

9554318
ENET 9864318



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Swiss Federal Office of Energy

Programm
Aktive Sonnenenergienutzung, Photovoltaik



ALUCOSOL

Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen

ausgearbeitet durch

Dr. M. Weng / Dr. W. Hotz / F. Hofmann
Alusuisse Technology & Management AG
Badische Bahnhofstrasse 16
8212 Neuhausen am Rheinfall

Dr. D. Kuse / Dr. J. Gobrecht
Paul Scherrer Institut
5232 Villigen PSI

T. Kälin
Electrowatt Engineering AG
Bellerivestrasse 36
8034 Zürich

P. Toggweiler / D. Ruoss
Enecolo AG
Lindhof 235
8617 Mönchaltorf

PD Dr. H. Kiess
Im unteren Tollacher 11
8162 Steinmaur

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Die Tatsache, dass sich das Anwendungspotential für die photovoltaische Stromerzeugung in der Schweiz – aber auch in anderen dicht besiedelten Industrieländern – in hohem Mass auf die Gebäudeintegration abstützt, war und ist allgemein anerkannt und wurde in der Vergangenheit an nationalen und internationalen Konferenzen immer wieder bestätigt. Es fehlt aber immer noch an geeigneten Produkten und Systemtechnologien.

Um dieses Potential innert nützlicher Frist zu nutzen, müssen entsprechende Solarzellenmodule auf den Markt gebracht werden. Eine Erweiterung des bestehenden Angebots ist dringend erforderlich. Diese Situation war Ausgangspunkt für das ALUCOSOL-Projekt.

Der Grundstein für das Projekt wurde am 10. September 1991 mit einem Workshop zum Thema „Grossflächige Photovoltaische Solarzellen für die Architektur“ gelegt. Hinter diesem Titel stand die Idee, ein Photovoltaik- (PV-) System zu entwickeln, das auch modernen Ansprüchen an eine befriedigende architektonische Gestaltung gerecht wird. Das Ziel war die kostengünstige, (halb-)kontinuierliche Fertigung eines photovoltaischen „Halbzeugs“, dessen Verarbeitung zu einem für die Architektur geeigneten Verbundmaterial sowie die Integration der standardisierten Verbundfassadenelemente in die Gebäudehülle.

Resultat des Workshops war die Grobplanung des ALUCOSOL-Projekts mit zunächst drei Projektphasen: 1. Konzept- und Machbarkeitsstudie, 2. Labormässige Fertigung von Mustern, 3. Realisierung von Pilotmodulen. Im Verlauf des Projekts wurde die Planung um eine weitere Phase (4. Herstellung von Demo-Fassadenelementen) erweitert, um anhand einer geeigneten Fassade u.a. die Montagefreundlichkeit, den PV-Wirkungsgrad, die Systemtechnik, das Aussehen und die Kosten Seite realistisch ermitteln zu können.

Die ersten drei Phasen wurden vom Nationalen Energie-Forschungs-Fond (NEFF) gefördert; ihre Resultate wurden anfangs 1996 in einem Abschlussbericht veröffentlicht. Die vierte – vom Bundesamt für Energie (BFE) geförderte – Phase ist im vorliegenden Bericht beschrieben. Das ursprüngliche Ziel der Herstellung und Erprobung einer Demo-Fassade musste bereits gegen Ende der Projektphase III aufgegeben werden, da trotz intensiven Bemühungen keine kommerziell verfügbare und zur Realisierung des ALUCOSOL-Konzepts geeignete Solarzellen-Technologie gefunden werden konnte. Statt dessen war vorgesehen, bis zum Projektende die Idee der grossflächigen Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium in Verbindung mit einem geeigneten Konzept zur Stromableitung weiterzuentwickeln und bis zum Stadium von einzelnen Pilotmodulen in der Grössenordnung von DIN A4-Format voranzutreiben.

Bis zur Abgabe des Schlussberichts war u.a. das Erreichen der folgenden Detailziele vorgesehen: Lösungsansätze für die grossflächige Beschichtung von Aluminium mit a-Si:H, Lösung des Problems der Stromdurchführungen (Prototypen), Verbesserung des bestehenden Oberflächenschutzes (Beständigkeit, Kratzfestigkeit, Kosten, etc.), Herstellung und Prüfung von Pilotmodulen im Format von etwa DIN A4, Darstellung des ALUCOSOL-Konzepts inkl. Kostenschätzung, Erstellen des Grobkonzepts für einen Fertigungsablauf.

Um das Defizit der fehlenden Zellen auszugleichen, wurde beschlossen, die Grundlagen für die grossflächige a-Si:H-Direktabscheidung auf Aluminium-Substrat in Zusammenarbeit mit dem IMT Neuchâtel und anderen Partnern aus Wissenschaft und Industrie zu erarbeiten. Die meisten Aktivitäten während der Projektphase IV bestanden daher auch in der Suche nach Möglichkeiten zur Realisierung des Konzepts der a-Si:H-beschichteten Aluminiumbleche mit Stromdurchführungen und in entsprechenden Versuchen bei verschiedenen Partnern. Damit wurde die Zielsetzung des Projekts – die Entwicklung eines PV-Fassadensystems bis zur Produktionsreife – in eine Machbarkeitsstudie für das vorgesehene Solarzellenkonzept abgeändert.

Während bezüglich der konzeptionellen und theoretischen Überlegungen die Projektziele weitgehend erreicht werden konnten, erwies sich die praktische Umsetzung als weitaus schwieriger und zeitlich aufwendiger als geplant. Es konnten nur Teilaspekte der Modulherstellung (Beschichtung von Al-Blechen mit a-Si:H, Laserbohren der Durchführungen, etc.) erprobt werden, so dass die Herstellung eines funktionsfähigen Pilotmoduls im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht realisiert werden konnte. Die gewonnenen Erkenntnisse führen aber zu dem Schluss, die ALUCOSOL-Idee im Rahmen eines noch zu definierenden Nachfolgeprojekts weiterzuverfolgen.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Abstract

The fact that the application potential for photovoltaic current production in Switzerland – but also in other densely settled industrialised countries – is mainly based on building integration has been generally accepted and was often confirmed in the past at national and international conferences. However, suitable products and system technologies are still missing.

In order to utilise this potential within a reasonable space of time, corresponding solar cell modules have to be put on the market. An expansion of the existing product range is urgently necessary. This situation was the starting point for the ALUCOSOL project.

The foundation-stone of the project was laid during a work-shop on September 10th, 1991, covering the subject „Large area solar cell modules for architecture“. Behind this subject stood the idea of developing a photovoltaic (PV-) system considering all requirements of a satisfying architectural shaping. The target was the cost-effective, (half-)continuous fabrication of a photovoltaic semi-product, its processing to a composite material, which is suitable for architecture, and the integration of the standardised composite elements into the façade.

The result of the work-shop was a rough plan of the ALUCOSOL project with for the time being three phases: 1st: concept and feasibility phase, 2nd: laboratory-scale manufacturing of samples, 3rd: fabrication of pilot modules. During the project the plan was expanded to an additional phase (4th: fabrication of demo façade elements). The target of this phase was a realistic examination of assembly, PV-efficiency, system technology, appearance and costs.

The first three phases were financially supported by the National Energy Research Found (NEFF); at the beginning of 1996 their results were published in a final report. The 4th phase – financially supported by the Swiss Federal Office of Energy (BFE) – is described in the report in hand. As no solar cell technology could be found, that was commercially available and suitable for the realisation of the ALUCOSOL-project, the initial target of fabrication and testing of a demo-façade had already to be given up at the end of phase III. As a compensation it was planned to develop the idea of the large area deposition of a-Si:H on aluminium in connection with a suitable concept for the current collection and to go ahead with this concept up to the state of pilot modules in the size of about DIN A4.

By the delivery of the final report the achievement of the following detail targets was planned: solution concepts for the large area deposition of a-Si:H on aluminium, solution of the problem of current conduction through the cells (prototypes), improvement of the existing surface protection system (mechanical and chemical stability, scratch resistance, costs, etc.), fabrication and testing of pilot modules in the size of about DIN A4, documentation of the ALUCOSOL-concept including cost estimation, setting up of a rough concept for fabrication.

As a compensation for the lack of suitable solar cells the decision was made to acquire the basis for the large area direct deposition of a-Si:H on aluminium in collaboration with IMT Neuchâtel and other partners from science and industry. Most of the activities during project phase IV consisted of the search for possibilities to realise the concept of aluminium-sheets with a-Si:H-deposition and current conductions, and of corresponding experiments at various partner institutions. With this procedure the object of the project – i.e. the development of a PV-façade system up to production maturity – was changed to a feasibility study for the planned solar cell concept.

Concerning the conceptual and theoretical considerations the targets of the project were mainly achieved. However, the practical realisation proved to be much more difficult and time spending than originally planned. Only partial aspects of the module fabrication (deposition of a-Si:H on Al-sheets, laser-drilling of current conductions, etc.) could be examined; therefore the fabrication of a functioning pilot module could not be realised. However, the gained results and perceptions led to the conclusion that the promotion of the ALUCOSOL idea has to be continued; a follow-up project should soon be defined.

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage	5
1.1 Zusammenfassung der Projektphasen I-III (NEFF-Förderung)	5
1.2 Zielsetzung für Phase IV	8
1.3 Projektorganisation in Phase IV	9
1.4 Arbeitsprogramm / Lösungsweg	9
2 Resultate	11
2.1 Marktsituation (Update)	11
2.1.1 ALUCOBOND®	11
2.1.2 Anwendungspotential	12
2.1.2.1 Fassade und Dach	12
2.1.2.2 Übrige Anwendungen	14
2.1.3 Bauintegrierte Photovoltaik (bestehende Produkte)	15
2.2 Auswertung Pilotmodule	17
2.3 Konzepte „Neue Module“	21
2.3.1 a-Si:H auf Aluminium	21
2.3.2 Stromdurchführungen	22
2.3.2.1 Konzept	22
2.3.2.2 Dimensionierung der Zellenträger	23
2.3.2.3 Dimensionierung der Zelloberflächen	25
2.3.2.4 Lösungsvorschlag für die Zelloberflächen	27
2.3.3 Oberflächenschutz	28
2.3.3.1 Plasma-Nitrid-Schutzschichten auf a-Si:H-Solarzellen	28
2.3.4 Vier-Zellen-Module	29
2.3.5 Grobkonzept für die Produktion	29
2.4 Versuche	31
2.4.1 Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium	31
2.4.2 Thermische Zyklen mit a-Si:H-Zellen auf Al-Substrat	32
2.4.3 Realisierung von Laserbohrungen	33
2.4.4 Plasma-Nitrid-Schutzschichten auf a-Si:H-Solarzellen	34
2.4.5 Polymere Schutzschichten	34
2.4.6 Kontaktierung für elektrische Messungen	34
2.4.7 Leitfähigkeitsmessungen an TCO	35
2.4.8 Herstellung eines STEELOBOND®-Demo-Moduls	36
2.5 Kostenanalyse (Zusammenfassung)	38
2.6 Koordination / Übertrag SCMIC-Projekt	39
3 Soll-Ist-Vergleich	40
3.1 Änderung der Zielsetzung	40
3.2 Grad der Zielerreichung	41
3.3 Gründe für Abweichungen	43
4 Schlussfolgerungen	44
5 Ausblick / Weiteres Vorgehen	45
5.1 Offene Probleme	45
5.2 Weitere Arbeiten (kurz-/langfristig)	45
6 Literaturverzeichnis	46
7 Projektdokumentation	47

1 Ausgangslage

Die Tatsache, dass sich das Anwendungspotential für die photovoltaische Stromerzeugung in der Schweiz – aber auch in anderen dicht besiedelten Industrieländern – in hohem Mass auf die Gebäudeintegration abstützt, war und ist allgemein anerkannt und wurde in der Vergangenheit an nationalen und internationalen Konferenzen immer wieder bestätigt. Vielfach sind aber die heute eingesetzten Solarzellenmodule nicht im eigentlichen Sinn in die Gebäudehülle integriert; bisher übernehmen sie nur in Ausnahmefällen gleichzeitig auch die Funktion von Bauelementen: Es fehlt immer noch an geeigneten Produkten und Systemtechnologien.

Um dieses Potential innert nützlicher Frist auszunutzen, müssen entsprechende Solarzellenmodule auf den Markt gebracht werden. Spezielle, aber zumeist teure Module für diesen Zweck sind zwar seit geraumer Zeit erhältlich, eine Verbreiterung des Angebots ist aber dringend erforderlich und überfällig. Diese Situation war der Ausgangspunkt für das ALUCOSOL-Projekt.

1.1 Zusammenfassung der Projektphasen I-III (NEFF-Förderung)

Der eigentliche Grundstein für das Projekt wurde am 10. September 1991 gelegt, als bei der heutigen Alusuisse Technology & Management AG (damals: Alusuisse-Lonza Services AG) in Neuhausen ein Workshop zum Thema „Grossflächige Photovoltaische Solarzellen für die Architektur“ stattfand. Hinter diesem Titel stand die Idee, ein Bausystem zur langfristig wirtschaftlichen Erzeugung von Solarstrom zu entwickeln, das auch modernen Ansprüchen an eine befriedigende architektonische Gestaltung gerecht wird. Das Ziel war die kostengünstige, (halb-)kontinuierliche Fertigung eines photovoltaischen „Halbzeugs“, dessen Verarbeitung zu einem für die Architektur geeigneten Verbundmaterial sowie die Integration der standardisierten Verbundfassadenelemente in die Gebäudehülle.

Ziele des Workshops waren die Identifikation geeigneter Partner für ein entsprechendes Forschungsprogramm, die Abstimmung mit anderen laufenden bzw. geplanten Projekten mit ähnlicher Zielsetzung zur Vermeidung von Doppelspurigkeiten, die Bestimmung von Verantwortlichen und die Festlegung der ersten Schritte. In der Folgezeit formierte sich das Projektteam aus den vier Firmen Alusuisse Technology & Management AG (ATM), Enecolo AG (ENEC, damals: PMS Energie AG), Electrowatt Engineering AG (EWE, damals: Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG) und Paul Scherrer Institut (PSI), wobei die Aufnahme weiterer Partner - insbesondere eines Architekturbüros - in das Team offen gehalten wurde bzw. beabsichtigt war. Ferner wurde die Grobplanung des Projekts von 1992-1995 in die drei Projektphasen

- I Konzept- und Machbarkeitsstudie
- II Labormässige Fertigung von Mustern
- III Realisierung von Pilotmodulen

festgelegt. Im Verlauf des Projekts wurde diese Planung um eine weitere Phase

- IV Herstellung von Demo-Fassadenelementen

erweitert, um anhand einer geeigneten Fassade u.a. Montagefreundlichkeit, photovoltaischer (PV-) Wirkungsgrad, Bautaughkeit, Systemtechnik, Aussehen und die Kosten- seite realistisch ermitteln zu können.

In der ersten Phase des Projekts von Juni 1992 bis März 1993 standen gemäss der Projekt-Grobplanung zunächst Konzept- und Machbarkeitsstudien im Vordergrund. Vor Beginn der eigentlichen Projektarbeiten waren in einer vorgeschalteten Planungsphase Teilziele festgelegt worden, deren Erreichen die Meilensteine für den Entscheid über den Eintritt in die Projektphase II und damit die Weiterführung des Projekts darstellten:

- Bewertung bestehender Fassadensysteme hinsichtlich Eignung für PV-Anwendungen
- Technische und wirtschaftliche Bewertung der bekannten Solarzellen-Technologien
- Technische und wirtschaftliche Bewertung von Modulsystemen
- Zusammenstellung und Bewertung ökologischer Daten
- Erstellung eines Grobdesigns für ein Fassadenelement
- Erstellung eines Konzepts für die Systemtechnik
- Einbindung eines oder mehrerer Solarzellenhersteller in das Projekt

Entsprechend dieser Zielsetzung wurden verschiedene Teilprojekte definiert, die jeweils unter der Leitung eines der Projektpartner bearbeitet wurden:

- | | |
|--|-------|
| • Fassadensystem | (ATM) |
| • Solarzellen-Technologie | (PSI) |
| • Modulsystem | (EWE) |
| • Ökologie | (EWE) |
| • Design des PV-integrierten Fassadenelementes | (ATM) |
| • Systemtechnik | (EWE) |
| • Solarzellenpartner | (ATM) |

Die Hauptarbeit der ersten Projektphase bestand darin, Informationen zu den oben genannten Teilzielen bzw. Teilprojekten zusammenzutragen und entsprechende Kontakte herzustellen. Als Arbeitstitel für das Projekt wurde in Anlehnung an bestehende Produktnamen für Fassadenhalbzeuge (z.B. ALUCOBOND®) des Alusuisse-Lonza-Konzerns der Name ALUCOSOL gewählt.

Zum Thema *Fassadensystem* wurde eine Liste aller wichtigen Fassadentypen erstellt und mit einem Kriterienkatalog verknüpft. Eine Bewertung ergab Vorteile für Verbundfassaden vom Typ ALUCOBOND® und bestätigte damit die Richtigkeit der Projektidee.

Als Basis für die Auswahl von geeigneten *Solarzellen-Technologien* diente ebenfalls ein Kriterienkatalog. Da die Bewertung eindeutig zugunsten der Silizium-Technologien ausfiel, wurde beschlossen, diese vorrangig weiterzuverfolgen.

Die Auswahl eines geeigneten *Modulsystems* wurde vorbereitet, jedoch gemäss der Planung bis zur Projektphase III offengehalten. Vom Projektteam favorisiert wurde das Konzept des „Einzellenmoduls“, bei dem die gesamte Modulfläche mit einem photovoltaisch aktiven Material (z.B. a-Si:H) beschichtet ist.

Die Abklärungen zur *Ökologie* zeigten, dass in dieser Hinsicht die auf Silizium basierenden Solarzellen-Technologien sinnvoll sind. Alle anderen überprüften Dünnschicht-Technologien erwiesen sich dagegen für eine Fassadenanwendung aus ökologischen oder sicherheitstechnischen Gründen (z.B. im Brandfall) als sehr problematisch.

Vom Architektenbüro Hostettler + Partner wurden im Auftrag des Projektteams drei Entwürfe für *Fassadenelemente* erstellt. Um Kosten zu sparen, wurde eine Standardisierung der Module angestrebt: Die Fassade sollte als einzelne Fertigelemente in der Werkstatt inkl. Verkabelung vorgefertigt werden, um die Endmontage später auf der Baustelle ohne Gerüste durchführen zu können.

Da die *Systemtechnik* im Durchschnitt etwa die Hälfte der Kosten einer PV-Anlage ausmacht, kommt ihr wegen des hohen Kostensparpotentials grosse Bedeutung zu. In der Projektphase I wurde daher vom Projektpartner Electrowatt Engineering AG mit Unterstützung der Enecolo AG eine umfangreiche Konzeptstudie zu diesem Thema erstellt, die später immer wieder aktualisiert wurde. Zentrale Punkte dieser Studie waren die im Rahmen dieses Projekts entwickelte Idee des „Einzellenwechselrichters“, die auch zum Patent angemeldet wurde, sowie die Verwendung der beiden Deckbleche eines Sandwich-Verbunds als Stromleiter.

Die Suche nach geeigneten *Solarzellenlieferanten* war der zentrale Punkt der Projektphase I und wurde mit entsprechend hohem Aufwand durchgeführt. Neben zahlreichen Kontakten wurde mit folgenden Firmen zusammengearbeitet: BP Solar Ltd. (GB), UNI-SOLAR (USA) und Phototronics GmbH (D). Im Rahmen des vom NEFF geförderten Projekts "Grossflächige Abscheidung von amorphen photovoltaischen Silizium-Schichten auf Aluminium" wurde ausserdem die Zusammenarbeit mit dem IMT Neuchâtel intensiviert.

Bei den Arbeiten der Projektphase II ging es vor allem um die Umsetzung der Resultate der Machbarkeitsstudie aus Phase I, d.h. die Herstellung erster Labormuster, um die Ausführbarkeit der in der ersten Projektphase gesammelten Ideen zu überprüfen. Wichtige Themen waren vor allem das Aufkaschieren der Solarzellen auf verschiedene Trägermaterialien und der Schutz der Oberflächen vor äusseren Einflüssen.

Die ersten *Labormodule* wurden bei ATM (a-Si:H auf rostfreiem Stahl von UNI-SOLAR) und im Auftrag des Projektteams bei BP Solar Ltd. (c-Si) hergestellt. In umfangreichen Versuchsreihen wurden geeignete Kleber und Oberflächenschutzfolien evaluiert und bezüglich wichtiger Materialeigenschaften – insbesondere Langzeitverhalten und Bewitterungsbeständigkeit – getestet. Zur Abschätzung der durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten verursachten Durchbiegung der Module wurde eine FEM-Berechnung durchgeführt.

Die Resultate der durchgeführten Arbeiten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Abschlussbericht zu den Phasen I und II dokumentiert /1/.

Für die Phase III waren zunächst die Weiterführung dieser Versuche und der Aufbau eines kleinen Fassadenabschnitts (Fläche ca. 4 m²) für Demonstrations- und Messzwecke geplant. Für die Versuche zum *Oberflächenschutz* sowie für einige weitergehende Untersuchungen waren noch genügend Zellen von Fa. UNI-SOLAR vorhanden, eine zugesagte Lieferung von ca. 120 Zellen (a-Si:H auf Stahl) für die Demo-Fassade verzögerte sich jedoch über Monate und war bis Ende November 1995 noch nicht eingetroffen, so dass dieser Teil der Arbeiten auf einen späteren, unbestimmten Termin verschoben werden musste. ~~Statt dessen wurden andere Aktivitäten, die in dieser Phase noch nicht oder nur in geringerem Umfang vorgesehen waren, vorgezogen bzw. ausgeweitet /2/.~~

Bei den ökonomischen Abklärungen zur Fassadenintegration von Solarzellenmodulen erwies sich sehr bald, dass eine *Marktanalyse* im konventionellen Sinn für das geplante ALUCOSOL-System wegen der Vielzahl der nichtbeeinflussbaren und schwierig voraus-sagbaren Faktoren (Umweltsituation, politisches, wirtschaftliches, technisches Umfeld) zum damaligen Zeitpunkt noch nicht möglich war. Anstelle einer genauen Marktanalyse wurden aber durch Quervergleiche aufschlussreiche Aussagen über den zukünftigen Markt gefunden. Daneben wurden diverse Potentialstudien berücksichtigt, welche jedoch sehr unterschiedliche Ergebnisse zutage förderten. Obwohl die durchgeführten Abschätzungen erwartungsgemäss noch keine definitive Aussage über die tatsächlichen Marktchancen von ALUCOSOL ergaben, wurde deutlich, mit welchem Marktpotential für fassaden- bzw. dachintegrierte PV-Anlagen für die kommenden Jahre gerechnet werden kann.

Zum Themenbereich *Systemtechnik* wurden zahlreiche Vorüberlegungen zum Konzept des Einzellenwechselrichters gemacht, die in ein als Spin-Off gestartetes JOULE-Projekt (SCMIC – Single Cell Module Integrated Converter System) eingebracht wurden. Kernpunkte dieses Konzepts sind die Auslegung der gesamten Moduloberfläche als eine einzige Zelle, die Verwendung der beiden metallischen Deckbleche des Modulträgers als Stromleiter und der Einsatz eines integrierten Wechselrichters pro Modul (s. Kapitel 2.6).

Als Möglichkeiten für die elektrische Kontaktierung zwischen Zelle, Substrat und Steckanschluss oder Inverter wurden unterschiedliche Verbindungstechniken in Betracht gezogen: Kleben, Löten, Punktschweissen und Kaltlöten (Pressen, etc.). Von diesen wurden das Verkleben mit leitfähigen Materialien und das Punktschweissen näher untersucht. Beide Verfahren erwiesen sich als prinzipiell tauglich, die leitfähigen Kleber sind für eine Massenfertigung noch zu teuer, so dass nach anderen Lösungen gesucht werden muss.

Wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der zur Verfügung stehenden Solarzellen (a-Si:H auf rostfreiem Stahl) und der Aluminiumoberfläche von ALUCOBOND® wurden die ersten Labormodule mit einem Stahl-Kunststoff-Stahl-Verbund („STEELBOND®“) hergestellt; hierdurch konnten Durchbiegungen weitestgehend vermieden werden. Die bei der Modulherstellung auftretenden Druck- und Temperaturbelastungen hatten dabei keinen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Zellen. Für die Fertigung von ALUCOSOL ist diese Erkenntnis von grosser Bedeutung, da andernfalls grosse Einschränkungen bei der Wahl des Kaschierverfahrens bestanden hätten.

Als Oberflächenschutz wurden TEFZEL®-Folien eingesetzt, die auf verschiedene Arten mit der Zellenoberfläche verbunden wurden: als vorläufig beste Variante erwies sich die Kombination einer dünnen, geschlitzten EVA-Klebefolie mit der TEFZEL®-Folie, womit ein blasenfreies Aufkaschieren sowohl auf einzelne Zellen als auch auf die Labormodule möglich wurde. Verklebungen auf einer Glasplatte und auf a-Si:H-Dünnschichtzellen wurden durchgeführt und Prüfungen der Haftfestigkeit, der Transmission und der UV-Beständigkeit durchgeführt. Als Alternativen zu dieser Oberflächenbeschichtung wurden Ormocer-Materialien sowie Dünnglasfolien untersucht. Während die Ormocere grundsätzlich in Frage kommen, schieden die Glasfolien wegen ihrer Sprödigkeit aus.

An den ALUCOSOL-Pilotmodulen auf der Basis von ALUCOBOND® mit kristallinen Zellen, die in Projektphase II im Auftrag des Projektteams hergestellt worden waren, wurden erste Langzeiterfahrungen im Ausseneinsatz gewonnen. Die Auslagerung dieser Module wurde weiter fortgesetzt, da die gewonnenen Erkenntnisse grösstenteils auch für künftige ALUCOSOL-Varianten genutzt werden können.

Die Resultate der in Phase III durchgeführten Arbeiten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden ebenfalls in einem Abschlussbericht dokumentiert /3/.

1.2 Zielsetzung für Phase IV

Das übergeordnete Ziel des ALUCOSOL-Projekts war die Entwicklung eines modernen PV-Fassadensystems, das gegenüber konventionellen Lösungen entscheidende Vorteile bezüglich Gewicht, Herstellungs- und Montagekosten, Integration des elektrischen Systemteils und der architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten besitzt. Insbesondere die kostengünstige, möglichst kontinuierliche Modulfertigung bildete hierbei einen wichtigen Schwerpunkt.

Das ursprüngliche Ziel der Herstellung und Erprobung einer Demo-Fassade innerhalb des Förderungszeitraums durch das BFE musste bereits gegen Ende der Projektphase III aufgegeben werden, da trotz intensiven Bemühungen keine kommerziell verfügbare und zur Realisierung des ALUCOSOL-Konzepts geeignete Solarzellen-Technologien gefunden werden konnte. Statt dessen war vorgesehen, bis zum Projektende die Idee der grossflächigen Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium in Verbindung mit einem geeigneten Konzept zur Stromableitung weiterzuentwickeln und bis zum Stadium von einzelnen Pilotmodulen in der Grössenordnung von DIN A4-Format voranzutreiben.

Folgende Detailziele sollten bis zur Abgabe des Schlussberichts erreicht werden:

- Ausarbeitung des Konzepts für einen Vier-Zellen-Modul (als Alternative zum Einzellenmodul zur Realisierung ausreichend hoher Spannungen)
- Verbesserung des bestehenden Oberflächenschutzes (Beständigkeit, Kratzfestigkeit, Kosten, etc.)
- Lösung des Problems der Stromdurchführungen (Prototypen)
- Lösungsansätze für grossflächige Beschichtung von Aluminium mit a-Si:H
- Herstellung und Prüfung von Pilotmodulen im Format von etwa DIN A4
- Darstellung des ALUCOSOL-Konzepts inkl. Kostenschätzung
- Grobkonzept für den Fertigungsablauf

1.3 Projektorganisation in Phase IV

In der Projektphase IV setzte sich das ALUCOSOL-Projektteam aus den Firmen Alusuisse Technology & Management AG, Paul Scherrer Institut und Enecolo AG zusammen, nachdem die Electrowatt Engineering AG aufgrund eines firmeninternen Entscheids nach Abschluss von Phase III ausgeschieden war.

Die Alusuisse Technology & Management AG beschäftigt sich u.a. mit der Entwicklung und Verarbeitung von Verbundhalbzeugen für Fassadenplatten und besitzt heute ein grosses Know-how auf diesem Gebiet. Im Forschungsinstitut in Neuhausen stehen Einrichtungen zur Herstellung von Mustern in verschiedenen Grössen sowie die Infrastruktur diverser analytischer Labors zur Verfügung. Die Hauptaufgaben von ATM im ALUCOSOL-Projekt bestanden in der Koordination aller Aktivitäten sowie in der Herstellung und Prüfung von Versuchsmustern. Weitere Aufgaben waren Organisation und Abstimmung hinsichtlich der Aktivitäten zum Thema "Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium".

Das Paul Scherrer Institut betreibt Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Solarzellen und verfügt u.a. über Einrichtungen zur Charakterisierung von Solarzellen hinsichtlich der elektrischen und photoelektrischen Eigenschaften, die zusammen mit dem vorhandenen Fachwissen dem Projekt zur Verfügung gestellt wurden.

Der Beitrag der Enecolo AG zum vorliegenden Projekt bestand aus der allgemeinen Entwicklungsunterstützung, dem Einbringen von Anwendungserfahrung und der Koordination zur International Energy Agency (IEA), PVPS, Task 7. Fa. Enecolo AG war ausserdem verantwortlich für diverse Firmenkontakte, für die Organisation der Aktivitäten zum Einzellen-Wechselrichter-System und für die Durchführung einzelner Versuche.

Die Electrowatt Engineering AG stand nach ihrem Ausscheiden aus dem eigentlichen Projektteam als Unterauftragnehmer zur Verfügung und bearbeitete Detailfragen der ALUCOSOL-Systemtechnik gemäss den Anforderungen des Projektfortschritts. Die Erfahrungen aus anderen EWE-Photovoltaik-Projekten wurden laufend in das ALUCOSOL-Projekt eingebracht; die regelmässige Überwachung der auf dem Mont-Soleil installierten Pilotmodule aus Phase II gehörte ebenfalls zu den Aufgaben der Electrowatt Engineering AG in der Projektphase IV.

Zwischen den Projektpartnern wurde ein Zusammenarbeitsvertrag abgeschlossen, in dem der Vertrag mit dem BFE einen integralen Bestandteil bildete und in dem die Rechte und Pflichten der Partner festgelegt wurden.

1.4 Arbeitsprogramm / Lösungsweg

Zunächst war geplant, bis zum Ende von Phase III weitere Mustermodule mit geeigneten Einbett- und Laminiertechniken herzustellen. Dabei sollten a-Si:H-Zellen auf Stahlblech von Fa. UNI-SOLAR auf einem geeigneten Verbundmaterial im Format von ca. 0.5 m² eingesetzt werden. An diesen Modulen sollte die Einzellenverschaltung grossflächiger Module erprobt werden; d.h., dass neuartige Verschaltungen, z.B. unter Nutzung beider Verbundbleche und „massive“ Stromführungszonen in der Schicht zu entwickeln waren.

Das bezüglich Integrationsfähigkeit bevorzugte System von direkt auf Aluminium deponierten a-Si:H-Zellen stand zum Beginn von Phase IV nicht zur Verfügung und konnte daher nicht die Basis für das in dieser Phase zu entwickelnde Fassadenelement bilden. Im Hinblick auf eine vollintegrierte Lösung für eine 2. ALUCOSOL-Generation sollten jedoch die Grundlagen der a-Si:H-Direktabscheidung auf Aluminium durch Zusammenarbeit mit dem IMT Neuchâtel erarbeitet werden. In Verbindung mit einem Modulkonzept a-Si:H/Stahl auf einer Verbundplatte sollten in einem Parallelprojekt die spezifischen, auf die ALUCOSOL-Systemtechnik zugeschnittenen elektrischen Komponenten pilotmässig hergestellt werden. Dies galt für den Modul- bzw. Einzellenwechselrichter (in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich), die DC-Elektrokomponenten und die Anschlüsse an den Systemkanal. Damit sollte die Testfähigkeit der Pilotmodule ermöglicht werden.

Die ALUCOSOL-Module sollten bezüglich der PV-Funktion, in Labortests (Korrosion, UV), mittels ISPRA-Test und unter Freibewitterung geprüft werden. Für Schwachstellen, die in den Prüfungen auftraten, sollten kurzfristig Lösungen gesucht werden, die bei den Fassadenelementen entsprechend zu berücksichtigen waren. Im Laufe von Phase IV sollte das erfolgversprechendste ALUCOSOL-System definiert werden. Das definitive Konzept für das ALUCOSOL-Fassadensystem sollte festgelegt und Detailpläne für die geplanten Demonstrations-Elemente erstellt werden. Parallel hierzu war eine Marktstudie geplant.

Die PV-funktionsfähigen Elemente sollten in einer geeigneten Fassade zur Erprobung und zu Demo-Zwecken (z.B. für Architekten oder Bauherren) eingesetzt werden. Damit sollten Montagefreundlichkeit, PV-Wirkungsgrad, Bautaughlichkeit, Systemtechnik, Aussehen sowie die Kostenseite realistisch ermittelt werden. Im Hinblick auf die im Erfolgsfall folgende Pilotproduktion war vorgesehen, die mit dem Betrieb der Fassade gewonnenen Erkenntnisse zur definitiven Spezifikation der Komponenten, insbesondere für den elektrischen Systemteil, zu verwenden. Die während der pilotmässigen Fertigung der Fassadenelemente gesammelten Daten zu Kosten, Energieverbrauch und Umweltbelastungen (inkl. Daten zur Solarzelle) sollten die Basis für eine erste Kosten- und Ökobilanz über die erwartete Lebensdauer der ALUCOSOL-Fassadenelemente bilden.

Den geplanten zeitlichen Ablauf mit den ursprünglich festgelegten Terminen für technische Berichte (TB) und den Schlussbericht (SB) zeigt die folgende Übersicht:

Thema	1997												1998												Wer?
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mal	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mal	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Untersuchung thermische Zyklen an a-Si:H-Zellen auf Alu																									ATM / IMT
Ausarbeitung eines Antrags für Joule-Projekt (Lochzellen)																									IMT / ATM
Weiterführung Modulentwicklung																									alle -> Detailplan
Abscheidung von a-Si auf Aluminium (Muster / Test IMT)																									IMT / ATM
Kontakte zu Solarzellenherstellern																									alle
Pilotmodule im Format DIN A4																									(noch offen)
Grossflächige Beschichtung von Aluminium mit a-Si:H																									(noch offen)
Zusammenfassung der Tests an Pilotmodulen (Status Quo)																									ATM / ENEC
Oberflächenschutz (LONZA-THV-Folie, SiO _x , Nidrid, etc.)																									ATM / PSI
Konzept Vier-Zellen-Modul																									ENEC / EWE
SCMIC-Projekt																									ENEC / ETHZ / FhG / NAPS / ATM

Mit dem Abschluss des Projekts sollten die Voraussetzungen für eine Pilotproduktion des ALUCOSOL-Systems vorhanden sein. Die Implementierung in einem Produktionsbetrieb und die dazu notwendigen Arbeiten waren jedoch nicht mehr im Rahmen des vorliegenden Projekts vorgesehen.

2 Resultate

2.1 Marktsituation (Update)

2.1.1 ALUCOBOND®

ALUCOBOND® ist ein leichtes Verbundmaterial aus zwei Aluminium-Deckschichten und einem variablen Kernmaterial. Dieses auf den ersten Blick einfache und dennoch vielseitige Produktkonzept wurde vor ca. 30 Jahren entwickelt und seither immer wieder den Marktbedürfnissen angepasst und entsprechend verbessert.

Neben einer Vielzahl von speziellen Anwendungen (Tischtennis-Platten, Maschinenverkleidungen, etc.) wurde der Architektur ein Fassadenwerkstoff geliefert, der zahlreiche positive Eigenschaften in sich vereint, insbesondere hohe Stabilität bei gleichzeitiger Flexibilität, gute Oberflächenplanheit, einfache Weiterverarbeitbarkeit der plattenförmigen Halbzeuge zu dreidimensionalen Elementen und eine für Verbundwerkstoffe ausgezeichnete Rezyklierbarkeit.

Die Produktion von ALUCOBOND® wurde 1969 bei der Alusuisse Singen GmbH (D) begonnen, bis 1997 wurden weltweit über 40 Mio. m² verkauft. Die wichtigsten Absatzmärkte sind Europa und Asien, während Amerika, Australien und Afrika hier eine wesentlich geringere Rolle spielen. Durch zunehmende Konkurrenz und aufgrund international verschärfter Brandschutzbestimmungen hat der Druck auf die traditionelle ALUCOBOND®-Variante mit Polyethylen-Kern in der jüngeren Vergangenheit zugenommen, was zu einem erhöhten Innovationsbedarf geführt hat.

In den letzten Jahren wurde das ALUCOBOND®-Produktsortiment daher auch um zahlreiche Varianten erweitert. Dabei wurden insbesondere die Beschaffenheit des Kerns und die Beschichtung der Aluminium-Deckbleche verändert. Beispiele hierfür sind ein nahezu unbrennbarer sowie mehrere schwer-entflammbare Kerne, aber auch der Ersatz der normalen Einbrennlackierung durch diverse Speziallacke und Folien. Unter dem Produktnamen ALUCORE® wurde sogar ein Verbund mit einem Kern aus Aluminiumwaben lanciert, der bezüglich der Biegesteifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte die Produktpalette nach oben erweitert.

Weiterverarbeitung und Montage der Verbundplatten werden traditionell beim Kunden (z.B. Metallbaufirma, Fassadenbau-Unternehmen, etc.) vorgenommen. Hierfür wurden in der Vergangenheit verschiedenartige Befestigungssysteme (Nieten, Klemmen, Kassetten, etc.) bei Alusuisse entwickelt, die wiederum den Kunden empfohlen und von diesen übernommen oder modifiziert wurden.

Mit der Möglichkeit zum Aufkaschieren von alternativen Oberflächen und mit dem Vorhandensein einfacher Montagesysteme besitzt ALUCOBOND® grundsätzlich die Voraussetzungen zur Fassadenintegration von photovoltaischen Flächen. Aus der Sicht des Marktes für hinterlüftete Fassaden bestand aber bisher nur wenig Bedarf nach einer Erweiterung des Sortiments durch ein PV-System. Diese Situation kann sich jedoch sehr schnell ändern, wenn es gelingt, Solarzellenmodule kostengünstig mit einem bestehenden Fassaden- oder Dachsystem zu verbinden.

Falls ein Konkurrent ein solches System erfolgreich auf den Markt bringt, entstehen möglicherweise erhebliche Gefahren für das laufende Geschäft, der bereits vorhandene Konkurrenzdruck kann sich weiter verstärken. Andererseits kann es eine Stärkung der Marktposition von ALUCOBOND® bedeuten, wenn neben den gängigen Halbzeugen mit lackierter oder folienbeschichteter Oberfläche eine photovoltaisch aktive Produktvariante zusammen mit entsprechender Systemtechnik angeboten werden kann.

2.1.2 Anwendungspotential

2.1.2.1 Fassade und Dach

Die folgenden Angaben entstammen im wesentlichen einem Bericht der EU-Kommission zu den Perspektiven der Photovoltaik bis zum Jahr 2010 /4/.

Der potentielle PV-Markt wurde aufgrund der Endverbraucher-Anwendung abgeschätzt. Günstige, gebäudeintegrierte Modulsysteme sind für netzverbundene PV-Anlagen am besten geeignet. Die potentiell auf Dächern installierbare PV-Leistung wurde für Europa auf ca. 618 GWp und für die anderen OECD-Länder auf über 1100 GWp geschätzt. Die jährliche Stromproduktion durch PV-Dächer könnte in Europa demnach 500 TWh betragen:

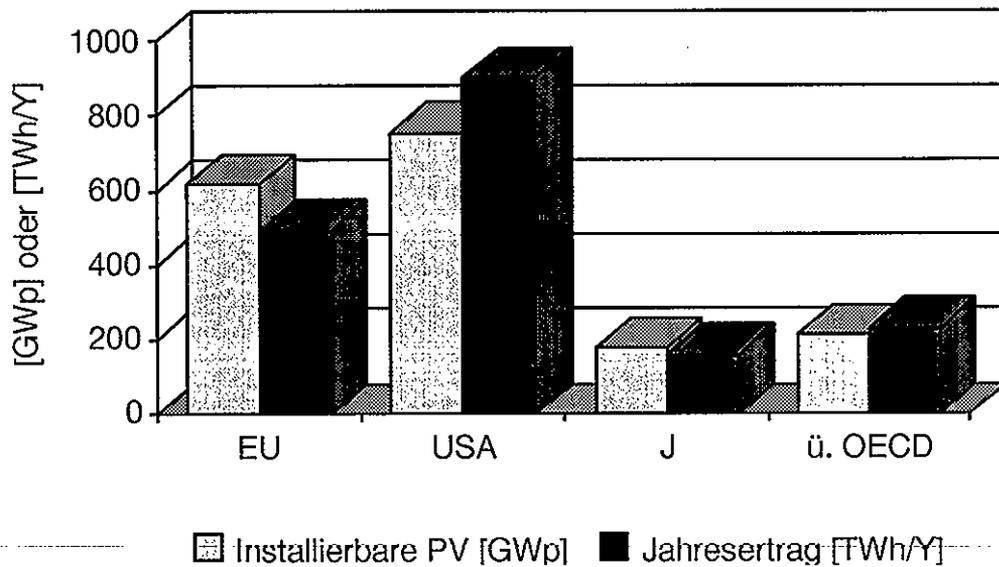


Bild 2.1.2.1.1 → Potentielle installierbare PV-Leistung und jährliche Stromproduktion

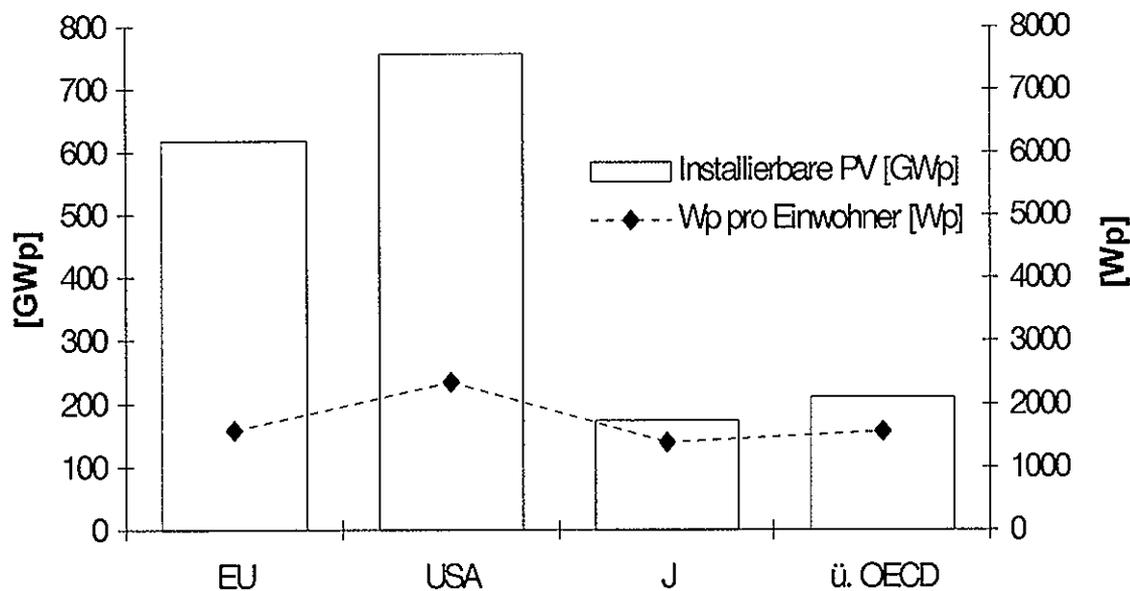


Bild 2.1.2.1.2 → Potentielle installierbare PV-Leistung und Jahresertrag pro Kopf

Netzunterstützende PV-Installationen stellen den zweiten Anwendungsbereich für netzverbundene PV-Anlagen dar. Multi-Megawatt-PV-Installationen werden jedoch bis zum Jahre 2010 ökonomisch kaum mit herkömmlichen Kraftwerken konkurrenzieren können. Die Gesamtzahl der ländlichen Bevölkerung in den Entwicklungsländern, die keinen Anschluss zu irgendwelchen Elektrizitätswerken hat, beläuft sich auf über 1 Billion Menschen. Das entsprechende Marktpotential für Inselanlagen würde sich auf über 16 GWp belaufen. Das Marktpotential für Inselanlagen in ländlichen Gebieten beläuft sich in Europa auf rund 150 MWp.

Aus der oben genannten Marktschätzung lässt sich folgendes für den Europäischen PV-Markt im Jahre 2010 schliessen:

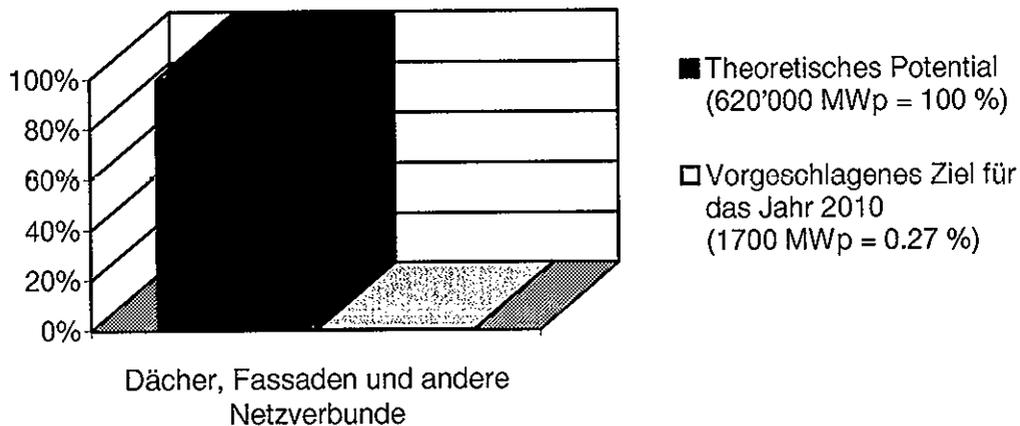


Bild 2.1.2.1.3 → Vergleich von theoretischem Potential für 2010 und vorgeschlagenem Ziel für gebäudeintegrierte und andere netzgebundene Solaranlagen

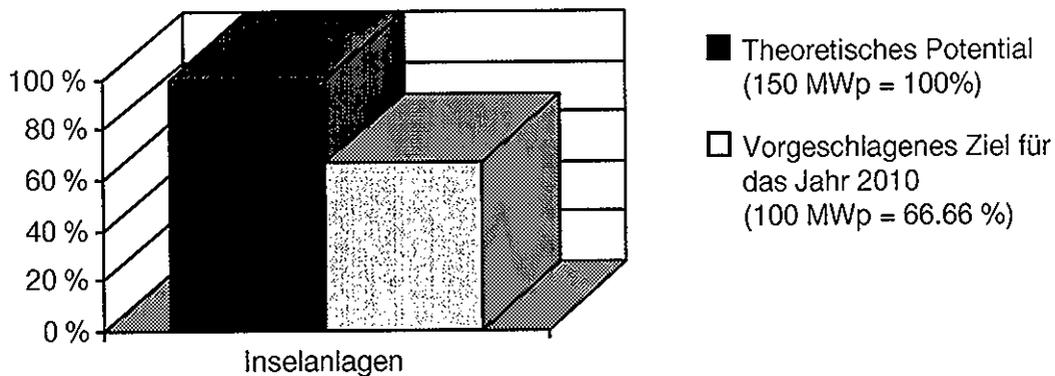


Bild 2.1.2.1.4 → Vergleich von theoretischem Potential für 2010 und vorgeschlagenem Ziel für Inselanlagen

Die Realisierung dieser Ziele, zusammen mit den rund 200 MWp installierten PV-Anlagen für spezielle Zwecke, würde im Jahr 2010 die Produktion von ca. 2000 MWp PV-Leistung garantieren. Die 2000 MWp entsprechen einem Flächenbedarf von ca. 15 Millionen m², die 600 GWp Gesamtpotential beanspruchen bei 15% Wirkungsgrad rund 4000 km².

Dies ist eine eher tiefe Schätzung; neuere Untersuchungen in Holland und in der Schweiz zeigen, dass allein in Holland etwa 800 km² auf Gebäuden zur Verfügung stehen. In der Schweiz gelten nach einer von der NET AG betreuten Untersuchung /5/ folgende Zahlen:

Übersicht Flächenpotential Schweiz (km²)

Ertragskriterium:	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Dächer:	114	160	195	224	238
Fassaden:				36	56
Total	114	160	195	260	294
Umsetzung 2010 (0.27%)		0.43		0.10	

Das heisst, dass bis im Jahr 2010 in der Schweiz rund 430'000 m² Dachfläche und ungefähr 100'000 m² Fassadenfläche belegt sein werden. Das entspricht etwa 80 MW Nennleistung, im Vergleich dazu sind heute erst ca. 10 MW installiert. Auf ganz Europa bezogen errechnet sich eine Fläche von rund 15 Mio m². Mit einem fiktiven Marktanteil von 25 % für ALUCOSOL ergibt sich ein Marktvolumen von etwa 4 Mio m² kumulativ bis ins Jahr 2010, weiteres Wachstum ist möglich.

Ein Szenario dazu kann folgendermassen aussehen: Vom Gesamtpotential Europa von rund 4000 km² sollen in 10 Jahren 20 % ausgeschöpft werden. Dazu bedarf es pro Jahr 80 km² Solarmodule. Ein wesentlicher Teil dieses Potentials betrifft die Dächer. Bei 25 % Marktanteil für ALUCOSOL entsteht ein jährliches Marktvolumen von 20 Mio m² pro Jahr. Dies ist ein Mehrfaches der heutigen ALUCOBOND®-Produktion.

Obwohl diese Abschätzungen auf zahlreichen Annahmen basieren und daher keine definitive Aussage über die tatsächlichen Marktchancen von ALUCOSOL machen können, wird deutlich, welches Marktpotential für fassaden- bzw. dachintegrierte PV-Anlagen in den kommenden Jahren besteht.

Das mögliche Marktvolumen liesse sich auch aus dem aktuellen und dem zu erwartenden Bauvolumen in der Schweiz oder in Europa abschätzen. Da jedoch auch hier zahlreiche Annahmen getroffen werden müssten, ist keine höhere Genauigkeit der Abschätzung zu erwarten; daher wird im Rahmen dieses Berichts darauf verzichtet.

2.1.2.2 Übrige Anwendungen

Neben der Fassaden- bzw. Dachintegration wären selbstverständlich auch andere Anwendungen für ALUCOSOL denkbar. Allerdings wurde hierzu kein eigentliches Potential definiert. Statt dessen werden im folgenden einige Beispiele aufgeführt, wo neben den Anwendungen „Fassade“ und „Dach“ ALUCOSOL ebenfalls eingesetzt werden könnte.

Beschattungslamellen existieren in diversen Formen und Grössen, angefangen von gewöhnlichen Lamellen im Kleinformat bis hin zu grossformatigen Profilen. Letztere werden je nach Objekt senkrecht oder waagrecht montiert. Der Vorteil von ALUCOSOL liegt in diesem Fall unter anderem darin, dass wegen der relativ hohen Eigensteifigkeit bei niedrigem spezifischem Gewicht des Materials grosse Stützabstände möglich sind. Vorteilhaft ist hierbei auch die Verformbarkeit des Materials.

Zahlreiche Lastwagenaufbauten sind mit ALUCOBOND® oder ALUCORE® ausgerüstet. Ein Teil dieser Fläche könnte mit ALUCOSOL belegt werden, um elektrische Geräte zu versorgen und die Bordbatterie zu laden. Da ALUCOSOL leicht und robust ist, ist es darüber hinaus auch für andere mobile Anwendungen sehr gut geeignet.

Die volle Integration der Solarmodule bietet auch bei Garagen und Containergebäuden Vorteile. Insbesondere könnten derartige Fertiggebäude dem Diebstahl von Modulen vorbeugen. Dies wäre im übrigen allgemein ein Vorteil von ALUCOSOL, weil ein integriertes Bauelement weniger anfällig ist bezüglich Diebstahl als ein freistehender Solarmodul.

2.1.3 Bauintegrierte Photovoltaik (bestehende Produkte)

Die nachfolgende Tabelle stellt eine Übersicht über die derzeit vorhandenen Produkte für die PV-Gebäudeintegration dar, ohne allerdings Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

In der Spalte „Anwendung“ bedeutet: F = Fassade, Ds = Schrägdach, Df = Flachdach

Nr.	Systemname, Beispiel	verwendete Materialien	Kurzbeschreibung	Anwendung
1	Isolierglas	Glas, Al	Standardmodell, Isolierverglasung	F
2	Ökotec 3	Glas, rostfreier Stahl	System ähnlich wie "Structural glazing"	F
3	Alupro	Glas, Al, Kunststoff	Profilsystem aus Al mit Gummiprofilen	Ds, F
4	PV & Warmluft	Glas, Al, Metall, Isolation	PV- und Niedertemp.-Luftkollektor	Ds, F
5	BOALSolar	Glas, Al, Kunststoff, Neopren	Ähnlich wie Alupro	Ds
6	Solardachziegel	Glas, Kunststoff	Spezialmodul mit Glas und Kunststoffrahmen zur Dachintegration	Ds
7	Pietarsaari Solar House	Silicon, Kunststoffprofile	Anstatt Al werden faserverstärkte Kunststoffprofile angewendet	Ds
8	E. Schweizer Metallbau	Glas, Al, Gummi (EPDM),	Modulspezifische Rahmenkonstruktion	Ds
9	Direktmontage	Holz, Glas, Aluprofil, Kunststoff	Direktmontage von Grossmodulen auf die Dachkonstruktion	Ds
10	Auf Dach	Glas, Al, Metall	Viele verschiedene Systeme existieren auf dem Markt	Ds, Df
11	Profilblech	Glas, Klebstoff (Acrylschaumband), Blech	Rahmenlose Module auf ein standardisiertes Profilblech geklebt	Ds, F
12	Braas	Glas, Kunststoff	Einbausystem f. gleichnamige Betonziegel	Ds
13	ALUHIT	Glas, Al, Gummi, Metall,	Standard-Einbausystem für Fassadenplatten	Ds, F
14	Sofrel u. andere Betonsockel	Glas, Beton, Metall, Silicon	Div. Varianten f. modulbezogene Betonsockel sind auf dem Markt.	Df
15	SOFREL dicht	Blech oder Verbundmaterial, Kunststoff, Eisenbeton	Flachdachkonstruktion, wasserdicht	Df
16	Eurosolar photovoltaic roof system	Glas, Halter aus Metall, Klebstoff	Spezialkonstruktion für plattenartige Elemente	Df, F
17	Angestellte Fensterbrüstung	Glas, Holz, Metall	Das leichte Anstellen (z.B. 15 °) im Bereich der Fensterbrüstung erhöht den Ertrag und erzeugt Sommerschatten	F

(Fortsetzung der Tabelle von Seite 15)

Nr.	Systemname, Beispiel	verwendete Materialien	Kurzbeschreibung	Anwendung
18	SOLBAC	rostfreier Stahl, Faserzement	Formstücke zur Aufnahme von Solarmodulen; Kies oder andere Materialien als Ballast	Df
19	SOLGREEN	rostfreier Stahl	Spez. Halterung für Solarmodule im Gründach	Df
20	CONSOLE	PE (100% recycelbar)	Kies, Ziegelsteine oder Beton zur Beschwerung ähnlich wie Solbac	Df
21	SCIBEL	Beton, Silicon, Glas	Lamine sind direkt auf Betonplatten geklebt	Df, Ds
22	POWERGUARD	Glas, Beton, Isolation, Epoxy-Harz	Lamine mit relativ dickem Glas sind auf die Isolation montiert	Df, Ds
23	MEGALINO	Glas, Al, Beton	Spezialbetonsteine für relativ grosse Module, z.B. AC - Module	Df
24	RACK SYSTEM	Glas, Beton, Al	Dreieckrahmen auf Betonsockel, ältere Bauart	Df
25	SUNSLATES	Glas, Faserzementplatten, Kunststoff	Montagesystem zur Kombination mit Dächern u. Fassaden aus Faserzementplatten	Ds, F
26	SOLRIF	Glas, Al	Spezialrahmen für Lamine zur dichten Dach-Integration	Ds

2.2 Auswertung Pilotmodule

BP Solar hatte 1994 in Zusammenarbeit mit dem ALUCOSOL-Team sieben Pilotmodule auf ALUCOBOND®-Substrat gefertigt. Dabei handelte es sich um Lamine mit den bekannten monokristallinen BP Solar Saturn-Hochleistungs-Solarzellen, die unter anderem auch im Standardmodul BP585 verwendet werden.

Bei den ALUCOSOL-Pilotmodulen wurden die Solarzellen nicht wie üblich hinter einem Glassubstrat einlaminiert, sondern auf der Vorderseite einer ALUCOBOND®-Platte. Die Frontabdeckung erfolgte mit TEFZEL®-Folie, als Zelleneinbettungsmaterial fand EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) Verwendung.

Von den 7 in Phase II hergestellten Prototypen wurden vier Exemplare an vier verschiedenen Standorten getestet: Neuhausen am Rheinfall (reine Bewitterung ohne elektrische Funktion) / Mönchaltorf / Lugano / Mont Soleil.

Beim Standort Mönchaltorf wurde das Laminat bodennahe auf einem SOFREL-Sockel (Version DMX) aufgestellt. Nach mehr als drei Jahren Exposition sind diverse kleine Löcher mit einem Durchmesser von ca. 2 mm in der TEFZEL®-Oberfläche sichtbar, deren Ursprung sich jedoch nicht rekonstruieren lässt. In Frage kommen Aufschläge von Kieselsteinen, Hagelkörnern oder sonstigen scharfkantigen Gegenständen. In den Randzonen traten die üblichen Bräunungseffekte schon nach wenigen Wochen auf. Im Verlauf der Zeit haben sich die braunen Stellen jedoch nicht weiter vergrößert. Hingegen wirkt die TEFZEL®-Oberfläche matt und nicht sehr attraktiv.

In Lugano stand ein ALUCOSOL-Modul während 18 Monaten auf dem Pilotraum des Projektes SUGLIO, an den anderen beiden Standorten liefen die Tests während mehr als drei Jahren. In Lugano und Mönchaltorf wurden nur visuelle Untersuchungen durchgeführt. Vor und nach der Exposition wurde der Modul auch elektrisch ausgemessen.

An allen Standorten traten nach einiger Zeit elektrische Unterbrüche auf. Module, welche nicht der Sonnenstrahlung ausgesetzt waren, blieben jedoch intakt. In zwei Fällen wurde der Unterbruch untersucht und repariert. Es handelte sich um einen klassischen Bruch bei den Zellenverbindungen. Nach dem erneuten Verbinden mittels Lötens funktionierten die Module wieder gemäss den Spezifikationen. Anfänglich wurde als Ursache für die Unterbrüche das Aluminiumsubstrat vermutet, weil dieses eine grössere Dilatation als zum Beispiel Glas aufweist. Nachdem aber mittlerweile in Deutschland viele Module der ehemaligen AEG auf Basis Glas/Glas ähnliche Unterbrüche aufweisen, muss eher ein Fabrikationsmangel als Fehlerursache angenommen werden.

Eine wichtige Frage war das Verhalten der mit TEFZEL®-Folie beschichteten Moduloberfläche. Wesentliche Kriterien zur Beurteilung waren die Ästhetik, die Verschmutzung und die Robustheit. Am Standort im Tessin konnte der ALUCOSOL-Modul mit drei anderen ähnlichen Modultypen verglichen werden: einem baugleichen Modul von BP, jedoch mit Glasabdeckung (BP252), einem BP-Modul mit der ersten Generation von Saturnzellen und mit drei Modulen von Kyocera mit polykristallinen Zellen.

Die Bewertung von Besucherinnen und Besuchern ergab meistens ein eindeutiges Resultat: Die Kyocera-Module gefielen optisch am besten, der ALUCOSOL-Modul kam in der subjektiven Bewertung am wenigsten gut weg. Begründung: Die TEFZEL®-Oberfläche sei nicht eben, wirke dadurch unruhig und sähe allgemein nicht attraktiv aus. Unklar ist jedoch, ob dies am TEFZEL® selber liegt oder ob es eher dem Umstand zuzuschreiben ist, dass es sich um Prototypen-Module handelt. Das Beispiel „UNI-SOLAR-Modul“ zeigt nämlich, dass auch ein TEFZEL®-Modul gut aussehen kann.

Am Standort SUGLIO wurden einige vergleichende, qualitative Untersuchungen bezüglich Verschmutzung gemacht. Neben den erwähnten Aufständungen wurden je zwei Module mit 0° und 4° Neigung aufgestellt. Der horizontal liegende Modul weist eindeutig eine höhere Verschmutzung auf. Eine Neigung von 4° bringt eine leichte Verbesserung. Insbesondere entstehen weniger sogenannte Wasserflecken. Diese bilden sich vor allem bei

waagrecht positionierten Modulen. Dabei verdunstet Regen- oder Kondenswasser und hinterlässt Schmutz. Dieser ist dann nicht wie beim gewöhnlichen Staub regelmässig über die Oberfläche verteilt, sondern es bilden sich eigentliche Inseln. Die quantitativen Einflüsse auf den Modulertrag konnten nicht ermittelt werden. Bei den schräg gestellten Modulen wurde kein wesentlicher Unterschied zwischen TEFZEL®- und Glasoberfläche festgestellt.

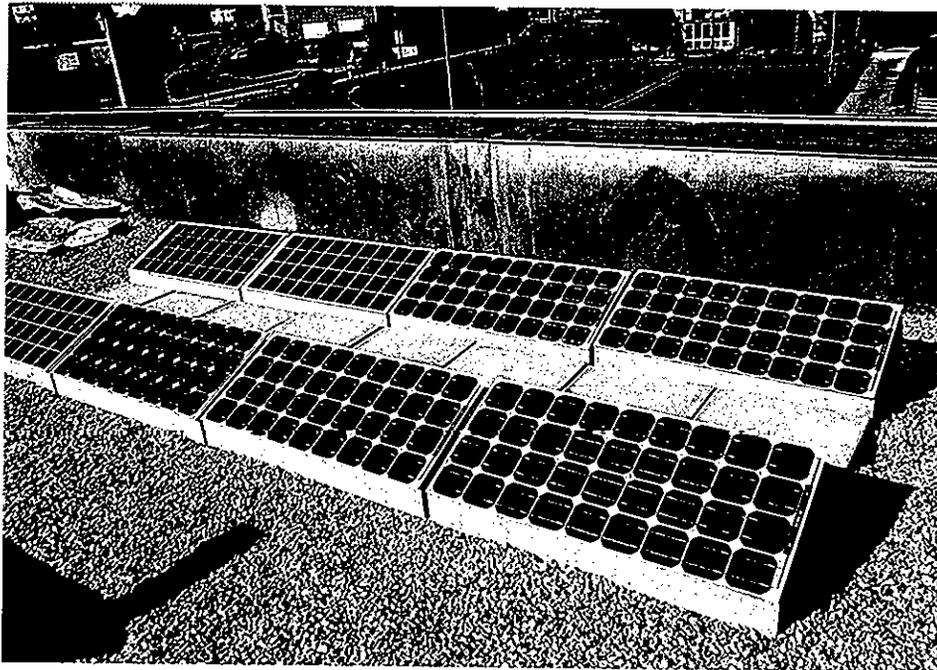


Bild 2.2.1 → Testaufbau des ALUCOSOL-Pilotmoduls am Standort SUGLIO

Zwei Exemplare der ALUCOSOL-Pilotmodule wurden am 7. November 1996 auf das Freiluftprüfgelände beim Solarkraftwerk Mont Soleil transportiert. Ab dem 15. April 1997 wurde einer dieser Module auf dem Versuchsstand Nr. 5 elektrisch betrieben und bei periodischen Besuchen hinsichtlich des Bewitterungsverhaltens beurteilt. Der zweite Modul wurde an einem geschützten Ort zwischengelagert. Über diese Testüberwachung durch EWE existieren detaillierte Protokolle, die in regelmässigen Abständen angefertigt wurden. Der abschliessende Bericht ist in der Projektdokumentation enthalten.

Wegen ungenügender Abdichtung der Leiterdurchführung zur Laminatrückseite bildeten sich sehr bald bräunliche Verfärbungen im oberen mittleren Bereich der Frontseite des Moduls (Die Modulanschlussfahnen auf der Modulrückseite liegen frei; das Modul verfügt über keine Anschlussdose.). Im Verlauf des Bewitterungstests veränderten sie sich jedoch kaum noch. Die Längskanten zeigen ein mangelhaftes Finish mit EVA-Überlauf, erwiesen sich jedoch als dicht. Die Haftung der TEFZEL®-Folie im Kantenbereich war während der ganzen Testperiode einwandfrei.

Dort, wo jeweils vier Solarzellen mit ihren abgeschrägten Ecken zusammenstossen, ergeben sich freie quadratische Flächen, die nicht durch Solarzellen abgedeckt sind. Das EVA ist an diesen Stellen besonders stark der Einstrahlung ausgesetzt. In diesen zellenfreien Zonen haben sich im Verlauf der Bewitterung verschiedene rundliche und längliche Einschlüsse von 1-5 mm Ausdehnung gebildet. Es könnte sich um Gas- oder Flüssigkeitseinschlüsse handeln. Als Gründe für diesen Degradationseffekt kommen vermutlich die Mikroporosität des TEFZEL®, aber auch Ausscheidungen aus dem EVA unter UV-Einfluss in Frage (UV wird durch TEFZEL® viel weniger abgeschirmt als durch eine Frontabdeckung aus Glas.).

Eis und Schnee haften auf Glas besser als auf TEFZEL®. Die unterschiedlich strukturierten Oberflächen von BP Solar, UNI-SOLAR und CANON zeigen kurzfristig (z.B. nach Sonnenaufgang) recht stark abweichende Haftung von Wassertropfen und Eispartikeln; über längere Zeiten beobachtet sind aber keine eindeutigen Unterschiede feststellbar.

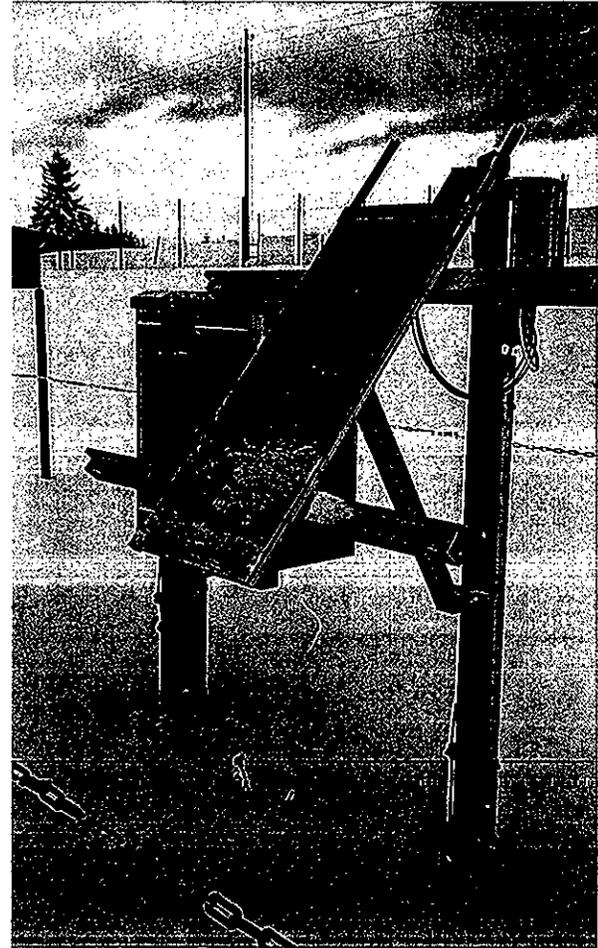
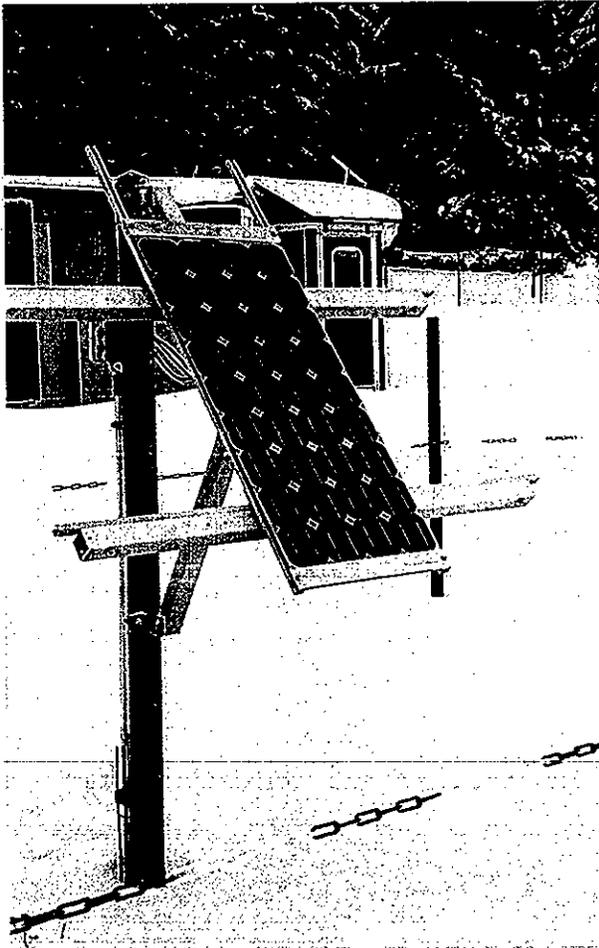


Bild 2.2.1 → Testaufbau der ALUCOSOL-Pilotmodule auf dem Mont Soleil ← Bild 2.2.2

Kurzfristig kann der Eindruck entstehen, dass Wettereinflüsse (Niederschläge, Wind etc.) bei Glas- und TEFZEL®-Oberflächen zu unterschiedlichen Reinigungseffekten führen. Module mit TEFZEL®-Folie scheinen unabhängig von ihrer Oberflächenstruktur durch Niederschläge eher besser gereinigt zu werden. Langfristige Beobachtungen zeigen aber, dass die Oberflächenverschmutzungen von TEFZEL® und Glas keine eindeutigen Unterschiede aufweisen (Beobachtungen am PSI deuten allerdings darauf hin, dass sich in den Strukturen der TEFZEL®-Oberflächen Schmutz kumuliert.).

Der BP Solar-Pilotmodul wurde von April 1997 bis April 1998 elektrisch ausgemessen und dabei mit anderen Modultypen von BP Solar, Siemens und UNI-SOLAR verglichen. Für einen Modul mit monokristallinen Zellen lagen die spezifischen Produktionswerte und der Ertrag eher im unteren Bereich, für einen nicht optimierten Pilotmodul waren die gemessenen Daten aber durchaus zufriedenstellend.

Am 3. Juni 1998 fiel der ALUCOSOL-Pilotmodul auf dem Mont Soleil elektrisch endgültig aus, nachdem bereits am Vortag einige Produktionsunterbrüche aufgetreten waren. Der zweitletzte Betriebstag war sehr warm und wies eine hohe Einstrahlung auf, die diesen

Tag zum bisher ertragreichsten im Jahre 1998 machte. Der Einfluss von Thermostress kann unter diesen Umständen als gegeben betrachtet werden.

Auch andere ALUCOSOL-Pilotmodule aus der gleichen Fertigung fielen nach etwa zwei Jahren Betrieb aus. Es zeigten sich Unterbrüche in den Flachleitern, mit denen die Zellen in Serie verschaltet sind. BP Solar hatte offensichtlich dem Problem der Dilatation unter Thermostress bei dieser Pilotfertigung auf ALUCOBOND®-Substrat zu wenig Rechnung getragen, so dass die beschriebenen Schäden begünstigt wurden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die ALUCOSOL-Pilotmodule auf der Basis von ALUCOBOND® robust und unempfindlicher gegen Zerstörung sind als Module mit Glasabdeckungen und dass sie einfaches Handling und flexible Montagemöglichkeiten bieten. Sie erscheinen allerdings optisch weniger schön als Glas, und ihre Oberfläche ist anfälliger gegen Verkratzen und ähnliche mechanische Verletzungen.

Weitere kritische Punkte, die bei einer späteren Fabrikation beherrscht werden müssen, sind die Auslegung der Zellen-Verbindungsleiter für die wechselnde Dilatation bei Erwärmung und Abkühlung, die gleichmässige Strukturierung der (TEFZEL®-)Oberflächen, eine saubere Kantenverarbeitung, das Verhindern von Ausscheidungen aus dem EVA (z.B. durch einen integrierten UV-Schutz) und eventuell ein zusätzlicher mechanischer Schutz für die 4 Modulecken.

Obwohl die BP Solar-Pilotmodule vom Aussehen und von der Herstellung her nicht dem endgültigen ALUCOSOL-Konzept entsprechen, konnten aus den beschriebenen Tests zahlreiche wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in die weiteren Überlegungen zu einer allfälligen Fertigung integriert werden müssen.

2.3 Konzepte „Neue Module“

2.3.1 a-Si:H auf Aluminium

Zu Beginn des ALUCOSOL-Projekts war festgelegt worden, dass nur eine kommerziell verfügbare und gleichzeitig umweltverträgliche Solarzellen-Technologie zur Anwendung kommen sollte. Eine umfassende Bewertung anhand technischer, kommerzieller, ökologischer und ästhetischer Anforderungen hatte ergeben, dass in erster Linie die verschiedenen Silizium-Technologien in Betracht kommen (mono- bzw. polykristallines und amorphes Silizium, Spherical Solar Cells von Texas Instruments, etc.). Diese wurden daher weiterverfolgt, ohne jedoch damit andere, noch in der Entwicklung befindliche Technologien gedanklich vollkommen auszuschliessen.

Als Resultat einer Bewertung möglicher Modulsysteme wurde innerhalb des Projektteams bereits in einem frühen Projektstadium die Idee des „Einzellenmoduls“ favorisiert, bei dem die gesamte Modulfläche mit einem photovoltaisch aktiven Material ohne die bisher übliche Unterteilung in einzelne serienverschaltete Zellen beschichtet ist. Da als Grundlage für die ALUCOSOL-Module die auf Aluminiumblechen basierenden Sandwichverbunde vom Typ ALUCOBOND® vorgesehen waren, lag die Idee nahe, Aluminium als Substrat für die eigentlichen Solarzellen zu verwenden.

Trotz intensiver Recherchen konnte jedoch kein kommerzieller Anbieter gefunden werden, dessen Produkt die entsprechenden Anforderungen erfüllt hätte. Am weitesten entsprachen die Zellen von Fa. UNI-SOLAR (a-Si:H auf rostfreiem Stahl) dem ALUCOSOL-Grobkonzept; trotz intensiver Bemühungen konnte jedoch keine befriedigende Basis für eine Zusammenarbeit bezüglich Weiterentwicklung bzw. Modifikation der UNI-SOLAR-Zellen für eine ALUCOSOL-Anwendung gefunden werden. Ohne jegliche Modifikation schied die Verwendung dieser Zellen auf ALUCOBOND® wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl und Aluminium aus.

In Anbetracht dieser Situation war es nicht mehr möglich, die ursprüngliche Forderung nach der kommerziellen Erhältlichkeit der zu verwendenden Zellen aufrecht zu erhalten. Um das ALUCOSOL-Konzept weiter verfolgen zu können, wurde beschlossen, im Rahmen des Projekts die Idee des grossflächigen Einzellenmoduls mit a-Si:H auf Aluminium zumindest bis über das reine Laborstadium hinaus als Eigenentwicklung voranzutreiben.

An den hierzu notwendigen systemtechnischen Voraussetzungen wurde im Rahmen des JOULE-Projekts „SCMIC – Single Cell Module Integrated Converter System“ gearbeitet (siehe Kapitel 2.6), während die Grundlagen für die Zellenherstellung im Rahmen des NEFF-Projekts Nr. 682 „Aluminium-Fassadenelemente mit direkt abgeschiedenen amorphen Silizium-Solarzellen“ /6/ geschaffen wurden. Als zentrale Probleme stellten sich hier die Haftung und die Interaktion zwischen der photovoltaischen Schicht und dem Aluminium-Substrat heraus. Die wissenschaftliche Basis zu dieser Thematik bildete eine Dissertation an der EPFL Lausanne, welche am IMT Neuchâtel angefertigt wurde /7/.

Die folgenden Schlussfolgerungen wurden in dieser Dissertation formuliert:

- a) Das Hauptproblem der Solarzellen auf (den untersuchten) Aluminiumsubstraten ist die Topographie der Oberfläche: Diese kann zu 'pinholes' in der darauf deponierten Solarzelle führen.
- b) Hochglanz-Aluminium hat eine charakteristische Oberfläche (weitgehend glatt, jedoch durch wenige, scharfkantige Problemstellen mit z.T. vertikalen Flanken durchbrochen).
- c) Die Problemstellen können durch zusätzliche Schichten zwischen Substrat und Solarzelle zugedeckt werden; das Substrat wird dadurch für die nachfolgende Solarzelle besser bedeckbar.
- d) Die natürlichen Oxidschichten auf Metalloberflächen sind ein Schlüsselement, das sowohl die Diffusion als auch das elektrische Verhalten der Solarzellen beeinflusst.
- e) Es ist technologisch nicht sinnvoll, direkt auf Aluminium zu deponieren.

- f) Die (isotrope) Diffusion ist ein potentielles Problem; durch geeignete Schichtenfolgen kann sie auf ein nicht störendes Mass reduziert werden.
- g) „Plasmainduzierte Diffusion“ ist effizienter, d.h. für die Solarzelle gefährlicher, als thermisch aktivierte Interdiffusion.
- h) Die Qualität der amorphen Siliziumschicht (Porosität) beeinflusst die Diffusion.
- i) Für jede Beleuchtungsintensität der Solarzelle gibt es einen kritischen Parallelwiderstand bzw. eine kritische Fehlerstellendichte (grosse Toleranz bei hoher Intensität, kleine Toleranz bei niedriger Intensität).
- j) Der tolerierbare Wert des Parallelwiderstandes einer Solarzelle wird durch die Art der Anwendung definiert (Bei Leistungsanwendungen darf der Widerstand geringer sein als bei „Indoor“-Anwendungen).

In Rahmen der zitierten Dissertation konnte grundsätzlich und im Labormassstab nachgewiesen werden, dass eine Herstellung von funktionsfähigen Solarzellen durch Deposition von a-Si:H auf einem Aluminiumsubstrat möglich ist. Damit war die Voraussetzung für die weiteren Arbeiten mit dem Ziel einer grossflächigen Solarzelle auf Aluminium gegeben.

2.3.2 Stromdurchführungen

2.3.2.1 Konzept

Neben dem Grundprinzip der Solarzellen, nämlich Licht mit einem möglichst guten Wirkungsgrad in Strom zu verwandeln, liegt die zweite Herausforderung in der möglichst verlustfreien Ableitung des Stromes zum Verbraucher bzw. zum Anschluss des Solarmoduls. Fast alle heute vorhandenen Solarzellen erzeugen die elektrische Spannung zwischen der lichtabgewandten und der dem Licht zugewandten Seite. Diese Spannung bzw. der korrespondierende Strom müssen von der Solarzelle weggeführt werden.

Auf der lichtabgewandten Seite ergeben sich keine besonderen Anforderungen. Ein vollflächiges, leitendes Substrat oder eine Netz- bzw. Gitterstruktur mit leitfähigem Material erfüllen ihren Zweck. Auf der lichtzugewandten Seite entsteht ein funktionales Problem. Wegen des Umstands, dass Materialien mit guter elektrischer Leitfähigkeit in der Regel kein Licht durchlassen, muss die Vorderseite mit speziellen elektrischen Leitern ausgerüstet sein. Standardmässig werden sogenannte Kontaktfinger verwendet. Bei Dünnschichtzellen wird durch häufige Serienschaltung die Weglänge des Stromes soweit verkürzt, dass auch eine relativ schlechte Leitfähigkeit noch ausreicht. Ideal ist, wenn beide Polaritäten auf der Rückseite abgenommen werden können.

Ein verschiedentlich vorgeschlagenes System dreht den pn-Übergang um 90°. In einer Zelle sind anstatt einer Grenzschicht gleich hunderte von pn-Übergängen vorhanden, welche innerhalb der Zelle selbst in Serie geschaltet sind. Es resultiert eine hohe Spannung und ein kleiner Strom.

Eine andere Variante, den Strom möglichst verlustfrei abzuleiten, bieten Stromdurchführungen. Dabei wird der Strom auf direktem Weg durch die Zelle hindurch von der Oberfläche abgeleitet. Ein solches System wurde auch von UNI-SOLAR vorgeschlagen und getestet. Die typischen Unterschiede lassen sich am Beispiel des UNI-SOLAR-Moduls deutlich aufzeigen (Bild 2.3.2.1.1). Zu den diesbezüglichen weiteren Plänen sind jedoch derzeit keine weiteren Informationen vorhanden.

Die abgedeckte Fläche beträgt 2 % bei der Variante mit Drähten. Bei schrägem Lichteinfall von beispielsweise 30° verdoppelt sich die beschattete Fläche. Mit Durchführungen sinkt die nicht-aktive Fläche auf deutlich unter 1 %. Zudem ergibt sich eine homogene Beleuchtung der aktiven Schicht.

Zur technischen Machbarkeit der Durchführungen wurden zahlreiche Abklärungen und teilweise auch Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu befinden sich in der Versuchsdokumentation.

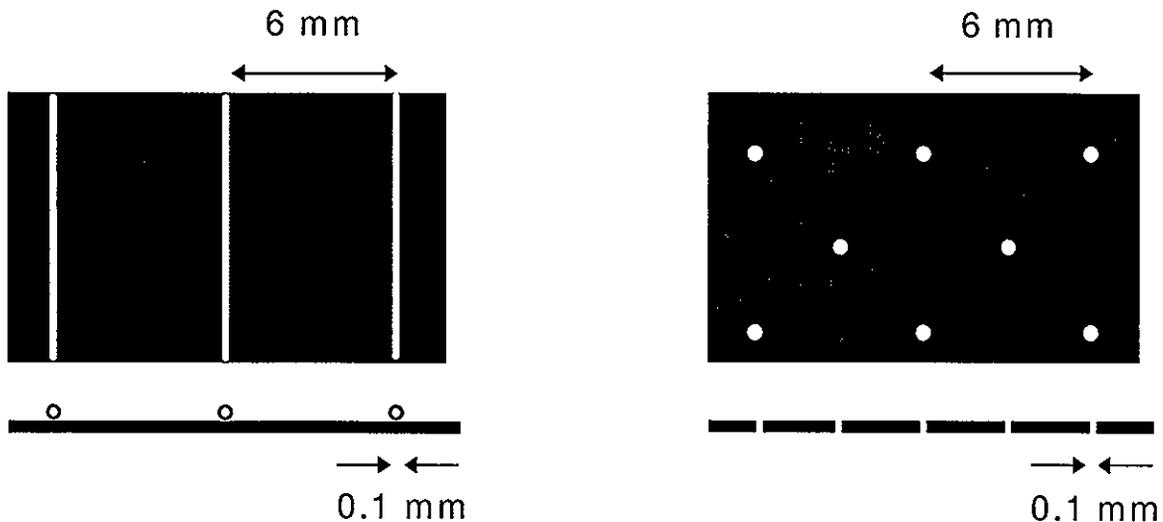


Bild 2.3.2.1.1 → Schemadarstellung von Zellen mit Stromleitern und Durchführungen

Derzeit ist noch kein anwendungsreifer Prozess vorhanden, es zeichnen sich jedoch mehrere Varianten als Lösung ab; vor allem hinsichtlich der Kosten müssen die Prozessschritte noch optimiert werden. Auch bei den Durchführungen, welche UNI-SOLAR vorschlägt, sind noch Verbesserungen zur Reduktion der Prozesskosten anstehend.

Ähnliche Durchführungen werden auch im Bereich Leiterplatten angewendet. Obwohl hier mehrere Verfahren zur Stromdurchführung eingeführt sind, lassen sich diese nur beschränkt auf ALUCOSOL übertragen. Es stellt sich hier auch die Frage, ob Leiterplatten möglicherweise als Substrat für Solarmodule dienen könnten. Auf den ersten Blick sind zwar die Preise für konventionelle Printplatten zu hoch, trotzdem können einzelne Prozessschritte für die Solarzellen-Technologie übernommen werden.

Eine weitere Form der Stromdurchführungen resultiert aus dem Grundkonzept des ALUCOSOL- bzw. SCMIC-Modulaufbaus, welcher zwei Blechplatten der gleichen Größe wie der Modul als Zellenträger und als Stromleiter erfordert. Pro Modul wird ein Wechselrichter (vorzugsweise in der Modulmitte) eingebaut, der den erzeugten Strom am oberen und unteren Blech abnimmt. Diese Anordnung macht eine ausreichend dimensionierte Stromdurchführung vom oberen Blech durch die Trägerplatte zum Wechselrichter notwendig.

Die in den Zellenträgern anfallenden Leistungsverluste werden in der Projektdokumentation für verschiedene Konfigurationen dargestellt. Damit sind Grundlagen für die Dimensionierung der notwendigen Blechabmessungen in Abhängigkeit von Modulgröße und Material vorhanden. Der gleiche Ansatz wird verwendet, um die Abmessungen und die Anzahl der Stromdurchführungen durch die eigentliche Zelle festzulegen.

2.3.2.2 Dimensionierung der Zellenträger

Zu untersuchen waren Realisierbarkeit und Optimierung der Durchführung zum Wechselrichter bezüglich Leistungsverlusten, Modulgröße, Blechwerkstoff, -stärke und -kosten, Gewicht und Durchführungsgestaltung. Zunächst wurde die Gleichung der Verlustleistung hergeleitet, wobei zur einfacheren Berechnung von einem runden Modul ausgegangen wurde. Ausgehend von dieser Formel wurden Diagramme und Tabellen mittels einer Wertetabelle errechnet und gezeichnet. Die Ermittlung der Leistungsverluste, die aufgrund des Sammelprinzips der Durchführung zunächst als gross angenommen wurden, überraschte durch deren relativ geringes Ausmass. Die Verluste sollten aber durch geeignete Auswahl von Leiter, Blechstärke und Durchführungsgröße möglichst gering gehalten werden.

Zur Modulmitte hin nimmt die Stromstärke stark zu. Diese Eigenheit des SCMIC-Prinzips, bei dem die Trägerbleche für den Ladungstransport verwendet werden, kann bei ungeeignetem Werkstoff und Blechstärke zu erheblichen Verlusten führen. Angenommen wurden drei mögliche Werkstoffe: Aluminium, Kupfer und Edelstahl. Die Leitfähigkeiten bzw. die spezifischen Widerstände dieser drei Werkstoffe unterscheiden sich wie folgt:

$$\text{Al: } 0.027 \Omega\text{mm}^2/\text{m} \quad \text{Cu: } 0.017 \Omega\text{mm}^2/\text{m} \quad \text{Fe: } 0.1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

Die Leitfähigkeit bzw. der spezifische Widerstand haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsverluste. Diese sind bei Aluminium und Kupfer, die beide gute Leiter sind, relativ ähnlich. Demgegenüber verursacht Edelstahl, für den näherungsweise die Leitfähigkeit von Eisen (Fe) angenommen wurde, eine ca. 5x höhere Verlustleistung im Vergleich zu den anderen Werkstoffen.

Die Leitungsverluste hängen selbstverständlich auch von der Wahl der Blechstärke ab. Je dünner das Blech gewählt wird, desto grösser sind die Verluste, welche aus dem kleinen Querschnitt, der zur Leitung des Stromes zur Verfügung steht, resultieren. Ab einer kritischen Blechstärke von 0.3 - 0.5 mm, die je nach Werkstoff variiert, treten allerdings keine erheblichen Verluste mehr auf.

Im folgenden Diagramm sind die grossen Unterschiede bei verschiedenen Werkstoffen und Blechstärken deutlich zu sehen.

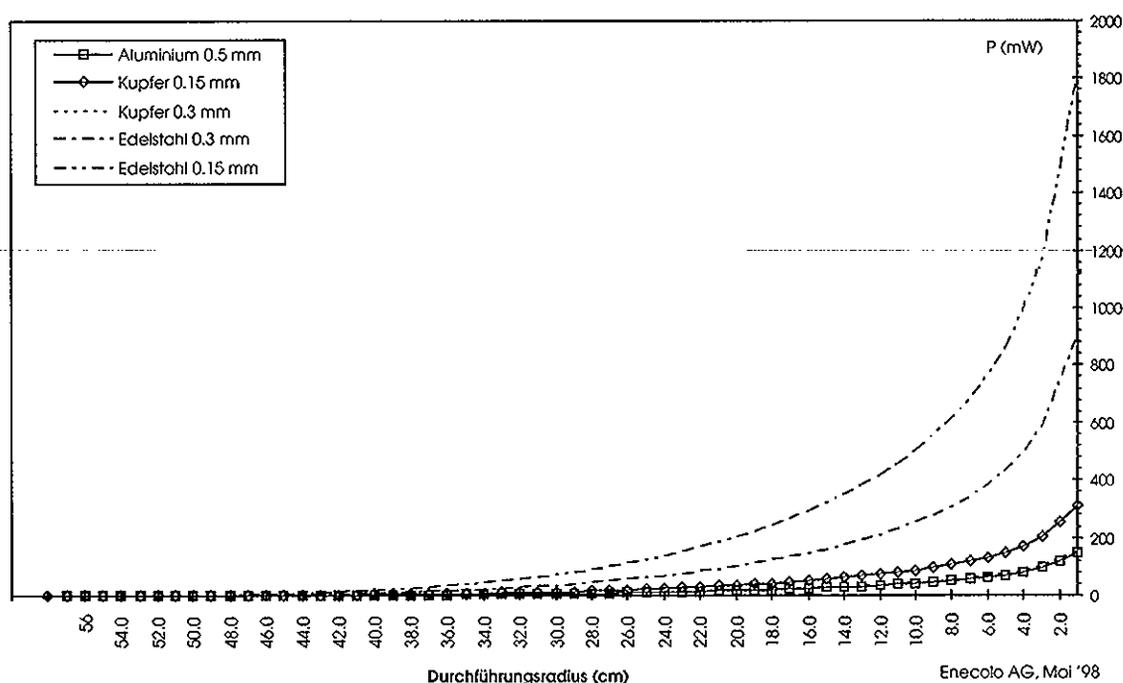


Bild 2.3.2.2.1 → Übersicht zur Verlustleistung verschiedener Werkstoffe / Blechstärken

Bezüglich der untersuchten elektrischen Eigenschaften ist das Prinzip einer Durchführung in der Mitte eines Einzellenmoduls zum Abgreifen des Stromes gut realisierbar. Die Auswahl des Werkstoffes sowie die geeignete Blechstärke hängen von weiteren anderen Eigenschaften ab, wie der benötigten mechanischen Festigkeit, geeigneten Ausdehnungskoeffizienten (gegenüber a-Si:H), der Verfügbarkeit der gewünschten Blechstärke, dem Gewicht, aber auch dem Preis.

Die Grösse und Geometrie der Durchführung können gemäss den Erfordernissen der Boost-Stage oder der Fertigung in einem bestimmten Rahmen gewählt werden, wobei die

Grösse der Durchführung sehr entscheidend für die Grösse der Leistungsverluste ist. Zu beachten ist ferner, dass die errechneten und graphisch dargestellten Verluste sich nur auf ein Blech beziehen. Bei der Gesamtbetrachtung eines Moduls muss mit zwei Blechen (Vorder- und Rückseite), also mit doppelter Verlustleistung gerechnet werden. Die genauen Verluste für bestimmte Module (auch rechteckig) lassen sich erst nach dem Festlegen der entsprechenden Spezifikationen genau berechnen.

2.3.2.3 Dimensionierung der Zellendurchführungen

Ein wesentlicher Vorteil von PV-Zellen auf ALUCOBOND® liegt in der Möglichkeit, die beiden Aluminium-Bleche, die durch den Kunststoffkern voneinander isoliert sind, als Stromleiter zu verwenden. Dieser Aufbau erlaubt, die hohen Ströme der grossflächigen Zellen ohne grosse Verluste zum Einzellenwechselrichter zu leiten. Sicherheitsprobleme wegen unter Spannung stehender Teile bestehen nicht, da die Spannung an einem Einzellen-Modul im Bereich von 1-2 Volt liegt.

Die Stromableitungen von der Zelle zum unteren Aluminium-Blech sind das noch zu lösende Problem. Der eine Pol ist mit der Unterseite der Zelle verbunden, welche direkt auf dem Al-Substrat abgeschieden wird. Der zweite Pol liegt auf der Zellenoberseite, die mit einer transparenten leitenden Schicht (TCO) beschichtet ist. Von hier muss der erzeugte Strom - so verlustfrei wie möglich, um den Zellenwirkungsgrad nicht zu reduzieren - mit möglichst geringer Abschattung zum unteren Al-Blech geführt werden.

Die heute allgemein angewandte Lösung ist die Stromableitung mit auf der Zellenoberfläche aufgeklebten, dünnen Drähten oder mit gedruckten Leiterbahnen (Kapitel 2.4.6). Der Abstand zwischen den Drähten wird optimiert, damit der Serienwiderstand der TCO-Schicht nicht zu hoch wird und gleichzeitig die notwendige Flächenabdeckung der Zelle minimiert wird.

An den Modulrändern werden die Leiterbahnen miteinander verbunden. Bei ALUCOSOL müsste bei dieser Lösungsvariante der zweite, auf der lichtzugewandten Seite liegende Pol mit dem hinteren Al-Blech mittels einer leitenden Einrahmung elektrisch verbunden werden (Bild 2.3.2.3.1).

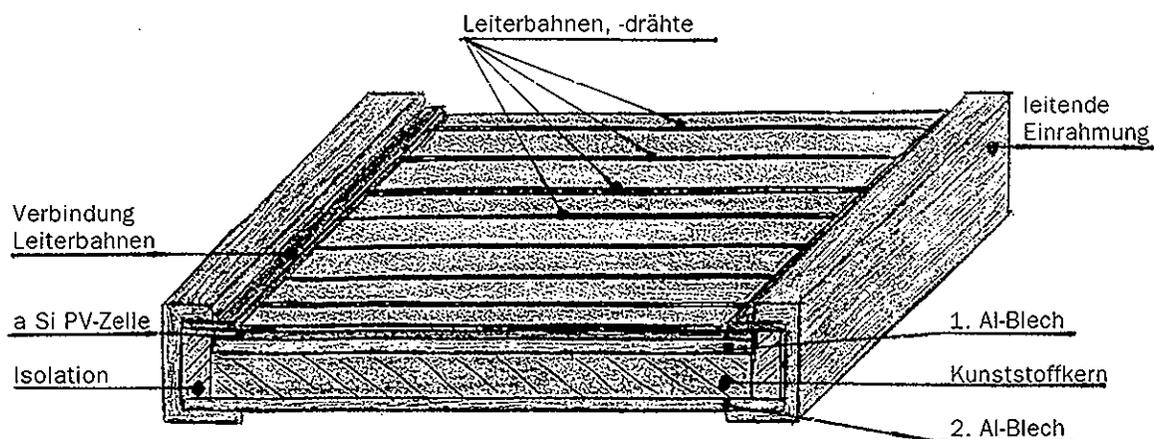


Bild 2.3.2.3.1 → Stromverbindungen mit Leiterbahnen und leitender Einrahmung

Die lokale Durchführung mit vielen, kleinen, leitenden Verbindungen durch isolierte Löcher in der a-Si:H-Zelle selbst ist eine effizientere Lösung der Verbindung der transparenten leitenden Schicht (TCO) zur unteren Platte. Der Abstand zwischen den Durchführungen wird so gewählt, dass einerseits der Serienwiderstand der TCO-Schicht nicht zu hoch wird, andererseits aber gleichzeitig die abgedeckte Fläche der zur Sonne gerichteten

ten Seite so klein wie möglich ist. Auf diese Weise wird die nicht-wirksame Zellenoberfläche auf ein Minimum reduziert. Die beschriebene Verbindung sollte technisch zu einem vernünftigen Preis realisierbar sein (Bild 2.3.2.3.2).

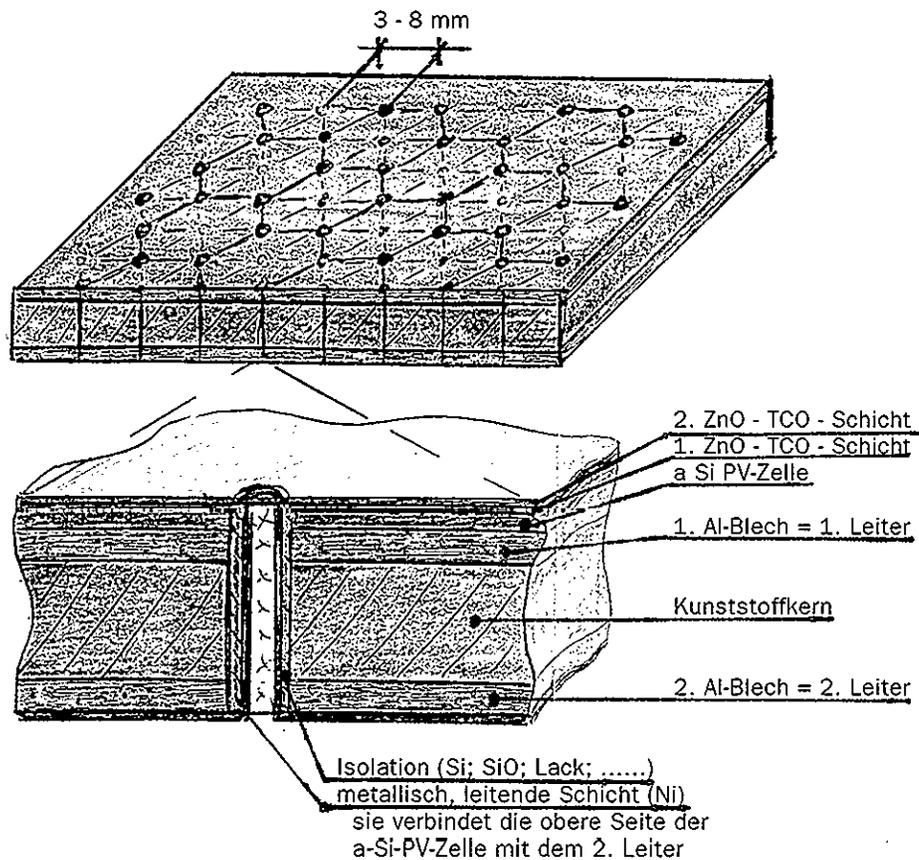


Bild 2.3.2.3.2 → Stromverbindungen mit Durchführungen durch die Zelle

Ein hexagonales Muster der Durchführungen (d.h. Bohrungen an den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks) nähert gegenüber einem rechteckigen Muster einen Kreis besser an, die Stromableitung ist somit günstiger. Die Anzahl Bohrungen/Fläche lässt sich aus dem Kehrwert der Fläche um jede Bohrung berechnen. Bei einer hexagonalen Anordnung gleichseitiger Dreiecke mit Seitenlänge a beträgt sie $a^2 \times \sqrt{3}/4$. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl Bohrungen/Fläche und die Stromstärke in mA, die bei Annahme von 60 A/m^2 und 1 V Spannung für die in Frage kommenden Abstände durch jede Bohrung fließt.

Lochabstand in mm:	3	5	6	8	10
Anzahl Bohrungen pro m^2 :	128300	46188	32075	18042	11547
mA / Bohrung bei 60 A/m^2 :	0.5	1.3	1.9	3.3	5.2
Leiter- \varnothing bei 3 A/mm^2 in μm^2 :	156	433	624	1109	1732

Nach unseren Abschätzungen liegt der optimale Abstand zwischen den einzelnen Durchführungen bei ca. 5 mm. Bei diesen Abständen wären ca. 46'000 Bohrungen pro m^2 notwendig und die Stromstärke pro Bohrung wäre ca. 1.3 mA. Der notwendige Leiterquerschnitt der leitenden Durchföhrung liegt bei einer Stromdichte von 3 A/mm^2 bei $400 \mu\text{m}^2$. Die Bohrungen selbst sollen einen möglichst kleinen Durchmesser (ca. 0.1 bis 0.2 mm) haben, um nicht zu viel Fläche abzudecken. Die Anforderungen an die Genauigkeit bezüglich Lage, Winkel, Rundheit und Durchmesser sind nicht hoch, lediglich die Durchföhrung selbst muss gewährleistet sein.

Die Herstellung muss wegen der Anzahl und des kleinen Durchmessers der Bohrungen voll automatisiert, schnell und kostengünstig sein. Als Verfahren kommen Stanzen, Laserbohren oder Elektronenstrahlbohren in Frage. Wegen des relativ zur Bohrlänge kleinen Durchmessers erfolgte eine Konzentration auf Laser- bzw. Elektronenstrahlbohren, wegen der niedrigeren Kosten wurde die Laservariante ausgewählt. Mit einem vollautomatisierten System auf einer Bandlinie mit Strahlenteilung und galvanischen Ablenkspiegeln sollten Kosten im Bereich unter 10 CHF/m² möglich sein.

Bei Stromstärken durch jede einzelne Durchführung im Bereich von 0.5 mA bis 10 mA würde der Leiterquerschnitt bei einer Stromdichte von 3A/mm² zwischen ca. 150 µm² und 3000 µm² betragen. Bei einem Lochdurchmesser von 0.1 mm entspricht dies einer Minimaldicke der leitenden, metallischen Bahn von ca. 0.5 µm² bis 10 µm², bei einem Lochdurchmesser von 0.2 mm halbieren sich die Minimaldicken entsprechend. Diese Dicken können durch eine Ankeimung mit einer CVD-Bedampfung oder mit einer chemischen Abscheidung, gefolgt von einer galvanischen Abscheidung, erreicht werden.

2.3.2.4 Lösungsvorschlag für die Zellendurchführungen

Bei der angedachten Variante mit lokalen Durchführungen zum hinteren Aluminiumblech muss die Durchführung zunächst gegenüber dem oberen Blech isoliert werden und muss dann durch den Kunststoffkern geführt werden. Es ist jedoch mehr als fraglich, ob derartige Bohrungen zu einem akzeptablen Preis durchgeführt werden können. Bei einem Aufbau des Leitersystems mit zwei gegeneinander isolierten, miteinander verklebten Aluminiumblechen als Substrat für die PV-Zelle wären die zahlreichen Durchführungen einfacher herzustellen.

Bild 2.3.2.4.1 zeigt eine Variante für den Aufbau einer Zelle mit leitenden Durchführungen. Der Herstellungsprozess sieht dabei folgendermassen aus:

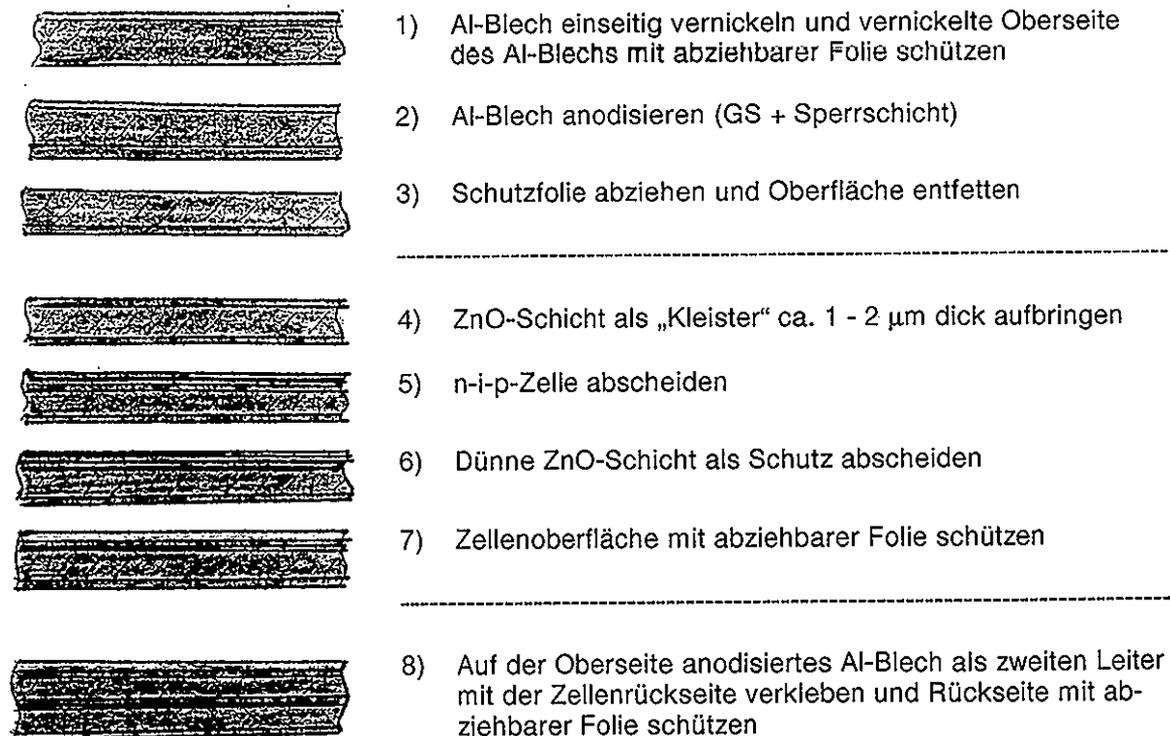
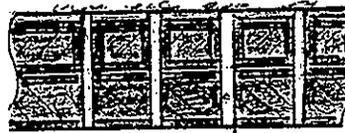


Bild 2.3.2.4.1 → Herstellung von a-Si:H-PV-Zellen auf Aluminium-Blech mit Stromdurchführungen zu einem zweiten Al-Blech



9) Löcher ($\varnothing = 0.1 - 0.2 \text{ mm}$) mit Laser von der Rückseite her bohren (hexagonales Muster aus gleichseitigen Dreiecken mit Kantenlänge



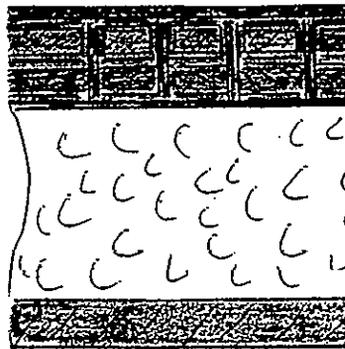
10) Innenseite der Löcher im Bereich des oberen Leiters (a-Si:H-Zellensubstrat) isolieren. PVD-SiO- oder SiN-Beschichtung oder Beizen und Aufbau einer selektiven Sperrschicht durch geeignete Einstellung der Polarität zwischen den beiden Al-Blechen aufbauen)



11) Innenseite der Löcher mit Metall bedampfen oder chemisch beschichten; danach wird die Schicht galvanisch mit metallischem Leiter (Ni) verstärkt oder die Löcher aufgefüllt



12) Schutzfolie abziehen, ZnO auf a-Si:H-Zellenoberfläche abscheiden, obere Schutzschicht aufbringen: zunächst SiN mit PVD, anschliessend Sol-Gel, TEFZEL[®], etc., eventuell mit Oberflächenstruktur; Oberfläche mit abziehbarer Folie schützen



13) Zelle zu Verbund (ALUCOBOND[®], ALUCORE[®], etc.) verarbeiten

Bild 2.3.2.4.2 → Herstellung von a-Si:H-PV-Zellen auf Aluminium-Blech mit Stromdurchführungen zu einem zweiten Al-Blech (Fortsetzung)

Auf diese Weise könnte eine Endloszelle mit zwei bereits angeschlossenen Leitern hergestellt werden. Diese Zelle kann als oberes Deckblech z.B. für ALUCOBOND[®] oder einen anderen Verbund verwendet werden.

2.3.3 Oberflächenschutz

2.3.3.1 Plasma-Nitrid-Schutzschichten auf a-Si:H-Solarzellen

Eine denkbare Möglichkeit, die Oberfläche von a-Si:H-Solarzellen gegen Witterungseinflüsse, Reinigungsmittel, etc. zu schützen, ist die Beschichtung mit Silizium-Nitrid. Bei diesem transparenten Material handelt es sich um ein amorphes, wasserstoffhaltiges Nitrid, welches sowohl mechanisch als auch chemisch sehr stabil ist und in der Mikroelektronik häufig zur Passivierung von integrierten Schaltungen verwendet wird.

Am PSI wurden entsprechende Versuche zur Überprüfung der Eignung von Silizium-Nitrid als Oberflächenschutz durchgeführt, die im Kapitel 2.4.4 näher beschrieben sind. Dabei konnte eine mechanische Schutzwirkung grundsätzlich nachgewiesen werden.

2.3.4 Vier-Zellen-Module

Der sogenannte Einzellensystem wurde im Rahmen des ALUCOSOL-Projekts eingehend studiert und beschrieben. Der Vier-Zellen-Modul ist eine Untervariante dazu. Die Ergebnisse der Wechselrichterentwicklung zeigen, dass der Wirkungsgrad bei Eingangsspannungen von weniger als 1 V überproportional schlechter wird. Abhilfe ist möglich, indem die Zellen soweit aufgeteilt werden, dass eine akzeptable Eingangsspannung entsteht.

Prinzipiell können die Zellen beliebig aufgeteilt werden. Um die Stabilität der Trägerplatten nur wenig zu beeinträchtigen, wurde die Variante mit vier Zellen vorgeschlagen. Allerdings wird auch in diesem Fall die Biegesteifigkeit der Platte geschwächt. Durch zusätzliche konstruktive Massnahmen kann dieser Nachteil jedoch behoben werden. Elektrisch werden die vier Zellen im Wechselrichter in Serie geschaltet. Dies kann auf dem Print mit den Leistungsbauteilen geschehen und bedeutet keinen wesentlichen Nachteil. Ausser der etwas reduzierten Stabilität der Trägerplatte bleiben die wesentlichen Vorteile des Einzellensystems erhalten:

- Nutzung der Metallplatten als Leiter
- Keine Serienverbindungen im Modulbereich
- Keine Bypass-Dioden
- Plane Oberfläche möglich

Die einzelnen grossflächigen Zellen sind im Wechselrichter in Serie geschaltet. Bei einem Modul von 1 m² fließen z.B. bei 12 % Wirkungsgrad rund 60 A pro Modulviertel bei einer Spannung von 0,5 V.

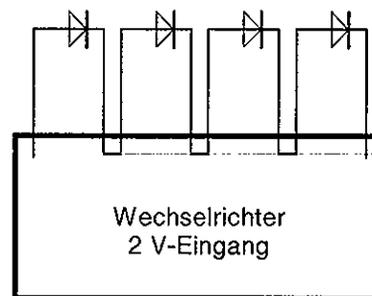


Bild 2.3.4.1 → Elektrisches
Prinzipschema

Für grossflächige Solarzellen auf Sandwichplatten eignen sich vor allem Dünnschichtzellen mit doppelten oder dreifachen Halbleiterschichten in Serienschaltung. Im Zusammenhang mit den vorgeschlagenen Stromdurchführungen resultiert eine aussichtsreiche Modultechnologie.

Bei der Variante Vier-Zellen-Modul könnten jedoch auch grossflächige, kristalline Zellen mit einem pn-Übergang verwendet werden. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Technologie der Fa. Astropower, welche grossflächige, kristalline Solarzellen auf Keramik herstellt. Darüber hinaus sind auch andere Varianten vorstellbar, wo die grosse Fläche unter Umständen einen Vorteil bringt.

2.3.5 Grobkonzept für die Produktion

Die Grundkonzeption für ALUCOSOL stand bereits in einem sehr frühen Projektstadium fest: In den zunächst eher theoretischen Überlegungen in Projektphase I kristallisierte sich sehr bald das Einzellensystem mit a-Si:H-PV-Schicht als die vom Projektteam favorisierte Lösung heraus /1/. Gründe hierfür waren sowohl ökonomischer als auch ökologischer Natur, nicht zuletzt aber auch die Absicht, nicht einfach ein „Me too“-Produkt zu entwickeln, sondern nach neuartigen Lösungen für die Fassadenintegration von Solar-

modulen zu suchen. Rückblickend muss festgestellt werden, dass zwar zahlreiche neue und zum Teil unkonventionelle Ansätze gefunden wurden, dass aber wegen des Fehlens einer geeigneten und gleichzeitig technisch ausgereiften Zellentechnologie diese Ansätze nicht in reale Solarmodule umgesetzt werden konnten. Insofern kann das im folgenden beschriebene Grobkonzept nur den aktuellen Stand der Überlegungen und der in Teilbereichen durchgeführten Untersuchungen darstellen.

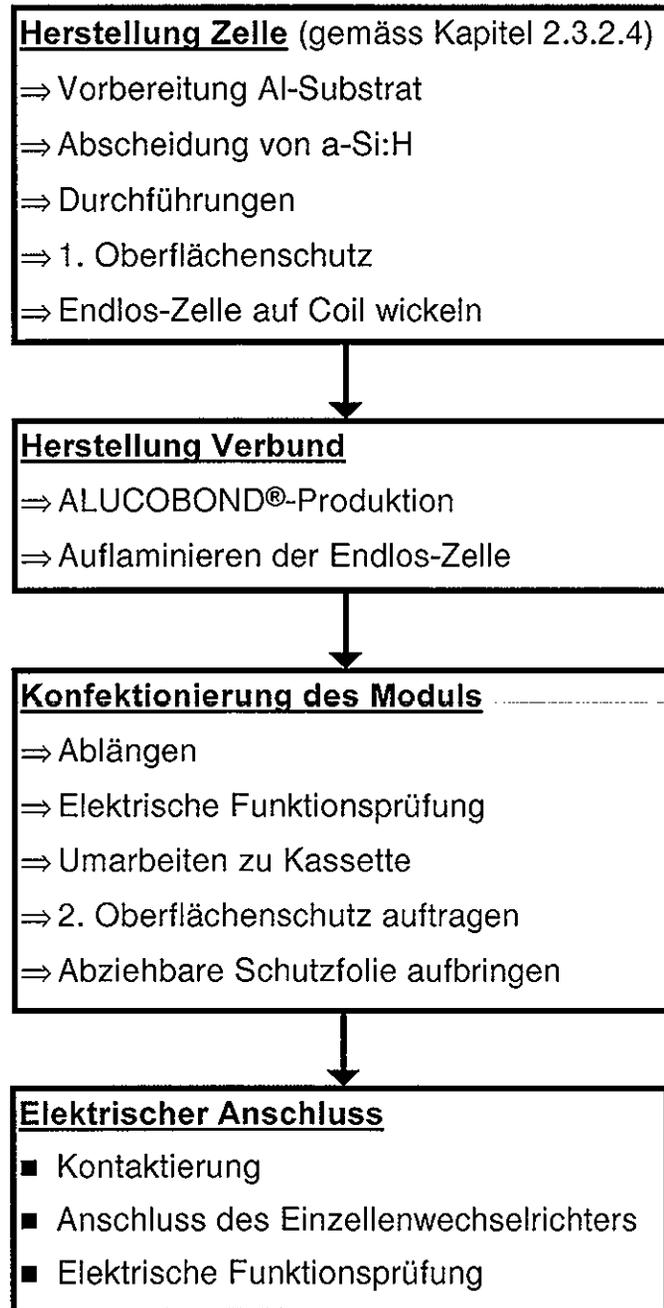


Bild 2.3.5.1 → Grobkonzept für die ALUCOSOL-Produktion

2.4 Versuche

2.4.1 Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium

Die Abscheidung der a-Si:H-Zellen kann entweder direkt auf dem Al-Substrat oder auf einem chemisch vernickelten oder verchromten Al-Substrat durchgeführt werden. Eine solche Abscheidung einer funktionsfähigen amorphen Silizium-Zelle auf einem Al-Substrat war jedoch nur als Versuch in kleinem Massstab möglich und wurde in [7] ausführlich beschrieben. Aufgrund fehlender technischer Voraussetzungen konnte ein Upscaling bisher noch nicht durchgeführt werden, so dass lediglich einige Teilaspekte des ALUCOSOL-Zellenkonzepts praktisch überprüft werden konnten:

- Abscheidung einzelner Substanzen (a-Si:H, ZnO, TCO, Chrom, Nickel, etc.)
- Realisierung von Laserbohrungen durch zwei miteinander verklebte Al-Bleche (siehe Kapitel 2.4.3)
- Die Isolierung der Bohrungen (keine positiven Resultate)
- Silizium-Nitrid-Beschichtung einer Zelle als Oberflächenschutz (siehe Kapitel 2.4.4)

Da innerhalb des ALUCOSOL-Projektteams die Einrichtungen zur Durchführung der notwendigen Verfahrensschritte nicht zur Verfügung standen, wurden die Arbeiten bei verschiedenen Partnerinstitutionen abgewickelt. Die folgende Liste enthält nach Themen geordnet die wichtigsten Partner:

⇒ Abscheidung von Zellen auf Al-Substrate:

- Institut de MicroTechnique IMT Neuchâtel (Schweiz)
(Prof. A. Shah; Dr. M. Götz; Dr. Keppner)
- Forschungszentrum Jülich, Institut für Schicht- und Ionentechnik (Deutschland)
(Dr. C. Beneking; Dr. B. Rech; Hr. S. Wieder)
- Consultant Solar Energy (Finnland)
(J. Hyvärinen)
- EPV Energy Photovoltaics (U.S.A.)
(Dr. A. E. Delahoy)

⇒ Abscheidung von Zellen:

- AKZO-Nobel (Niederlande)
(Hr. Jongerden; Hr. Middelmann)

⇒ Abscheidung von Schichten auf Al-Substrate:

- EPF Lausanne, Centre de Recherches en Physique des Plasmas (Schweiz)
(Dr. Hollenstein)
- ETH Zürich, Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenztechnik (Schweiz)
(Dr. Homan)
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (D, Baden-Württemberg)
(Dr. Dimmler, Hr. Menner)
- NAPS France (Frankreich)
(D. Guillardau)

Aus der Vielzahl der Partner resultierte ein erheblicher Koordinationsaufwand. Da die meisten Arbeiten sukzessive bei verschiedenen Partnern durchgeführt werden mussten, verging zumeist viel Zeit mit dem Transport von Substraten und Proben. Durch die notwendigen Transporte entstanden oftmals Beschädigungen oder Verunreinigungen der Muster. Insgesamt erwies sich der zur Verfügung stehende Zeitrahmen als zu kurz für die Durchführung sämtlicher Arbeiten.

2.4.2 Thermische Zyklen mit a-Si:H-Zellen auf Al-Substrat

Bei der Abscheidung von a-Si:H-Zellen auf Al-Substrate trat wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Al und Si die Frage des Verhaltens dieser Zellen bei Temperaturschwankungen auf. Zur Überprüfung der Verbindung zum Al-Substrat der beim IMT Neuchâtel abgeschiedenen a-Si:H-Zellen wurden an drei Zellen mit geringfügig unterschiedlichem Aufbau zwischen Zelle und Al-Substrat thermische Zyklen durchgeführt.

Die geprüften Zellen bestanden jeweils aus einem 80 mm x 50 mm grossen Al-Substrat mit drei Zeilen aus je 8 runden Zellen mit 5 mm Durchmesser und einer Zeile aus 5 runden Zellen mit 10 mm Durchmesser. Diese Aufteilung wurde am IMT gewählt, um eine statistische Beurteilung der Funktionsfähigkeit der Zellen zu gewährleisten, und nicht nur einfach eine Ja-/Nein-Aussage über eine einzelne, wenn auch etwas grössere Zelle zu erhalten.

Die drei geprüften Zellenaufbauten waren:

S99:	Al/ZnO(Sputtering)/NIP/ITO
S100:	Al/ZnO(CVD)/NIP/ITO
S114:	Al/Sol-Gel/ZnO/NIP/ITO

Ein Teil der Zellen (9 kleine und 2 grosse Zellen) wurde zusätzlich noch mit einer Klarlackschicht geschützt. Vor dem Versuch wurden alle Zellen unter künstlichem Licht geprüft und diejenigen, die eine höhere Spannung als 500 mV aufwiesen, als gut markiert.

Die Proben wurden in einer Klimakammer zyklisch zwischen -30°C und +100°C abgekühlt und aufgeheizt. Die Zykluszeit betrug 90 min. Während der Temperaturzyklen kondensierte und gefror beim Abkühlen die Luftfeuchtigkeit auf den Zellen, was den Test noch strenger machte. Nach 300 Zyklen wurden die Zellen wieder geprüft. Bei der Annahme von 30 Frostzyklen pro Jahr würden bei normalen Auslagerungsverhältnissen diese 300 Zyklen einer Exposition von 10 Jahren entsprechen.

Von den mit der Klarlackschicht geschützten Zellen fiel bei allen drei Zellenaufbauvarianten kein einziges Exemplar aus. Von den ungeschützten Zellen fielen ca. 50 - 60% aus, es traten lokal kleine Abplatzungen der Zelle auf, die vermutlich von den mechanischen Kontaktstellen zur Zellenüberprüfung ausgelöst wurden.

Da die geschützten Zellen den Test bestanden, dagegen ein Teil der ungeschützten Zellen ausfiel, ist der Ausfall eher mit der kombinierten Wirkung der Feuchtigkeit und der Temperaturzyklen zu erklären als ausschliesslich durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten; andernfalls wären auch die abgedeckten Zellen ausgefallen. Streng genommen ist diese Aussage nur für kleine Flächen gültig, die grösste Zelle im Versuch hatte einen Durchmesser von 10 mm. Wenn aber die Verhältnisse zwischen Dicke der einzelnen abgeschiedenen Schichten (im μm -Bereich) und Zellengrösse (10 mm) berücksichtigt werden, können die Ergebnisse extrapoliert werden. Sobald ein Upscaling von auf Al-Substrate abgeschiedenen a-Si:H-Zellen möglich ist, müssen als Bestätigung grössere Zellen (min. 300 mm x 300 mm) den Temperaturzyklen unterworfen werden.

Da bis zum Projektende keine grösseren, funktionstüchtigen a-Si:H-Zellen auf Aluminium verfügbar waren, wurde eine Serie verschiedener Proben einer Temperaturzyklenprüfung zwischen -30 °C und 80 °C unterworfen. Dieser Versuch war Mitte 1998 noch nicht abgeschlossen und läuft bei ATM über das Projektende hinaus. Bei den Proben 4 und 7-11 war die Haftung der Si-Schicht auf dem Substrat bereits zu Beginn schlecht.

- 1) UNI-SOLAR-Zelle auf Stahlblech, mit 100 μm SiN beschichtet
- 2) UNI-SOLAR-Zelle auf Stahlblech, mit 200 μm SiN beschichtet
- 3) UNI-SOLAR-Zelle auf Stahlblech, mit 300 μm SiN beschichtet

- 4) Zelle abgeschieden bei Consultant Solar Energy, Finnland, auf Al-Substrat (ZnO-NIP-ZnO)
- 5) Al-Blech mit ITO von NAPS France + Si-Abscheidung von EPFL
- 6) Al-Blech mit ITO von NAPS France + Si-Abscheidung von EPFL
- 7) Verchromtes Al-Blech glatt + Si-Abscheidung von EPFL
- 8) Verchromtes Al-Blech glatt + Si-Abscheidung von EPFL
- 9) Verchromtes Al-Blech rau + Si-Abscheidung von EPFL
- 10) Verchromtes Al-Blech rau + Si-Abscheidung von EPFL
- 11) Al-Blech mit ZnO von Uni Stuttgart + Si-Abscheidung von EPFL

2.4.3 Realisierung von Laserbohrungen

Für die Herstellung der Stromdurchführungen von der dem Licht zugewandten Zellenoberfläche zum hinteren stromleitenden Blech (siehe Kapitel 2.3.2) muss die Zelle mit dem leitenden Al-Substrat und dem davon isolierten zweiten leitenden Al-Blech mit Lötlern durchbohrt werden, welche anschliessend zunächst isoliert und dann mit einem Leiter beschichtet werden.

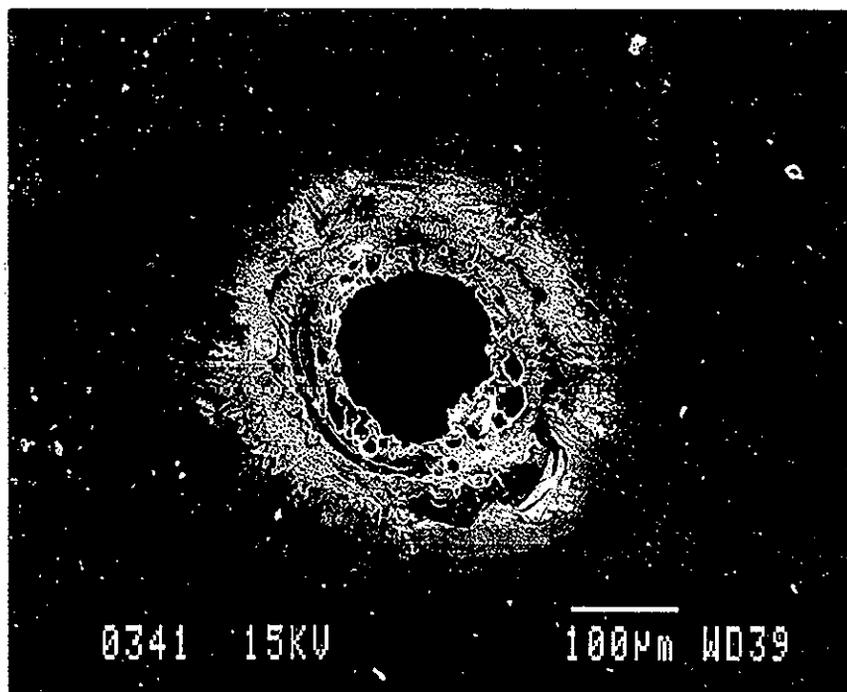


Bild 2.4.3.1 → REM-Aufnahme einer Laserbohrung

Zur Überprüfung der Machbarkeit wurden je zwei anodisierte Aluminium-Plättchen im Format 100 mm x 100 mm miteinander verklebt. Da im Projektteam kein geeigneter Laser zur Verfügung stand, wurden die Bohrungen mit dem Laser mit einem hexagonalen Lochraster mit ca. 5 mm Abstand zwischen den Löchern (ca. 46000 Löcher/m²) in Auftrag gegeben. Die Bohrungen sollten einen Durchmesser von ungefähr 0.1 bis 0.2 mm aufweisen und brauchten nicht rund zu sein. Die Bohrachse selbst musste nicht zwingend senkrecht zur Plattenoberfläche stehen, sie konnte bis zu einen Winkel von ca. +/- 20° um die Senkrechte streuen. Diese bezüglich der Funktionalität unbedenklichen Vereinfachungen sollten die Kosten der Laserbohrungen bei der Zellenherstellung niedrig halten.

Die Laserbohrungen wurden von den folgenden Institutionen durchgeführt:

- Fachhochschule Münster; FB Physikalische Technik
- Laser-Automation Gekatronic s.a., La Chaux-de-Fonds

Es zeigte sich, dass die gewählte Methode der Laserbohrungen grundsätzlich machbar ist, dass aber noch ein erheblicher Optimierungsbedarf besteht. Bei der Bearbeitung der einzelnen Plättchen waren insbesondere die Kosten mit ca. 20 Rp./Laserbohrung sehr hoch, weil nicht für diesen Zweck speziell optimierte Systeme eingesetzt werden konnten. Nach Angaben der Auftragnehmer wären bei optimierten Systemen mit Aufspaltung des Laserstrahles und Strahlablenkung mittels galvanischen Spiegeln geschätzte Kosten von 0.01 - 0.05 Rp./Bohrung denkbar. Hochgerechnet auf 50'000 Löcher/m² wäre demnach für die Laserbohrungen der Zellen mit Kosten von ca. 5.- bis 25.- CHF/m² zu rechnen.

2.4.4 Plasma-Nitrid-Schutzschichten auf a-Si:H-Solarzellen

Am PSI wurde auf unbeschichtete, kontaktierte a-Si:H-Solarzellen der Fa. UNI-SOLAR Silizium-Nitrid durch Plasma-Abscheidung aufgebracht. Die Zellen wurden vor und nach der Beschichtung photovoltaisch getestet, nach der SiN_x-Abscheidung wurde bei ATM die Kratzfestigkeit der Oberfläche im Vergleich zu einer unbeschichteten Zelle getestet.

Der Wirkungsgrad der Zellen wurde durch den Abscheidungsprozess, der bei Temperaturen unterhalb von 200 °C stattfand, nicht beeinträchtigt. In einem Fall konnte sogar eine Erhöhung des Wirkungsgrads festgestellt werden, dessen Ursache jedoch ungeklärt ist. Die mechanische Schutzwirkung konnte mit einem bei ATM gebauten Gerät nachgewiesen werden. Die Projektdokumentation enthält weitere Details zur Abscheidung der SiN_x-Schicht und zur Untersuchung der Abriebfestigkeit.

2.4.5 Polymere Schutzschichten

Auf Tandemzellen der Fa. UNI-SOLAR aus einer früheren Lieferung wurden unterschiedliche Beschichtungen aufgebracht; anschliessend wurden vergleichende Korrosionsuntersuchungen (Xenotest) durchgeführt /8/. Dabei zeigte sich, dass bezüglich des Korrosionsverhaltens die derzeit bevorzugte Variante (TEFZEL®-Folie + EVA-Klebeschicht) die besten Eigenschaften besitzt, während sich z.B. eine mitgetestete Sol-Gel-Beschichtung nach ca. 1500 h von der Zelle ablöste.

2.4.6 Kontaktierung für elektrische Messungen

Am IMT Neuchâtel waren amorphe und mikrokristalline Silizium-Solarzellenstrukturen direkt auf Aluminium-Bleche abgeschieden und mit transparenten Zinkoxid-Kontaktschichten versehen worden. Da ein geeignetes Verfahren für die Stromdurchführungen noch nicht verfügbar war, sollte am PSI versucht werden, metallische Frontkontaktgitter auf diese Schichten aufzubringen, um elektrische Messungen zu ermöglichen. Randbedingungen waren eine möglichst schonende Behandlung der Oberfläche und ein weitgehender Verzicht auf Nassprozesse.

Die Kontaktschichten waren ihrerseits mit einem transparenten Lack zum Schutz vor Feuchtigkeit versehen. Das vollständige Entfernen dieses Lackes ohne Beschädigung der ZnO-Schicht erwies sich als sehr schwierig. Obwohl noch Lackreste auf der Oberfläche verblieben waren, wurde aber trotzdem an zwei von drei Proben mit einem Photoprozess eine Silber-Lift-off-Metallisierung vorgenommen.

Bei der Photolack-Entwicklung lösten sich jedoch Teile der a-Si:H-Schicht vom Aluminium-Substrat ab. Der Lift-off-Prozess funktionierte nur partiell, so dass sich zahlreiche Unterbrechungen der Leiterbahnen ergaben.

Elektrische Messungen in den optisch unbeschädigten Zellenbereichen ergaben keinen messbaren Strom und eine stark variierende Spannung bis zu einigen 100 mV. Daraus musste geschlossen werden, dass die Kontaktierung schlecht bzw. gar nicht vorhanden war. Über die tatsächliche Qualität der Zellen auf dem Aluminium-Substrat liessen sich somit keine Aussagen gewinnen. Weitere Details und einige REM-Aufnahmen enthält die Projektdokumentation.

2.4.7 Leitfähigkeitsmessungen an TCO

Anfang April 1998 hatte Fa. NAPS France Aluminiumbleche mit TCO (Transparent Conductive Oxide) beschichtet. Es handelt sich um ZnO (Zinkoxid), welches bei ca. 400 °C abgeschieden wurde. NAPS hatte für diesen Zweck den Standardprozess zur Beschichtung von Glas leicht angepasst, über die Qualität der TCO-Schicht herrschte jedoch Unklarheit. Mit den nachfolgend beschriebenen Messungen wurde versucht, mehr Informationen über die Leitfähigkeit und die Übergangswiderstände zu erhalten.

Die Messapparatur wurde gemäss Bild 2.4.7.1 eigens für diese Aufgabe konstruiert. Um den Kontaktwiderstand so gering wie möglich zu halten, wurden vergoldete Kontakte verwendet. Der Druck auf die Kontakte war gleichzeitig ein Messparameter.

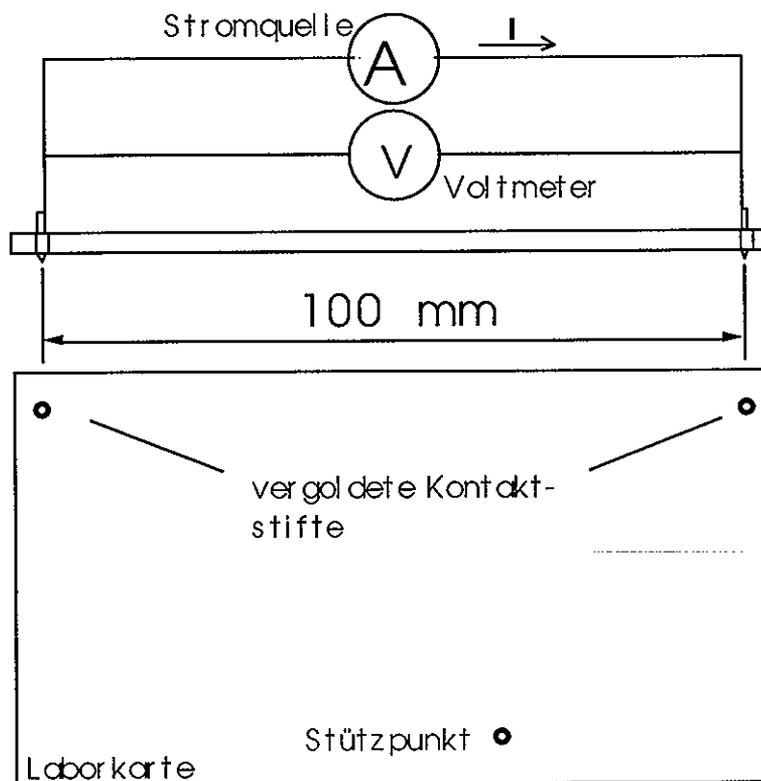


Bild 2.4.7.1 → Aufbau der Messvorrichtung

Bereits im Vorfeld war absehbar, dass die Messungen schwierig werden, doch die Probleme wurden erst bei der eigentlichen Messung sichtbar. Zum einen war die Schichtdicke der 20 x 30 cm grossen Probe – wie man an der unterschiedlichen Färbung erkennen konnte – sehr unterschiedlich. Zusätzlich war der gemessene Spannungswert stark abhängig vom jeweiligen Messdruck. Um die Fehler und Ungenauigkeiten besser abschätzen zu können, wurden zum Vergleich zusätzlich ein Aluminiumblech ohne Beschichtung und ein Edelstahlblech gemessen.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die Messung nicht die erhofften Ergebnisse liefert. Bild 2.4.7.2 zeigt eine grosse Streuung der Messwerte, was deutlich auf die Problematik der Messanordnung hinweist. Dennoch ist zumindest eine grobe Schätzung über den Leitfähigkeitsbereich möglich, die jedoch nicht überbewertet werden darf. Weitere Details, Beobachtungen und Ergebnisse enthalten der Messbericht und das Messprotokoll, die der Projektdokumentation beigelegt sind.

Widerstand TCO

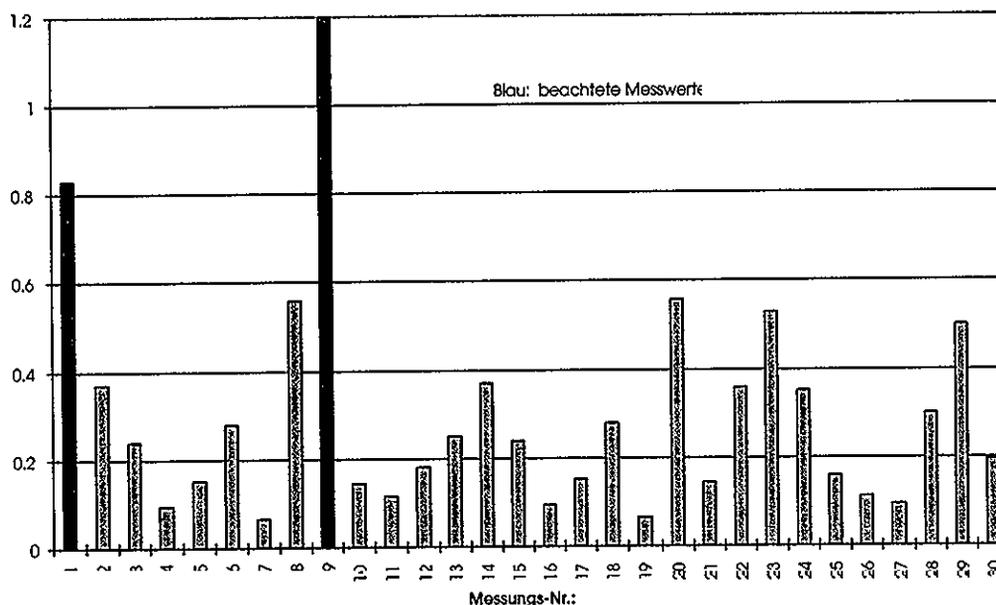


Bild 2.4.7.2 → Übersicht über die Messungen der TCO-Schicht

2.4.8 Herstellung eines STEELOBOND®-Demo-Moduls

Über Fa. Enecolo AG konnte eine Solarzelle der neuesten Generation (a-Si:H-Triple-Zelle auf rostfreiem Stahl, ca. 25 cm x 35 cm) der Fa. UNI-SOLAR beschafft werden. Da derzeit vermutlich keine grösseren Zellen erhältlich sind, wurde im Projektteam beschlossen, aus diesem Exemplar ein Demo-Modul herzustellen. Wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl und Aluminium wurde als Trägerplatte nicht ALUCOBOND®, sondern ein vergleichbarer Aufbau aus rostfreien Stahlblechen gewählt. Dieser Aufbau wurde vor mehreren Jahren als Produktvariante STEELOBOND® entwickelt, wegen verschiedener Probleme aber nicht in die Produktion eingeführt.

Bereits in Projektphase II war ein ähnlicher Modul realisiert worden, damals allerdings mit zwei parallel geschalteten Zellen im Format von jeweils 12 cm x 33 cm. Zunächst wurde in einem ersten Arbeitgang die Trägerplatte aus einem 3 mm dicken Polyethylen-Kern und zwei Blechen aus rostfreiem Stahl (Dicke oben: 0.15 mm / Dicke unten: 0.30 mm) durch Lamination in einer Presse hergestellt. Die ca. 0.15 mm dicke Solarzelle wurde mit ihrer blanken Unterseite mittels eines leitfähigen Epoxy-Klebers auf das obere Deckblech aufgebracht und während etwa 24 h bei ca. 70 °C unter flächiger Belastung verklebt. In der Mitte der Trägerplatte war vor dem Aufbringen der Solarzelle eine Bohrung mit einem Durchmesser von ca. 25 mm durch das untere Deckblech und den Kern ausgeführt worden, so dass die Unterseite des oberen Deckblechs mit einem Kontakt versehen werden konnte. Durch Kontaktieren der Zellenoberfläche mit dem unteren Deckblech war es damit möglich, sowohl das obere als auch das untere Deckblech als Stromleiter zu verwenden. Bild 2.4.8.1 gibt einen ungefähren optischen Eindruck des Moduls wieder.

Da die Zellenoberfläche bereits ab Werk mit einem transparenten Schutzlack versehen war, wurde auf eine zusätzliche Schutzschicht verzichtet. Der fertige Modul erwies sich als funktionsfähig, für detaillierte Messungen stand jedoch nicht mehr ausreichend Zeit zur Verfügung. Bei einer improvisierten Messung mit künstlicher Beleuchtung mit einer Leuchtdichte von ca. 10'000 Lux wurde eine Spannung von 1,76 V bei einem Strom von 138 mA gemessen. Im Vergleich dazu brachte eine UNI-SOLAR-Zelle mit halber Fläche bei gleicher Beleuchtung etwa 1,65 V bei 68 mA.



Bild 2.4.8.1 → Ansicht des STEELOBOND®-Demo-Moduls

Selbstverständlich weicht der Demo-Modul noch in einigen Punkten vom ALUCOSOL-Konzept ab. Insbesondere erfolgte die Herstellung praktisch ausschliesslich in Handarbeit. Der verwendete leitfähige Epoxy-Kleber kann nur als Zwischenlösung angesehen werden, da er für grossflächige Anwendungen zu teuer ist. Auch die hier gewählte Variante mit Stahlblech als STEELOBOND® wäre in der Praxis mit erheblichen Nachteilen behaftet (geringere Leitfähigkeit der Deckbleche, schwierigere Verarbeitbarkeit zu Fassadenelementen, etc.). Nicht zuletzt erfolgt die Stromableitung von der Zellenoberfläche konventionell über dünne Drähte zu Sammelschienen am Modulrand. Im kleinen Massstab gibt der Demo-Modul jedoch einen groben Eindruck vom Aussehen der geplanten ALUCOSOL-Module.

2.5 Kostenanalyse (Zusammenfassung)

In einer früheren Projektphase wurden detaillierte Kostenanalysen zur Modulfertigung mit kristallinen Zellen durchgeführt. Dabei zeigte sich klar, dass allein durch die Laminierung auf ALUCOBOND® keine wesentlichen Kostenreduktionen möglich sind. Diese Aussage basierte auf bestehenden Zellen-, Laminier- und Modultechnologien und führte letztlich auch zum Entscheid, diese mögliche Anwendung vorläufig nicht weiter zu entwickeln.

Signifikante Kostenreduktionen sind erst möglich durch die volle Integration des Solarzellen- und Modulaufbaus in das ALUCOBOND®. Für die Integration gibt es diverse Varianten. Nachfolgend wird ein mögliches Konzept kurz beschrieben, das auch im SCMIC-Projekt untersucht wurde. Innerhalb des ALUCOSOL-Projekts wurden hierzu verschiedene Versuche durchgeführt.

Das Konzept ist im vorliegenden Bericht an mehreren Stellen erwähnt und beschrieben. Es basiert auf einer Aluminium-Sandwichplatte als Einzellenmodul mit Stromdurchführungen innerhalb der Zelle. Die nachfolgende Tabelle zeigt eine erste Kostenschätzung zu diesem Konzept. Zuvor sei aber erwähnt, dass es schwierig war, zuverlässige und präzise Zahlen zu den einzelnen Prozessschritten zu erhalten.

Aufgelistet sind die geschätzten Herstellungskosten für Solarmodule aus amorphen Silizium-Dünnschichten auf Glas und auf Aluminium-Sandwichplatten in CHF/m² respektive CHF/100 W. Die Schätzung basiert auf einer Modul-Jahresproduktion von > 10 MW, einer weitgehend automatisierten Fabrikation und relativ niedrigen Kapitalkosten. Die Zahlen stammen aus diverser Literatur zu diesem Thema sowie aus Gesprächen.

	Glas/Glas	ALUCOSOL
Substrate: Glas, 2 Stück	16	-
Alu-Sandwich	-	18
TCO-Deposition	20	20
p-i-n-Deposition, 2x	15	15
Metallisierung	12	-
Serienschaltung innerhalb Zelle	8	-
Durchführungen	-	15
Hartstoffschicht	-	10
Modulfertigung	40	-
Zusatzeinrichtungen	30	30
Diverses	9	12
Total	150	120

Das neue Konzept erlaubt die Kostenreduktion vor allem wegen des Wegfalls des zusätzlichen Schritts der Modulfertigung, weil der Modul im gleichen Arbeitsgang wie die Zellen gefertigt wird. Wegen der niedrigen Spannung von 2-3 V ist die Einbettung des Moduls einfacher. Eine transparente Hartstoffschicht auf der Zellenoberfläche mit guten Eigenschaften als Diffusionssperre – wie das zum Beispiel beim Silizium-Nitrid der Fall ist – sollte als Schutzschicht normalerweise genügen. Ebenso wichtig ist allerdings auch der Schutz gegen mechanische und chemische Einflüsse, so dass eventuell noch eine weitere Schutzschicht (z.B. TEFZEL®) vorgesehen werden muss. Weitergehende Versuche müssen die Machbarkeit und die resultierenden Kosten genauer aufzeigen, bevor ein eigentlicher Technologieentscheid möglich ist.

2.6 Koordination / Übertrag SCMIC-Projekt

Die Idee des grossflächigen Einzellensystems entstand im Zusammenhang mit dem ALUCOSOL-Konzept. Im Rahmen des ALUCOSOL-Projekts konnte eine grobe Abschätzung der Machbarkeit als Modul durchgeführt werden. Hingegen lag die grosse Unbekannte im Bereich des Modulwechselrichters mit den entsprechenden Spezifikationen.

Zur Erforschung dieser Fragen und für die Entwicklung von Prototypen wurde ein Projekt im Rahmen des JOULE-Programms bei der EU eingereicht. Das Institut für Solarenergie der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG-ISE) in Freiburg (D) koordinierte die Projektarbeiten. Neben ATM und Enecolo AG waren das Institut für Leistungselektronik an der ETH Zürich und die Fa. NAPS France als weitere Projektpartner beteiligt. Das SCMIC-Projekt endet praktisch zeitgleich mit dem ALUCOSOL-Projekt.

Zum Thema „Wechselrichter“ wurden sehr gute Ergebnisse erzielt. Bereits ab einer Eingangsspannung von 1 V lassen sich akzeptable Wirkungsgrade mit einem vertretbaren Aufwand erzielen. Sowohl an der ETHZ wie auch beim FhG-ISE konnten Prototypen mit unterschiedlichen Schaltungen gebaut werden, welche zu ähnlichen Resultaten führten. Bei 2 V Eingangsspannung und einem maximalen Strom von 120 A lässt sich für den gesamten Konverter ein Eurowirkungsgrad von DC auf 230 V AC (inkl. Netzanbindung) von 87.5 % erzielen.

Die Zukunft des Einzellensystems wird daher kaum von der Wechselrichter-Problematik bestimmt, sondern vor allem davon, ob der Modulherstellungsprozess die erwarteten Vereinfachungen erlaubt. Diese Frage konnte das SCMIC-Projekt allerdings noch nicht beantworten.

3 Soll-Ist-Vergleich

3.1 Änderung der Zielsetzung

Zu Beginn von Phase IV des ALUCOSOL-Projekts stand entgegen der ursprünglichen Planung kein Pilotmodul mit Zellen aus a-Si:H/Stahl auf einer Verbundplatte zur Verfügung und konnte daher nicht die Basis für das in dieser Phase zu entwickelnde Fassadenelement bilden. Um das Defizit der fehlenden Zellen zumindest teilweise auszugleichen, wurde daher beschlossen, die Grundlagen für die a-Si:H-Direktabscheidung auf Aluminium-Substrat in Zusammenarbeit mit dem IMT Neuchâtel und anderen Partnern aus Wissenschaft und Industrie zu erarbeiten.

Wegen der fehlenden Module war daher auch die Durchführung der geplanten Labortests (Korrosion, UV), des ISPRA-Tests und der Freibewitterung nicht möglich. Statt dessen wurden die Tests an den BP Solar-Pilotmodulen intensiviert, da auch von diesen wegen des ähnlichen Aufbaus zahlreiche relevante Aussagen zum ALUCOSOL-Konzept zu erwarten waren (siehe Kapitel 2.2).

Die Definition des erfolgversprechendsten ALUCOSOL-Systems musste daher grossenteils aufgrund theoretischer Überlegungen erfolgen und war daher auch nicht vollständig durchführbar. Das definitive Konzept für das ALUCOSOL Fassadensystem konnte nicht im Detail festgelegt werden und die zugehörige Marktstudie musste allgemeiner gehalten werden als ursprünglich geplant (siehe Kapitel 2.1).

Da bis zum Abschluss der Projektarbeiten keine PV-funktionsfähigen Fassadenelemente bzw. Pilotmodule auf der Basis von a-Si:H/Aluminium zur Verfügung standen, war der Bau einer Demofassade nicht möglich, so dass keine Daten zu Montagefreundlichkeit, PV-Wirkungsgrad, Baulauglichkeit, Systemtechnik, Aussehen sowie Kosten vorliegen.

Die weitaus meisten Aktivitäten während der Projektphase IV bestanden in der Suche nach Möglichkeiten zur Realisierung des Konzepts der a-Si:H-beschichteten Aluminiumbleche mit Stromdurchführungen und in entsprechenden Versuchen bei verschiedenen Partnern.

Damit wurde die eigentliche Zielsetzung des Projekts – die Entwicklung eines PV-Fassadensystems bis zur Produktionsreife – auf eine Machbarkeitsstudie für das vorgesehene Solarzellenkonzept zurückgestuft. In Kapitel 3.2 ist die dazugehörige Einschätzung des Projektteams zum Grad der Zielerreichung zu den einzelnen Themen des Projekts, aufgeteilt in Theorie und Praxis, in Tabellenform dargestellt.

3.2 Grad der Zielerreichung

Die untersuchten Projektkriterien werden im folgenden anhand der Theorie- und der Praxisresultate bewertet. Aus diesem Grunde werden zwei Kategorien (Theorie und Praxis) dargestellt. Der dunkel gefärbte Laufbalken indiziert die Zielerfüllung in Prozenten.

Die Darstellung beinhaltet die Begutachtung aller Projektmitarbeiter und repräsentiert den Durchschnitt.

Kriterien	Ziel erfüllt in %										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Theorie	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Systemtechnik	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Marktstudie	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Anwendungspotential	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Anwendungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Technologie-Evaluation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Erfahrungen mit den a-Si:H-Pilotmodulen	Wurde in der Theorie nicht untersucht										
Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Durchführungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Vier-Zellen-Modul	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Einzellenmodul	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Oberflächenschutz	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Grobkonzept für die Produktion	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Kostenanalyse	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Thermische Zyklen	Wurde in der Theorie nicht untersucht										

Kriterien	Ziel erfüllt in %										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Praxis	■	■	■	■	■	■					
Systemtechnik	■	■	■	■	■	■	■				
Marktstudie	Wurde in der Praxis nicht untersucht!										
Anwendungspotential	Wurde in der Praxis nicht untersucht!										
Anwendungen	■	■	■	■	■	■	■				
Technologie-Evaluation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Erfahrungen mit den a-Si:H-Pilotmodulen	■	■									
Abscheidung von a-Si:H auf Aluminium	■	■	■	■	■	■					
Durchführungen	■										
Vier-Zellen-Modul	Wurde in der Praxis nicht untersucht!										
Einzellenmodul	■	■	■	■	■	■					
Oberflächenschutz	■	■	■								
Grobkonzept für die Produktion	Wurde in der Praxis nicht untersucht!										
Kostenanalyse	Wurde in der Praxis nicht untersucht!										
Thermische Zyklen	■	■	■	■	■	■	■	■			

3.3 Gründe für Abweichungen

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, bestanden die weitaus meisten Aktivitäten während der Phase IV des ALUCOSOL-Projekts in der Suche nach Möglichkeiten zur Realisierung des Konzepts der a-Si:H-beschichteten Aluminiumbleche mit Stromdurchführungen und in entsprechenden Versuchen bei verschiedenen Partnern.

Insbesondere die Partnersuche und die Koordination der einzelnen Versuchsschritte zwischen den Partnern erwiesen sich als sehr zeitaufwendig. Keiner der für die Herstellung einer grossflächigen Zelle in Frage kommenden Partner hatte sämtliche Einzelverfahren zur Verfügung, so dass zwischen den einzelnen Verfahrensschritten jeweils ein Versand nötig war, der wiederum mit Zeitverlusten verbunden war.

Darüber hinaus hatten die meisten Partner, die nicht zum engeren Projektteam gehören, zahlreiche Eigeninteressen, die sich nicht immer mit den Interessen des ALUCOSOL-Projektteams deckten. Als ein weiteres Hemmnis stellte sich die Furcht vor Know-how-Verlust heraus, die zumeist nur in Gesprächen oder mit Hilfe geeigneter Verträge gemildert werden kann, was aber in der Regel ebenfalls mit erheblichem Zeitaufwand verbunden ist. Die Klärung der Interessen und die Vertrauensbildung sollten möglichst vor dem Startschuss zu den eigentlichen Projektarbeiten stattfinden (wie 1991 beim Workshop geschehen); dies war jedoch im vorliegenden Fall wegen der kurzfristig geänderten Zielsetzung erst während des Projekts möglich.

Als weiterer Grund für die Zielabweichungen muss die Tatsache angesehen werden, dass die technische Umsetzung der Ideen zur Herstellung der grossflächigen Zellen in die Praxis schwieriger war als angenommen. Hier zeigte sich, dass die 1991 beim Workshop vorgesehene zweigleisige Vorgehensweise

1. Erarbeitung von Grundlagen zur Zellenherstellung und Umsetzung in die Praxis
2. Produktentwicklung eines Fassadensystems

vermutlich zu einem grösseren Erfolg geführt hätte, da sehr viele Aktivitäten parallel anstatt hintereinander hätten durchgeführt werden können.

4 Schlussfolgerungen

Wenn auch das ursprüngliche Projektziel nicht vollumfänglich erreicht wurde, so können aufgrund der erzielten Ergebnisse doch zahlreiche interessante und nützliche Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ⇒ Im Bereich Modultechnologie bringt die Variante ALUCOSOL ein erhebliches Verbesserungspotential. Allerdings besteht bei der Fertigung von Modulen ganz allgemein ein Optimierungspotential
- ⇒ ALUCOBOND® eignet sich gut als Substrat für Solarzellen.
- ⇒ ALUCOBOND® mit kristallinen Zellen und gleichem Laminierverfahren wie bei konventionellen Glasmodulen ergibt keine Kostenvorteile bezüglich der Module, jedoch eine höhere Flexibilität bezüglich der Systemtechnik.
- ⇒ Kostenvorteile lassen sich erst erzielen durch die Anwendung kontinuierlicher Abscheidungsverfahren für a-Si:H auf Aluminium oder auf ein anderes Metall sowie durch eine direkt nachgeschaltete Modulfertigung.
- ⇒ Das SCMIC-Konzept (Einsatz eines Einzellenwechselrichters) bildet die Basis für die kontinuierliche Zellen- und Modulfertigung.
- ⇒ Die Resultate aus dem vom EU-Projekt SCMIC zeigen, dass ein Wechselrichter für Eingangsspannungen von 1 - 2 V machbar und sinnvoll ist.
- ⇒ Amorphe Silizium-Schichten haften nur unter bestimmten Bedingungen auf Aluminium; für die Herstellung funktionsfähiger a-Si:H-Zellen auf Aluminium ist sehr viel Know-how erforderlich.
- ⇒ Mit den Stromdurchführungen durch die aktive Schicht auf die Rückseite der Zellen ergibt sich ein vorteilhaftes Modulkonzept. Dessen Machbarkeit konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts jedoch erst im theoretischen Ansatz und nur teilweise auch praktisch nachgewiesen werden.
- ⇒ Die Leitfähigkeit von 0.5 mm dickem Aluminiumblech genügt, um einen Einzellenmodul in der Größenordnung von einem Quadratmeter zu bauen. Bei Stahlblech von 0.5 mm Dicke ergeben sich ungefähr fünfmal grössere Verluste; diese liegen im Bereich von 1 - 2 %.
- ⇒ Derzeit ist kein kommerzieller Produzent von Solarzellen bereit oder in der Lage, geeignete Zellen für das ALUCOSOL-Konzept zur Verfügung zu stellen.
- ⇒ Hartstoffschichten aus Silizium-Nitrid oder Silizium-Oxid auf Silizium bzw. Zinn- oder Zinkoxid bilden eine mögliche Alternative zu Glasoberflächen als kratzfestem Schutz für die PV-Schicht.
- ⇒ Die Eignung von TEFZEL® oder ähnlichen transparenten Polymeren als Oberflächenschutz ist kritisch bei Bauelementen mit einer langen Gebrauchsdauer, wie sie bei Fassaden- und Dachanwendungen gefordert wird.

5 Ausblick / Weiteres Vorgehen

5.1 Offene Probleme

Diejenigen Problemkreise, die im Rahmen des Projekts nicht gelöst werden konnten und daher vorläufig offen bleiben müssen, wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich beschrieben. Die nachfolgende Aufstellung dient daher lediglich als Zusammenfassung:

Stichworte	Erläuterungen
a-Si:H	Geeignete Technologiepartner sind derzeit nicht vorhanden und müssen noch evaluiert werden.
a-Si:H auf Aluminium	Die technischen Bedingungen zur genügenden Haftung müssen noch endgültig bestimmt und festgelegt werden.
Transparente Hartstoffschichten	Haftung, Witterungs- und UV-Beständigkeit sowie die mechanischen Eigenschaften konnten im Rahmen des ALUCOSOL-Projekts nur in Ansätzen untersucht werden; hierzu sind weitergehende Versuche notwendig.
Stromdurchführungen	Zu diesem Thema sind noch zahlreiche Versuche notwendig, um die bisherigen theoretischen Überlegungen in die Praxis zu übertragen und die Machbarkeit definitiv nachzuweisen. Daran anschliessend kann die zugehörige Verfahrenstechnik festgelegt werden.
Prozesslinie	Der endgültige Nachweis der Machbarkeit des gesamten ALUCOSOL-Prozesses muss noch erbracht werden, daran anschliessend müssen die zu erwartenden Investitions- und Betriebskosten bestimmt werden.

5.2 Weitere Arbeiten (kurz-/langfristig)

Nach dem Abschluss des laufenden Projekts wird von den Projektpartnern eine Standortbestimmung vorgenommen. Die Folgearbeiten definieren sich aufgrund der neuen Zielsetzung. Bei einem „Ja“ zur weiteren Technologieentwicklung braucht es unter anderem folgende Schritte:

- Zusätzliche Partner im Bereich der Dünnsolarzellen und der zugehörigen Prozesstechnologien müssen gefunden oder aufgebaut werden (Die Suche und die Organisation der Zusammenarbeit bedeuten einen beachtlichen Aufwand).
- Ein oder mehrere Folgeprojekte müssen definiert werden.
- Für das vorgeschlagene ALUCOSOL-Konzept kommen zahlreiche verschiedene Verfahren und Prozesse zu Einsatz. Es wird sich sicher lohnen, im Anschluss an das hier beschriebene Projekt ein Technologie-Monitoring durchzuführen, damit vorhandenes Know-how integriert werden kann.
- Kritische technische Details und Probleme können an Hochschulen in Form von Studien- und Semesterarbeiten untersucht werden: „Isolierte Durchführungen“, „Transparente Hartstoffschichten“, „Abscheidung von Silizium-Schichten auf Aluminium“, etc.

6 Literaturverzeichnis

- /1/ Weng, Michael et al.: Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen (Phasen I und II), genehmigter Schlussbericht zum NEFF-Projekt Nr. 557, März 1994
- /2/ Weng, Michael et al.: ALUCOSOL – Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen, Offerte zuhanden des Bundesamtes für Energiewirtschaft für ein Energieforschungsprojekt, August 1995
- /3/ Weng, Michael et al.: Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen (Phase III), genehmigter Schlussbericht zum NEFF-Projekt Nr. 557, Februar 1996
- /4/ N.N. EU-Bericht "Commission of the European Communities, Directorate General for Energy; Photovoltaics in 2010; Executive Summary"
- /5/ Gutschner, Marcel Entwicklung eines Ansatzes zur Ermittlung des ertragskriterium-differenzierten photovoltaischen Flächenpotentials im schweizerischen Gebäudepark, Diplomarbeit an der Universität Freiburg, April 1997
- /6/ Shah, Arvind et al.: Aluminium-Fassadenelemente mit direkt abgeschiedenen amorphen Silizium-Solarzellen, genehmigter Schlussbericht zum NEFF-Projekt Nr. 682, Januar 1997
- /7/ Götz, Michael: Solarzellen aus amorphem Silizium auf Aluminium: Drei Wege, den Substrateinfluss zu beschreiben, Dissertation an der EPFL Lausanne, 1997
- /8/ Steup, Heinz: Korrosionsprüfung (Xeno-Test) an Solarzellen der Fa. USSC (alte Variante) mit verschiedenen Beschichtungssystemen, interner Prüfbericht, Alusuisse-Lonza Services AG, Mai 1996

7 Projektdokumentation

Die Projektdokumentation ist eine Ergänzung zum vorliegenden Bericht und enthält zahlreiche vertrauliche Informationen, die nicht für eine Veröffentlichung vorgesehen sind. Die nachfolgenden Beilagen sind daher ausschliesslich den Berichtsexemplaren für das BFE und die Projektpartner beigelegt. Eine allfällige Weitergabe an Dritte bedarf der Genehmigung durch die Alusuisse Technology & Management AG. Nach dem Abschluss des Projekts stehen hierfür als Kontaktpersonen Hr. F. Hofmann und Hr. W. Ritter zur Verfügung.

- 1: ALUCOBOND®-Prospekt „Tausend Ideen – ein Material“
- 2: Bericht über den Freilufttest an ALUCOSOL-Pilotmodulen mit kristallinen BP-Solarzellen auf dem Testareal des Solarkraftwerks Mont Soleil
- 3: Skizzen zum Vierzellen-Modul
- 4: Berechnungen zur elektrischen Verlustleistung in den Leiterblechen nach dem SCMIC-Konzept
- 5: Patentanmeldung „Beschichtungssubstrat“ zur Abscheidung von a-Si auf Aluminium
- 6: REM-Aufnahmen von amorphem Silizium, abgeschieden auf Aluminium-Bleche RELITAL, Oberfläche 440, beschichtet mit SnO (ITO) und auf Al-Blech Werkstoff 185, Oberfläche 200, beschichtet mit ZnO
- 7: REM-Aufnahmen der Oberflächentopographie von vernickelten Al-Bandoberflächen
- 8: REM-Aufnahmen von SnO (ITO), abgeschieden auf Al-Blech RELITAL, Oberfl. 440, sowie ein dazugehöriges EDS-Spektrum
- 9: Prüfbericht zur Charakterisierung einer abgeschiedenen TCO-Schicht mittels SNMS
- 10: REM-Aufnahmen von a-Si:H-Zellen, abgeschieden auf Aluminium, z.T. mit lokalen Abplatzungen, sowie dazugehörige EDS-Spektren
- 11: REM-Aufnahmen von Laserbohrungen durch zwei miteinander verklebte Aluminiumbleche mit Anodierschicht
- 12: Schriftverkehr zur Isolierung der Innenseite von Laserbohrungen mit SiO_x
- 13: Technischer Bericht zur Plasmabeschichtung von a-Si:H-Zellen mit Silizium-Nitrid
- 14: Prüfbericht zur Ermittlung der Abriebfestigkeit diverser Oberflächenbeschichtungen
- 15: Prüfbericht zum Korrosionsverhalten diverser Beschichtungssysteme auf Solarzellen
- 16: Prüfbericht zur Korrosions- und UV-Beständigkeit von versiegelten und ungeschützten Solarzellen
- 17: Versuchsbericht zum Aufbringen metallischer Frontkontaktgitter auf transparente ZnO -Kontaktschichten (inkl. REM-Aufnahmen)