaïques connectées au réseau. Les effets attendus en ce qui concerne l'encombrement et les périodes d'ombre ont été pris tout particulièrement en considération lors du choix de l'emplacement. Entrée en exploitation à la fin de septembre 1991, l'installation pilote a, comme il se doit, été équipée de nombreux instruments permettant de relever les données météorologiques et d'exploitation. Celles-ci ont été évaluées en 1992 et 1993 par Electrowatt S.A. Le présent article met en évidence les résultats principaux de cette évaluation.

Lienhard

LIFOS-EW

Ihr Beratungs-Team mit der
grössten praktischen
Erfahrung bei der Einführung
Ihres Netzinformations-
systems.

Rufen Sie uns an.

Bolimattstrasse 5
5033 Buchs-Aarau
Telefon 064 22 82 82
Telefax 064 22 89 78

Ingenieurbüro
K. Lienhard AG
Buchs-Aarau



LANZ Stromschienen BETOBAR

Für die sichere Strom-Übertragung und Strom-Verteilung von 380–6000 A. Schutzart IP 68.7

- Hohe Kurzschlussfestigkeit
- maximaler Personenschutz
- komplett mit Montagematerial, Wand- und Decken-durchführungen, Anschlüssen, Abgangskästen etc.
- preisgünstig, platzsparend und rasch montiert
- wartungsfrei
- korrosionsfest

Rufen Sie **lanz oensing ag** an für Beratung,
Offerte, preisgünstige und rasche Lieferung
Tel. 062/78 21 21 Fax 062/76 31 79

LANZ Produkte interessieren mich! Bitte senden Sie Unterlagen:

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> LANZ Stromschienen
BETOBAR 380–6000 A | <input type="checkbox"/> LANZ G-Kanäle und
kleine Gitterbahnen |
| <input type="checkbox"/> Verteil-Stromschienen | <input type="checkbox"/> Schienenmontage-
system MULTIFIX |
| <input type="checkbox"/> Beleuchtungs-Stromschienen | <input type="checkbox"/> Doppelböden für techn.
Räume |
| <input type="checkbox"/> LANZ Kabelträgersystem aus
Stahl und Polyester | |

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!
Name/Adresse/Tel.: _____



lanz oensing ag

CH-4702 Oensingen · Telefon 062 78 21 21

CVM-Powermeter

Ersetzt 30 konventionelle Messinstrumente

- **Misst, berechnet genau**
Spannung, Strom,
Wirk-, Schein-, Blindleistung
Minima- und Maxima
Leistungsfaktor, Frequenz
- **Programmierbar**
Erweiterbar
Netzwerkfähig



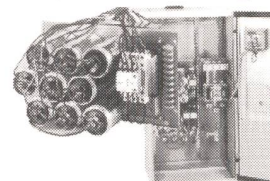
ELKO
SYSTEME AG

Messgeräte · Systeme · Anlagen zur Kontrolle und
Optimierung des Verbrauches elektrischer Energie
Haldenweg 12 CH-4310 Rheinfelden
Tel. 061-831 59 81 Fax 061-831 59 83

Blindenergiekosten vernichten BOMOMC-...

Vollautomatische Blindleistungs-Kompensations-Anlagen

- 15 ... 1200 kVar
- modular
- verlustarm
- betriebssicher
- servicefreundlich
- SEV-Norm 3724 erfüllt
- wirtschaftlich



Partner für Elektro-Energie-Optimierung · erfahren · kompetent · individuell beratend seit 1965

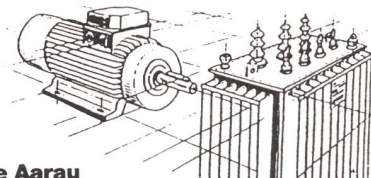


detron ag

Zürcherstrasse 25, CH 4332 Stein
Tel. 064-63 16 73 Fax 064-63 22 10



Industrielle Betriebe Aarau



PCB-frei?

- Transformatoren
- Kondensatoren
- Leistungsschalter
- Beratung
- PCB- und Qualitäts-Analysen
- Refilling, Retroil (Reinigung)
- Revisionen, Reparaturen
- PCB-Entsorgung

Wir sind rund um die Uhr für Sie einsatzbereit!

Industrielle Betriebe Aarau
Servicebetriebe · Binzmattweg 2
5035 Unterentfelden
Telefon 064 21 00 21
Fax 064 21 03 80

IBA