

POWER MEMS

KLEINE SOLARKRAFTWERKE AUS DEM ALL

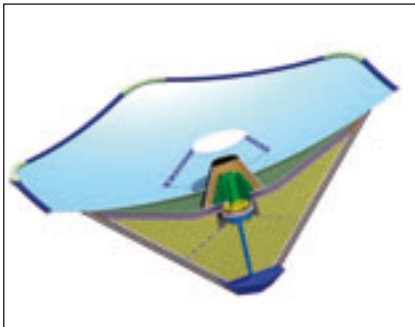


Foto: Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)

Bild 1: Seitenansicht des Mikro-Turbinen-Generator Moduls (MTG-Modul) mit Cassegrain Kollektor, Wärmekraftmaschine sowie Kondensator/Radiator Vorrichtung

Die Mikrotechnik ist immer stärker auf dem Vormarsch. Auch die Raumfahrt profitiert von den Entwicklungen in diesem noch recht jungen Industriezweig. Nach einer Konzeptstudie des Instituts für Raumfahrtsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt könnten in Zukunft solarbetriebene Mikrokraftwerke die Energie für Satelliten erzeugen.

Power-MEMS

Während komplexe Applikationen aus der Nanotechnologie weitgehend noch Zukunftsmusik sind, werden im Bereich der Mikrotechnik schon marktreife Produkte entwickelt. Besonders die sogenannten Power-MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) versprechen eine große Anzahl von Nutzungsmöglichkeiten.

ten. Hauptaufgabe dieser mikrotechnischen Energiewandler ist die Umwandlung von mechanischer Arbeit in elektrische Energie.

Die Forschung auf dem Gebiet der Power-MEMS begann Mitte der 90er Jahre und entwickelte sich im Schatten der Minibrennstoffzellenforschung. Ziel beider Forschungsgebiete ist es, eine Alternative zu herkömmlichen Batterien zu bieten. Während die Brennstoffzellentechnologie in ihrem Entwicklungszustand schon recht weit fortgeschritten ist, steht die Entwicklung der Power-MEMS noch relativ am Anfang. Untersucht werden vor allem turbinengetriebene Applikationen. Ein Hauptaugenmerk dieser Mikroturbinentechnik liegt dabei auf Verbrennungsturbinen, die mit dem offenen Jouleprozess arbeiten, das heißt die Verbrennung eines Treibstoffes mit Sauerstoff. Ziel dieser Minimotoren ist es, eine billige und effiziente Alternative zu Batterien in Mobiltelefonen, Laptops und Digitalkameras zu bieten. Diese Turbinen sind meist nur einige Millimeter groß und wiegen nur wenige Gramm. Die Leistung dieser kleinen Kraftwerke beträgt zwischen 10 und 40 Watt.

Professor Allan Epstein, Leiter des Institutes für Aeronautics & Astronautics am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), entwickelt mit seiner Forschungsgruppe bereits kleine mikroturbinenbetriebene Akkus für Laptops und andere Applikationen (Bild 2).

Mikroturbinencluster

Laut Epstein können die Power-MEMS aber auch in sogenannten Stacks oder Clustern betrieben werden, bei denen 100 bis 1000 Mikroturbinen-Generatoren zusammengeschaltet werden. Studien deuten darauf hin, dass mit solch einem Mikroturbinencluster Leistungsdichten von bis zu 20 kW/kg erreicht werden können (vgl. Epstein, Senturia: „Macro Power from Micro Machinery“, 1997, Science).

Eine Konzeptstudie für regenerative Power-MEMS wird zurzeit am Institut für Raumfahrtsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Die Studie untersucht, ob ein Mikro-Turbinen-Generator-Modul (MTG-Modul) über die Konzentrierung der Solarstrahlung mit einem Cassegrain Kollektorsystem betrieben werden kann. Die einzelnen Systemelemente wie Receiver/Dampferzeuger, Turbine, Generator, Kondensator/Radiator und Pumpe sollen mikrotechnisch hergestellt und zusammen mit dem Kollektorsystem innerhalb eines Moduls untergebracht werden (siehe Bild 1). Eine Vielzahl solcher Module sollen später als Energiewandler in Satelliten eingesetzt werden.

Energieversorgung für Satelliten

Neue und innovative Denkansätze sind für die Energieversorgung von Satelliten besonders wichtig. Seit 1996 ist zu beobachten, dass sich der Energiebedarf eines Satelliten mehr als verfünffacht hat. Der gestiegene Strombedarf wird für immer umfangreichere Satellitenanwendungen benötigt wie zum Beispiel Telekommunikation, Navigation oder Erdbeobachtung. Solarzellen produzieren dabei aus der Sonnenenergie den benötigten Strom für den Satelliten. Oft werden große Flächen von Solarzellen benötigt, um die geforderte Leistung zu erbringen. Die Solarzellen versorgen nicht nur den Satelliten selbst mit elektrischer Energie, sondern speisen auch die Batterien an Bord. Diese Batterien versorgen dann den Satelliten während der Dunkelperiode der Erde bewegt. Das Energiesystem eines solchen Satelliten (auch Power Subsystem genannt) kann bis zu 40% der Masse des



Foto: Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)

Bild 2: Power-MEMS von der MIT Forschungsgruppe um Professor Alan Epstein (links). Schnittansicht des H₂ Gasturbinen Chips (rechts oben). Siliziumwafer mit radialen Gaseinlassstufen für die Mikroturbine (rechts unten).

Gesamtsatelliten ausmachen, ein nicht zu unterschätzender Kostenfaktor.

Das MTG Konzept

Die Power-MEMS Konzeptstudie des DLR beschäftigt sich daher mit einem regenerativen Mikro-Rankine-Wandler, der durch die Konzentration der Solarstrahlung betrieben wird. Der zugrundeliegende Arbeitsprozess ist der Clausius-Rankineprozess, auch Dampfkraftprozess genannt. Hierbei wird ein flüssiges Medium isobar erhitzt bis es schließlich verdampft. Der heiße Dampf treibt eine Turbine an, die wiederum an einen Generator angeschlossen ist, der den benötigten Strom erzeugt.

Die Benutzung eines solarbetriebenen Rankine-Wandlers zur Stromerzeugung ist in der Raumfahrt nicht neu. Es wurden bereits einige theoretische Abhandlungen über dieses Thema geschrieben. Auch wurden schon einige Prototypen gebaut und getestet. Zu einem Einsatz im Orbit kam es allerdings bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht. Bei den bisherigen Konzepten wurde stets eine zentrale Konstruktion vorgenommen, d.h. das Sonnenlicht wird über einen zentralen Reflektorspiegel oder über eine ähnliche Kollektorvorrichtung auf einen großen Receiver (Dampferzeuger) konzentriert. Eine zentrale Turbineneinheit mit angeschlossenem Generator wandelt dann die thermische Energie in elektrische Energie um. Die Leistungsklasse dieser Energiewandlerkonzepte bewegt sich dabei zwischen 1 kW bis zu 1 MW.

Bei den MTG-Modulen wird der dezentrale Ansatz verfolgt. Ein Modul ist für eine elektrische Leistung von ca. 10 Watt konzipiert. Diese 10 Watt Module können, ähnlich wie Solarzellen, in

ein Solarpanel integriert werden, um für den Satelliten den benötigten Strom zu produzieren.

Als Arbeitsmedium wurden verschiedene Fluide untersucht. Für einen Hochtemperaturkreisprozess (200–450°C) wurde Wasser als Arbeitsmedium gewählt. Für einen Niedertemperaturprozess (20–180°C) wurde das organische Arbeitsmedium Toluene (C₇H₈) betrachtet.

Aufbau eines Moduls

Das MTG-Modul ist mit einem Cassegrain-Kollektorsystem ausgestattet, das mit doppelter Reflexion arbeitet. Ein paraboloider Primärspiegel reflektiert zunächst die einfallende Solarstrahlung auf einen hyperboloiden Sekundärspiegel, der dann die bereits verdichtete Strahlung auf einen Receiver konzentriert (Bild 3).

Ein Vorteil dieses Kollektorsystems ist die kompakte Bauweise, denn Kondensator/Radiator können hinter dem Primärspiegel angebracht werden und sind trotzdem direkt an die gesamte Wärmekraftmaschine angeschlossen. Zusätzlich befindet sich der Radiator während des Betriebs stets auf der sonnenabgewandten Seite des Moduls. Dadurch lässt sich eine störende Bestrahlung des Radiators durch die Sonne vermeiden. Dies ist besonders wichtig, da im Weltraum die erforderliche Luft zur Wärmeabfuhr (Konvektion) fehlt. Die gesamte Abwärme des MTG-Moduls muss mittels Wärmestrahlung über einen Radiator abfließen.

Receivertemperaturen von mehreren hundert Grad

Bei einer Solarkonstante im Orbit von $S = 1350 \text{ W/m}^2$ entstehen durch die Konzentration des Kollektorsystems Receiver-

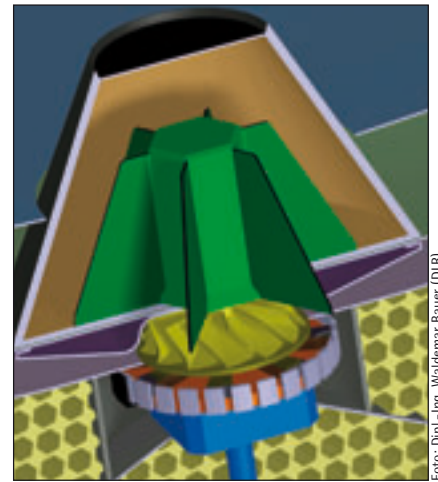


Foto: Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)

Bild 4: Detailzeichnung des Receivers mit Latentwärmespeicher, Mikroradialturbine sowie Generator und Mikrospeisepumpe

temperaturen von mehreren hundert Grad. Die so eingebrachte Energie wird zunächst in einem Mikrothermalpuffer zwischengespeichert. Dieser Latentwärmespeicher benutzt als Phasenwechselmaterial ein Gemisch aus Kalium- und Natriumnitrat, das sich bei Temperaturanstieg verflüssigt (Bild 4). Wenn der Satellit in den Erdschatten eintritt, speist der Thermalpuffer weiterhin den Verdampfer mit ausreichend Energie, so dass der Rankineprozess für einen gewissen Zeitraum weiterläuft.

Der Verdampfer sowie der dazugehörige Überhitzer bestehen hauptsächlich aus einem Mikrowärmetauscher, der über passive Heizplatten im Salzgemisch die thermale Energie des Puffers anzapft. Der Mikrowärmetauscher besitzt hunderte von kleinen Mikrokanälen, die je eine Kanalbreite von nur ca. 50–150 µm aufweisen. Durch diese kleinen Mikrokanäle ergibt sich eine sehr große Wärmedurchgangsfläche, die dem Verdampfen des Arbeitsfluides zu Gute kommt.

Nach einer kurzen Überhitzungsphase im Verdampfer strömt der heiße Dampf in die Turbinenkammer, um eine Mikroradialturbine anzutreiben. Ein Generator ist über eine Welle mit der Turbine verbunden und produziert einen elektrischen Output, der dem Satelliten zur Verfügung gestellt wird.

Nach der Turbine gelangt der Dampf in den Kondensator. Hier kondensiert er unter Abgabe von Wärme und kehrt in seine flüssige Form zurück. Bedingt durch das Vakuum des Weltraums kann der abzuführende Wärmestrom des Kondensators nur über Wärmestrahlung stattfinden. Ein speziell angeordneter Radiator auf der Rückseite des Moduls emittiert die Abwärme des Dampfprozesses über Strahlung. Um ein gegenseitiges Anstrahlen der einzelnen MTG-Module

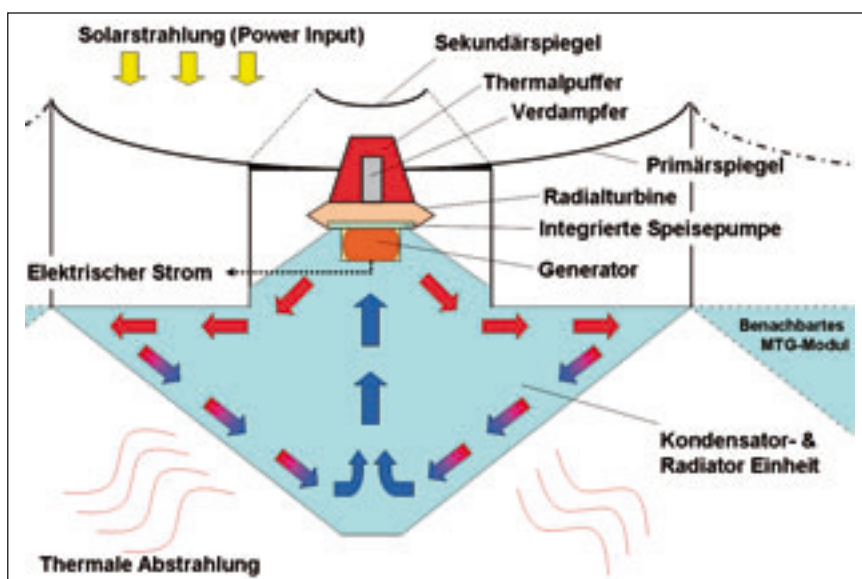


Foto: Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)

Bild 3: Schematische Darstellung des MTG-Moduls mit einzelnen Systemelementen

zu verhindern, stehen die jeweiligen Radiatorflächen immer im rechten Winkel zueinander. Die Rückseite des Panels hat daher eine spitzzackige Oberfläche.

Die Kondensation kann entweder über einen weiteren Mikrowärmetauscher erfolgen, wobei ein weiterer sekundärer Kühlkreislauf die abzuführende Wärme zur Modulrückseite transportiert, oder der Dampf kondensiert direkt an der Rückwand des MTG-Moduls. Hier wird das Kondensat von einer speziellen porösen Oberfläche aufgefangen. Da im Satellitenorbit keine Schwerkraft herrscht, wird die Flüssigkeit über die Kapillarwirkung in einem Zwischenspeicher gesammelt. Von hier gelangt das flüssige Arbeitsmedium mithilfe einer Mikrospeisepumpe wieder zum Verdampfer, um erneut die Sonnenenergie aufzunehmen. Der Rankine-Kreisprozess ist somit geschlossen, und das MTG-Modul erzeugt einen konstanten elektrischen Strom. Durch den dezentralen Konzeptansatz werden nun viele Module in ein Solarpanel integriert und betrieben (siehe Bild 5).

Vorteile

Ein Vorteil des MTG-Modul Ansatzes ist unter anderem die leichte Integration in bereits existierende Paneltechnologien der Raumfahrt.

Schaut man auf die bisherigen Konzepte für solardynamische Generatoren im Weltraum, so wurden diese bisher nur in einer Leistungsklasse (z.B. 1 KW oder 1 MW) konzipiert. Der Leistungsbedarf von Satelliten ist aber sehr unterschiedlich – von wenigen Watt bis zu mehreren Kilowatt. Der Modulansatz ist hier also besonders sinnvoll, da er ein quasi stufenloses Aufrüsten der Energieversorgung eines Satelliten ermöglicht (durch Hinzufügen bzw. Weglassen von Modulen).

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus dem Mikrowärmepuffer. Dieser agiert innerhalb des MTG-Moduls als eine Art Batterie. Er speichert thermische Energie und gibt diese während der Dunkelphase an den Verdampfer ab, so dass der Kreisprozess am Laufen gehalten wird. Dadurch lassen sich Batterien einsparen – der Satellit wird leichter. Ein solches MTG-Panel fungiert somit als ein komplett integriertes Energiepanel, welches sowohl Energieumwandlung als auch deren Speicherung übernimmt.

Ein zusätzlicher Vorteil ergibt sich bei einem Vergleich mit der jetzigen Solarzellentechnologie. Die Leistung von Solarzellen ist temperaturabhängig, d.h. je wärmer eine Solarzelle wird, desto niedriger ist die elektrische Leistung der Zelle. Dieser Effekt wird auch temperaturabhängige Verschiebung des MPP (Maximum Power Point) genannt. Dieser Verlust entfällt bei den MTG-Modulen, da gerade die thermische Energie für den Kreisprozess wichtig ist.

Zusätzlich schätzt die Konzeptstudie des DLR die Produktionskosten der Module als relativ niedrig ein. Neben den allgemeinen Kostendegressionseffekten der Serienfertigung ist die Herstellung des Kollektors kostengünstig. Bei den Reflektionsspiegeln des Cassegrain-Kollektors handelt es sich keinesfalls um teurer herstellbare optische Spiegel, sondern lediglich um sogenannte *Non-Imaging-Mirrors*, die relativ billig produziert werden können.

Hier die Vorteile der MTG-Module im Überblick:

- Leichte Integrierbarkeit in bestehende weltraumtaugliche Paneltechnologien;

- Hohe Redundanz des Gesamt-Panels aufgrund der dezentralen Modulbauweise. Quasi stufenloser Kapazitätsaufbau, je nach Energiebedarf des Satelliten;
- Mikro-Latentwärmespeicher verlängert Stromausbeute => Einsparung von Batteriemasse;
- Keine Verschiebung des MPP (Maximum Power Point) durch Temperaturanstieg wie bei der Solarzelle;
- Cassegrain Reflektorspiegel sind „Non-Imaging-Mirrors“, also zu relativ geringen Kosten produzierbar;
- Technologietransfer zu terrestrischen Anwendungen.

Nachteile

Die Konzeptstudie des DLR zeigt aber auch gewisse Nachteile auf. In der Raumfahrt herrscht ein Trend zur Vermeidung von beweglichen Teilen bzw. Mechanismen, da diese immer auch eine Quelle von Störungen sein können. Das MTG-Modul besitzt einige bewegliche Teile (z.B. Radialturbine).

Ein weiteres Problem stellt das komplizierte Verhalten von Phasenübergängen des Arbeitsmediums unter Mikrogravitation dar. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Schließlich übersteigt das momentane Gesamtgewicht des MTG-Moduls immer noch die Masse von vergleichbaren Solarpanelen (bei vergleichbarer Outputleistung). Auch hier muss noch weitere Optimierungsarbeit geleistet werden.

Die Nachteile der MTG-Module im Überblick:

- Bewegliche Teile sind potentielle Schwachstellen innerhalb des MTG-Moduls;
- Schwierigkeiten bei der Berechnung von Zweiphasensystemen unter Mikrogravitation;
- Momentan kalkulierte Masse des MTG-Moduls ist höher als bei vergleichbaren Solarzellen.

Und auf der Erde?

Für terrestrische Anwendungen vereinfachen sich die Bedingungen für das MTG-Modul erheblich. Zum einem muss die Kondensatorabwärme nicht mehr allein über die Strahlung abtransportiert werden. Erleichternd kommt hier die Konvektion zur Hilfe, d.h. die Wärmeabfuhr über z.B. vorbeiwehende Luft (passiv oder aktiv gesteuert). Dadurch könnte der Kondensator um ein Vielfaches kleiner konzipiert werden. Zum anderen erleichtert die auf der Erde vorherrschende Gravitation viele Prozesse innerhalb des MTG-Moduls, z.B. das Auffangen und

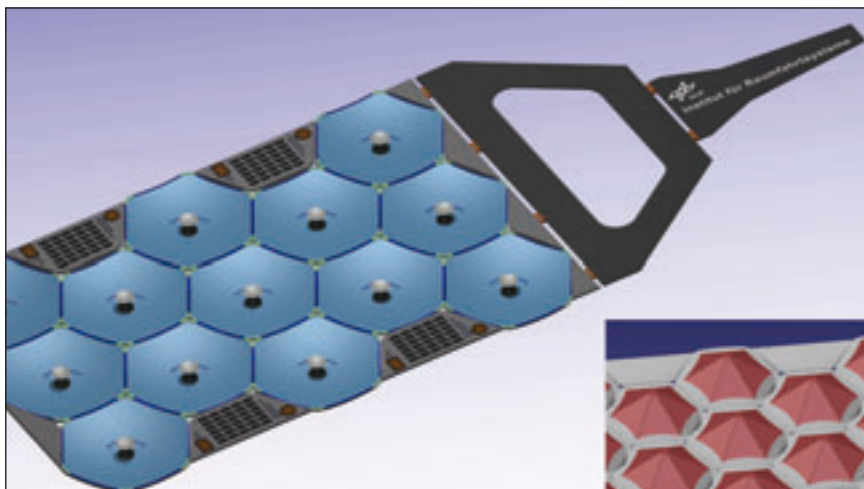


Foto: Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)

Bild 5: Mögliche Anordnung mehrerer MTG-Module zu einem MTG-Panel für Satelliten. Die Kondensatoren/Radiatoren befinden sich auf der Rückseite des Panels. Um gegenseitiges Anstrahlen zu vermeiden, stehen die Radiatorflächen jeweils im Rechten Winkel zu einander (siehe Bild rechts unten).

Sammeln des Kondensats.

Für Anwendungen auf der Erde wäre ein MTG Einsatz als Ergänzung zur Solarzelle denkbar. Hier sind jedoch die Produktionskosten eine der entscheidenden Variablen. Die Firma SolFocus benutzt bereits preisgünstig herstellbare Cassegrain-Reflektorsysteme, um sogenannte *multiple-junction* Solarzellen im Brennpunkt des Kollektors zu betreiben (Bild 6). Eine mögliche preisgünstige Herstellung der MTG-Module durch Massenfertigung und Systemoptimierung könnte eine Ergänzung zur Solarzelle darstellen.

Die Entwicklung des MTG-Moduls beinhaltet aber auch das Potential für weitere Folgeerfindungen. Zum Beispiel die Nutzung für die Stromerzeugung durch Mikroabwärmenutzung. Gerade bei kleinen Abwärmequellen, so genannte MPS (Micro Power Sources), bei denen eine Nutzung bisher nicht sinnvoll erschien, könnte das MTG-Modul Prinzip angewendet werden, zum Beispiel bei der PC-Prozessorabwärme, der Glühbirnenabwärme oder bei der HiFi-Anlagenabwärme.

Lässt man den Cassegrain-Kollektor weg und verkleinert man den Kondensator, könnten diese kleinen Rankine-Wandler an alle möglichen Verbraucher mit Abwärme angeschlossen werden. Wird das modifizierte MTG-Modul z.B. direkt auf dem Prozessor eines PCs angebracht, könnte diese Abwärme genutzt werden. Der somit erzeugte Strom könnte wieder auf das Mainboard des Rechners zurückgespeist werden. Durch solche Maßnahmen lässt sich die Energieeffizienz verschiedenster Gebrauchsgegenstände erhöhen.

Denkbar ist auch der Betrieb der MTG-Module im Clusterverbund als Ersatz zur Lichtmaschine im Auto. Die Rankine-Wandler können die Abgaswärme nut-

zen oder zur Kühlung des Motorblockes beitragen. Durch Nutzung der Motorabwärme könnte der Gesamtwirkungsgrad von Fahrzeugen weiter erhöht werden.

Ausblick

Neben zusätzlichen technischen Optimierungen des MTG-Moduls sowie thermodynamischen Berechnungen soll das generelle Potential der Power MEMS weiter im Bremer Institut für Raumfahrtssysteme des DLR untersucht werden.

Hier kommt die neuartige Concurrent Engineering Facility (CEF) des Bremer Institutes zur Hilfe. Die CEF ist eine so genannte Simultanentwurfsanlage, in der ein Expertenteam in sehr kurzer Zeit komplexe Konzeptstudien durchführt.

Das MTG Modul wird hier in Zukunft weiter analysiert sowie optimiert werden, um somit nicht nur einen Beitrag für die Raumfahrt zu leisten, sondern auch zukünftige regenerative Energiesysteme für die Erde zu entwerfen.



Foto: Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)

Bild 6: Modulares (low-cost) Cassegrain Kollektorsystem der Firma SolFocus. Im Brennpunkt der Kollektoren befinden sich spezielle *Multiple-Junction* Solarzellen.

Weiterführende Links

DLR Institut für Raumfahrtssysteme;
Abteilung Systemanalyse Raumsegmente:

■ www.dlr.de/irs/desktopdefault.aspx/tabid-4392/7172_read-10767/

„Die Liliput-Maschinen“, (2004),
Technology Review:

■ www.heise.de/tr/downloads/08/4/6/3/Tag-Referenz_Syntax_.pdf
Microsystems Technology Laboratories
@ MIT:

■ www-mtl.mit.edu/index.html
Firma SolFocus:

■ www.solfocus.com/

ZU DEN AUTOREN:

Text:

► *Dipl. Wi.-Ing. Daniel Schubert* ist Mitarbeiter der Forschungsgruppe Systemanalyse Raumsegmente des DLR Instituts für Raumfahrtssysteme in Bremen.

daniel.schubert@dlr.de

Bilder:

► *Dipl.-Ing. Waldemar Bauer (DLR)*

RAL Denkanstoß Nr. 2

Die Sonne bringt es an den Tag*

* Das Erneuerbare-Energien-Gesetz gibt Investoren und Anlegern die Chance, über 20 Jahre eine gesetzlich garantierte Vergütung für Solarstrom zu erhalten. Neben einer soliden wirtschaftlichen Projektgrundlage ist aber auch die Technik entscheidend. Viele Banken und Versicherungen vertrauen bereits heute auf die RAL-GZ 966 zur Sicherung ihrer Investition.

Qualität ist das Einhalten von Vereinbarungen

Für Solaranlagen bedeutet dies, dass sie über die Lebensdauer funktionieren und hohe Erträge erwirtschaften. Dies ist der Fall, wenn sie von qualifiziertem Personal nach der guten fachlichen Praxis geplant, ausgeschrieben und aus hochwertigen Komponenten gebaut werden. Eine Bestellung gemäß RAL-GZ 966 definiert die gute fachliche Praxis für Komponenten, Planung und Ausführung rechtsverbindlich. Ein beiderseitiger Vorteil für Auftraggeber und Auftragnehmer.



RAL-GZ 966

