

Analyse des Betriebsverhaltens von Photovoltaikanlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung

H. Häberlin, Ch. Beutler und Ch. Liebi
Ingenieurschule Burgdorf, Labor für Photovoltaik
Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf/Schweiz
Tel: ++41 / 34 426 68 11, Fax: ++41 / 34 426 68 13
e-Mail: heinrich.haeberlin@hti.bfh.ch , Internet: www.pvtest.ch

1. Einleitung

Um die Energieproduktion und das Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen verschiedener Grösse und an verschiedenen Orten in fairer Weise miteinander vergleichen zu können, wurde vom JRC in ISPRA/Italien eine sehr nützliche normierte Datenauswertung vorgeschlagen [1].

Diese Auswertung wurde von uns weiterentwickelt (speziell für netzgekoppelte Anlagen) und um neue aussagekräftige Darstellungsarten erweitert. Insbesondere wurde eine Methode realisiert, welche eine detaillierte Analyse sporadischer Fehlfunktionen (z.B. Maximum-Power-Tracking-Fehler beim Wechselrichter, (Teil-) Beschattung oder Schneebedeckung des Generators usw.) erlaubt.

2. Normierte Erträge und Verluste

Durch die Einführung der normierten Grössen Y_r (Referenzertrag), Y_a (Generatorertrag), Y_f (Endertrag) sowie L_c (Generatorverluste), L_s (Systemverluste) und PR (Performanz) können recht aussagekräftige Auswertungen erstellt werden. Diese Auswertungen können als Jahresstatistik (mit entsprechenden Monatswerten), als Monatsstatistik (mit Tageswerten) und als Tagesstatistik (mit Stundenwerten) grafisch oder tabellarisch dargestellt werden. Die Angabe der Performanz über jedem Balken erhöht den Informationsgehalt der verwendeten Balkengrafiken wesentlich. Diese Auswertungen ermöglichen einerseits einen direkten Anlagevergleich und andererseits das Erkennen von gewissen Fehlfunktionen.

In Tabelle 1 sind die normierten Erträge und Verluste zusammengefasst und erklärt.

3. Normierte Leistungen und normiertes Tagesdiagramm

Sofern das Speicherintervall der Daten kleiner als 1 Stunde ist, können auch die kurzzeitigen Mittelwerte (z.B. 5-Minuten-Werte) normiert werden. Die *Normierung* erfolgt mittels *Division der Werte durch die Solargenerator-Nennleistung P_0 resp. Sonneneinstrahlung G_0 bei STC*. Diese neuen normierten Momentanwerte werden analog zu den Erträgen mit Kleinbuchstaben benannt (y_r , y_a , y_f , l_c , l_s und pr). Damit kann nun ein sog. *normiertes Tagesdiagramm* erstellt werden, was eine noch feinere Analyse des Betriebsverhaltens ermöglicht (siehe Beispiele).

4. Aufteilung der Generatorverluste

Falls nebst den elektrischen Grössen und der Sonneneinstrahlung auch die *Solar-generatortemperatur* gemessen wird, können die Generatorverluste weiter unterteilt werden in

- **Temperaturbedingte Verluste L_{CT} resp. I_{CT}** (Zellentemperatur meist $>25^{\circ}\text{C}$)
- **Übrige, nicht temperaturbedingte Verluste L_{CM} resp. I_{CM}** (Verdrahtung, Strangdioden, Teilabschattung, Verschmutzung, Schneebedeckung, Mismatch, MPT-Fehler etc.)

⇒ Bei netzgekoppelten Anlagen steigt L_{CM} resp. I_{CM} infolge von Fehlfunktionen stark an und ist somit ein sehr guter Indikator für Anlageprobleme. Gut geplante und realisierte Anlagen haben normalerweise möglichst kleine L_{CM} -Werte.

Nebst L_{CT} und L_{CM} wird der **temperaturkorrigierte Referenzertrag Y_T resp. die temperaturkorrigierte Strahlungsleistung y_T** eingeführt.

Da die Leistung eines Solargenerators temperaturabhängig ist, liefert ein sonst idealer Solargenerator mit der **Nennleistung P_0** und der **Solarzellentemperatur T_C** bei **Bestrahlung mit $G_0 = 1 \text{ kW/m}^2$** im Punkt maximaler Leistung (MPP) die folgende **temperaturkorrigierte Solargenerator-Nennleistung: $P_{0T} = P_0[1 - c_T(T_C - T_0)]$** .

Damit kann man die normierten Momentanwerte für Leistungen und Verluste sowie die momentane Performanz wie folgt definieren:

- | | |
|---|---|
| • Normierte Strahlungsleistung/ Referenzleistung | $y_r = G_I / G_0 = G_I / 1 \text{ kWm}^{-2}$ |
| • Temperaturkorrigierte Strahlungsleistung | $y_T = y_r \cdot P_{0T} / P_0 = y_r \cdot [1 - c_T(T_C - T_0)]$ |
| • Normierte Solargeneratorleistung | $y_a = P_A / P_0$ |
| • Normierte Nutzleistung | $y_f = P_{\text{nutz}} / P_0$ |
| • Temperaturbedingte Generatorverluste | $I_{CT} = y_r - y_T$ |
| • Nicht temp.-bedingte Generatorverluste | $I_{CM} = y_T - y_a$ |
| • Systemverlustleistung | $I_s = y_a - y_f$ |
| • Momentane Performanz | $pr = y_f / y_r$ |

Dabei bedeuten

- P_{0T} Temperaturkorrigierte Solargenerator-Nennleistung
 P_0 Solargenerator-Nennleistung bei STC.
 c_T Temperaturkoeffizient der MPP-Leistung des Solargenerators (typisch $0,0044\text{K}^{-1}$ bei kristallinen Solarzellen).
 T_C Zellentemperatur des Solargenerators.
 T_0 STC-Bezugstemperatur, bei der die Solargenerator-Nennleistung P_0 definiert ist (25°C).
 G_I Globale Bestrahlungsstärke in Solargeneratorebene (kW/m^2)
 G_0 Bestrahlungsstärke bei STC (1kW/m^2).
 P_A vom Solargenerator produzierte Gleichstromleistung.
 P_{nutz} von der Photovoltaikanlage produzierte Nutzleistung (bei netzgekoppelten Anlagen: $P_{\text{nutz}} = P_{\text{ac}}$).

Aus den Momentanwerten y_i resp. l_i kann man durch **Integration** die Tages-, Monats- oder Jahreswerte Y_i resp. L_i berechnen:

$$Y_i = \int_0^T y_i * dt = \sum_k y_{ik} * \Delta t \quad \text{resp.} \quad L_i = \int_0^T l_i * dt = \sum_k l_{ik} * \Delta t$$

Mit diesen Beziehungen können nun auch die Tages- Monats- oder Jahreswerte für **Y_T (temperaturkorrigierter Strahlungs- resp. Referenzertrag)**, die **temperaturbedingten Generatorverluste L_{CT}** und die **nicht temperaturbedingten Generatorverluste L_{CM}** bestimmt werden.

Ferner können noch weitere sinnvolle Verhältnisse definiert werden:

Temperatur-Korrekturfaktor $k_T = Y_T / Y_r$
 Generator-Korrekturfaktor $k_G = Y_a / Y_T$
 Wechselrichter-Nutzungsgrad $n_l = Y_f / Y_a$ (bei netzgekoppelten Anlagen)

In der nachfolgenden Tabelle werden die wichtigsten normierten Größen zusammengefasst und erläutert:

Symbol	Bezeichnung	Bedeutung / Erklärung / Ursache	Einheit	
Y_r	Strahlungsertrag, Referenzertrag (Reference Yield)	$Y_r = H_I / G_0$. Y_r entspricht der Zeit, während der die Sonne mit $G_0 = 1 \text{ kW/m}^2$ scheinen müsste, um die Energie H_I auf den Solargenerator einzustrahlen.	$\frac{\text{kWh/m}^2}{\text{d} \cdot 1 \text{ kW/m}^2}$	[h/d]
L_c	Generatorverluste Feldverluste (Capture Losses)	Temperaturbedingte Verluste L_{CT} : Verluste, weil Zelltemperatur meist $> 25^\circ\text{C}$. Übrige, nicht temperaturbedingte Verluste L_{CM} : - Verdrahtung, Strangdioden, kleine Einstrahlung. - Teilabschattung, Verschmutzung, Schneebedeckung, Strahlungsinhomogenitäten, Mismatch. - Maximum-Power-Tracking-Fehler, Nichtabnahme der verfügbaren Generatorleistung wegen Wechselrichter ausfallen oder bei vollem Akku (bei Inselanlagen). - Fehler bei Strahlungsmessung. - Bei Pyranometer-Strahlungsmessung: Spektrale Verluste, Glasreflexionsverluste.	$\frac{\text{kWh}}{\text{d} \cdot \text{kWp}}$	[h/d]
Y_a	Generator-Ertrag (Array Yield)	$Y_a = E_A / P_0$. Y_a entspricht der Zeit, während der die Anlage mit Solargenerator-Nennleistung P_0 arbeiten müsste, um die Generator-DC-Energie E_A zu erzeugen	$\frac{\text{kWh}}{\text{d} \cdot \text{kWp}}$	[h/d]
L_s	Systemverluste (System Losses)	Wechselrichter-Umwandlungsverluste DC-AC, Speicher-verluste des Akkus bei Inselanlagen.	$\frac{\text{kWh}}{\text{d} \cdot \text{kWp}}$	[h/d]
Y_f	Endertrag (Final Yield)	$Y_f = E_{\text{Nutz}} / P_0$. Y_f entspricht der Zeit, während der die Anlage mit Generator-Nennleistung P_0 arbeiten müsste, um die gleiche Nutzenergie E_{Nutz} zu produzieren. Bei Netzverbundanlagen ist $E_{\text{Nutz}} = E_{\text{ac}}$.	$\frac{\text{kWh}}{\text{d} \cdot \text{kWp}}$	[h/d]
PR	Performanz, Nutzungsziffer, (Performance Ratio)	$PR = Y_f / Y_r$. PR ist das Verhältnis zwischen der effektiv genutzten Energie E_{Nutz} zur Energie, die eine verlustlose, ideale PV-Anlage mit Solargenerator-temperatur 25°C bei gleicher Einstrahlung produziert.		[1]
$Y_r \xrightarrow{-L_c} Y_a \xrightarrow{-L_s} Y_f \qquad Y_r \xrightarrow{-L_{CT}} Y_T \xrightarrow{-L_{CM}} Y_a \xrightarrow{-L_s} Y_f$				

Tabelle 1: Übersicht über Definition und Bedeutung der normierten Erträge und Verluste bei Photovoltaikanlagen. Bei der Angabe der Einheiten wurde angenommen, dass für längere Bezugsperioden *Tages-Durchschnittswerte* angegeben werden.

5. Beispiele der neuen Diagramme:

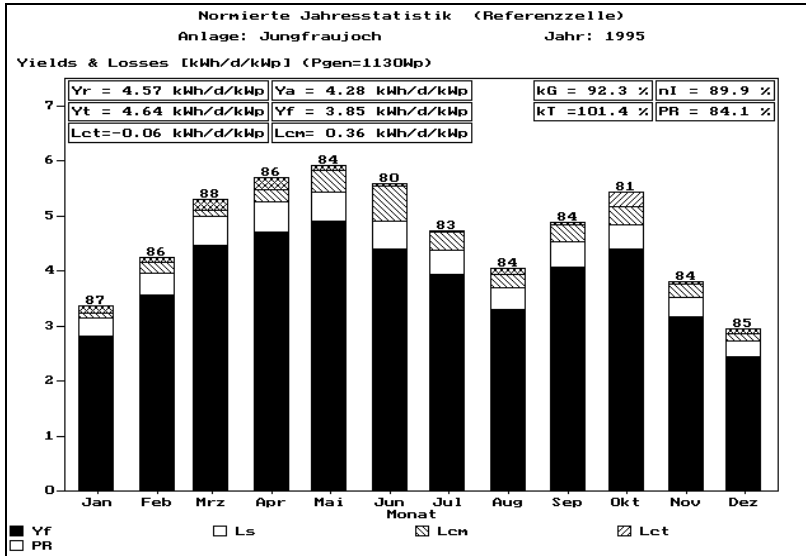


Bild 1: Normierte Jahresstatistik der Anlage Jungfrauojch von 1995. Der Endertrag Y_f erreicht 3.85kWh/d/kWp resp. 1405kWh/a/kWp). Die temperaturabhängigen Feldverluste L_{CT} sind fast durchwegs negativ. Entsprechend hoch sind die PR-Werte. Im Juni wurden die nicht temperaturabhängigen Feldverluste L_{CM} durch Schneebedeckung an einzelnen Tagen erhöht.

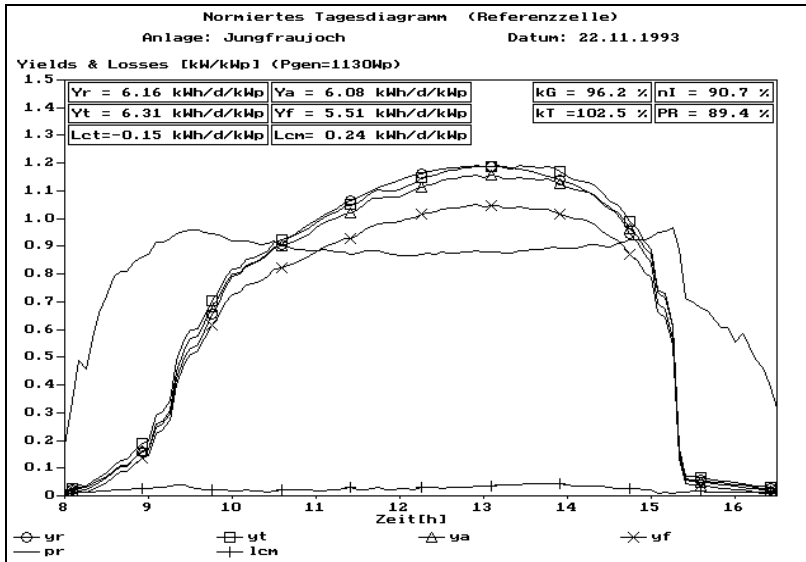


Bild 2: Normiertes Tagesdiagramm der Anlage Jungfrauojch am 22.11.1993. Strahlend schöner Tag mit sehr kleinem L_{CM} und hohem k_G , d.h. die Anlage funktioniert an diesem Tag einwandfrei und ohne irgendwelche Beeinträchtigungen.

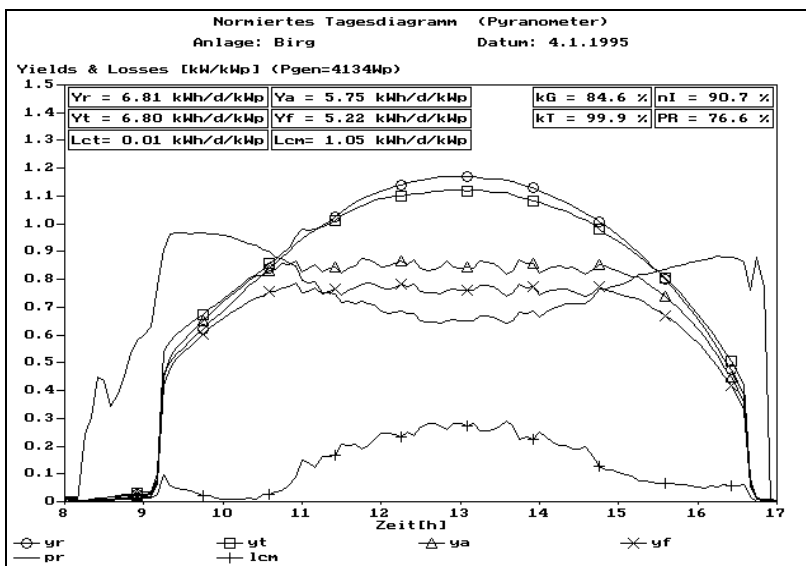


Bild 3: Normiertes Tagesdiagramm für die Anlage Birg (2670m) am 4.1.1995. Weil der Solargenerator im Vergleich zur Wechselrichter - Nennleistung etwas überdimensioniert ist, steigt L_{CM} über die Mittagszeit etwas an. Die Werte für k_G und PR liegen entsprechend tiefer.

6. Systematische Analyse von Fehlern mit Hilfe der neuen normierten Auswertungen:

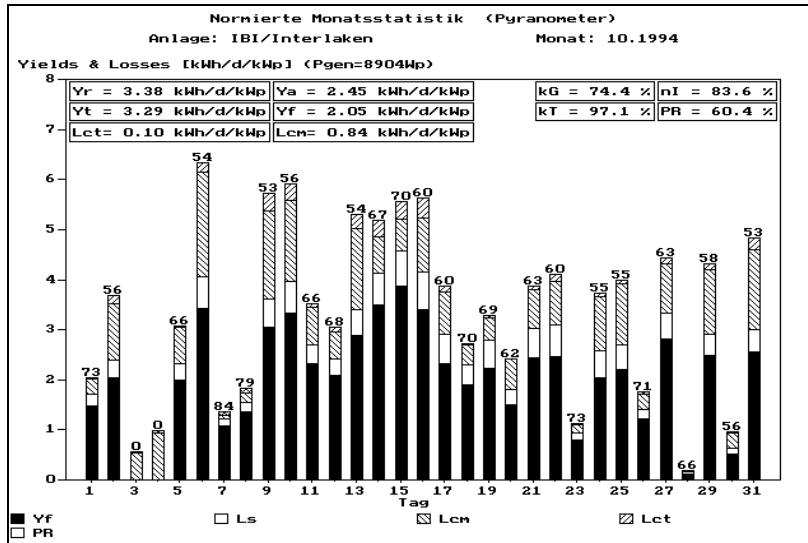


Bild 4: Normierte Monatsstatistik der 8.9kWp-Anlage der Industriellen Betriebe Interlaken (IBI) für Oktober 1994. Man erkennt, dass offenbar im Laufe des 2.10. Probleme auftraten und dass die Anlage am 3.10. und 4.10. ausser Betrieb war. Ab dem 5.10. nahm die Anlage mit reduzierter Leistung den Betrieb wieder auf.

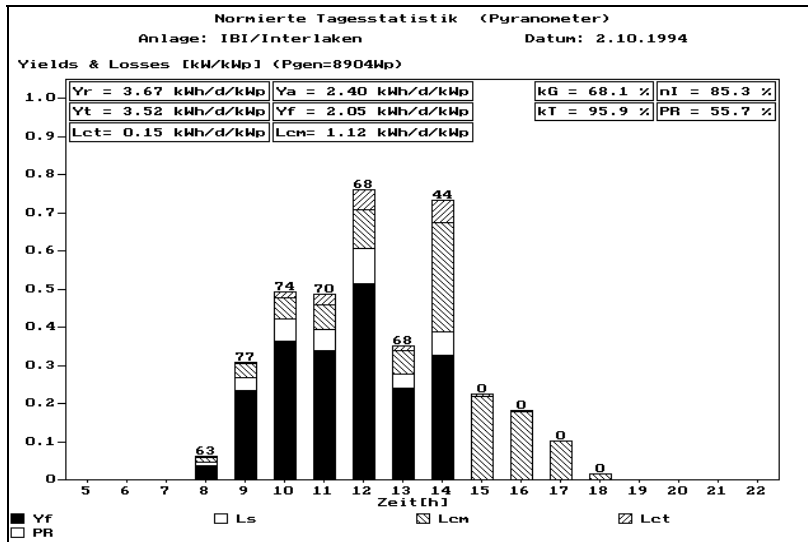


Bild 5: Normierte Tagesstatistik für den 2.10.1994 für die Anlage IBI Interlaken. Zwischen 13:00 und 14:00 fiel der Master-Wechselrichter aus, was das Abschalten der ganzen Anlage zur Folge hatte. Für den Rest des Tages wurde keine Energie mehr produziert.

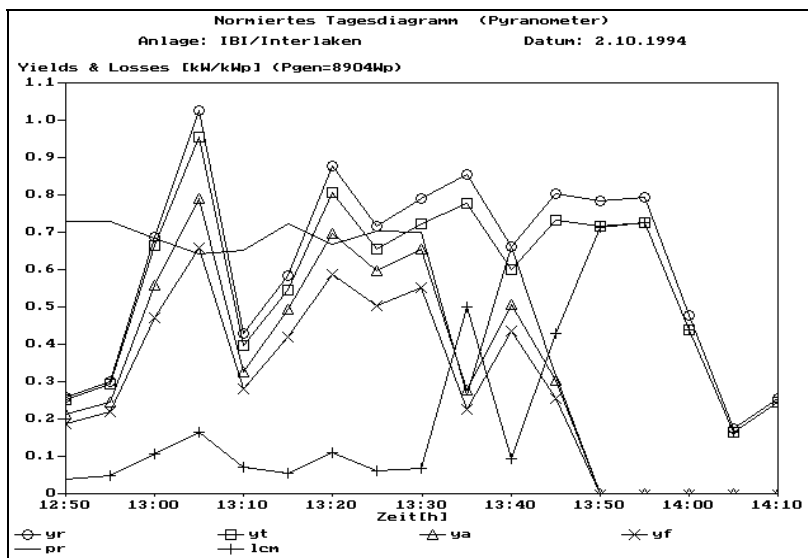


Bild 6: Detailanalyse (gedehntes normiertes Tagesdiagramm). Der Ausfall kündigt sich bereits um 13:35 durch ein temporäres MPP-Tracking-Problem (Anstieg von I_{CM} , Einbruch von pr) an. Um 13:42 erfolgt der endgültige Ausfall des Master-Wechselrichters, die Energieproduktion der ganzen Anlage sinkt auf 0. Als Folge davon sinkt y_f und pr ebenfalls auf 0.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die in dieser Arbeit vorgestellten erweiterten normierten Darstellungen kann das Betriebsverhalten von Photovoltaikanlagen verschiedener Grösse und an unterschiedlichen Standorten im Detail analysiert und verglichen werden. Wird bei einer Photovoltaikanlage ein etwas detaillierteres Messprogramm durchgeführt, sollte nicht nur die Umgebungstemperatur, sondern unbedingt auch die Zellen- oder Modultemperatur T_C gemessen werden. Mit dieser Grösse können die Generator- oder Feldverluste in den temperaturbedingten und nicht temperaturbedingten Anteil aufgespalten werden, was eine wesentlich genauere Untersuchung erlaubt. Stehen Messwerte in kürzeren Messintervallen als eine Stunde zur Verfügung, ermöglicht die Darstellung der normierten Leistungen und Verluste im normierten Tagesdiagramm eine noch feinere Analyse.

Normierte Leistungen und Verluste können auch zur Fehlerdiagnose eingesetzt werden. Werden die Messwerte sehr häufig (z.B. jede Sekunde) erfasst, lässt sich mit normierten Leistungen und Verlusten auf einfache Weise eine permanente Betriebsüberwachung realisieren, die eine sofortige Erkennung eventuell auftretender Fehler ermöglicht. Beim neuen Photovoltaik-Testzentrum der ISB ist diese Methode bereits seit einiger Zeit realisiert.

Leider konnte im vorliegenden Beitrag nur ein kurzer Überblick über unsere neuen normierten Auswertungen gegeben werden. Detailliertere Informationen, insbesondere umfangreiche Theorie, viele Beispiele und praktische Tips, befinden sich in unseren weiteren Publikationen [2 und 4].

Verdankungen

Der Aufbau der Messtechnik und die Entwicklung eines grossen Teils der in dieser Arbeit verwendeten Software erfolgte im Rahmen eines vom **Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)** und vom **Wasser- und Energiewirtschaftsamt (WEA) des Kantons Bern** finanzierten Projektes. Der Bau der Anlage auf dem Jungfrauoch wurde überdies von mehreren Firmen und Institutionen unterstützt. Die Photovoltaik-Aktivitäten der Ingenieurschule Burgdorf wurden und werden auch von den **Industriellen Betrieben Burgdorf (IBB)**, der **BKW Energie AG** und dem **Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB)** unterstützt. All diesen Firmen und Institutionen sei an dieser Stelle für ihre wertvolle Unterstützung herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants, Document B: Analysis and Presentation of Monitoring Data, Issue 4.1, June 1993, CEC JRC Ispra/Italien.
- [2] H. Häberlin, Ch. Beutler: "Analyse des Betriebsverhaltens von Photovoltaikanlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung", SEV/VSE-Bulletin 4/95.
- [3] H. Haeberlin and Ch. Beutler: "Highest Grid connected PV Plant in the World at Jungfrauoch: Excellent Performance in the first two Years of Operation". Proc. 13th EU PV Conf., Nice 1995.
- [4] H. Haeberlin and Ch. Beutler: "Normalized Representation of Energy and Power for Analysis of Performance and On-line Error Detection in PV Systems". Proc. 13th EU PV Conf., Nice 1995.