

**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:** 84 (1993)

**Heft:** 10

**Artikel:** 2,5-kW-Solaranlage "Solarturm"

**Autor:** Erni, Philippe

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902688>

### **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:** 14.01.2026

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

Aus Schulstuben- und Labortheorie wird Wirklichkeit: Die 2,5-kW-Photovoltaikanlage «Solarturm» gesellt sich zu den wenigen Vertretern sonnennachgeführter Solarkraftwerke Europas. Grösse, Möglichkeiten und Funktionalität machen das Projekt «Solarturm» jedoch zu einer einzigartigen Anlage ihrer Klasse. Die vielfältigen Messmöglichkeiten gestatten die Erforschung zweiachsig nachgeführter Solarpanels.

# 2,5-kW-Solaranlage «Solarturm»

■ Philippe Erni

## Einleitung

Im Rahmen eines KWF-Projektes (Kommission für wissenschaftliche Förderung) entschlossen sich Vertreter der Ingenieurschule Biel für den Bau einer zwar aufwendigen, aber um so interessanteren Sonnennachführung für Photovoltaikelemente. Als Financier und somit auch als Besitzer und Betreiber des Kleinkraftwerkes tat sich das Elektrizitätswerk der Stadt Biel als kooperativer Partner hervor.

An dieser Stelle soll bemerkt sein, dass in vorliegendem Artikel auf Kosten-Nutzen-Rechnungen verzichtet wird. Die Anlage ist in ihrer Funktion nicht nur ein reines Photovoltaikkraftwerk. Sie ist vielmehr auch als Instrument zu verstehen, mit dem die ISB (Ingenieurschule Biel) ein Werkzeug erhält, das der Erforschung von sonnennachgeführten Photovoltaikelementen dient. Bei der Konzeptionierung der Anlage wurde diesem Punkt besondere Beachtung geschenkt.

## Photovoltaik und Sonnennachführung

Nur wenige Kilometer vom Standort des Solarturmes (Bild 1) entfernt befinden sich die berühmten Twanner Weingebiete; an den Südhängen entlang des Bielersees gelegen. Was das nun mit einer Solarnachführung zu tun hat?

Nebst dem, dass beide, Wein- als auch «Solarbauer» bestrebt sind, die Sonnenenergie in eine «anwenderfreundliche Form» umzusetzen, gibt es noch einen weiteren Zusammenhang. Schon die Vorfahren der jetzigen Weinbauern haben lange vor unserer Zeit bemerkt, dass der Sonne zugewandte Flächen

die Sonnenstrahlen besser nutzen und somit wesentlich bessere Erträge liefern. Lassen wir den Wein im Keller und beschäftigen uns wieder mit Photovoltaik.

Photovoltaik nennt man einen Effekt, der sich an PN-Übergängen zeigt, sobald Strahlungsenergie einfällt. Durch die Strahlung angeregt, werden die Valenzelektronen des Halbleitermaterials auf ein höheres Energieniveau gebracht. Dies führt aufgrund verschieden dotierter Grundmaterialien zu einer Ladungstrennung und somit zum Aufbau einer Spannung. Letztlich ist es diese Spannung, die es gestattet, in einem geschlossenen Stromkreis einen Strom fliessen zu lassen.

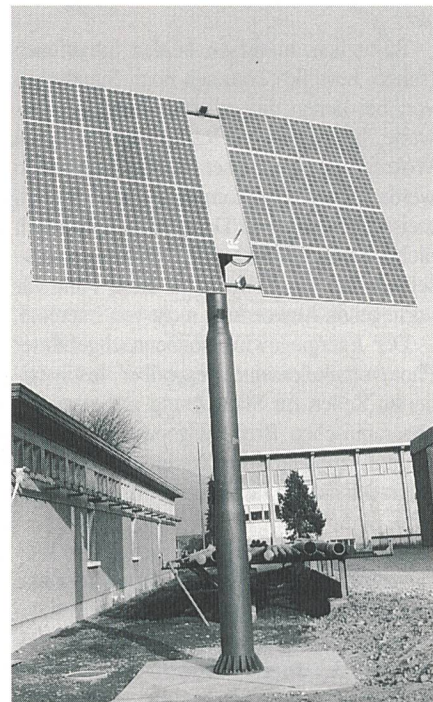


Bild 1 Nahaufnahme des Solarturmes. Das auf der grauen Fläche montierte Rohr dient der einfachen Kontrolle der Sonnenausrichtung; fällt das Sonnenlicht durch das Rohr auf die Mitte der weissen Platte, so ist die Fläche exakt der Sonne zugewandt



Wird nun die Oberfläche des photovoltaischen Elementes so zur Strahlungsquelle gerichtet, dass die Strahlung senkrecht einfällt, so erhält man die grösstmögliche Einstrahlung ohne Hilfsmittel wie Linsen oder Spiegel verwendet zu haben. Trifft die Strahlung nicht senkrecht ein, so verringert sich die der Strahlung ausgesetzte Oberfläche entsprechend dem Anstellwinkel und im weiteren wird ein Teil der Strahlungsenergie im gleichen Winkel wieder abgestrahlt, wie sie auf die Fläche eintrifft; sie ist für das Vorhaben, das Licht in elektrische Energie umzusetzen, verloren.

Die auf der Erde einfallende Sonnenstrahlung ist die Summe aus Diffusstrahlung und Direktstrahlung und wird Globalstrahlung genannt. Die Direktstrahlung ist jener Anteil der extraterrestrischen Strahlung, welcher von der Atmosphäre weder reflektiert noch absorbiert oder gestreut wird. Der Diffusanteil seinerseits besteht aus der Himmelsstrahlung (gestreute Strahlung) und aus der Reflexionsstrahlung.

Das Vorhandensein einer direkten Strahlungsquelle gilt in der Praxis für den Fall, wo der Direktstrahlungsanteil der Globalstrahlung am grössten ist. Das heisst, mit anderen Worten ausgedrückt; wenn es «schön» ist oder wenn «die Sonne scheint». Scheint die Sonne aber nicht, so gewinnt der Diffusanteil der Globalstrahlung zunehmend an Bedeutung. In einem solchen Fall, der zum Beispiel bei Bewölkung gegeben ist, werden die höchsten Einstrahlungswerte auf einer horizontal dem «Himmel» zugewandten Fläche gemessen.

Zusätzlich zu diesen beiden Situationen (schön, bewölkt) kommen noch Situationen vor, bei denen die grössten Einstrahlungswerte, bedingt durch Reflexionen (z.B. an Wolken), in irgend einer Richtung gemessen werden. Diese Vorkommnisse sind jedoch meist nur von kurzer Dauer bzw. heben sich nicht durch bedeutende Strahlungsunterschiede hervor. Somit sind diese Fälle für vorliegende Anwendung nicht von Interesse.

Der Energiegewinn sonnennachgeführter Photovoltaikmodule gegenüber festinstallierten Zellen (in Südrichtung mit einer der geographischen Breite angepassten, idealen Neigung montiert) beträgt in unseren Breitengraden auf die Jahreserträge bezogen etwa 25%.

Die Energiemengen, das heisst der Wirkungsgrad einer Photovoltaikanlage lässt sich durch die Nachführung der Zellen steigern.

Spricht man von einachsiger nachgeführter Solaranlage, so versteht man darunter eine Nachführung, bei welcher nur der Azimut ausgerichtet wird (Rotation um die vertikale Achse), wobei der Inklinationswinkel ein fester Neigungswinkel zugeordnet ist.

Bei der nun besprochenen Anlage handelt es sich um eine sogenannte zweiachsige

Nachführung, welche die Module in horizontaler Richtung (Inklination: Höhenwinkel-Nachführung) als auch in vertikaler Richtung (Rotation: Azimut-Nachführung) nachführt.

### Prinzip der «diskreten Nachführung»

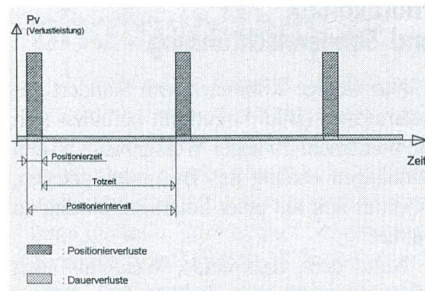
Der Grundgedanke vorliegender Nachführung basiert auf der Überlegung, möglichst effizient, also mit möglichst wenig Nachführverlusten zu positionieren. Diese Verluste, hier als elektrische Verlustenergien  $E_v$  betrachtet, ergeben sich aus der Zeit  $t$  und der Leistung  $P_v$  wie folgt:

$$E_v = P_v \cdot t \quad (1)$$

Die «verlorene» Energie wird demzufolge um so grösser, je grösser diese beiden Faktoren werden; entsprechend ist man bestrebt, sowohl  $P_v$  als auch  $t$  klein zu halten. Der Faktor  $P_v$  ist durch die Grösse der Antriebsmotoren der Nachführkonstruktion bzw. deren aufgenommene Leistung gegeben, die wiederum von den mechanischen Verlusten der bewegten Teile (Verstellmechanik) und der Motoren selbst bestimmt wird. Diese beiden Einflüsse sind nur mit einem grossen finanziellen Aufwand zu reduzieren. Dadurch kann dieser Faktor innerhalb eines gesetzten finanziellen Rahmens als gegeben und somit als Konstante betrachtet werden. In vorliegendem Fall gestattete das Budget die Verwendung von immerhin je einem Planetengetriebe pro Achse, das eine hohe Übersetzung (Erläuterungen zur Mechanik folgen später) mit gutem Wirkungsgrad aufweist.

So gesehen zeigt sich in (1) nur noch  $t$  als veränderbare Grösse für eine verlustarme Nachführung. Diese Voraussetzung wirft jetzt die Frage nach einem Konzept auf, das mit möglichst kurzen Positionierzeiten arbeitet und so ein optimales Verlust-Gewinn-Verhältnis liefert.

Das Ziel der Nachführsteuerung soll also sein, die Einschaltdauer der Motoren  $t$  so kurz wie möglich zu halten. Dies geschieht dadurch, dass nur dann neu positioniert wird,



**Bild 2** Es wurde eine Software entwickelt, die unter Vernachlässigung der Atmosphäre die theoretischen Verhältnisse zwischen dem Gewinn in der alten Position und dem Gewinn in der neuen Position als Funktion der «Totzeit» zwischen Positionierungen errechnet

wenn sich aufgrund der meteorologischen Situation unter Berücksichtigung der Nachführverluste ein Energiegewinn ergibt.

Zu diesem Zweck wurde eine Software entwickelt, die unter Vernachlässigung der Atmosphäre die theoretischen Verhältnisse zwischen Gewinn in der alten Position und dem Gewinn in der neuen Position in Funktion der «Totzeit» zwischen Positionierungen errechnet, wobei nur die direkte Strahlung von Interesse war (Bild 2).

Das Ergebnis des erstellten Programms lautet unter den bereits erwähnten Vernachlässigungen und bei noch nicht berücksichtigten Positionierverlusten wie folgt:

Sei  $D$  die auf eine beliebig geneigte Fläche einfallende Strahlungsintensität in  $W/m^2$  und  $D_0$  die extraterrestrische Strahlungsintensität (auch Solarkonstante genannt,  $D_0 = 1353 W/m^2$ ), so ergibt sich bei der Voraussetzung von  $D/D_0 = 0,99$  ein Positionierintervall von etwa 36 Minuten.

Lässt man also eine Fläche – nachdem man sie exakt dem Sonnenstand entsprechend ausgerichtet hat – 36 Minuten lang unbewegt stehen, so beträgt die einfallende, umsetzbare Strahlungsintensität noch 99% der maximal möglichen Strahlungsintensität  $D_0$ . Diese Werte sind theoretischer Natur, wobei sie für eine erste Näherung an effektiv herrschende Verhältnisse sehr dienlich sind.

### Standort

Die Wahl eines geeigneten Standortes kennt drei wesentliche Aspekte:

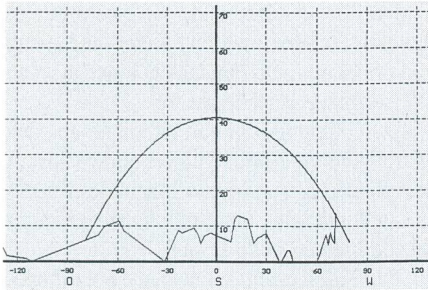
- Einstrahlungswerte (meteorologisch, topologisch und geographisch bedingt)
- Erschliessungskosten
- Bodenpreise

Die beiden letzteren Argumente sind zwar nicht unbedingt technischer Natur, aber dennoch mitentscheidend.

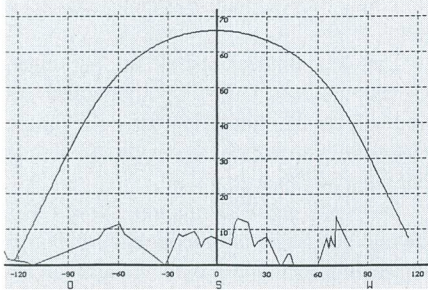
So war bei vorliegendem Fall ein relativ enger Rahmen für die Standortwahl durch das vom EW Biel zur Verfügung gestellte Gelände gegeben. Innerhalb von diesem Spielraum wurde nach einem optimalen Standort gesucht. Hierzu ist eine weitere Software entwickelt worden, welche für einen beliebigen Punkt des Geländes (beschrieben mit x-, y- und z-Koordinaten) die jährlich einfallende Strahlungsenergie sowie Sonnenstand und Horizont berechnet (Bild 3).

Als entscheidendes Kriterium ist der Horizontverlauf zu berücksichtigen. Das heisst, dass es von grosser Bedeutung ist, vor allem in den Sommermonaten möglichst wenig Schattenwurf auf die Zellenfelder zu erhalten. Das Resultat des relativ aufwendigen Programms war ernüchternd; sieht man die Solarzellen auf einer Höhe von 7 m über Bo-





**Bild 3a** Sonnenstandgrafik für Solarturm (März)



**Bild 3b Sonnenstandgrafik für Solarturm (Juni)**

den vor, so spielt der Standort innerhalb des Geländes keine grosse Rolle mehr.

Also gewann bei der Wahl eines geeigneten Standortes das Argument der Erschliessungskosten an Bedeutung. Die Lösung besteht nun darin, den Standort möglichst nahe am Messgebäude zu wählen. Dies erlaubt ausser der Kostenreduzierung die Verwendung kurzer Leitungen, was eine Verringerung von Leitungsverlusten sowie eine Reduktion der Störungsanfälligkeit mit sich bringt.

## Ausführung

Die Ausführung, also der Bau der Anlage gliedert sich in Unterkapitel wie

- Steuerung; Software, Hardware (Sensorik, Ansteuerungen usw.)
- Mechanik; Statik, Antrieb, Fertigung
- Energiegewinnung; Solarzellen, Wechselrichter, Messeinrichtungen

Eine Übersicht über die gesamte Anlage und deren Komponenten bietet Bild 4.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass aufgrund der verrichteten Vorarbeit theoretischer Art folgende Punkte vorausgesetzt wurden:

- Der Antrieb der Achsenverstellmechanik soll elektromechanisch erfolgen (also mittels Elektromotoren).
- Die Nachführung soll zweiachsig gebaut werden.
- Es sollen Solarzellen unterschiedlicher Machart verwendet werden, um Vergleichsmessungen zu ermöglichen.

## Steuerung

Das Prinzip der Nachführung beruht auf dem Grundgedanken der bereits erwähnten diskreten Nachführung. Eine weitere charakterisierende Eigenschaft der Steuerung ist die Vorgabe von Sollpositionen. Das heisst, die Anlage «sucht» nicht nach der maximalen Strahlungsintensität, sondern sie erhält von der Steuerung (speicherprogrammierbare Steuerung; SPS) direkt die Position vorgegeben, um maximale Energieumsetzung zu erzielen. Die Sollposition ist bei überwiegendem Direktstrahlungsanteil (Sonnenschein) durch die Berechnung des Sonnenstandes gegeben. Bei überwiegendem Diffusstrahlungsanteil ist die Horizontale als Sollposition gegeben, wobei diese Stellung für die Zellenfelder nur dann angefahren wird, wenn die diffuse Strahlungsintensität gross genug ist, um die Positionierverluste zu decken.

Die Positionierung nach berechneten Sollwerten bringt den Vorteil, dass die optimale Position für die Solarzellen nicht energetisch aufwendig gesucht werden muss (man denke hier an den Faktor  $\langle \tau \rangle$  aus [1] ), sondern auf direktem Weg angefahren werden kann.

Bei der Beurteilung der Strahlung wird nicht nur die Quantität, sondern auch die «Qualität» betrachtet, wodurch erwähnte Kriterien erkannt werden können. Dazu bedarf es mehrerer Sensoren, welche die einfallende Strahlungsintensität als Funktion der Einstrahlrichtung messen.

Zu diesem Zweck wurde ein Kandelaber errichtet, auf dem in einer Höhe von etwa 9 m über Boden die Sensoren aufgesetzt sind, die somit ähnliche Einstrahlungsverhältnisse antreffen (bezüglich Schattenwurf) wie die Zellenfelder der Nachführung. Als Sensoren dienen monokristalline Siliziumzellen, die über einen «Messshunt» im kurzschlussnahen Arbeitspunkt betrieben werden. Im Kurzschlussbetrieb haben diese Sensoren einen Stromverlauf, der zur Strahlungsinintensität direktproportional ist. Durch Wahl des gleichen Materials der Sensorzellen wie bei den Zellen auf dem Turm ergibt sich, dass die erfassten Lichtspektren gleich sind. Unmittelbar neben den Sensoren, ebenfalls auf dem Kandelaber befindet sich ein Spannungs-/Stromwandler, der vom Steuerrack ferngespiessen wird. Die Aufgabe des Wand-

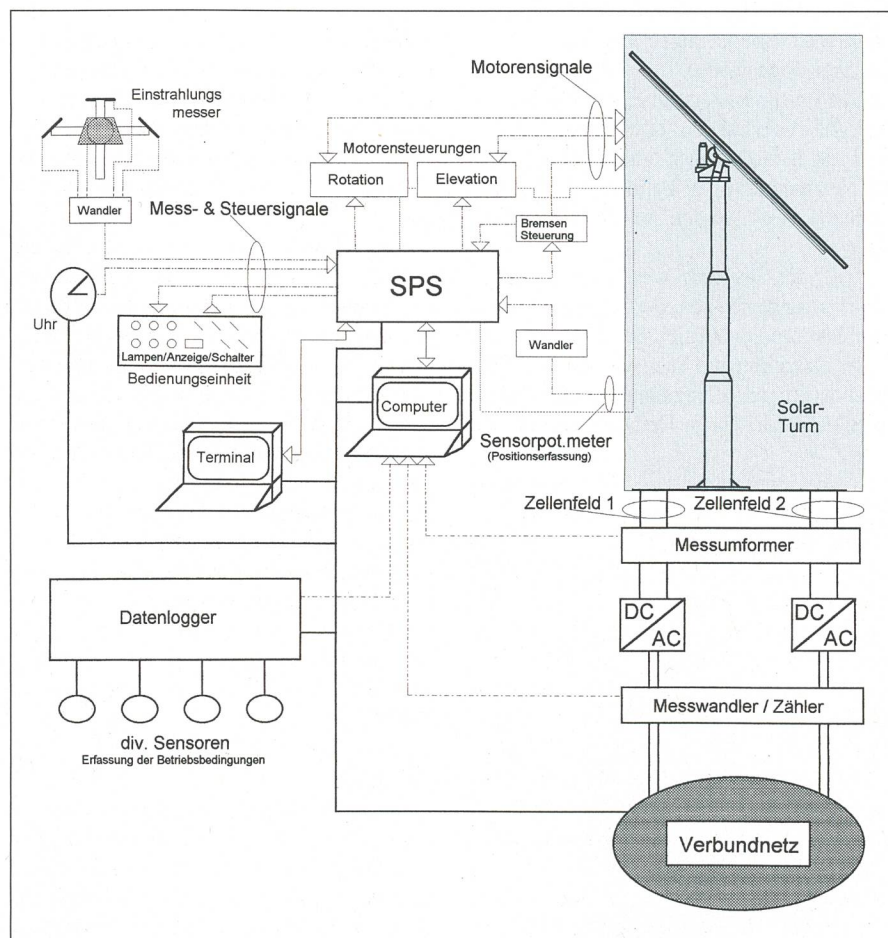


Bild 4 Blockschema des Solarturms

- Steuerleitungen für die Nachführung
- Energieleitungen
- Datenleitungen für Programmier- und Wartungsarbeiten
- Messleitungen für Experimentier- und Auswerteinrichtung
- Schutzleitungen



lers ist es, die über dem «Shunt» abfallende Spannung aufzubereiten.

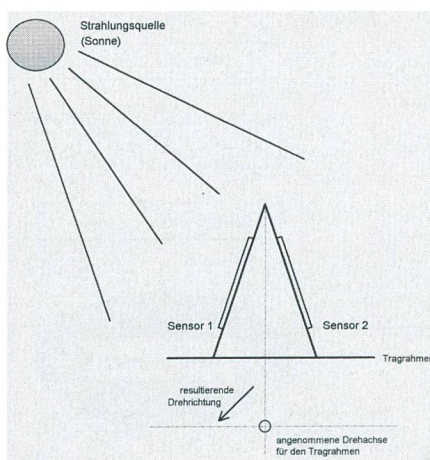
Eine weitere Massnahme zur Reduktion der Verluste wird durch die Abschaltung des Systems während den «Totzeiten» erreicht. Dies bedingt jedoch, dass die Steuerung bei erneutem Aufstarten noch immer über die Informationen über den Zustand und über die Position der Anlage verfügt. Deshalb werden keine Inkrementalgeber zur Positionserfassung, sondern Sensorpotentiometer mit hoher Auflösung (hohe Genauigkeit durch möglichst kleine Linearitätsabweichungen), also Absolutwertgeber verwendet.

Um eine weitgehend störungsfreie Übertragung der Schleiferspannung zu erreichen, wird diese über einen am Eingang hochohmigen Spannungs-/Stromwandler in eine Stromschleife im Bereich von  $\pm 20$  mA konvertiert, die wiederum über einen A/D-Wandler in einen digitalen Wert gewandelt wird, welcher von der SPS ausgewertet werden kann.

Ferner verfügt die Steuerung über die Möglichkeit, kontinuierlich in die Richtung der Einstrahlungsquelle mit der grössten Strahlungsintensität zu positionieren, also laufend durch Vergleichen nach der Position mit der grössten Ausbeute sucht. Diese Art von Nachführung dient jedoch aufgrund energetischer Überlegungen lediglich zu Testzwecken (siehe oben).

Das Prinzip basiert auf Einstrahlungsmessern, die direkt auf dem Tragrahmen montiert sind, auf dem sich auch die Solarmodule für Vergleichsmessungen befinden. Je nachzuführende Achse werden zwei Sensoren benötigt.

Trifft die Strahlung wie in Bild 5 dargestellt, ausgehend von der eingezeichneten Strahlungsquelle auf den Sensor 1, so misst dieser einen höheren Wert als Sensor 2. Bewegt man nun den Tragrahmen solange in die in Bild 5 angedeutete Drehrichtung, bis die



**Bild 5** Bewegt man den Tragrahmen so lange in die Drehrichtung, bis die Sensoren 1 und 2 die gleichen Werte messen, so ist der Tragrahmen mit den darauf montierten Solarmodulen der grösstmöglichen Strahlung ausgesetzt

Sensoren 1 und 2 die gleichen Werte messen, so ist der Tragrahmen mit den darauf montierten Solarmodulen der grösstmöglichen Strahlung ausgesetzt, die man durch drehen um die in der Skizze angenommene Drehachse (z.B. die vertikale Achse, also für Azimut-Ausrichtung) erreichen kann. Dieses Vorgehen bleibt sich dem Prinzip nach für Azimut- und Höhenwinkelnachführung gleich.

Wie erwähnt bedingt diese Art der Nachführung den Nachteil hoher Nachführverluste, berücksichtigt man die in der Praxis oft auftretenden Spezialfälle, wo Initialisierungspositionen angefahren werden müssen bzw. die Strahlungsquelle vorerst «gesucht» werden muss.

Beispiel: Im Sommer überstreicht die Sonnenbahn für den Azimut bis zu  $\pm 127^\circ$  (ausgehend von Südrichtung). Befindet sich nun das Zellenfeld bei Sonnenaufgang noch immer in der Stellung, die für den Sonnenuntergang des Vortages entsprechend optimal war, so werden die Sensoren keine Direktstrahlung messen können (obwohl vorhanden). Die Gegenmassnahme besteht darin, Initialpositionen anzufahren bzw. eine «Nachrückführung» (Nachrückführung; während der Nacht in die für den nächsten Morgen optimale Stellung positionieren) vorzunehmen. Im Falle einer Schlechtwetter-situation am Morgen des nachfolgenden Tages und Wetterbesserung zum Beispiel am frühen Nachmittag ist eine solche Rückführung jedoch ohne Sinn geblieben, obwohl Energie für die Positionierung aufgewendet wurde.

Rechnet man all diese unnötigen, bei genannter Nachführungsart aber schwer vermeidbaren Verluste zusammen, so stellt man auf die Dauer beachtliche Einbussen fest.

Die Motoren, es handelt sich um zwei identische DC-Motoren, werden von einer getrennten Motorensteuerung geregelt und versorgt. Die SPS hat lediglich die Aufgabe, Soll- und Istposition der Tragrahmenmechanik zu vergleichen und dementsprechend die Panels durch Befehle an die Motorensteuerung zu positionieren. Speisung, Regelung und Drehzahlüberwachung der Motoren übernehmen die im Blockschema dargestellten Motorensteuerungen, wobei es sich hier um ein auf dem Markt angebotenes Produkt handelt.

### Mechanik

Die Höhe der horizontalen Drehachse zur «Erweiterung des Horizontes» wurde auf 7 m Höhe festgesetzt. Um diese Höhe zu erreichen, ist die gesamte Drehmechanik auf einer Plattform angeordnet, die drehbar auf dem gegen oben verjüngten Turm befestigt ist. Der Turm besteht aus Stahlrohren mit drei verschiedenen Rohrdurchmessern. Die Rohre sind mit den dazwischenliegenden Reduzierstücken verschweisst.

Der Turm selbst steht auf einem  $10 \text{ m}^3$  grossen, eisenarmierten Betonfundament, wo er mit einer im Fundament eingelassenen Versetzplatte verschraubt ist.

Das Führungsrohr für sämtliche auf den Turm geführten Leitungen verläuft im Innern des Rohrturmes sowie im Innern des Fundamentes und wird unterirdisch ins nebenstehende Messgebäude geführt.

Der Tragrahmen, auf dem die Solarmodule befestigt sind, besteht aus zusammengeschweissten Vierkantrohren unterschiedlicher Festigkeit. Die Welle des Tragrahmens wird von zwei Stehlägern gehalten und gelagert.

Die Tragrahmenkonstruktion hat einen Stellbereich von  $0$  bis  $90^\circ$  (horizontal bis vertikal) für die Inklination und  $360^\circ$  für die Rotation, wobei diese durch die Steuerung auf etwa  $340^\circ$  begrenzt wird.

Die Statik der Konstruktion ist nach SIA für die der Norm entsprechenden, maximal anzunehmenden Windgeschwindigkeiten bei einer Zellenfeldgrösse bis  $30 \text{ m}^2$  ausgelegt, wobei jeweils der schlechteste Fall (Tragrahmenposition mit grösstem Windangriff) betrachtet wird.

Die statischen als auch dynamischen Berechnungen der Stahlkonstruktion wurden in Form einer Vorprojektstudie an der Ingenieurschule Biel durchgeführt. Detailplanung sowie Ausführung wurden von der auf Anlagebau spezialisierten Firma «Ingenieurbüro Meyer, Deitingen», übernommen. Das Gewicht des Stahlbaus ohne Solarzellen, Motoren, Getriebe usw. beträgt rund  $1300 \text{ kg}$ .

Die Achsen der Anlage werden von je einem Gleichstrommotor gleicher Grösse (etwa  $300 \text{ W}$ ) mit integrierter Stillstandsbremse über Planetengetriebe verstellte.

Das Getriebe für den Rotationsantrieb hat eine Untersetzung von  $3477 : 1$ , wobei das nachfolgende Vorgelege eine weitere Untersetzung (Ritzel auf Abtriebswelle zu Drehkranz) aufweist. Der Drehkranz ist fest mit dem Turm verbunden. Motor und Getriebe sind auf einer drehbaren Plattform montiert, die über ein Wälzlager am Drehkranz befestigt ist.

Der Motor für die Verstellung der horizontalen Achse – der Inklinationsantrieb – wirkt über ein Planetengetriebe mit einer Untersetzung von  $1304 : 1$  auf den Tragrahmen, auch hier an ein Vorgelege anschliessend. Das Vorgelege besteht in diesem Fall aus dem Ritzel – auf der Abtriebswelle des Getriebes montiert – und einem mit dem Tragrahmen fest verbundenen Zahnkranzsegment. Diese grossen Übersetzungsverhältnisse ermöglichen die problemlose Bewältigung der grossen Momente an den Abtriebsachsen der Getriebe mit verhältnismässig kleinen Motoren. Die Momente sind durch die beachtliche Windangriffsfläche der Solarmodule gegeben.



Durch die grossen Übersetzungen kann durchaus von einer Selbsthemmung ausgegangen werden. Zur Sicherheit wurden jedoch Motoren mit eingebauten Stillstandsbremsen – nach dem Ruhestromprinzip gebaut – eingesetzt.

## Solarzellen/Wechselrichter

Um die Betriebseigenschaften zweier verschieden gefertigter Solargeneratoren, bestehend aus poly- bzw. monokristallinen Siliziumzellen, zu untersuchen, wurde die Nutzfläche auf dem Tragrahmen der Nachführkonstruktion in zwei getrennte Felder aufgeteilt.

Das eine besteht aus 24 Solarmodulen (ein Modul besteht aus 36 Stück monokristallinen Siliziumzellen) des Typs BP Solar 255 mit 55 W angegebener Leistung je Modul (bei 25 °C Zelltemperatur und einer 1000 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung). Das andere Feld besteht aus 24 Solarmodulen des Typs Kyocera LA361K51, die jedoch aus 36 Stück polykristallinen Siliziumzellen aufgebaut sind, mit 51 W Leistung pro Modul (bei 25 °C Zelltemperatur und 1000 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung). Die Angaben sind den jeweiligen Katalogen entnommen.

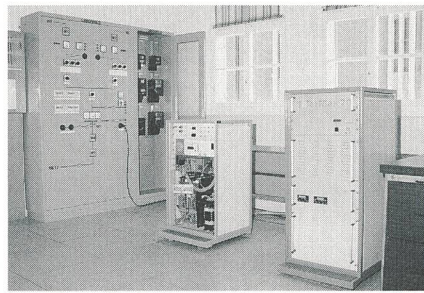
Die Module sind wie folgt geschaltet: Sechs Module werden in Serie zu einem Strang verbunden, vier solcher Stränge parallel. Dies ergibt ein Feld von total 24 Modulen. Die Nennspannung beträgt bei einer solchen Schaltung der Module zwischen 80 und 120 Volt (Spannung unter Last bzw. im Leerlauf), was dem geforderten Eingangsspannungsbereich der Wechselrichter entspricht.

Die beiden Zellenfelder werden getrennt auf je einen Wechselrichter Typ SMA PV-WR 1500 geführt. Diese Trennung hat den Vorteil, dass beide Zellenfelder, die ja verschiedene Betriebseigenschaften aufweisen, vom Wechselrichter im sogenannten MPP («Maximum Power Point»), dem optimalen Arbeitspunkt für das entsprechende Zellenfeld, betrieben werden.

Die Trennung gestattet auch die getrennte Einspeisung des durch die beiden Zellenfelder erzeugten Stroms ins Verbundnetz, was das Messen und deren Auswertung vereinfacht, ja selbst zu deren Richtigkeit beiträgt (Problematik des MPP).

Zu diesem Zweck wurde jeder der beiden Wechselrichter eigens mit einem Zähler ausgestattet, der die abgegebene Energie des entsprechenden Zellenfeldes erfasst.

Die Einspeisung der vom Wechselrichter konvertierten 230 V Wechselspannung ist einphasig. Die Wechselrichter arbeiten nach dem Prinzip der PWM (Puls-Weiten-Modulation). Dies erlaubt eine qualitativ hochstehende Wandlung der anfallenden Gleichspannung in die abzugebende Wechselspannung.



**Bild 6** Blick in das Messgebäude der Solaranlage: Messschrank im Hintergrund, in der Mitte das Steuerrack für den Solarturm, daneben der 20-kW-Wechselrichter für die am Boden fest installierte Photovoltaikanlage

## Mess- und Auswerteinrichtungen

Bei den Messungen geht es in erster Linie darum, so viele Daten wie nötig zu erfassen. Das heisst aber auch, Möglichkeiten für eventuelle Versuchsreihen offen zu halten.

Die verschiedenen zu messenden Daten lassen sich in Themenkreise einordnen, welche durch die zu untersuchenden Komponenten gegeben sind. Die wichtigsten dieser Themenkreise und deren zu erfassenden Daten lauten wie folgt:

- Solarzellen: Betriebswerte (Spannung, Strom, Zelltemperaturen) Betriebsbedingungen (Umgebungstemperatur, Einstrahlungswerte)
- Wechselrichter: Betriebswerte (Spannung, Strom; jeweils primär und sekundär)
- Nachführung: Betriebswerte (Leistung, energieeinspeisend, dito beziehend), Betriebsbedingungen (Einstrahlung, Einstrahldauer, Verfügbarkeit)

Als weiterer, eher seltener und daher speziell zu erwähnender Themenkreis kann das Netz angesehen werden. Dadurch, dass Betreiber und Eigentümer der Anlage ein Elektrizitätswerk, also ein Netzbetreiber ist, öffnen sich für Versuchsanordnungen luxuriöse Möglichkeiten. An erster Stelle steht hier das Untersuchen der einspeisenden Elemente gegenüber dem Netz bzw. umgekehrt; Selbstlauf, Phasenwinkel, Rundsteuersignale, um einige Beispiele zu nennen.

## Solarzellen

Es sollen die langfristigen Betriebseigenschaften von mono- gegenüber polykristallinen Solarzellen untersucht werden. Zu diesem Zweck werden Daten wie Zelltemperatur, Spannung und Strom in Langzeitmessungen erfasst. Gleichzeitig werden Umgebungstemperatur und Einstrahlungswerte gemessen.

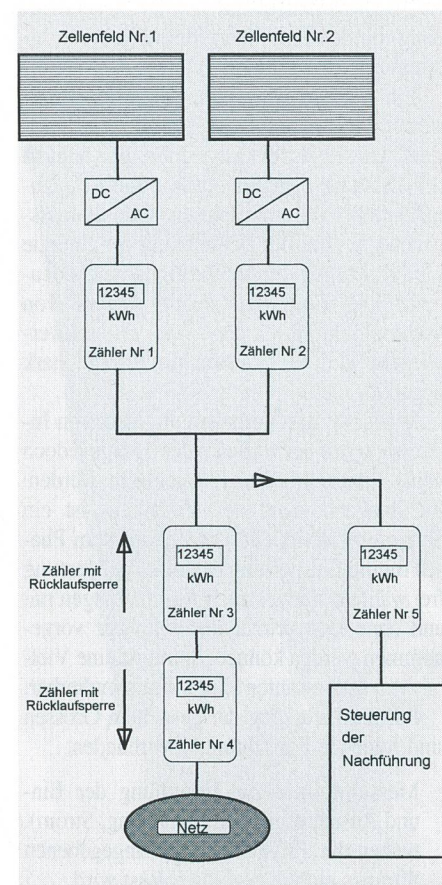
Anhand dieser Grössen soll anschliessend in Form von Semester- und Diplomarbeiten

an der Ingenieurschule Biel eine Auswertung stattfinden, die über das Betriebsverhalten dieser Komponenten unter bestimmten Umständen oder im langfristigen Einsatz Aufschluss geben sollen.

Für die Erfassung dieser Daten sind folgende Einrichtungen vorhanden:

- Strahlungsmesser:  
Pyranometer zur Erfassung der Globalstrahlung  
Pyranometer mit Schattenring zur Erfassung der Diffusstrahlung
- Temperatur:  
Temperatursensoren an zwei verschiedenen Solarmodulen  
Temperatursensor für Umgebungstemperaturmessung nach SMA-Standard (Schweizerische Meteorologische Anstalt)
- Strom, Spannung:  
Messumformer pro Panelfeld primärseitig (DC)  
dito sekundärseitig (AC)  
diverse Zähler (Bild 7)

Die zu erfassenden Daten werden von einem Datenlogger registriert bzw. direkt von einem PC eingelesen und ausgewertet.



**Bild 7** Zwei Zähler mit Rücklaufsperrn, welche die effektiv abgegebene (Zähler Nr. 1) sowie die aufgenommene (Zähler Nr. 3) Energie des Solarturmes messen



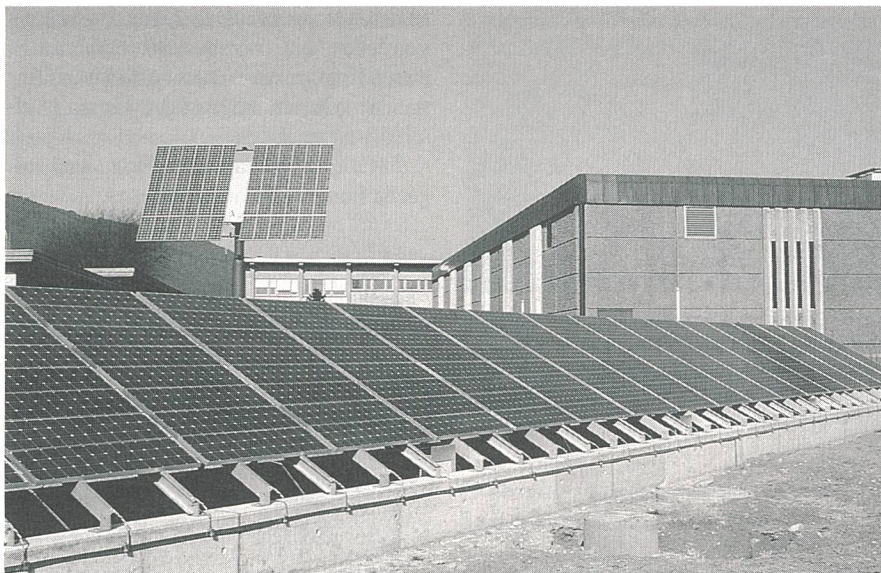


Bild 8 Gesamtansicht des Unterwerks Mett des Elektrizitätswerkes Biel und der BKW.  
Im Vordergrund die festmontierte 22-kW-Photovoltaikanlage und dahinter der Solarturm

### Wechselrichter

Dem Wechselrichter sollte im Zusammenhang mit den Solarzellen insofern Beachtung geschenkt werden, als dass er das Betriebsverhalten der Solargeneratoren durch sein MPT («Maximum Power Tracking») beeinflusst. Diese Daten sind also im Zusammenhang mit den erwähnten Messungen von Interesse.

Ein weiteres Kriterium, das bei Wechselrichtern von Interesse ist, ist sein Wirkungsgrad. Dieser Aspekt ist jedoch, nur anhand der Leistung beurteilt etwas trügerisch, zumal letztlich die eingespiesene Energie massgebend ist. Bei der Betrachtung der Energie wird das Argument der Verfügbarkeit bedeutend. Die Einbussen durch Ausfall von Wechselrichtern zeigen sich als schwerwiegend und beeinflussen die Erträge stark negativ.

Weiter ist das Verhalten am Netz von Interesse, wozu bei vorliegender Anlage jedoch keine Langzeitmessungen gemacht werden. Zu Beobachtungen des Verhaltens ist ein Schaltschrank erstellt worden, auf dem Phasen für die Einspeisung bzw. für die Messung frei wählbar sind als auch Abschaltungen mit und ohne Last primär und sekundär vorgenommen werden können. Somit ist eine Vielfalt von interessanten Zuständen simulierbar.

Für die Erfassung der gesuchten Grössen sind folgende Einrichtungen vorhanden:

- Messumformer zur Ermittlung der Ein- und Ausgangsgrössen (Spannung, Strom), wobei die Phasenlage des abgegebenen Stromes nicht langfristig erfasst wird.
- Ein im Wechselrichter integrierter Zähler sowie Spitzenwerterfassung und Speicherung (ebenfalls im Wechselrichter integriert).

- Schaltschrank mit herausgeführten Klemmen und Buchsen sowie Anzeigeinstrumenten für Strom und Spannung.

### Nachführung

An dieser Stelle tritt der eigentliche Hauptgedanke, die Vorteile einer Nachführung in unseren Breitengraden (und Längengraden) zu untersuchen, wieder in den Vordergrund. Vorteil bedeutet in diesem Zusammenhang in erster Linie der Energiegewinn gegenüber einer festinstallierten Anlage.

Die Ermittlung des Gewinnes wird erreicht, indem von der an das Verbundnetz

abgegebenen Energie die bezogene subtrahiert und mit der abgegebenen Energie einer festinstallierten Anlage verglichen wird.

Zu diesem Zweck wurden zwei Zähler mit Rücklaufsperrn installiert, die einerseits die effektiv abgegebene (Zähler Nr. 1) sowie die aufgenommene (Zähler Nr. 3) Energie des Solarturmes messen (Bild 7). Zwei weitere Zähler (Zähler Nr. 1 und 2) messen die pro Feld abgegebene Energie und ein fünfter Zähler (Zähler Nr. 5) misst den Eigenverbrauch der Nachführung.

Um die so erhaltenen Werte der Nachführung mit denen einer stationären Anlage zu vergleichen, ist auf dem gleichen Gelände ein Solarkraftwerk mit installierten 22 kW gebaut worden (Bild 8), deren Wechselrichter sich im gleichen Gebäude wie Steuerung und Wechselrichter der Nachführung befindet.

Auch das stationäre 22-kW-Solarkraftwerk ist mit einer grossen Anzahl von Messmöglichkeiten versehen, um gleich wie beim Solarturm Langzeitmessungen zu machen.

Für die Schlussfolgerung werden nun die Messresultate der festinstallierten Anlage entsprechend dem Verhältnis der installierten Leistungen (bzw. der jeweiligen Anzahl montierter Solarzellen) mit den Erträgen der Nachführung verglichen und ausgewertet.

Wie auch immer die Ergebnisse ausfallen werden, so ist schon jetzt ein Erfolg zu verzeichnen. Das Schaffen von Ausbildungsplätzen auf dem Gebiet der Photovoltaik für angehende Ingenieure ist ebenso selten wie notwendig. Mit dem hier vorgestellten Projekt ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung getan worden.

## «Tour solaire» de 2,5 kW

La théorie étudiée dans les écoles et les laboratoires devient réalité: l'installation photovoltaïque de 2,5 kW ou «tour solaire» vient s'ajouter aux quelques rares modèles de centrales solaires orientables d'Europe. Du fait toutefois de sa grandeur, de ses possibilités et de sa fonctionnalité, le projet «tour solaire» est une installation unique en son genre. Les mesures diverses permettent de faire des recherches sur des panneaux solaires orientables sur deux axes.

Des représentants de l'Ecole d'ingénieurs de Bienne ont décidé, dans le cadre d'un projet KWF (commission pour le développement scientifique), de construire une installation, certes coûteuse,

mais d'autant plus intéressante pour des éléments photovoltaïques orientables. En tant que bailleur de fonds, et de ce fait propriétaire et exploitant de la petite centrale, l'entreprise électrique de la Ville de Bienne s'est montrée très coopérative.

Le présent article n'entre pas dans les calculs de coûts et profits. N'ayant pas pour seule fonction d'être une installation photovoltaïque, cette dernière doit également être vue comme un instrument permettant à l'Ecole d'ingénieurs de Bienne de faire des recherches sur des éléments photovoltaïques orientables. Ce facteur a été retenu tout particulièrement lors de la conception de l'installation.



# Endurance exemplaire

CAVI  
ELETTRICI

CAVI  
ELETTRICI





# Polyester renforcé fibres de verre: pour toutes les situations

Nos chemins de câbles et caniveaux en polyester renforcé fibres de verre sont gages de sécurité dans les bâtiments commerciaux et industriels, dans les tunnels ferroviaires et routiers, ainsi que dans les installations extérieures. Ce matériau a fait ses preuves en aéronautique et dans d'autres secteurs de pointe. Les chemins de câbles Ebo fabriqués dans cette matière jouissent d'une réputation internationale.

Aucun environnement n'est trop rude pour les chemins de câbles Ebo en matériau renforcé fibres de verre, quel que soit le domaine: locaux humides, aéroports, installations routières et ferroviaires, stations d'épuration, industries chimiques et alimentaires, mais aussi banques, cabinets d'assurances, stades, bâtiments publics, parcs de stationnement, etc.

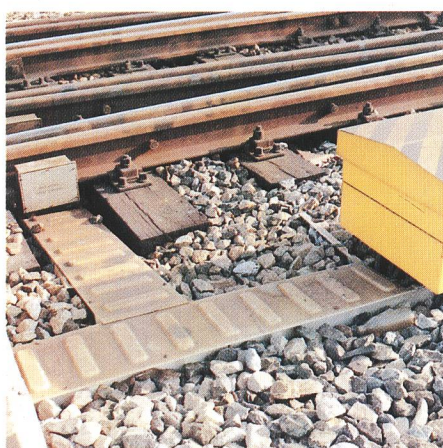
Les chemins de câbles et caniveaux résistent à des sollicitations mécaniques importantes. Des nervures de renforcement assurent une stabilité élevée et un faible frottement lors du tirage des câbles.

## **Des chemins de câbles aux caractéristiques particulières.**

Les chemins de câbles Ebo résistent à la corrosion, à l'attaque des acides, des bases et à la plupart des substances chimiques. Ils ne présentent aucune nocivité pour les produits alimentaires. Ils sont également électriquement isolants, difficilement inflammables, thermorésistants, autoextinguibles et sans halogènes. En cas d'incendie, ils protègent les câbles plus longtemps.

Le polyester renforcé fibres de verre ne subit aucune déformation entre  $-80$  et  $+130^{\circ}\text{C}$ . Un intervalle de dilatation de 8 mm sur les manchons de liaison compense les variations de longueurs. Nos chemins de câbles résistent durablement aux rayonnements ultraviolets (UV) intenses, aux intempéries, aux gaz d'échappement et à l'oxydation. Les chemins de câbles Ebo ne s'altèrent pas dans le temps, car ils conservent leurs qualités d'origine.

Il existe en option des chemins de câbles à fond perforé. Le rôle de ces perforations est d'assurer une bonne aération, ainsi que



l'écoulement éventuel d'eau et le positionnement des chevilles de séparation. Des pièces de forme pour les changements de direction, des couvercles, un nombre important d'accessoires ainsi qu'un système breveté de fixation garantissent un montage rapide, parfait et économique.

Selon le type d'application envisagé et la charge, les caniveaux sont recouverts d'un couvercle en polyester ou d'une tôle striée. Tous les souhaits en matière et de possibilités de montage sont comblés grâce à un choix de 12 dimensions et un vaste assortiment d'accessoires.

Le rapport qualité-prix est très attrayant. En effet, le faible poids des chemins de câbles,



leur système de liaison sans vis par manchon, ainsi que la simplicité de façonnage à l'aide d'outils courants tels que scies sauteuses et perceuses, raccourcissent considérablement les temps de montage. L'absence de formation de bavures élimine tout risque de blessure pour le monteur et d'endommagement des câbles. Des avantages qui garantissent une endurance élevée.

Un dense réseau commercial de distributeurs spécialisés en électrotechnique est la garantie de toujours trouver à proximité, dans sa région, des produits Ebo.



**Ebo AG**  
Zürichstrasse 103  
**CH-8134 Adliswil**  
Tél. 01/482 86 86  
Fax 01/482 86 25