

Langzeiterfahrungen mit PV-Anlagen in der Schweiz

Prof. Dr. Heinrich Häberlin

Berner Fachhochschule

Hochschule für Technik und Informatik

Fachbereich Elektro- und Kommunikationstechnik

Kompetenzgruppe Energiesysteme

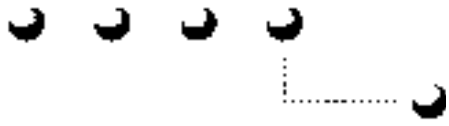
Photovoltaik-Labor

Tel. 034 426 68 11, Fax 034 426 68 13

CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ

Internet: www.pvtest.ch

e-Mail: heinrich.haeberlin@hti.bfh.ch



1. Einführung

Neben Wechselrichtertests führt die HTI Burgdorf auch seit 1992 Langzeit-Messungen an vielen netzgekoppelten PV-Anlagen durch.

Gegenwärtig werden 42 PV-Anlagen mit zur Zeit 55 Wechselrichtern ausgemessen. Die meisten Anlagen befinden sich in Burgdorf.

Seit 1992 resp. 1993 werden auch Daten von zwei hochalpinen Anlagen auf 3454 m und 2670 m erfasst.

Im Juni 2001 wurden die Anlage Mont-Soleil (560 kWp, 1270 m) und im Dezember 2001 drei Anlagen mit Dünnschichtzellen (CIS, a-Si-Tandem, a-Si-Tripel) ins Messprogramm integriert.



2. Wechselrichterzuverlässigkeit

Die bezüglich Zuverlässigkeit kritischste Komponente bei netzgekoppelten PV-Anlagen ist der Wechselrichter.

Die HTI Burgdorf führt bereits seit 1992 eine Ausfallstatistik über eine bisher stetig steigende Anzahl von Netzwechselrichtern (siehe Tabelle 1).

Wechselrichter-Ausfälle nach WR-Typen geordnet:

Wechselrichter	Bau-jahr	Betriebs-monate	Anzahl Hardwaredefekte													Hardware-Defekte pro WR-Betriebsjahr													
			92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	Total	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	Total	
PVWR 1500	1992	112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1			0.1
PVWR 1800	1992	201	0	3	5	4	0								12	0.0	0.8	1.3	1.0	0.0									0.7
Solcon 3300	1991	189	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
Solcon 3400HE	1992	497	1	1	4	0	1	0	0	2	2	0	1	1	13	33.2	1.0	1.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3
Solarmax S	1995	1539				0	5	0	4	1	2	8	2	3	25				0.0	0.4	0.0	0.3	0.1	0.1	0.5	0.1	0.2	0.2	
TopClass 1800	1993	122		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TC 2500/4 Grid III	1996	90					0	0	0	0	0	0	0	0	0					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TC 2500/6 Grid II	1994	230			0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	3			0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
TC 2500/6 Grid III	1996	77					0	0	0	0	0	0	0	0	0					0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TopClass 3000	1992	184	1	2	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	7	1.9	1.3	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.5	
TC 4000/6 Grid II	1994	370			0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3			0.0	0.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
TC 4000/6 Grid III	1996	553					1	0	0	1	1	0	1	0	4					0.7	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	
Solarmax 15	1995	104				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SolarMax20	1994	202			1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2			1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1
SolarMaxDC30+	1998	60							0	0	0	0	0	0	0							0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EcoPower20	1994	57			5	0	3	2	2						12			5.6	0.0	3.0	2.0	2.3						2.5	
EdiSun 200	1996	86					0	1	0	0	0	0	0	0	1					0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	
Convert4000	1998	433							0	0	2	1	0	2	5							0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.3	0.1	
ABB	1992	31										0	0	0	0									0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fronius Mini	2002	23											0	0	0										0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TopClass Spark	2001	73										0	0	0	0										0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total		5232	2	6	16	7	13	4	7	7	7	11	4	7	91	0.71	0.69	0.95	0.29	0.34	0.09	0.15	0.15	0.14	0.21	0.07	0.13	0.21	

Tabelle 1: Wechselrichter-Ausfälle nach Typen

Wechselrichter-Defekte

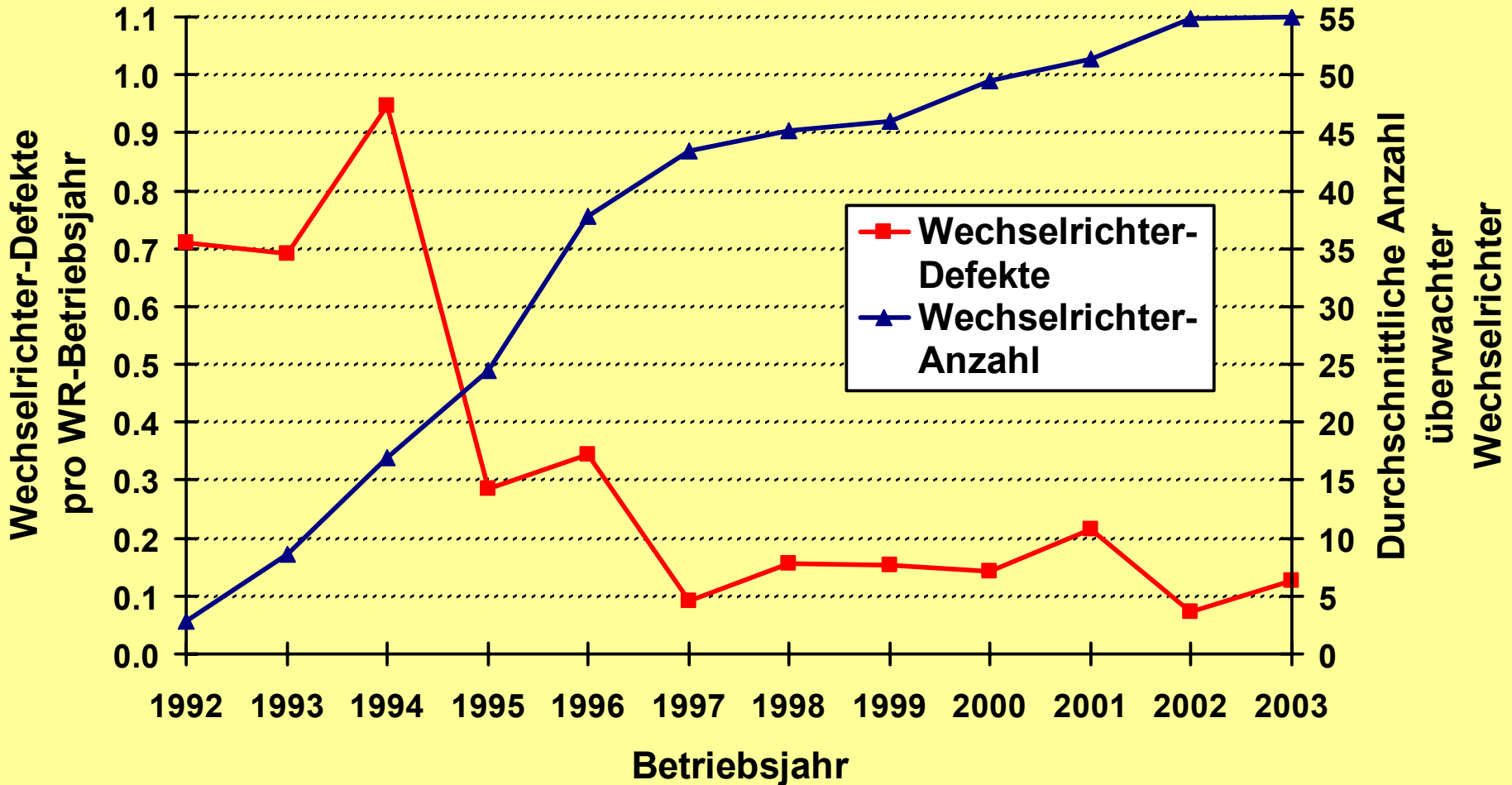


Bild 1: Anzahl Wechselrichter-Defekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr



Ein Wechselrichter-Defekt wirkt sich je nach dem Zeitpunkt und der Gerätegrösse energetisch natürlich sehr verschieden aus.

Bei einzelnen betroffenen Anlagen kann der Energieverlust durchaus im Bereich von 10 % liegen (siehe Bild 2 und 3).

Normierte Jahresstatistik (Pyranometer)

Anlage: Birg Jahr: 2003

Yields & Losses [kWh/d/kWp] (Pgen=4134Wp)

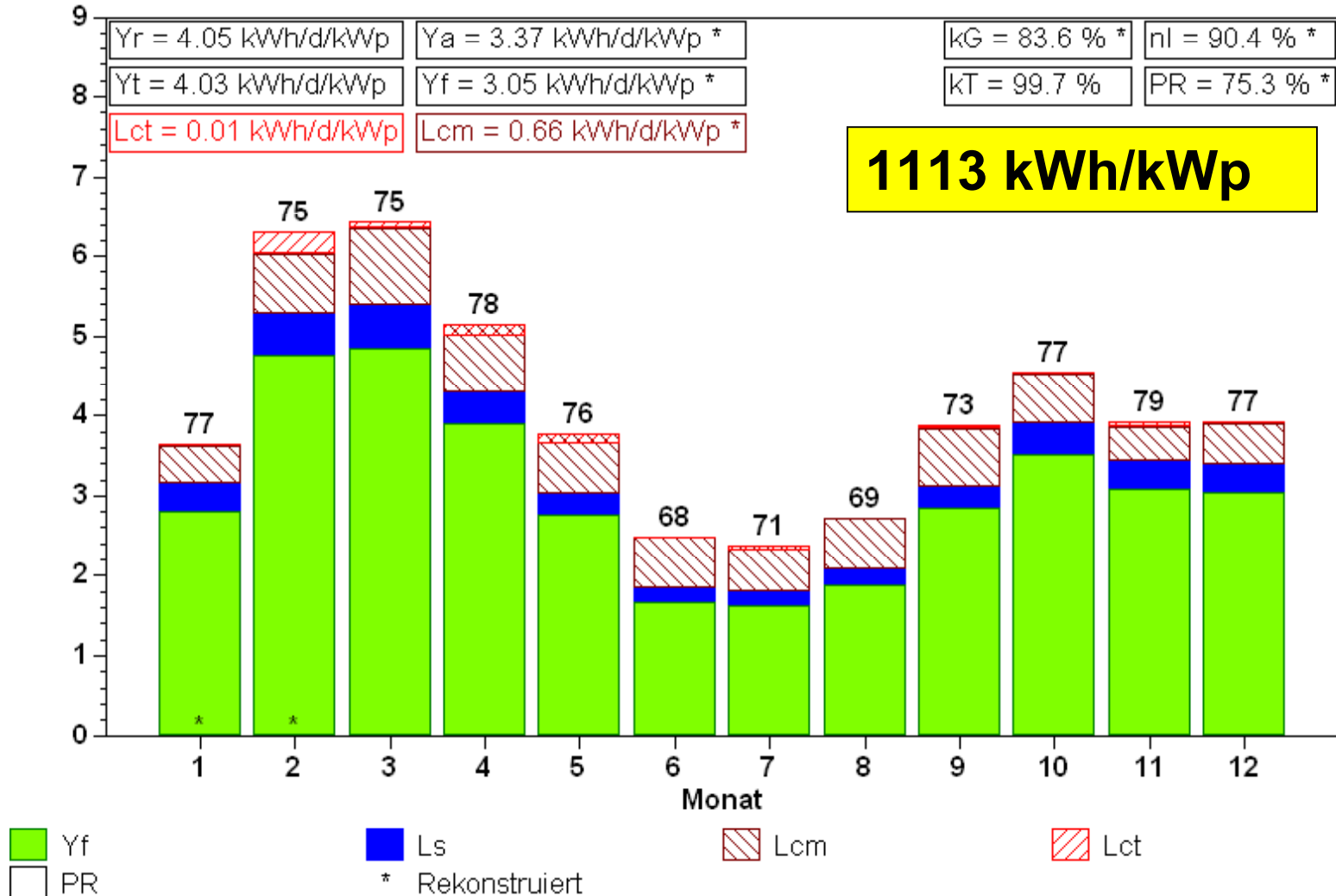
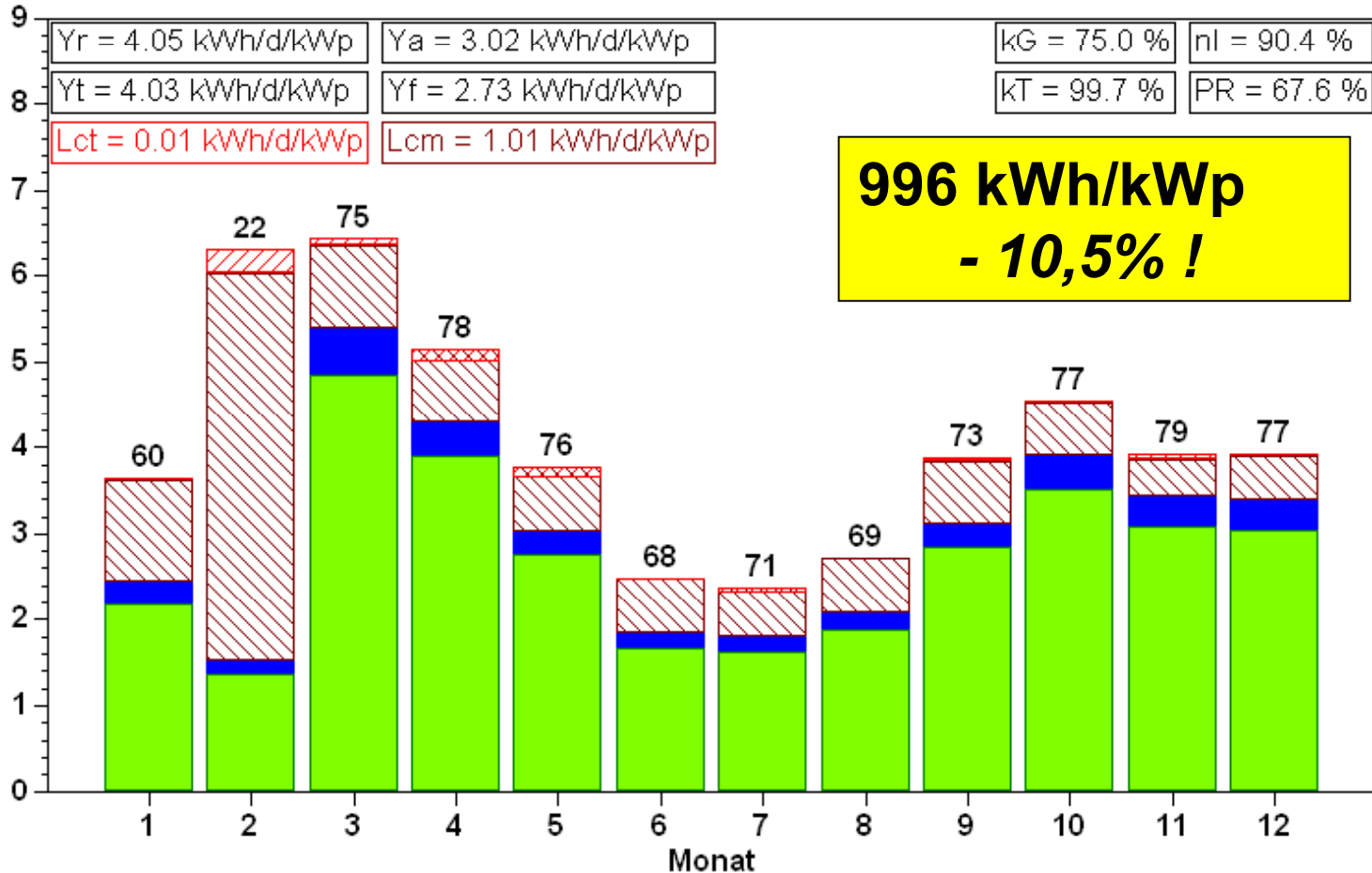


Bild 2: Normierte Jahresstatistik Anlage Birg 03 (ohne WR-Ausfall)

Normierte Jahresstatistik (Pyranometer)

Anlage: Birg Jahr: 2003

Yields & Losses [kWh/d/kWp] (Pgen=4134Wp)



996 kWh/kWp
- 10,5% !



Bild 3: Normierte Jahresstatistik Anlage Birg 03 (WR-Ausfall Jan. / Feb.)

Ertragsverlust wegen Wechselrichterausfällen (PV-Anlagen in Burgdorf)

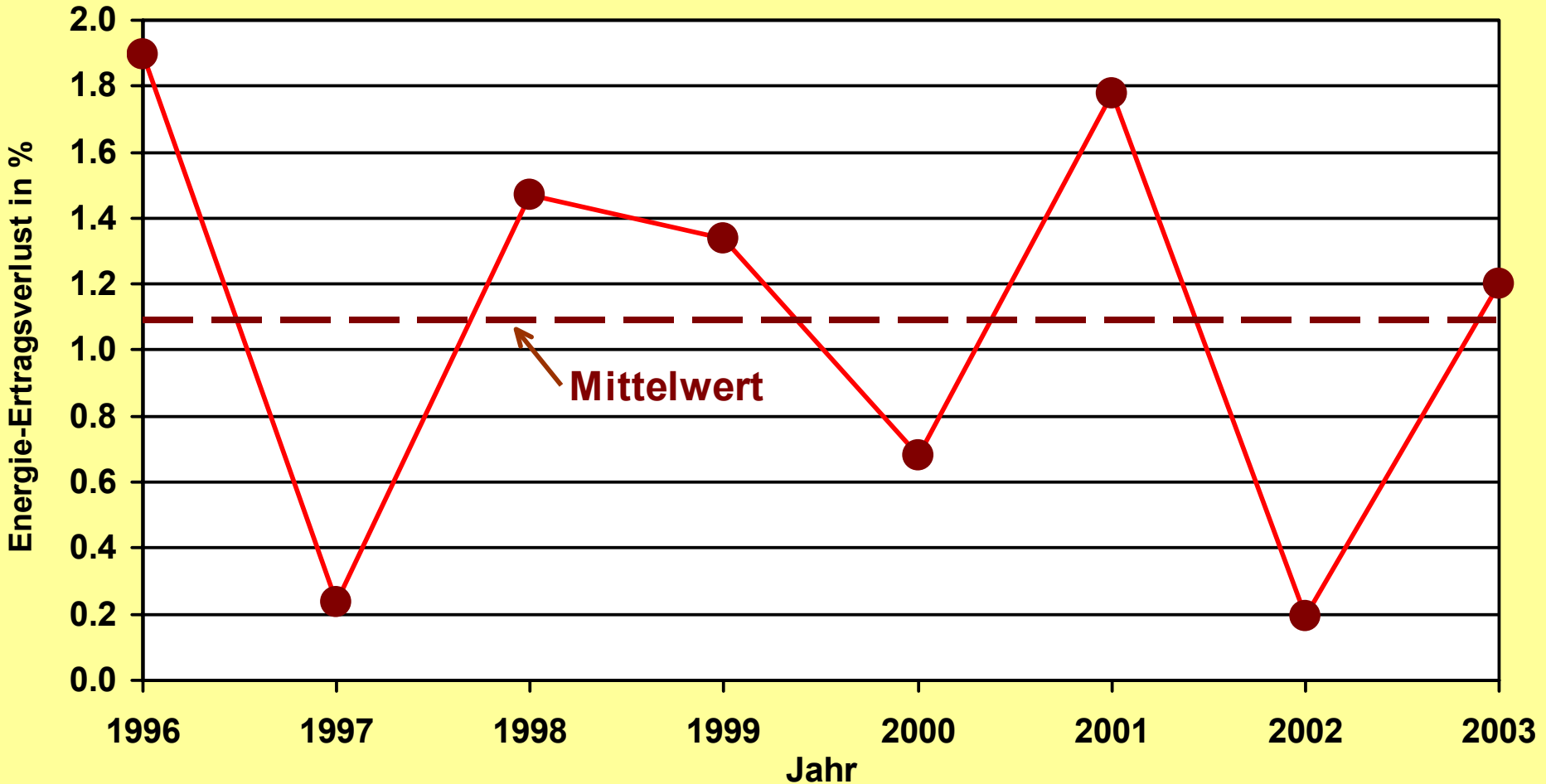


Bild 4: Energie-Ertragsverlust wegen Wechselrichter-Ausfällen



3. Energieertrag im Verlauf der Zeit

Um verschiedene Anlagen einfach miteinander vergleichen zu können, wird der **Energieertrag der Anlagen am besten in Kilowattstunden pro Kilowatt peak (kWh/kWp)** angegeben. Damit spielt die Grösse der Anlage keine Rolle mehr, der Energieertrag wird bei jeder Anlage auf 1kWp (1 kW Spitzenleistung bei STC) umgerechnet.

Entsprechend der von Jahr zu Jahr etwas schwankenden Einstrahlung variieren auch die registrierten Jahres-Energieerträge.

Normierter Energieertrag aller PV-Anlagen mit WR in Burgdorf

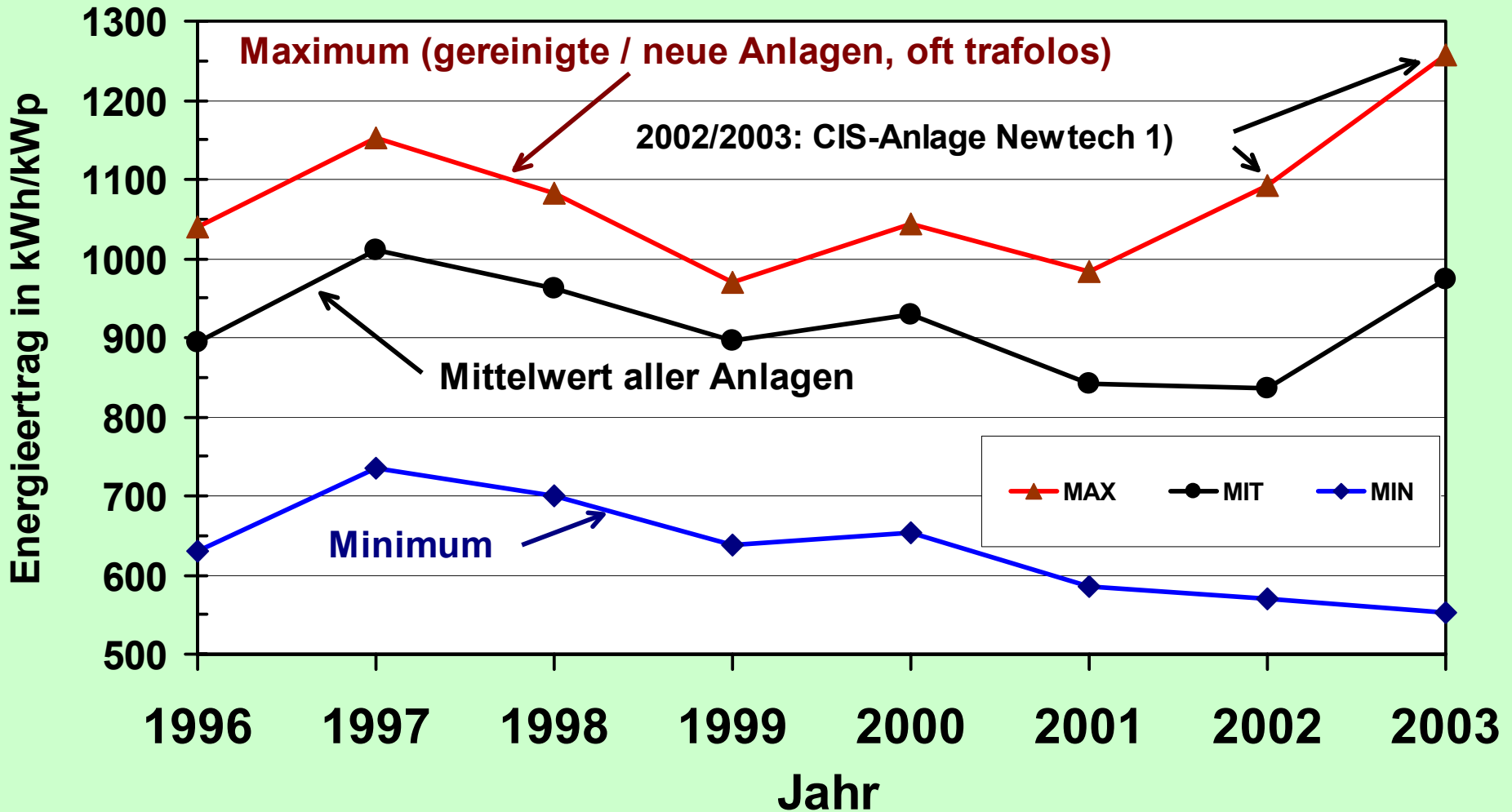


Bild 5: Normierter Jahres-Energieertrag aller PV-Anlagen in Burgdorf



3.1 Auf strahlungsmässiges Normaljahr bezogene normierte Energieerträge in Burgdorf

Um den Einfluss der von Jahr zu Jahr etwas schwankenden Einstrahlung zu eliminieren, werden die **normierten Energieerträge** der einzelnen Anlagen auf ein **strahlungsmässiges Normaljahr mit $H = 1163 \text{ kWh/m}^2$** umgerechnet.

Jahresenergieproduktion aller PV-Anlagen in Burgdorf (umgerechnet auf Normaljahr)

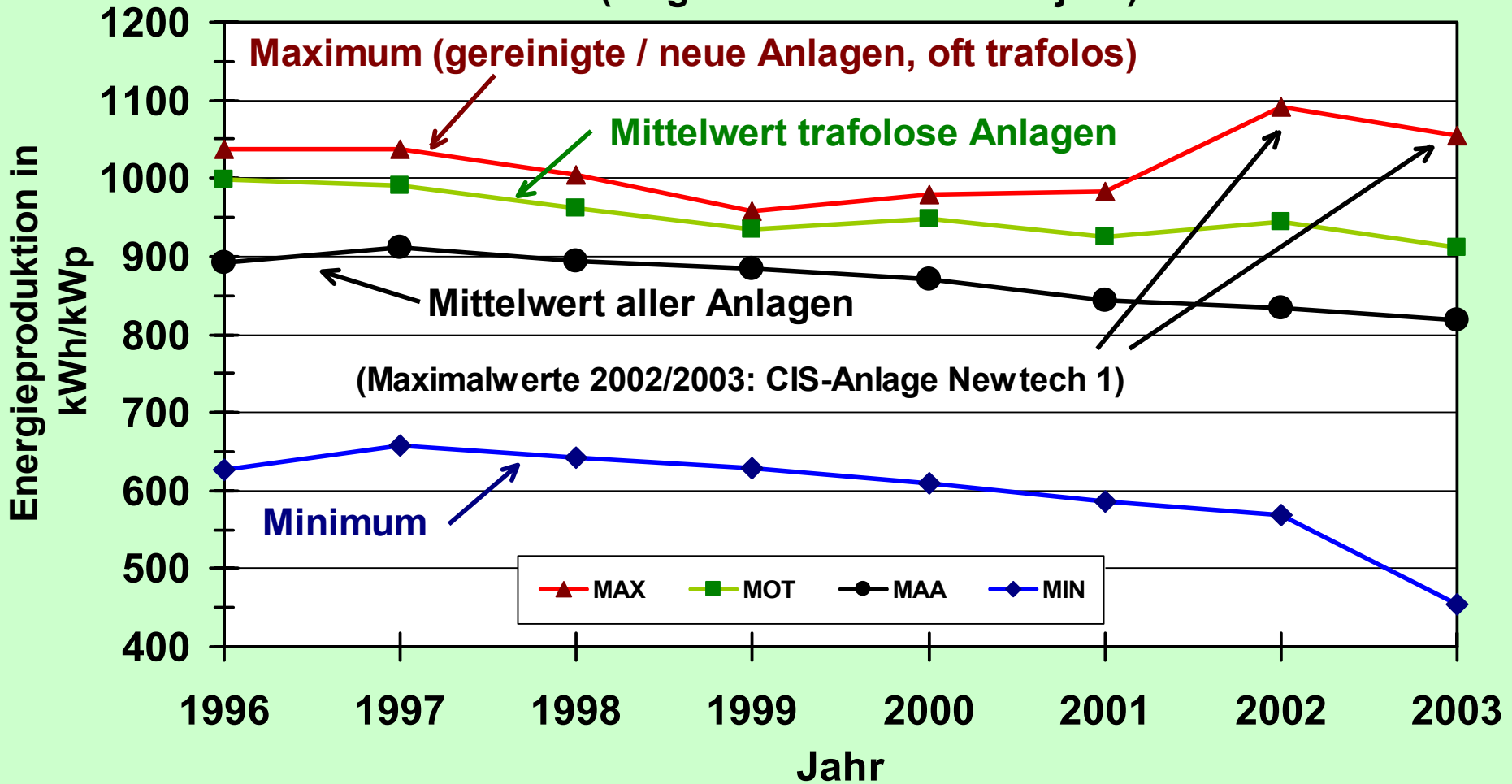


Bild 6: Normierter Energieertrag aller PV-Anlagen in Burgdorf in einem strahlungsmässigen Normaljahr (H = 1163 kWh/m²)



3.2 Auf Normaljahr bezogene normierte Energieerträge älterer PV-Anlagen in Burgdorf (Einfluss der Wechselrichterausfälle eliminiert)

Um das *Langzeitverhalten der Solargeneratoren* zu zeigen, muss der Einfluss der Wechselrichter-Ausfälle auf die Ertragsentwicklung eliminiert werden und es dürfen nur ältere Anlagen berücksichtigt werden.



Die in Bild 7 dargestellten Werte zeigen deshalb die Auswirkungen anderer Einflüsse auf den Solargenerator:

- **Verschmutzung**
- **Alterung**
- **Ausfall einzelner Stränge**
(z.B. Defekte von Strangdioden oder Strangsicherungen)
- **Moduldefekte**
- **Schneebedeckung**
- **Zunehmende Teilbeschattung durch wachsende Bäume**
(bei einzelnen Anlagen)

Jahresenergieproduktion älterer PV-Anlagen in Burgdorf (umgerechnet auf Normaljahr, ohne WR-bedingte Ertragsausfälle)

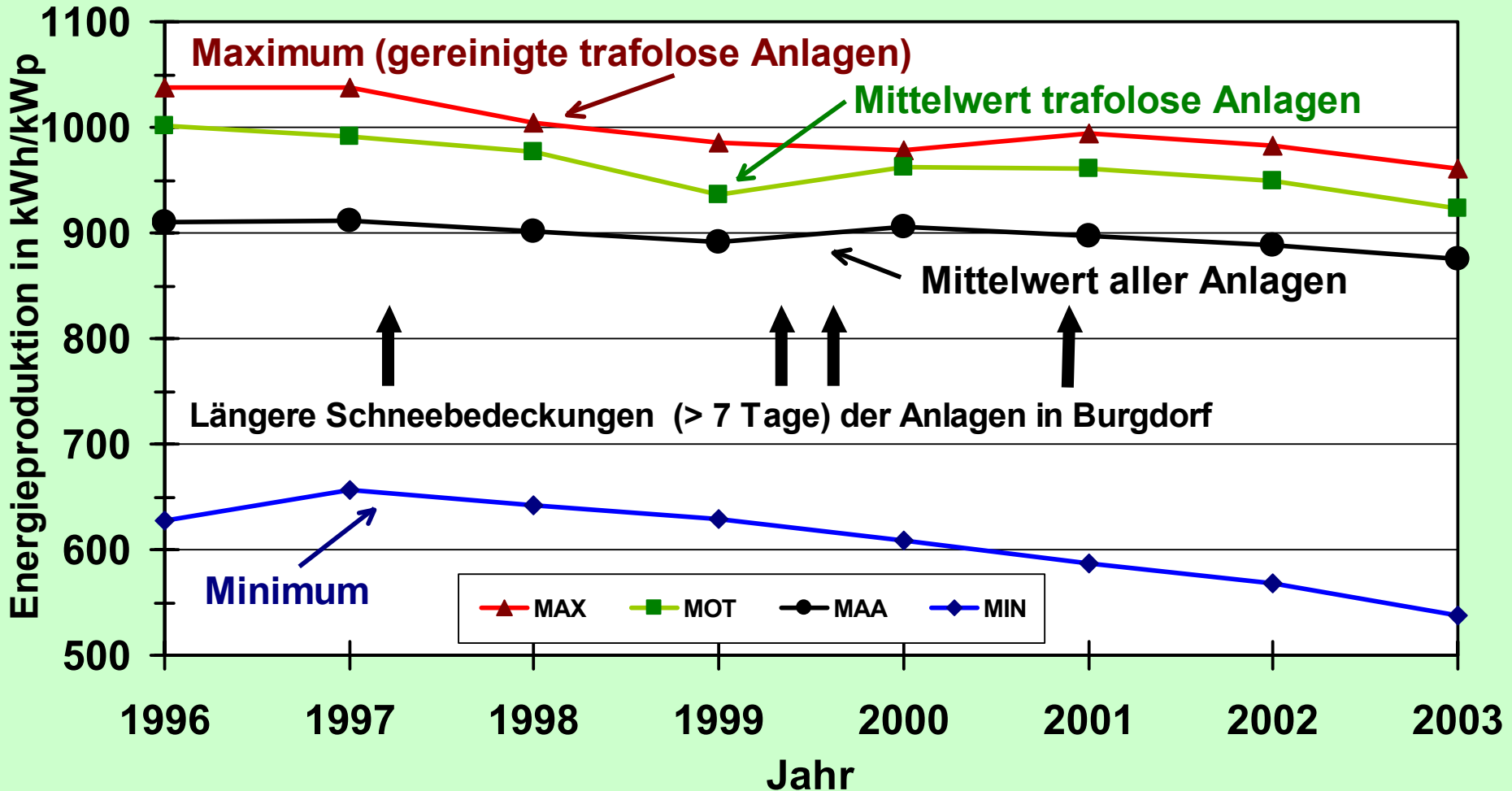


Bild 7: Normierter Energieertrag der vor 1998 erstellten PV-Anlagen in strahlungsmässigem Normaljahr (WR-Ausfälle eliminiert)

3.3 Verschmutzungs- und alterungsbedingte Ertragsabnahme beim Solargenerator der PV-Testanlage der HTI Burgdorf

Seit 1994 betreibt das PV-Labor der HTI Burgdorf ein Testzentrum für PV-Anlagen mit einem PV-Generator (60kWp, Anstellwinkel $\beta = 30^\circ$) auf dem Dach des Neubaus Elektrotechnik. Im Laufe der Zeit wurde die Entwicklung permanenter Verschmutzungstreifen am unteren Rand der verwendeten (gerahmten) PV-Module beobachtet, die eine allmähliche Reduktion des Energieertrags der Anlage bewirkten.



PV-Anlage West der HTI in Burgdorf: Generator-Korrekturfaktor im Sommerhalbjahr (April-September)

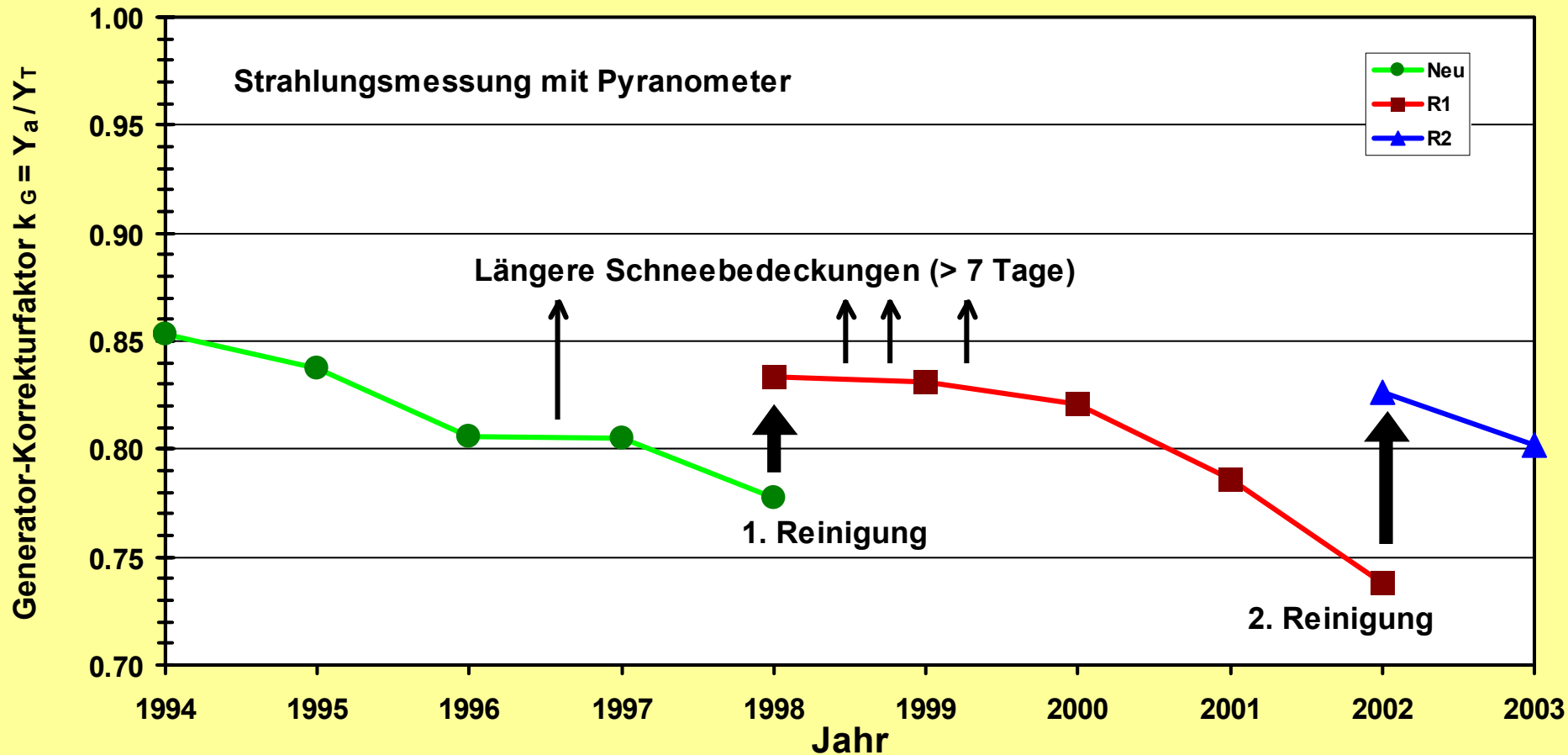


Bild 8: Generator-Korrekturfaktor $k_G = Y_a/Y_T$ bei Teilanlage West der PV-Anlage der HTI mit Angabe der Reinigungen (Idealfall $k_G = 1$)

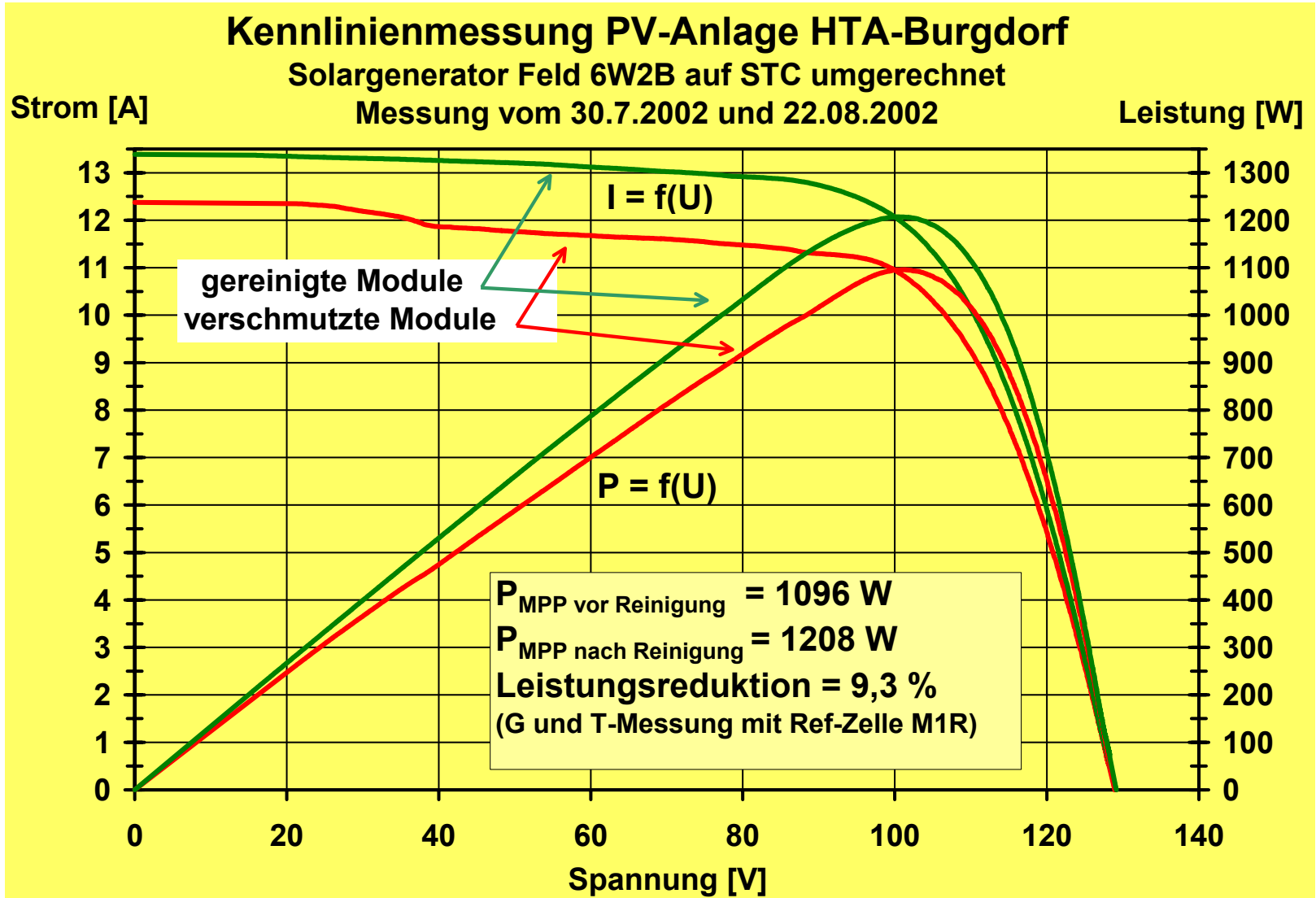


Bild 9: Auf STC umgerechnete I-U- und P-U-Kennlinien sowie P_{MPP} eines 6-er Arrays vor und nach der 2. Reinigung im August 2002.



3.4 Verlauf von k_G bei hochalpinen Anlagen

Die gleiche Untersuchung des Generator-Korrekturfaktors k_G wurde auch für die beiden hochalpinen Anlagen Birg und Jungfrauoch durchgeführt.

Da es sich dabei um Fassadenanlagen mit $\beta = 90^\circ$ handelt, ist eine Untersuchung des k_G -Verlaufs im Winterhalbjahr sinnvoll, da im Sommer der Einfluss der Glasreflexionsverluste infolge der steil stehenden Sonne die Ergebnisse verfälscht. Dabei muss natürlich der Einfluss temporärer Schneebedeckungen und von Wechselrichterstörungen eliminiert werden.

Hochalpine PV-Anlagen Jungfrauoch und Birg: Generator-Korrekturfaktor im Winterhalbjahr (Monate ohne Schnee)

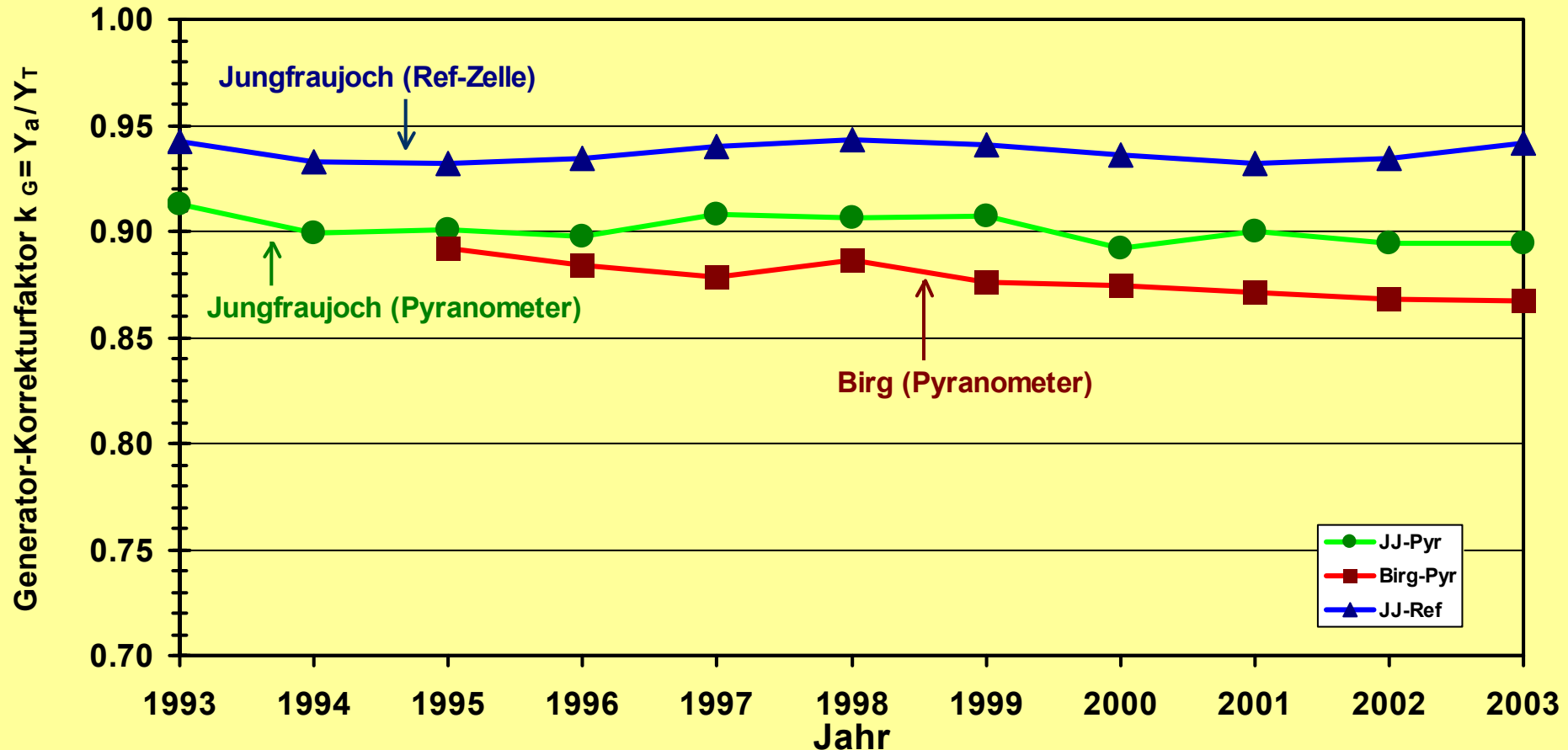


Bild 10: Gemessene Winter- k_G -Werte bei Anlagen Jungfrauoch und Birg



3.5 Energieverluste 2003 bei der Anlage Mt. Soleil

Wie bei Mittellandanlagen war 2003 auch bei der Anlage Mont Soleil das bisher mit Abstand ertragsreichste Jahr.

Dank des seit 2001 durchgeführten Monitorings durch die HTI Burgdorf und der Elimination eines lästigen Fehlers Ende 2002 funktioniert die Anlage nun relativ gut und eventuelle Betriebsstörungen werden rasch erkannt.

Verlustquellen 2003:

- Wechselrichterausfälle: 0%**
- Schneebedeckungen: 2,1%**
- Service-Abschaltungen der 16 kV-Leitung: 0,9%**
- Auslösungen DC-Strangschalter, Störungen 16 kV: 2,8%**

Normierte Jahresstatistik (Pyranometer)

Anlage: Mont Soleil Jahr: 2003

Yields & Losses [kWh/d/kWp] (Pgen=554592Wp)

Yr = 4.34 kWh/d/kWp	Ya = 3.32 kWh/d/kWp	kG = 76.7 %	nl = 96.2 %
Yt = 4.33 kWh/d/kWp	Yf = 3.19 kWh/d/kWp	KT = 99.7 %	PR = 73.6 %
Lct = 0.01 kWh/d/kWp	Lcm = 1.01 kWh/d/kWp		

1164 kWh/kWp

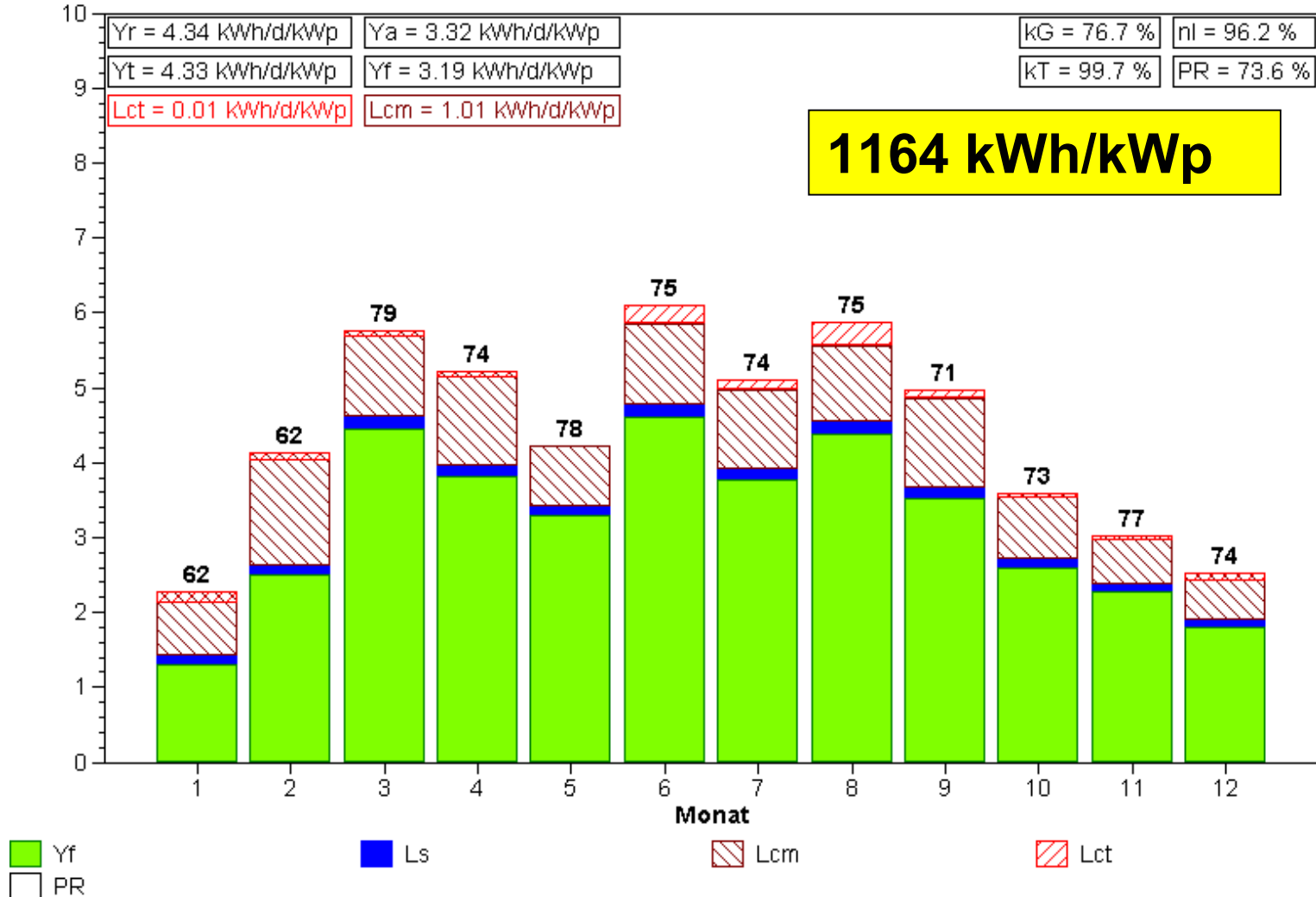


Bild 11: Effektiver Ertrag 2003 PV-Anlage Mont Soleil

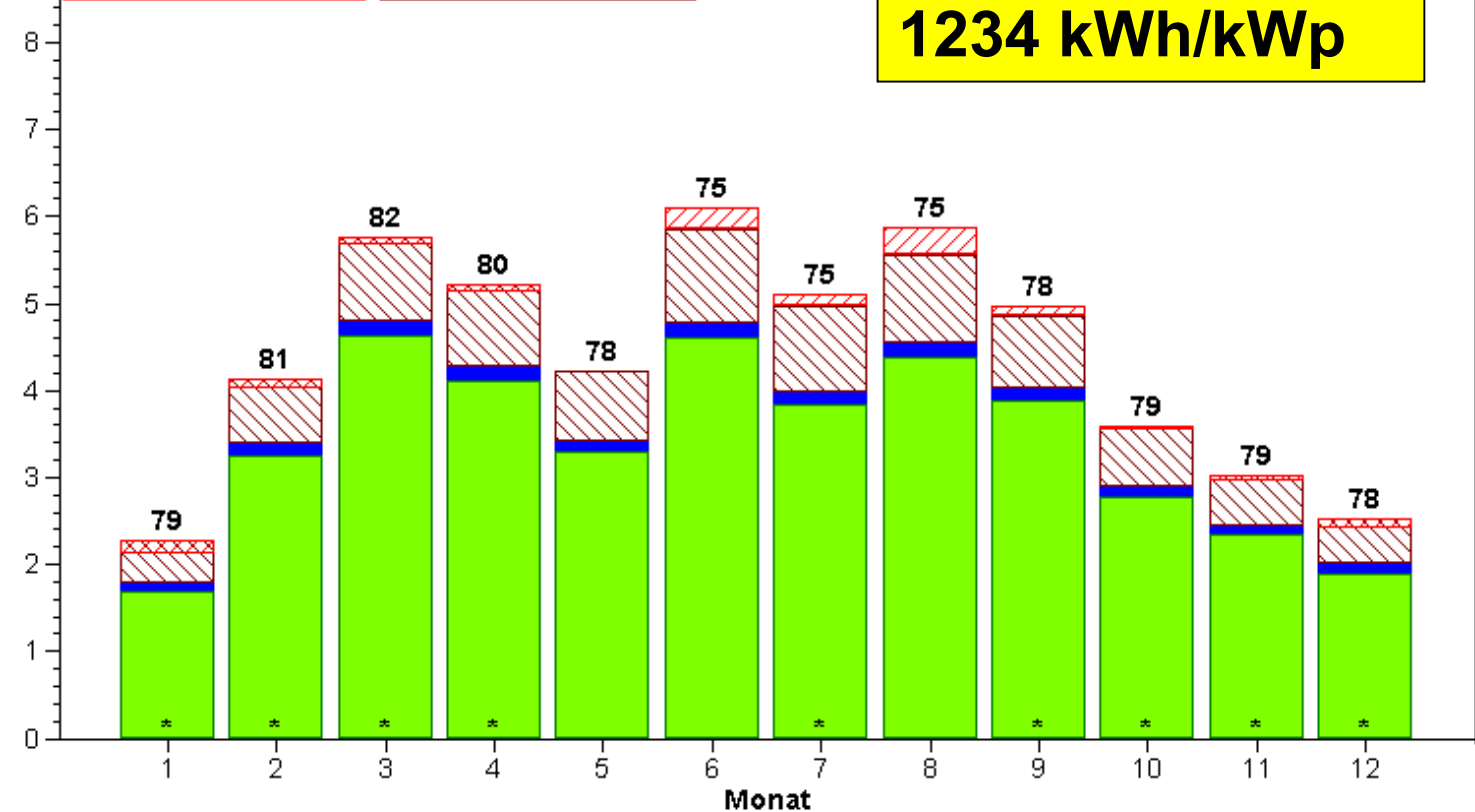
Normierte Jahresstatistik (Pyranometer)

Anlage: Mont Soleil Jahr: 2003

Yields & Losses [kWh/d/kWp] (Pgen=554592Wp)

Yr = 4.34 kWh/d/kWp *	Ya = 3.51 kWh/d/kWp *	kG = 81.2 % *	nl = 96.3 % *
Yt = 4.33 kWh/d/kWp *	Yf = 3.38 kWh/d/kWp *	kT = 99.7 % *	PR = 77.9 % *
Lct = 0.01 kWh/d/kWp *	Lcm = 0.82 kWh/d/kWp *		

1234 kWh/kWp



■ Yf ■ Ls Lcm Lct
 PR * Rekonstruiert

Bild 12: Hochgerechneter Ertrag 2003 PV-Anlage Mont Soleil



4. Zusammenfassung und Ausblick

- **Relativ geringer Energieverlust durch Wechselrichter-ausfälle (1996 – 2003 im Mittel ca. 1,1%).**
- **Oft deutliche Ertragseinbusse (bis 10%) bei PV-Anlagen mit gerahmten Modulen im Flachland (Verschmutzung der Unterkante bei zu geringem Abstand Zellen-Rahmen).**
- **Je nach Lage, Anstellwinkel und Modultyp ist eine periodische Reinigung des PV-Generators ratsam.**
- **Nur wenige Prozent (typisch gut 3%) des beobachteten Ertragsverlustes sind auf Modul-Degradation zurückzuführen. Somit scheint die Annahme berechtigt, dass der PV-Generator eine Lebensdauer von 20 – 30 Jahren erreichen wird.**



- **Das Interesse der Anlagebesitzer nimmt im Laufe der Zeit teilweise ab und ihre Anlagen „vergammeln“ etwas.**
- **Wechselrichter fallen typischerweise nach 5 - 10 Jahren erstmals aus. Bei kleinen Wechselrichtern ist nach 10 - 15 Jahren oft ein Totalersatz nötig.**
- ***Wünschbar: Anschlussmöglichkeit für Strahlungs- (und evtl. T-) Sensor am Wechselrichter.*** Mit vorhandener P- und E- Registrierung wäre so laufende Überwachung der Performance Ratio und rasche Fehlerdetektion möglich.

Weitere Informationen (auch Langzeit- und On-Line-Messdaten von vielen PV-Anlagen ab 1993 und zahlreiche Publikationen):

www.pvtest.ch



Verdankungen

Die beschriebenen Langzeitmessungen bis Mai 1995 erfolgten im Rahmen eines vom BFE und vom WEA des Kantons Bern finanzierten Messprojektes. Die weiteren Messungen ab Oktober 1996 bis August 2003 wurden im Rahmen zweier weiterer Monitoring-Projekte (Finanzierung: BFE, PSEL, Localnet AG, GMS, EBL) weitergeführt. All diesen Institutionen sei an dieser Stelle für ihre wertvolle Unterstützung gedankt.

Ich danke auch meinen ehemaligen Assistenten, Herr Ch. Beutler, der diese Langzeitmessungen von 1992 bis 1997 betreut hat, und Herrn S. Oberli, der neben Herr Beutler wesentlich bei der Realisierung und dem Ausbau der Auswertesoftware mitgewirkt hat.

Ebenso danke ich ihrem Nachfolger, Herrn Ch. Renken, der die Anlagen seit Herbst 1997 weiter betreut und meinen übrigen Assistenten, die zeitweise ebenfalls an der Betreuung der Anlagen mitgewirkt haben. Im Laufe von 2004 wird Herr Ch. Geissbühler die Hauptverantwortung für die Langzeit-Messungen übernehmen.



ENDE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ich stehe Ihnen nun gerne für
allfällige Fragen zur Verfügung

www.pvtest.ch