

# Dish-Stirling-Systeme

## Eine Technologie zur dezentralen solaren Stromerzeugung

Dipl.-Ing. Doerte Laing  
DLR  
Doerte.Laing@dlr.de

Dipl.-Phys.  
Wolfgang Schiel  
Schlach Bergermann  
und Partner (SBP)  
W.Schiel@sbp.de

Dr.-Ing. Peter Heller  
DLR  
Peter.Heller@dlr.de

### Einleitung

Dish-Stirling-Systeme sind Anlagen zur dezentralen solarthermischen Stromerzeugung, die direkte Sonnenstrahlung nutzen. Ihre elektrische Leistung liegt typischerweise zwischen 5 und 50 kW. Durch diesen Leistungsbereich und die Möglichkeit, mehrere Systeme zu einer „Farm“ zusammenzuschalten, sind die Dish-Stirling-Systeme für einen weiten Einsatzbereich geeignet. Leistungen von 5 kW bis in den MW-Bereich können damit abgedeckt werden und bieten damit einen Ersatz für die heute weit verbreiteten Diesel-Aggregate.

Stirling-Kreisprozess in mechanische Energie wandelt. Ein direkt an die Kurbelwelle des Stirlingmotors gekoppelter Generator formt diese dann in elektrische Energie um.

### Bisher ausgeführte Systeme

Anfang und Mitte der 80er Jahre wurden in den USA in mehreren Projekten (JPL, Vanguard, McDonnell Douglas) die ersten modernen Dish-Stirling-Anlagen mit 25 kW elektrischer Leistung gebaut [1]. Heute arbeiten in den USA drei Konsortien an der Markteinführung der Dish-Stirling-Technologie. Stirling Engine Systems (SES) ist dabei, zusammen mit Boeing und der schwedischen Firma Kokums, das 25 kW-Modul von McDonnell Douglas zu überarbeiten. Science Applications International Corporation (SAIC) und Stirling Thermal Motors (STM) entwickeln ein 22 kW-Modul. Sandia National Laboratories entwickelt ein 10 kW-System für netzunabhängigen Betrieb. Eine Übersicht über die internationale Entwicklung von Dish-Stirling-Systemen findet sich in [2 und 3].

In Deutschland arbeitet seit 1984 Schlaich Bergermann und Partner (SBP) an der Entwicklung von Dish-Stirling Systemen. In Saudi-Arabien wurden zwei Einheiten mit Konzentratoren von 17m Durchmesser und 50-kW<sub>el</sub>-Stirlingmotoren errichtet. Die weitere Entwicklung bei SBP konzentrierte sich auf erheblich vereinfachte und kostengünstigere Anlagen (V 160), mit der nach einem Prototypen in Stuttgart (1988) [4] fünf Einheiten mit einem 7,5m Durchmesser-Konzentrator und 9 kW elektrischer Leistung verwirklicht wurden. Drei dieser Systeme wurden 1992 im Rahmen des Projektes Distal I auf der Plataforma Solar de Almería in Südspanien gebaut und im Dauerbetrieb getestet [5]. Diese Anlagen markieren mit über 30.000 kumulierten Betriebsstunden die weltweit umfangreichsten Betriebserfahrungen mit solchen Systemen.

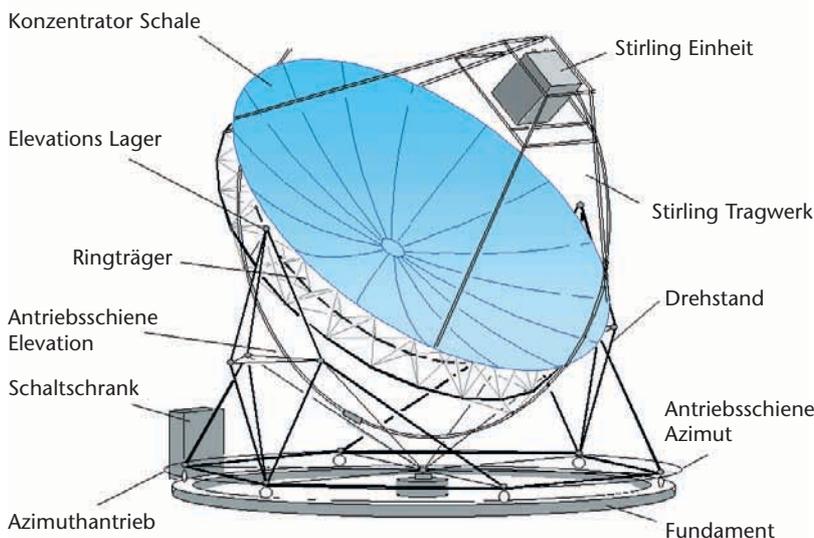


Abbildung 1  
Dish-Stirling-Prinzip

Die wesentlichen Komponenten eines Dish-Stirling-Systems sind in Abb.1 dargestellt. Eine rotationssymmetrisch parabolisch gekrümmte Konzentratorschale mit kurzer Brennweite bündelt Solarstrahlung auf den nahe seines Brennpunktes angeordneten Receiver mit der Stirling-einheit. Da gerichtete (direkte) Solarstrahlung konzentriert wird, müssen Konzentrator und Stirlingeinheit kontinuierlich zweiachsig der Sonne nachgeführt werden. Der Receiver absorbiert die Strahlung und führt sie als Hochtemperaturwärme dem Stirlingmotor zu, der sie über den

1996 wurde im Rahmen des Projektes Distal II in Almería mit dem Aufbau von drei weiteren Einheiten der nächste Entwicklungsschritt verwirklicht [6]. Diese Anlagen sind mit Konzentratoren von 8,5 m Durchmesser, Stirlingmotoren von 9 kW elektrischer Leistung und einer vollautomatischen Steuerung ausgestattet (Abb. 2) und werden seither kontinuierlich betrieben.

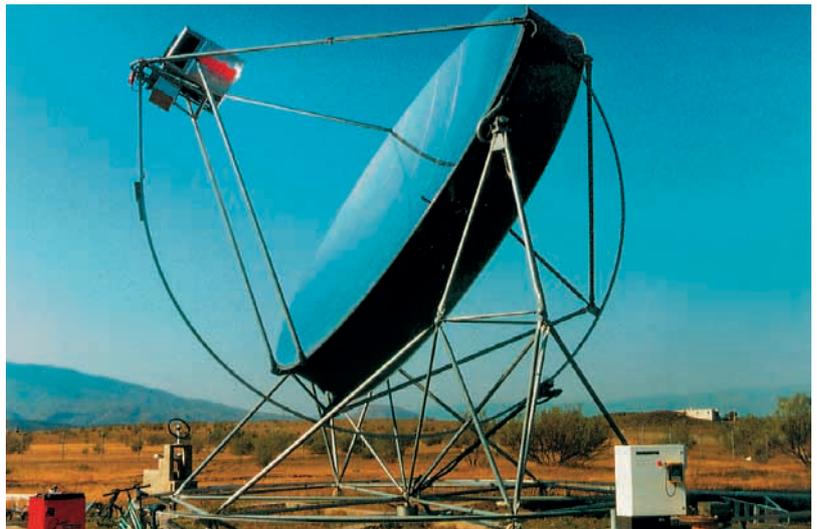
## Das EuroDish-Projekt

1998 folgte der Startschuss für die nächste Generation von Dish-Stirling-Anlagen bei SBP. Zusammen mit sechs weiteren deutschen und spanischen Partnern und unter Förderung der Europäischen Kommission wurde ein fortgeschrittenes System entwickelt, der EuroDish. Hauptziel dieses Projekts war die Verringerung der hohen Anlagenkosten. Zwei Prototypen wurden bis 2001 auf der Plataforma Solar de Almería errichtet und befinden sich inzwischen im Erprobungsbetrieb (Abb. 3).

Dies sind die wesentlichen Komponenten des Systems:

### Konzentrator

Die Konzentratoren der vorangegangenen Systeme wurden in Metallmembran-Technik ausgeführt. Dabei werden dünne Edelstahlbleche (0,2 bis 0,5 mm) in einem formgebenden Lastfall plastisch in die gewünschte Geometrie verformt und im Betrieb durch einen geringen Unterdruck im Konzentratorgehäuse stabilisiert. Mit dieser Technologie können sehr präzise und steife Konzentratoren gebaut werden, doch der Montageaufwand vor Ort ist beim Bau von einzelnen Anlagen sehr hoch. Die damit verbundenen Kosten können erst durch Errichtung einer größeren Anzahl von Systemen an einem Aufstellort entscheidend verringert werden. Da im Zuge der Markteinführung jedoch die Aufstellung einzelner Anlagen oder kleinerer Cluster im Vordergrund stehen, wurde beim Konzentrator des EuroDish ein ganz neuer Weg beschritten. Der Konzentrator mit 8,5 m Durchmesser wird nunmehr als dünnwandige Sandwichschale aus faserverstärktem Epoxidharz ausgeführt. Die Konzentratorschale besteht aus zwölf gleichen Segmenten, die auf einem sehr



präzisen Formwerkzeug laminiert, wärmebehandelt und zur Versteifung rückseitig mit einer Rippe versehen werden. Die Vorderseite wird mit Dünnglasspiegeln (0,9 mm) beklebt, die eine dauerhaft hohe Reflektivität von rund 94 % gewährleisten.

Abbildung 2  
Dish-Stirling System  
Distal II in Almería



Bei der Montage wird zunächst ein Fachwerk-Ringträger aufgebaut. Die Schalensegmente werden in einem Container angeliefert und in einer Drei-Punkt-Lagerung auf dem Ringträger sowie mittig auf einem einfachen Zentrierwerkzeug montiert, wobei zur Justierung lediglich ein optisches Nivellier benötigt wird (Abb. 4). Sind alle Segmente montiert, so werden diese entlang ihrer radialen Kanten verklebt. Durch die formschlüssige Verbindung entfaltet sich die vorteilhafte Schalentragswirkung und bildet so ein sehr steifes und leichtes Bauteil mit hoher Formtreue.

Abbildung 3  
EuroDish-Prototypen  
auf der Plataforma  
Solar de Almería,  
Spanien

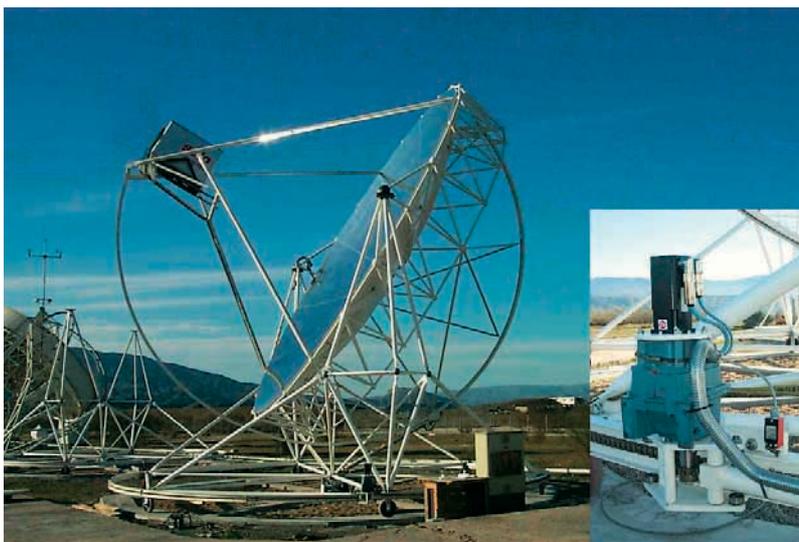


Abbildung 4  
Konzentratorschale  
und Segmenthandling

### Nachführung

Da der Konzentrator im Betrieb stets exakt auf die Sonne ausgerichtet sein muss, wird er in zwei Achsen beweglich montiert. Neben der in den Vorgängeranlagen Distal I realisierten polaren Aufhängung, bei der eine Achse parallel zur Erdachse verläuft, die andere senkrecht dazu, kann diese Bewegung auch mit einer azimuthalen Montierung erfolgen. Beim EuroDish verläuft hierbei die Azimuthachse senkrecht und die Elevationsachse parallel zur Erdoberfläche. Ein als Rohrkonstruktion ausgeführter sogenannter Drehstand sorgt für die azimuthale Bewegung, indem er auf sechs Rädern auf einem ringförmigen Fundament mit dem zentralen Azimuthlager abrollt. In 5,7 m Höhe sind auf dem Drehstand die Elevationslager angeordnet, in denen der Konzentrator aufgehängt ist.

Abbildung 5  
Drehstand und  
Antriebseinheit mit  
Servomotor und  
Getriebe



Um die hohen Drehmomente aufzunehmen, die unter Windlast auf den Konzentrator wirken, werden die resultierenden Kräfte über Rollen-

ketten und Antriebsbögen (9,3 m Durchmesser) in die mit Servomotoren ausgestatteten Antriebe eingeleitet, sodass recht kleine und preisgünstige Getriebe und Motoren verwendet werden können (Abb. 5). Die aktuelle Position wird über hochgenaue Drehgeber an die Steuerung zurückgemeldet.

### Receiver

Der Receiver ist das Bindeglied zwischen Konzentrator und Stirlingmotor und damit ein hochbeanspruchtes Bauteil. Es muss einer Reihe von teilweise gegenläufigen Anforderungen genügen: Einerseits muss die Solarstrahlung zu einem hohen Anteil absorbiert und zugleich die infrarote Abstrahlung minimiert werden, zum anderen verlangt der Stirling-Kreisprozess hohe Temperaturen, hohe Arbeitsgasdrücke und einen kompakten Wärmeaustauscher mit geringem Schadvolumen.

Der eingesetzte Receiver besteht aus 78 Rohren, die über Sammler an den Arbeitsraum des Motors angeschlossen werden. Jedes einzelne Rohr besteht aus einer hochtemperatur- und korrosionsbeständigen Nickelbasislegierung, Außendurchmesser 3 mm, Wandstärke 0,6 mm. Auf der Rückseite sind Thermoelemente zur Temperaturüberwachung angebracht. Die maximalen Temperaturen auf den bestrahlten Rohrvorderseiten liegen bei etwa 900°C bei einem mittleren Arbeitsgasdruck von bis zu 150 bar.

Der Receiver befindet sich etwa 15 cm hinter dem Brennpunkt des Konzentrators, wodurch er deutlich geringeren Strahlungsflussdichten ausgesetzt ist als im Brennpunkt. Ein wassergekühlter Aluminiumzylinder bildet einen Hohlraum

vor dem Receiver (Cavity), dessen Öffnung in der Brennebene liegt. Dadurch werden die Wärmeverluste durch Konvektion und infrarote Abstrahlung deutlich verringert. Rückseitig ist der Receiver mit einer keramischen Isolierung versehen, die vollständig in Edelstahlblech gekapselt ist.

Beim EuroDish wird die Jahresenergieausbeute der Anlage gesteigert, indem der Konzentrator mit rund 25 % größerer Fläche ausgelegt wurde als für die Nennleistung des Stirlingmotors erforderlich (solares Vielfaches). Dadurch muss bei Einstrahlungen ab rund  $850 \text{ W/m}^2$  überschüssige Wärme abgeführt werden, was durch ein kleines auf die Receiverrohre gerichtetes Gebläse erfolgt. Durch diese Leistungsabregelung wird zwar bei hoher Einstrahlung Energie verschenkt. Der Vorteil ist aber, dass der Stirlingmotor bei geringer und mittlerer Einstrahlung auch mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden kann. In der Jahresenergiebilanz führt dies insbesondere bei Standorten mit relativ wenigen Stunden mit maximaler Einstrahlung zu einem Gewinn von fast 30% gegenüber einer Dimensionierung ohne solares Vielfaches.

### Stirling 161

Der beim EuroDish eingesetzte Stirling 161 der Solo Kleinmotoren GmbH basiert auf der ursprünglich von der schwedischen United Stirling AB entwickelten Anlage V 160 und wird seit

1990 von Solo weiterentwickelt und in Prototypenstückzahlen gebaut [7]. Derzeit wird bei Solo eine Kleinserienfertigung dieser Maschine als gasbetriebenes BHKW aufgebaut.

Der Stirling 161 (Abb. 6) wird mit Helium als Arbeitsgas betrieben und erreicht bei einem mittleren Druck von 150 bar, eine Gastemperatur von  $650^\circ\text{C}$  und mit 1.500 U/min eine elektrische Leistung von 9 bis 10 kW. Das Kurbelgehäuse ist drucklos, die Zylinder wassergekühlt. Die Rückkühlung des Kühlwassers erfolgt im geschlossenen Kreislauf mittels einer Umwälzpumpe durch einen Wasser/Luftkühler. An der Kurbelwelle ist ein Asynchrongenerator angeflanscht, der direkt ins Netz einspeist.

Die Hauptaufgabe der Mikroprozessor-Motorregelung besteht in der Steuerung des Arbeitsgasdruckes im Motor, der über Ventile, einen Kompressor und einen Hochdruck-Vorratsbehälter dem jeweiligen solaren Leistungsangebot angepasst wird.

## Testbetrieb und Ausblick

Zwei Prototypen des EuroDish-Systems wurden im Dezember 2000 und Juni 2001 auf der Plattform Solar de Almería errichtet und in Betrieb genommen. Während des Testbetriebs wurden die Steuerungssoftware verbessert und die Antriebe weiterentwickelt. Inzwischen sind die Anlagen im vollautomatischen Betrieb und werden vom Personal des DLR betreut. Gegenwärtig wird der nächste Entwicklungsschritt in Angriff genommen. Mit finanzieller Förderung des Bundesumweltministeriums werden drei Arbeitspakete bearbeitet:

- Die beiden EuroDish Prototypen in Almería werden weiter betrieben, um Betriebserfahrungen zu sammeln. Zudem dienen sie auch dazu, weiterentwickelte Komponenten zu erproben und zukünftige Anlagenbetreiber zu schulen.
- Weitere Leistungssteigerung der Anlagen und Maßnahmen zur Kostensenkung bei Komponentenherstellung und Montage sollen den Übergang in eine Kleinserienfertigung ermöglichen und die bisher noch hohen Systemkosten verringern.

Abbildung 6  
Stirling V161 von Solo  
Kleinmotoren GmbH  
mit Solarreceiver



- Bei drei ausgewählten Nutzern (z.B. Energieversorgungsunternehmen) werden so genannte Länderreferenzanlagen gebaut. Damit können Montage, Betrieb und Wartung unter marktnahen Bedingungen erprobt werden. Außerdem wird die Technik für die Öffentlichkeit und potenzielle Betreiber sichtbar.

## Literatur

- [1] Lopez, C. W.; Stone, K.W.:  
Design and Performance of the Southern California Edison Stirling Dish. Solar Engineering Vol. 2 ASME, USA 1992.
- [2] Stine, W. B.; Diver, R.B.:  
A Compendium of Solar Dish-Stirling Technology. Sandia-Bericht Sand 93-7026 UC-236, USA 1994.
- [3] Schiel, W.; Laing, D.:  
Survey on Solar-Electric Dish-Stirling Technology. Proceedings of the VDI-GET 10th International Stirling Engine Conference Osnabrück, ISBN3-931384-38-1, 2001.
- [4] Keck, T.; Benz, R.; Schiel, W.:  
Bau und Test eines 7,5-m-Dish-Stirling-Systems. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 0328925C (BMFT), Schlaich Bergemann und Partner, Stuttgart (1990), unveröffentlicht.
- [5] Schiel, W.; Schweizer, A.; Stine, W.:  
Evaluation of the 9-kW-Dish-Stirling-System of Schlaich Bergemann und Partner Using the Proposed IEA Dish-Stirling Performance Analysis Guidelines, Proceedings of the 29th IECEC, Monterey, CA, August 7-12, 1994.
- [6] Keck, T.; Schiel, W.; Schweitzer, A.:  
Auf den Punkt genau. Sonnenenergie (1998), Nr. 3. DGS-ISES, ISSN 0172-3278, München 1998.
- [7] Baumüller, A.; Schiel, W.:  
Single Acting 10 kW (el) Stirling Engine Application and Results. 8. ISEC, University of Ancona, Italien, 1997.