**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:** 88 (1997)

**Heft:** 10

**Artikel:** Solarzellenanlage mit Direktkopplung an ein Gleichstromnetz

**Autor:** Keller, Max / Minder, Rudolf

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-902200

**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:** 09.12.2025

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

Das Betriebsverhalten von Solarzellenanlagen, die mit dem 50-Hz-Netz gekoppelt sind, ist heute gut bekannt und wird auch laufend weiter untersucht. Im Gegensatz dazu sind nur wenig Kenntnisse über photovoltaische Gleichstromsysteme vorhanden. Das 80-kW-Solarzellenkraftwerk «Park+Ride Neufeld», seit Anfang 1993 in Betrieb, ist das weltweit erste grössere Photovoltaiksystem, das direkt galvanisch mit dem Fahrleitungsnetz eines Verkehrsbetriebes gekoppelt ist. Diese Anlage bietet deshalb eine einzigartige Gelegenheit, das Verhalten solcher Systeme zu untersuchen.

# Solarzellenanlage mit Direktkopplung an ein Gleichstromnetz

**Adresse der Autoren**
*Max Keller*
dipl. Bauing. ETH, M.Sc. mech. eng. CSU
Electrowatt Engineering AG, 8034 Zürich

Dr. *Rudolf Minder*
Minder Energy Consulting
8917 Oberlunkhofen

■ Max Keller und Rudolf Minder

## Einleitung und Zielsetzung

Das Projekt «Park+Ride Neufeld» basiert auf den Erfahrungen aus dem Betrieb einer 2-kW-Pilotanlage auf dem Dach der Gewerblich-Industriellen Berufsschule Bern. Die direkte Einspeisung photovoltaisch erzeugter Elektrizität in ein Gleichstromnetz stellte damals eine völlig neue Anwendung dar, und es waren keine Erfahrungen mit einseitig geerdeten Systemen mit hohen Spannungen von bis zu 1000 V vorhanden. Diese Versuchsanlage wurde während einiger Zeit mit Erfolg betrieben und ausgemessen.

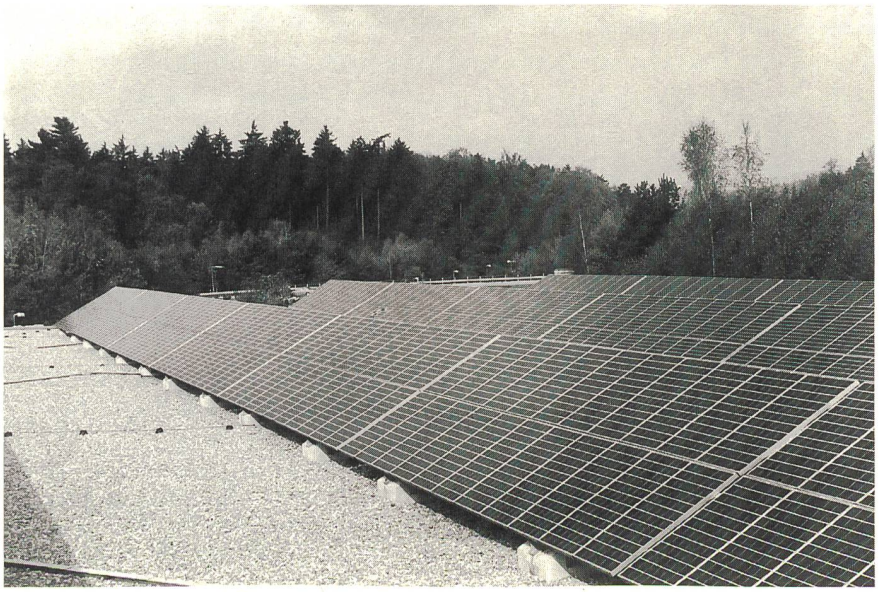

Bild 1 Dachgeschoss «Park+Ride» mit Solarzellenanlage.

Aufgrund der ermutigenden Resultate beschloss das Elektrizitätswerk der Stadt Bern (EWB) ein Solarkraftwerk mit einer Nennleistung von 80 kW zu erstellen. Die vom EWB betriebene Anlage speist den Solarstrom direkt in das Fahrleitungsnetz der städtischen Verkehrsbetriebe ein. Auf die Zwischenschaltung eines DC/DC-Wandlers mit Lastanpassung («Maximum Power Point Tracking», MPPT) wurde aufgrund des Versuchs mit der 2-kW-Pilotanlage verzichtet. Die damalige grobe Auswertung zeigte, dass der zeitweise Betrieb des Solargenerators ausserhalb des optimalen Arbeitspunktes weniger Verluste verursachte als ein Gleichstromimpedanzwandler.

Ein wichtiges Ziel des hier beschriebenen Projekts war es, mit Messungen und Computersimulationen diese Aussage für die am Ende einer Trolleybuslinie gelegene «Park+Ride»-Anlage Neufeld zu überprüfen. Einerseits treten an diesem Standort, bedingt durch den Busbetrieb und die relativ lange Fahrleitung, grosse Spannungs- und Belastungsschwankungen auf, andererseits liegt die Leistung der Anlage in der Grössenordnung der Leistung eines Trolleybus, so dass sich andere Verhältnisse ergeben als bei der 2-kW-Pilotanlage. Damit sollten auch generelle Aussagen über die Möglichkeiten und Probleme von Photovoltaikanlagen mit DC-Direkteinspeisung gemacht werden können.

Ein weiteres Ziel der Arbeiten war die Ermittlung des Potentials solcher Anlagen in der Schweiz, wobei nicht nur Einspeisungen in Fahrleitungsnetze, sondern auch andere Gleichstromsysteme zu berücksichtigen waren.

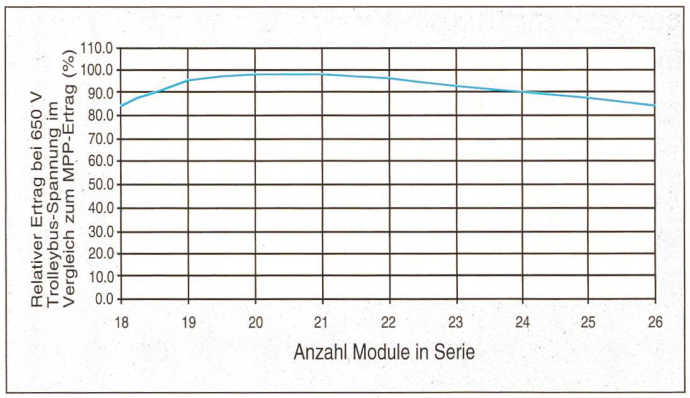


**Bild 2** Relativer Ertrag in Funktion der Anzahl Module (berechnete Werte).

| | |
|---|---|
| **Standort** | «Park+Ride» Neufeld |
| X-Koordinate | 600,1 km |
| Y-Koordinate | 199,7 km |
| Meereshöhe | 560 m ü. M. |
| Einstrahlung in Modulebene | 1168 kWh/m² a |
| **Solargenerator** | |
| Solarmodulfläche | 690 m² |
| Anstellwinkel | 30° |
| Azimutabweichung | 28° nach Westen |
| Modultyp | polykristallin |
| Modulhersteller | Kyocera, Japan |
| Module in Serie | 22 |
| Module in Parallel | 38 |
| Betriebsspannung | 650 V |
| Leerlaufspannung | 1000 V |
| Spitzenleistung Solarzellenfeld (STC) | 79,4 kW |
| Jahresertrag | 80 000 kWh |
| **Netzeinspeisung** | Direkte galvanische Kopplung mit dem SVB-Netz |
| **Bauherr** | Elektrizitätswerk der Stadt Bern |
| **SVB-Netz** | |
| Leistung Trolleybus Nr. 62–66 | 152 kW |
| Niederflurtram | 306 kW |

**Tabelle 1** Technische Daten der Solarzellenanlage «Park+Ride.»

## Anlagebeschreibung

Die Photovoltaikanlage befindet sich am nördlichen Stadtrand von Bern auf dem obersten Parkdeck der «Park+Ride»-Anlage Neufeld auf 560 m ü.M. (Bild 1).

Für die Solarzellenanlage steht eine Fläche von rund 2500 m² zur Verfügung, die zur Montage von 690 m² Solarzellen genutzt wird. Das «Park+Ride»-Gebäude ist nicht exakt nach Süden orientiert, sondern weist eine Azimutabweichung von 28° nach Westen auf. Um die Anlage möglichst gut ins Gebäude zu integrieren, wurden die Solarmodule parallel zur Gebäudeflucht ausgerichtet, was im Vergleich zu einer exakten Südausrichtung eine kleine Ertragseinbusse ergibt.

Weitere geringe Verluste entstehen auch durch die gegenseitige Beschattung der Module (Beschattungswinkel 12°) und im Winter durch Schatten von Bäumen. Trotz solcher in der Praxis meist vorhandener Einschränkungen kann der gewählte Standort als gut bezeichnet werden.

### Photovoltaikgenerator

Die Solarmodule sind in sechs Reihen angeordnet und unter einem Winkel von 30° aufgeständert. Für einen Mittelland-Standort ist dieser Anstellwinkel optimal. Die Module sind auf einer leichten feuerverzinkten Stahlkonstruktion befestigt, die ihrerseits von vorfabrizierten Betonelementen getragen wird. Diese Montageart nach dem Prinzip der Schwergewichtsfundation trägt allen statischen und Winddruckansprüchen Rechnung und erlaubt bei kleinstem Montageaufwand eine Aufstellung ohne Verletzung der Dachhaut.

Die ganze Anlage besteht aus 38 Tragkonstruktionen (Tischen), auf denen insgesamt 836 Solarmodule montiert sind. Jede Tragkonstruktion hat den gleichen Aufbau und enthält 22 Module, die in Serie verdrahtet sind.

Die Serieschaltung von 22 Modulen war das Ergebnis von Optimierungsrechnungen für die Betriebsspannung des Trolleybusnetzes von nominell 650 VDC. Bild 2 zeigt den Einfluss der Anzahl in Serie geschalteter Module auf den Ertrag.

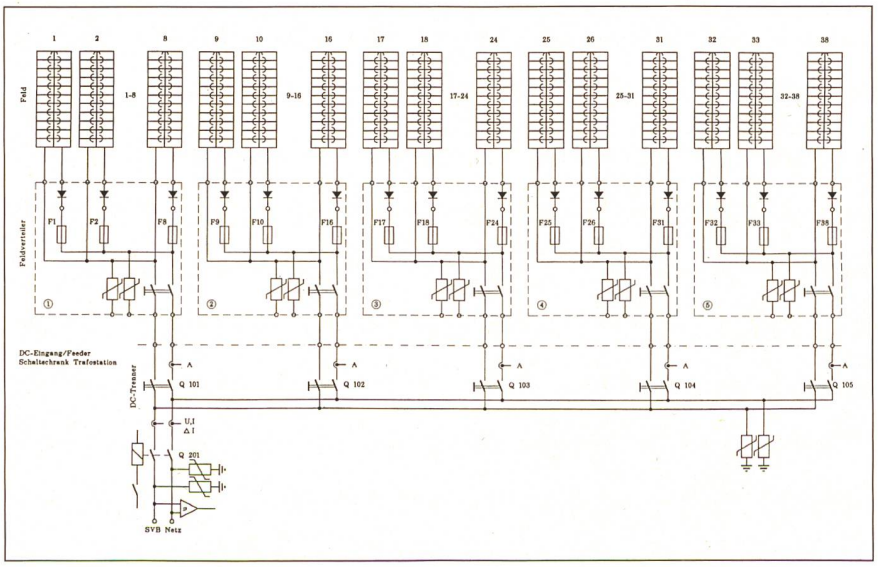


**Bild 3** Elektrisches Prinzipschema der Solarzellenanlage.

Wie Bild 3 zeigt, besteht das Solarkraftwerk aus 38 parallelen Strängen. Jeweils acht bzw. sieben solcher Stränge sind zu einem Feld zusammengefasst, und das ganze Solarzellenfeld somit elektrisch in fünf parallel geschaltete Teilfelder unterteilt.

Die einzelnen Stränge sind mit den Feldverteilern verbunden, wo Blockdioden, Schmelzsicherungen und Überspannungsableiter untergebracht sind. Neben diesen Elementen enthalten die Feldverteiler auch DC-Schalter zum Abtrennen einzelner Felder für Versuchszwecke oder im Störungsfall.

Alle Teilfelder speisen auf eine gemeinsame Gleichstrom-Sammelschiene, von wo aus die Kopplung mit dem SVB-Trolleybusnetz über einen Gleichstromschütz (Feeder), der durch das Leitsystem angesteuert wird, erfolgt.

Die Anlage kann sowohl lokal ab der Schaltzentrale Neufeld wie auch von der 3,5 km entfernten Leitstelle Monbijou des Elektrizitätswerks der Stadt Bern (EWB) aus überwacht und bedient wer-

| Monat 1995 | Verlust $L_{ct}$ (%) | Verlust $L_{cr}$ (%) | Verlust $L_{cmpp}$ (%) | Verlust $L_{cmdiv}$ (%) |
|---|---|---|---|---|
| Sommer | 5,2 | 1,3 | 1,8 | 5,7 |
| Herbst | 3,1 | 1,2 | 2,4 | 6,3 |
| Winter | –7,2 | 0,5 | 8,4 | 25,8 |

**Tabelle II Verluste im Sommer-, Herbst- und Winterbetrieb.**

den. Für die Anlagesteuerung, die Anzeige der Meteorologie- und Betriebsdaten sowie für die Überwachung der gesamten Anlage musste dazu ein spezielles SPS-basiertes Leittechniksystem realisiert werden.

In Tabelle I sind die wichtigsten Kenndaten der Solarzellenanlage «Park+Ride» Neufeld zusammengefasst.

## Energieertrag und Vergleich mit anderen Anlagen

Bei der untersuchten direktgekoppelten Solarzellenanlage wirken sich Spannungsschwankungen auf dem Fahrleitungsnetz unmittelbar auf den Arbeitspunkt der Solarmodule aus. Dadurch entstehen Fehlanpassungen mit entsprechendem Verlust an nutzbarer Energie. Andererseits treten auch bei einem System mit DC/DC-Wandler und optimaler Lastanpassung (MPPT) gewisse Verluste auf. Zudem verursacht ein solches Gerät zusätzliche Kosten.

Die detaillierte Untersuchung des Betriebsverhaltens hat interessante Erkenntnisse über die in der Solarzellenanlage «Park+Ride» auftretenden Verluste geliefert. Diese Verluste können auf vier Komponenten aufgeteilt werden:

- $L_{ct}$: Temperaturbedingte Generatorverluste
- $L_{cr}$: Verluste durch Verkabelung und Strangdioden
- $L_{cmpp}$: Verluste durch Fehlanpassung (Betrieb des Solargenerators ausserhalb MPP)
- $L_{cmdiv}$: Restliche Generatorverluste (Teilbeschattung, Schneebedeckung, Mismatch, Strahlungsinhomogenitäten)

Tabelle II zeigt die Verluste eines typischen Sommer-, Herbst- und Wintermonates als prozentuale Anteile bezogen auf den Referenzertrag, das heisst den spezifischen Ertrag eines verlustfreien Systems bei Standard-Testbedingungen.

Wie Tabelle II zeigt, sind die ohmschen Verluste ($L_{cr}$) relativ gering. Die temperaturbedingten Verluste ($L_{ct}$) dagegen sind im Sommer wegen der hohen Zelltemperaturen am höchsten und erreichen in den kalten Monaten negative Werte, das heisst sie stellen einen Gewinn dar.

Die Verluste infolge Fehlanpassung ($L_{cmpp}$) sind in der warmen Jahreszeit ebenfalls gering. Die DC-Spannung liegt hier nahe beim Optimum (MPP), was natürlich bei der Systemauslegung geplant war. In den Wintermonaten, wenn die MPP-Spannung des Generators infolge tiefer Temperatur höher ist, ergeben sich dadurch etwas grössere relative Verluste, welche aber absolut gesehen wenig ins Gewicht fallen.

Die restlichen Verluste ($L_{cmdiv}$) sind im Sommer und Herbst recht konstant und steigen dann im Winter stark an. Der grösste Anteil an diesen Verlusten dürfte auf temporäre Schneebedeckung des Solargenerators zurückzuführen sein. Ein weiterer Anteil ist durch die Wirkungsgradverminderung der Solarzellen bei kleinen Einstrahlungen gegeben.

Neben dem spezifischen Energieertrag – gleichbedeutend mit der jährlichen Vollbetriebsstundenzahl – wird zur Beurteilung des energetischen Verhaltens von Solarzellenanlagen der sogenannte PR-Wert (Performance ratio) verwendet.

Der PR-Wert ist in grober Näherung unabhängig vom Standort und entspricht dem Verhältnis der erzeugten Energie der Anlage zu derjenigen Energie, welche ohne Verluste hätte erzeugt werden können. Diese Grösse stellt damit einen Gütegrad einer Anlage dar.

Der Verlauf der PR-Werte über die Jahre 1995 und 1996 ist in Bild 4 dargestellt. Die Performance ratio liegt dabei im Jahresdurchschnitt bei 84–85%.

Vom Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke VSE wird eine Photovoltaik-Produktionsstatistik geführt. Diese umfasst eine Auswertung von mehreren hundert netzgekoppelten Anlagen in der Schweiz. Im Jahr 1995 lag der durchschnittliche spezifische Energieertrag bei 815 kWh/kW$_p$.

Im Vergleich dazu betrug der spezifische Ertrag der Anlage «Park+Ride» im

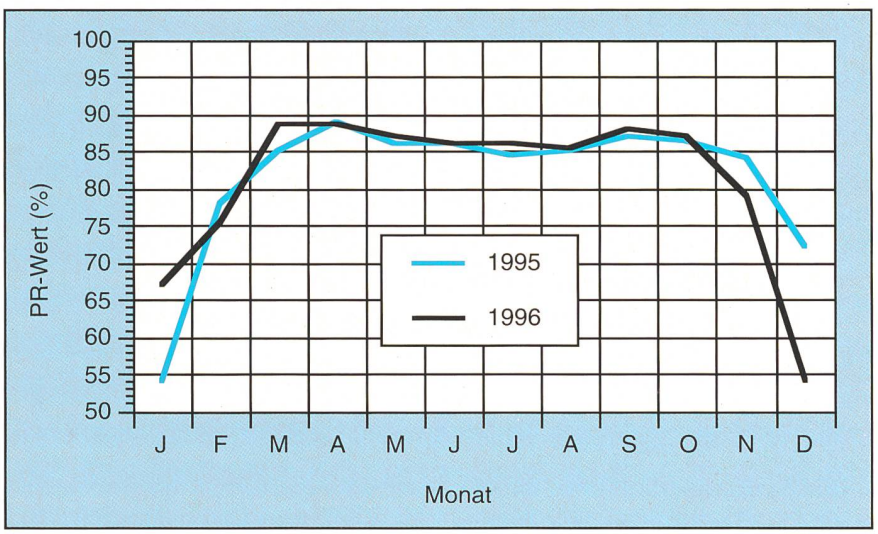


**Bild 4 Jahresverlauf der PR-Werte 1995 und 1996.**

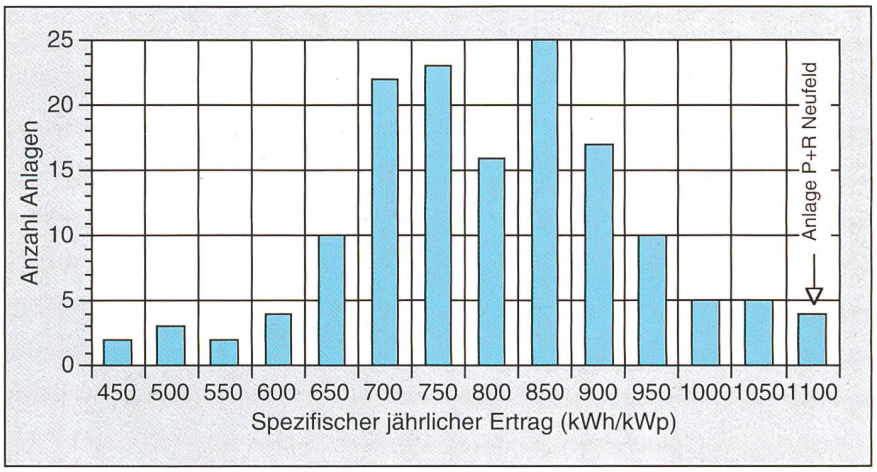


**Bild 5 Photovoltaik-Ertragsstatistik der Schweiz 1995.**

| Anlage | Install. Leistung | PR-Wert (1995) |
|---|---|---|
| «Park+Ride» | 80 kW | 84% |
| Jungfraujoch | 3 kW | 84% |
| Mont-Soleil | 560 kW | 76% |
| Taubenhalde | 20 kW | 72% |

**Tabelle III Vergleich der PR-Werte verschiedener Anlagen.**

Jahre 1995 insgesamt 1100 kWh/kW$_p$, das heisst es konnte etwa 35% mehr Energie produziert werden als im gesamtschweizerischen Durchschnitt.

Bild 5 zeigt die Ertragsstatistik des Jahres 1995 mit dem für die Gleichstromanlage «Park+Ride» eingezeichneten Wert. Es ist daraus ersichtlich, dass nur ein verschwindend kleiner Teil der erfassten Anlagen ähnlich hohe Ertragswerte erreichen.

Auch im Vergleich mit einzelnen Anlagen zeigt es sich, dass das Konzept der Direktkopplung insgesamt sehr effizient ist.

Ein Vergleich des Energieertrags der Anlage «Park+Ride» mit der ebenfalls in der Stadt Bern gelegenen 20-kW-Anlage Taubenhalde, welche einen Teil des Strombedarfs der Marzilibahn liefert, ist besonders aussagekräftig, da beide praktisch identischen Meteobedingungen ausgesetzt sind.

Wie erwähnt, lag 1995 der spezifische Energieertrag der Anlage «Park+Ride» bei 1100 kWh/kW$_p$. Demgegenüber erbrachte die Anlage Taubenhalde im Jahre 1995 mit 883 kWh/kW$_p$ zwar einen etwas höheren Ertrag als der schweizerische Durchschnitt, aber doch 20% weniger als die Anlage mit DC-Direktkopplung.

Interessante Erkenntnisse in bezug auf das energetische Verhalten lassen sich auch durch Vergleich mit weiteren Solarzellenanlagen gewinnen, die in anderen klimatischen Regionen aufgestellt sind.

So konnten zum Beispiel bei der Anlage Jungfraujoch im Jahre 1995 der sehr hohe Wert von 1404 kWh/kW$_p$ und bei der Anlage Mont-Soleil 945 kWh/kW$_p$ ins Netz eingespeist werden.

Der Rekordertrag der Anlage Jungfraujoch war zu erwarten und ist primär eine Folge der dort sehr hohen Einstrahlung und der tiefen Aussentemperaturen.

Eher überraschend ist jedoch, dass die im Mittelland gelegene Anlage «Park+Ride» einen deutlich höheren spezifischen Ertrag erzielte, als die Anlage Mont-Soleil, obwohl diese über einen Inverter mit hohem Wirkungsgrad verfügt. Neben den tieferen Systemverlusten bei der Direktkopplung hängt dies mit der auf hohe Winterproduktion ausgelegten Geometrie der Anlage Mont-Soleil zusammen. Im weiteren waren auch die Einstrahlungswerte 1995 auf dem Mont-Soleil unterdurchschnittlich: 1996 war der spezifische Ertrag der Anlage Mont-Soleil mit 1088 kWh/kW$_p$ wesentlich höher.

Auch beim Vergleich der PR-Werte schneidet die Anlage «Park+Ride» sehr gut ab, wie Tabelle III zeigt.

## Technische Probleme

Ein Gleichstrom-Fahrleitungsnetz weist sehr viel grössere Spannungsschwankungen auf als ein 50-Hz-Netz. Die Trolleybus- und Tramlinien sämtlicher Schweizerstädte werden mit einer Netzspannung von etwa 650 VDC betrieben. Dieser Spannung überlagern sich neben relativ langsamen, durch wechselnde Belastung verursachten Spannungsschwankungen, auch schnelle, kurze Spannungsimpulse mit grosser Amplitude, welche ohne spezielle Massnahmen auf den Solargenerator übertragen werden und ihn damit einer dynamischen Belastung aussetzen.

Solche Spannungsimpulse werden beim Anfahren des Trolleybusses, beim Überfahren von Trennstrecken sowie beim Durchschlagen von dünnen Eisschichten auf der Fahrleitung bei tiefen Temperaturen verursacht.

Bei der Solaranlage «Park+Ride» hat sich gezeigt, dass dem Transientenverhalten des Solargenerators gebührend Rechnung getragen werden muss. Schon nach kurzer Betriebsdauer traten Durchschläge und Beschädigungen bei mehreren Solarmodulen auf, welche offensichtlich mit der Impulsbelastung in Zusammenhang stehen. Die aufgetretenen Probleme hängen primär mit der speziellen und unüblichen Konstruktion der hier eingesetzten Module zusammen. Diese weisen zwar einen ausreichenden statischen Isolationswiderstand auf, sind aber, wie Versuche an der Ingenieurschule Burgdorf klar nachgewiesen haben, extrem transientenempfindlich. Gründe dafür sind eine als Dampfsperre in die Rückabdeckung einlaminierte Alufolie, die kein definiertes elektrisches Potential aufweist, sowie die Führung der Modulanschlussleiter, bei welchen gegenüber dem Rahmen hohe elektrische Feldstärken auftreten können.

Bei elektrotechnischen Komponenten, die nach den üblichen Regeln konstruiert sind, kann davon ausgegangen werden, dass die elektrische Festigkeit bei Impulsspannungen deutlich höher liegt als bei statischer Spannungsbelastung. Bei einer Leerlaufspannung der Anlage von 1000 V gegen Erdpotential sollten deshalb auch bei den gemessenen hohen Transienten bei Modulen üblicher Bauart keine Probleme auftreten.

Zur Erfassung der Spannungsspitzen wurden Messungen mit einem schnellen Transientenrecorder mit einer Abtastrate von etwa 2 MHz durchgeführt.

Es hat sich dabei gezeigt, dass beim positiven Leiter des Solargenerators die Spannung kurzfristig sehr stark, das heisst auf Werte unter Null zusammenbrechen kann. Da diese Impulse zwar unregelmässig, aber häufig auftreten, stellen sie für die Anlage eine eigentliche Dauerbeanspruchung dar.

Um weitere Schäden an den offensichtlich sehr empfindlichen Modulen bei der Anlage «Park+Ride» zu verhindern, wurde beschlossen, ein Tiefpassfilter zwischen die Anlage und die Fahrleitung einzubauen. Seither sind keine weiteren Störungen mehr aufgetreten, und es kann deshalb angenommen werden, dass dieses Filter einen ausreichenden Schutz gegen Überspannungen bietet.

Da die heutigen Prüfverfahren für Solarmodule (z.B. ESTI-Test 503) nur gerade die statische Spannungsfestigkeit testen, muss dem Planer von ähnlichen Anlagen empfohlen werden, in jedem Fall ein solches Filter vorzusehen, auch wenn vermutlich die meisten handelsüblichen Module solche Transienten verkraften würden.

Die aufgetretenen Probleme wurden mit dem Modulhersteller ausführlich besprochen. Dieser hat bei der neuesten Generation seiner Module gewisse Änderungen vorgenommen. Es ist deshalb anzunehmen, dass das Problem der Transientenempfindlichkeit heute weitgehend gelöst ist.

## Marktpotential von photovoltaischen Gleichstromsystemen

Die Einspeisung photovoltaisch erzeugter Elektrizität in ein Fahrleitungsnetz erscheint zunächst als etwas «exotische» Anwendung. Es ist offensichtlich, dass das Potential für solche Anlagen wesentlich geringer ist, als dasjenige von Einspeisungen in das 50-Hz-Netz. Um das Marktpotential abschätzen zu können, wurden, in Ergänzung zu den technischen Untersuchungen an der Anlage «Park+Ride», die möglichen Gleichstromanwendungen näher betrachtet. Neben den Fahrstrom-Einspeisungen betrifft dies zum Beispiel die Einspeisung von PV-Strom in den DC-Zwischenkreis von Umrichtern, USV-Anlagen usw.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass das Potential allein bei den schweizerischen Eisenbahn-, Tram- und Trolleybus-DC-Fahrleitungsnetzen in der Grössenordnung von etwa 100 MW liegt.

Zählt man das Potential bei den USV-Anlagen grösserer Leistung dazu, das auf etwa 25 MW geschätzt wird, so ergibt sich ein grosses Gesamtpotential für DC-Direkteinspeisungen. Dieses würde theoretisch genügen, um die von «Energie 2000» gesetzten Ziele von 50 MW installierter Leistung für Photovoltaikanlagen bis im Jahre 2000 allein durch Einspeisung in Gleichstromnetze zu erreichen.


## Verdankungen

Die Durchführung der beschriebenen Untersuchung wurde ermöglicht durch einen Beitrag des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL). Dem PSEL sowie dem zuständigen Projektpaten, Herrn Dr. K. P. Schäffer, sei für die gewährte Unterstützung und die wohlwollend-kritische Begleitung herzlich gedankt.

Ohne die aktive Mitwirkung des Elektrizitätswerks der Stadt Bern hätte das Projekt nicht realisiert werden können. Besonders verdankt sei die Unterstützung durch die Herren J. Vaterlaus, R. Bärtschi, V. Obrist und weitere EWB-Mitarbeiter.

Für die Untersuchungen zu den Systemverlusten sowie zu den Transientenproblemen leistete die Ingenieurschule Burgdorf mit dem Photovoltaik-Labor und dem Hochspannungslabor wertvolle Beiträge. Den Herren Dr. H. Häberlin, Dr. R. Minkner und weiteren Mitarbeitern sei dafür herzlich gedankt.


## Folgerungen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Untersuchung der PV-Anlage «Park+Ride» Neufeld wichtige Erkenntnisse zu den folgenden Punkten ergab:

- Verständnis des Verhaltens eines grossen, direktgekoppelten PV-Systems bei statischen und dynamischen Lastbedingungen.
- Vergleich des Energieertrages der Anlage «Park+Ride» mit Anlagen mit Wechselrichtern und Netzkopplung.
- Technischer und wirtschaftlicher Vergleich der Direktkopplung mit der Ankopplung über einen DC/DC-Steller mit «Maximum Power Tracking».
- Probleme von Netztransienten und deren Lösung, Hinweise für die Spezifikation von Solarmodulen bezüglich Spannungsfestigkeit.
- Marktpotential der Gleichstromanwendungen in der Schweiz

Die direkte galvanische Kopplung mit einem 650-V-Fahrleitungsnetz ist aufgrund dieser Untersuchung technisch und wirtschaftlich sinnvoll. Trotz der Verluste durch Fehlanpassung können hohe Energieerträge erzielt werden. Obwohl bei einer galvanisch direkt gekoppelten Anlage Kosten für die Steuerung und Überwachung entstehen, ergeben sich vergleichsweise tiefe Systemkosten, so dass sich insgesamt – für Solaranlagen – sehr günstige Stromgestehungskosten ergeben.

Ein Impedanzwandler mit MPP-Tracking hätte unter denselben meteorologischen und betrieblichen Bedingungen keinen höheren Ertrag erbracht als die gewählte direkte galvanische Kopplung, so dass dessen Kosten nicht durch einen Mehrertrag amortisiert werden könnten. Voraussetzung für einen effizienten Betrieb ist allerdings, dass der Solargenerator sorgfältig ausgelegt wird, was zweckmässigerweise mittels Simulationsrechnungen erfolgt.

Neben den energetischen Vorteilen spricht auch die hohe Verfügbarkeit für die Direktkopplung. Diese liegt nahe bei 100%. Demgegenüber wurde bei Wechselrichteranlagen gemäss VSE-Statistik im Jahre 1995 im schweizerischen Durchschnitt nur eine Verfügbarkeit von 97,7% erreicht. Es kann angenommen werden, dass auch bei DC/DC-Stellern ähnliche Ertragseinbussen infolge nicht hundertprozentiger Verfügbarkeit in Kauf genommen werden müssten.

Offen ist die Frage, ob das Konzept der Direktkopplung auch bei wesentlich höheren Spannungen sinnvoll ist. Dazu müssten weitere Abklärungen vorgenommen werden, da die meisten Modulhersteller die zulässige Systemspannung für ihre Produkte auf einige 100 V begrenzen.

Die Untersuchungen der Transientenprobleme haben gezeigt, dass die üblichen Modultests für solche Anwendungen nicht genügen. Andererseits kann mit geeigneten Massnahmen die Impulsbelastung der Module auf ungefährliche Werte reduziert werden.

Das Marktpotential von direktgekoppelten PV-Systemen schliesslich stellt mit einem geschätzten Wert von 125 MW zwar nur eine Nische dar im Vergleich zur 50-Hz-Netzkopplung. Die gute Kosteneffizienz solcher Anlagen rechtfertigt jedoch sicher weitere Projekte ähnlicher Art. Die Anlage in Bern wurde inzwischen auch bereits von interessierten Fachleuten aus verschiedenen Ländern, welche ähnliche Systeme planen, besucht.

### Literaturangabe


Solarzellen-Anlage «Park+Ride» Neufeld: Auswertung von Messdaten und Betriebserfahrungen. Schlussbericht PSEL-Projekt Nr. 72, Januar 1997, Electrowatt Engineering AG, 8034 Zürich.



# Installation photovoltaïque raccordée directement au réseau à courant continu

La fiabilité d'installations photovoltaïques raccordées au réseau de 50 Hz est bien connue de nos jours et continue à être régulièrement étudiée. Il n'existe par contre que peu d'informations sur les systèmes photovoltaïques à courant continu. Opérationnelle depuis le début de 1993, l'installation photovoltaïque de 80 kW «Park+Ride» Neufeld est le plus grand système photovoltaïque du monde à être raccordé directement de manière galvanique au réseau caténaire d'un service de transport public. Cette installation offre donc une occasion exceptionnelle d'étudier la fiabilité de tels systèmes.

VSE
UCS

# Leitbild der schweizerischen Elektrizitätswerke

| | |
|---|---|
| **Unsere Kunden** | stehen im Mittelpunkt unseres Handelns. |
| **Unser Produkt Strom** | wollen wir für kleine und grosse Kunden sicher und genügend, kostengünstig und umweltgerecht beschaffen und verteilen. |
| **Unsere Mitarbeiter** | wollen im Dialog mit den Kunden deren Wünsche und Bedürfnisse ergründen und ernst nehmen. |
| **Unsere Dienstleistungen** | wollen wir auf die individuellen Bedürfnisse unserer Kunden ausrichten. |
| **Unsere Leistungsfähigkeit** | wollen wir täglich neu und flexibel unter Beweis stellen. |
| **Unsere Unternehmen** | wollen wichtige Aufgaben im Dialog miteinander lösen. |
| **Unsere Energiezukunft** | wollen wir im Dialog mit Kunden, Behörden und Politikern mitgestalten und so unseren Handlungsspielraum erweitern. |
| **Als Branche** | wollen wir unsere Anliegen in der Öffentlichkeit einmütig vertreten. |

**Wir leisten damit einen Beitrag an die Schweiz von morgen**

zur Sicherung des Wirtschaftsstandorts Schweiz
zur Schonung der Umwelt
zur Erhaltung der Lebensqualität der Bevölkerung

SCHWEIZER ELEKTRIZITÄT
*Der Draht mit Zukunft*