

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:	7
Artikel:	Wurde die Beschattung unterschätzt? : Analyse der 50-kW-Photovoltaikanlage ISOKW in Brugg
Autor:	Weibel, Andreas / Dürr, Martin
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902311

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>

Ist das Mittelland ein geeigneter Standort für Solarzellenanlagen? Welchen Einfluss hat die Beschattung auf den Jahresertrag einer Photovoltaikanlage? Sind Programme zur Simulation solcher Anlagen in der Praxis brauchbar? Zur Beantwortung solcher Fragen wurde das Betriebsverhalten der im Herbst 1992 eingeweihten Solarzellenanlage ISOKW in Brugg näher untersucht. Die Arbeiten umfassten neben den direkten Messungen an der Anlage auch die Auswertung der über drei Jahre gesammelten Messdaten.

Wurde die Beschattung unterschätzt?

Analyse der 50-kW-Photovoltaikanlage ISOKW in Brugg

■ Andreas Weibel und Martin Dürr

Charakteristische Eigenschaften der PV-Anlage ISOKW

Die untersuchte Photovoltaikanlage befindet sich im aargauischen Brugg. Sie wurde im Herbst 1992 durch die Interessengemeinschaft ISOKW in Betrieb genommen und wird heute durch die Beratungsstelle Infoenergie betreut und verwaltet. Die Kosten für die gesamte Anlage betrugen 835 000 Franken, welche durch die öffentliche Hand, aber auch durch Firmen und Privatpersonen finanziert wurden. Auf dem Flachdach einer Fabrikationshalle der Kabelwerke Brugg AG sind 945 Solarzellenmodule des Typs Siemens M 55 mit je 53 W Nennleistung montiert. Dies ergibt eine Gesamtleistung von rund 50 kW, welche bei STC-Bedingungen (Standard Test Conditions: 25 °C Zellentemperatur, 1000 W/m² Sonneneinstrahlung) zur Verfügung steht. Auf der benutzten Dachfläche von 1300 m² wurden mittels geeigneten Metallträgern 350 m² aktive Solarzellenfläche (Flächennutzung 27%) mit einem Neigungswinkel von 30° montiert. Die Ausrichtung der Panel wurde dem Dach angepasst, welches 32° nach West orientiert ist. Somit ist das Solarfeld nicht optimal nach Süden ausgerichtet. Da aus statischen Gründen der Abstand der Modulreihen vorgegeben war, konnte eine gegenseitige Beschattung der Module während der Wintermonate nicht verhindert werden. Ebenso treten Beschat-

Solargrossanlagen erreichen meist nur während der Einweihungsphase ein gewisses Mass an öffentlichem Interesse. Nach einiger Betriebszeit geraten sie oft in Vergessenheit und sind nur noch für die Anlagenbetreiber und vielleicht für die Strombezüger von Interesse. Trotzdem sollten die Betriebserfahrungen solcher Stromerzeuger für die Forschung und Entwicklung im Bereich der Alternativenergieerzeugung genutzt, aber auch für die Planung anderer Anlagen weiter verwendet werden. Auch nicht zu unterschätzen ist die Tatsache, dass Schäden an Photovoltaik(PV)-Anlagen sowie schlechte Arbeitspunkte der Wechselrichter schwer feststellbar sind und so viele Solaranlagen über lange Zeit unerkannt schlechte Betriebsergebnisse liefern können. Dank einer gemeinsamen Initiative des Anlageverantwortlichen Martin Rauber und des Fachdozenten Prof. Dr. Heinrich Prechtl wurden die seit drei Jahren gesammelten Daten der ISOKW am Labor für Energietechnik der Ingenieurschule Rapperswil (ITR) aufbereitet und systematisch untersucht. Dies geschah im Rahmen einer Semester- und Diplomarbeit der Autoren dieses Artikels.

Adressen der Autoren:

Andreas Weibel, dipl. El.-Ing. HTL,
Jetter Steuerungstechnik, Münchwilerstrasse 21,
9554 Tägerschen, und
Martin Dürr, dipl. El.-Ing. HTL, TNC Consulting AG,
Asylstrasse 84, 8708 Männedorf.

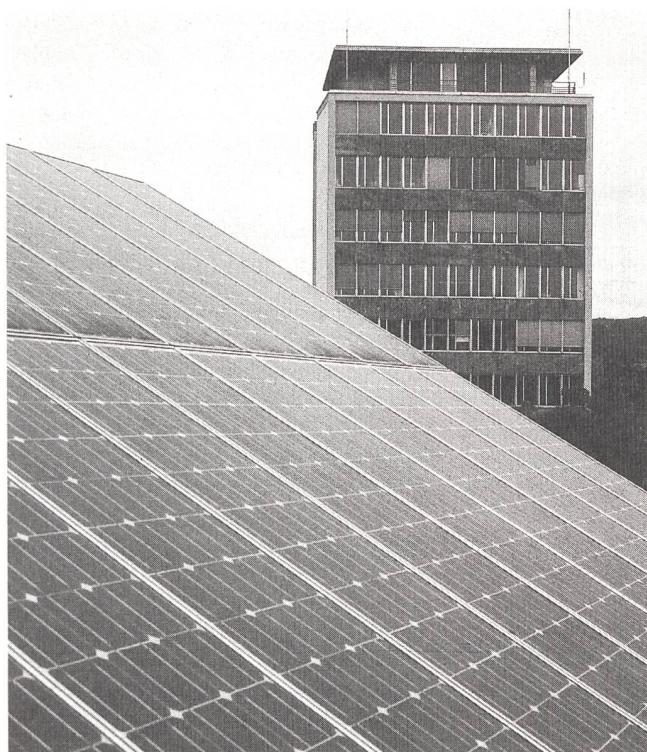


Bild 1 Die Beschattung des ISOKW verursacht eine Ertragseinbuße von rund 4,5%.

Die Anlage ISOKW in Brugg verliert während der Wintermonate Leistung infolge gegenseitiger Beschattung der Module, aber auch infolge Beschattung durch angrenzende Bürogebäude.

Gründen für diese Diskrepanz nachzugehen war eines der Ziele der weiteren Untersuchungen.

Eine nützliche Option von PVSIM für diese Abklärungen war die Möglichkeit des Datenimports. Damit konnten bestimmte Messdaten direkt in das Programm integriert und daraus die entsprechenden Soll-Werte berechnet werden. Mit Hilfe dieser Methode wurden insbesondere die Verluste infolge Beschattung berechnet. Das Programm konnte die in Brugg effektiv gemessenen Einstrahlungen und Außentemperaturen einlesen und danach die Soll-DC-Ausgangsleistungen für ein Jahr berechnen. Diese Rechenergebnisse wurden dann mit den effektiv an den Wechselrichter abgegebenen Leistungen (Energiemengen) verglichen. Die Differenz konnte als Beschattungsverluste interpretiert werden. Aus einem Vergleich der DC-Erträge mit den AC-Erträgen konnten zudem die Verluste infolge Ausfalls des Wechselrichters ermittelt werden.

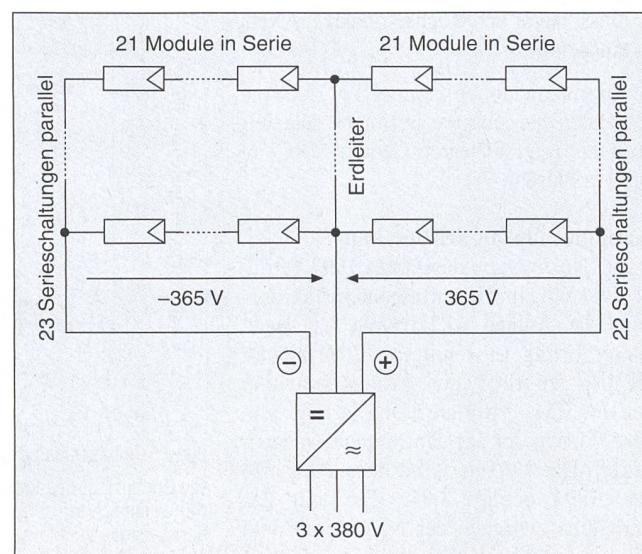
tungsverluste durch benachbarte Gebäude (Bild 1) und Werbebeschriftungen auf. Das Feld ist als Mittelpunktschaltung (Bild 2) verdrahtet, was eine positive und eine negative Spannungsebene ergibt. Ein Wechselrichter der Firma Invertomatic wandelt die $\pm 365\text{-V}$ -Gleichspannung in eine netzkonforme $3 \times 380\text{-V}$ -Wechselspannung um, welche ins öffentliche Netz der Industriellen Betriebe Brugg eingespeist wird. Die DC-Nennströme liegen im Bereich von 68 A. Eine im Wechselrichter installierte Messdatenerfassung misst alle 3 Sekunden 17 Anlagewerte. Zur Auswertung können die gespeicherten Daten mit einem Modem auf den PC geladen werden.

Anlage tage-, monats- und jahresweise berechnet werden kann. Die Meteonormdaten geben Auskunft über die Global- und Diffusustrahlung sowie die Temperaturverläufe in den meisten Schweizer Ortschaften und beruhen auf langjährigen Erfahrungswerten. Mit PVSIM und den erwähnten Daten wurde für die Anlage in Brugg ein Jahresenergieertrag (AC-Energie, welche ins Netz eingespeist werden kann) von 50 000 kWh errechnet. Gegenüber den 800 kWh, die (im Mittelland) pro kW installierter Nennleistung normalerweise erwartet werden dürfen, schien dieses Ergebnis allzu optimistisch. Bei der vorhandenen 50-kW-Nennleistung sollten also nach Erfahrung rund 40 000 kWh ins Netz eingespeist werden können. Den

Vergleich von Ertragssimulationen mit Messungen

Die Planung von grösseren Solaranlagen ist heutzutage ohne Rechnerunterstützung kaum mehr vorstellbar. Eine sehr nützliche Hilfe ist dabei die Ertragssimulation. In der Photovoltaiktechnik sind bereits einige Programme vorhanden. Für die hier beschriebenen Untersuchungen am ITR wurde das Programm PVSIM verwendet. Es ermöglicht, die komplette Anlage mit Modulen, Wechselrichtern und restlichen Anlagekomponenten zu konfigurieren. Zur korrekten Simulation sind ebenso die Eingabe der geographischen Lage, die Modulausrichtung und der Verlauf des Horizontes notwendig. Im Programm sind die Strahlungsdaten der Meteonorm enthalten, mit welchen der Ertrag einer PV-

Bild 2 Prinzipschaltbild der PV-Anlage ISOKW
Das Feld wurde als Mittelpunktschaltung ausgelegt; an den beiden Polen des Abgangs liegt eine positive oder eine negative Spannung von 365 V gegen Erde.



Photovoltaik

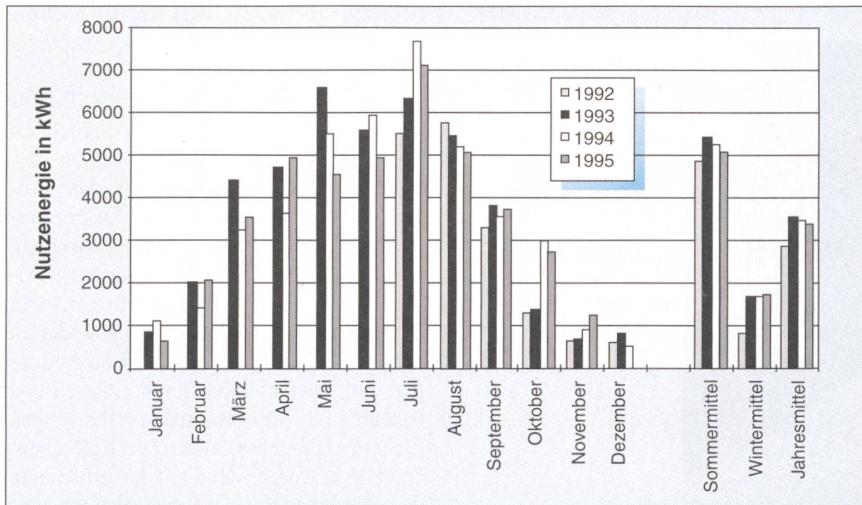


Bild 3 Energiebilanz der PV-Anlage ISOKW

Im Durchschnitt lieferte die Anlage von Juli 1992 bis November 1995 etwa 41 500 kWh Nutzenergie pro Jahr ins Netz. Der Einfluss der zahlreichen Nebeltage im Herbst ist sehr gut ersichtlich.

und auf dem Computer weiterverarbeitet werden.

Auswertung der gesammelten Daten

Aus den gesammelten Rohdaten wurden Stunden- und Tageswerte berechnet. Da die verwendeten Messdaten vom September 1992 bis Dezember 1995 nicht alle dasselbe Zeitintervall aufwiesen, musste dazu ein spezielles Softwareprogramm (in C++) geschrieben werden. Anhand der so erhaltenen Daten konnte die ganze Anlage schliesslich analysiert werden. Folgende Parameter wurden mit den Messdaten berechnet und dargestellt:

- Ertrag (Bild 3) und Nutzungsgrad der PV-Anlage
- Tagesverläufe der Einstrahlung und der Nutzleistung
- DC- und AC-Leistung in Abhängigkeit der Einstrahlung
- Einschaltschwelle des Wechselrichters (DC-Spannung, welche erreicht sein muss, bevor der Wechselrichter ins Netz einspeist)

Als nützliches Hilfsmittel zur Analyse der Daten hat sich die normierte Darstellung des Joint Research Centers (JRC) in Ispra erwiesen.

Zusammenfassung der Resultate

Die Nutzenergie des Jahres 1993 betrug 41 370 kWh, im darauffolgenden Jahr lieferte die Anlage 41 710 kWh ins Netz. Dieser Ertrag ist somit fast 20% kleiner als der aufgrund der Ertragssimulation mit PVSIM erwartete Jahresertrag von 50 000 kWh, der auf den Meteonormdaten basiert. Der Nutzungsgrad über das ganze Jahr 1994 beträgt 8,9%. Er stellt das Verhältnis zwischen der Nutzenergie und der eingestrahlten Energie dar. Infolge

mer. Der genaue Einfluss der Beschattung auf die Leistung wird im nächsten Kapitel beschrieben. Der geschätzte Verlust durch die Beschattung betrug im Jahre 1994 etwa 1930 kWh, was ungefähr 4,5% des gesamten Jahresertrages entspricht.

Detailmessungen und Feinanalyse

Messungen am Wechselrichter und am Solarfeld

Ziel der Messungen war, den Wirkungsgrad des Wechselrichters und die Genauigkeit der Datenerfassung nachzuprüfen. Infolge schlechten Wetters (zahlreiche Nebeltage) konnte der 60-kW-Wechselrichter nur im untersten Leistungsbereich überprüft werden. Bei einer AC-Leistung von 2 kW erreicht er einen Wirkungsgrad von über 70%, was in etwa mit den Angaben des Herstellers übereinstimmt. Zur Bestimmung der Gleichströme wurden Transformator-Shunts eingesetzt. Die Wechselströme wurden mit Durchsteckwählern gemessen. Diese Messwandler wurden auch zur Überprüfung des eingebrachten Messsystems eingesetzt. Bei der Analyse der Messdaten stellte sich heraus, dass die Werte auf der DC-Seite nur geringe, die AC-Werte aber grössere Unterschiede aufweisen. Eine mögliche Ursache ist der ungünstige Einbauort der Durchsteckwandler. Sie sind in der Nähe von grossen Drosselpulsen des Wechselrichters angebracht, so dass die dort herrschenden Streufelder die Messungen wahrscheinlich stark beeinflussen.

Weiter wurden die Module mit Hilfe eines sogenannten PV-Field-Testers ausgemessen. Anhand der Spannungs- und Stromkennlinien kann damit ein defektes Modul erkannt werden. Beim ISOKW wurden alle 945 M 55-Module in Ordnung befunden.

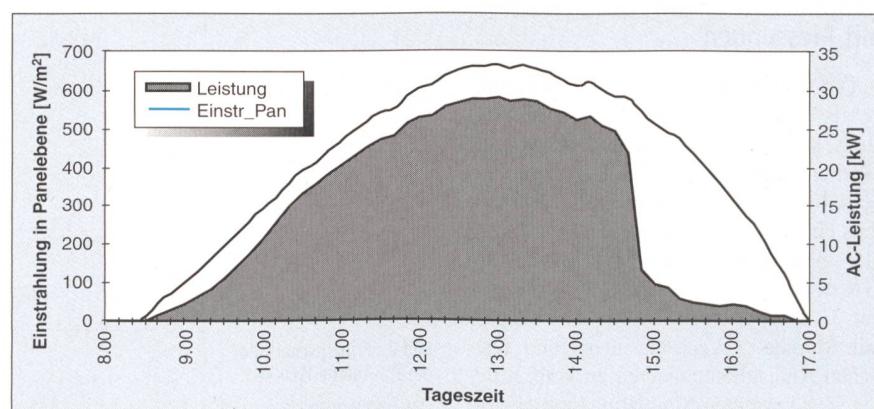


Bild 4 Globalstrahlung und AC-Leistung im Vergleich

Die Grafik zeigt den Verlauf der Globalstrahlung in der Paneelebene (einfache Kurve) und der AC-Leistung (Kurve mit Schraffur) für den 18. Januar 1994. Der Leistungsverlust infolge Beschattung durch das Bürogebäude am Morgen (bis 10.20 Uhr) ist gering, aber deutlich sichtbar. Es fällt ebenso auf, wie die Leistung am Nachmittag zusammenbricht, sobald sich die Module gegenseitig beschatten.

Ertragseinbusse durch Beschattung

Wie schon erwähnt, beschatten sich die Module in den Wintermonaten gegenseitig. Den Einfluss der Beschattung nachzuvollziehen war ein weiteres Ziel der Untersuchungen; dazu wäre aber ein sonniger Tag nötig gewesen. Da sich die Sonne während der zur Verfügung stehenden Zeit nicht zeigte, wurde nach einer anderen Lösung gesucht. Diese ergab sich dann eher unerwartet. Die Wetterverhältnisse wurden in der fraglichen Zeit (Dezember 1995) noch schlechter, und als Zugabe wurde die Anlage auch noch von einer dünnen Schneeschicht bedeckt. Durch systematisches Reinigen der Module vom Schnee konnte die Beschattung realitätsnah simuliert werden.

Zuerst wurde nur die obere Hälfte des ganzen Feldes vom Schnee befreit. Anhand der Bilder 5 und 6 ist erkennbar, dass bei diesem Vorgehen die Hälfte jeder Serieschaltung noch vom Schnee «beschattet» wird. Welche Auswirkung das auf die DC-Leistung hat, ist im Bild 7 zu sehen. Während der ersten 23 Minuten der Messzeit (untere Hälfte des Feldes noch schneedeckt) ist die Leistung praktisch gleich Null. Sobald jedoch die Minusseite des ersten Arrays schneefrei ist, schnellt die Leistung P- in die Höhe. Danach kommt die Plusseite dazu, was als zweite Spitze um 12.37 Uhr zu erkennen ist. So kann jeder «Buckel» als Zuschaltung eines Arrays interpretiert werden (1 Array = 4 Reihen = 12 Serieschaltungen, je 6 Plus- und 6 Minuspole). Die letzten zwei Leistungsschwankungen und der anschliessende Leistungsrückgang sind nicht mehr auf die Reinigung, sondern auf die wechselhafte Einstrahlung zurückzuführen.

Der krasse Leistungseinbruch während der Beschattung könnte durch eine andere



Bild 5 Beschattungssimulation

Um die Beschattung zu simulieren, wurde die Anlage nach und nach systematisch vom Schnee gereinigt.

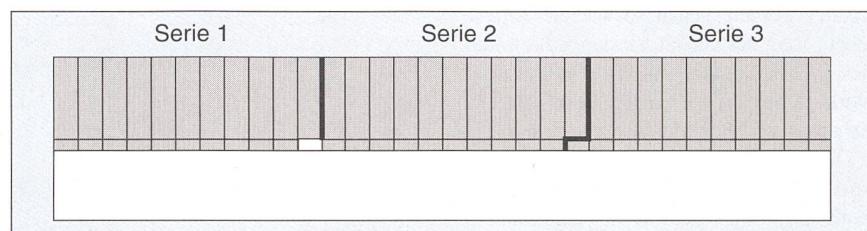


Bild 6 Vorgehensweise beim Abräumen des Schnees

Zuerst wurde die Schneedecke von der oberen, danach von der unteren Hälfte jeder Serieschaltung entfernt.

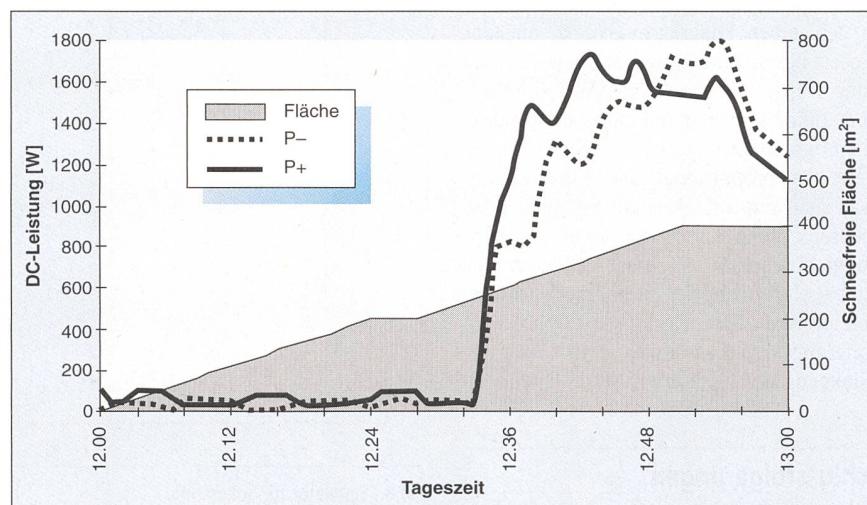


Bild 7 Verlauf der DC-Leistung während der Schneeräumung

Das Reinigen der oberen Hälfte jeder Serieschaltung hat praktisch keinen Einfluss auf die Leistung. Erst wenn eine ganze Serieschaltung schneefrei ist, nimmt die Leistung sprunghaft zu.

Beschattung der Module vermindert werden. Zum einen könnte bei der bestehenden Anordnung der Module je eine Serieschaltung aus der oberen und der unteren Reihe gebildet werden. Dabei würde aber die Leerlaufspannung um 240 V erhöht werden.

Andererseits könnten die Module waagrecht statt aufrecht montiert werden. Bei dieser Variante würde dieselbe Spannung

erreicht wie bei der bestehenden Anlage. Die Leistung würde aber bei Beschattung nicht so abrupt zusammenbrechen, weil die oberen zwei Serieschaltungen noch länger Strom liefern könnten.

Simulator zur Bestimmung der Beschattungsverluste

Da sich das Mittelland während der Diplomarbeit unter einer dicken Nebeldecke versteckte und die Aufgabenstellung unter anderem die genaue Bestimmung der Beschattungsverluste vorsah, wurde eine Methode entwickelt, mit der diese Einflüsse auch ohne Sonne abgeklärt werden konnten. Die Idee bestand darin, die gesamte Anlage als elektronische Ersatzschaltung in einem Elektronik-Simulationsprogramm aufzubauen und damit solche Ereignisse und ihre Auswirkungen simulieren zu lassen. Jede einzelne Solarzelle kann auf sehr einfache Weise dargestellt werden. Sie besteht primär aus einer Stromquelle, welcher eine parallele Diode angefügt ist. In dieser Weise können 36 «Zellen» in Serie geschaltet und so ein Modul simuliert werden. Hier können die Bypassdioden und sonstige Schutzelemente ebenfalls eingefügt werden. Auf dieselbe Art können die «Module» zusammengenge-

Photovoltaik

schaltet werden, genau so wie die Anlage gebaut ist (oder gebaut werden sollte). Auf diese Weise konnten mit Hilfe von Analog Work Bench (AWB) Zellen und Module realistisch nachgebildet werden (Bild 8).

Das Betriebsverhalten von Modulen wird vollständig durch die U/I-Kennlinie bestimmt. Wird einem Modul ein Kondensator zugeschaltet, so kann während des Ladevorgangs der Anstieg der Spannung und der Abfall des Stromes gemessen werden. Stellt man diese zwei Messreihen in demselben Diagramm dar, so entsteht die oben erwähnte Kennlinie. Dieser Vorgang wurde mit Hilfe von AWB simuliert und führte zu erstaunlich realitätsnahen Kennlinien. Der gelieferte Strom einer Zelle ist proportional zur Einstrahlung. Will man nun die Beschattung einer oder mehrerer Solarzellen oder sogar von Modulen simulieren, so muss lediglich der Kurzschlussstrom der Stromquelle verringert werden. Das Resultat ist eine Veränderung der Kennlinie, somit auch der Rückgang der gelieferten Modulleistung.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen an der Anlage ISO-KW in Brugg lassen folgende Schlüsse zu:

- Die Anlage arbeitet technisch einwandfrei; die einzelnen Komponenten sind unbeschädigt und gut eingestellt. Verluste entstehen ausschliesslich durch äussere Einflüsse wie das Wetter oder die Beschattung.
- Verluste durch die nichtoptimale Ausrichtung (32° West statt nach Süden) und durch die Beschattung wurden zu Beginn der Arbeiten überschätzt. Die Beschattungsverluste könnten trotzdem durch eine bessere Anordnung der Module verringert werden.
- Der Standort der ISOKW ist für ein solches Solarzellenfeld eher ungünstig. Viele Nebeltage verhindern eine optimale Energieerzeugung. Strahlungsvergleiche mit Anlagen an besseren Standorten (z. B. GR, TI) zeigen dies deutlich.
- Photovoltaik-Simulationsprogramme sind wertvolle Instrumente für die Beurteilung von Standorten, Ausrichtungen, Modulen, Wechselrichtern usw. Die errechneten Jahreserträge sind aber mit Vorsicht zu geniessen, da sie meist zu hoch liegen. Bei Analysen eignen sich die Programme aber sehr gut zum Erkennen von Verlusten.
- Ebenso verhält es sich mit den Strahlungsdaten der Meteonorm. Die Jahreserträge sind nur grobe Schätzungen, sagen über den Jahresverlauf wenig aus und fallen meist zu hoch aus. Trotzdem sollten sie bei der Planung grösserer Anlagen berücksichtigt werden.
- Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades eines Wechselrichters ist zu beachten, dass

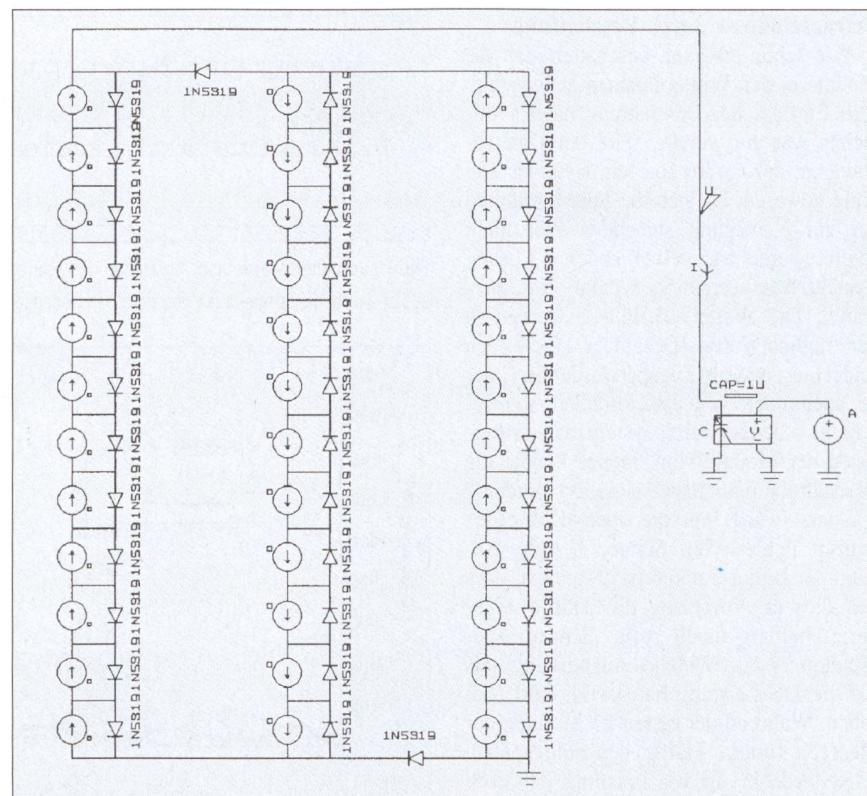


Bild 8 Simulator für Solarmodul

Mit dieser Schaltung, basierend auf dem Elektroniksimulationsprogramm AWB, wurde das Solarmodul Siemens M 55 nachgebildet und simuliert. Sichtbar sind die Ersatzschaltungen von 36 Solarzellen und die Kondensatorschaltung zur Aufnahme der U/I-Kennlinie.

konventionelle Messmethoden (Berechnung der AC- und DC-Leistung aus Strom und Spannung) schnell zu unrealistischen Resultaten führen können. Zu erklären ist dies mit der Tatsache, dass kleinste Messfehler der Geräte und Wandler sich gegenseitig beeinflussen und so rasch Fehler im Prozentbereich erreicht werden. Bei heutigen Wechselrichtern mit Wirkungsgraden um 95% wäre somit die exakte Bestimmung der Verlustleistung nur anhand von Abwärmemessungen sinnvoll. Dies ist jedoch nur in speziell ausgerüsteten Räumlichkeiten und nicht am Einsatzort möglich.

- Die normierte Darstellung der Analyseergebnisse erfordert sehr viel Arbeit und grosses Verständnis für die Photovoltaiktechnik. Sie ist trotzdem sehr nützlich bei der Analyse des Betriebs- und Störverhaltens und ermöglicht den Vergleich verschiedener Anlagen.

Schlussbemerkung

Die 50-kW-Solarzellenanlage ISOKW in Brugg ist für Besucher zugänglich. Interessenten können sich für eine Besichtigung anmelden bei Infoenergie, Beratungszentrale, Martin Rauber, Postfach, 5201 Brugg, Telefon 056 441 60 80.

A-t-on sous-estimé l'ombrage?

Analyse de l'installation photovoltaïque ISO-KW de 50 kW à Brugg

Le Plateau central convient-il bien aux installations de cellules solaires? Quelle est l'influence de l'ombrage sur le rendement annuel d'une installation photovoltaïque? Les programmes de simulation de telles installations sont-ils utilisables dans la pratique? Pour répondre à ces questions, on a examiné de près la tenue en service photovoltaïque de l'installation ISO-KW à Brugg, inaugurée en automne 1992 (figures 1 et 2). Outre les mesures directes sur l'installation, les travaux comportaient aussi l'analyse des données de mesure collectées sur plus de trois ans (figure 3). Les simulations de rendement avec le programme PVSIM, les comparaisons d'allure journalière entre l'insolation et la puissance AC cédée (figure 4), et les examens systématiques (figures 5-8) ont montré que l'ombrage réciproque des modules, spécialement au cours des mois d'hiver, n'est pas négligeable et qu'il peut entraîner de considérables pertes de puissance.