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: 86 (1995)

Heft: 23

Artikel: Auf dem Weg zu leistungsfähigen Dünnschicht-Solarzellen : Forschung an Solarzellen aus dünnen Siliziumschichten am Institut de Microtechnique (IMT) in Neuenburg

Autor: Shah, Arvind / Tscharner, Reto

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902506

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: 11.07.2025

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

Die von der Mikroelektronik übernommene Wafertechnik in der heutigen Form stellt ökonomisch wie ökologisch keine langfristige Möglichkeit für die Solarzellenproduktion dar. Zukünftige Photovoltaik-Technologien werden sicherlich auf Dünnschichtzellen beruhen, auch wenn zurzeit ihre Wirkungsgrade noch relativ tief sind. Das Silizium bleibt indessen ein Vorzugskandidat für Dünnschichtzellen: Durch die Kombination des amorphen mit dem neuen mikrokristallinen Silizium werden vielversprechende Perspektiven eröffnet.

Auf dem Weg zu leistungsfähigen Dünnschicht-Solarzellen

Forschung an Solarzellen aus dünnen Siliziumschichten am Institut de Microtechnique (IMT) in Neuenburg

■ Arvind Shah und Reto Tscharner

Stand der Technik bei den «klassischen» Solarzellen – Wafertechnik

Im Moment bestehen fast alle Solarmodule, die für Energieanwendungen eingesetzt werden, aus kristallinem Silizium. Sie gründen auf der klassischen Wafertechnik, welche ursprünglich für die Mikroelektronik eingeführt wurde. Solche Solarmodule sind zurzeit bekanntlich noch sehr teuer; sie führen (bei schweizerischen Verhältnissen) zu Stromkosten von über 1 Fr./kWh; solche Kosten verhindern aber einen breiten Einsatz der Photovoltaik. Bild 1 zeigt die Entwicklung des Produktionsvolumens und der Marktpreise für Photovoltaikmodule in den letzten 15 Jahren; wohl sind die Preise in diesem Zeitraum gesunken, jedoch weit weniger stark, als ursprünglich erhofft. Sicher ist eine weitere spürbare Preissenkung (von etwa 50%) durchaus möglich, falls das Produktionsvolumen stark erhöht wird. Doch solange man bei der Wafertechnik bleibt, darf man keinen dramatischen Preissturz und wirklich konkurrenzfähige Preise für die Photovoltaik erwarten. Dafür gibt es grundsätzliche physikalische Gründe: Für die Herstellung von Solarzellen mit der Wafertechnik müssen pro Megawatt (MW_p) Solarzellenleistung über 10 Tonnen hochreines Silizium ver-

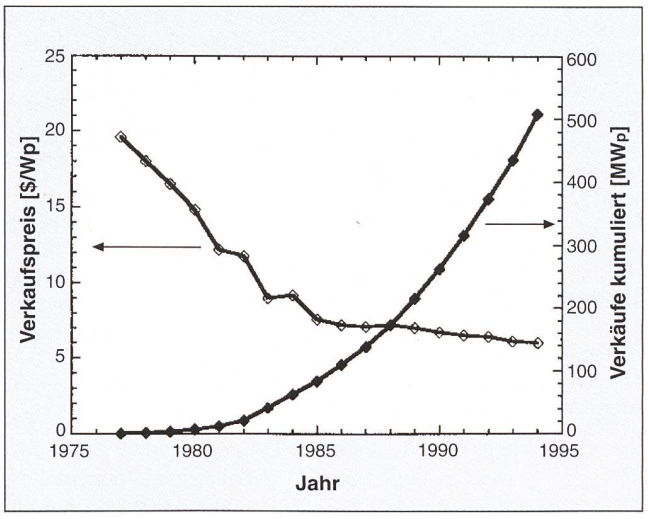


Bild 1 Marktpreise für Photovoltaikmodule
Entwicklung des mittleren Marktpreises für Photovoltaikmodule und des kumulierten Produktionsvolumens 1977–94; nach [2].

Adresse der Autoren:
Prof. Dr. *Arvind Shah* und *Reto Tscharner*,
El.-Ing. HTL, Institut de Microtechnique,
Université de Neuchâtel, Breguet 2, 2000 Neuchâtel.

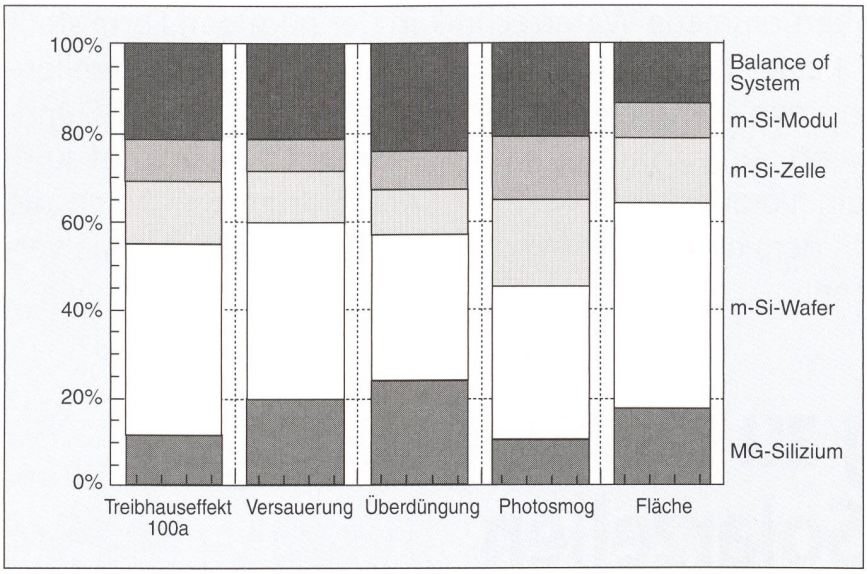


Bild 2 Ökologische Belastung durch Photovoltaikanlagen

Ökologische Belastung durch eine Photovoltaikanlage aus monokristallinem Silizium (Stand 1995). Anteil der hauptsächlichen Fabrikationsschritte an den Belastungen für verschiedene Wirkungsklassen. Die entsprechenden «ökologischen Rückzahldauern» für den substituierten Strom betragen zwischen 4,4 und 7,8 Jahre, wenn man vom europäischen Strommix UCPTE ausgeht; nach [1].

arbeitet werden. Dies beinhaltet eine Investition von rund 10 kWh grauer Energie (Primärenergie) pro Spitzenwatt (W_p) installierter Solarleistung. Daher ist die ökologische Belastung bei der Wafertechnik relativ hoch; man rechnet für die damit aufgebauten Solarinstallationen mit ökologischen Rückzahldauern von etwa vier bis acht Jahren [1]. Bild 2 zeigt zudem, dass bei einem durchgerechneten praktischen Beispiel der überwiegende Teil der ökologischen Belastung auf die Solarzellenherstellung selber zurückzuführen ist und nur ein kleiner Teil (um 20%, je nach Belastungskategorie) auf die Bereitstellung der sonstigen Systemteile (der sog. «Balance of Systems»). Während vorausgesagte Preise für neu aufkommende Technologien wie die Photovoltaik eher *willkürliche* Grössen sind und schliesslich von Industriestruktur, Produktionsvolumen, Nachfrage, Angebot usw. abhängen werden, sind anderseits Angaben über Materialflüsse, graue Energie und ökologische Belastung von *grundsätzlicher* Natur. Solche Überlegungen zeigen aber klar, dass ein künftiger, massiver Grosseinsatz der Photovoltaik *nicht* auf der Wafertechnik basieren kann.

Alternativen zur Wafertechnik

Zurzeit sind vor allem folgende Technologien als Alternativen zur Wafertechnik in Diskussion oder labormässig in Erprobung:

- Dünnfilmsilizium (in amorpher oder kristalliner Form)
- Kadmiumtellurid (CdTe)
- Kupferindiumdiselenid ($CuInSe_2$, auch als CIS bezeichnet)
- Farbstoffzellen (auch elektrochemische Zellen genannt)

Alle diese Methoden weisen gegenüber der Wafertechnik einen Entwicklungsrückstand auf und führen, jedenfalls im Moment, zu geringeren Modulwirkungsgraden als die Wafertechnik. Eigentliche Produktionserfahrung besteht hier nur beim Dünnfilmsilizium, und zwar bei Solarzellen aus amorphem Silizium. Letztere werden heute vor allem als Batterieersatz für Kleingeräte (Taschenrechner usw.) eingesetzt und nur ausnahmsweise für eigentliche Energieanwendungen. In den folgenden Abschnitten dieses Beitrages wird hauptsächlich auf die Probleme und Aussichten des Dünnfilmsiliziums eingegangen.

Zu den anderen drei Varianten soll hier nur kurz erwähnt werden, dass gegen diese noch schwerwiegende Einwände erhoben werden. Beim Kadmiumtellurid ist der Einsatz des Kadmiums ökologisch sehr bedenklich. Beim Kupferindiumdiselenid ist auf die beschränkte Verfügbarkeit des Indiums hinzuweisen, was auf dem Weltmarkt schon in der Vergangenheit (also noch ohne den Einsatz in Solarzellen) zu wilden Preisfluktuationen geführt hat. Bei den an der EPFL (Prof. Michael Grätzel) entwickelten Farbstoffzellen schliesslich ist es bisher unseres Wissens nirgends gelungen, eine komplette, versiegelte Zelle mit für den wirtschaftlichen Einsatz befriedigender Langzeitstabilität und ausreichendem Wirkungsgrad herzustellen. Grossflächige Module für Energieanwendungen mit dieser Technologie fehlen vollständig; entsprechend konnten bisher auch gar keine Feldversuche durchgeführt werden. Es ist daher sicher noch zu früh, um glaubhafte Prognosen über die technischen und wirtschaftlichen Aussichten dieses Zellentyps zu machen. Für Preisvoraussagen, wie sie etwa vor zwei Jahren in der Tagespresse veröffentlicht wurden und die auf extrapolierten Wirkungsgradwerten von 15% gründeten, fehlt heute noch die Basis.

Solarzellen aus amorphem Silizium – Bestandesaufnahme

Auch die ursprünglich in das amorphe Silizium gesetzten Hoffnungen waren – zumindest in zeitlicher Hinsicht – übertrieben, und es setzte nach einer Periode der Euphorie (1982–85) ein eigentlicher Rückschlag bei der Forschungsfinanzierung und auch eine starke Ernüchterung bei den Forschern selber ein. Heute kann man dieses Solarzellenmaterial wohl objektiver beurteilen:

- Es steht ohne Zweifel fest, dass man mit amorphem Silizium durchaus stabile Solarmodule herstellen kann, wenn auch zurzeit noch mit relativ geringen Wirkungsgraden (siehe Tabelle I).
- Jährlich werden einige hunderttausend Quadratmeter amorpher Solarzellen produziert, wobei der überwiegende Anteil Anwendung findet in Taschenrechnern und anderen Kleingeräten (in Uhren, elektronischen Wägegeräten, Fotoapparaten u. a. m.).
- An einzelnen Teststandorten in den USA, Japan und Europa besteht auch schon mehrjährige Felderfahrung mit grösseren Modulen.
- Kommerzielle, grossflächige Module mit amorphen Solarzellen sind erhältlich, die einen stabilen Wirkungsgrad von etwa 4 bis 6% aufweisen.
- Schliesslich sind die Produktionskosten für Solarzellen aus amorphem Silizium bereits heute relativ tief (Bild 3). Dabei ist speziell von Interesse, dass die Deposition der eigentlichen Solarzelle aus amorphem Silizium nur einen Drittel der gesamten Herstellkosten eines Moduls ausmacht. Die anderen zwei Drittel der spezifisch zuordenbaren Kosten werden durch das Substrat, die elektrischen Kontakte (TCO, Metallisierung, Serieverschaltung) sowie die Einkapselung verursacht; sie sind als «allgemeine» Kosten für Dünnfilm-Solarzellen anzusehen, wie sie bei den meisten anderen Dünnschichttechnologien in gleicher Weise anfallen.

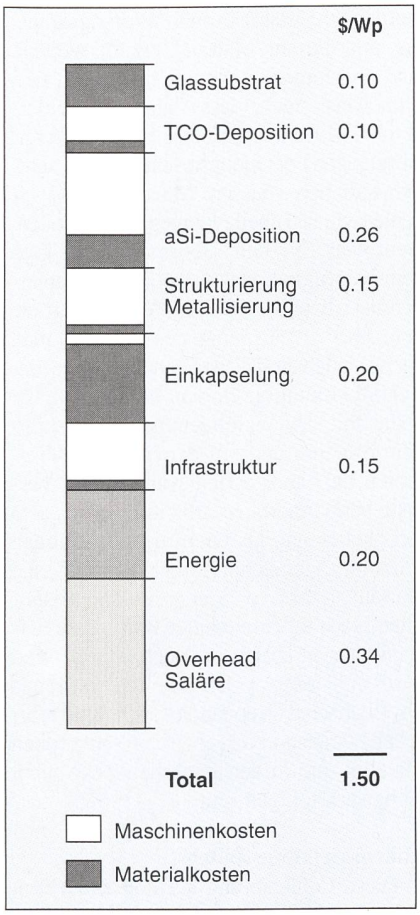


Bild 3 Herstellkosten für Photovoltaikmodule aus amorphem Silizium

Die Herstellkosten basieren auf heute bekannten (und benützten) Produktionsprozessen, sind aber hochgerechnet für eine Vollauslastung bei 1,5 MW_p pro Jahr (Dreischichtbetrieb). Ein stabiler Modulwirkungsgrad von 5%, Module mit Einfachverglasung und eine Produktionsausbeute von 80% wurden angenommen; nach [3].

Abscheidung von amorphem Silizium mit dem VHF-Plasma

Amorphe Solarzellen wurden in der Mitte der 70er Jahre eingeführt und seither praktisch ausschliesslich mittels Plasma-CVD (plasma-assisted chemical vapor deposition) abgeschieden. Die entsprechende Abscheidekammer besteht aus einer Anordnung von zwei parallelen Elektroden, zwischen denen das Plasma kapazitiv angeregt wird. Die elektrische Anregung des Plasmas erfolgt üblicherweise bei einer Frequenz von 13,56 MHz, einer standardisierten Frequenz für Industrieanwendungen.

Eine Pionierleistung des IMT war 1986, eine neue Variante für die Plasmaabscheidung einzuführen und sukzessive zu optimieren. Das Plasma wird dabei nicht bei der Standardfrequenz von 13,56 MHz (RF), sondern bei höheren Frequenzen zwischen 50 und 150 MHz im sogenannten VHF-Bereich elektrisch angeregt. Die Erfindung stammt vom damaligen Oberassistenten am IMT, Dr. H. Curtins, und wurde patentiert. Umfangreiche Untersuchungen wurden in der Folge in Zusammenarbeit mit dem CRPP (Centre de recherches sur la physique des plasmas, ETH Lausanne) durchgeführt. Sie zeigen, dass sich das VHF-Plasma grundsätzlich anders verhält als das übliche RF-Plasma. Insbesondere wurde mit der VHF-Abscheidung möglich, die Abscheiderate für hochwertiges amorphes Silizium von ungefähr 1 µm/h auf 5 µm/h zu steigern; auch konnte dabei die prozesstechnisch störende Bildung von Siliziumpulver im Reaktor vermieden werden. Dies könnte in Zukunft entscheidende ökonomische Vorteile bei der Solarzellenfabrikation bringen.

Mit der VHF-Abscheidung können am IMT amorphe Solarzellen hergestellt werden, die einen Anfangswirkungsgrad von gegen 11% für eine Einfachzelle (single junction p-i-n) erreichen, und zwar bei relativ hoher Abscheiderate von 3 µm/h. Damit ist der Beweis erbracht, dass die VHF-Abscheidung qualitativ ebenso gute Solarzellen liefert wie die langsamere RF-Abscheidung. Zurzeit wird die VHF-Abscheidung auf Flächen von 40×50 cm auch von amerikanischen und japanischen Firmen getestet, zwecks Herstellung der amorphen Siliziumschichten für Flachbildschirme.

Mit einer Plasmaabscheidung bei einer höheren Anregungsfrequenz, und speziell auch mit der VHF-Abscheidung, ist es nicht nur möglich, die Depositionsrate zu steigern, sondern man kann auch das für die Abscheidung verwendete Trägergas (Silan, evtl. auch German) besser ausnützen und damit Rohmaterial sparen. Aus Bild 3 kann man ersehen, dass diese Massnahmen dazu geeignet sind, die Kosten für die Deposition der amorphen Solarzelle noch weiter zu senken, da sowohl die spezifischen Anlagekosten wie auch die Materialkosten (vor allem Silangas) entscheidend reduziert werden. Allerdings sind die übrigen Kosten für ein Solarmodul (Einkapselung, Substrate, TCO, elektrische Verschaltung) davon nicht betroffen und fallen um so mehr ins Gewicht.

Lichtinduzierte Degradation von amorphem Silizium

Leider weist das amorphe, wasserstoffhaltige Silizium (a-Si:H) allgemein einen lichtinduzierten Degradationseffekt auf (den sog. Staebler-Wronski-Effekt, SWE): Der Wirkungsgrad der amorphen Solarzellen verringert sich unter der Einstrahlung von Sonnenlicht während den ersten paar hundert Betriebsstunden, um sich dann aber auf einem tieferen Wert zu stabilisieren. In Bild 4 sind die Messdaten für Solarmodule aus amorphem Silizium bei einer Testanlage (Anlage TISO in Canobbio bei Lugano) dargestellt. Man sieht daraus, dass der Wirkungsgrad am Anfang stark abnimmt, um sich nachher auf einem tieferen Wert einzupendeln. Man stellt auch fest, dass der Wirkungsgrad saisonalen Schwankungen unterworfen ist: bedingt durch die höheren Umgebungstemperaturen ist er im Sommer etwas höher als im Winter.

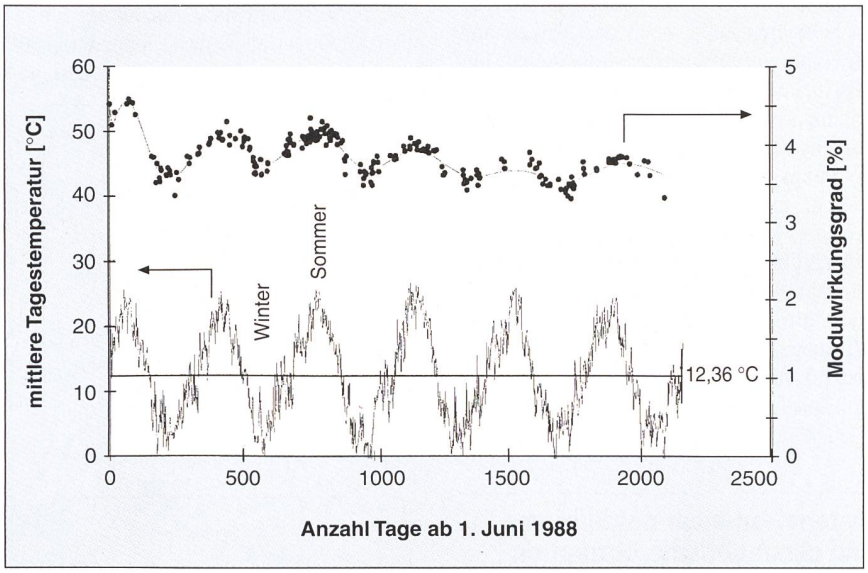


Bild 4 Wirkungsgrad einer Testanlage

Verlauf von Wirkungsgrad und mittlerer Tagestemperatur 1988–94 bei der Testanlage TISO in Canobbio TI (96 Module Typ G4000 der Firma Arco mit einer totalen Nennleistung von 2880 W_p); nach [4], mit freundlicher Genehmigung von TISO.

Seit rund zehn Jahren versuchen weltweit viele Forschungsgruppen, diesen störenden Effekt (der kein eigentliches Stabilitätsproblem ist, wohl aber zu einer Wirkungsgradeinbusse führt) zu beheben oder zumindest zu reduzieren. Es ist den meisten Forschern klar, dass wohl nur eine Verringerung des Staebler-Wronski-Effekts zu einer entscheidenden Verbesserung im Wirkungsgrad der amorphen Solarzelle führen wird. Ein Durchbruch ist aber bis jetzt nirgends gelungen; man wird sich zunehmend bewusst, dass rasche, spektakuläre Fortschritte auf dieser Front auch in Zukunft nicht zu erwarten sind. Immerhin weiss man aber heute, dass unter anderem die folgenden Faktoren den SWE verstärken und damit den stabilisierten Wirkungsgrad der Solarzelle reduzieren können:

- eingebaute Verunreinigungen in der amorphen Siliziumschicht, wie Sauerstoff;
- innere mechanische Spannungen;
- eine ungünstige und ausgeprägte Mikrostruktur, insbesondere Mikrokavitäten;
- ein Abweichen vom optimalen Wasserstoffgehalt (von vermutlich etwa 2%).

Mit der VHF-Abscheidung und dank sorgfältiger Optimierung der Prozesstechnik konnte das IMT die ersten drei der obigen Faktoren mindestens einzeln in den Griff bekommen. Weiter gelang es, eigentliche «Weltrekorde» in der Erniedrigung der Sauerstoffverunreinigung und Reduzierung der Mikrostruktur zu erreichen; es war jedoch bisher nicht möglich, alle diese vier entscheidenden Faktoren gleichzeitig unter Kontrolle zu bekommen. Die Arbeiten werden intensiv weitergeführt.

Für die Arbeit in diesem Sektor sind nicht nur eine sorgfältige Prozessoptimierung und systematische Labormessungen an Schichten nötig, auch der Aufbau und die Optimierung ganzer Solarzellen mit den neuen, verbesserten Schichten sind wichtig. Schliesslich wird ein neutrales, aussenstehendes Labor die gemessenen Wirkungsgrade in Langzeitversuchen bestätigen müssen. Gelingen alle diese Teilschritte, so wird man nicht nur amorphe Solarzellen mit höheren, stabileren Wirkungsgraden erhalten, sondern gleichzeitig auch billigere Solarzellen, da bei einer Wirkungsgraderhöhung auch die flächenspezifischen Kosten (Substrate, Kontakte, Einkapselung) entsprechend sinken werden (siehe Bild 3).

Materialvarianten des Siliziums und deren optische Absorption

Amorphes Silizium

Ein Halbleiter, welcher für Solarzellen verwendet wird, muss das Sonnenlicht sehr wirksam absorbieren können. Es ist einer der hauptsächlichen Nachteile des kristallinen Siliziums – speziell der mono- und polykristallinen Siliziumwafer – dass sein Absorptionskoeffizient im sichtbaren Teil des Lichtes, wo die Intensität des Sonnenspektrums am grössten ist, relativ niedrig ist (viel niedriger als z. B. bei Galliumarsenid, Kadmiumtellurid und CIS). Dies ist aus grundsätzlichen, quantenphysikalischen Gründen so.

Im Vergleich dazu hat die amorphe Form des Siliziums einen wesentlich höheren optischen Absorptionskoeffizienten im sichtbaren Bereich des Lichtes. Die Absorptionskoeffizienten für kristalline Siliziumwafer (c-Si) und amorphe Siliziumschichten (a-Si:H) sind in Bild 5 dargestellt. Daraus geht hervor, dass beim amorphen Silizium wesentlich dünnere Schichten (unter 1 µm) schon genügen, um das Sonnenlicht nutzbringend zu absorbieren.

Wafer aus kristallinem Silizium, die in konventionellen Solarzellen verwendet werden, weisen Dicken zwischen 200 und 400 µm auf, schon deshalb, weil man mechanische Probleme hat, sie in noch dünnere Scheiben zu zersägen. Die gewaltige Materialeinsparung bei der amorphen Solarzelle dürfte daher offensichtlich sein. Bei den amorphen Solarzellen resultieren damit Energie- und Ökobilanzen, die weit günstiger sind als bei den konventionellen kristallinen Solarzellen mit Siliziumwafern. Ermöglicht wird dies durch den hohen optischen Absorptionskoeffizienten im sichtbaren Bereich des Lichtes, der von Anfang an eines der Hauptargumente für die Entwicklung der Solarzelle aus amorphem Silizum war und der damit erstmals zu einer wirklichen Dünnfilmtechnik für das Silizium führte.

Anderseits sind die Grenzen des amorphen Siliziums als Solarzellenmaterial allen Spezialisten viel stärker bewusst geworden: die stabilisierten Wirkungsgrade, die mit diesem Material erzielt werden, sind im Moment allgemein noch recht tief. Man weiss auch, dass sich der Staebler-Wronski-Effekt wohl erst nach weiterer, jahrelanger Forschungsarbeit wird wesentlich reduzieren lassen. Man erreicht zwar heute (wie in Tabelle I angegeben) mit dem amorphen Silizium labormässig in Tandem-Konfigurationen – trotz des Staebler-Wronski-Effekts – stabile Wirkungsgrade von über 10%. Hingegen kommt man zurzeit noch keineswegs in die Nähe der Rekordwirkungsgrade von bis zu 24%, die heute mit der Wafertechnik aus kristallinem Silizium und mit extrem teuren Verfahren im Labor erzielt wurden. Die Verluste beim amorphen Silizium werden also stets höher sein als beim monokristallinen Silizium; vielleicht gelingt es aber, die Wirkungsgrade von amorphen und kristallinen Solarzellen einander mehr anzugleichen; dies ist aber heute noch unsicher und wird auf jeden Fall ohne ein vertieftes physikalisches Verständnis der elektronischen Transportvorgänge im amorphen Material und in der amorphen Zelle nicht zu bewerkstelligen sein.

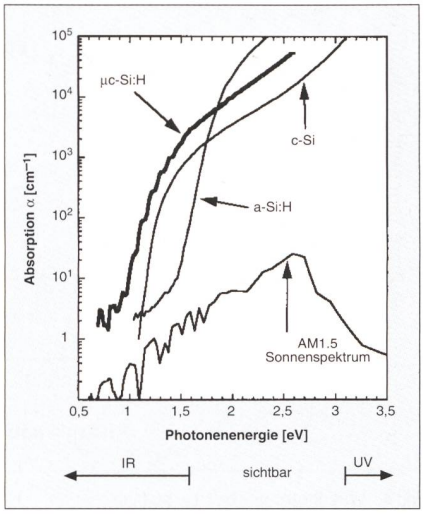


Bild 5 Optischer Absorptionskoeffizient α in Funktion der Photonenenergie für die verschiedenen Formen des Siliziums

Mikrokristalline Zellen

Diese Ernüchterung auf dem amorphen Sektor hat nun dazu geführt, dass man seit etwa 1990 wieder vermehrt nach einer Dünnfilmtechnik auf der Basis des kristallinen Siliziums Ausschau gehalten hat. In diesen Zusammenhang ist auch das gegenwärtig laufende, ambitiöse Forschungsprogramm an der australischen Universität New South Wales (Prof. Martin Green) zu stellen: Mit Aufwendungen von rund 10 Mio. Franken pro Jahr (während zunächst vier Jahren) ist dieses Forschungsprogramm weltweit zurzeit die grösste einzelne Forschungsaktivität auf dem Gebiet der Solarzellen. Bei diesem Forschungsprogramm wird das Ziel verfolgt, eine Vielzahl von einzelnen polykristallinen Siliziumschichten elektrisch parallel zu schalten, um in einer neuartigen Zellkonfiguration auf höhere Wirkungsgrade zu kommen. Bisher beruhen die vielversprechenden Wirkungsgradangaben aus diesem Labor für Dünnschichtzellen allerdings nur auf Simulationen und leider noch nicht auf tatsächlich hergestellten Solarzellen.

In der Tat ist man beim Dünnfilmsilizium technologisch im Moment noch in einer Zwickmühle: Will man hohe Wirkungsgrade (z. B. um die 15%) erreichen, so braucht man relativ dicke Konfigurationen (10–20 µm) aus polykristallinem Silizium. Dies führt aber wieder zu teuren Solarzellen, weil die Schichten – wenigstens vorläufig – nur bei höheren Temperaturen

deponiert werden können (600–800 °C oder mehr). Für gewisse Verfahren sind auch speziell teure Substrate (z. B. Keramiksubstrate) nötig; in anderen Fällen ist die Depositionsrate sehr gering, was auch wieder zu hohen Produktionskosten führen würde. Das übliche polykristalline Silizium schliesslich, wie es für Solarzellen verwendet wird, besteht aus Kristalliten in der Grösse von einigen Millimetern; es besitzt ungefähr die gleiche optische Absorption wie das monokristalline Silizium, so dass man hier zwangsläufig ebenfalls auf relativ dicke Schichten angewiesen ist.

Ein interessanter Kompromiss zwischen dem amorphen und dem kristallinen Silizium stellt nun das mikrokristalline Silizium (µc-Si:H) dar. Es ist dies ein polykristallines Silizium mit sehr kleinen Kristalliten. Der Durchmesser der Kristallite ist hier in der Grössenordnung von etwa 1 µm. Nun hat das mikrokristalline Silizium interessanterweise im nutzbringenden Teil des Lichtspektrums eine optische Absorption, welche zwischen jener des monokristallinen und des amorphen Siliziums liegt (Bild 5); hier sind also einige Mikrometer genügend, um eine befriedigende Absorption des Sonnenlichts zu gewährleisten. Zudem ist es möglich, wie im nächsten Abschnitt erläutert wird, mikrokristalline Siliziumschichten herzustellen, die keinen Staebler-Wronski-Effekt aufweisen.

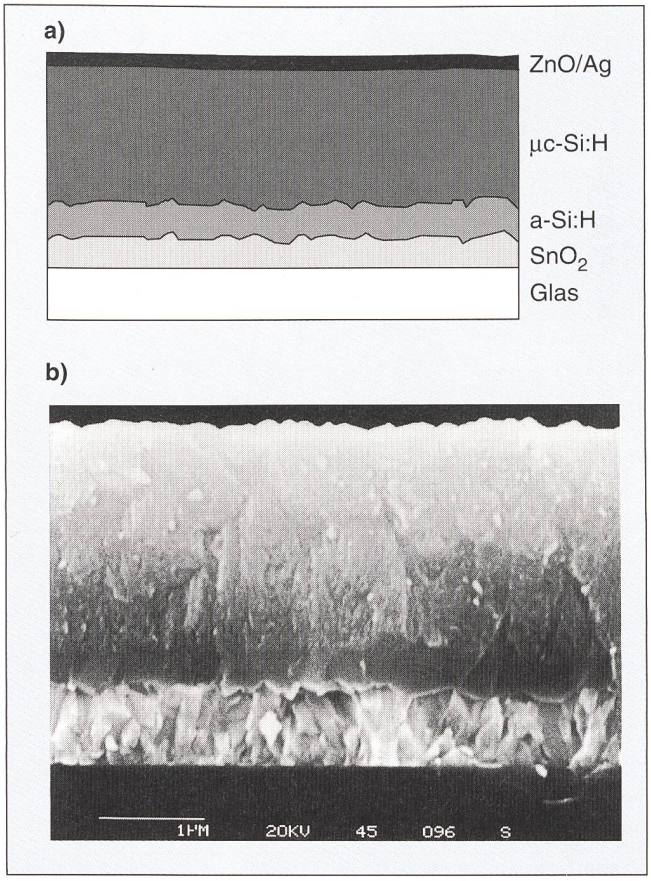


Bild 6 Tandem-Solarzellen

Tandem-Solarzelle bestehend aus mikrokristalliner Zelle (unten) und amorpher Zelle (oben)
a schematischer Aufbau
b elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnittes (Dr. V. Shklover, ETHZ)

Solarzellen aus mikrokristallinem Silizium

Das IMT hat seine Forschung in den letzten Jahren ganz auf amorphe und mikrokristalline Siliziumschichten und Solarzellen konzentriert. Schon früh zeigte sich, dass die hier eingeführte VHF-Abscheidung besonders günstig ist für die Herstellung von dotierten mikrokristallinen, wasserstoffhaltigen Siliziumschichten, wie sie in der amorphen Solarzelle oftmals mitverwendet werden. Diese p- und n-dotierten Schichten innerhalb der amorphen p-i-n-Solarzelle sind äusserst dünn (0,1 bis 0,2 nm); sie dienen vornehmlich zur Schaffung des inneren elektrischen Feldes (und nicht zur Photokonversion) und müssen deshalb qualitativ nicht besonders gut sein.

In den letzten beiden Jahren ging man am IMT dazu über, auch mikrokristalline intrinsische Schichten für Solarzellen zu optimieren; und es gelang, mit der VHF-Methode bei relativ niedriger Depositionstemperatur (220 °C) mikrokristalline Schichten herzustellen, die eine weit geringere Defektdichte aufweisen als bisher üblich. Die hohe Qualität des so hergestellten mikrokristallinen Siliziums (µc-Si:H) ist für den Spezialisten schon aus der entsprechenden Kurve in Bild 5 erkennbar; man sieht, dass die Defektabsorption dieser mikrokristallinen Siliziumschichten in der Tat sehr gering ist. Solche hochwertige mikrokristalline Schichten werden am IMT als photokonvertierende, intrinsische (i) Schicht innerhalb einer vollständig mikrokristallinen p-i-n-Solarzelle eingesetzt [5].

Die Resultate mit mikrokristallinen Schichten übertrafen die Hoffnungen bei weitem. Es gelang, eine vollständig mikrokristalline Solarzelle herzustellen, welche gegenüber der amorphen Solarzelle eine im Infrarotbereich erweiterte Spektralantwort aufweist und vollständig stabil ist. Ein Wirkungsgrad von 4,6% wurde in den ersten Versuchen schon erreicht. Dies war schon deshalb erstaunlich, weil man bisher annehmen musste, dass das mikrokristalline Silizium – wegen der vielen Korngrenzen zwischen den winzigen Kristalliten – prinzipiell zu viele Defekte haben würde und nach den ursprünglichen Erwägungen als Solarzellenmaterial für die eigentliche Photokonversion ungeeignet wäre. Die Versuche haben nun das Gegenteil bewiesen.

Doppel- und Dreifachzellen

Besonders interessant sind Solarzellen aus mikrokristallinem Silizium als «Bauteile» in Doppelzellen (Tandemzellen) und Dreifachzellen. Zum Beispiel mit einer Tandemzelle (Bild 6), bestehend aus einer mikrokristallinen und einer amorphen Solarzelle, kann man die verschiedenen Spektralanteile des Sonnenlichts optimal ausnützen: Die obere amorphe Solarzelle absorbiert vor allem das blaue und das grüne Licht, während die untere, mikrokristalline Solarzelle den grössten Teil des roten und einen Teil des Lichts im nahen Infrarot in Elektrizität umwandelt. Die erste solche am IMT hergestellte Tandemzelle hatte einen anfänglichen Wirkungsgrad von 9,1%; mittlerweile konnten 10,5% erreicht werden (Bild 7). Dabei ist die mikrokristalline Teilzelle von Anfang an stabil, während die amorphe Teilzelle dem Staebler-Wronski-Effekt unterworfen ist (womit der Gesamtwirkungsgrad am Anfang leicht absinkt).

Damit ist ein neues Feld der Solarzellenforschung eröffnet, welches nun wissenschaftlich und technisch sorgfältig erschlossen werden muss. Die Transportvorgänge im mikrokristallinen Material müssen physikalisch verstanden und technisch beherrscht werden, wenn der Wirkungsgrad weiter gesteigert werden soll. Die mikrokristalline Solarzelle weist noch einen gewichtigen Nachteil auf: Die maximale Abscheiderate liegt hier (selbst bei der an sich günstigeren VHF-Abscheidung) bisher bei etwa 4 µm/h. Dies ist ökonomisch noch unzureichend, zumal man hier Solarzellendicken von 2 bis 3 µm benötigt, um das Licht genügend gut zu

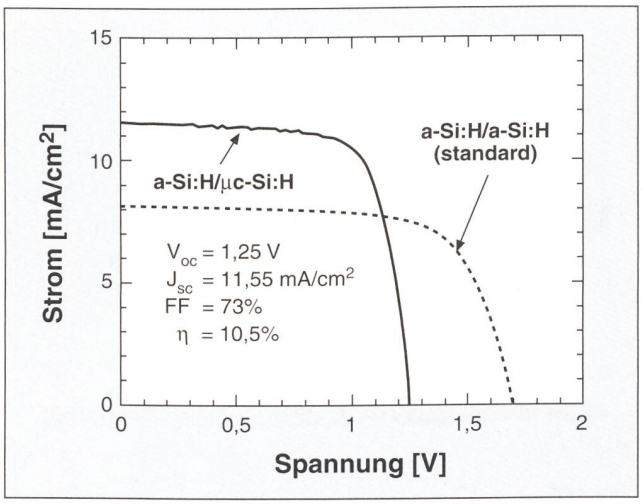


Bild 7 Kennlinien von Tandem-Solarzellen

I/V-Kennlinie einer Tandem-Solarzelle mikrokristallin/amorph; zum Vergleich ist die Kennlinie einer rein amorphen Tandemzelle angegeben.

	ohne Si-Ge-Legierungen	mit Si-Ge-Legierungen
Laborzellen (einige mm^2/cm^2)	10,0% (Fuji)	11,2% (USCC)
Labormodule ($\geq 900\ cm^2$)	8,9% (Fuji)	10,2% (USCC)
Kommerzielle Module (*beste* Werte aus Produktion)	6,3% (PST)	8% (Solarex)
Produktspezifikationen (garantierte Werte)	54 W/m^2 (USCC) 50 W/m^2 (PST)	

Tabelle I Wirkungsgrade von Solarzellen und -modulen im Vergleich

Stabilisierte Wirkungsgrade, die für Solarmodule aus amorphem Silizium bisher erreicht wurden. Man beachte, dass Solarzellen, die Germaniumlegierungen enthalten, wahrscheinlich spürbar teurer sein werden als die anderen, da der Preis für das Gas German (GeH_4) zurzeit viel höher ist als jener des Silans.

absorbieren. Schliesslich wird die Kombination von amorphen und mikrokristallinen Teilzellen erst dann wirklich interessant werden, wenn der im amorphen Silizium vorhandene Staebler-Wronski-Effekt weiter reduziert werden kann.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Silizium bleibt wohl auch für die kommenden Jahre das Schlüsselmaterial der Photovoltaik. Es gibt aber deutliche Anzeichen dafür, dass man auch im Energiesektor noch innerhalb des laufenden Jahrzehnts für einen Teil der Anwendungen von der klassischen Wafertechnik wegkommen und statt dessen eine Dünnschichttechnik aufbauen wird. Im Moment ist bei der Technologie des Dünnschichtsiliziums ein eigentlicher Wettlauf im Gang zwischen amorphen und kristallinen Varianten. Möglicherweise bringt aber gerade die Kombination dieser beiden Formen die grössten Vorteile.

Die Forschungsgruppe am IMT hat jedenfalls ihre Arbeit voll auf die Technologie des Dünnschichtsiliziums ausgerichtet. Dabei wurde in einer ersten Phase das amorphe Silizium gründlich untersucht und die neue Methode der VHF-Abscheidung für amorphe Siliziumschichten eingeführt und etabliert. Diese am IMT erfundene und patentierte Abscheidungsmethode findet zurzeit auch in der Industrie, speziell in Japan und den USA, immer mehr Beachtung.

Mit der Fortsetzung dieser Forschungsarbeiten möchte das IMT weiterhin einen weltweit signifikanten Beitrag zur Entwicklung einer Dünnschichtsolarzelle aus Silizium leisten. Mittelfristig geht es darum, eine Solarzelle mit geringen Kosten (etwa 1 $/$W_p$) und einem befriedigenden Wirkungsgrad (über 10% und stabil) zu entwickeln. Eine solche Solarzelle wäre ein idealer Baustein für die Integration der Photovoltaik in Gebäuden. Am IMT ist man sich im klaren, dass für eine solche Solarzelle Anstrengungen aus vielen verschiedenen Forschungsgruppen zusammenfliessen müssen. Die Solarzellenforschung am IMT kann dabei – eine adäquate Finanzierung vorausgesetzt – einen wichtigen Beitrag zur Sicherung des Forschungs- und Produktionsstandorts Schweiz darstellen. – Seit 1985 wurde die Forschungsarbeit am IMT vom BEW und vom Kanton Neuenburg finanziert.

Literatur

[1] *P. Suter:* Umweltbilanz der Photovoltaik. Photovoltaik-Seminar Freiburg (CH), 1995.

[2] *A. Ricaud:* Les modules photovoltaïques: quels produits pour quels marchés? Systèmes solaires 103(1994) S. 19–37.

[3] *K. S. Srinivas:* Energy Investment and Production Costs of Amorphous Silicon PV-Modules. Technical Digest 6th PVSEC, New Delhi, 1992.

[4] *M. Camani:* Schlussbericht TSO 1990–93, ENET 9100 196.

[5] *J. Meier* et al.: Intrinsic Microcrystalline Silicon (μc-Si:H) – a promising new Thin Film Solar Cell Material. Proc. 1st WCPEC, Hawaii, 1994.

[6] *A.V. Shah, R. Platz* und *H. Keppner:* Thin-Film Silicon Solar Cells: A Review and Selected Topics. Solar Energie Materials and Solar Cells 38, 1995.

Vers des cellules solaires à couches minces performantes

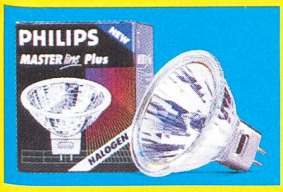
La recherche sur les cellules solaires en couches minces de silicium à l'Institut de Microtechnique à Neuchâtel

Les cellules solaires classiques actuelles utilisant des plaquettes (wafers) de silicium, empruntées de la microélectronique, ne conviendront vraisemblablement pas pour une future utilisation à grande échelle du photovoltaïque. Les technologies d'avenir seront certainement celles des «couches minces», particulièrement appropriées à l'intégration du photovoltaïque dans le bâtiment. Parmis les différentes variantes étudiées, celle basée sur des couches minces de silicium offre les plus grands atouts d'une part pour des raisons économiques et écologiques et d'autre part car il existe une expérience de production industrielle.

Les travaux de recherche effectués à l'Institut de Microtechnique à Neuchâtel ont conduit à réduire potentiellement les coûts de production en utilisant la déposition par «plasma VHF», et à obtenir des couches améliorées ainsi que des cellules à haut rendement. Une nouveauté intéressante a été dernièrement introduite: le silicium microcristallin hydrogéné. De fait, c'est la combinaison de silicium amorphe et microcristallin qui permet dans des cellules tandems d'accroître le rendement stabilisé tout en gardant les avantages de fabrication simple des cellules solaires par plasma.

MASTERline Plus – das brillanteste Halogenlicht.

Let's make things better.



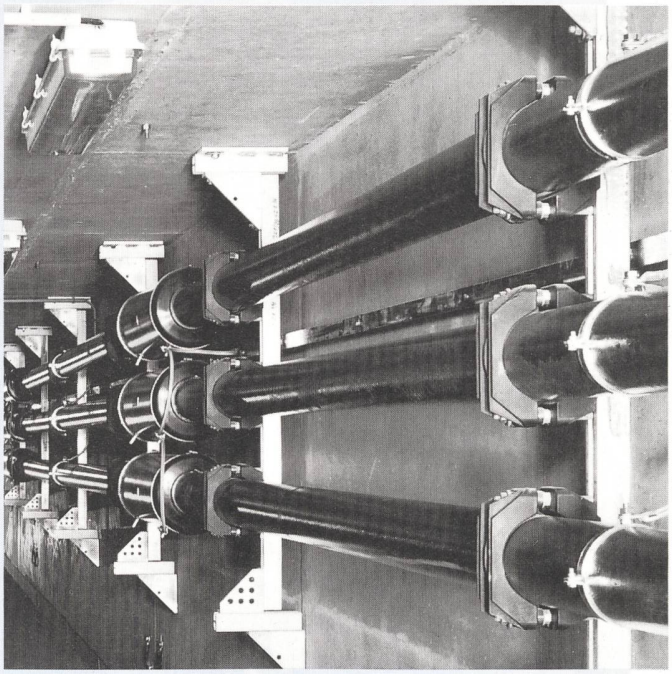
Die neue MASTERline Plus hat eine einzigartige Lichtstärke. Das heisst: Entweder bis zu 60% mehr Licht als mit herkömmlichen Kaltlicht-Lampen oder weniger Stromkosten, weil beispielsweise MASTERline Plus mit 35 Watt Leistung bisherige Lampen mit 50 Watt ersetzen können.

PHILIPS

PHILIPS

Die beste Wahl innovativer Technologie.

GASCOIL® SF6-isolierte Messwandler für autonome und integrierte GIS Anwendungen



DURESCA® Giessharzisolierte Stromschienen nach Kundenspezifikation
Hintergrundbild: SILESCA® Giessharztransformator

Seit ihrer Gründung 1914 hat sich MGC zu einem führenden Hersteller von Leistungstransformatoren, Messwandlern sowie isolierten Stromschienensystemen etabliert. Vertreten in über 20 Ländern bietet MGC weltweit hochentwickelte, kundenspezifische Lösungen an. Profitieren Sie von unserem know-how, unserer Qualität und Flexibilität. Auf Ihre Kontaktaufnahme freut sich:

MGC
MOSER-GLASER

MGC Moser-Glaser & Co. AG
Energie- und Plasmatechnik
Hofackerstrasse 24
CH - 4132 Muttenz / Schweiz

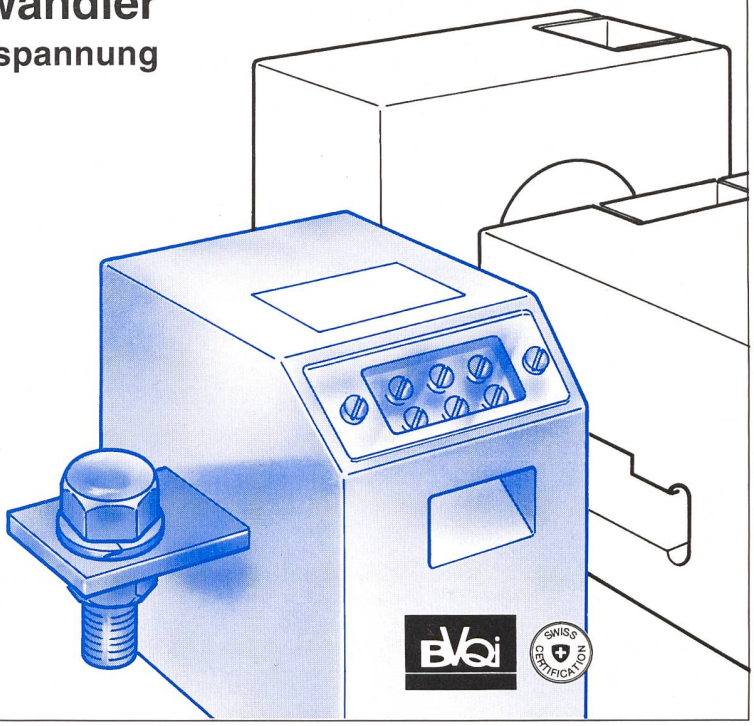
Telefon 061 / 467 61 11
Telefax 061 / 467 63 11

PFIFFNER

Strom- & Spannungswandler
Niederspannung

Ihr Vorteil, unsere Verpflichtung:

- beste Schweizer Qualität
- kurze Lieferzeiten
- kompakte Bauweise
- kompetente Beratung
- spezifische Lösungen



PFIFFNER MESSWANDLER AG
5042 HIRSCHTHAL / SWITZERLAND
TEL ..41 62 739 28 28 FAX ..41 62 739 28 10

SUISSE ROMANDE: SOTERO SA
1114 Colombier, Tel. ..41 21 869 81 81

BVQI SWISS CERTIFICATION

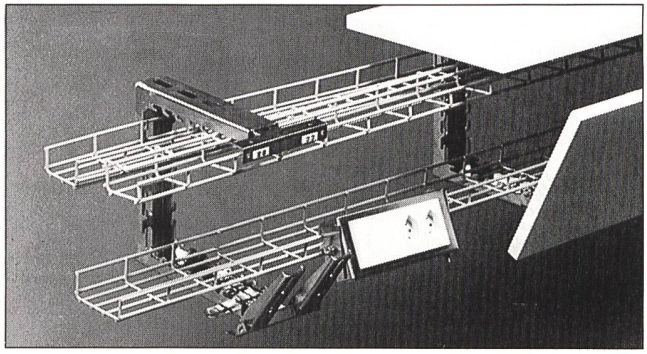
Fribos STAHL

Im Explosionsschutz kennen wir uns aus

Explosionsgeschützte
- Leuchten
- Installationsgeräte
- Befehlsgeräte
- Meldegeräte
- Steuerungen
- MSR-Geräte
- Feldmultiplexer

Ex

Fribos AG, Muttenzerstrasse 125
CH-4133 Pratteln 2, Telefon 061 821 41 41, Fax 061 821 41 53



NOUVEAU Canaux d'allèges LANZ

Les nouveaux canaux d'allèges astucieux de LANZ (brev. dép.) aux multiples avantages:
- **différentes dimensions dès 150×200 mm. Prises de courant invisibles à l'intérieur**
- **problèmes d'accessibilité et de séparation parfaitement résolus**
- **revêtement avec le matériel de votre choix, pour un design parfait**

Constatez par vous-même combien la planification et l'installation avec les canaux d'allèges LANZ sont meilleures et plus simples. Téléphonez-nous:
lanz oensingen 062/78 21 21 fax 062/76 31 79

☐ **Les canaux d'allèges de LANZ m'intéressent. Veuillez me faire parvenir votre documentation.**

☐ **Pourriez-vous me/nous rendre visite, avec préavis s.v.p.?**

Nom/adresse: _____

bk

lanz oensingen sa
CH-4702 Oensingen · téléphone 062 78 21 21

WEKAwegweisend.
WEKA Verlag AG

Sind Sie ExperteIn in EMV-Fragen?

Für die praxisorientierten Loseblattwerke des Verlagsbereichs Technik publiziert der WEKA Verlag - der führende Verlag für Fachinformationen - ein Praxishandbuch EMV.

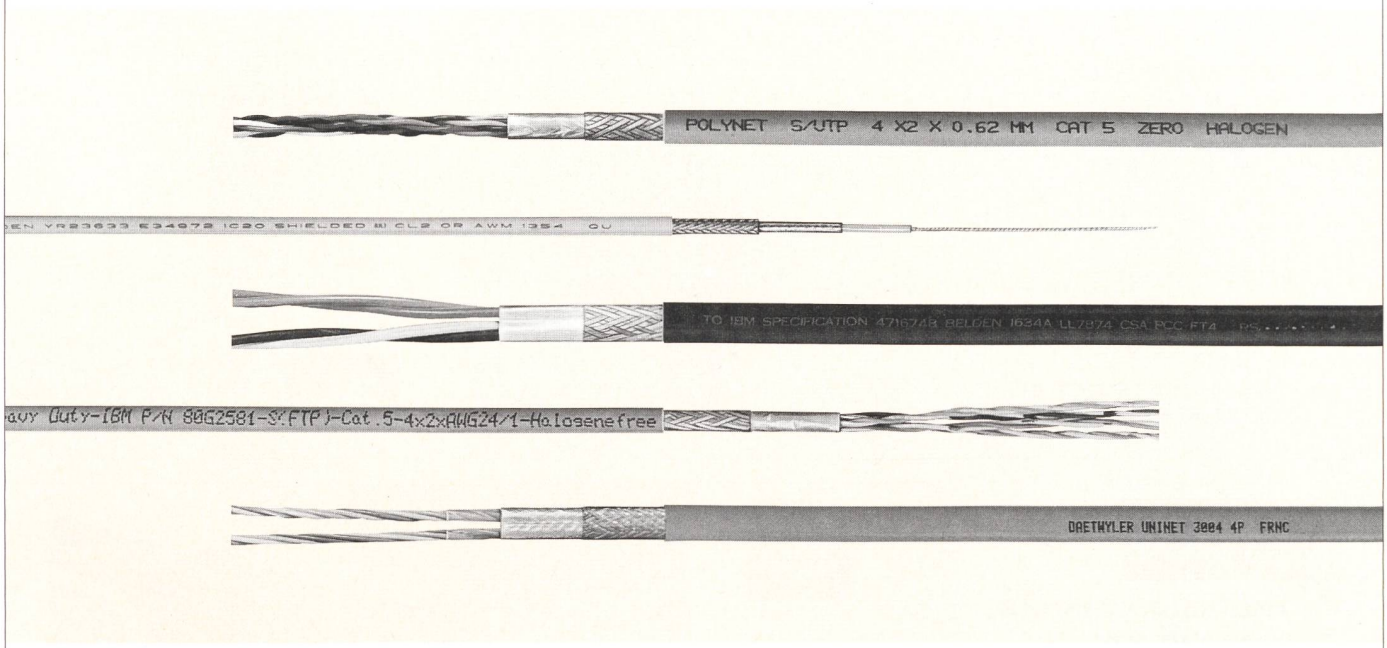
Sind Sie der/die praxisorientierte Fachmann/frau? Haben Sie publizistisches Flair?

Für die Realisierung dieser interessanten Aufgabe suchen wir einen Profi auf dem Gebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit. Interessiert? Dann sollten Sie uns noch heute anrufen.

Hans-Jörg Gerhard freut sich über Ihre Kontaktaufnahme.
Tel. 01-434 88 69.

Hermetschloostrasse 77 Postfach 8010 Zürich Telefon 01-434 88 88 Telefax 01-432 82 01

«Ein Fall für Daten!»



universelle Verkabelung	Ethernet	Token Ring	ATM
Belden	ITT	AT & T	IBM
ICS	Uninet	Polynet	ACS
S-UTP	S-STP	FTP	UTP

384

OTTO FISCHER AG

Elektrotechnische Artikel en gros, Aargauerstrasse 2, Postfach, 8010 Zürich
Telefon 01/276 76 76, Romandie 01/276 76 75, Ticino 01/276 76 77
Telefax 01/276 76 86, Romandie 01/276 77 63, Ticino 01/276 77 95