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: Klimatologische Untersuchungen für Solarkraftwerke in den Alpen

Autor: Durisch, Wilhelm / Hofer, Beat / Wuillemin, Daniel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902321

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

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

Dieses Projekt diente dazu, klimatologische Daten für solarthermische und photovoltaische Kraftwerke in den Schweizer Alpen zu messen, auszuwerten und bereitzustellen und wurde vom Paul-Scherrer-Institut zusammen mit Industriepartnern und Behörden durchgeführt. Solche Daten sind nicht nur für den Bau und Betrieb von solaren Kraftwerken unerlässlich, sondern auch für die Einschätzung ihres Potentials in den Schweizer Alpen und ihrer ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit (Durisch et al., 1988). Von besonderem Interesse sind die Menge der verschiedenen Einstrahlungsarten und ihre Qualität, das heisst ihr technisch nutzbarer Anteil. Für die photovoltaische Umwandlung ist auch die spektrale Zusammensetzung der Strahlung wichtig. Basierend auf vorausgegangenen Evaluationen möglicher Standorte für Solarkraftwerke wurden Laj Alv bei Disentis, Graubünden, (Breite 46.71° N, Länge 8.79° O, Höhe ü. M. 2500 m) sowie Feselalpe bei Jeizinen im Kanton Wallis (Breite 46.34° N, Länge 7.72° O, Höhe ü. M. 2150 m) ausgewählt.

Klimatologische Untersuchungen für Solarkraftwerke in den Alpen

Adresse der Autoren:
Dr. *Wilhelm Durisch*, Dr. *Beat Hofer* und *Daniel Wuillemin*, Paul-Scherrer-Institut, PSI, CH-5232 Villigen PSI.

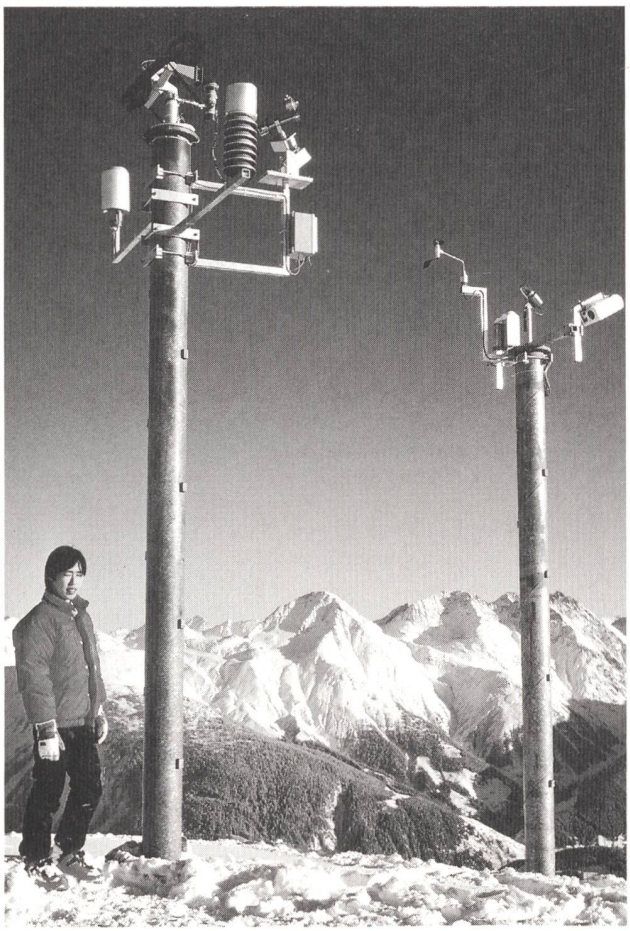


Bild 1 Masten mit Meteo-Messfühlern der Messstation Laj Alv bei Disentis (GR). Die PC-Datenerfassung dazu befindet sich in einem Betriebsgebäude der Bergbahnen Disentis. In diesem für Solarkraftwerke interessanten Gebiet wurden während fünf Jahren kraftwerksrelevante Daten erhoben.

■ Wilhelm Durisch, Beat Hofer und Daniel Wuillemin

Resultate

In Laj Alv (Bild 1) wurde während fünf Jahren gemessen (1986–1989 und 1992). Die nun zur Verfügung stehende Information enthält jährliche Sets von Fünf-Minuten-Mittelwerten sowie Tagessummen, Monats- und Jahressummen der direkt-normalen Einstrahlung, der global-normalen Einstrahlung, der global-horizontalen Einstrahlung, der diffus-horizontalen Einstrahlung und der global-geneigten (60°, Süd) Einstrahlung. Neben der solaren Einstrahlung wurden auch die konventionellen meteorologischen Daten erhoben sowie einige Spektrummessungen durchgeführt. Über die Daten von Laj Alv wird in (Durisch et al., 1996) ausführlich berichtet.

Einstrahlungsdaten

Die wichtigsten Resultate der Einstrahlungsmessungen in Laj Alv sind in Tabelle I zusammengefasst.

Die durchschnittliche Jahressumme der direkt-normalen Einstrahlung, I_n, von 1354 kWh/m² bestätigt gut die Annahme von 1400 kWh/m² in der Sotel-Studie (BEW, 1985). Dasselbe gilt für die global-normale

	1986	1987	1988	1989	1992	Durchschnitt
I_n	1405	1352	1303	1555	1154	1354
G_n	2405	2278	2119	2518	2148	2294
G_h	1489	1449	1373	1484	1417	1442
$G_{60,S}$	1907	1811	1702	1954	1748	1824

Tabelle I Jährliche Summen und Fünf-Jahres-Durchschnittswerte in kWh/m² der direkt-normalen Einstrahlung, I_n, der global-normalen Einstrahlung, G_n, der global-horizontalen Einstrahlung, G_h, und der global-geneigten (60°, Süd) Einstrahlung, $G_{60,S}$, gemessen in den Jahren 1986–1989 und 1992 in Laj Alv, Disentis, Graubünden.

	1990/91	1991/92	1992/93	1993/94	Durchschnitt
I_n	1697	1399	1449	1410	1489
G_n	2547	2406	2406	2300	2415
G_h	1461	1403	1420	1400	1421
$G_{60,S}$	1865	1817	1775	1668	1781

Tabelle II Jährliche Summen und Vier-Jahres-Durchschnittswerte in kWh/m² der direkt-normalen Einstrahlung, I_n, der global-normalen Einstrahlung, G_n, der global-horizontalen Einstrahlung, G_h, und der global-geneigten (60°, Süd) Einstrahlung, $G_{60,S}$, gemessen in den Jahren 1990–1994 auf der Feselalpe bei Jeizinen im Wallis.

Einstrahlung, für die eine Jahressumme von 2400 kWh/m² von einem Modell in derselben Studie vorhergesagt wurde. Aus Tabelle I kann man schliessen, dass sonnennachgeführte Photovoltaikzellen (Umwandlung von G_n in Elektrizität) 1,7mal mehr Energie pro m² und Jahr erhalten würden als solarthermische Systeme, die auf der Konzentration von I_n basieren, zum Beispiel Heliostat/Turm- oder Paraboltrog-Kraftwerke. Zusätzlich zu den erwähnten Messungen wurde 1992 die globale Einstrahlung in nach Süden gerichteten Ebenen bei Neigungen von 30, 45 und 60° gemessen. Die Jahressummen sind 1533, 1706 und 1748 kWh/m². Der unerwartet hohe Wert bei 60° ist höchstwahrscheinlich auf die Schneereflexion zurückzuführen. Gelegentliche Spitzenwerte der globalen Einstrahlung, die grösser als die Solarkonstante (1365 W/m²) waren, wurden beobachtet (bis 2000 W/m²), wobei Reflexionen von Schnee und Wolken eine Rolle gespielt haben könnten. Es gab keine Verschmutzung der Pyranometer-Dome und der Pyrheliometer-Fenster, so dass keine Korrekturen der Jahressummen nötig waren. Die Strahlungsmessungen wurden ergänzt durch Messungen von Wind, Regen, Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit, Albedo, Teilspektrummessungen mit einem silikonbeschichteten Pyranometer, und in einer späteren Phase auch durch Messungen der spektralen Intensitätsverteilung der global-normalen Einstrahlung.

Auf der Feselalpe (Bild 2) wurden von Oktober 1990 bis Oktober 1994 mit wenigen Ausnahmen dieselben Grössen wie in Laj Alv gemessen. Die wichtigsten Resultate sind in Tabelle II zusammengestellt:

Aus dem Vergleich der Einstrahlungs-Durchschnittswerte in den Tabellen I und II geht hervor, dass der Standort Feselalpe bezüglich direkt-normaler Einstrahlung besser abschneidet als Laj Alv. Dies dürfte mit der südlicheren Lage der Feselalpe und sommerlicher Quellbewölkung zusammenhängen, welche auf dem höher gelegenen Laj Alv mehr ins Gewicht fällt. Der Vergleich ist allerdings nur bedingt zulässig, da korrekterweise nur langjährige Mittelwerte miteinander verglichen werden dürfen. Vergleiche mit langjährigen Mitteln der global-horizontalen Einstrahlung benachbarter Stationen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) tendieren jedoch in die gleiche Richtung. Damit bestätigen auch die Feselalpe-Daten die in der Sotel-Studie (BEW 1985) getroffenen Annahmen. Beachtenswert ist, dass Photovoltaik-Anlagen mit südorientierten, 60° geneigten Solarzellen an guten alpinen Standorten jährlich rund 1,6mal mehr Strahlungsenergie angeboten bekommen als beispielsweise am Mittellandstandort PSI (siehe dazu auch Durisch, 1993). Im besonders interessanten Winterhalbjahr (1. Oktober bis 31. März) sind es infolge Hochnebel über dem Mittelland sogar rund 2,5mal mehr. Da daraus signifikant tiefere Stromgestehungskosten resultieren, sind alpine Standorte für die Photovoltaik besonders attraktiv. Eine detaillierte Zusammenstellung der Feselalpe-Daten ist in (Wuillemin et al., 1995) zu finden. Für Leser, die an einem Vergleich mit einem typischen Sonnenland, wie zum Beispiel Jordanien, interessiert sind, sei auf (Durisch, 1995) hingewiesen.

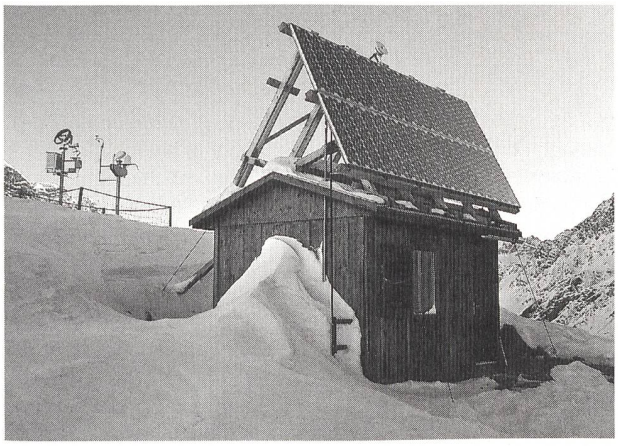


Bild 2 Wetterstation mit Photovoltaik-Stromversorgung. Die Station wurde 1983 im Val Maroz, Bergell, errichtet (siehe BEW, 1985 und Durisch et al., 1985). Sie gelangte nach Abschluss der Messungen im Val Maroz zunächst in Morgins im Unterwallis und dann auf der Feselalpe bei Jeizinen im Oberwallis zum Einsatz. Sowohl die angewandte Messtechnik als auch die Stromversorgung haben sich über rund elf Jahre hervorragend bewährt.

Hochaufgelöste Einstrahlungsdaten

Um Simulationen über das dynamische Verhalten eines neuen solarthermischen Receivers (von Sulzer patentiert) mit realen meteorologischen Daten durchzuführen, wurde in Laj Alv ein Satz hoch aufgelöster Daten (Drei-Sekunden-Mittelwerte) der direkt-normalen Einstrahlung gemessen. Dieser wurde in einem Simulationsmodell (Hofer, 1991) verwendet, das durch Resultate eines Receiver-Tests im International solar energy center in Almería, Spanien, gut bestätigt wurde. Da die direkt-normale Einstrahlung in den Alpen beträchtlichen stochastischen Schwankungen unterworfen ist, sind solche Modelle besonders wichtig für die Planung und Auslegung von Receivern und für die ökonomische Optimierung von Kraftwerken.

Spektrummessungen

Für die richtige Auswahl von photovoltaischen Zellen für die ortsspezifischen klimatischen Bedingungen sind auch Informationen über die spektrale Zusammensetzung der globalen Einstrahlung nötig. Dies trifft besonders für zukünftige «multigap»-Zellen zu und für Zellen, die auf neuen Halbleitermaterialien basieren. Zu diesem Zweck wurden Messungen mit einem Spektrophotometer am PSI in Würenlingen und in Laj Alv durchgeführt, und zwar an ausgewählten Tagen 1991 und 1992. Einige dieser Resultate werden in Bild 3 gezeigt.

Spektrummessungen im Winter in Laj Alv zeigen, dass die Rotverschiebung zu

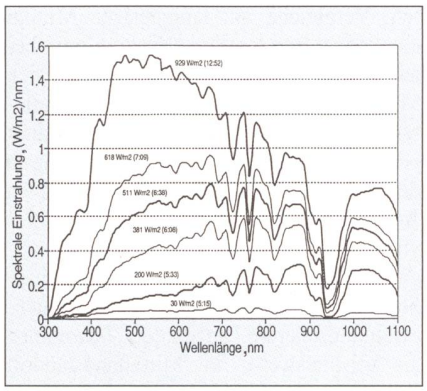


Bild 3 Spektrale Zusammensetzung der global-normalen Einstrahlung am PSI, Würenlingen, am 12. Juli 1991. Zu jeder Kurve ist die entsprechende global-normale Einstrahlung in W/m² und die Zeit der Messung, MEZ in Klammern, angegeben. Der 12. Juli 1991 war ein klarer, wolkenloser Tag. Die Kurven zeigen die erwartete Blauverschiebung des Spektrums vom Morgen bis zur Mittagszeit.

höheren atmosphärischen Massen bei klarem Himmel schwach ist und dass die Spektren qualitativ mit denen vergleichbar sind, die am PSI in Würenlingen an klaren Sommertagen zur Mittagszeit gemessen wurden. Wintermessungen am PSI unter der bekannten Hochnebeldecke wie auch bei klarem Himmel lassen die blauverschiebende Wirkung des Hochnebels gut erkennen.

Etwa 150 Spektren wurden gemessen und auf Disketten gespeichert. Einige wurden mit dem Lowtran 7-Code simuliert. Vergleiche mit Messungen zeigen, dass Lowtran 7 durch Messungen für jede klimatologische Gegend angepasst werden muss, wenn verlässliche Voraussagen gemacht werden sollen. Deshalb werden weitere Messungen an ausgewählten Orten, in verschiedenen Kollektorebenen (fix und nachgeführt) und unter typischen Wetterbedingungen empfohlen. Mit solchen Messungen könnte auch die Frage beantwortet werden, wie weit das Spektrum in der Kollektorebene durch vom Schnee reflektierte Sonnenstrahlung verändert wird.

Schlussfolgerungen/Ausblick

Annahmen in früheren Solarkraftwerkstudien konnten ziemlich gut durch Messkampagnen an ausgewählten Orten in den Schweizer Alpen bestätigt werden. Einmalige Vieljahres-Sets von Fünf-Minuten-Mittelwerten der direkt-normalen und der global-normalen Einstrahlung wurden mit Erfolg gemessen und gespeichert. Erstere wurden in einer Real-Simulation eines neuen Solar-Receivers verwendet und führten zu vielversprechenden Resultaten in bezug auf die beste Nutzung selbst kurzer Perioden der direkt-normalen Einstrahlung. Erste Messungen in der Schweiz der spektralen Zusammensetzung der global-normalen Einstrahlung zeigen, dass die Änderung des Spektrums während des Tages in den Alpen weniger gross ist als im schweizerischen Mittelland. Im Hinblick auf die beste Anwendung zukünftiger photovoltaischer Zellen werden systematische Messungen des Solarspektrums an ausgewählten Orten empfohlen. In diesem Zusammenhang sollte die Einwirkung von schneereflektierter Solarstrahlung auf die spektrale Zusammensetzung der Strahlung, die auf photovoltaische Zellen fällt, untersucht werden. Zu diesem Zweck könnte eine neue Albedo-Messmethode, wie sie von (Durisch, 1989) vorgeschlagen wurde, kombiniert mit einem Spektrophotometer angewendet werden. Insgesamt zeigen die durchgeführten Messungen einmal mehr, wie wichtig in-situ-Abklärungen für die optimale Nutzung der Sonnenenergie sind.

Sämtliche Globalstrahlungssensoren sind am Weltstrahlungszentrum in Davos geeicht worden. Genau genommen gilt diese Eichung jedoch nur für Davos (Fröhlich et al., 1995). Die Verwendung der Davos-Eichfaktoren an anderen Standorten kann zu Messfehlern bis rund 2% führen. Dies liegt an der Unempfindlichkeit der Sensoren für Wellenlängen über 2750 nm. Durch standortspezifische Korrekturen gelingt es, den fraglichen Fehler zu reduzieren. Um diese Korrektur zu umgehen, schlagen wir für hochgenaue Messungen vor, Sensorabdeckungen aus Aluminiumoxid, Al_2O_3, anstelle von Glas oder Quarz zu verwenden. Denn Al_2O_3 weist bis 5500 nm eine gute Durchlässigkeit auf. Ein vereinfachter Prototyp steht seit rund einem Jahr am PSI erfolgreich im Testbetrieb.

Verdankungen

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW, Bern) für die grosszügige finanzielle Unterstützung, den Bergbahnen Disentis, dem Elektrizitätswerk Bündner Oberland und der Compagnie Industrielle Radioélectrique, Bern, für ihre technische Unterstützung und die ausgezeichnete Zusammenarbeit sowie dem Bundesamt für Militärflugwesen und Fliegerabwehr für Helikoptertransporte. Dank gebührt auch dem Energie-Departement des Kantons Wallis für seine finanzielle und stete personelle Unterstützung. Ursula Grütter danken wir für die Übersetzung aus dem Englischen und die Erstellung der Reinschrift.

Referenzen

Bundesamt für Energiewirtschaft: Economic comparison between solar thermal and photovoltaic electricity generation. Abridged version. Ed. on behalf of the swiss federal Office of energy (Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern) and SOTEL Consortium, by W. Durisch, B. Hofer, Fig., Tab. 45 p., App. April 1986 (Original study in German, March 1985).

Durisch, W., Bühlmann, M., Kesselring P.: Meteorologische Messungen für Solarkraftwerke in den Alpen am Beispiel der Station Metaroz. 5. Symposium sur la recherche et le développement en énergie solaire en Suisse, EPF-Lausanne, 14.–15. Okt., 1985, Proceedings, S. 421–434.

Durisch, W., PSI; Fricker, H., Sulzer; Toggweiler, P., EWI: Potential, Einführungsgeschwindigkeit und Kosten solarthermischer Kraftwerke in den Schweizer Alpen. PSI-Bericht Nr. 9, Mai 1988.

Durisch, W., Brack, M., Bulgheroni, W., Gähwiler, E.: Albedo measurements and system performance of a grid-connected photovoltaic plant in the Swiss alps. Proceedings of the ISES Solar World Congress, Kobe, Japan, Sept. 4–8, 1989, Vol. 1, pp. 336–340.

Durisch, W.: Ertrags- und Wirkungsgradmessungen an Solarzellen. Bulletin SEV/VSE 10/1993, S. 25–28.

Durisch, W., Keller, J., Bulgheroni, W., Keller, L., Fricker, H.: Solar irradiation measurements in Jordan and comparison with californian and alpine data. Applied energy 52 (1995) 111–124.

Durisch, W., Hofer, B.: Klimatologische Untersuchungen für Solarkraftwerke in den Alpen am Beispiel Laj Alv, Disentis, Graubünden. PSI-Bericht Nr. 96-01, Januar 1996, ISSN 1019–0643.

Fröhlich, C., Philipona, R., Romero, J., Wehrli, C.: Radiometry at the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Centre. Optical engineering, Vol. 34, No. 9/2757, September 1995.

Hofer, B.: Klimatologische Grundlagen für Solarkraftwerke. Untersuchung von Qualität und Quantität der kraftwerksrelevanten solaren Einstrahlung im Hinblick auf geeignetes Anlagedesign und optimale Elektrizitätsproduktion am Beispiel Laj Alv, Kanton Graubünden. Diss. ETH Nr. 9437.

Wuillemin, D., Brack, M., Bulgheroni, W., Durisch, W., Meier, Z.: Meteo Wallis: Einstrahlungsdaten, Schlussbericht. PSI-Bericht 95-16, 26 p., 1995.

Etudes climatologiques pour des installations solaires alpines

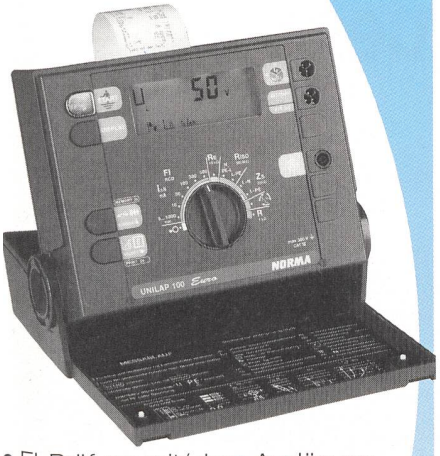
Ce projet a servi à mesurer, évaluer et mettre à disposition des données climatologiques nécessaires à l'installation de centrales thermiques solaires et photovoltaïques dans les Alpes suisses. Il a été réalisé par l'Institut Paul Scherrer, en collaboration avec des partenaires industriels et les pouvoirs publics. De telles données sont indispensables non seulement pour pouvoir construire et exploiter des centrales solaires, mais aussi pour évaluer leur potentiel dans les Alpes suisses et leur rentabilité. La quantité des divers types de rayonnement et leur qualité, c'est-à-dire leur part techniquement utilisable sont d'un intérêt particulier. La composition spectrale du rayonnement est elle aussi importante pour la transformation photovoltaïque. Laj Alv près de Disentis (GR) ainsi que Feselalpe près de Jeizinen (VS) ont été choisis sur la base d'évaluations de sites potentiels de centrales solaires.

UNILAP 100 Euro

Das Schutzmassnahmen-Prüfgerät für Messungen nach NIV und allen Europanormen

Neu

Prüfen von Schutzmassnahmen in Anlagen ist jetzt so einfach wie nie zuvor!



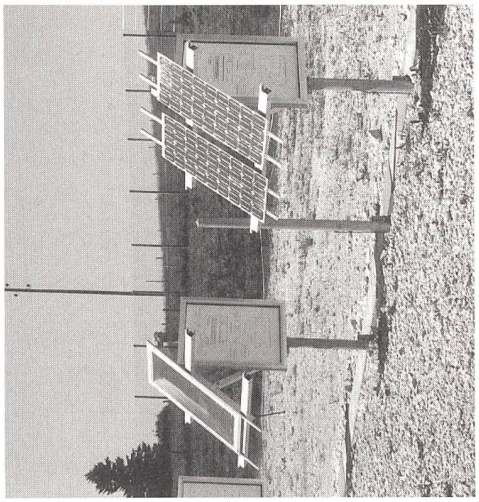
- FI-Prüfung mit/ohne Auslösung mit Impuls, Rampe, Auslösestrom, Auslösezeit
- Drucker, Speicher, Schnittstelle (Option DOCU-PACK)
- Erdungswiderstands-, Isolationsmessung
- Schleifen-/Netzimpedanzmessung
- 2 Jahre Garantie

CE

LEM ELMES AG
Bahnhofstrasse 15
8808 Pfäffikon SZ
Tel. 055/415 75 75
Fax 055/415 75 55

LEM

Besuchen Sie den Mont-Soleil, das Testzentrum für Solartechnologie!

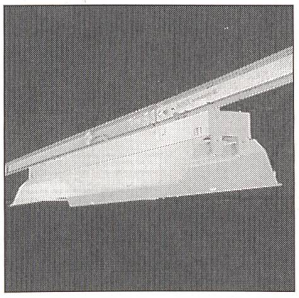


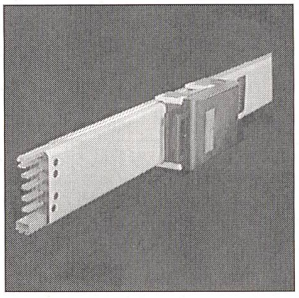
Das neue, im Sonnenkraftwerk Mont-Soleil eingerichtete Experimentierfeld, kann besucht werden auf Voranmeldung bei:

Besucherinformation
Mont-Soleil
c/o BKW Energie AG, Bern
Tel. 031 330 51 25

oder Sekretariat
Mont-Soleil
Tel. 039 41 38 58

SONNENKRAFTWERK MONT-SOLEIL





LANZ Beleuchtungs- und Verteil-Stromschienen 25–900 A

Für die preisgünstige Lampenmontage und für die unkomplizierte, änder- und erweiterbare Stromanschlussmöglichkeit der Geräte, Apparate und Maschinen in Fabrikationsräumen, Fertigungsstrassen, Versuchslokalen, Labors, Garagen, Lager- und Speditionshallen, Sportanlagen, Supermärkten etc. Einfach montierbar. Montagematerial, Anschluss- und Abgangskästen werden mitgliefert.
Verlangen Sie Beratung und Offerte vom Spezialisten
lanz oensingen 062/388 21 21 Fax 062/388 24 24

Bitte senden Sie Unterlagen:

- ☐ Beleuchtungs- und Verteil-Stromschienen 25–900 A
- ☐ LANZ G-Kanäle und kleine Gitterbahnen
- ☐ LANZ BETOBAR Stromschienen 380–6000 A
- ☐ LANZ Kabelträger aus galv. Stahl/Inox/Polyester
- ☐ LANZ Doppelböden für Büros/techn. Räume
- ☐ LANZ Brüstungskanäle
- ☐ LANZ UP/AP-Dosen

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!
Name/Adresse/Tel.: _____

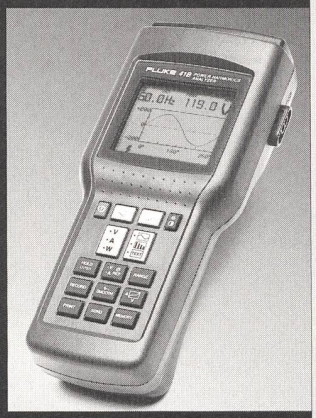
23

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 388 21 21

FLUKE

Harmonics Meter

Der neue Massstab im Erkennen von Oberschwingungen



- Einfach in der Bedienung
- Schnell in der Auswertung
- Robust im Einsatz

Fluke 39 und 41B sind die neuen handlichen Prüfgeräte für die Analyse der Qualität Ihrer Energieversorgung!

Sie messen:
- Spannung und Strom echt effektiv

Zeigen auf Tastendruck:
- VRMS, ARMS und deren Spitzenwerte
- Wirk-, Schein- und Blindleistung
- Crest-, K- und Leistungsfaktoren
- Oberschwingungen

Darstellung der Resultate:
- Signalform
- Balkendiagramm (mit Zoomfunktion)
- Numerisch (mit 3-Phasen-Berechnung)

Dokumentations- und Speichermöglichkeiten

The Best in Test & Measurement

FLUKE Authorized Distributor

Direkt ab Lager bei:

Distrelec AG	01/ 944 99 11
Logotron AG	055/ 410 83 21
Hega-Bugnard AG	01/ 432 31 70
EWI Elektro Wiget GmbH	041/ 855 16 12

Fluke (Switzerland) AG
8952 Schlieren