

Solarthermie für Dezentrale Strom- erzeugung

von Reiner Buck, Doerte Laing
und Wolfgang Schiel

Überblick

Für die zukünftige dezentrale, rein solare bzw. hybride Stromerzeugung in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung ist das Dish/Stirling-System im Leistungsbe-
reich von 10 kW bis 10 MW eine der aussichtsreichsten Technologien. Erste Marktanalysen weisen ein mittelfristig erschließbares Potential allein in den Mittelmeerranrainern von mehr als 550 MW aus. Kostenschätzungen zeigen, daß bei entsprechender Serienfertigung ein Kostenniveau von 3–4 TDM pro installiertes kW erreicht werden kann. Damit wären die spezifischen Stromgestehungskosten von Dish/Stirling Anlagen geringer bzw. gleich wie bei heutigen dezentralen Dieselanlagen gleicher Leistung, die zur Zeit die Stromversorgung in diesen Bereichen sicherstellen. Mit dieser schadstoffarmen/freien und ressourcenschonenden Technologie könnte ein großer neuer Exportmarkt für die Industrienationen erschlossen werden.

The Dish/Stirling system at power levels from 10 kW to 10 MW is one of the most promising technologies for future solar or solar/hybrid electricity generation in regions with high solar irradiation. First market assessments for the Mediterranean area showed a market potential of more than 550 MW which could be opened up in the mid-term. Estimates indicate that investment costs of about 3–4 TDM per installed kW are achievable, assuming mass production. In this case the levelized energy costs of Dish/Stirling systems would be lower or comparable to stationary Diesel engines which are now used in these applications. With this environmentally clean and resource saving technology a large new export market for the industrial nations could be opened up.

1. Einleitung

Das Dish/Stirling System besteht aus den drei Komponenten: Konzentrator, Receiver und Stirling-Motor ([Abbildung 1](#)). Der zweiachsig parabolisch gekrümmte Konzentrator bündelt die einfallende Sonnenstrahlung auf einen im Brennpunkt angeordneten Wärmetauscher (Receiver), der gleichzeitig der Erhitzerkopf der Stirlingmaschine ist. Der Stirling-Motor wandelt die über den Receiver in den Stirlingprozeß eingekoppelte Wärme in mechanische Wellenleistung, die ein direkt an die Kurbelwelle des Motors angeflanschter Generator in elektrische Energie umsetzt.

Die Erprobung von mehreren prototypischen Einheiten über mehr als 45.000 Betriebsstunden im System unter realen Bedingungen hat die technische Stimmigkeit und Machbarkeit sowie die Leistungs- und Betriebsfähigkeit des Gesamtsystems aufgezeigt [1][2][3][4]. Dabei wurden die bisher höchsten Wirkungsgrade bei der Wandlung von Solarstrahlung in elektrische Energie (20 bis 30%) bereits in dieser frühen Entwicklungsphase erreicht.

Darauf aufbauend ist der nächste konsequente Schritt das Erreichen der prognostizierten Kostenreduktion des Gesamtsystems. Hierzu wird zur Zeit in mehreren Gruppen weltweit an ersten Kleinstserien gearbeitet, um das erforderliche Kostenreduktionspotential darzustellen und erste Marktnischen zu erobern.

Parallel zu den Arbeiten am rein solaren System werden Hybridreceiver entwickelt, die eine gleichzeitige solare wie fossile Betriebsweise ermöglichen, und in entsprechenden Demonstrationsprojekten qualifiziert. Mit dieser Maßnahme soll die Verfügbarkeit und die Versorgungssicherheit konventioneller Systeme erreicht und die Stromgestehungskosten weiter gesenkt werden.

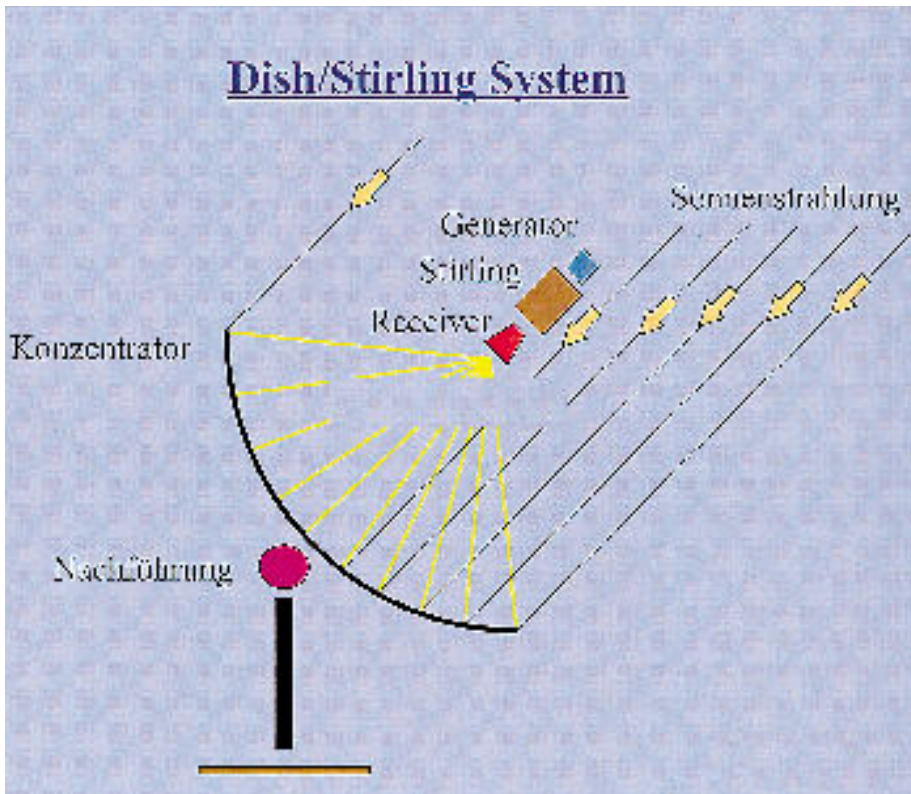
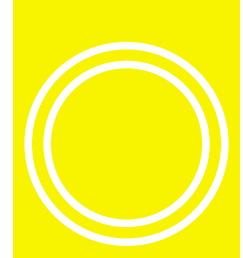
2. Stand der Technik

In den letzten 12 Jahren wurden von vier verschiedenen Gruppen insgesamt fünf Prototypen entwickelt und teilweise mehrere Einheiten gebaut und getestet [1]. In der Tabelle sind die wesentlichen Kenngrößen der einzelnen Systeme aufgeführt. Es wurden fünf verschiedene Konzentratorentwicklungen durchgeführt und vier verschiedene Stirling-Motoren eingesetzt. Beim Konzentrator wurden zwei grundsätzlich verschieden Entwicklungslinien verfolgt:

- Facettierte Glas/Metall Bauweise: Ein- bzw. auch zweiachsig gekrümmte rückseiten-verspiegelte Glassegmente mit teilweise eingegebenen oder an das Paraboloid angepaßten unterschiedlichen Krümmungsradien werden dabei auf eine tragende Stahlstruktur aufgeschraubt und einzeln ausgerichtet. Die gesamte

Dipl.-Ing. Reiner Buck und Dipl.-Ing. Doerte Laing sind Projektleiter für Heat-Pipe- bzw. volumetrische Receiverentwicklung im Institut für Technische Thermodynamik der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart.

Dipl.-Phys. Wolfgang Schiel ist Partner im Ingenieurbüro Schlaich, Bergemann und Partner (SBP), Stuttgart.



Struktur wird entweder polar oder azimutal aufgehängt und zweiachsig mit entsprechenden Stellmotoren der Sonne nachgeführt.

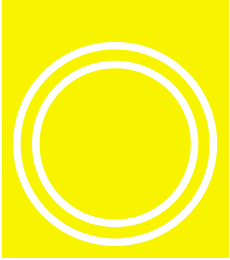
- Membranbauweise: Dünne Edelstahlbleche werden über einen Druckring (Trommel) gespannt und befestigt, wobei die vordere Membran unter Verwendung von entsprechenden Lasten (Wasser und/oder Unterdruck) in ein Paraboloid plastisch verformt und anschließend mit dünnen (0,6–0,8 mm dicken) Spiegelsegmenten belegt wird. Die dabei entstehende verwindungssteife Trommel wird entweder azimutal oder polar aufgehängt und zweiachsig mit entsprechenden Stellmotoren der Sonne nachgeführt [5].

Mit beiden Konzepten wurden ausreichend gute Spiegelkonturen und damit eine gute bis sehr gute optische Leistungsfähigkeit erzielt. Mittlere Konzentrationsfaktoren von über 2.000, bei maximalen Konzentrationsfaktoren von über 10.000, wurden problemlos erreicht. Konzentratorwir-

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Dish/Stirling-Systems

Tabelle 1: Stand der Dish/Stirling-Technik

Name	Vanguard	MDAC	Deutsch/Saudi	SBP 9 kW	Aisin/Miyako
Jahr	1984–86	1984–88	1984–89	1989–	1992–
Netto Leistung	25 kW	25 kW	50 kW	9 kW	8,5 kW
Wirkungsgrad gemess.	29,4 % @760 °C Gastemp.	29% – 30%	23,1%	20,3%	12% bei 900 W/m²
Anzahl	1	6	2	6	3
Betriebsstunden	5.000 h	12.000 h	7.000 h	20.000 h	k. A.
Verfügbarkeit gemess.	k. A.	40 – 84%	k. A.	60 – 86%	k. A.
Status	beendet	beendet	gelegentlicher Betrieb	3 Einh. im Dauertest	Testbetrieb
Konzentrator					
Durchmesser	10,47 m Ø	10,57 m Ø	17 m Ø	7,5 m Ø	7,5 m Ø
Bauart	Facetiert Glas Spiegel	Facetiert Glas Spiegel	Stretched membrane	Stretched membrane	Stretched membrane
Zahl der Facetten	336	82	1	1	24
Facettengröße	0,451 x 0,603 m	0,91 x 1,22 m	Ø 17 m	Ø 7,5 m	Ø 1,524 m
Spiegelträger/ Reflektorschicht	Glas/Silber	Glas/Silber	Glas/Silber	Glas/Silber	Plastikfolie/ Aluminium
Reflektivität (neu)	93,5%	91%	92%	94%	bis 85%
Konzentrationsfaktor	2750	2800	600	4000	1540
Betriebsstunden	k. A.	175.000	18.000 h	54.000 h	k. A.
Wirkungsgrad	89%	88,1%	78,7%	82%	78%
Maschine					
Hersteller	USAB	USAB	USAB	SOLO	Aisin Seiki
Leistung (elektr.)	25 kW	25 kW	50 kW	9 kW	30 kW
Arbeitsgas	Wasserstoff	Wasserstoff	Wasserstoff	Helium	Helium
Druck (max.)	20 MPa	20 MPa	15 MPa	15 MPa	14,5 MPa
Gas-Temperatur (max.)	720 °C	720 °C	620 °C	650 °C	683 °C
Akkumul. Betriebsst.	40.000 h	80.000 h	10.000 h	450.000 h	k. A.
η Stirling (incl. Gen.)	38,5%	38,5%	38,5%	31%	25%
Receiver					
Typ	Rohr	Rohr	Rohr	Rohr	Rohr
Aperturdurchmesser	20 cm	20 cm	70 cm	12 cm	18,5 cm
Rohrtemperatur	810 °C	810 °C	800 °C	850 °C	780 °C
Wirkungsgrad	90%	90%	80%	86%	65%



kungsgrade von bis zu 90% wurden gemessen.

Bei den Stirling-Motoren wurden ausschließlich kinematische Aggregate eingesetzt, die entweder einfach oder doppelwirkend ausgeführt wurden. Als Wärmeträgermedium wurde Helium oder Wasserstoff verwendet. Die Maschinenwirkungsgrade erreichten bei den doppelwirkenden Maschinen teilweise über 40% (Wellenleistung zu eingekoppelter Wärmeleistung), bei den einfachwirkenden Maschinen wurden etwa 33% erzielt.

Die Receiver wurden so gut wie ausschließlich als Rohrbündelreceiver ausgeführt, mit Rohraußendurchmessern von 2,5 bis 4,5 mm, gefertigt aus hochtemperaturfesten Werkstoffen wie z.B. Inconel 625, das eine Materialtemperatur von ca. 900°C zuläßt. Damit wurden obere Prozeßtemperaturen von 650 bis 750°C erreicht. Die mittlere Strahlungsbelastung auf der Wärmetauscherfläche lag im Bereich von 30 bis 80 W/cm², in einzelnen Testphasen bis zu 130 W/cm². Eine erste Natrium-Heat-Pipe-Receiverentwicklung für die V-160 Maschine wurde für das 9 kW System über ca. 1.500 h erfolgreich getestet [6].

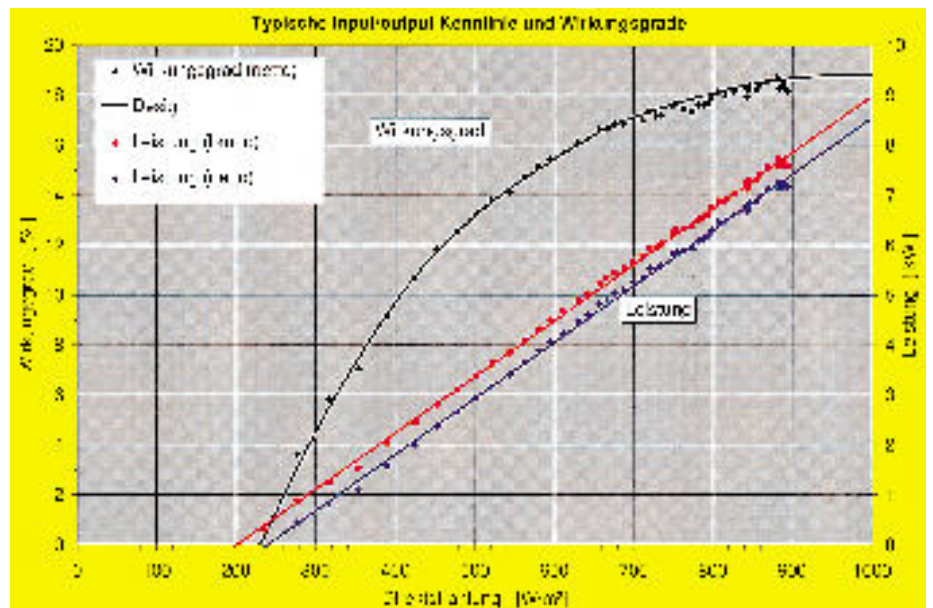
Insgesamt wurden mit den fünf verschiedenen Systemen ca. 45.000 solare Produktionsstunden akkumuliert, wobei die akkumulierten Betriebsstunden der einzelnen Komponenten (speziell durchgeführte Komponenten-Testprogramme im Labor bei Qualifikationstests, Betrieb während Bewölkung oder anderen Anwendungen, etc.), wesentlich höher liegen: Konzentratoren über 200.000 h; Stirling-Motoren über 500.000 h; Receiver über 50.000 h. Die maximalen Systemwirkungsgrade lagen im Bereich von 20 bis 30% (Sonne in Strom) und mittlere Wirkungsgrade von 16–24% wurden gemessen, wobei die Unterschiede im wesentlichen auf die eingesetzten Stirling-Motoren zurückzuführen sind.

Als Beispiel zeigt **Abbildung 2** die drei 9 kW Anlagen, die seit 1991 auf der Plataforma Solar de Almería/Spanien im Dauerbetrieb (Sonnenauf- bis Sonnenuntergang) betrieben werden und insgesamt bisher ca. 23.000 Betriebsstunden akkumuliert haben [4]. Die



Abbildung 2: SBP 9 kW Dish/Stirling Einheiten in Almería

Abbildung 3: Energie- und Leistungsdaten des SBP 9 kW Systems



gemäß den IEA Richtlinien [7] ausgewerteten Betriebs- und Leistungsdaten dieser Anlagen sind in **Abbildung 3** dargestellt. Ab einer solaren Direktstrahlung von 240 W/m² wird von den Systemen Energie ins Stromnetz eingespeist. Der Nettowirkungsgrad erreicht Werte bis knapp 19% an klaren Tagen. Unter guten Einstrahlungsbedingungen werden Tageswirkungsgrade bis ca. 17% erreicht. **Abbildung 4** zeigt eine statistische Auswertung der monatlichen Betriebsstunden der Systeme.

Die erzielten Verfügbarkeitsdaten der fünf Prototypanlagen reichen von 30

bis über 80%. MTBF-Zeiten¹ von bis zu 4.000 Stunden für ein einzelnes System wurden gemessen. Die aufgetretenen Fehler, die zum Stillstand der Anlage führten, können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Stirling-Motor: Undichtigkeiten in den Gußteilen der Zylinder, hervorgerufen durch Lunken bei der Herstellung, Ausfälle bei der elektronischen Regelung der Maschine, Verschleiß an Kolbenstangendichtun-

¹ MTBF: mean time between failures (Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Störungen)

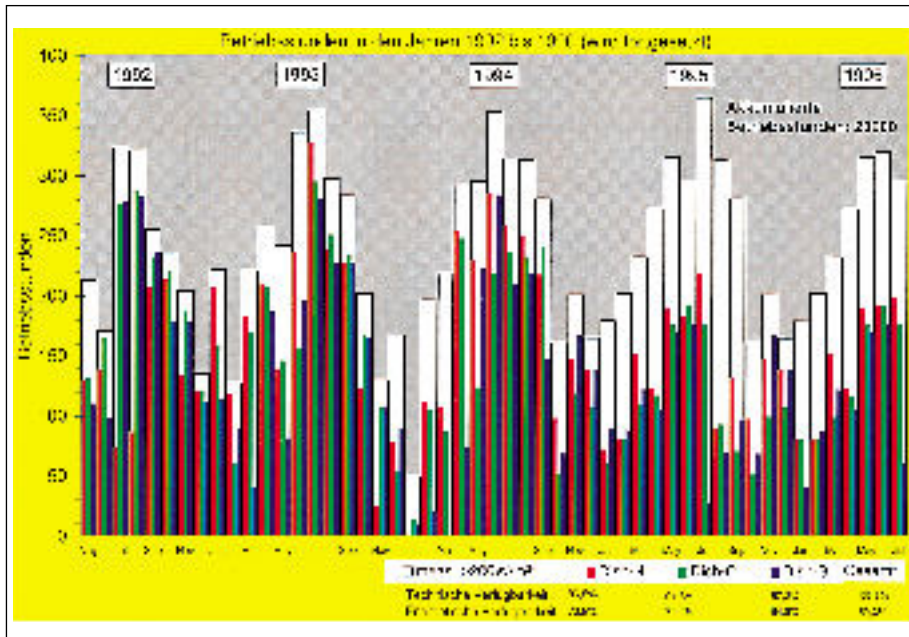
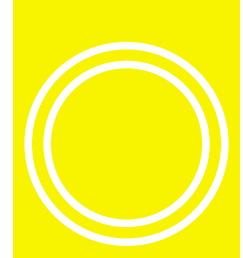


Abbildung 4: Betriebsstatistik der drei SBP 9 kW Einheiten in Almería/Spain

gen, die sehr unterschiedliche Standzeiten aufwiesen (1.500 bis teilweise über 7.000 h).

- **Konzentrator:** Die Konzentratoren wiesen in der Regel hohe technische Verfügbarkeiten auf, die teilweise Werte von 100% über mehrere Jahre erreichten.
- **Nachführung und Regelung:** In diesem Bereich wurden die meisten Ausfälle registriert. Mangelnde Störsicherheit, Kontaktschwierigkeiten bis hin zu Ausfällen konventioneller Bauteile wie Schütze, Endlagenschalter, Relais, etc. führten zum Stillstand des Gesamtsystems.
- **Receiver:** Als höchstbelastetes Bauteil führten bereits kleinere Unregelmäßigkeiten und nicht ausgereifte Regelalgorithmen in der Systemregelung bei Wolkendurchgängen, Anfahrvorgängen und bei hohen Einstrahlungswerten zu Ausfällen. Receiver-Isolierung und Schutzschilde zeigten noch keine ausreichenden Dauerstandfestigkeiten und machten immer wieder Nachbesserungen erforderlich.

Die Systemkosten für diese ersten Prototypanlagen, soweit sie bekannt sind, lagen in der Größenordnung von 30–36 TDM/kW installiert. Die Kosten teilen sich dabei im Verhältnis von ca. 60:40 in Konzentrator/ Nachführung/ Fundamente und Stirling-Motor auf. Die Motorkosten lagen bei ca. 12–14 TDM/kW (Einzelfertigung) und die

Stahlbaukosten (ohne Nachführung) bei ca. 25 DM pro kg.

Bewertung

Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse der in den letzten Jahren durchgeführten Entwicklungsprojekte lassen eine erste Bewertung dieser dezentralen solaren Technologie zu:

- Die Dish/Stirling Technologie ist zur Zeit die energetisch effizienteste solare Technologie. Spitzenwirkungsgrade von 20 bis 30% und mittlere Tageswirkungsgrade von 16–25% wurden bereits in den ersten Prototypanlagen nachgewiesen.
- Mit über 45.000 solaren Betriebsstunden konnte die technische Machbarkeit in allen Komponenten nachgewiesen werden.
- Der Stirling-Motor ist heute technologisch beherrschbar. Das Problem der Abdichtung zum Kurbelgehäuse (Stangendichtung) kann als gelöst betrachtet werden. Weitere Testergebnisse und bessere Reproduzierbarkeit bei der Abstimmung der einzelnen Bauteile aufeinander in der Serie lassen einen wartungsfreien Betrieb des Stirling-Motors von 10.000 h erwarten.
- Der Receiver und seine Anpassung an die vom Konzentrator vorgegebene Leistungsdichteverteilung, die Fügetechnik und die Materialauswahl ist entwickelt, und die erforderlichen

Programme zur Dimensionierung und thermodynamischen Auslegung sind heute verfügbar.

- Da der Stirling-Motor im Gegensatz zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren extern beheizt wird, bietet er die Möglichkeit, die Wärme nicht nur über hochkonzentrierte Solarstrahlung zu beziehen sondern auch (gleichzeitig oder nach Sonnenuntergang) von einem Brenner (Erdgas, Erdöl, nachwachsende Brennstoffe wie z.B. Rapsöl, Biogas etc.) und damit hybrid betrieben zu werden. Dies ermöglicht eine kontinuierliche bzw. auf den Verbraucher abgestimmte Energieerzeugung und ist mittelfristig kostengünstiger, als eine separate Diesel-Generatoreinheit daneben zu betreiben. Außerdem führt der Hybridbetrieb zu einer erheblichen Senkung der Stromgestehungskosten (Anhebung des Kapazitätsfaktors von 0,3 (rein solar) auf 0,8–0,9 bei Hybridbetrieb).

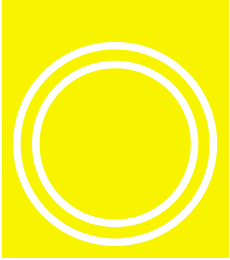
3. Aktuelle Entwicklungsarbeiten

Die laufenden Dish/Stirling-Entwicklungsbemühungen sind heute im wesentlichen auf die Länder USA und Deutschland beschränkt. Auch aus Japan, Australien und Rußland wird über Entwicklungsarbeiten berichtet, der Informationsstand ist für eine detaillierte Beschreibung der Aktivitäten aber nicht ausreichend.

In den USA wird zur Zeit das sog. „Utility Scale Joint Venture Program (USJVP)“ durchgeführt mit dem Ziel der Entwicklung einer marktreifen netzgekoppelten 25 kW Einheit [8]. Die technische Leitung dieses Vorhabens liegt bei Sandia National Laboratories (SNLA). SNLA führt auch eigene Entwicklungsarbeiten von Konzentratoren und Receivern durch und berät die Herstellerfirmen bei der Auslegung und Dimensionierung der einzelnen Komponenten und unterstützt sie bei der Erprobung der fertigen Bauteile bis hin zum Systemtests.

Im Rahmen des USJVP arbeitet derzeit ein Konsortium unter der Leitung der Firma Science Application International Corp. (SAIC) an der Entwicklung von Dish/Stirling-Systemen².

In Deutschland arbeiten zur Zeit SBP, L&C Steinmüller und SOLO Kleinmoto-



ren GmbH mit einer 50% igen Förderung der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg an der Weiterentwicklung des SBP 9 kW Systems.

3.1 SAIC 25 kW Entwicklungsvorhaben

Die erste Phase (System Design) wurde beendet und mit Phase 2 (Test von fünf Prototypen) begonnen³. Ein Konzentrator mit einer Spiegelfläche von 89,4 m² wurde entwickelt, bestehend aus 16 einzelnen Metall-Membran-Facetten, die auf eine tragende Stahlstruktur aufgesetzt sind (Abbildung 5). Als Ziel für den Konzentratorwirkungsgrad werden zur Zeit ca. 88% angegeben.

Als Stirlingmaschine wird der von Stirling Thermal Motors (STM) entwickel-

te doppelwirkende STM 4–120 Stirling-Motor eingesetzt. Diese Maschine hat vier parallel angeordnete Zylinder, die auf eine hydraulisch verstellbare Taumelscheibe (swash plate) wirken, über deren Anstellwinkel der Kolbenhub und damit die Leistung der Maschine geregelt wird. Die Taumelscheibe ist an den Generator gekoppelt. Die Maschine soll einen Wirkungsgrad zwischen 40–45% bei 1.800 Umdrehungen erreichen. Als Bindeglied zwischen Konzentrator und Motor wird ein direkt bestrahlter Rohrreceiver verwendet. Alternativ wird ein Heat-Pipe-Receiver entwickelt, außerdem liegt das Design für eine hybridisierte Variante des Rohrreceivers vor.

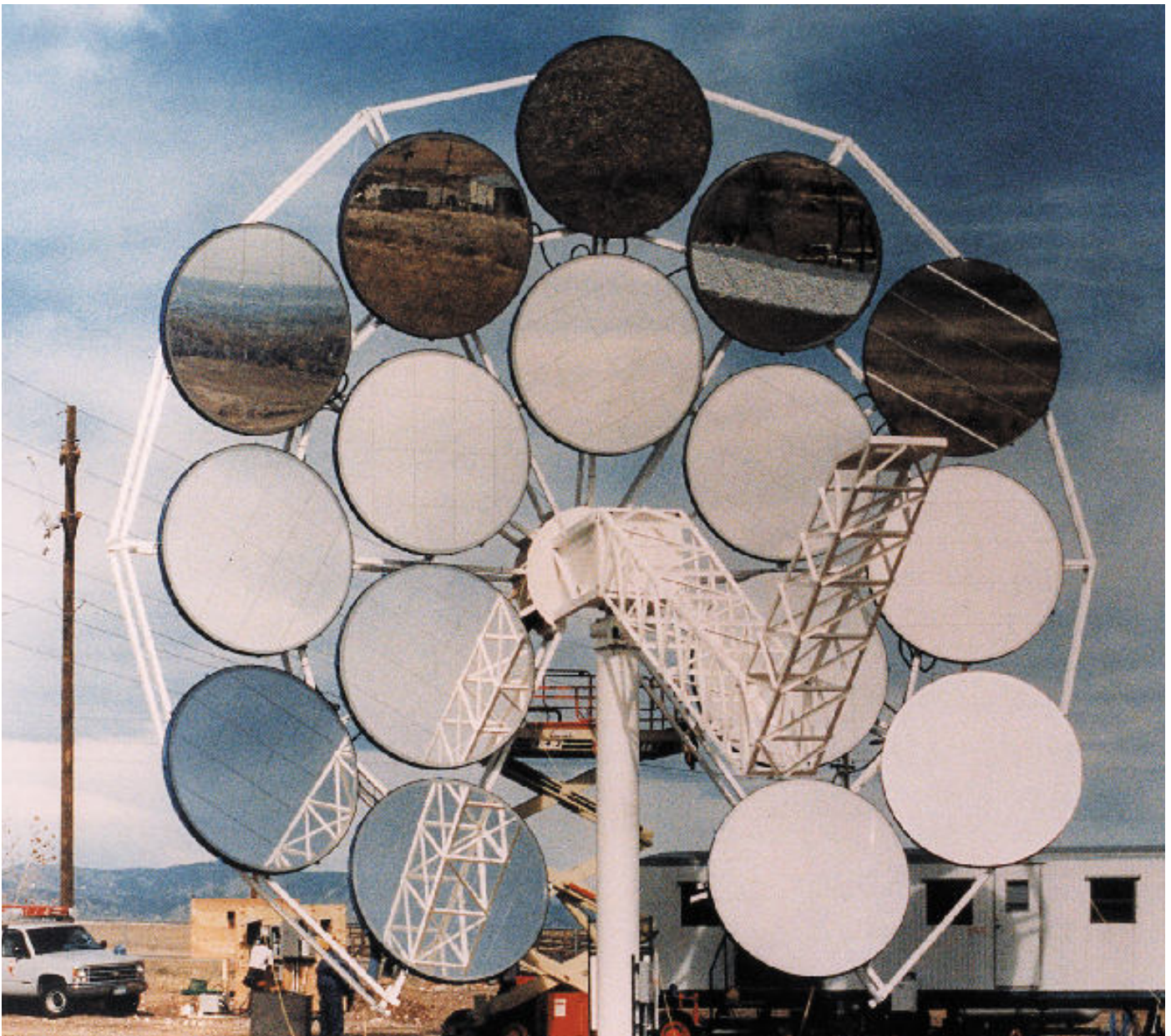
Ein System-Prototyp wurde bisher

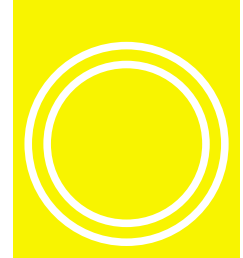
ca. 300 h solar betrieben. Die maximale Leistung betrug bei diesen Tests 21.2 kW. Die geplanten Entwicklungsarbeiten in der Phase 2 betreffen in erster Linie die Konzentrator-Nachführung, eine bessere Anpassung des

² Im Konsortium arbeitete die Firma Cummins Power Generation (CPG) mit, die ihre Entwicklungsarbeiten im Sommer 1996 einstellte; CPG beendete auch die Entwicklung von 7 kW-Dish/Stirling-Einheiten innerhalb des „Dish/Stirling Joint Venture Program“ (DSJVP).

³ Der Kostenrahmen für Phase 1 lag bei 6 Mio. US-\$, für Phase 2 sind 10 Mio. US-\$ vorgesehen; das US Department of Energy (DOE) fördert das Vorhaben mit 50%.

Abbildung 5: 25 kW_{el} SAIC Konzentrator





Receivers an die Strahlungsverteilung sowie Verbesserungen beim Stirling-Motor. Außerdem sollen einige der fünf Prototypen mit Hybrid-Receivern ausgestattet sein.

3.2 CPG 25 kW Entwicklungsvorhaben

In der ersten Phase dieses Vorhabens⁴ wurde ein azimutal aufgehängter Spiegel mit 143 m² Fläche entwickelt. 50 einzelne parabolisch gekrümmte Glas/Metall Facetten sind in zwei Reihen kreisförmig so aneinandergesetzt, daß ein Paraboloid mit einem 60°-Ausschnitt gebildet wird (Abbildung 6). Als Stirling-Motor war eine 30 kW Freikolbenmaschine vorgesehen, wegen Problemen jedoch ein kinematischer 25 kW-Stirlingmotor der Fa. Aisin Seiki eingesetzt; außerdem wurde als Backup-Lösung eine Klein-Gasturbine mit ca. 30 kW Leistung entwickelt. Ein System-Prototyp wurde gebaut und mit Stirling-Motor und Heat-Pipe-Receiver für einige Stunden betrieben. Probleme zeigten sich vor allem im Bereich des Stirling-Motors sowie des Receivers.

3.3 Dish/Stirling Joint Venture Program 7 kW (DSMP)⁵

Der Konzentrator besteht aus 24 runden Facetten, die mit einer rückseitenverspiegelten Polymerfolie bespannt sind. Ein Heatpipe-Receiver wurde erfolgreich getestet. Probleme traten im wesentlichen beim Stirling-Motor auf, der nach dem Freikolbenprinzip arbeitet. Die Fortsetzung der Arbeiten ist unklar.

3.4 SBP/Steinmüller/SOLO Dish 10 kW

In Deutschland wird zur Zeit die zweite Generation eines 9 kW Systems entwickelt. Drei Kleinserienvorläufer werden in Südspanien aufgebaut und anschließend getestet. Anschließend ist der Bau von 100 Einheiten (1 MW) geplant, die als Referenzanlage für erste Marktanwendungen dienen sollen.



Abbildung 6: 25 kW_{el} CPG Konzentrator

Der Konzentrator mit einem Durchmesser von 8,5 m (Ø 56,7 m²) wird als Metall-Membran-Spiegel ausgebildet, wobei die Vorder- und Rückseitenmembran mittels eines speziell dafür entwickelten Laser-Schweißverfahrens auf den Druckring verschweißt wird. Diese Technologie wurde bereits

Abbildung 7: SOLO-161 Stirlingmotor



erfolgreich bei dem Bau eines 150 m² Metall-Membran-Heliostaten eingesetzt und zeigte – technisch wie wirtschaftlich – sehr befriedigende Ergebnisse. Zur weiteren Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung wurde die Spiegelfläche von bisher 44,1 m² (Ø 7,5 m) auf 56,7 m² (Ø 8,5 m) vergrößert. Auf diese Weise wird ein solares Vielfaches von 1,3 erzielt, das zu einer Steigerung der Jahresenergieleistung um ca. 30% führt. Bei nur unwesentlichen Herstellungsmehrkosten des Konzentrators wird dadurch ein deutlicher Beitrag zur Reduzierung der Gesamtkosten erzielt.

Als Stirling-Motor wird weiterhin der SBP/SOLO V-160 Motor eingesetzt, der sich hinsichtlich Leistung und Zuverlässigkeit in dem Vorläufer-Projekt über 23.000 solare Betriebsstunden bewährt hat. Die Maschine wurde in allen ihren Komponenten fertigungstechnisch und kostenmäßig vollständig überarbeitet, wobei in erster Linie Kostenaspekte und die Betriebserfahrungen aus Almería und ersten BHKW-Anwendungen eingeflossen

⁴ Kostenrahmen 8 Mio. US-\$, zu 50% vom DOE gefördert.

⁵ Das 5-jährige Programm wurde 1991 vom DOE initiiert (Kostenrahmen 15 Mio. US-\$, zu je 50% vom DOE und von CPG getragen).

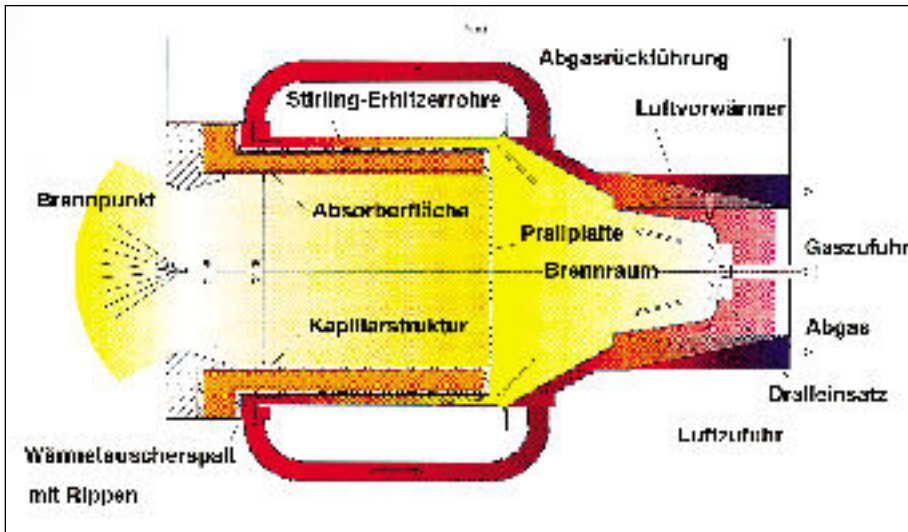
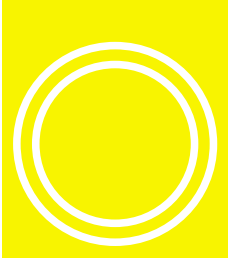


Abbildung 8: Schema des hybridisierten Heat-Pipe-Receiver

sind. Die neue Maschine mit der Typenbezeichnung SOLO-161 (Abbildung 7) wurde auf dem Prüfstand detailliert untersucht. Eine Leistungssteigerung (Wellenleistung) von fast 15% von 9,5 auf 11 kW bei einer Wirkungsgradsteigerung von zwei Prozent und einer Stabilisierung der MTBF-Zeiten auf ca. 5.000 h, sowie eine Kostenreduktion um 50% bei der Enzelfertigung wurden dabei erreicht. Der bewährte Rohrreceiver wurde an die neue Maschine angepaßt und eine Leistungsabregelung für den Überlastbereich bei hohen Einstrahlungen $> 800 \text{ W/m}^2$ eingeführt.

Für das 10 kW SBP Dish/Stirling-Systems entwickelt DLR im Rahmen einer BMBF-Förderung einen hybridbetriebenen Heat-Pipe-Receiver. Das Funktionsschema ist in Abbildung 8 dargestellt. Dem coaxialen Wärmerohr wird über die konzentrierte Solarstrahlung und/oder einen Gasbrenner Wärme zugeführt. Diese wird über die in den äußeren Mantel des Wärmerohrs eingelöteten Stirling-Erhitzerrohre an den Stirling-Motor übertragen. Die Innenwände des Wärmerohrs sind mit einer Kapillarstruktur aus feinen Maschennetzen ausgekleidet, die mit dem Wärmeträgermedium Natrium gefüllt ist. Die Betriebstemperatur liegt bei ca. 800°C . Das Wärmerohr kann eine thermische Leistung von 35 kW übertragen.⁶

Die konzentrierte Solarstrahlung wird von dem inneren Zylinder des Wärmerohrs, der Absorberfläche, absorbiert. Auf Grund des Wärmerohrprinzips

und der hervorragenden Wärmeübertragungseigenschaften des Natriums können sehr hohe Strahlungsspitzen toleriert und die ungleichmäßige Strahlungsfluvverteilung auf der Absorberfläche auf eine gleichmäßige Belastung an den Stirling-Erhitzerrohren transformiert werden. Der hinter dem Wärmerohr sitzende Gasbrenner mit einer Leistung von $40 \text{ kW}_{\text{th}}$ verbrennt den Brennstoff in einer kegelförmigen Brennkammer. Die Prallplatte trennt die Brennkammer von dem Solarreceiver-Hohlraum. Die Abgase strömen vom hinteren Ende der Heat-Pipe axial über den mit 240 Rippen bestückten äußeren Zylinder des Wärmerohrs, wobei die Wärme zum Teil direkt und zum Teil über das Wärmerohr an die Stirling-Erhitzerrohre übertragen wird. Als Brennstoff wird Erdgas bzw. Propan eingesetzt.

Der erste Hybrid-Heat-Pipe-Receiver wird zur Zeit im Labor getestet. Anschließend erfolgt ein Test im Dish/Stirling-Teststand DISCOS des ZSW unter realen Bedingungen. Im Rahmen eines von der EU geförderten Folgeprojektes wird diese Entwicklung weitergeführt. Die Schwerpunkte liegen hierbei zusätzlich auf der Entwicklung eines effizienten und schadstoffarmen Brenners, sowie auf der Entwicklung einer neuartigen Kapillarstruktur für Wärmerohre mit dem Ziel einer kostengünstigen großtechnischen Herstellung.

4. Wirtschaftlichkeit und Kosten

Die potentiellen Anwendungsbereiche

der Dish/Stirling-Technologie sind die solare bzw. solar/hybride Stromerzeugung

- im Verbundnetz, wo viele einzelne Module zu einer Farmanlage von 1 bis 10 MW zusammengefaßt werden
- im Inselnetz (Farmanlage von 0,1 bis 1 MW)
- als Einzelanlagen ohne Netzanbindung im Leistungsbereich von 10 bis 200 kW.

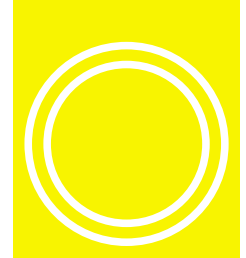
Erste Potential- und Marktanalysen [9] zeigen, daß mit einem ausgereiften Dish/Stirling-System allein im Mittelmeerraum ein mittelfristiges Potential (bis zum Jahr 2005) von 550 MW (entsprechen 55.000 Anlagen je 10 kW) wirtschaftlich erschlossen werden kann. Bei diesen Untersuchungen wurden nur netzgekoppelte Neuinstallationen bzw. Zubauten in bereits bestehenden kleinen Inselnetzen berücksichtigt. Anlagen, die in ein Verbundnetz einspeisen, wurden ebensowenig berücksichtigt wie hybridisierte Systeme und dezentrale autarke Einheiten (Bewässerungsanlagen, Pumpen, Kühlaggregate, einzelne Verbraucher, Wasserentsalzungs- bzw. -aufbereitungsanlagen).

Das für die Erschließung dieses Marktes notwendige Kostenreduktionspotential der Dish/Stirling-Systeme kann auf Grund des im wesentlichen aus konventionellen Bauteilen (Stahlbau, Elektrik, Motortechnik) bestehenden Gesamtsystems gut und sicher abgeschätzt werden (die Angaben aus der Industrie und der Forschungsinstitutionen stimmen gut überein).

Die Systemkosten⁷ für die ersten prototypischen Einheiten des SBP 9 kW Dish/Stirling-Systems lagen bei 36 TDM/kW, wobei auf das Stirlingaggregat ca. 14,4 TDM/kW entfielen (ein vergleichbarer Autoserienmotor kostet ca. 100 DM/kW); bei Serienfertigung erscheinen Systemkosten von 3–4 TDM/kW erreichbar (Abbildung 9).

⁶ Die Kapillarstruktur wurde vom Forschungsinstitut für Kerntechnik und Energiewandlung (KE) der Universität Stuttgart ausgelegt und gebaut.

⁷ Herstellkosten aller Komponenten in Deutschland, Transport nach Almería, Fundamente, Montage und Inbetriebnahme vor Ort.



Kostenschätzungen des DOE und SAIC ergaben ähnliche Werte.

Wenn man Wartungs- und Betriebskosten dieser Systeme berücksichtigt, erhält man Stromgestehungskosten, die für technisch ausgereifte Anlagen im Bereich von 40-80 Pf/kWh liegen [9]. Dabei spielen insbesondere das lokale Strahlungsangebot sowie die Art der Nutzung eine Rolle.

Damit wäre eine solche regenerative solarthermische Stromerzeugungseinheit im dezentralen Einsatz (10-10.000 kW) deutlich günstiger als alle anderen zur Zeit verfügbaren solaren Energietechnologien zur Stromerzeugung und auch günstiger als konventionelle Systeme,

wie z.B. Dieselaggregate in abgelegenen Gegenden, wo der Liter Diesel zwischen 0,50 und 1,50 DM kostet. Auch im Vergleich mit Photovoltaik-Anlagen, die ebenfalls besonders für die dezentrale Nutzung geeignet sind, haben Studien Kostenvorteile für die zukünftige Dish/Stirling-Technologie vorhergesagt [10].

Für die Markteinführung wird der Hybridisierung der Dish/Stirling-Systeme eine große Bedeutung beigemessen, da für viele potentielle Anwendungen eine gesicherte Leistungsbereitstellung gefordert ist, d. h. auch während Zeiten ohne bzw. ohne ausreichende Solarstrahlung muß trotzdem die gewünschte Leistung verfü-

bar sein. Dies gilt insbesondere für Anwendungen als autarke bzw. Inselsysteme, die gegen Dieselaggregate konkurrieren. Im Vergleich zu Photovoltaik-Anlagen weist die Dish/Stirling-Technologie den wesentlichen Vorteil auf, daß durch den bereits vorhandenen Motor die Hybridisierung kostengünstiger durchzuführen ist.

Literatur

- [1] W. B. Stine, R. B. Diver: „A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology“, Sandia Report SAND93-7026 UC-236, (1994)
- [2] R. Benz, W. Schiel, W. Friedl, J. Schlaich: „Entwicklung, Bau und Erprobung zweier Metallmembran-Solkonzentratoren mit Stirling-Energiewandler, Leistung je 50 kW_{el}“, Abschlußbericht, BMFT Forschungsvorhaben 03E8247A
- [3] C. W. Lopez, K. W. Stone: „Design and Performance of the Southern California Edison Stirling Dish“, Solar Engineering Vol. 2, ASME (1992)
- [4] W. Schiel, T. Keck, J. Kern, A. Schweitzer: „Long Term Testing of Three 9 kW Dish/Stirling Systems“, Proc. ASME Intl. Solar Energy Conf., San Francisco (1994)
- [5] W. Schiel: „Dish/Stirling Systeme – Technische Auslegung, Betriebserfahrung und Entwicklungspotential“, Solarthermische Kraftwerke zur Wärme und Stromerzeugung, VDI Berichte 704 (1988)
- [6] O. Goebel, D. Laing: „Second Generation Sodium Heat-Pipe Receiver for the USAB V-160 Stirling Engine: Development and On-Sun Test Results“, Proc. 28 th IECEC Conf. (1993)
- [7] W. Schiel, A. Schweitzer, B. Stine: „Evaluation of the 9-kW Dish/Stirling System of Schlaich Bergermann und Partner Using the Proposed IEA Dish/Stirling Performance Analysis Guidelines“, Proc. 29 th IECEC, Monterey (1994)
- [8] T. Mancini: „Dish/Stirling Development program in the USA“, Proc. 5th Task III-Meeting within IEA SolarPaces on Solar Technology and Applications, DLR, Köln
- [9] H. Klaiß, F. Staiß: „Solarthermische Kraftwerke für den Mittelmeerraum“, Springer-Verlag (1992)
- [10] J. Nitsch, H. Dienhart, F. Staiß, F. Trieb: „Dezentrale Stromversorgung mit Solarenergie im Vergleich“, VDI Berichte 1200 (1995) 93

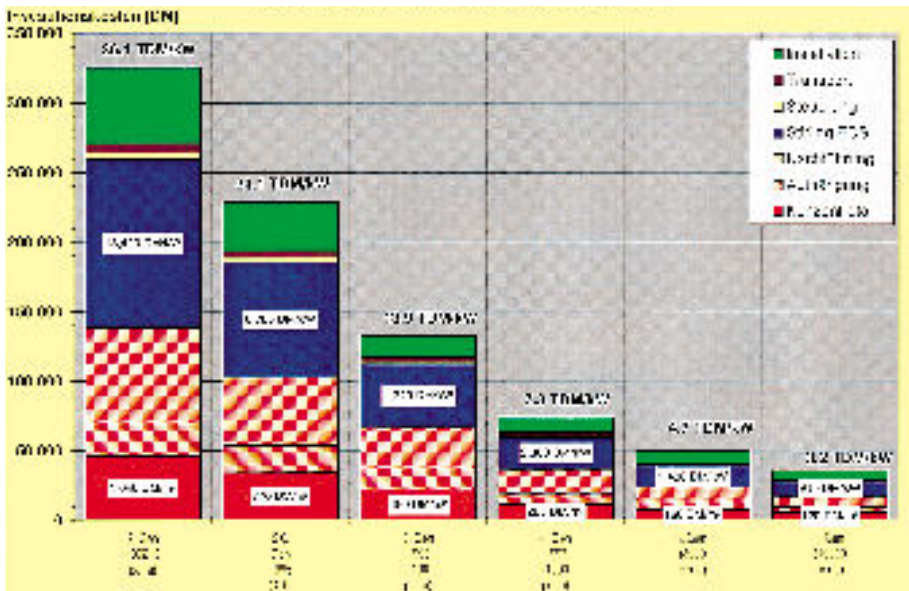


Abbildung 9: Kostenentwicklung des SBP 9 kW Dish/Stirling-Systems

Abbildung 10: Stromgestehungskosten von Dish/Stirling-Systemen

