

Langzeiterfahrungen in der Photovoltaik-Systemtechnik

Prof. Dr. Heinrich Häberlin

Berner Fachhochschule

Technik und Informatik

Fachbereich Elektro- und Kommunikationstechnik

Photovoltaik-Labor

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

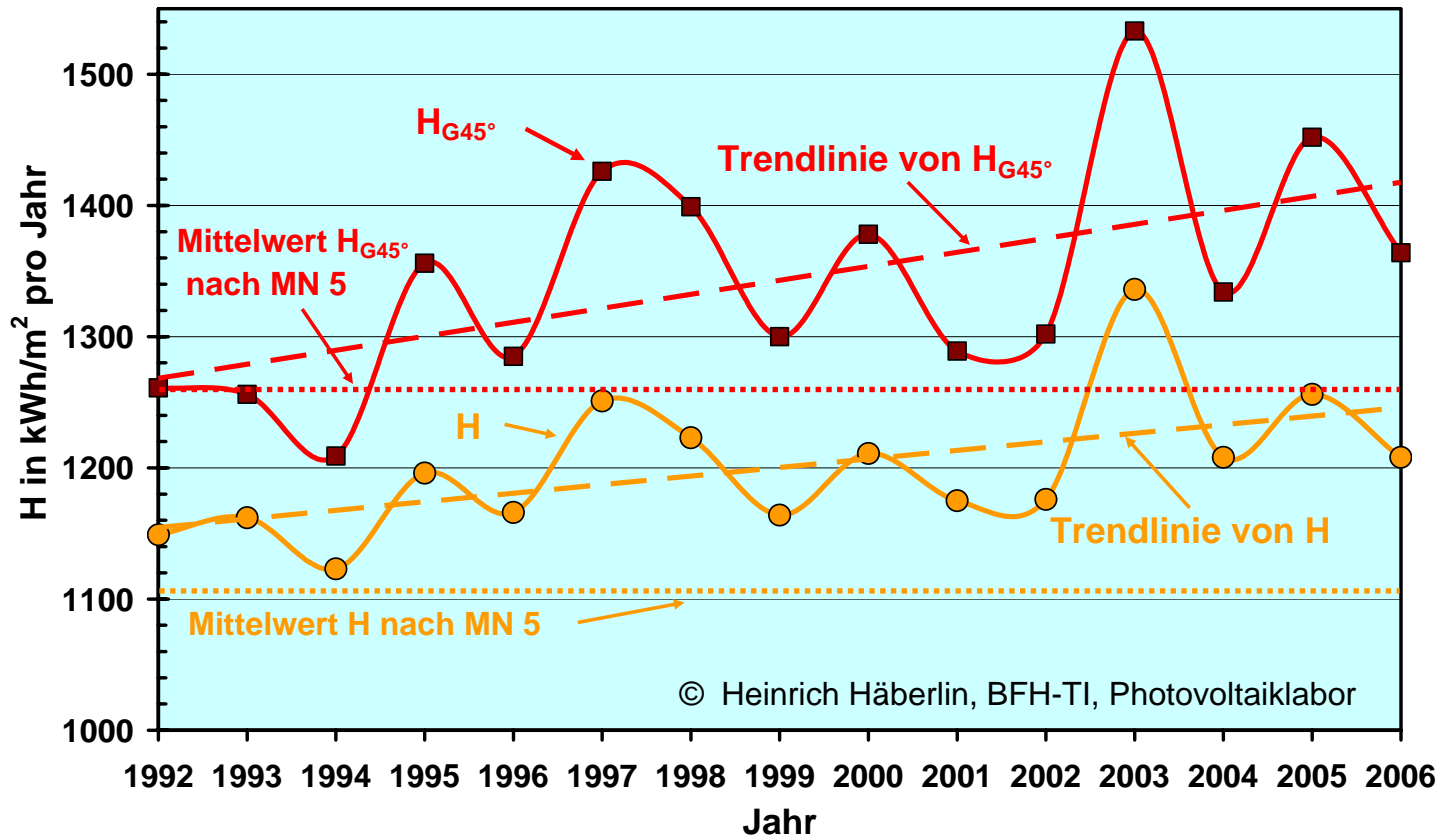
CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ

Internet: www.pvtest.ch

e-Mail: heinrich.haeberlin@bfh.ch

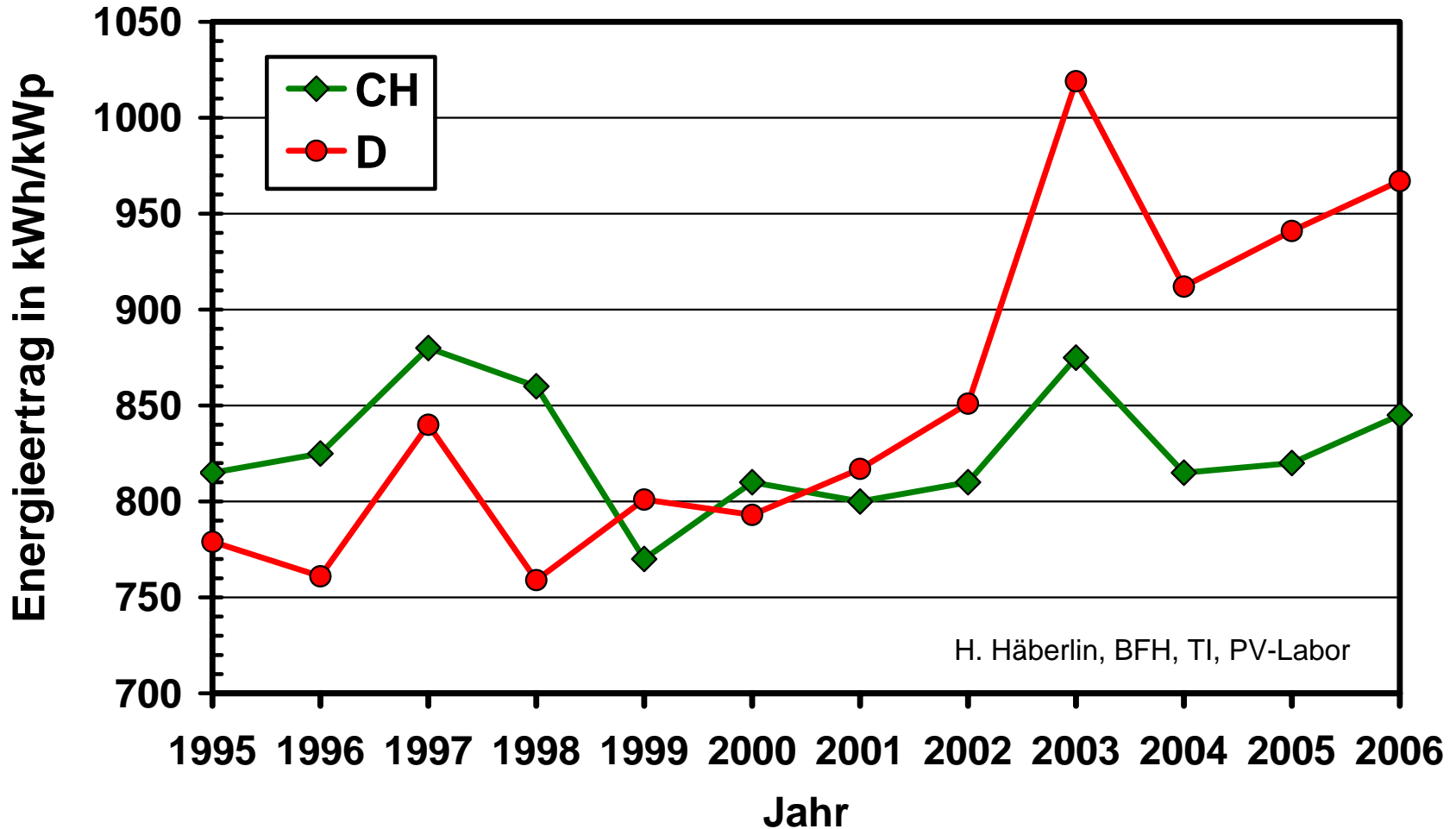
1. Einführung

Jahreseinstrahlung H und H_{G45° in Burgdorf 1992 - 2006



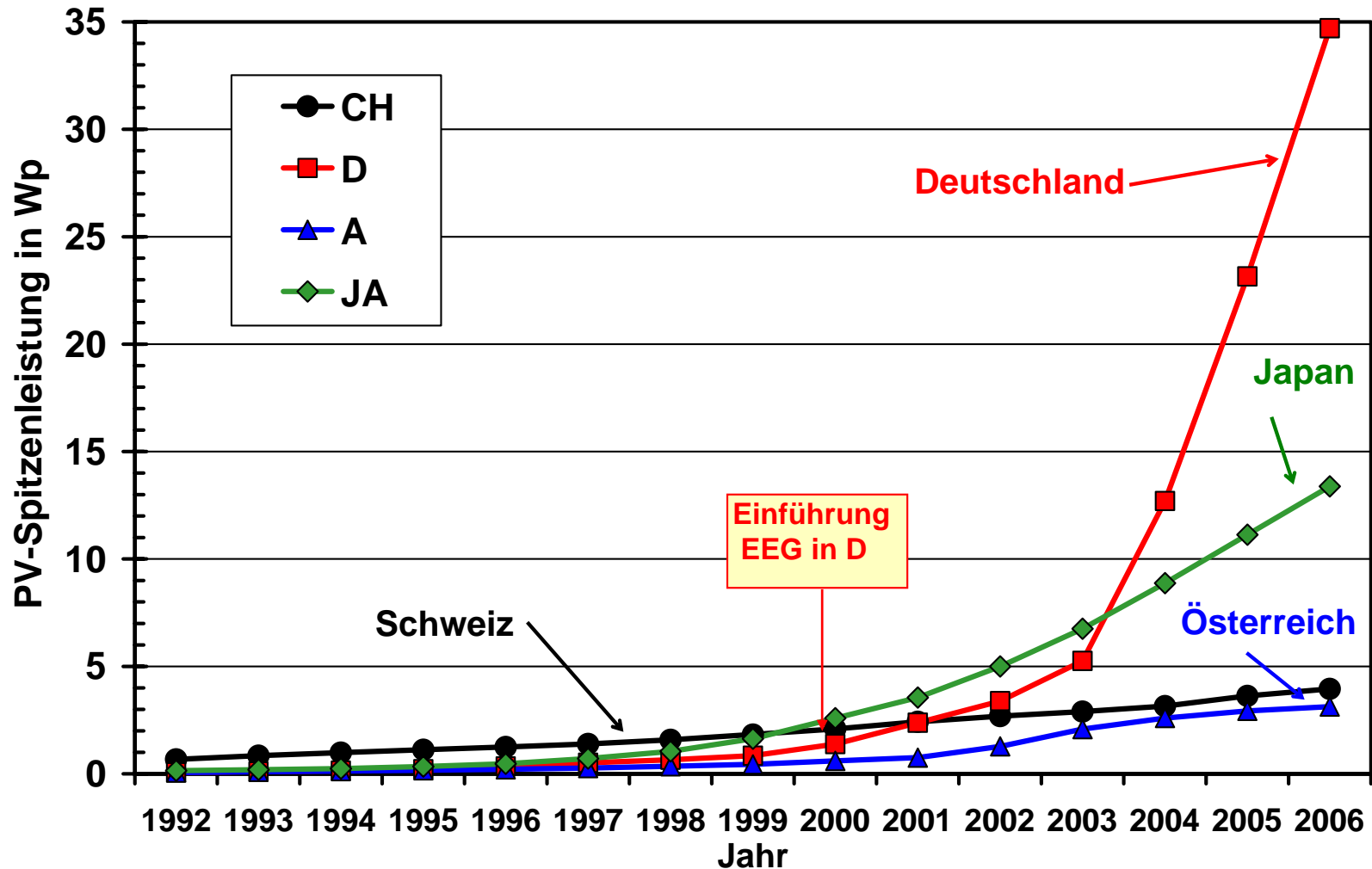
Gemessene Sonneneinstrahlung in Burgdorf in Horizontal-ebene (H) und in 45° geneigte Ebene in Südrichtung (H_{G45°). Anstieg um einige Prozent in 15 Jahren!

Spezifischer Energieertrag von PV-Anlagen in CH und D



**Sonneneinstrahlung in CH um einige Prozent höher als in D.
Warum sinkt denn der mittlere CH-Ertrag im Vergleich zu D?**

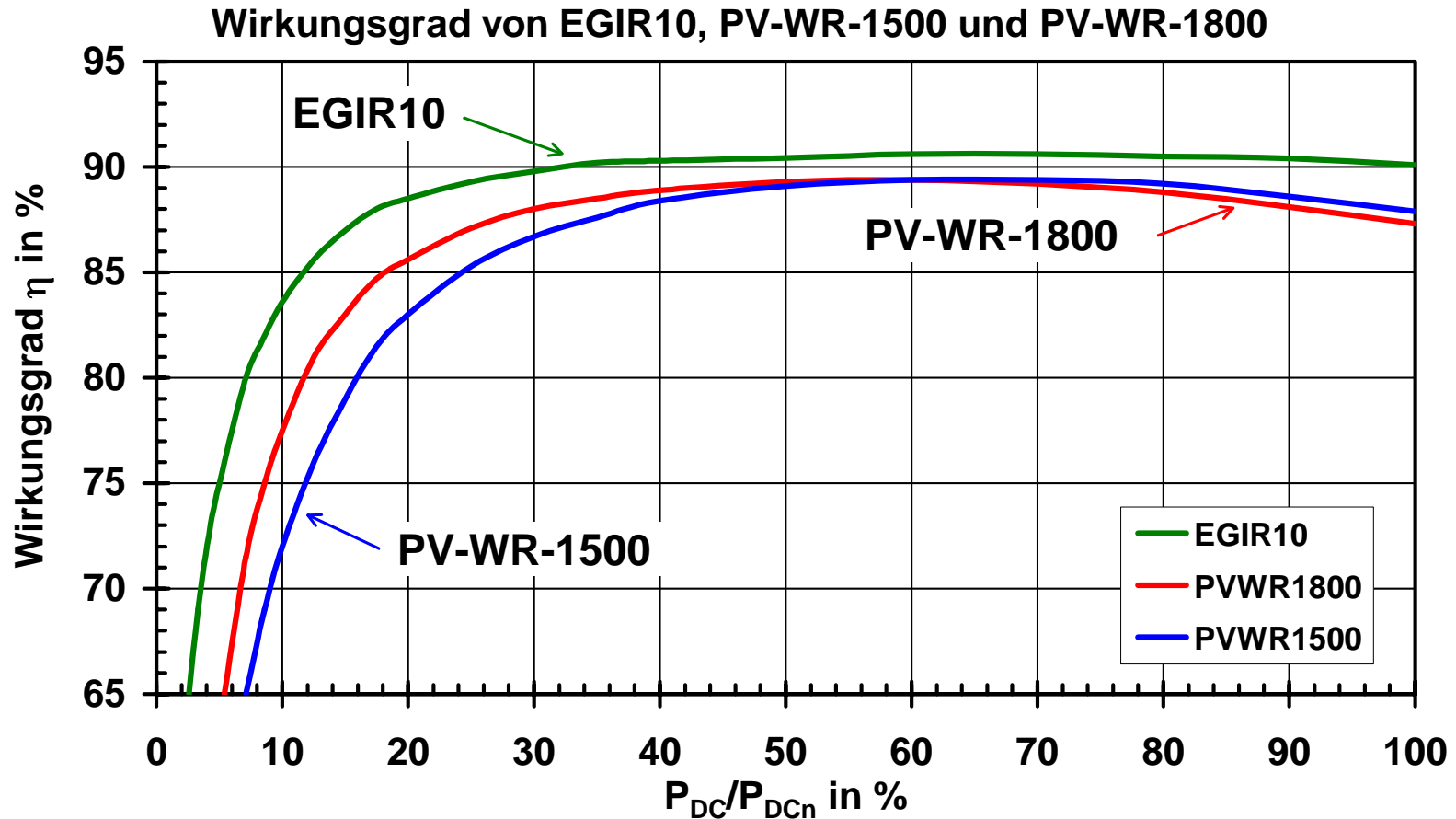
Installierte PV-Spitzenleistung pro Kopf in D, A, CH und JA



In D dank EEG viel mehr neue, technisch bessere Anlagen (höherer WR-Wirkungsgrad, P der Module näher an P_{Nenn}) !

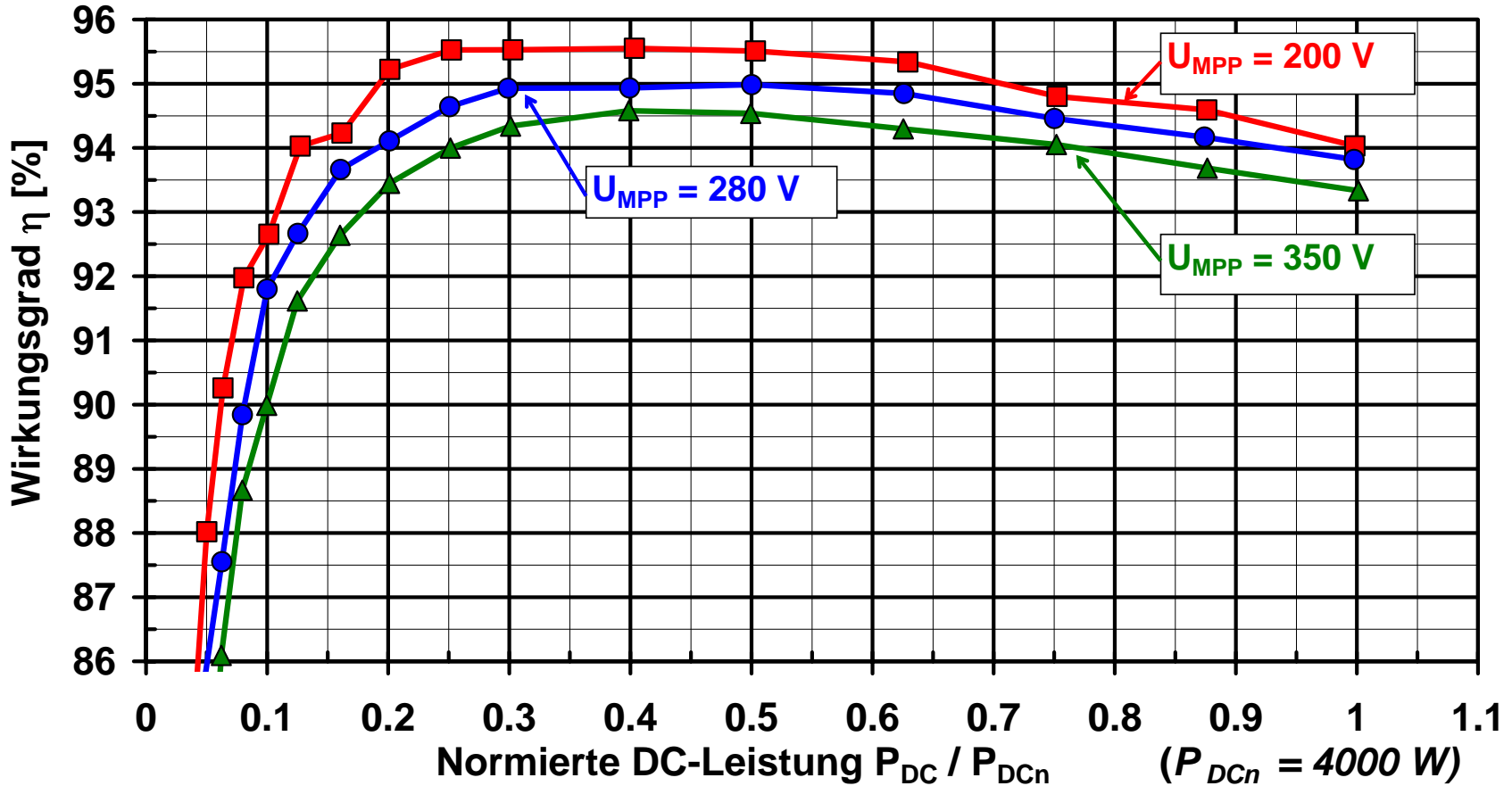
2. Technische Entwicklung bei Wechselrichtern

2.1 Umwandlungs-Wirkungsgrad



Wirkungsgrad von Wechselrichtern (mit Trafo) um 1990

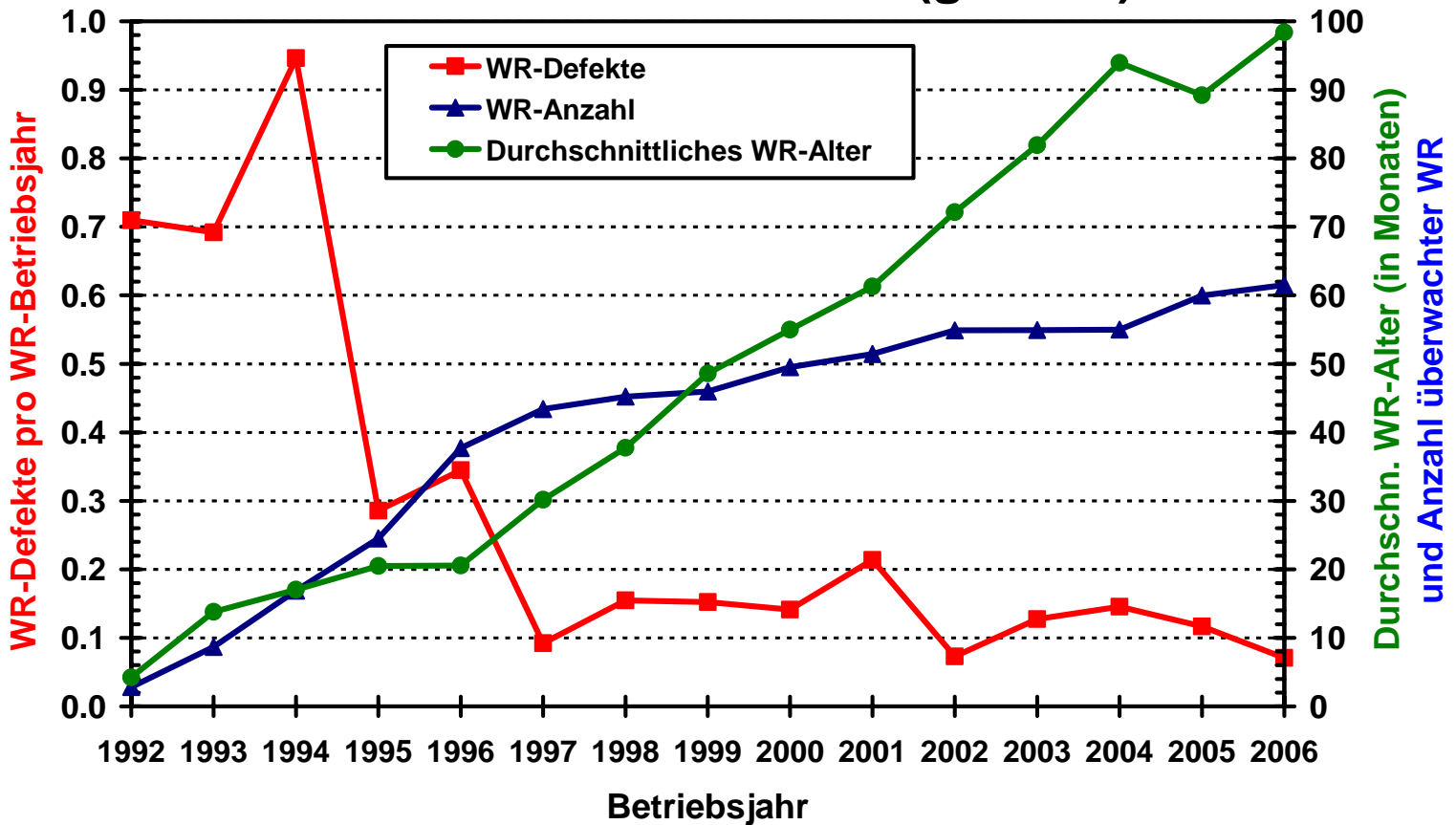
SunnyBoy 3800: Wirkungsgrad $\eta = f(P_{DC}/P_{DCn})$



Umwandlungs-Wirkungsgrad eines modernen Wechselrichters mit galvanischer Trennung.
Trafoleose Geräte erreichen noch etwa 2% höhere Werte.

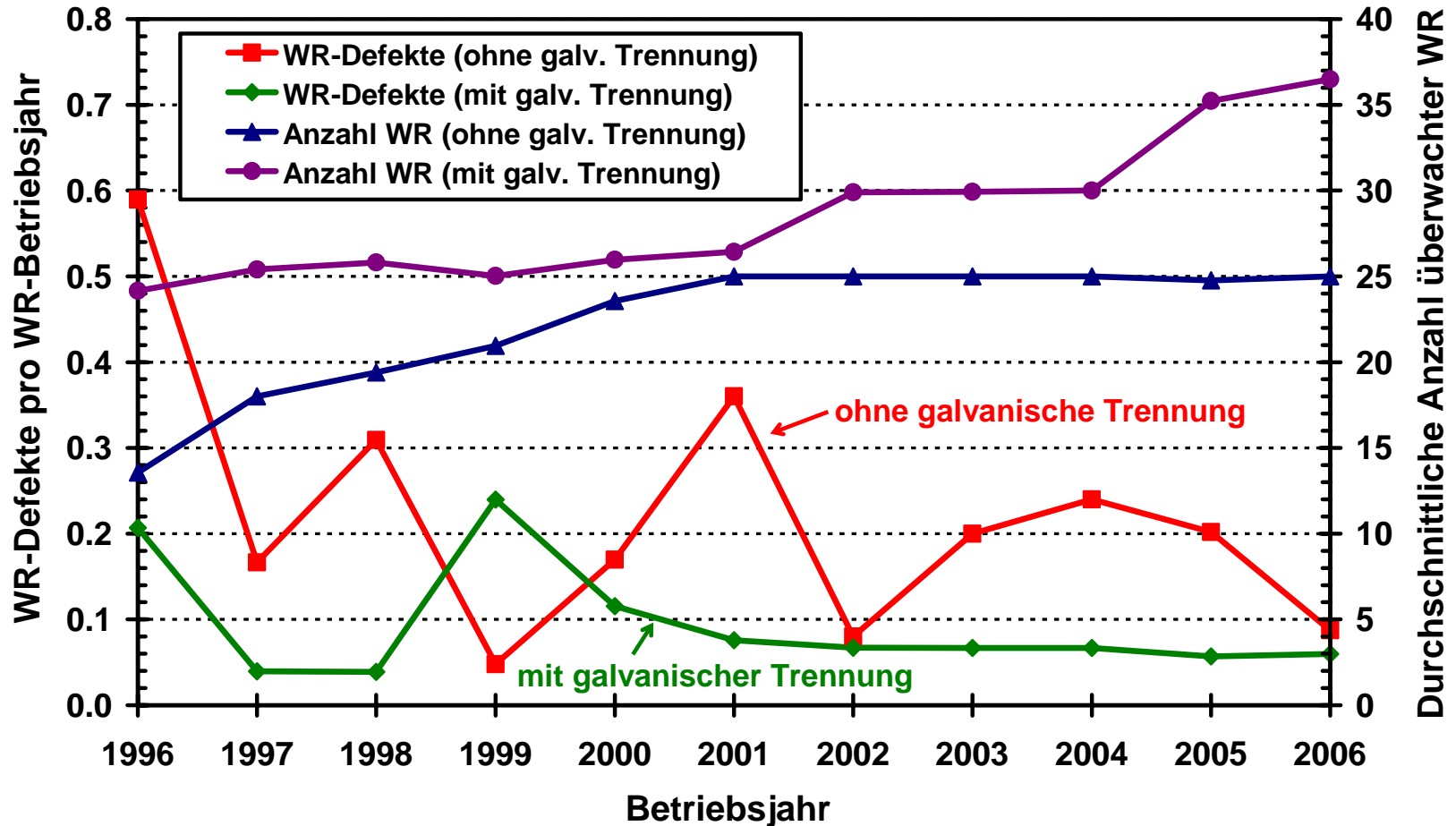
2.2 Wechselrichterzuverlässigkeit

Wechselrichter-Defekte (gesamt)

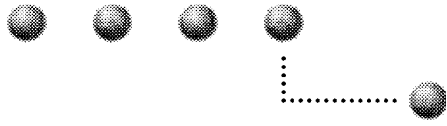


1989 - 1991 ca. 3 bis 4, 1992 – 1996 zwischen 0,3 und 1, seither um 0,1 Wechselrichter-Defekte pro Betriebsjahr

Wechselrichter-Defekte (aufgeteilt)



Gemäss Langzeitmessungen des PV-Labors meist etwas mehr Defekte Leistung bei traflosen Wechselrichtern.



2.3 Auswirkung von Defekten auf Energieproduktion

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

Bei einzelnen betroffenen Anlagen kann er in einzelnen Jahren durchaus im Bereich von 10 % liegen.

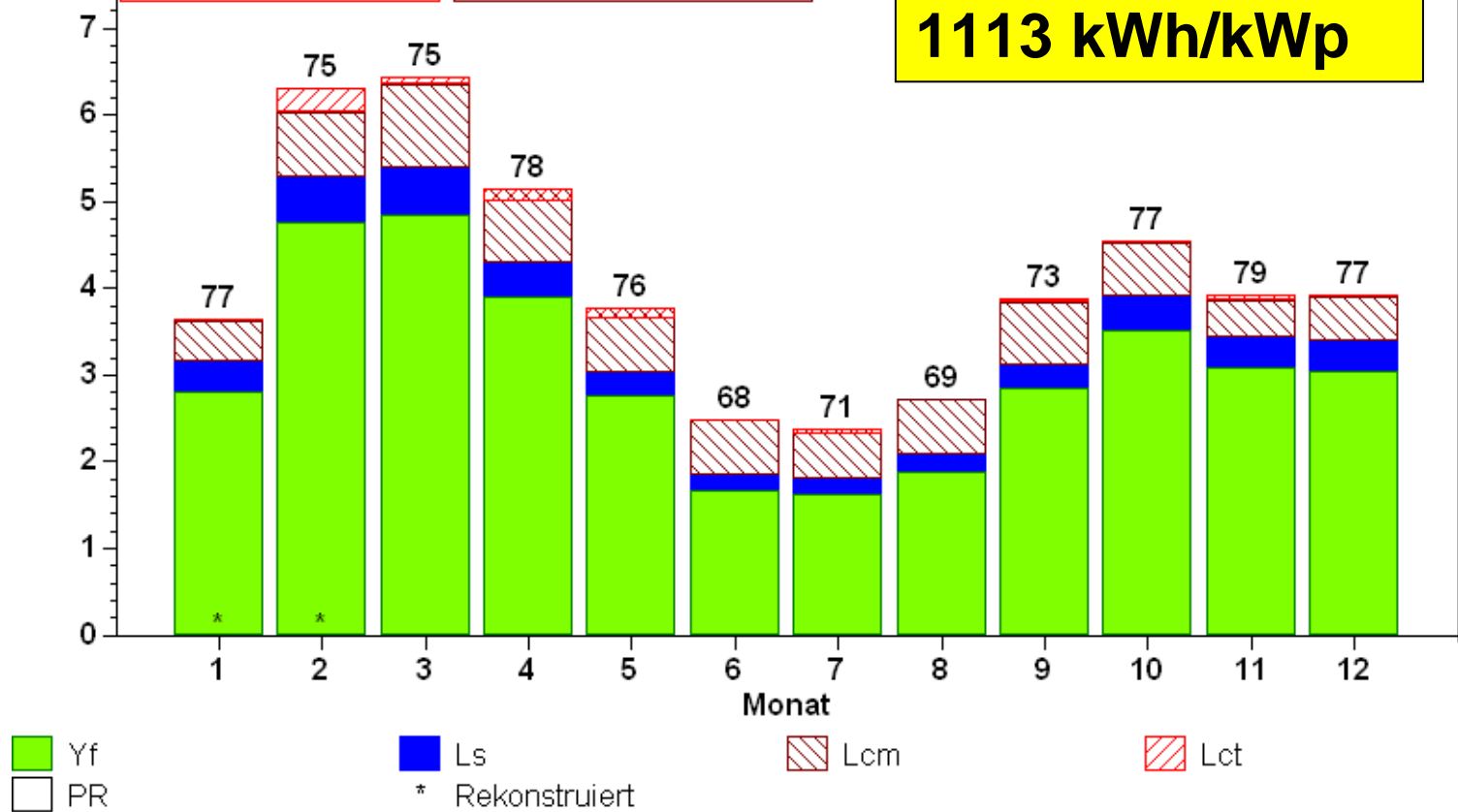
Normierte Jahresstatistik (Pyranometer)

Anlage: Birg Jahr: 2003

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

Yr = 4.05 kWh/d/kWp	Ya = 3.37 kWh/d/kWp *	kG = 83.6 % *	nl = 90.4 % *
Yt = 4.03 kWh/d/kWp	Yf = 3.05 kWh/d/kWp *	kT = 99.7 %	PR = 75.3 % *
Lct = 0.01 kWh/d/kWp	Lcm = 0.66 kWh/d/kWp *		

1113 kWh/kWp

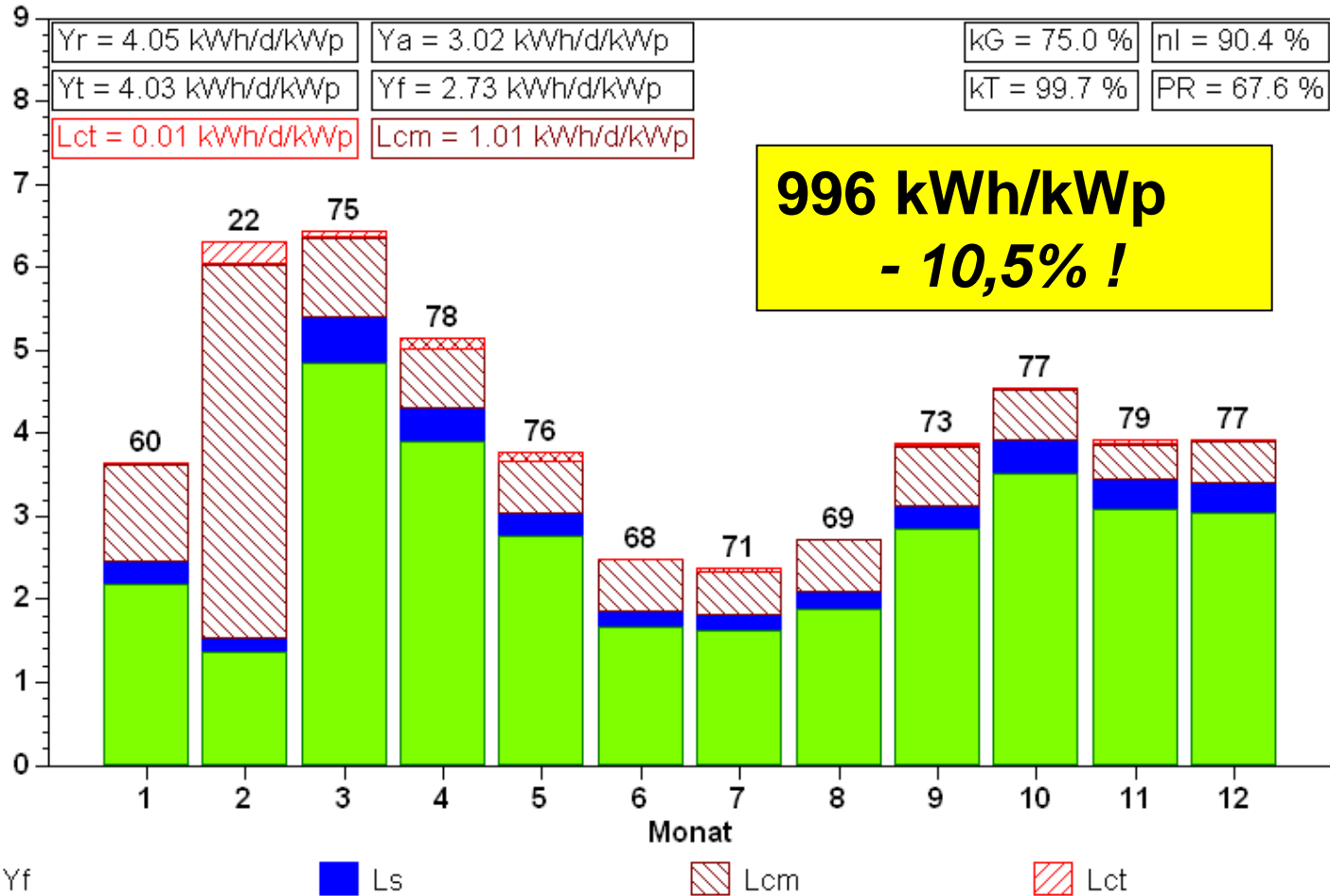


Normierte Jahresstatistik Anlage Birg 03 (ohne WR-Ausfall)

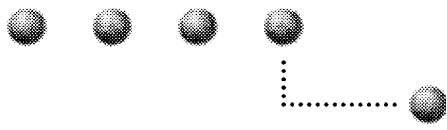
Normierte Jahresstatistik (Pyranometer)

Anlage: Birg Jahr: 2003

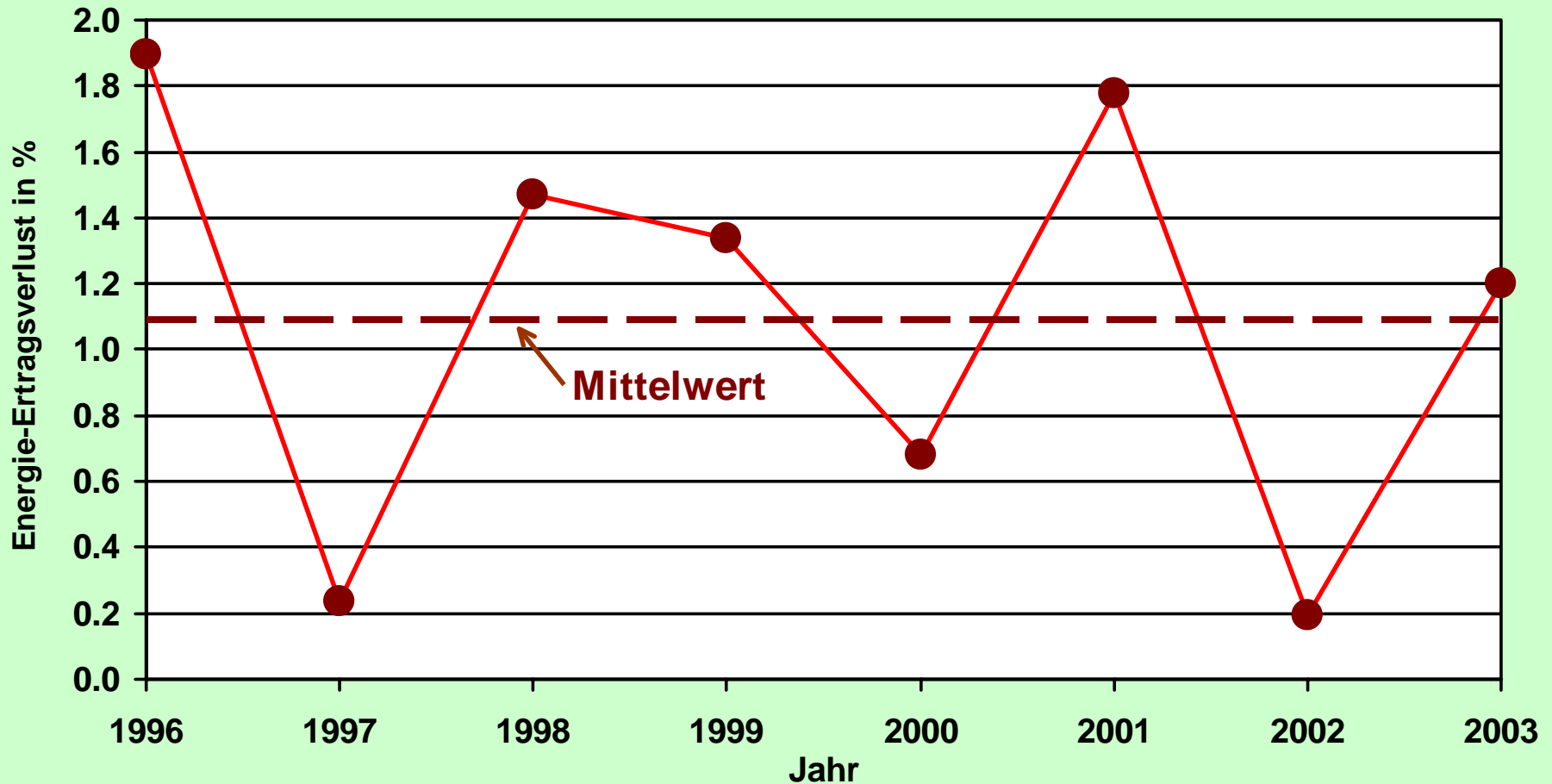
Yields & Losses [kWh/d/kWp] ($P_{gen}=4134Wp$)



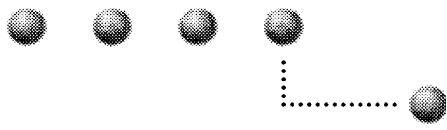
Normierte Jahresstatistik Anlage Birg 03 (WR-Ausfall Jan. / Feb.)



Ertragsverlust wegen Wechselrichterausfällen (PV-Anlagen in Burgdorf)



Der mittlere Ertragsausfall auf Grund von Wechselrichter-Defekten liegt dagegen deutlich tiefer und beträgt im Mehrjahresmittel ca. 1,1%.

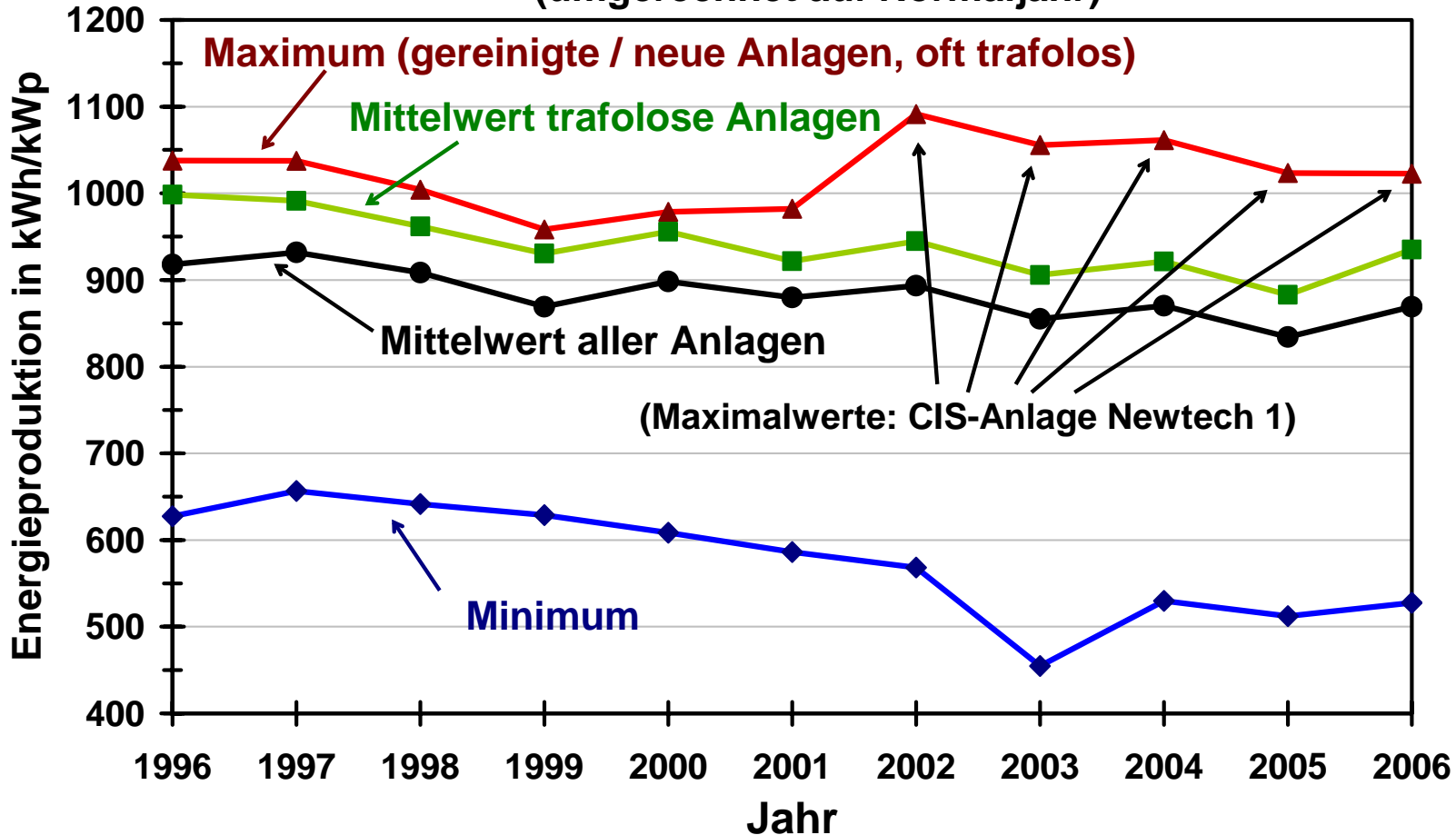


3. Energieertrag im Verlauf der Zeit

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 1kW_p (1 kW Spitzenleistung bei STC) umgerechnet.

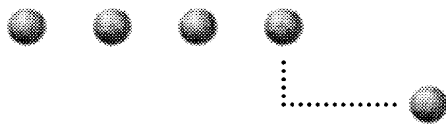
Entsprechend der von Jahr zu Jahr etwas schwankenden Einstrahlung variieren auch die registrierten Jahres-Energieerträge.

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



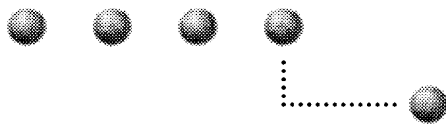
Etwas sinkender Trend infolge Verschmutzung und Alterung!

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



Die in einem Normaljahr tendenziell leicht sinkenden Energieerträge sind primär die Folge von anderen Einflüssen auf den Solargenerator:

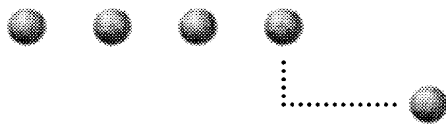
- **Verschmutzung**
- **Alterung**
- **Ausfall einzelner Stränge**
(z.B. Defekte von Strangdioden oder Strangsicherungen)
- **Defekte in Modulen und Generatoranschlusskästen**
- **Schneebedeckung**
- **Zunehmende Teilbeschattung durch wachsende Bäume**
(bei einzelnen Anlagen)



4. Langzeit-Probleme auf der DC-Seite

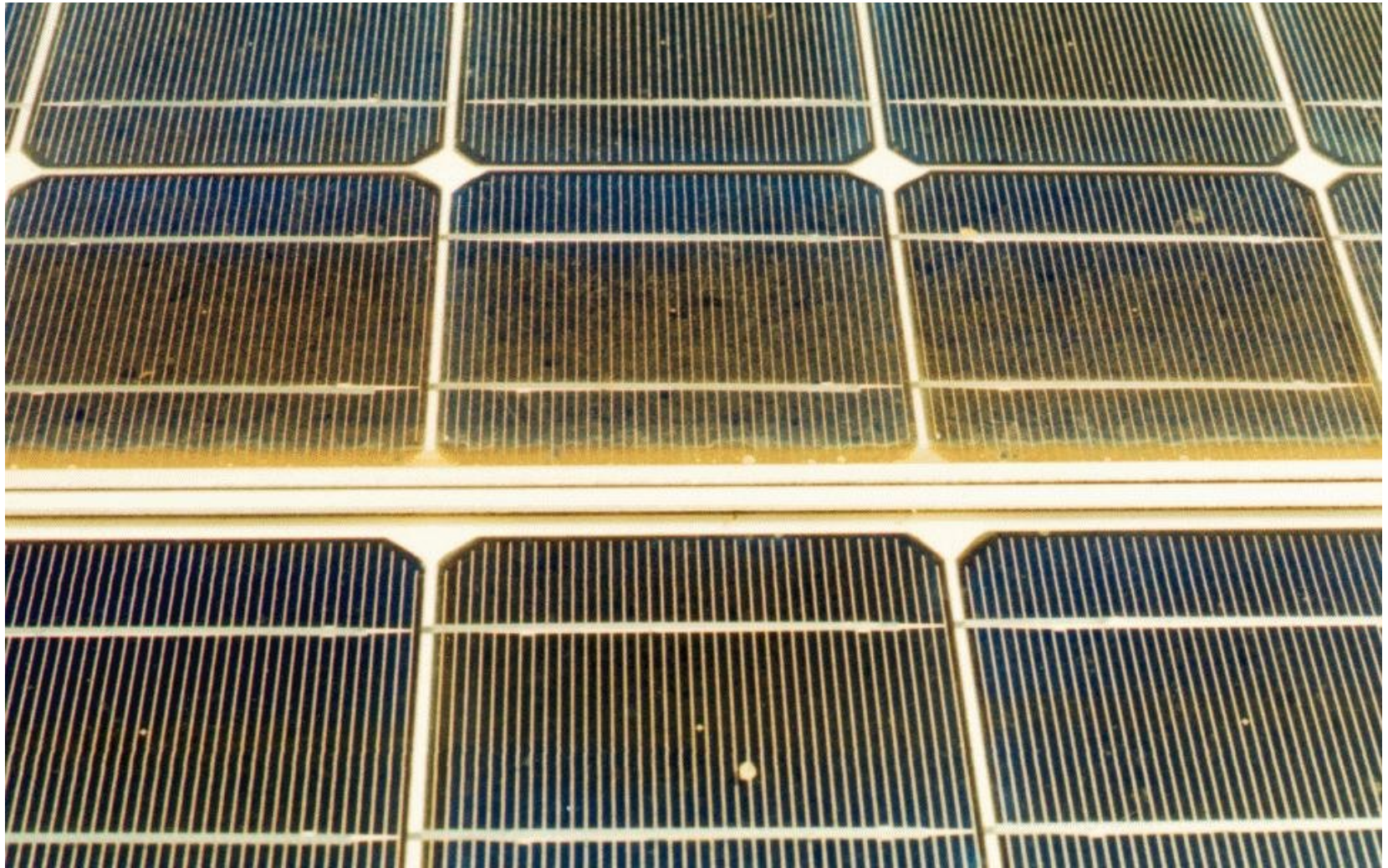
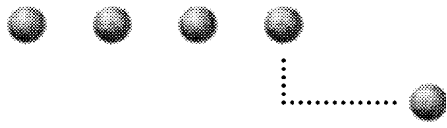
Nach der starken Verbesserung der Wechselrichterqualität gewinnt für einen hohen Energieertrag auch das Langzeitverhalten der DC-Seite an Bedeutung.

Zur Schaffung einer optimalen Ausgangslage für die unvermeidliche Langzeit-Degeneration ist die Verwendung möglichst eng tolerierter Module sehr wichtig (z.B. mit Minustoleranz 0% oder mit +/- 3% statt wie früher bis +/- 10% (und in der Praxis oft sogar etwas mehr)).



4.1 Verschmutzungs- und alterungsbedingte Ertragsabnahme beim 60kW-PV-Generator der BFH in Burgdorf

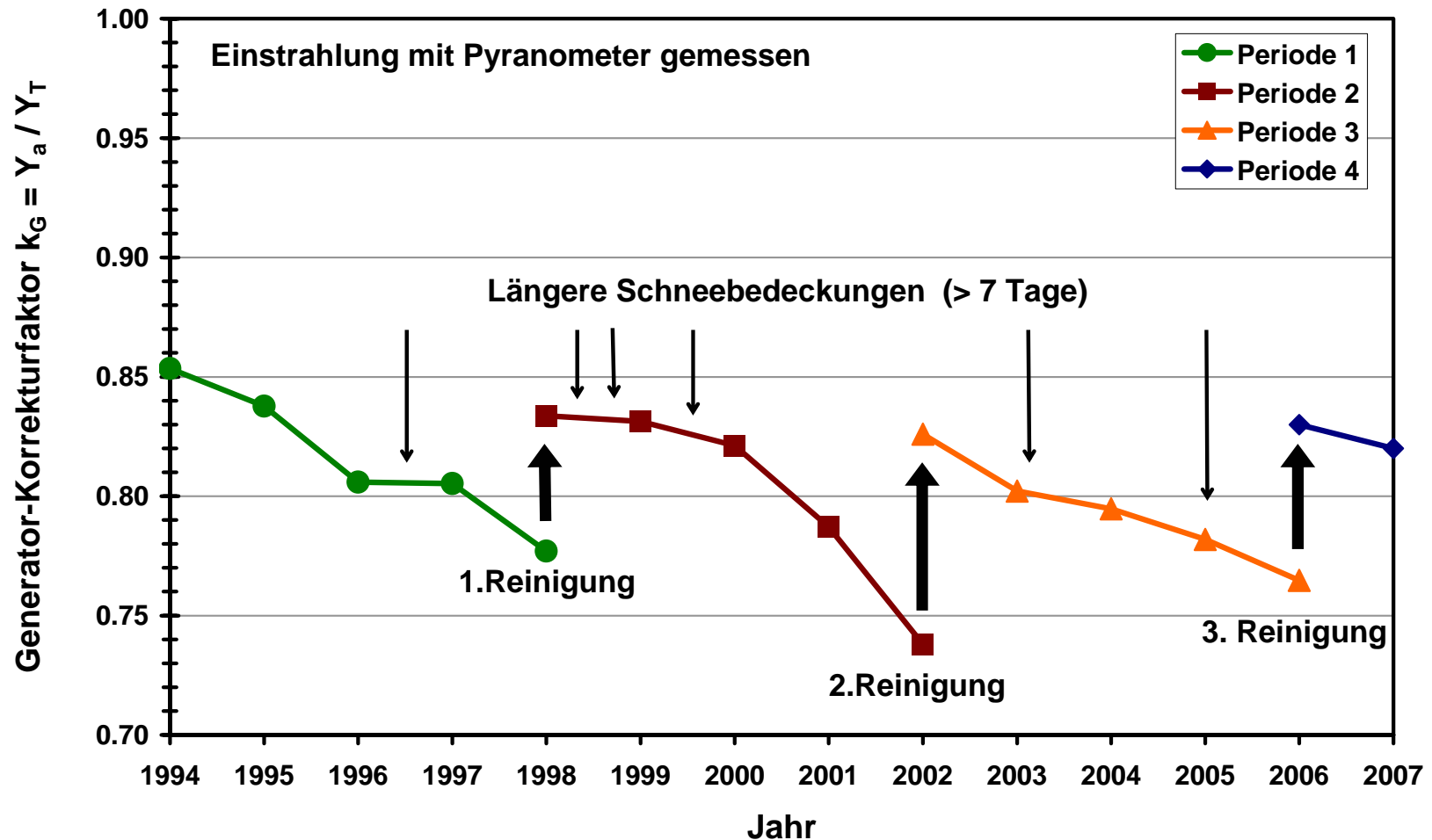
Seit 1994 betreibt das PV-Labor ein Testzentrum für PV-Anlagen mit einem PV-Generator (60 kWp, Anstellwinkel $\beta = 30^\circ$) auf dem Dach des Neubaus Elektrotechnik. Im Laufe der Zeit wurde die Entwicklung permanenter Verschmutzungstreifen am unteren Rand der verwendeten (gerahmten) PV-Module beobachtet,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



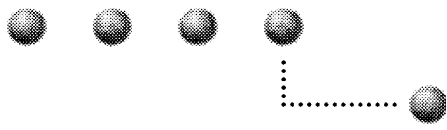
Detailansicht der Verschmutzung des PV-Generators nach einer längeren Trockenperiode kurz vor der Reinigung.

PV-Anlage Tiergarten West, BFH-TI, Burgdorf:

Verlauf des Generator-Korrekturfaktors im Sommer (April-September)



Verlauf von $k_G = Y_A / Y_T$ über 12 Jahre (sollte im Idealfall 1 sein):
Nach jeder Reinigung steigt der Generator-Korrekturfaktor k_G deutlich.

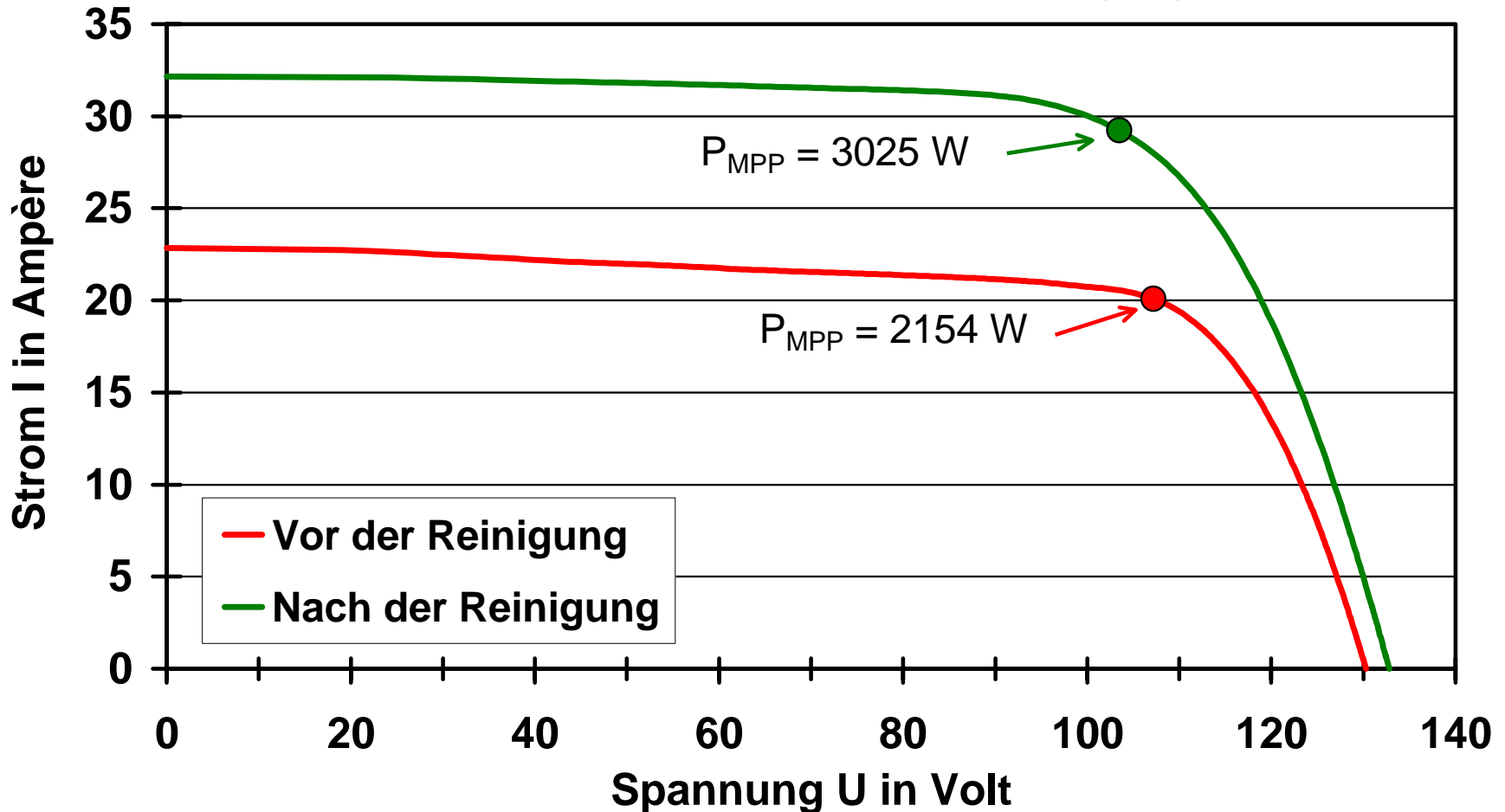


4.2 Verschmutzung bei Anlage Mc Donalds in Burgdorf

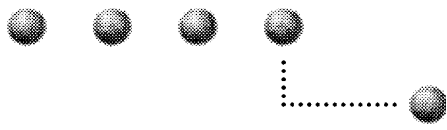


Sehr starke Verschmutzung auf ganzer Zellenfläche (nahe Kreuzung, Bahnlinie, Sägerei, fettige Küchenabluft)

Kennlinien (bei STC) vor und nach Reinigung



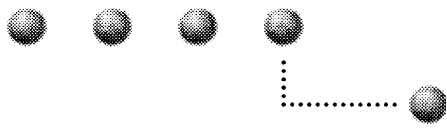
Auf STC umgerechnete I-U-Kennlinie der PV-Anlage Mc Donalds mit einer Nennleistung von 3,3 kWp vor und nach der Reinigung (Leistungsverlust -28,8% vor Reinigung).



4.3 Verschattung durch Bäume



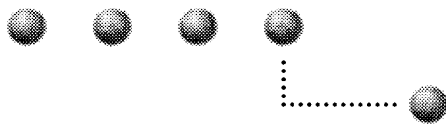
An verschiedenen Anlagen entsteht im Laufe der Jahre eine zunehmende Beschattung durch wachsende Bäume



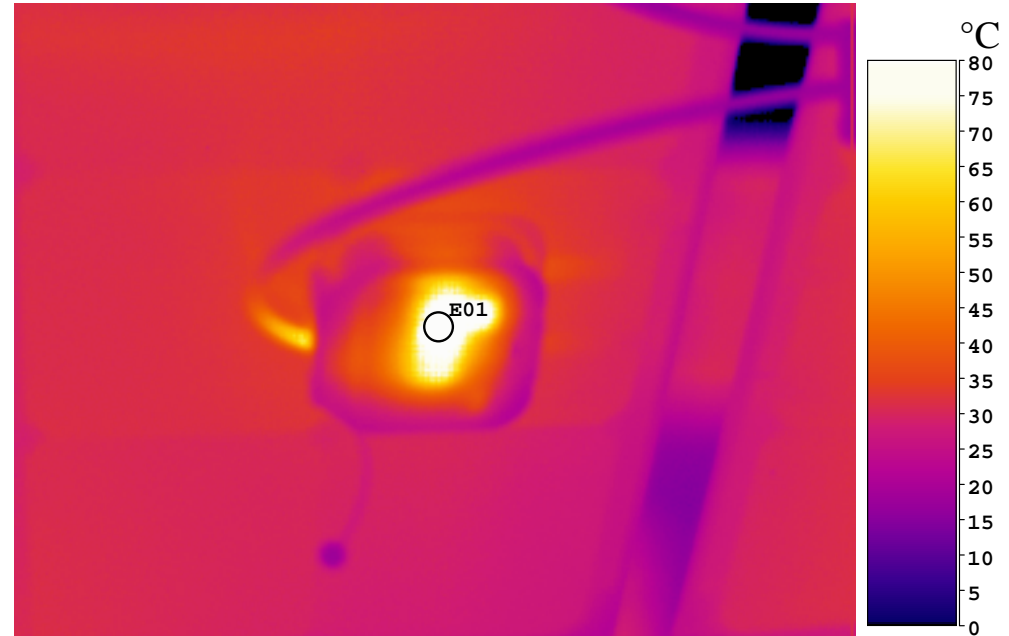
4.4 Lokale Zellenbeschattung durch Flechten auf Modulen



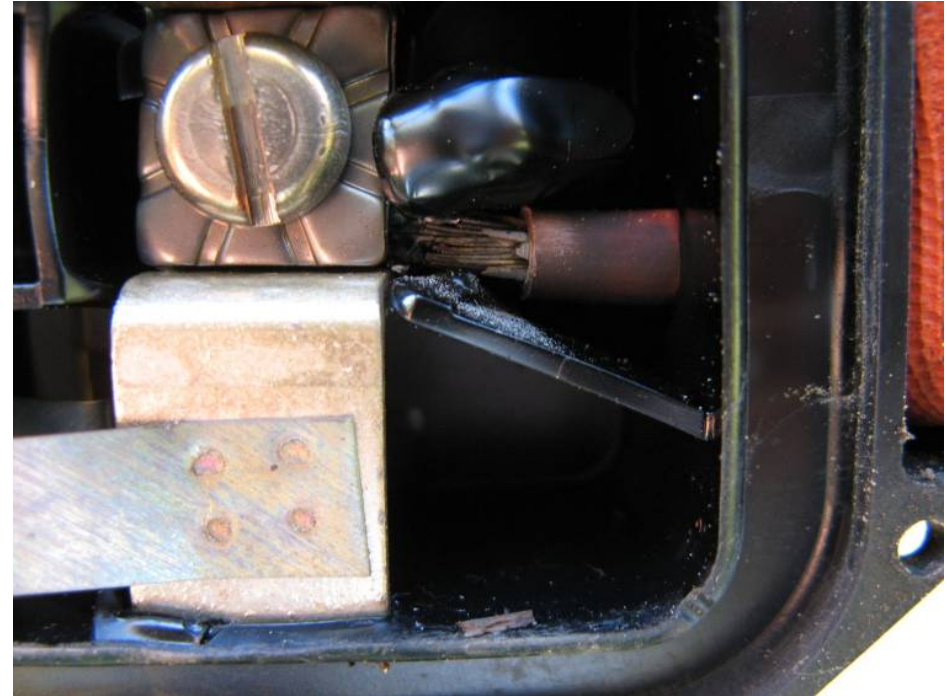
Im Laufe der Jahre entstehen an Modulrahmen oft Flechten, welche die Leistung des betroffenen Moduls deutlich reduzieren.



4.5 Schäden an Modulen



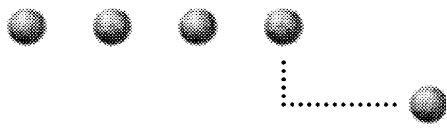
Geschmolzene Anschlussdose:
Schon bei geschlossener Anschlussdose beträgt die Temperatur am Punkt E01 über 80°C. Der Deckel ist durchgeschmolzen.



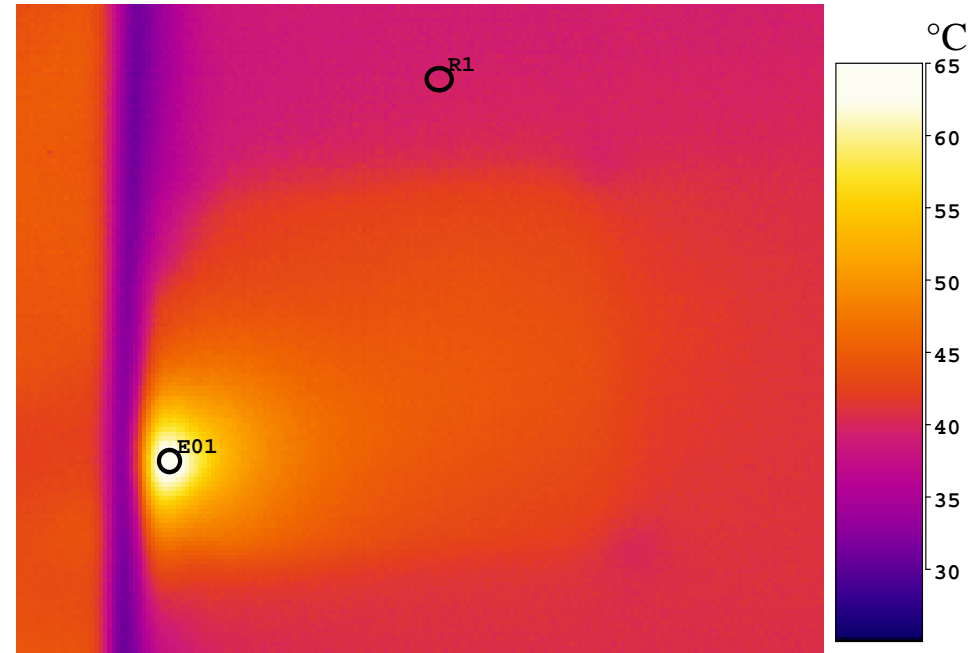
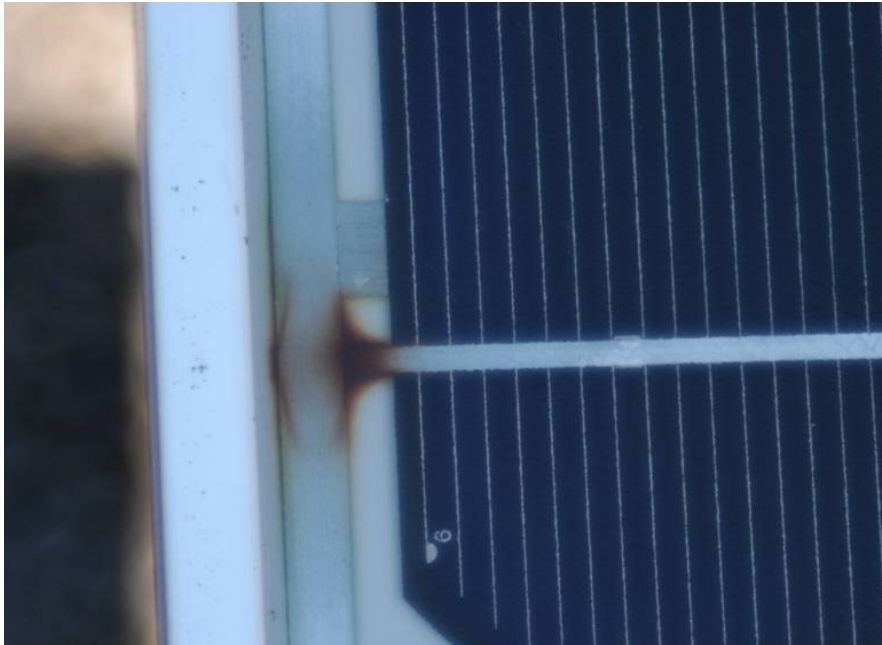
Grund für Temperaturerhöhung:

Links: Lockere Schraube der Klemme.

Rechts: Litzen des Anschlusskabels teilweise abgebrochen.

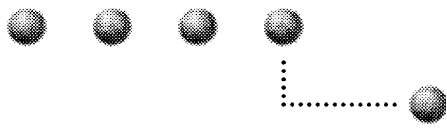


Überhitzte Stellen in Modulen: Ansicht von vorne

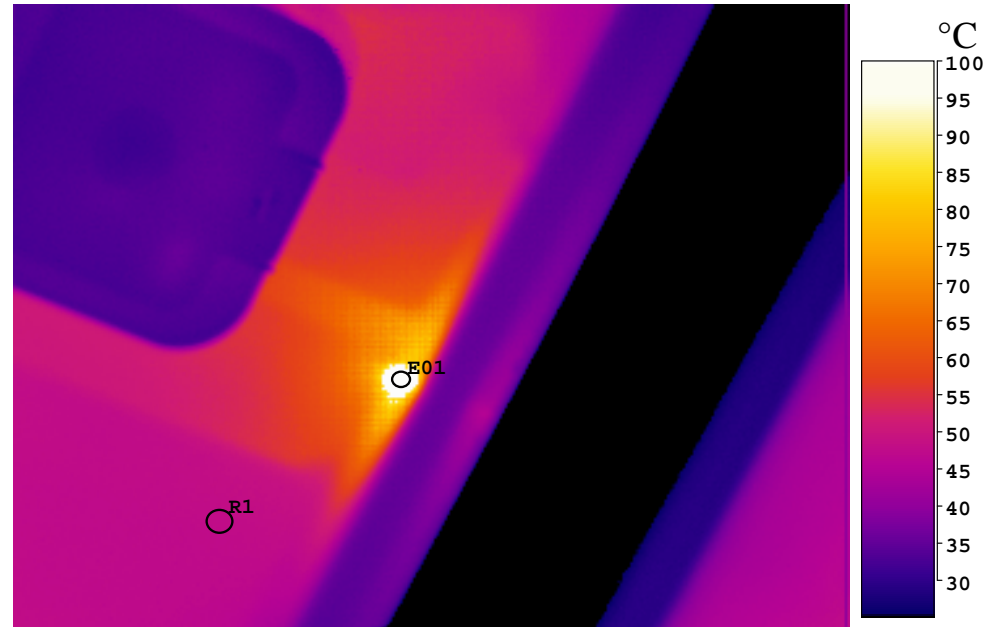


Stark erhitzter Kontaktstreifenübergang

Bei diesem Modul ist schon optisch feststellbar, dass der Übergangswiderstand der Kontaktstreifen zu gross ist und sich die Stelle stark erwärmt.

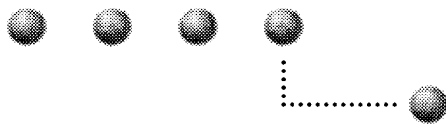


Überhitzte Stellen in Modulen: Ansicht von hinten

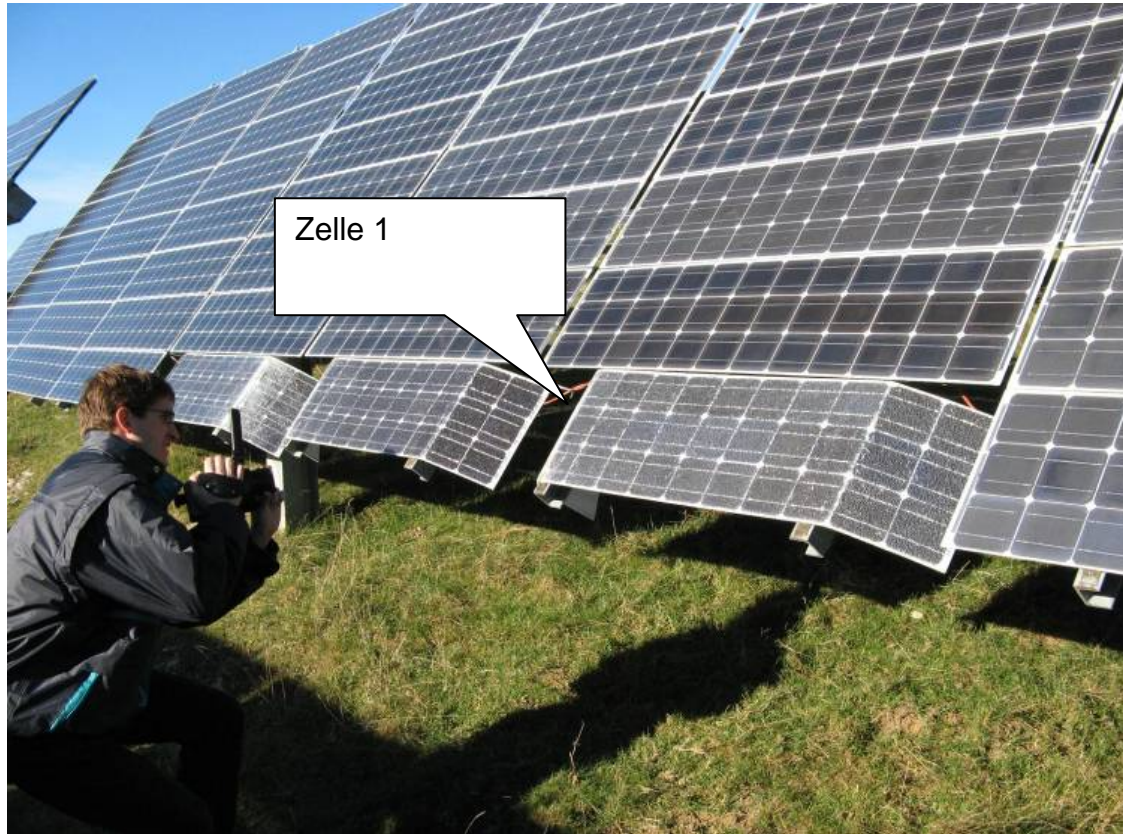


**Auf der Rückseite ist auch die Folie durchgeschmolzen.
Die Stelle erwärmt sich massiv (> 90°C!).**

**Bei manchen älteren Anlagen sind auf thermografischen
Aufnahmen des Solargenerators etliche solche heissen
Stellen zu finden, die längerfristig zu Schäden führen
dürften.**

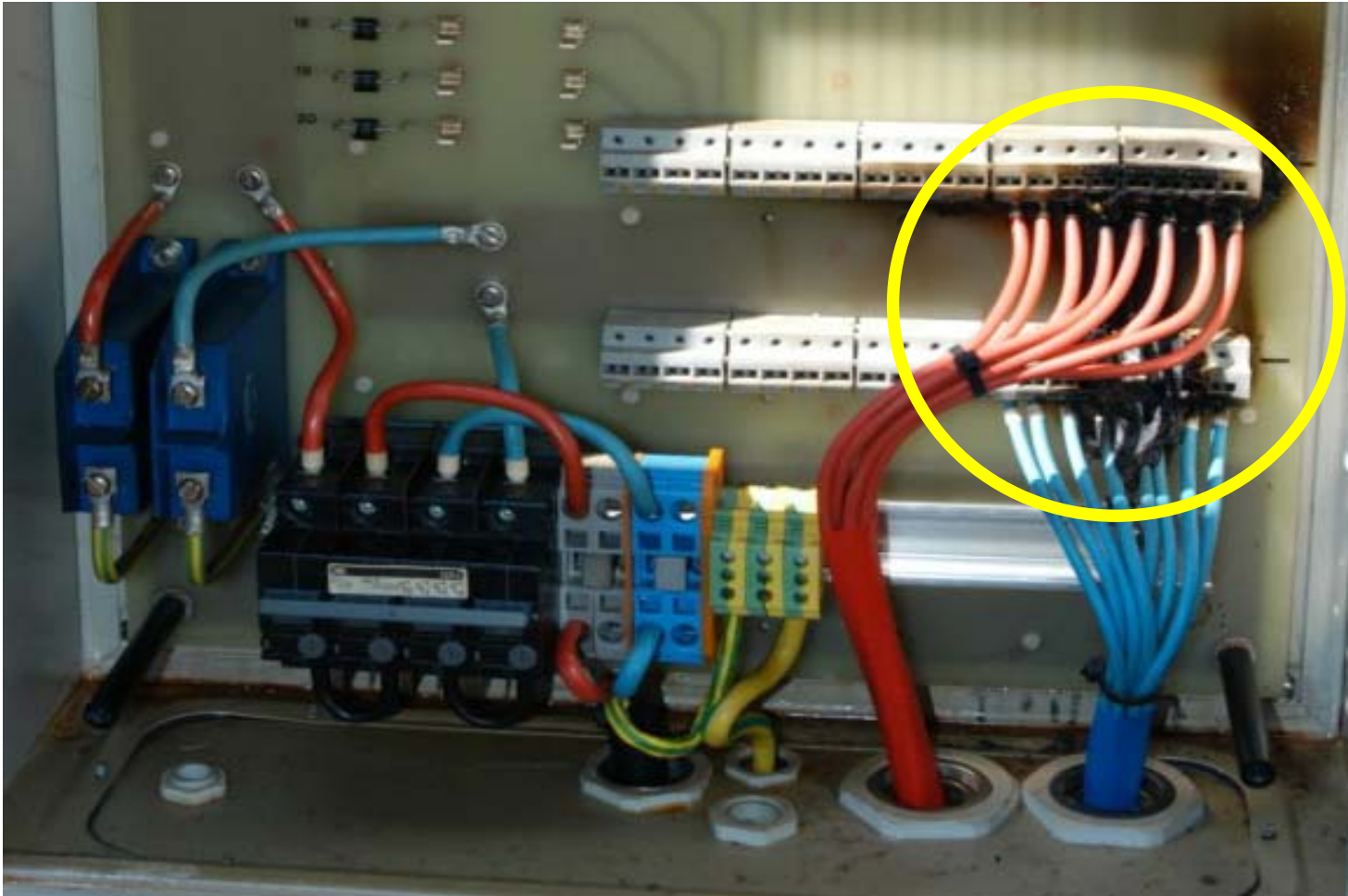


Mechanische Schäden an Modulen der Anlage Mt. Soleil



Bei mehr als einem Feld wurden gebrochene Module entdeckt. Wahrscheinlich wurden sie von Schneelasten im Winter abgeknickt. Bei einer abgeknickten Zelle konnte eine Erwärmung gemessen werden.

4.6 Schäden in Generatoranschlusskästen

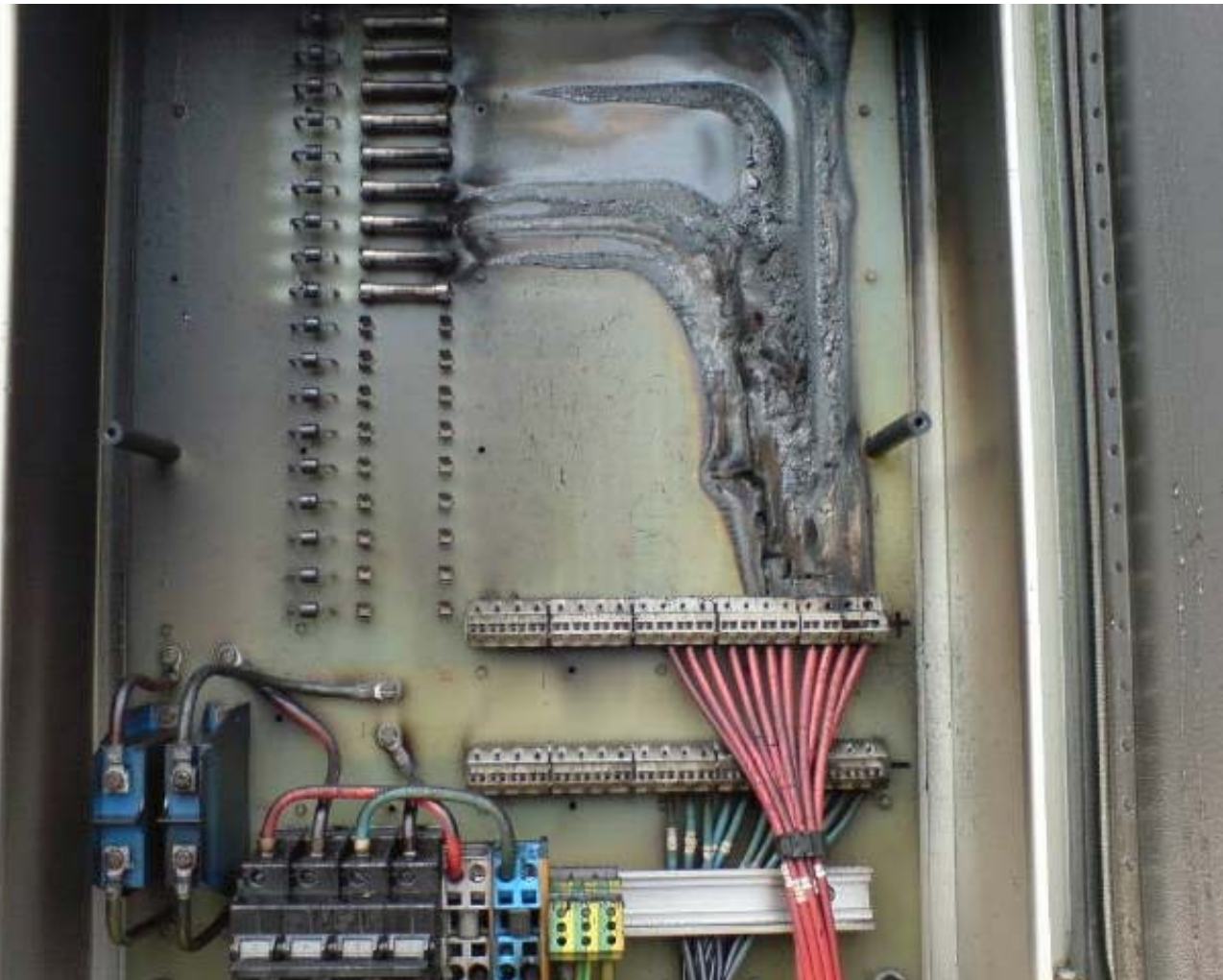


Schwelbrand im Generatoranschlusskasten einer 11 Jahre alten PV-Anlage von 15 kW mit U_{MPP} ca. 500V



Detailaufnahme des Brandherdes. Vermutlich hat sich eine Lötstelle im Laufe der Zeit überhitzt und ist dann während einer Strahlungsspitze unter Lichtbogenbildung durchgeschmolzen.

Weiterer, noch schlimmerer Brandfall:



Durch Serielichtbögen bereits verkohlte Leiterbahnen in Generatoranschlusskasten einer anderen, analogen Anlage mit 20kW (U_{MPP} ca. 500V) vor der Entwicklung des endgültigen, katastrophalen Brandes. Vor dem Öffnen des Schrankes war die Leistung bereits stark reduziert.

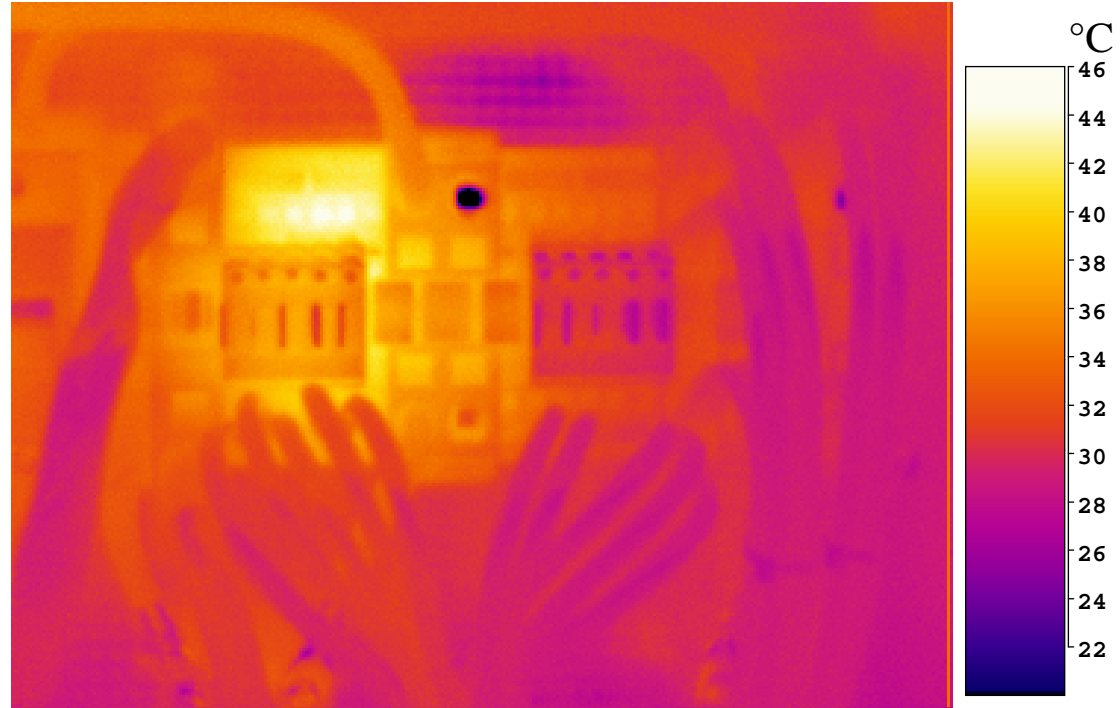
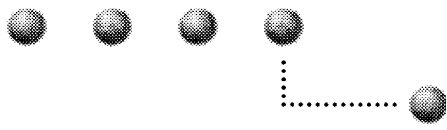
(Bild EBL)



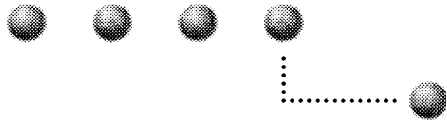
Kurz nach der ersten Aufnahme entwickelte sich nach dem Öffnen des Schrankes (Ermöglichung des Luftzutritts) ein starker Lichtbogen zwischen + und -, der sogar ein Loch in der Rückwand des Metallschranks schmolz. (Bild EBL)



**Durch den Brand im
Generatoranschlusskasten
verursachte Schäden an
der Aussenisolation des
Gebäudes, auf welche der
Kasten montiert war.
(Bild EBL)**

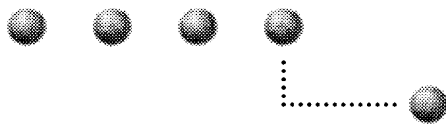


Auch bei einer 3kW-Anlage traten Schäden im Generator-Anschlusskasten auf (Unterbruch durch verschmorten Brückenstecker, danach Betrieb nur mit halber Leistung). Da U_{MPP} hier nur ca. 100V betrug, traten keine schwereren Schäden auf.



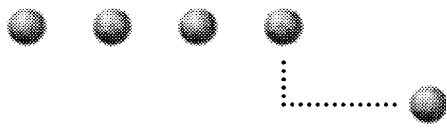
5. Zusammenfassung und Ausblick

- **Wirkungsgrad neuer Wechselrichter ist heute sehr viel besser als 1990 (nur noch wenige Prozent unter 100%).**
- **Relativ geringer Energieverlust durch Wechselrichter-ausfälle (z.B. 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.**
- **Das Interesse der Anlagebesitzer nimmt im Laufe der Zeit teilweise ab und ihre Anlagen "vergammeln" etwas.**



- **Nur wenige Prozent (z.B. gut 3% in 12 Jahren) des beobachteten Ertragsverlustes wegen Modul-Degradation. Somit ist die Annahme berechtigt, dass der PV-Generator eine Lebensdauer von 20 – 30 Jahren erreichen wird.**
- **Wechselrichter fallen typischerweise nach 5 - 10 Jahren erstmals aus. Bei kleinen Wechselrichtern ist oft nach 10 - 15 Jahren ein Totalersatz nötig.**
- **Auch an den übrigen Komponenten auf der DC-Seite können Langzeitschäden auftreten.**
- **Gut geplante neue Anlagen mit modernen Modulen und Wechselrichtern sollten in der Schweiz verbreitet Jahreserträge um 1000 kWh/kW_p erreichen.**

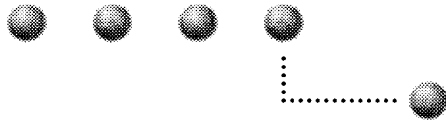
**Weitere Informationen und zahlreiche Publikationen:
www.pvtest.ch.**



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 März 2007 wurden im Rahmen dreier 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, Herrn S. Oberli, Herrn Ch. Beutler, Herrn Ch. Renken und Herrn Ch. Geissbühler, welche nacheinander die nun seit 1992 dauernden Langzeit-Messprojekte betreut haben. Seit Anfang 2007 hat Herr M. Kämpfer die Hauptverantwortung für diese Messungen übernommen.



ENDE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ich stehe Ihnen nun gerne für
allfällige Fragen zur Verfügung

www.pvtest.ch