

Potenziale der CuInS_2 -Solarzelle

Prof. M. Ch. Lux-Steiner
HMI

lux-steiner@hmi.de

Dr. Nikolaus Meyer
Dipl.-Phys. Kai Siemer
HMI

meyer@hmi.de

1. Einleitung

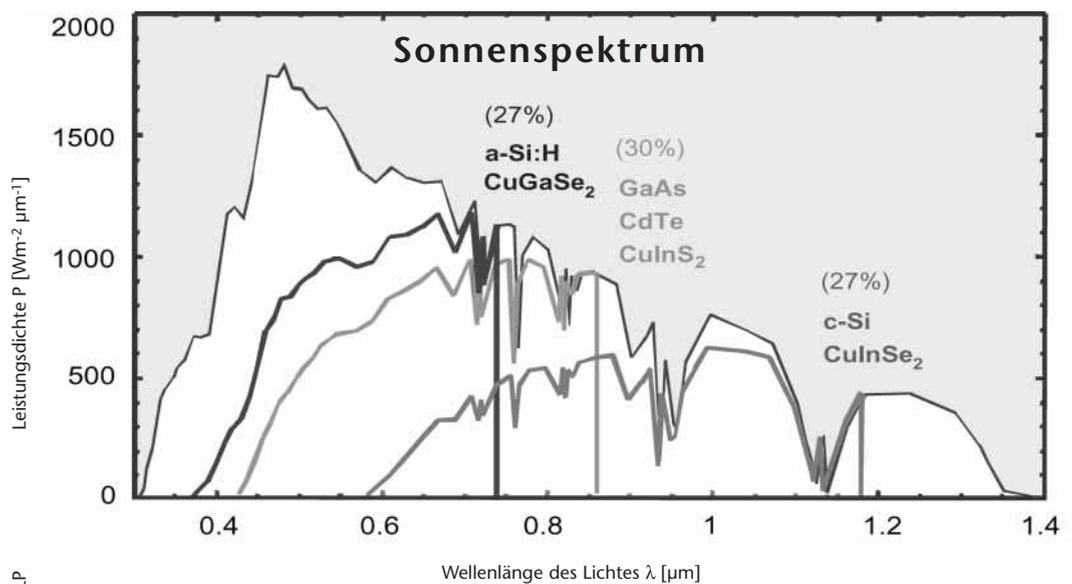
Der Markt für Photovoltaik (PV) ist seit 20 Jahren durch ein starkes Wachstum gekennzeichnet. Für die kommenden 10 Jahre prognostiziert die Investmentbank Sarasin [1] die Fortsetzung des Wachstumskurses und eine durchschnittliche Jahreszunahme von 17%, so daß sich der Weltmarkt bis zum Jahr 2010 auf 1000 MWp verfünffacht. Neueste Studien gehen sogar von einem globalen Marktvolumen von 1700 MWp im Jahr 2010 aus [2]. Das starke Wachstum charakterisiert den Photovoltaikmarkt als einen der Zukunftsmärkte, mit einer Entwicklung vergleichbar zu derjenigen im Telekommunikationsbereich. Neu anlaufende, staatliche Förderprogramme setzen gegenwärtig zusätzliche Wachstumsimpulse und führen teilweise sogar zu Unterversorgungseffekten auf dem Modulmarkt.

Im Jahr 1999 bestanden 87% der verkauften Solarmodule aus poly- oder monokristallinem Silicium (c-Si) auf der Basis von Siliciumscheiben (d.h. Si-Wafern). Dünnschichtmodule,

überwiegend aus amorphem Silicium (a-Si:H), bedienen den Rest des Marktes. Beim kommenden Produktionsanstieg wird erwartet, daß der prozentuale Marktanteil der kristallinen Siliciummodule sinkt. Zum einen kämpfen die Hersteller mit Lieferengpässen beim benötigten Reinstsilicium, wodurch Kapazitätserweiterungen an Grenzen stoßen, und zum anderen lassen sich die Kosten der Silicium-Wafertechnologie wegen der hohen Materialkosten auch durch Massenfertigung nicht erheblich senken. So schätzt Sarasin [1] den Marktanteil der Module aus amorphem Silicium im Jahr 2010 schon auf 30%. Da diese Module unter Standardbetriebsbedingungen einen relativ niedrigen Wirkungsgrad besitzen und eine aufwendige Fertigungstechnologie erfordern, ist fraglich, ob sie innerhalb der Dünnschichttechnologie den Markt langfristig dominieren werden.

Erste Firmen arbeiten inzwischen am Aufbau von Produktionslinien neuartiger, effizienterer Dünnschichtmodule aus Kadmium-Tellurid, auch CdTe bezeichnet (z.B. BP Solar, Antec Solar), oder aus Kupfer-Indium-Gallium-

Abbildung 1
Spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen und PV-Modulen auf der Basis unterschiedlicher Absorbermaterialien: kristallines Silicium (c-Si), amorphes Silicium (a-Si), Kadmium-Tellurid (CdTe), Gallium-Arsenid (GaAs) und verschiedene Kupfer-Indium-Gallium-Schwefel-Selen-Verbindungen (CuInSe_2 , CuInS_2 und CuGaSe_2).



Schwefel-Selen-Verbindungen, je nach der elementaren Zusammensetzung innerhalb des Systems $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ kurz als CIS, CGS, CIGS oder CIGSS benannt (z.B. Würth Solar, Siemens Solar), wobei S für Schwefel oder Selen stehen kann. Sarasin [1] schätzt für das Jahr 2010 den Marktanteil dieser Technologien vorsichtig auf 5 bis 10%, wobei die Ökotoxizität der beteiligten Materialien als wachstumsbegrenzender Faktor angesehen wird. Bei den CuInS_2 -Modulen fällt dieses Argument trotz niedrigster Produktionskosten weg. Das Potenzial dieser neuen Zellen- und Modultechnologie wird hier erstmals umfassend aufgezeigt.

2. Material- und Bauelementeigenschaften

Für terrestrische Anwendungen im Hochleistungsbereich (z.B. Gebäudeintegration) haben in der Großproduktion Solarmodule auf Basis von hochabsorbierenden Halbleitermaterialien wie α -Si: H, CdTe, CIS, CIGS oder CIGSS gegenüber den langjährig etablierten, mono- und multikristallinen c-Si-Modulen Vorteile beim Material- und Energieeinsatz, ohne daß es theoretisch begründete Wirkungsgradeinbußen gibt. Für den wirtschaftlichen Erfolg wird die möglichst gute Annäherung an die theoretischen Wirkungsgradgrenzen in der Produktion entscheidend sein.

Aufgrund ihrer spektralen Empfindlichkeit (nur Licht mit einer Energie oberhalb der materialspezifischen Energielücke wird absorbiert) könnten alle oben erwähnten Materialien bei genügender Materialdicke und Materialqualität theoretisch [3] zirka 27 bis 30% der einfallenden Sonnenenergie nutzen (Abb. 1). Je größer die Energielücke des Halbleiters ist, desto größer kann die Photospannung auf Kosten eines kleineren Photostroms sein. Der Wirkungsgrad verhält sich aber proportional zum Produkt der beiden photoelektrischen Größen.

Obwohl die CuInS_2 -Solarzellen mit einer Energielücke über 1,5 eV beim gegenwärtigen Entwicklungsstand den Wirkungsgraden von $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ mit Energielücken unter 1,3 eV unter Standard-Bedingungen (100 mW/cm^2 AM1.5 Beleuchtung bei 25°C) etwa 2% ab-

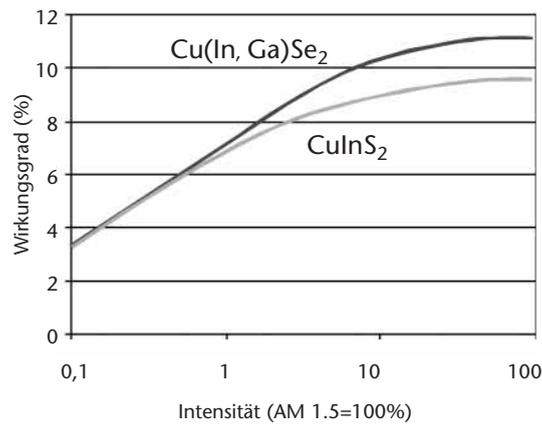


Abbildung 2
Beleuchtungsabhängiges Verhalten des Wirkungsgrads von CuInS_2 -Solarzellen im Vergleich zu $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Solarzellen bei schwachen Intensitäten.

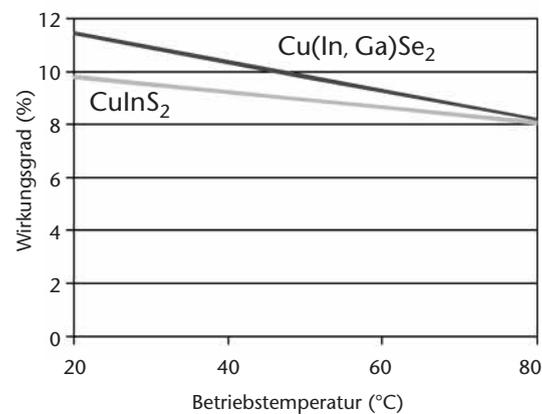
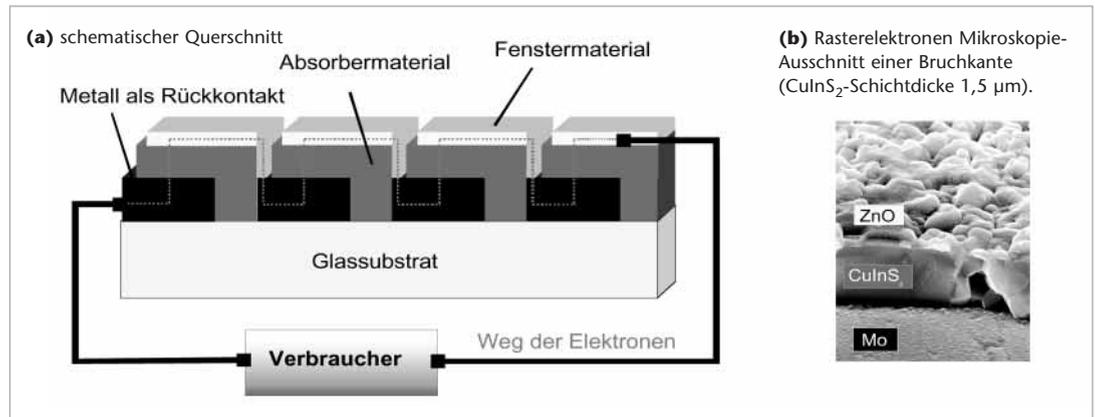


Abbildung 3
Temperaturverhalten des Wirkungsgrads von CuInS_2 -Solarzellen im Vergleich zu $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Solarzellen (Typische Betriebstemperatur unter Sonneneinstrahlung sind 45 bis 55°C).

solot unterlegen sind, gilt, daß die nutzbare Spannung von üblicherweise 750 mV einer CuInS_2 -Solarzelle über dem typischen Wert von 550 mV einer $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Solarzelle liegt. Dies bedeutet, daß bei gleicher Zellen- bzw. Modulstruktur die CuInS_2 -Bauelemente höhere Ausgangsspannungen liefern und geringeren Stromdichten unterworfen sind. Konsequenterweise werden bei optimaler Entwicklung von CuInS_2 -Bauelementen weniger thermische Verluste (Joule Wärme) erwartet. Zellen aus Materialien mit unterschiedlicher Energielücke besitzen auch ein unterschiedliches Intensitäts- und Temperaturverhalten. Abb. 2 und Abb. 3 zeigen den Vergleich einer CuInS_2 - und einer $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Zelle mit Wirkungsgraden von 9,5% bzw. 11% unter Standardbeleuchtungsbedingungen für verschiedene Beleuchtungsintensitäten und Arbeitstemperaturen. Es wird ersichtlich, daß sich ein besserer Wirkungsgrad unter Standardbedingungen von $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Zellen und -Modulen, der üblicherweise zur Produktspezifikation herangezogen wird, unter den meisten realen Betriebsbedingungen

Abbildung 4
 CuInS_2 -Dünnschicht-
 Module, die durch
 integrierte Verschalt-
 ung einzelner Zellen
 auf kostengünstigen
 Substraten wie Glas
 hergestellt werden.



(Schwachlichtverhalten oder hohe Arbeitstemperaturen) relativiert. Betrachtet man eine mittlere jährliche Sonneneinstrahlung in unserer Region und berücksichtigt die wichtigsten physikalischen Effekte basierend auf dem Unterschied der Energielücke, so liefert ein 9.5% CuInS_2 -Modul in der Tat den gleichen Energieeintrag wie ein 11% CuInSe_2 -Modul gleicher Fläche.

Konventionelles kristallines Silicium muß ohne ein besonderes zusätzliches Lichteinkonzept mehr als ein Zehntel Millimeter dick sein, um in seinem spektral empfindlichen Bereich die Solarstrahlung möglichst maximal zu absorbieren. Alle anderen wettbewerbsfähigen Materialien (Abb. 1) sind hochabsorbierend und brauchen dazu aufgrund ihres stärkeren optischen Absorptionsvermögens nur etwa ein Tausendstel Millimeter dick zu sein. Dies bedeutet eine Materialreduktion um zwei Größenordnungen, deutlich geringere Reinheitsanforderungen und niedrigere Prozeßtemperaturen bei der Fertigung. Daraus ergibt sich vor allem die Möglichkeit der kostengünstigeren, integrierten seriellen Verschaltung von Zellen zu Modulen auf preiswerten Glassubstraten.

Abb. 4 zeigt die schematische Darstellung eines solchen hochabsorbierenden CuInS_2 -Moduls im Querschnitt. Die Verschaltung erfolgt durch mechanisches oder optisches Strukturieren einzelner Schichtpakete innerhalb der Depositionsfolge Rückkontakt/Absorbermaterial/Fenstermaterial. Ein Modul, wie in Abb. 4 skizziert, liefert dann summarisch über die einzelnen Zellenspannungen einige Volt Gleichspannung am Modulausgang.

3. Innovationsgehalt

CuInS_2 -Solarmodule zeichnen sich gegenüber den konkurrierenden Produkten aus kristallinem Silicium und Cu(In,Ga)Se_2 durch geringere Herstellungskosten, höhere und stabilere Spannungsabgaben und die Verwendung nicht-toxischer Stoffe aus. Nachteilig sind die erreichten geringeren Wirkungsgrade unter Standardbedingungen.

Während die Herstellung und Verarbeitung des Siliciums einen aufwendigen Produktionsprozeß verlangt, der über 20 Einzelschritte umfaßt, können zur Herstellung von CuInS_2 -Solarmodulen einfache Verfahren der Glasbeschichtung eingesetzt werden und die Anzahl der Prozeßschritte um etwa ein Drittel reduziert werden. Zusätzlich führen kurze Prozeßzeiten von wenigen Minuten, Prozeßtemperaturen unterhalb 600°C als auch die Materialersparnis hinsichtlich Einsatzmenge bzw. Materialverschleiß zur Kostenreduktion. Aber auch beim Vergleich zur Produktion von Cu(In,Ga)Se_2 -Modulen werden deutliche Kostenvorteile für das CuInS_2 -Bauelement deutlich. Gründe dafür sind: (1) Der Einsatz von Schwefel statt Selen führt zu niedrigeren Rohstoffkosten, kürzeren Prozeßzeiten und weniger Prozeßschritten (kein Na-Effekt, kein Ga), (2) die Cu-reiche Präparation bringt höhere Prozeßausbeuten und (3) die hohe Photospannung verlangt weniger Serienschaltungen und reduziert die elektrischen Verschaltungsverluste, wie auch die Schichtdicken der Mo- und ZnO-Elektroden. Die flächenbezogenen Herstellungskosten von CuInS_2 -Modulen sind dadurch etwa 20% niedriger als bei Cu(In,Ga)Se_2 -Modulen.

Im Vergleich zu anderen Dünnschichttechnologien wird in der Herstellung von CuInS_2 -Modulen der Einsatz toxischer Stoffe weitestgehend vermieden. Im Gegensatz zu CdTe -Modulen enthält der CuInS_2 -Absorber das Schwermetall Kadmium nicht. Seit einigen Jahren arbeitet das Hahn-Meitner-Institut in Kooperation mit externen Entwicklungsabteilungen in Forschung und Industrie an der Entwicklung einer vollständig Cd-freien $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Technologie. Es steht nun fest, daß in der Fabrikation von $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Modulen auf die etablierten Cd-Prozesse ohne Wirkungsgradeinbuße verzichtet werden kann. Anders als in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Modulen wird in CuInS_2 -Bauelementen auch Selen nicht verwendet, das in elementarer Form als gesundheitsgefährdende Substanz bei der Modulproduktion zu hohen Sicherheitsaufwendungen führt. Ferner wird bei der CuInS_2 -Herstellung auf den Einsatz giftiger Gase (H_2S , H_2Se) verzichtet.

Trotz Wirkungsgradrückstand im Vergleich zu den hocheffizienten Solarzellentypen wie c-Si oder $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ bringt CuInS_2 mit der größeren Bandlücke folgende drei Vorteile mit sich: (i) stabilere Energieabgabe durch kleineren Temperaturkoeffizienten (Abb. 3) bei Modulerwärmung, die zwangsläufig bei Sonneneinstrahlung gegenüber der Umgebungstemperatur auftritt, (ii) niedrigere Energieverluste bei der Verschaltung einzelner Solarzellen zum Modul und der Verbindung der Module mit dem Verbraucher aufgrund geringerer Stromdichten für die Leistungsübertragung und (iii) geringere Wirkungsgradverluste gegenüber den spezifizierten Standardwerten bei Anwendungen im Außenbereich in den Vor- und Nachmittagsstunden sowie bei Bewölkung, da das Licht unter diesen Beleuchtungsverhältnissen eine günstigere Spektralverteilung für CuInS_2 besitzt.

Da die gleichmäßig schwarzen Oberflächen der $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Module Ähnlichkeit mit Natursteinelementen besitzen und unauffällig in Fassaden und Dächer zu integrieren sind, eignen sich diese Module besonders für die ästhetischen Aspekte der Architektur. Während c-Si-Module aus der Wafertechnologie über den Einsatz einzelner, kleinteiliger Siliciumscheiben definiert werden, ermöglicht der

weitgehend formvariable Modulaufbau bei den Dünnschichtkonzepten, d.h. auch bei den CuInS_2 -Modulen, ein hohes Maß an künstlerischen Gestaltungsmöglichkeiten bei aller Art von terrestrischen Anwendungen. Außerdem weisen sich die $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ und CuInS_2 -Bauelemente durch eine extrem hohe Strahlungsresistenz aus. Sie ist um zwei Größenordnungen besser als bei kristallinem Silicium, eine wichtige Eigenschaft für Weltraumanwendungen.

4. Marktpotenzial

CuInS_2 -Solarzellen liefern einen Energieertrag, der auf dem gleichen Niveau liegt wie der anderer Dünnschichtsolarzellen (z. B. a-Si, $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$). Sie heben sich jedoch durch ihre geringen Herstellungskosten und ihre herausragende Umweltbilanz von konkurrierenden Solarzellentypen ab.

Zur Bestimmung des Marktpotenzials von CuInS_2 -Solarzellen wurde eine Kostenrechnung durchgeführt, mit der eine mögliche Großproduktion von Solarmodulen nach dem in Abb. 4 gezeigten Modulaufbau bewertet wurde. Um die Herstellungskosten mit denen anderer Modultypen zu vergleichen (Abb. 5), wurden diese auf die Leistung bezogen, welche die Module bei optimaler Sonneneinstrahlung abgeben (Maßeinheit: DM/Wp mit Wp = Watt peak) [4]. Im Vergleich zu den marktbeherrschenden Solarmodulen aus mono- oder polykristallinem Silicium (mono-Si, poly-Si) liegen die Kosten von CuInS_2 -Modulen über 50% niedriger. Dieser Kostenvorteil ist auf eine Produktionsmenge von 10 MWp bezogen und

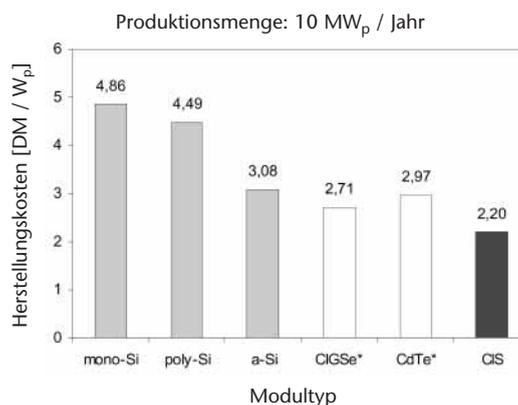


Abbildung 5
Herstellungskosten von CuInS_2 -Modulen (CIS) und konkurrierenden Typen (Produktionsmenge: 10 MWp/a) basierend auf Studien und Prognosen [4].

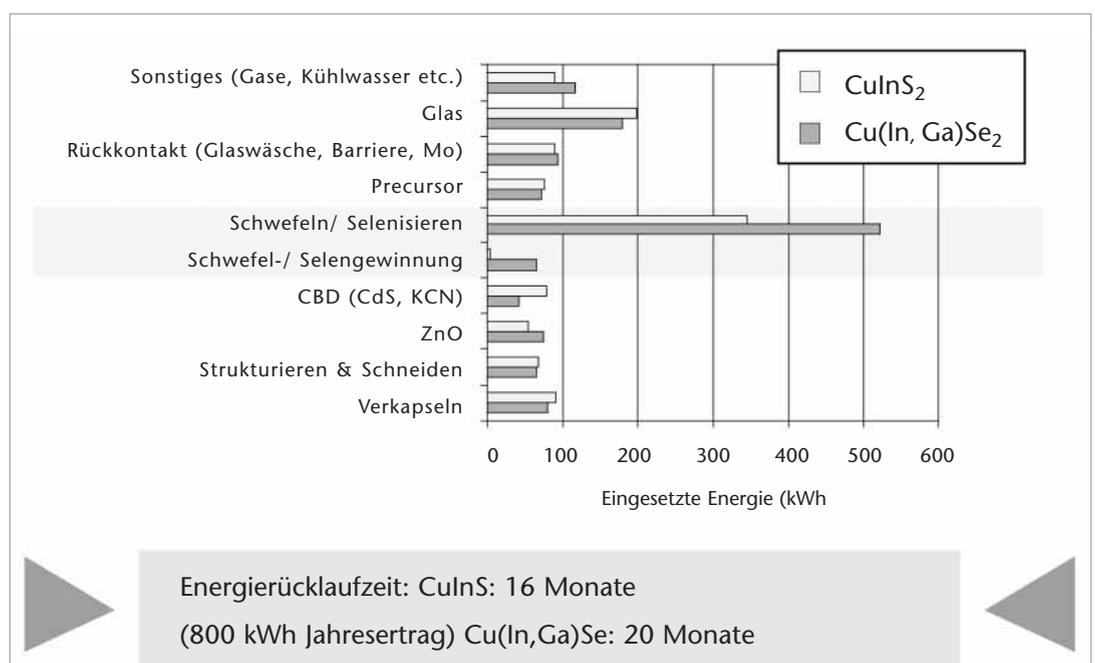
steigt bei größeren Mengen weiter an. Ursache sind die eingesetzten Beschichtungstechniken und der reduzierte Bedarf an Halbleitermaterial, der mit dem Aufbau des CuInS₂-Moduls als Dünnschichtmodul einhergeht. CuInS₂-Module besitzen auch gegenüber anderen Dünnschichttechnologien Kostenvorteile. Bereits bei einer Produktionsmenge von 1 MWp liegen die Herstellungskosten fast 20% niedriger als beim verwandten Material Cu(In,Ga)Se₂. Im Vergleich zu Solarmodulen aus amorphem Silicium (a-Si) und Kadmiumtellurid (CdTe) liegen die Kosten sogar fast 30% niedriger. Damit besitzen CuInS₂-Module das Potenzial, photovoltaische Energie zu konkurrenzlos günstigen Preisen erzeugen zu können.

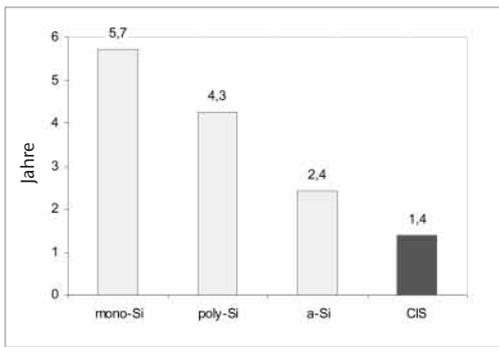
In der Ökobilanz von CuInS₂-Modulen, die vom Institut für Technischen Umweltschutz der TU Berlin angefertigt wurde, zeigt sich die Stärke der CuInS₂-Technologie in der Energiebilanz (Abb. 6, 7) und der Ökotoxizität. Die Energierücklaufzeit [5] – d.h. die Zeit, die ein Solarmodul genutzt werden muß, bis die zu seiner Herstellung eingesetzte Energie der photovoltaisch erzeugten entspricht – liegt danach unter zwei Jahren und beträgt nur rund ein Drittel der Zeit von Solarmodulen aus kristallinem Silicium (mono-Si, poly-Si). Im Vergleich zu Dünnschichtmodulen aus amorphem Silicium ist die Energierücklaufzeit über 40% gün-

stiger. Außerdem wird anders als bei anderen Technologien bei CuInS₂-Modulen der Einbau toxischer Substanzen wie Blei, Kadmium oder Selen weitgehend vermieden. In der Ökobilanz ergibt sich daher eine Toxizität, die niedriger liegt als bei Modulen aus kristallinem Silicium und bei Dünnschichtmodulen aus Cu(In,Ga)Se₂ und CdTe. CuInS₂-Solarmodule können damit nicht nur der emissionsarmen Energieerzeugung dienen, sondern schonen auch bei der Herstellung und Entsorgung die Umwelt. Die ökologische Unbedenklichkeit, deren Fehlen als Wachstumshindernis für andere Dünnschichttechnologien gesehen wird [1], ist bei CuInS₂-Modulen damit gegeben.

In den meisten Anwendungsfeldern der Photovoltaik ist der Modulpreis eine der wesentlichen nachfragebestimmenden Größen. Für die kostengünstigen CuInS₂-Module ist daher mit sehr guten Absatzchancen zu rechnen. Weitere Abnahmekriterien ergeben sich aus der genaueren Betrachtung der Marktsegmente [1]. 29% der 1999 verkauften Module waren für Dach- und Fassadensysteme in Industrieländern bestimmt. In der Architektur spielt neben den Kosten einer Solaranlage ihr Aussehen eine entscheidende Rolle. Mit ihrer homogenen, anthrazitfarbenen Oberfläche lassen sich CuInS₂-Module unauffällig in Bauwerke integrieren. Aber auch eine Einfärbung von

Abbildung 6
Energierücklaufzeiten von CuInS₂- und Cu(In,Ga)Se₂-Anlagen bezogen auf eine 1kW PV-Anlage aus CuInS₂-Modulen (η=9,5%) bzw. Cu(In,Ga)Se₂-Modulen mit (η= 11%).





CuInS_2 -Modulen ist technisch machbar. Weitere 18% des Marktes machen photovoltaische Kleinanwendungen (Taschenrechner, Sensoren, Campingartikel, Spielzeug etc.) aus. Bei diesen Anwendungen werden hohe Betriebsspannungen auf kleinen Flächen und bei schwankenden Beleuchtungsverhältnissen gefordert. Diese Qualitätsmerkmale besitzt CuInS_2 auf Grund seiner materialspezifischen Halbleitereigenschaften (hohe Photospannung und das günstige Schwachlichtverhalten), wodurch mit guten Absatzchancen zu rechnen ist. Der Bereich der Stromversorgungsanlagen in der Dritten Welt besitzt wegen der in vielen Regionen fehlenden Stromversorgungsnetze ein besonders hohes Wachstumspotential. CuInS_2 -Module zeichnen sich sowohl durch ihren niedrigen Preis für diesen Marktbereich aus als auch durch ihre Eigenschaft, bei hoher Betriebstemperatur, wie sie in den südlichen Ländern auftritt, einen außergewöhnlich guten Energieertrag zu liefern.

5. Entwicklungsstand in Deutschland

Das Hahn-Meitner Institut hat erste Kleinmodule (integrierte Serienschaltung von fünf Solarzellen auf $5 \times 5 \text{ cm}^2$) auf der Basis von CuInS_2 -Dünnschichtzellen mit Wirkungsgraden über 9% entwickelt. Für die einzelnen Prozessschritte der Zellenfertigung hat es Standardverfahren entwickelt, die bereits über einen langen Zeitraum mit hoher Reproduzierbarkeit Solarzellen mit Wirkungsgraden zwischen 10 und 12% lieferten. Einzelne Solarzellen erzielten mit Wirkungsgraden um 13% Weltbestmarken für diese Materialklasse.

In Vorbereitung zur industriellen Umsetzung gründet sich in 2001 die Firma Berlin Solar (Arbeitstitel) aus. Sie wird mit der Hochskalierung der Technologie auf größere Flächen beginnen mit dem Ziel, innerhalb der nächsten 4 bis 5 Jahre die ersten großflächigen CuInS_2 -Module auf den Markt zu bringen, um in 2010 die Serienproduktion zu etablieren.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Der Photovoltaikmarkt steht mit der stetig ansteigenden Nachfrage an einem Wendepunkt: Die Dünnschichttechnologien, die in der Wissenschaft seit langem große Beachtung finden, treten in den kommerziellen Wettbewerb zur Silicium-Wafertechnologie ein. Ihr Wachstumspotential ist gewaltig.

Für eine innovative Modulproduktion auf der Basis von CuInS_2 mit seinen hier vorgestellten Potenzialen bestehen dabei exzellente Marktchancen. Die CuInS_2 -Technologie hat im Labor ihre Vorzüge bereits bewiesen: ein hoher Energieertrag bei niedrigen Kosten sowie eine hervorragende Ökobilanz. Damit verspricht sie eine wettbewerbsfähige, wirtschaftliche und nachhaltige Produktionstechnologie zu werden. Die Phase der Pilotierung als Vorstufe zur Serienproduktion steht bevor.

Abbildung 7
Energierücklaufzeit bei der CuInS_2 -Technologie im Vergleich zu den Siliciumtechnologien [5].

Danksagung

Allen Mitarbeitern des Hahn-Meitner-Instituts sowie den externen Kooperationspartnern, die sich tatkräftig der erfolgreichen Entwicklung der CuInS_2 -Technologie gewidmet haben, den Mitarbeitern der Technischen Universität Berlin, Herrn Kunst und Frau Naujoks, welche die Ökobilanz erarbeitet haben, und Herrn Laueremann von der Arbeitsgemeinschaft Solare Materialien, der zur Bereitstellung der statistischen Daten beigetragen hat, möchten wir unseren Dank aussprechen. Unser Dank gilt ebenfalls den Ministerien BMBF und BMWi, dem Senat für Wissenschaft, Forschung und Kultur Berlin, sowie der Europäischen Kommission, welche die Finanzierung der durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf diesem Gebiet übernommen haben.

Literatur

- [1] Sarasin Studie, Photovoltaik am Ende des 20. Jahrhunderts: Markt, Akteure und Chancen einer nachhaltigen Industrie; Basel 1999
- [2] P.D. Maycock, Renewable Energy World, Review Issue 2000-2001, Vol. 3 (4), 2000
- [3] C.H. Henry, J. Appl. Phys. 51,(1980), 4494
- [4] Quelle: Mittelwert aus Kostenangaben folgender Studien: Arthur D. Little (16th EPSEC, Glasgow, 2000), Europäische Union (APAS RENA CT94 0008, 1997), Land Nordrhein-Westfalen (EOS, Neue Energie GmbH, Herzogenrath, 1997); für CdTe und CIGSe außerdem: Netherlands Energy Research Foundation (ECN-C-95-107, Petten, 1995), Electric Power Research Institut (EPRI, Proj. 3166-1, 3273-3, Pleasant Hill (CA), 1992)
- [5] Quelle: Si: Alsema, Universität Utrecht (2nd WCPSEC, Wien, 1998); CIS: I. Naujoks, Inst. f. techn. Umweltschutz der TU Berlin (unveröffentlicht)