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: 87 (1996)

Heft: 10

Artikel: 20-kW-Photovoltaikanlage NTB/NOK : Auslegung, Wechselrichter, Messdaten

Autor: Roth, Stefan / Schönholzer, Emil T.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902323

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: 05.12.2025

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

Im Sinne eines optimalen Einsatzes der Forschungs- und Entwicklungsgelder ist eine gut funktionierende Schnittstelle zwischen Lehre und Industrie von fundamentaler Bedeutung. Diesbezüglich darf das Projekt der 20-kW-Photovoltaikanlage am Neu-Technikum Buchs in zweifacher Hinsicht als vorbildlich bezeichnet werden. Erstens bietet diese Anlage eine ideale Experimentierumgebung für das im Rahmen eines KWF-Projektes entwickelte völlig neue Wechselrichterkonzept, und zweitens fruchteten die über lange Jahre bestehenden Kontakte zwischen dem Neu-Technikum Buchs (NTB) und den Nordostschweizerischen Kraftwerken (NOK) nun in einem gemeinsamen Pilotprojekt, das einen weiteren Teil der bekannten 1-Megawatt-Solarkette bildet.

20-kW-Photovoltaikanlage NTB/NOK: Auslegung, Wechselrichter, Messdaten

Adressen der Autoren:
Stefan Roth, dipl. Masch.-Ing. ETH, Ressortleiter Neue Energiesysteme, Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK), Parkstrasse 23, 5401 Baden
Emil T. Schönholzer, dipl. El.-Ing. MSEE, Professor, Neu-Technikum Buchs (NTB), Werdenbergstrasse 4, 9470 Buchs/SG.

■ Stefan Roth und Emil T. Schönholzer

Anlagebeschreibung

Konzept

Die Akzeptanz von photovoltaischen Stromerzeugungsanlagen in der Öffentlichkeit steigt mit der architektonischen Qualität der Integration des Solargenerators in das Gebäude. Als Beispiel hierfür darf sicher der bekannte Kirchturm von Steckborn zitiert werden.

Damit stand schon zu Beginn fest, dass auf dem frisch sanierten Dach des Grundlagentraktes des Neu-Technikums Buchs nur eine ästhetische und funktionale Integration der einzelnen Solarmodule in den gesamten Gebäudekomplex in Frage kam. Folglich wurde bereits am Anfang der Planungsarbeiten ein Team aus Architekten, Statikern und Solartechnikern gebildet, das alle Bedürfnisse unter einen Hut zu bringen hatte. Das Ziel war die Erstellung einer Strom erzeugenden Pergola, die der Beschattung des begehbaren Daches dient.

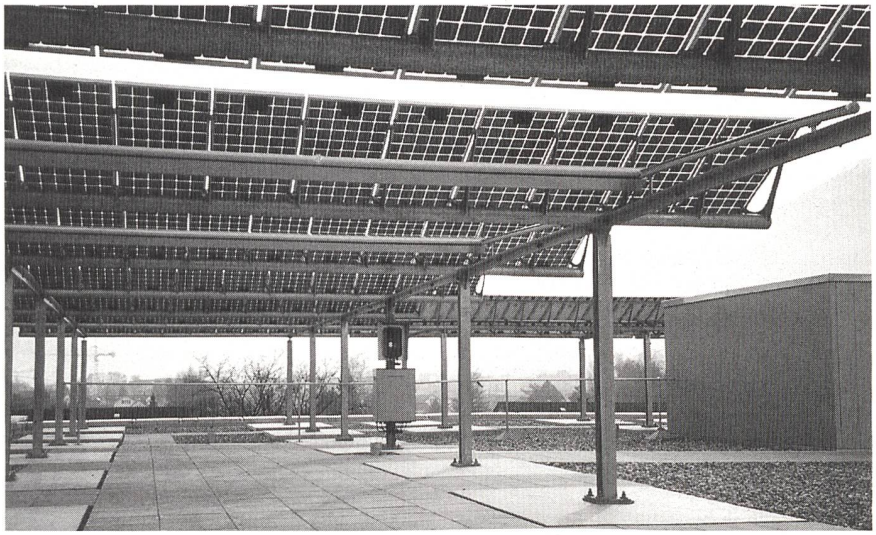


Bild 1 Die 20-kW$_p$-Solarpergola am Neu-Technikum Buchs (Foto: Manfred Hagen).

Das Ergebnis dieser interdisziplinären Zusammenarbeit darf sich sehen lassen. Die augenfälligen Rosinen dieses Projektes sind die Gestaltung der Tragkonstruktion und die Verwendung transluzider Solarmodule. Die inneren Werte hingegen liegen in dem raffinierten, völlig neuen Konzept der elektrischen Zusammenfassung des Solargenerators, der Steuerung, der Übertragung und der Umformung der Energie.

Entsprechend der Funktion als Pilot- und Demonstrationsanlage wird die von NOK, NTB, Bund, Kanton St.Gallen und weiteren finanzierte Anlage detailliert ausgemessen. Auf einem Monitor in der Cafeteria des Neu-Technikums, im Informationspavillon der NOK in Böttstein sowie auf der NTB-Homepage im WWW des Internets (http://www.ntb.ch/intern/pv-anlage/pv-anlage.html) können die Kenngrössen «On line» betrachtet werden. Die Betriebsüberwachung und die detaillierte Auswertung nach IEA-Normen sind in das Programm «1-Megawatt-Solarkette der

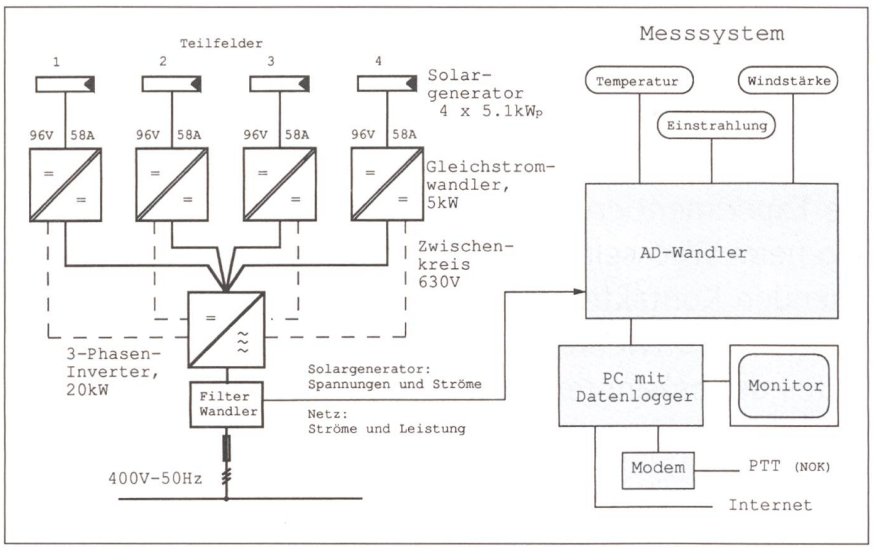


Bild 2 Prinzipschaltbild der Anlage.

NOK» integriert. Spezifische Versuche und Untersuchungen werden am NTB im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten durchgeführt.

Baugeschichte

Nachdem im August 1994 ein Variantenvergleich und im September 1994 ein Vorprojekt mit Kostenschätzung ausgearbeitet wurden, durchlief das Projekt die für jede PV-Anlage kritische Phase der notwendigen Finanzierungszusagen. So dauerte es bis im Juni 1995, bis definitiv grünes Licht gegeben werden konnte. Trotz der bereits weit fortgeschrittenen Zeit wurde mit dem letzten Einsatz aller Beteiligten versucht, die Anlage bis zum 25-Jahr-Jubiläum des Neu-Technikums Buchs am 23. September 1995 fertigzustellen. Aufgrund verschiedener Widerwärtigkeiten verzögerte sich leider die Anlieferung der Solarmodule, so dass die Anlage schliesslich erst am 14. Dezember 1995 voll in Betrieb gehen konnte.

Technische Auslegung

Die Solarzellen erzeugen Gleichstrom, das Netz jedoch erfordert die Einspeisung von 50-Hz-Wechselstrom. Daher sind entsprechende Wechselrichter erforderlich. Diese werden mit verschiedenen Schaltungsarten gebaut und angeboten. Ausserdem unterscheidet man heute nach Zuordnung zu den Solarzellen: zentrale Wechselrichter, die die Leistung des ganzen Feldes umsetzen, Wechselrichter pro Modulstrang und schliesslich Modulwechselrichter. Im letztgenannten Fall wären hier 192 Wechselrichter erforderlich.

Das vorliegende neue Konzept entspricht grob dem des Strangwechselrichters. Wie das Prinzipschaltbild (Bild 2) zeigt, ist der Solargenerator in vier Teilfelder von je 5,1 kW_p aufgeteilt. Jedes Teilfeld speist einen Gleichstromwandler, der die Spannung des Feldes von nominal 96 V auf eine konstante Zwischenkreis-Gleichspannung von 630 V umwandelt. Dieser Wandler beinhaltet einen Maximum Power Tracker. Er führt die optimale Betriebsspannung der Solarmodule, die vor allem von der Temperatur abhängig ist, für die maximale Ausnutzung der Einstrahlung nach. Ausserdem wird hier der Stromkreis der Module galvanisch vom Zwischenkreis und damit vom Netz getrennt. Das, zusammen mit der niedrigen Feldspannung, verhindert die Gefährdung von Menschen im Bereich der Module. Die eigentliche Umwandlung von Gleichstrom zu Wechselstrom erfolgt im zentral montierten dreiphasigen Inverter.

Das Konzept hat gegenüber bisherigen Anordnungen einige Vorteile. Zum einen kann für die aufwendige Aufgabe der Umwandlung von Gleichstrom in dreiphasigen Netzstrom ein kommerzieller Frequenzumrichter verwendet werden. Diese zu Tausenden für die Antriebstechnik gebauten Geräte sind robust und kostengünstig. Des weiteren kann die Umwandlung auf die Zwischenkreisspannung direkt beim Feld stattfinden. Eine Aussenmontage der Gleichstromwandler ist möglich, da diese mit einem Gehäuse nach IP54 ausgestattet sind. Ausserdem beugt eine vom Solargenerator gespeiste Heizung gegen die Bildung von Kondenswasser vor. Um die Leitungslängen auf der Modulseite kurz zu halten, wurde im Feld 2 von der Aussenmontage Gebrauch gemacht. Damit werden die Übertragungsverluste klein. Im vorliegenden Fall betragen sie trotz 60 m Kabellänge im Zwischenkreis weniger als 0,5%. Schliesslich bringt das Aufteilen auf vier Felder wesentliche Vorteile, falls Teilbeschattungen auftreten. Ausserdem führt die niedrige Strangspannung zu einer Verringerung der Verluste wegen Fehlanpassung der Module (Streuung der Kurzschlussströme). Auch ist keine Zellendegradation wegen hohem Betriebspotential zu befürchten.

Parallel zum Aufbau der Anlage befasste sich eine Diplomarbeit unter dem Titel EMV bei *PV-Anlagen* mit Untersuchungen und Verbesserungen im Bereiche der Funk- und Netzentstörung des Umrichtersystems. Dabei wurde erreicht, dass die Anlage alle einschlägigen Richtlinien und Vorschriften erfüllt.

Das modulare Wechselrichtersystem P400

Allgemeines

Wie das Prinzipschaltbild (Bild 2) zeigt, besteht der Wechselrichter bei dieser Anlage aus einem Dreiphaseninverter und vier vorgeschalteten, parallel arbeitenden 5-kW-Gleichstromwandlern. Der Inverter und die Gleichstromwandler sind in separaten Gehäusen untergebracht. Beim Inverter handelt es sich um einen normalen Frequenzumrichter für Wechselstromantriebe mit Zusätzen wie Steuerkarte, Netzfilter und Steuerschütz. Die Anzahl der Gleichstromwandler kann grundsätzlich 1, 2, 3 oder 4 betragen, womit ein Bereich von 5 bis 20 kW_p modular abgedeckt wird.

Im folgenden soll nun auf technische Einzelheiten dieses Wechselrichtersystems eingegangen werden, das in einem KWF-Projekt (Schule/Industrie) mit Bundesunterstützung entstanden ist.

5-kW–32-kHz-Gleichstromwandler

Der Gleichstromwandler besteht aus einer Brückenschaltung mit FET-Transistoren, die durch einen Pulsweitenmodulator mit zusätzlichen Treibern angesteuert werden. Die Taktfrequenz beträgt 32 kHz. Über einen Trenntransformator, der auch der Spannungsanpassung dient, werden zwei Diodenbrücken mit nachgeschalteten L-C-Filtern gespeist. Der Gleichstromwandler setzt die Spannung des Solargenerators (78–135 V) in die Zwischenkreisspannung (630 V) um. Für 10–100% Last liegt der Wirkungsgrad im Bereich von 92 bis 95%.

Der Gleichstromwandler ist mit dem Wechselrichter nur durch die beiden Zwi-

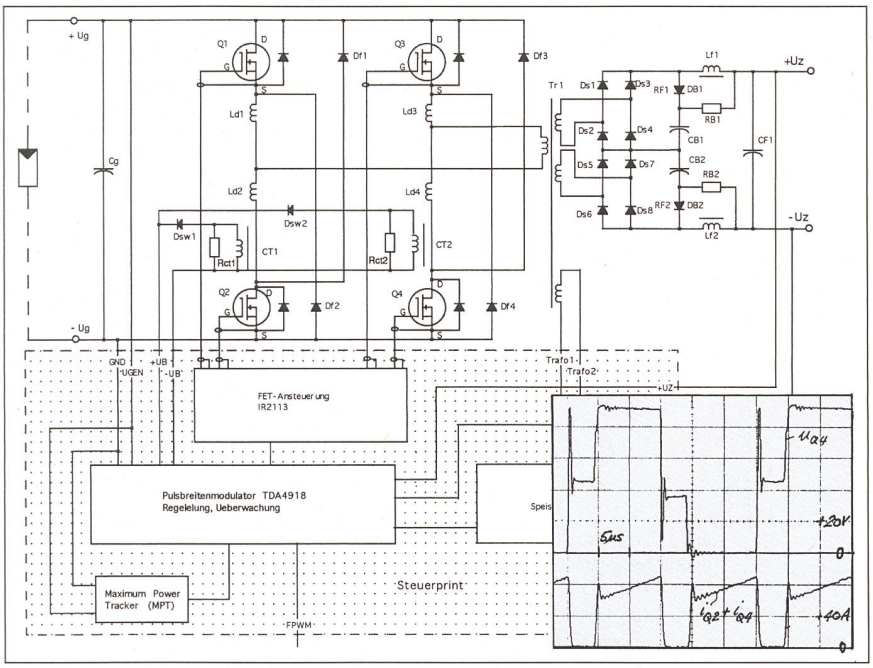


Bild 3 Gesamtschaltbild des Gleichstromwandlers

Bild 4 Wellenform im Gleichstromsteller bei voller Last (oben: Drain-Source-Spannung von Q4; unten: Strom in Q2 + Q4).

schenkreisleitungen verbunden. Er hat daher auch eine eigene, vom Solargenerator betriebene Speisung für die Signalelektronik. Eine automatische Ein/Aus-Steuerung ist eingebaut und geregelt wird die Spannung des Solargenerators.

Leistungsteil

Zu Beginn der Entwicklung wurden drei Grundschaltungen untersucht: Mittelpunktschaltung, Halbbrücke und Vollbrükke. Eine detaillierte Analyse führte zur Wahl der Vollbrückenschaltung. Wegen der relativ geringen Spannung des Solargenerators wurden FET gegenüber IGBT bevorzugt.

Ursprünglich wurde auch ein Betrieb mit Resonance Mode in Betracht gezogen. Daraus resultiert aber ein schlechter Wirkungsgrad bei kleiner Belastung, was bei PV-Anwendungen nicht akzeptabel ist. Die FET werden daher hart geschaltet und mit Pulsweitenmodulation (PWM) betrieben. Das ergibt jedoch in der Brückenschaltung an den Transistoren exzessive du/dt-Werte. Wird zum Beispiel Q1 schnell eingeschaltet, so tendiert Q2 wegen der Miller-Kapazität ebenfalls einzuschalten, was zu einem Kurzschluss führt. Das kann mit Drosselspulen vermieden werden. Es zeigte sich, dass es genügt, die Leitung zwischen den beiden Transistoren durch Ferrit-Ringkerne zu führen. Die resultierende Induktivität (L_{d1}–L_{d4}) zusammen mit der Kapazität der FET reduziert dann die Spannungsrate. Durch richtige Wahl der Ferrite kann gleichzeitig genügend Dämpfung erreicht werden, so dass keine zusätzlichen Snubber-Netzwerke mehr nötig sind. Die Rücklaufdioden DF1–DF4 übernehmen den Strom der entsprechenden FETs nach deren Abschalten und erlauben daher die verlustfreie Entladung der magnetisch gespeicherten Energie (Ferrite, Streuinduktivität des Transformators) in den Zwischenkreis. Um die Verluste klein zu halten, muss das Abschalten schnell geschehen, was letztlich Dioden mit sehr kleiner Einschaltverzögerung erfordert.

Wegen der relativ grossen Zwischenkreisspannung, $Uz = 630$ V, besteht der Gleichrichter aus zwei in Reihe geschalteten Diodenbrücken. So kann das Problem der Spannungsteilung bei seriegeschalteten Dioden umgangen werden. Ausserdem hält dies die Streuinduktivität des Transformators und damit die eingefangene Energie (trapped energy) tief. Das ist sehr wichtig, weil sonst die Verluste im passiven Snubber (DB1, C81, R81 usw.) trotz schneller Dioden zu gross werden.

Im Transformator wird ein kompakter Ferrit-Topfkern von 84 mm Durchmesser ohne zusätzlichen Luftspalt verwendet. Die Wicklungen sind aus Kupferfolien aufgebaut, wobei die Primärwicklung zwischen die beiden Sekundärwicklungen verschachtelt und zur Vermeidung von EMI-Ausbreitung zum Zwischenkreis abgeschirmt ist. Richtig ausgelegt können Proximitäts- und Skineffekte sehr tief gehalten werden. Der Wirkungsgrad liegt bei Nennlast über 99% mit etwa gleich grossen Kupfer- und Eisenverlusten. Bei der vorliegenden hohen Schaltfrequenz würde jede Koronabildung zu einer schnellen Beschädigung des Transformators führen. Dies wiederum wird durch entsprechende Vorkehrungen bei der Auslegung und durch Vakuumimprägnierung vermieden.

Die Entwicklung der Leistungsschaltung wurde durch PSpice-Simulationen wesentlich unterstützt. Obwohl nur einfache Modelle für FETs, Dioden und Ferrite zur Anwendung kamen, wurde dadurch die Optimierung sehr erleichtert.

Steuer- und Regelteil

Die Brückenschaltung erfordert Treiber auf drei verschiedenen Potentialen. Normalerweise wird dieses Problem mit Pulstransformatoren gelöst. Im vorliegenden Fall wird aber ein transformatorloser Treiber mit Level Shifter verwendet. Zwar werden diese heute in kleinen Leistungswandlern oft verwendet, bei höheren Leistungen begegnet man aber einigen Problemen. Der hohen di/dt-Werte in den FETs wegen ist es schwierig, Kopplung zwischen der negativen Leistungsbus (*Ug-*) und der Treiberbus zu vermeiden. Gelöst wird das Problem mit der Balun-Technik: Die Gatetreiber-Anschlüsse werden durch geeignete Ferrit-Ringkerne geführt.

Der Leistungsfluss wird, wie bereits erwähnt, durch PWM gesteuert. Der Modulator-IC arbeitet nach dem bekannten Prinzip: Vergleich einer Rampenspannung mit der Steuerspannung (Voltage Mode). Dabei ergaben sich aber zwei Probleme: Sättigung im Transformator (wegen kleinen Unbalancen) und Oszillationen im LC-Zwischenkreisfilter. Beide konnten überwunden werden durch das Zufügen von etwas Stromgegenkopplung (von den Stromwandlern CT1 und CT2), so dass nun ein «Mixed Mode» (etwas zwischen Current und Voltage Mode) existiert. Dies wurde mit dem Programmpaket Simulink so optimiert, dass sich schliesslich sehr günstige dynamische Verhältnisse ergaben.

Dreiphaseninverter

Wie bereits erwähnt, wird für die Umwandlung der konstanten Zwischenkreisspannung in dreiphasigen Netzstrom ein kommerzieller Frequenzumrichter für Wechselstromantriebe eingesetzt. Weil solche Geräte in grosser Quantität gebaut werden, lässt sich so diese zentrale Aufgabe mit hochmoderner, zuverlässiger Technik zu günstigen Kosten lösen.

Bild 5 zeigt das Prinzip des Inverters und dessen Steuerung. Die Brückenschaltung ist mit IGBT bestückt. Die Netzdrosselspulen *La* sind nötig, um die Spannungsdifferenz zwischen dem Inverter und dem Netz zu absorbieren. Um die Normen zu erfüllen (z.B. EN 55014), ist zusätzlich ein

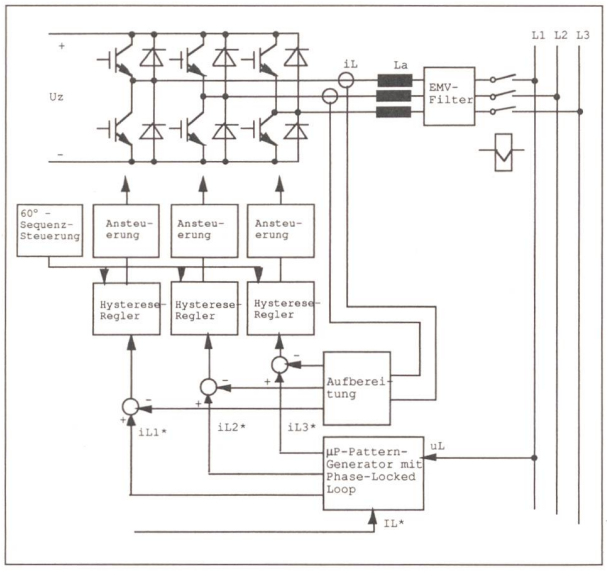


Bild 5 Inverter mit Steuer- und Regelsystem.

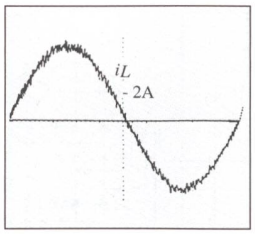


Bild 6 Netzstrom bei 70% Nennlast.

EMV-Filter vorgesehen. Der Mikroprozessor im Inverter generiert dreiphasige Sinussollwerte (i_{L1}*– i_{L3}*), die mit einem Phase «Locked loop» mit dem Netz synchronisiert werden. Zwei Netzströme werden gemessen, der dritte berechnet ($i_{L3} = -i_{L1}-i_{L2}$). Diese Signale werden mit den Sollwerten in Hysteresis-Reglern verglichen. In einem Dreileitersystem sind nur zwei Ströme voneinander unabhängig. Daher wird jeder der drei Hysteresis-Regler sequentiell für 60° stillgelegt. Schliesslich wird die Amplitude der Stromsollwerte durch den Gesamtstromsollwert I_L* gesteuert.

Der typische Verlauf des Netzstroms ist in Bild 6 gezeigt. Der Oberschwingungsgehalt ist bei Nennlast kleiner als 5%. Dies wird erreicht durch eine genügend hohe Schaltfrequenz (4–10 kHz) und richtig dimensionierte Netzdrosseln. Wichtig bei deren Auslegung ist auch, dass die hörbaren Geräusche klein gehalten werden, da der Inverter in einem Wohngebäude aufgestellt werden kann. Der Leistungsfaktor liegt oberhalb 0,95. Die Normen für den Netzanschluss [EN 60555] werden in jeder Beziehung erfüllt.

Gesamtsystem

Regelstruktur:

Die Gleichstromwandler (1–4 Stück) werden über die Zwischenkreisleitungen mit dem Inverter verbunden. Diese beiden Teile sind typisch einige Distanz voneinander entfernt. Daher sollte die Regelstrategie keine zusätzlichen Leitungen erfordern.

Das Prinzip kann aus Bild 7 entnommen werden. Wie bereits erwähnt, wird die Amplitude des Netzstromes durch den Sollwert I_L* bestimmt. Dieser wiederum wird generiert durch einen Vergleich der Zwischenkreisspannung Uz (630 V) mit dem Sollwert Uz*. Wenn Uz ansteigt, wird der Netzstrom vergrössert und umgekehrt. Weil der Uz-Regler sehr schnell ist, erscheint Uz für den Gleichstromwandler annähernd als eine Konstantspannungsquelle.

Der Gleichstromwandler hat die Aufgaben, die Spannung des Solargenerators Ug von etwa 96 V auf 630 V umzusetzen und ausserdem diesen vom Netz galvanisch zu trennen. Zudem muss dafür gesorgt werden, dass der Solargenerator jederzeit die maximal mögliche Leistung abgibt. Dies bewerkstelligt ein Ug-Regler mit überlagertem Maximum Power Tracker.

Der Gleichstromwandler darf in erster Näherung als verlustfrei betrachtet werden. Dann gilt: $Ug \bullet Ig = Uz \bullet Iz$
Der Übertragungsfaktor ist: $l = Uz / Ug$

Ein innerer Regler vergleicht Ug mit dem Sollwert Ug*, welcher nominal auf 96 V eingestellt ist (Nennspannung des Solargenerators). Dieser Regelkreis ist bedeutend langsamer als derjenige für Uz. Er bestimmt das Tastverhältnis der PWM und damit den Übertragungsfaktor λ.

Aus Bild 8 ist ersichtlich, dass im gezeigten Fall Ug* nahe beim optimalen Arbeitspunkt liegt (maximale Leistung $Pg = Ug \bullet Ig$). Wenn jedoch Temperatur und Einstrahlung ändern, ist ein Nachführen nötig. Daher wird ein relativ langsam arbeitender Maximalwertregler (Maximum Power Tracker) überlagert. Er funktioniert prinzipiell wie folgt: dessen Ausgangswert Um* wird etwas vergrössert und die Änderung der Leistung beobachtet. Falls die Leistung wächst, wird die Änderung in der gleichen Richtung wiederholt, andernfalls wird sie umgekehrt. Im eingeschwungenen Zustand entsteht eine kleine Schwingung um den Punkt maximaler Leistung. Im vorliegendem Gleichstromwandler wird ein daraus abgeleitetes Prinzip verwendet, das eine eigentliche Leistungsmessung nicht erfordert.

Aus Gründen des mittleren Wirkungsgrades als auch der Kosten wird die Nennleistung des PV-Wechselrichters oft etwas kleiner als die des Solargenerators gewählt. Dann muss im Fall maximaler Einstrahlung die Leistung begrenzt werden, was wie folgt geschieht: wenn der maximal zulässige Wert I_{Lmax} erreicht ist, bleibt der Netzstrom konstant und die Zwischenkreisspannung Uz beginnt anzusteigen. Dies wird durch den Uz-Begrenzer wahrgenommen, der nun seinerseits die Solargeneratorspannung Ug zu höheren Werten verstimmt und so die Leistung stabilisiert.

Die Optimierung der Regelkreise wurde durch Simulationen mittels des Programmpaketes Simulink vorgenommen. Dieses zeigte sich als sehr effizientes Werkzeug, welches State Space Averaging für die leistungselektronischen Teile und einfaches Optimieren der Regelkreise ermöglichte.

Betriebsführung

PV-Wechselrichter benötigen einige weitere Eigenschaften. So müssen sie mit einer automatischen Ein/Aus-Steuerung

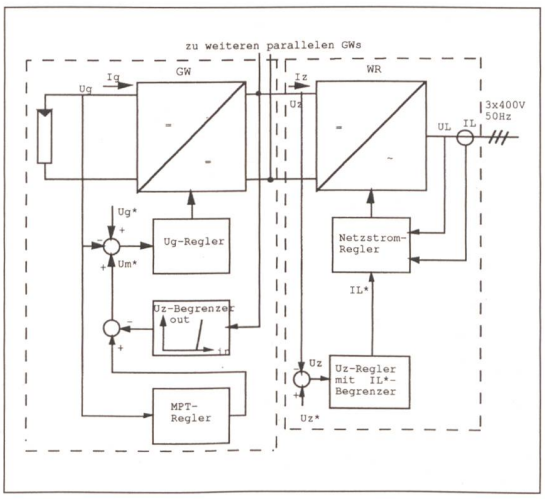


Bild 7 Regelstruktur des PV-Wechselrichters.

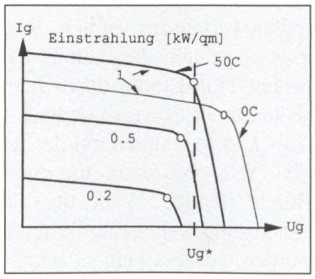


Bild 8 Typische Kennlinien des Solargenerators.

ausgestattet sein, welche den Betrieb startet, sobald genügend Einstrahlung für die Stromproduktion vorhanden ist, und im umgekehrten Fall auch wieder abschaltet. Im vorliegenden System geschieht dies durch Überwachung der Zwischenkreisspannung.

Selbstlauf (Islanding) muss zuverlässig gestoppt werden, wenn das Netz ausfällt. Gelöst wird das mit dem Mikroprozessor im Inverter durch Überwachung der Netzfrequenz.

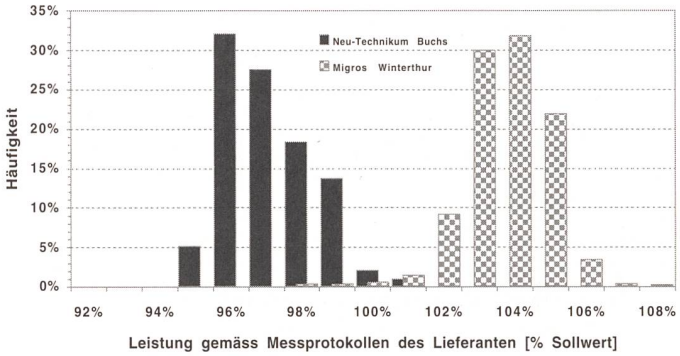


Bild 9 Vergleich der gelieferten Modulleistungen der PV-Anlagen Neu-Technikum Buchs und Migros-Winterthur anhand der von den Herstellern erstellten Messprotokollen.

Wirkungsgrad:

Solarzellen sind teuer. Ein guter Wirkungsgrad ist bei einem PV-Wechselrichter daher wichtig. Besonders die Verluste im Teillastbetrieb sollen klein sein, wird doch oft in diesem Bereich gearbeitet.

Heute werden PV-Wechselrichter oft mit dem Europäischen Wirkungsgrad beurteilt, der die zeitweise niedrige Belastung in Rechnung stellt und damit ungefähr den mittleren Betriebswirkungsgrad in unseren Breitengraden wiedergibt (Indizes bedeuten % Nennlast):

$$\eta_E = 0{,}03 \cdot \eta_5 + 0{,}06 \cdot \eta_{10} + 0{,}13 \cdot \eta_{20} + 0{,}1\,\eta_{30} + 0{,}48 \cdot \eta_{50} + 0{,}2\,\eta_{100}$$

Beim vorliegenden System wird der maximale Wirkungsgrad von 91% bei 60% Nennlast erreicht. Der Europäische Wirkungsgrad ist 90%.

Leistung der Solarmodule

Bereits die vom Hersteller mit Hilfe des Sonnensimulators erstellten Messprotokolle liessen erahnen, dass die gelieferten Module nicht die vorgesehene Leistung erbringen würden. Insgesamt 20,42 kW_p wurden dort anstelle der bestellten 21,12 kW_p gemessen (Bild 9). Das sind bereits 700 W_p oder 3,3% zu wenig!

Die im realen Betrieb gemessenen Leistungskennwerte der Anlage am NTB waren jedoch derart enttäuschend, dass sich weitere Abklärungen aufdrängten. Zu diesem Zweck wurden sechs repräsentative Module ausgewählt und zur Überprüfung zur European Solar Test Installation (ESTI) des Joint Research Centres (JRC) nach Ispra (I) geschickt. Dort wurde die Stromspannungskennlinie jedes dieser Module zweimal aufgenommen. Die anschliessend am NTB durchgeführten Aussenmessungen mit denselben sechs Modulen bestätigten die Resultate der ESTI vollumfänglich. Die ernüchternde Erkenntnis aus diesen Messungen ist, dass keines der geprüften Module die vertraglich vereinbarte Mindestleistung von 104,5 W_p bzw. 95% der theoretischen Nominalleistung erreichte. Der in Ispra ermittelte Durchschnittswert liegt mit 94,3 W_p oder 85,7% sogar weit davon entfernt. Nachdem die Herstellerfirma mit diesem Sachverhalt konfrontiert wurde, besteht nun die begründete Hoffnung, dass eine für beide Parteien befriedigende Lösung dieses Problems gefunden werden kann.

Nun ist es generell unbestritten, dass auf die Modulproduktion eines Herstellers eine Leistungstoleranz gewährt werden muss. Wird aber eine relevante Anzahl solcher Module bestellt, darf jedoch angenommen werden, dass der gelieferte Leistungs*mittelwert* dem im Vertrag vereinbarten Nominalwert entspricht und sich die Gesamtheit aller Module innerhalb der festgelegten *Toleranzen* bewegt. Vielfach wird leider nur versucht, das zweite Kriterium zu erfüllen. Für den Bauherrn besteht letztlich das grundsätzliche Dilemma, dass die effektiv gelieferte Leistung mit vertretbarem Aufwand nicht exakt genug nachgewiesen werden kann und somit das Thema der vom Hersteller wirklich gelieferten Leistung immer wieder zu Diskussionen Anlass geben wird.

Erste Messresultate und Erfahrungen

Datenerfassungssystem

Wie bei den bisherigen Anlagen der 1-Megawatt-Solarkette der NOK wird auch hier eine umfassende Mess- und Überwachungskampagne durchgeführt. Ein hochentwickeltes Akquisitionssystem misst alle 10 Sekunden 29 Datenpunkte, bildet daraus 10-Minuten-Mittelwerte, speichert diese und übermittelt die wichtigsten Grössen halbstündlich in die Auswertezentrale der NOK in Baden. Damit kann der Betrieb analysiert und allfällige Probleme sofort erkannt werden.

Analyse des Betriebsverhaltens

Monatlich wird eine Auswertung der Messdaten durchgeführt. Aus Bild 10 ist beispielsweise am 9. und am 15. Februar aufgrund der grossen *Lc*-Werte ersichtlich, dass morgens jeweils Schnee auf den Paneelen gelegen haben muss, der zuerst von der Sonne abgeschmolzen werden musste, bevor die Anlage ihre volle Leistung erbringen konnte. Eine hochaufgelöste Darstellung der wichtigsten Kenngrössen einer Photovoltaikanlage (Bild 11) gibt denn auch detailliert Auskunft über die entsprechenden Betriebscharakteristiken.

Am 15. Februar beispielsweise dauerte der Abtauvorgang der Solarmodule bis etwa 15 Uhr an. Dies geht einerseits aus der Diskrepanz zwischen der Einstrahlung (*Yr*) und der von den Solarmodulen erbrachten Leistung (*Ya*) hervor, die im Normalbetrieb bei Einstrahlungen über 100 W/m² ($Yr > 0{,}1$) in einem etwa konstanten Verhältnis zu einander stehen sollten (entsprechend einem annähernd konstanten Performance Ratio *PR*), andererseits aus den hohen Modulverlusten (*Lc*) hervor.

Vergleich verschiedener Anlagen anhand des Performance Ratio

Als praktische Grösse für den Vergleich von unterschiedlichen Solaranlagen wird das «Performance Ratio» *PR* angepriesen, welches im wesentlichen das Verhältnis zwischen der ins Netz eingespeisten Energie und der Sonneneinstrahlung auf die Solarzellenebene über einen definierten Zeitraum darstellt. Damit ist dieser Kennwert mehr oder weniger unabhängig von der Anlagengrösse und von den meteorologischen Bedingungen.

$$PR = Yf / Yr = (E_{ac} / P_0) / (\Sigma G_a \, \Delta t / G_{stc})$$

In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Vergleichbarkeit des *PR*-Wertes verschiedener Anlagen sehr stark relativiert werden muss. Dafür sind aus obiger Formel vor allem zwei Grössen verantwortlich: die Nominalleistung P_0 sowie die Einstrahlung auf den Solargenerator G_a.

In den meisten Fällen wird für die Nominalleistung mangels besserer Informationen der in den Verkaufsunterlagen des Herstellers angegebene Wert eingesetzt. Dieser stimmt in der Regel mit einer maximalen

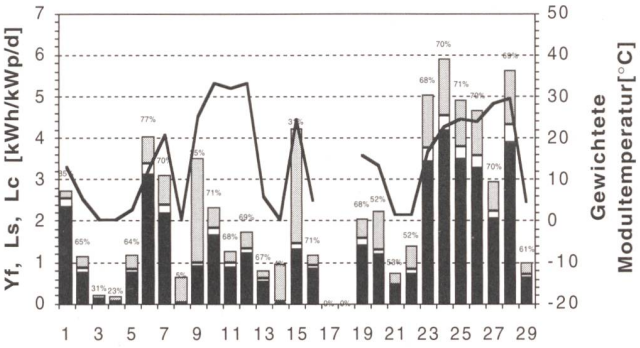


Bild 10 Kenngrössen (Tagesmittelwerte) der PV-Anlage Neu-Technikum Buchs im Monat Februar 1996.

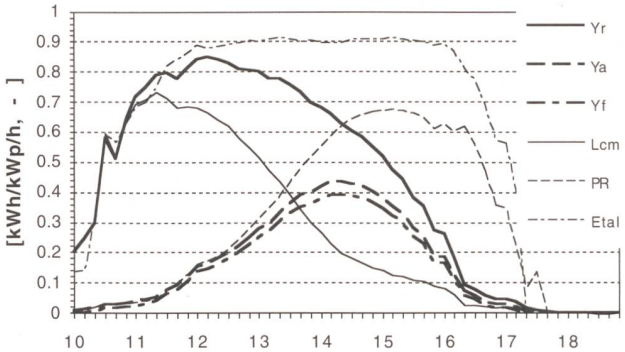


Bild 11 Tagesverlauf der wichtigsten Kenngrössen der Photovoltaikanlage am NTB am Beispiel des 15. Februars 1996.

Toleranz von ±10% mit der effektiven Leistung überein. Heute ist es jedoch üblich, dass der Hersteller im Werk erstellte Messprotokolle mitliefert, anhand welcher die effektive Leistung ermittelt werden kann. Dieses Vorgehen ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Versuchseinrichtung des Herstellers periodisch mit geeichten Solarmodulen kalibriert wird. Dass dies nicht zwingendermassen der Fall sein muss, zeigt das Beispiel der PV-Anlage Neu-Technikum Buchs sehr deutlich!

Die zweite Grösse, die Globalstrahlung, wird üblicherweise mit geeichten Pyranometern gemessen. Hier verursachen die Messgenauigkeit der Sensoren sowie die Inhomogenität der Einstrahlung im aus nur einem oder einigen wenigen Punkten bestimmten Flächendurchschnittswertes bereits eine beträchtliche, schwer quantifizierbare Unsicherheit der ermittelten Einstrahlung.

Weiter wird heute jedoch vielfach aus Kostengründen auf die teuren Pyranometer verzichtet und stattdessen Siliziumreferenzzellen eingesetzt. Diese haben jedoch ein sehr differenziertes spektrales Ansprechverhalten sowie aufgrund der planen Glasabdeckung unter flachen Einfallswinkeln sehr ausgeprägte Reflexionseigenschaften. Dies führt insgesamt tendenzmässig zu tieferen Werten für die gemessene Einstrahlung.

An einem schönen Tag (Bild 12) fallen die hohen Reflexionsanteile in den Morgen- und Abendstunden bei flachen Einfallswinkeln auf, während die Differenz über den Rest des Tages ungefähr konstant bleibt.

An einem Tag mit wechselhaften Einstrahlungsverhältnissen (Bild 13) fallen die Unterschiede geringer aus. Dies lässt sich qualitativ mit dem höheren Anteil an diffuser Strahlung (Reflexion) und der Verschiebung der Frequenzen in den langwelligen Bereich (Absorption) erklären.

Im Rahmen des Aktionsprogrammes der NOK werden mittels Doppelinstrumentierung langjährige Vergleichsmessungen zwischen Pyranometern und Referenzzellen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass keine allgemeine Korrelation zwischen den beiden Messmethoden hergeleitet werden kann.

Es ist aber offensichtlich, dass die Unterschiede um so grösser sind, je mehr der Solargenerator von seiner optimalen Ausrichtung entfernt ist. Als Beispiele veranschaulichen dies die vertikale Fassade der Anlage Migros-Winterthur im Sommer sowie der 30° geneigte Solargenerator der Anlage Neu-Technikum Buchs im Winter.

Anhand eines konkreten Zahlenbeispieles soll nun gezeigt werden, wie sich die geschilderten Einflüsse der Nominalleistung sowie der Globalstrahlung auf die Berechnung des Performance Ratio bemerkbar machen. Nehmen wir an, eine Anlage werde mit einem Pyranometer ausgemessen und die Leistungsangabe erfolge entsprechend den nominalen Herstellerangaben. Dann ermitteln wir für die Anlage in Buchs ungefähr einen *PR*-Mittelwert von 70%. Würde nun als Nominalleistung der in Ispra gemessene effektive und um 14,3% tiefere Wert eingesetzt, errechnet sich ein *PR* von 81,7%. Werden nun noch anstelle der mit dem Pyranometer erfassten Strahlungswerte jene der Referenzzelle eingesetzt (Jahreswert schätzungsweise 6% tiefer), ergibt dies ein *PR* von 86,9%. Für ein und dieselbe Anlage streut also der *PR*-Wert in diesem Beispiel zwischen 70% und 86,9%, obwohl das Betriebsverhalten und die Anlageparameter immer dieselben sind.

Es ist folglich beim Vergleich des *PR*-Wertes verschiedener Anlagen grosse Vorsicht geboten. Es sollten erstens die genausten verfügbaren Werte für die Modulleistung eingesetzt werden. Zweitens muss immer deklariert werden, welcher Art die verwendeten Strahlungssensoren sind, damit nur Anlagen mit gleicher Sensorbestükkung miteinander verglichen werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand des neuen Wechselrichtersystems P400 konnte aufgezeigt werden, dass das Einbinden eines kommerziellen Antriebsumrichters Vorteile wie geringere Kosten und potentiell bessere Zuverlässigkeit hat. Auch bringt das Aufteilen in einen Inverter und ein bis vier vorgelagerte Gleichstromwandler die Möglichkeit eines modularen Aufbaus von Photovoltaikanla-

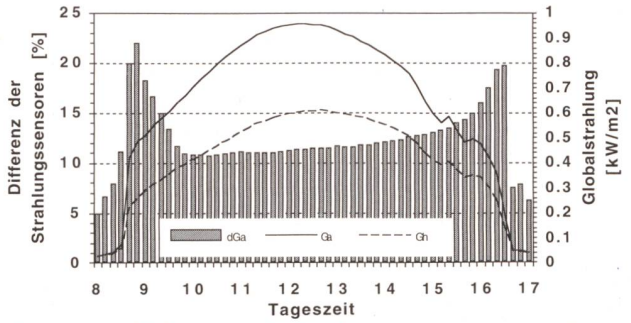


Bild 12 Unterschied zwischen den Strahlungssensoren an einem schönen Tag: Neu-Technikum Buchs am 24. Februar 1996.

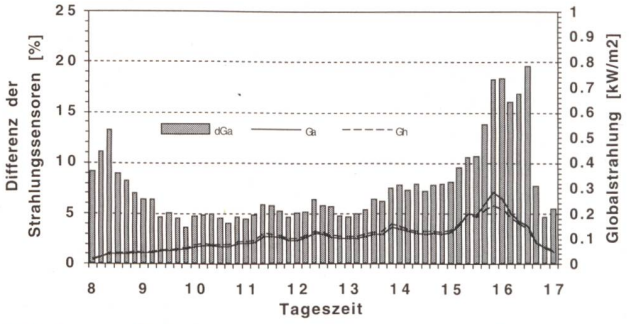


Bild 13 Unterschied zwischen den Strahlungssensoren an einem wechselhaften Tag: Neu-Technikum Buchs am 29. Februar 1996.

Beteiligte Unternehmen

A1-Electronic AG, 5620 Bremgarten	Messeinrichtung
Air Grischa, 7204 Untervaz	Lufttransporte
Donatsch Söhne AG, 7302 Landquart	Stahlbau und Montage
EW Buchs, 9470 Buchs/SG	Elektroinstallationen
Griesser, 5600 Lenzburg	Sonnendachanlage
Neu-Technikum Buchs, 9470 Buchs/SG	Engineering, Bauleitung
Nordostschweizerische Kraftwerke AG, 5401 Baden	Engineering, Bauleitung
Schmidhauser Elektronik AG, 9351 Neukirch-Egnach	Wechselrichtersystem
Temtec, 5722 Gränichen	Solarmodule

Technische Daten

Leistung, Energieertrag	
Nennleistung	20 kW_p
Jahresenergieertrag	~19 000 kWh
Solarmodule	
Fabrikat, Typ	GPV 110M
Zellenaufbau	Silizium, mono
Leistung (Herstellerangabe)	106,3 W_p (STC)
Fläche	0,845 m^2
Wirkungsgrad (Herstellerangabe)	12,6% (STC)
Solargenerator	
Anzahl Module	192
Teilung (Felder/Stränge/Module)	4 × 8 × 6 Module
Azimut (Ausrichtung)	–14° (Ost)
Elevation (Neigung)	30°
Leistung	20,4 kW_p (STC)
Spannung	96 V
Wechselrichter	
Leistung	20 kW

STC = Standard Test Conditions: Globalstrahlung 1 kW/m², Modultemperatur 25 °C, Spektrum AM 1.5

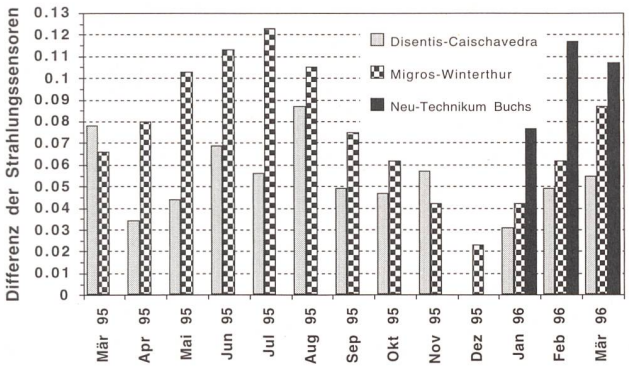


Bild 14 Unterschiede zwischen der Globalstrahlungsmessung mit Pyranometern und mit Referenzzellen, Monatsmittelwerte.

gen im Leistungsbereich von 5 bis 20 kW_p. Bereits liegen erste Messergebnisse vor, die der neuen Photovoltaikanlage ein einwandfreies Betriebsverhalten attestieren. Die noch anstehenden Probleme der zu geringen Modulleistung werden in Zusammenarbeit mit dem Hersteller bereinigt.

Die Betriebsüberwachung und standardisierte Datenanalyse der Solaranlage Neu-Technikum Buchs erfolgt im Rahmen der 1-Megawatt-Solarkette der NOK. Weiter wird beabsichtigt, durch Studienarbeiten einen detaillierten Einblick in die Verluste des Gesamtsystems zu erhalten. Insbesondere soll sorgfältig abgeklärt werden, wie sich diese zusammensetzen. Das erfordert eine Auswertung der technischen Daten der Anlage, die entsprechende Modellbildung, die Hochrechnung und schliesslich einen Vergleich mit den gemessenen Ertragsdaten. Dieser Vergleich zwischen der Modellrechnung und den eigentlichen Messdaten kann hier besonders aufschlussreich sein, weil durchwegs Präzisionsmesswandler zum Einsatz gekommen sind und das gesamte Datenakquisitionssystem durchgeprüft wurde.

Bereits ist in einer Diplomarbeit ein Messgerät entwickelt worden, welches das genaue Erfassen der Kennlinien und Kenngrössen der Module erlaubt. Mit diesem werden nun die Teilfelder ausgemessen, die Resultate mittels eines Solarzellenmodells auf Standardtestbedingungen (STC) hochgerechnet und mit den Angaben des Modulherstellers verglichen. Damit ist auch der Weg offen, die Leistungsabnahme durch Alterung und Verschmutzung gezielt zu verfolgen.

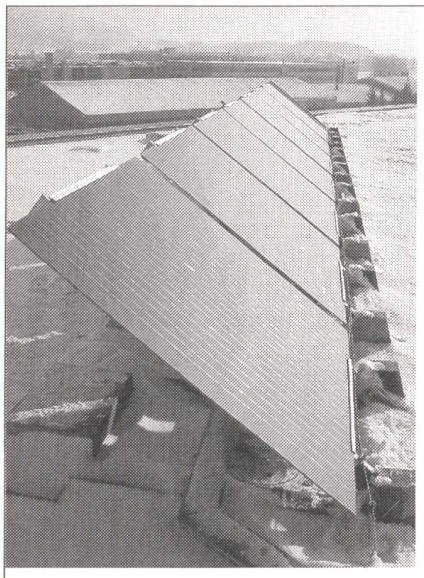
Literatur auf Anfrage

Symbole

- *Yr* Reference Yield: Normierte globale Einstrahlung auf die Modulebene [kWh/kW]
- *Ya* Array Yield: Normierter Energieertrag der Solarmodule [kWh/kW_p]
- *Yf* Final Yield: Normierte ins Netz eingespeiste Energiemenge [kWh/kW_p]
- *Ls* System Losses: Normierte Umwandlungsverluste des Wechselrichters [kWh/kW_p]
- *Lc* Capture Losses: Normierte Solargeneratorverluste, aufteilbar in temperaturbedingte (*Lct*) und temperaturunabhängige (*Lcm*) Verluste [kWh/kW_p]
- *PR* Performance Ratio: Leistungszahl, *PR* = *Yf/Yr* [%]
- G_h Globalstrahlung auf die Horizontalebene [kW/m²]
- G_a Globalstrahlung auf die Solarmodulebene [kW/m²]
- dG_a Relativer Unterschied zwischen der Globalstrahlung auf die Solarmodulebene, gemessen mit dem Pyranometer und jener mit der Referenzzelle [%]
- G_{stc} Normeinstrahlung: 1 kW/m²

Installation photovoltaïque de 20 KW des NOK et du NTB: dimensionnement, onduleur, mesures

Un bon interface entre l'école et l'industrie est d'une importance fondamentale pour une utilisation optimale des moyens consacrés à la recherche et au développement. Le projet d'installation photovoltaïque (20 kW) réalisé au Neu-Technikum Buchs (NTB) peut ici être considéré comme exemplaire, et ceci à deux points de vue. Premièrement, cette installation offre un contexte expérimental optimal pour développer un concept d'onduleur entièrement nouveau dans le cadre d'un projet de recherche, et deuxièmement les contacts de longue date existant entre le Neu-Technikum Buchs (NTB) et les Forces motrices du nord-est de la Suisse (NOK) ont abouti à un projet pilote commun, qui constitue un élément supplémentaire du projet «chaîne solaire de 1 mégawatt».



Neu

Sie können Ihre **Photovoltaik-Anlage** jetzt selbst bauen!*

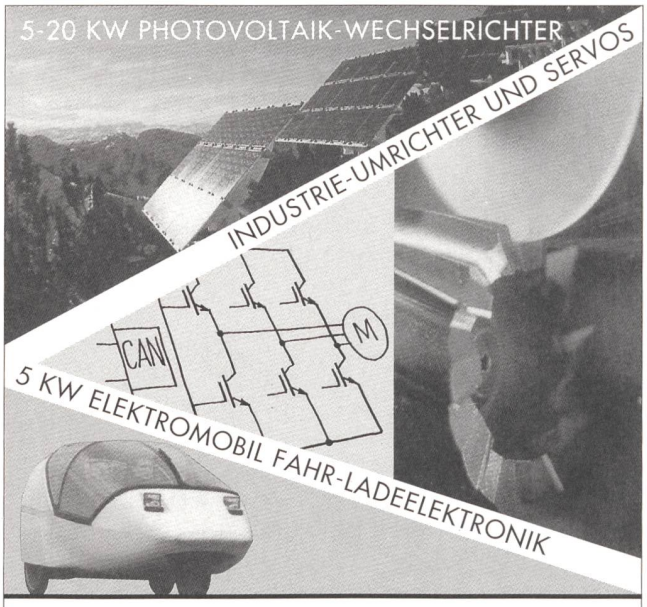
ATLANTIS 200W / 230V-Wechselstrom-Solarmodul

Montieren, anschliessen, Strom produzieren.

*Ihr lokaler Elektriker wird Sie dabei unterstützen

ATLANTIS ENERGIE AG

Lindenrain 4, 3012 Bern Telefon 031/300 32 20, Telefax 031/300 32 30



Wir sind Ihr Entwicklungspartner für High-Tech Antriebslösungen

- Leistungselektronik
- Steuer- und Regelsysteme
- Vernetzung, Software
- Drehstrommotoren, BLDC

Unsere Produkte werden in aller Welt kostengerecht in sehr hohen Stückzahlen gefertigt. Verlangen Sie unseren Lösungsvorschlag.

SCHMIDHAUSER AG

Entwicklungsteam für elektronische Systeme
CH-9315 Neukirch-Egnach

Telefon 071-474 70 30
Telefax 071-474 70 40

NIV-Prüfgerät «Ultratest»

- FI-Prüfung, AC und DC
- Isolationsmessung, 250 V–500 V–1000 V
- Erdungsmessung, 2-3-4-Leiter
- Schleifen – Kurzschluss Impedanzmessung > 400 kA
- Niederohmmessung
- Drehrichtung (Phasenfolge)
- Ausdruck auf Drucker und PC
- Das leichteste Gerät mit nur 1,6 kg

MESUCO

Mess- und Regeltechnik AG
Mesure et régulation SA

CH-8633 Wolfhausen
Tel. 055 253 40 70, Fax 055 253 40 71

AMAX *Solaire*

PHOTOVOLTAIK

Sämtliches Material für:

- Inselanlagen
- Netzeinspeisung

Für den Elektriker!

Lieferung in der ganzen Schweiz.

Qualität und 15 Jahre Erfahrung
Verlangen Sie unsere Preise!

Vy-Creuse 17 Postfach 549 **1196 GLAND**
Tel. 022 364 31 69 Fax 022 364 43 69

ECOPOWER®

DER NEUE FORTSCHRITTLICHE STATISCHE
LEISTUNGS-WECHSELRICHTER
FÜR PHOTOVOLTAISCHE ANWENDUNGEN
(AB 10 KW 3Ø BIS MW)

VORTEILE

- SELBSTGEFÜHRT (PWM 12/24 kHz)
- HOHER WIRKUNGSGRAD (95%)
- LEISTUNGSFAKTOR > 0,98 / 0,99
- STROMKLIRRFAKTOR < 4 %
- STROMOBERWELLEN < 2,5 %
- INDUSTRIEPRODUKT (standardisierte Ersatzteile)
- PARALLELSCHALTBAR OHNE BEGRENZUNG
- GROSSER UMGEBUNGS-TEMPERATURBEREICH (-20°/+50°C)
- GERÄUSCHENTWICKLUNG < 55 dB(A)
- "MPT"-REGELBEREICH: ± 15%
- MODULARER AUFBAU in IGBT-TECHNIK
- SCHRÄNKE aus rostfreiem Stahl für Aussenaufstellung geeignet

ERFÜLLTE NORMEN

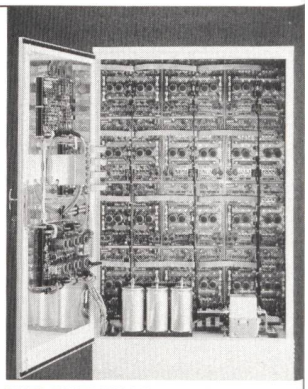
- VDE 0100 / 0160
- Entstörung: VDE 0875/N
- Netzrückwirkung: SEV 3600-1/ VDE 0160
- Qualitätsnorm ISO 9001
- Elektronikteil geschützt IP 54
- Konform der ESTI- Vorschriften

OPTIONEN

- Galvanische Trennung Array-Netz
- Vollständiges Fernmeßsystem und Fernausschaltung über PC (IBM komp.)

NEU SERIE MK II

- Preiswert
- Ausfürung IP 20



IMEL ENERGY AG
für Magnetics, UPS und Solar-Energy
CH-6595 Riazzino (Locarno)-SCHWEIZ
Tel. ++41/(91) 859 17 31
Fax ++41/(91) 859 17 32

Ein besonderer Vorteil: Der ECOPOWER-Wechselrichter, in Kombination mit dem PC-gesteuerten Fernsteuerungs- und Fernmeßsystem, kann über ein Modem mit unserer Kundendienstzentrale in Riazzino (Schweiz) verbunden werden.