

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:	91 (2000)
Heft:	10
Artikel:	Leistungsfähigkeit und spektrale Empfindlichkeit von Cu(In,Ga)Se ₂ -Solarmodulen
Autor:	Leutwyler, Markus / Durisch, Wilhelm
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-855549

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>

Leistungsfähigkeit und spektrale Empfindlichkeit von Cu(In,Ga)Se₂-Solarmodulen

In den meisten der heute verwendeten Solarmodulen wird Silizium als Halbleiter eingesetzt. Mono- oder polykristalline Zellen erreichen zwar hohe Wirkungsgrade (15–20%), sind dafür aber sehr teuer in der Herstellung. Dünnschicht-Silizium-Solarzellen sind wesentlich günstiger, bringen jedoch nur 5–7% Wirkungsgrad. Wird statt Silizium der Halbleiter Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) verwendet, können Solarmodule in Dünnschichttechnologie hergestellt werden, die höhere Wirkungsgrade erreichen.

■ Markus Leutwyler und Wilhelm Durisch

Dünnschicht-Solarmodule mit höheren Wirkungsgraden

Dem Team von Bernhard Dimmler am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Stuttgart ist es bereits 1998 gelungen, CIGS-Dünnschicht-Solarmodule von 30*30 cm² mit einem Wirkungsgrad von etwa 12% zu produzieren [1]. Kleine Zellen erreichen gar über 17%. Am Paul Scherrer Institut PSI ist nun ein CIGS-Modul des ZSW (30*30 cm², 41 einzelne Zellen) unter Realbedingungen getestet worden. Dort ist auf dem Dach eines Gebäudes eine entsprechende Testanlage installiert [2]. Unter freiem Himmel steht ein Sun-Tracker, auf dem die Prüflinge fixiert werden (Bild 1). Der Sun-Tracker folgt fortlaufend dem Sonnenstand, so dass die Sonne immer senkrecht auf das Modul scheint. Über dicke Kabel wird der vom Modul

produzierte Strom ins Laborgebäude geführt, wo computergesteuert Kennlinien aufgenommen werden. Zusätzlich zu den elektrischen Daten des Moduls wird mit Pyranometern die Globalstrahlung gemessen. Aus der elektrischen Leistung des Moduls, der Globalstrahlung und der Fläche des Moduls, kann nun der Wirkungsgrad berechnet werden.

Wirkungsgrad unter Standard-Testbedingungen

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle sinkt mit steigender Temperatur, wobei nahezu eine lineare Beziehung zwischen Temperatur und Wirkungsgrad besteht. Um Solarzellen miteinander vergleichen zu können, wird der Wirkungsgrad immer auf die Standard-Temperatur von 25 °C bezogen angegeben. Standard-Testbedingungen liegen dann vor, wenn die Einstrahlung bei 1000 W/m² und die relative atmosphärische Masse (AM) bei 1,5 liegt. Unsere Messungen fanden im Spätsommer um die Mittagszeit statt. Standardbedingungen herrschten in guter Annäherung.

Wird ein Solarmodul der Sonne ausgesetzt, erwärmt sich die Halbleiterschicht auf Temperaturen über 60 °C. Allerdings benötigt dieser Erwärmungsprozess eine gewisse Zeit. Dies ist bei der PSI-Testanlage die Grundlage für die Messung des Temperaturkoeffizienten. Während der Erwärmungsphase werden laufend Messungen gemacht. Wird nun die gemessene Temperatur dem entsprechenden Wirkungsgrad gegenübergestellt, kann der Temperaturkoeffizient mit einer

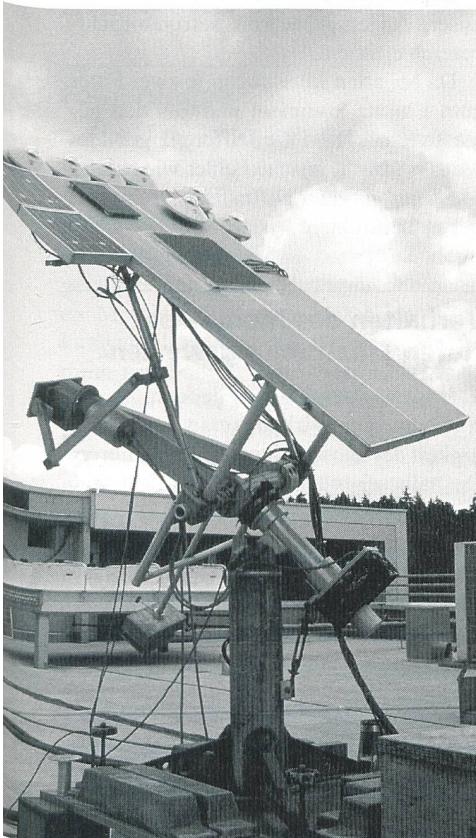


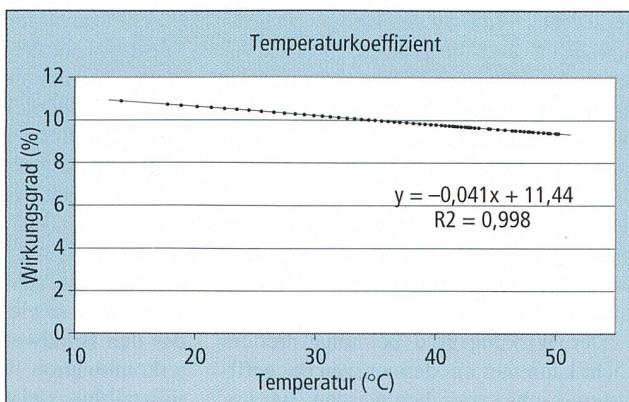
Bild 1 Sun-Tracker auf Gebäudedach am PSI.

Adressen der Autoren

Markus Leutwyler
Zürcherstrasse 18
8908 Hedingen

Dr. Wilhelm Durisch
Paul Scherrer Institut, PSI
5232 Villigen PSI

Bild 2 Temperaturkoeffizient.



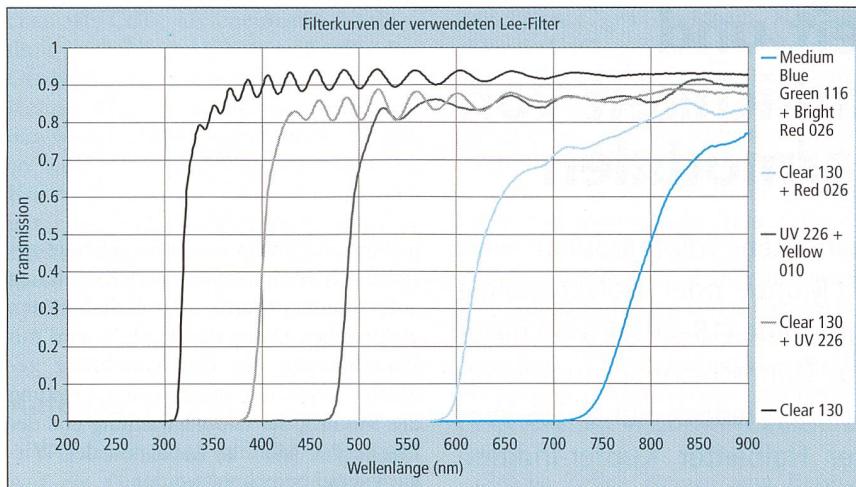


Bild 3 Transmission im sichtbaren Bereich.

linearen Regression bestimmt werden. Für das CIGS-Modul des ZSW haben wir einen Wirkungsgrad von 10,4% und einen Temperaturkoeffizienten von $-0,041\%/\text{°C}$ ermittelt. Je 10°C Erwärmung sinkt der Wirkungsgrad also um 0,4%-Punkte, bei 60 °C liegt er nur noch bei 9%. Die abgegebene elektrische Leistung beträgt somit nur noch 86% des Standardwerts. Dies zeigt die enorme Bedeutung des Temperaturkoeffizienten (Bild 2). Bei amorphen Siliziumzellen liegt der Temperaturkoeffizient bei etwa $-0,01\%/\text{°C}$ (z.B. Tripelzelle von Uni-Solar [4]).

Einfluss der Diffusität auf den Wirkungsgrad

Es ist anzunehmen, dass gerichtete, senkrecht auf die Oberfläche des Solarmoduls eintreffende Sonnenstrahlung einen höheren Wirkungsgrad erzielt als diffus eintreffende mit gleicher Intensität. Sowohl auf der Oberfläche des Trägermaterials (eine Glasscheibe) wie auch auf der Oberfläche des Halbleiters treten Reflexionen des eintreffenden Lichts auf. Diese sind bei senkrechter Einstrahlung am geringsten.

Die Firma Lee aus England stellt diverse Filterfolien für den Einsatz im Bühnen-, Film- und Videobereich her. Darunter sind auch einige Diffusionsfilter. Für unsere Messungen haben wir das Filter Nr. 400 «Leelux» ausgewählt. Es handelt sich um ein sehr starkes Diffusionsfilter, das wie ein Milchglas aussieht. Das Filter wurde vor das Solarmodul und die Pyranometer gespannt. Es ist wichtig, dass dabei kein ungefiltertes Licht die Messungen verfälscht.

Der Wirkungsgrad bei ungefiltertem Licht kann nun mit demjenigen bei gefiltertem Licht verglichen werden. Bei un-

seren Messungen sank er von 10,41% auf 9,51%, also auf einen Wert von 91,4% des Ausgangswerts. Die Abnahme betrug somit 8,6%. Allerdings ist dieser Wert kritisch zu betrachten. Bei unseren Messungen war es möglich, dass Licht hinter der Folie hin und her reflektiert wurde und die Pyranometer somit zu viel Licht erhalten haben. Es deutet zwar alles darauf hin, dass das Spektrum durch die Filterfolie nicht verändert wird. Dies müsste aber mit einem Spektrometer verifiziert werden, das auch die diffuse Strahlung misst. Des Weiteren könnte der Wirkungsgrad auch durch die verminderte Intensität etwas abgenommen haben (Teillastverhalten).

Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit mittels Filtermethode

In welchem Wellenlängenbereich arbeitet das Solarmodul am effizientesten? Um dies zu bestimmen, haben wir eine sehr kostengünstige Messmethode entwickelt. Es wurden Farbfilter gesucht, die eine «Cowshelf»-Charakteristik mit einer steilen Flanke aufweisen. Die Wellenlänge des «Cutoffs» soll variieren. Von verschiedenen in Frage kommenden Filtern wurde mit einem Perkin-Elmer-Spektrometer die Transmission im sichtbaren Bereich und mit einem FFT-IR-Spektrometer diejenige im infraroten Bereich ermittelt. Im infraroten Lichtbereich ähneln sich alle gemessenen Filter stark. Die Transmission ist durchgehend nahe 100% (Bild 3).

Bei der getroffenen Auswahl handelt es sich um vier Filterkombinationen zu je zwei Filter sowie um das Filter «Clear», das den Blindwert liefert. Bei jeder Filterkombination wird die transmittierte Einstrahlungsleistung sowie die abgege-

bene elektrische Leistung gemessen. Die Filter werden mit aufsteigendem «Cut-off»-Wert der Wellenlänge eingesetzt. Mit jedem neuen Filter wird ein weiterer Bereich des Spektrums weggefiltert. Die Einstrahlungsleistung hinter dem Filter verringert sich. Wird nun die Differenz zwischen den Einstrahlungsleistungen zweier aufeinanderfolgender Filterkombinationen in Relation gesetzt zur Differenz der abgegebenen elektrischen Leistung, so kann daraus der elektrische Wirkungsgrad im entsprechenden Wellenlängenbereich errechnet werden.

Diese Berechnung ergab folgende Werte:

- 320–400 nm: $\eta = 0,32\%$
- 400–490 nm: $\eta = 7,3\%$
- 490–620 nm: $\eta = 14,6\%$
- 620–800 nm: $\eta = 16,7\%$
- 800–1000 nm: $\eta = 5,8\%$
- $> 1000 \text{ nm}: \eta = 0\%$

Die Module sind also besonders im für unsere Augen grünen bis tiefroten Lichtbereich effizient.

Da bei allen Messungen je zwei Filter zum Einsatz kommen, und aus den gemessenen Werten die Differenz gebildet wird, sind systematische Fehler wie bei der Messung mit dem Diffusfilter viel weniger zu befürchten.

Verhalten des Moduls bei tiefen Einstrahlungswerten

Unsere Datenlage ist jedoch zu gering, um den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Einstrahlung zu modellieren. Deshalb sei hier auf die Tabelle I verwiesen.

Generell lässt sich sagen, dass die getesteten Module auch bei schwachen Einstrahlungen recht effizient arbeiten.

Einstrahlung (W/m ²)	Wirkungsgrad, temperaturkorrigiert (%)
44,2	5,40
45,8	5,44
47,7	5,50
49,7	5,60
49,8	5,60
50,3	5,62
116,5	7,30
122,8	7,57
131,6	7,84
132,1	7,83
143,4	7,82
145,1	7,99
151	7,99

Tabelle I Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Einstrahlung.

Anwendung des Kennlinienmodells zur Bestimmung des Serie- und Parallelwiderstandes

Die Kennlinie einer Solarzelle (Bild 4) kann mathematisch modelliert werden. Wird das Modell an die gemessenen Daten «gefittet», können die Parameter Serie- und Parallelwiderstand ermittelt werden. Für das Modul mit seinen 41 Zellen ergaben sich folgende Werte:

- Seriewiderstand (Modul): $4,11 \Omega$
- Parallelwiderstand (Modul): 584Ω

Diese beiden Widerstände verursachen einen Abfall des Wirkungsgrades. Das zeigt sich auch in der Tatsache, dass der Füllfaktor bei nur 0,618 liegt. Durch eine Optimierung unter anderem des Seriewiderstandes könnte das Modul sicherlich wirkungsgradmäßig kleinen Laborzellen angenähert werden.

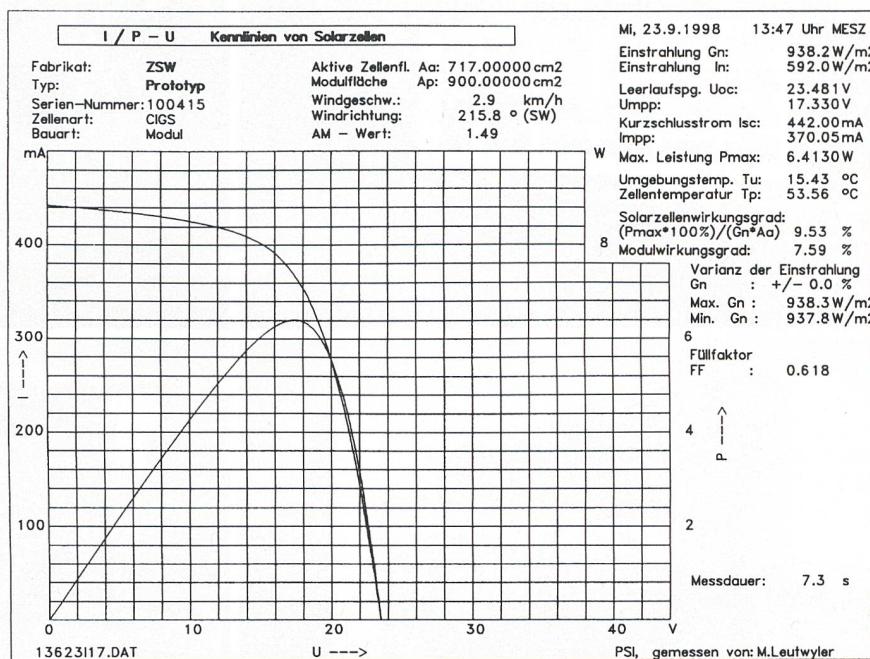


Bild 4 Kennlinie des getesteten CIGS-Moduls.

Folgerungen

In der Photovoltaik-Freiland-Testanlage des PSI [2] gelang es mit relativ geringem Aufwand, einige aufschlussreiche Kenngrößen eines neuartigen Solarzellenmoduls zu ermitteln. Zudem gelang es mit einer sehr einfachen neuen Methode auch den spektralen Wirkungsgrad zu bestimmen. Sein Maximum tritt bei rotem bis tiefrotem Licht auf, was etwas unterhalb der Bandlücken-Wellenlänge der CIGS-Zelle liegt [3]. Es verläuft aber oberhalb des spektralen Intensitätsmaximums des Sonnenlichts, welches unter STC-Bedingungen bei etwa 500 nm liegt. Daraus ergibt sich, dass durch leichte Erhöhung der Bandlückenenergie der Gesamtwirkungsgrad möglicherweise noch etwas gesteigert werden könnte. Verglichen mit kristallinen Siliziumzellen ist der Seriewiderstand hoch. Durch Senkung dieses Werts (besser leitende Elektroden durch Prozessoptimierung) könnte der Wirkungsgrad vielleicht auch noch etwas angehoben werden. Allerdings sollte damit keine allzu grosse Verteuerung der Module verbunden sein. Der Temperaturkoeffizient des Wirkungsgrades liegt mit $-0,041\%/\text{°C}$ relativ günstig zwischen jenen amorpher und kristallinen Solarzellen. Der am getesteten CIGS-Modul festgestellte STC-Wirkungsgrad von 10,4% ist für amorphe Dünnfilmmodule dieser Grösse

vergleichsweise hoch. Über allfällige Degradationsprozesse kann aus den bisherigen Messungen keine Aussage gemacht werden.

Literatur

- [1] Die neuen CIS-Zellen machen Sonnenstrom erschwinglich. Bild der Wissenschaft 5/1998, S. 32–37.
- [2] W. Durisch, D. Tille, A. Wörz and W. Plapp: Characterisation of Photovoltaic Generators. Applied Energy 65 (2000), S. 273–284.
- [3] A. N. Tiwari, F.-J. Haug and H. Zogg: Dünnschichtsolarzellen aus Verbindungshalbleiter. Bulletin SEV/VSE 10/98, S. 45–49.
- [4] W. Durisch, O. Struss and K. Robert: Efficiency of Selected Photovoltaic Modules under Varying Climatic Conditions. Presented at the WREC 2000, Brighton, UK, 1–7 July 2000. To be published in Renewable Energy.

[5] B. Dimmler und Hans-Werner Schock: CIS-Dünnschichtsolarzellen-Technologie. Forschungsverbund Sonnenenergie-Themen 95/96: Photovoltaik 3, 1996, S. 52–59.

[6] Hans-Werner Schock: Grundlagen der Photovoltaik (Teil 4): Dünnschichtsolarzellen aus Verbindungshalbleitern. Photon, 2. Jahrgang, Heft 1, 1997, S. 14–19.

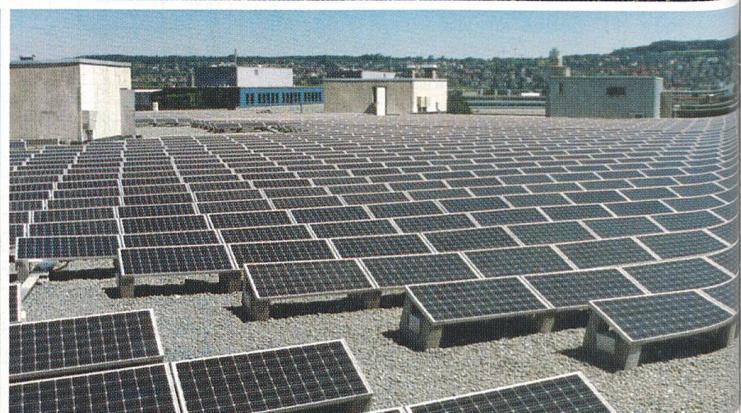
Adressen: Dr. Wilhelm Durisch
Angewandte Photovoltaik
Paul Scherrer Institut, PSI
5232 Villigen PSI
E-Mail: Wilhelm.Durisch@psi.ch

Richard Menner
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW)
Hessbruehlstrasse 21C
D-70565 Stuttgart, Germany
E-Mail: richard.menner@zsw-bw.de

Rendement et sélectivité spectrale de modules solaires

La plupart des modules solaires utilisés actuellement sont équipés de semi-conducteurs au silicium. Les rendements des cellules mono ou polycristallines sont, il est vrai, élevés, mais leur fabrication est par contre fort coûteuse. Des cellules solaires recouvertes de couches ultramince de silicium, bien qu’être nettement plus avantageuses, n’ont cependant un rendement que de 5 à 7 pour cent. Il est toutefois possible d’obtenir de meilleurs rendements en utilisant des couches ultramince au cuivre-indium-gallium-diselenid (CIGS) plutôt qu’au silicium comme semi-conducteurs pour fabriquer des modules solaires.

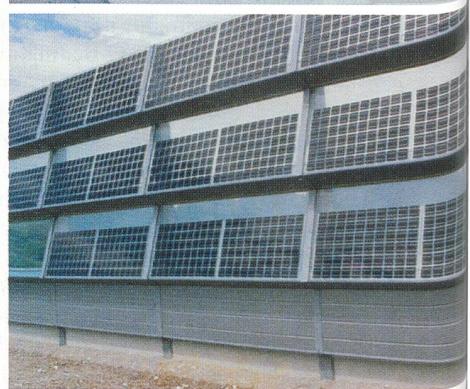
Strom aus der Sonne



Solaranlagen technologisch ausgereift und systematisch konzipiert.

FABRISOLAR ist eine der führenden Firmen für Strom aus Sonnenlicht. Wir verfügen über das beste Know-how und reiche Erfahrung mit allen heute verfügbaren Technologien. Ein Know-how, das wir in enger Zusammenarbeit mit den weltweit führenden Photovoltaik-Herstellern vorzu optimieren. Denn nur wer weiß, was heute möglich ist, kann wirklich individuelle Lösungen anbieten und Qualität garantieren. Als einziges Schweizer Unternehmen der Branche ist FABRISOLAR ISO 9001 zertifiziert und auch die deutsche Tochter Creaglas GmbH, wo Laminate bis 1.5 x 2.5 m für Fassaden und Dachintegration hergestellt werden, verfügt über den ISPRA-Attest IEC 61215.

Solaranlagen sind Vertrauenssache – wählen Sie deshalb für Ihr Projekt FABRISOLAR – der Partner, der Ihnen den höchsten Investitionsschutz bietet. Ob fürs Ferienhaus weitab vom Stromnetz, fürs Boot oder für eine professionelle Netzverbundanlage in beliebiger Grösse: FABRISOLAR verdient Ihr Vertrauen und garantiert Ihnen perfektes Engineering und optimalen Leistungsertrag.



FABRISOLAR
FABRIKATION TECHNIK INTEGRATION

FabriSolar AG
Untere Heslibachstrasse 39, CH-8700 Küschnacht
Tel. 01 - 914 28 80, Fax 01 - 914 28 88