Neues von der Stirlingmaschine: Stand der Entwicklung und Zukunftschancen

Autor(en): **Beck, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 14

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-79902

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

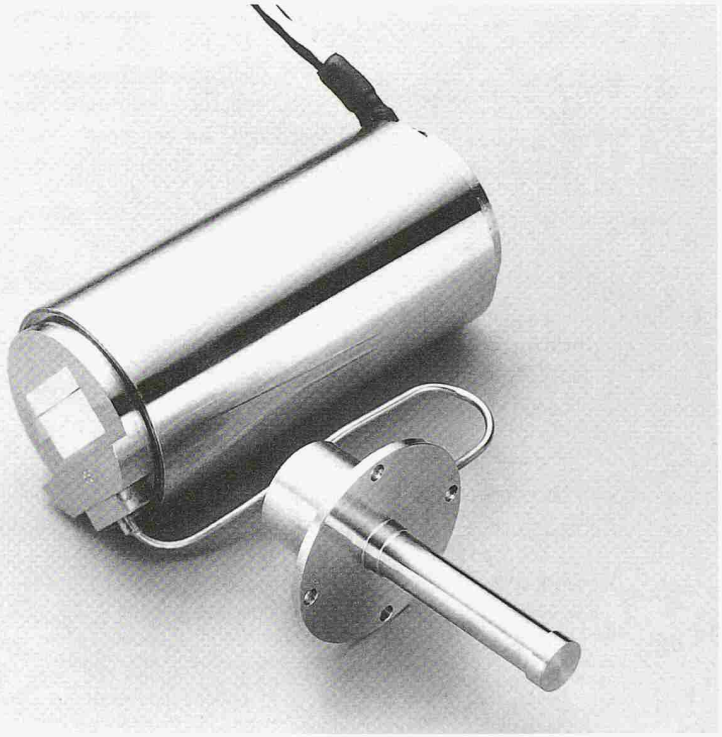
http://www.e-periodica.ch

Peter Beck, Osnabrück

Neues von der Stirlingmaschine

Stand der Entwicklung und Zukunftschancen

Bereits zum fünften Mal fand im Februar 2000 in Osnabrück das Europäische Stirling-Forum statt. Aus diesem Anlass gibt der folgende Bericht einen kurzen Überblick über den Entwicklungsstand, gegenwärtige und zukünftige Anwendungen sowie aktuelle Aufgabenstellungen bei der Fertigung von Stirlingmaschinen.



1
Miniatur-Split-Stirlingkühler, Masse l = 132 mm, Ø = 60 mm, maximale Kälteleistung 1,7 W (bei 80 K) (Bild: [1])

Die Zukunftsaussichten für die Stirlingmaschine sind besser als je zuvor. In der Forschung und Entwicklung wurde erkannt, dass wesentliche Marktchancen der Stirlingmaschine in Technikbereichen liegen, die nicht in unmittelbarer Konkurrenz zu herkömmlichen Aggregaten (zum Beispiel Otto- oder Dieselmotoren, Kaltdampfkältemaschinen) stehen oder wo der Stirlingmotor durch seine besonderen Eigenschaften den herkömmlichen Technologien zur Energieumwandlung (wie etwa Ottomotoren, Gas- und Dampfturbinenanlagen) überlegen sein kann. Als wichtigste potentielle und bestehende Anwendungsbereiche sind zu nennen:

- Wärme-Kraft-Kopplungen (WKK): zur Nutzung von Biomasse, Bio- und Deponiegasen, Prozessabwärme
- Direkte Umwandlung von Solarenergie in mechanische oder elektrische Energie (Niedertemperatur-Stirlingmotoren, Dish/Stirling-Systeme)
- U-Boot-Antriebe
- Hybrid-Antriebe von Fahrzeugen: bei geringeren Schadstoffemissionen als beim Otto- und Dieselmotor
- Kälteerzeugung im Tieftemperaturbereich (kleiner -80 °C): zur Gasverflüssigung, zur Kühlung von mikroelektronischen Bauelementen, Infrarotsensoren, Squids, Laserdioden und anderem.
- Kälteerzeugung im umgebungsnahen Temperaturbereich: wie zum Beispiel Klimakälte

Für den europäischen Raum ist neben der Tieftemperatur-Kälteerzeugung vor allem der Anwendungsbereich WKK und in Südeuropa zudem auch die direkte Umwandlung von Solarenergie in mechanische Energie oder elektrischen Strom interessant. Eine Weiterentwicklung von Stirlingmotor angetriebenen Hybrid-Fahrzeugen wird in Europa voraussichtlich von einer strengeren Reglementierung der Abgasvorschriften (wie zum Beispiel der kalifornische ULEV-Standard) abhängig sein - diese ist in Europa jedoch zur Zeit nicht in Sicht.

Verschiedene Konferenzen zur Stirlingmaschine haben gezeigt, dass es bereits heute für unterschiedliche Anwendungsbereiche hochentwickelte Stirlingmaschinen gibt, die bei einer entsprechenden Serienfertigung zu geringeren Stückkosten führen und damit einen wirtschaftlichen Einsatz ermöglichen.

Kältetechnik

Im Bereich der Tieftemperaturkühlung hat die Stirlingmaschine weltweit einen festen Platz am Markt eingenommen. Neben der Gasverflüssigung sind hier vor allem Miniatur-Stirling-Kryokühler zu nennen, die bereits heute auf dem Gebiet der Kühlung von Infrarotsensoren eine dominierende Stellung erlangt haben. Bei diesen Miniatur-Stirlingmaschinen handelt es sich um hochentwickelte, serienge-fertigte Aggregate, deren Eigenschaften wie hohe Temperaturkonstanz, hohe Betriebssicherheit, Wartungsfreiheit (!) und lange Lebensdauer (bis zu 20 000 Stunden bei 80 K sind erreicht worden) vor allem durch ihre ursprünglichen Anwendungen im militärischen Bereich gekennzeichnet sind. Ihre aktuellen Anwendungsbereiche liegen im zivilen Bereich:

- in der Medizintechnik, etwa zur Kühlung von höchstempfindlichen Magnetfeldsensoren, den sogenannten Squids
- in der Analysentechnik, wie die Kühlung von Laserdioden zur Gasanalyse
- bei Anwendungen in der Elektrotechnik: wie in der supraleitenden Antennentechnik und Mikroelektronik.

Eine Erschliessung ziviler Märkte erfordert aber eine neue Preisorientierung, da die Preise für die noch vorwiegend militärische Anwendung verhältnismässig hoch einzustufen sind.

Die Chancen für die Stirlingmaschine zur Kälteerzeugung im umgebungsnahen Temperaturbereich (Klimakälte, Kühl-

Die Stirlingmaschine

Die Stirlingmaschine ist eine Wärmekraftmaschine, in der eine konstante Gasmenge (Luft, Wasserstoff, Helium) zyklisch komprimiert und expandiert wird. Bei der Expansion wird Arbeit geleistet, die zum Beispiel über ein Kurbeltriebwerk, eine Membran oder einen Stromgenerator ausgekoppelt wird. Die Funktion lässt sich für einen Stirlingmotor durch den folgenden realen Kreisprozess beschreiben.

- *Verdichtung*: In einem Zylinder wird das Arbeitsgas bei niedriger Temperatur komprimiert. Die bei der Verdichtung entstehende Wärme wird über einen Kühler abgegeben.
- *Überschieben zum Expansionsraum*: Das Arbeitsgas wird vom Kompressionsraum durch den Kühler in den Regenerator und weiter über den Erhitzer in den Expansionsraum geschoben. Hierbei bleibt das eingeschlossene Gasvolumen zwar näherungsweise konstant, es nimmt jedoch im Regenerator (der meist aus feinen Drahtgewebelagen besteht) und im Erhitzer (Rohrbündel Wärmeübertrager, der von aussen mit einem Wärmestrom beaufschlagt wird) Wärme auf.
- *Expansion*: Bei der Expansion wird nutzbare Arbeit geleistet. Der während der Expansion zuzuführende Wärmestrom wird dem Arbeitsgas über den Erhitzer zugeführt.
- *Überschieben in den Kompressionsraum*: Abgeschlossen wird der Kreisprozess durch eine Volumenverschiebung, bei der das Arbeitsgas vom Expansionsraum durch die Wärmeübertrager (Erhitzer, Regenerator, Kühler) zum Kompressionsraum bewegt wird. Hierbei wird im Regenerator und im Kühler Wärme abgegeben, so dass sich das Arbeitsgas auf die Kompressionsraumtemperatur abkühlt.

Da dieser Kreisprozess auch umkehrbar ist, lässt sich die Stirlingmaschine in Verbindung mit einem zusätzlichen Antrieb auch als Wärmepumpe beziehungsweise als Kältemaschine einsetzen.

Moderne Stirlingmaschinen erreichen als Antriebsaggregat Wirkungsgrade von mehr als 30%. Sie zeichnen sich durch ein gleichmässiges Drehmoment und einen leisen, vibrationsarmen Betrieb aus. Da die Wärmezufuhr extern erfolgt, können Schadstoffemissionen durch eine geeignete Wahl von Brennern und Brennstoffen minimiert werden. Nachteile sind die hohen Fertigungskosten, da eine entsprechende Serienproduktion noch weitgehend fehlt. Mit den hohen Arbeitstemperaturen und -drücken sind Material- und Dichtungsprobleme verbunden, die jedoch weitestgehend lösbar sind.

schränke, Kühlhäuser) sind gegenwärtig nur schwer abschätzbar. Dies ist durch die grosse Konkurrenz von seit langem etablierten sowie weiter- und hoch entwickelten Kaltdampf-Kälteanlagen begründet. Der Markt für Kühlanlagen im umgebungsnahen Temperaturbereich (Supermärkte, Kühlschränke, Prozesskühlung und anderes mehr) ist jedoch gross genug, so dass in Grossserie produzierte Stirlingkältemaschinen abgesetzt werden könnten. Stirlingmaschinen zur Kälteerzeugung im umgebungsnahen Temperaturbereich könnten in Zukunft einen wichtigen Beitrag als Alternative zu herkömmlichen Kältemaschinen mit umweltgefährdenden Kältemitteln leisten. In diesem Zusammenhang wird seit Januar 1998 am Institut für angewandte Thermodynamik und Klimatechnik der Universität Essen eine Stirlingkältemaschine als Kühlaggregat für Supermärkte entwickelt. Das Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung einer Stirlingkältemaschine mit einer Leistung von maximal 10 kW für Temperaturen bei minus 35 °C zu einem marktreifen Produkt. Erste Ergebnisse zeigen, dass diese Stirlingkältemaschine, die das umweltfreundliche Arbeitsgas Helium nutzt, den Wettbewerb mit konventionellen einstufigen Kaltdampf-Kältemaschinen aufnehmen kann.

Kraft und Wärme

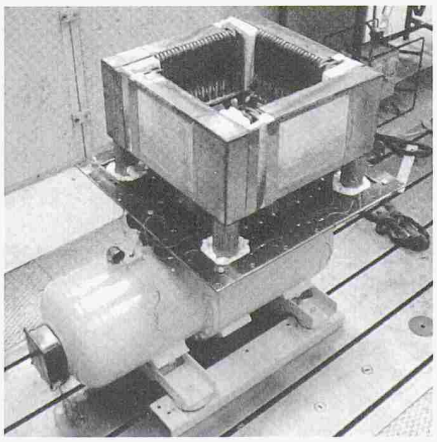
Im Bereich der WKK zeichnet sich in Mitteleuropa durch den Einsatz von festen Brennstoffen (Biomasse) eine Einsatznische für Stirlingmotoren ab. Hinsichtlich niedriger Emissionen und flexibler Verwendung unterschiedlicher Brennstoffe stellt der Stirlingmotor für den Leistungsbereich bis etwa 200 kW eine hoffnungsvolle Technologie-Alternative dar. Dieser Anwendungsbereich ist vor allem für Industriezweige interessant, die einen hohen Anfall an Holzabfällen bei einer kontinuierlichen Stromgrundlast aufweisen (zum Beispiel in der Möbelindustrie). Hinzu kommt, dass der Einsatz von Energieträgern wie etwa Biomasse (Holzschnitzel, Raps und ähnliches) durch seine tendenziell CO_2-neutrale Verbrennung eine Verminderung des Treibhauseffektes bewirkt und Ressourcen schont. Da alternative Technologien zur Verstromung von Biomasse erst ab etwa 500 kW Leistung zur Verfügung stehen (wie bei Dampfkolbenmotoren und Dampfturbinenanlagen) ist der Stirlingmotor in Verbindung mit einer Biomasse-Feuerung im kleineren Leistungsbereich nahezu konkurrenzlos.

Bei der Verwendung gasförmiger Brennstoffe wie Deponiegas und Biogas können beim Stirlingmotor-Blockheizkraftwerk aufgrund der äusseren Verbrennung im Gegensatz zum Ottomotor Abgasschadstoffe (wie etwa CO_2 und unverbrannte Kohlenwasserstoffe) weitgehend vermieden werden.

Sonnenenergie

Für eine solare Stromerzeugung in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung im Leistungsbereich von ungefähr 10 kW bis 10 MW ist das Dish/Stirling-System eine der aussichtsreichsten Technologien.

Allein für die Mittelmeeranrainerstaaten belegen erste Marktanalysen ein Potential von mehr als 550 MW. Kostenschätzungen zeigen, dass bei entsprechender Serienfertigung ein Kostenniveau von 3000–4000 Franken pro installiertem kW erreicht werden kann [5]. Damit erreichen die spezifischen Stromerzeugungskosten



2
Biomasse-Stirlingmaschine mit vier Erhitzerköpfen zur Strahlungsaufnahme in einer quadratischen Brennkammer. Leistung der Maschine etwa 35 kW_{el}. (Entwicklung: Technical University of Denmark; Bild: [3])

von Dish/Stirling-Anlagen die Grössenordnung von heutigen dezentralen Dieselanlagen gleicher Leistung, die zur Zeit die Stromversorgung in diesen Bereichen sicherstellen. Hier könnte mit der schadstoffarmen und ressourcenschonenden Stirling-Technologie ein neuer Exportmarkt für die Industrienationen erschlossen werden. Die erreichbaren Systemwirkungsgrade liegen im Bereich von 20–30%, mittlere Tageswirkungsgrade von 16–25% (Sonne in Strom) und liegen damit höher als bei konventionellen Photovoltaikanlagen. Die Dish/Stirling-Technologie ist somit die zur Zeit effizienteste solare Technologie [5].

Da der Stirlingmotor im Gegensatz zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren extern beheizt wird, bietet er die Möglichkeit, die Wärme nicht nur über direkte Solarstrahlung zu beziehen sondern auch - zum Beispiel nach Sonnenuntergang - von einem Brenner (Erdgas, Erdöl, nachwachsende Brennstoffe wie zum Beispiel Rapsöl, Biogas und so weiter). Dieser Hybridbetrieb des Dish/Stirling-Systems führt zu einer erhöhten Verfügbarkeit der Anlage sowie durch die vergrösserte Anzahl der Jahresbetriebsstunden zu einer weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und zur Verkürzung der Amortisationsdauer des Systems. Die potentiellen Anwendungsbereiche für diese Technologie sind die solare oder solar/hybride Stromerzeugung im:

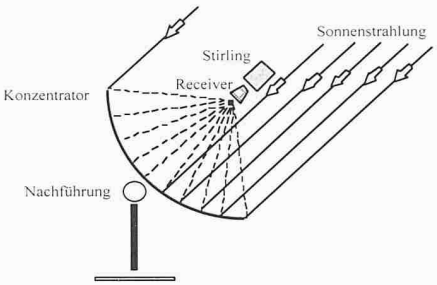
- Verbundnetz, wo viele einzelne Module zu einer Anlage von 1 bis 10 MW zusammengefasst werden
- Inselnetz (Anlagen von 0,1 bis 1 MW)
- Einzelanlagen (Stand-alone-System) ohne Netzanbindung im Leistungsbereich von 10 bis 200 kW.

Für die direkte Umwandlung von Solarenergie in mechanische Energie - etwa zum Antrieb von Wasserpumpen - ist der Niedertemperatur-Stirlingmotor interessant. Die Absicht, brauchbare solar angetriebene Pumpensysteme für Entwicklungsländer zu finden, führte nicht zuletzt aufgrund des einfachen Aufbaus und der möglichen Reproduzierbarkeit der Komponenten zur Weiterentwicklung des Niedertemperatur-Stirlingmotors.

Gegenwärtig werden von verschiedenen Herstellern Feldtests für Motoren im Leistungsbereich von etwa 50 bis 200 W durchgeführt. Die erforderliche Temperaturdifferenz zwischen Erhitzer- (Kollektor) und Kühlerseite beträgt etwa 40 bis 80 K, je Quadratmeter Einstrahlfläche werden ungefähr 50 W mechanische Leistung abgegeben. Der Motor kann vor allem dort eingesetzt werden, wo mechanische Energie im kleinen Leistungsbereich benötigt wird, eine ausreichende Sonnenscheindauer vorhanden ist und ein möglichst wartungsarmer Betrieb gewünscht ist.

Der Stirlingmotor im Fahrzeug

Obwohl Otto- und Dieselmotor einen inzwischen bemerkenswerten Entwicklungsstand erreicht haben und ihr Platz im Automobil langfristig gesichert sein wird, ist dennoch der Aufwand, der zur Erfüllung von Abgas- und Geräuschvorschriften nötig ist, augenfällig. Der reine Elektroantrieb stellt zwar eine mögliche Lösung dar, jedoch ist die noch unbefriedigend gelöste Speicherung der elektrischen Energie ein entscheidender Nachteil. Aus diesem Grund wird heute weltweit an der Umsetzung des Hybridantriebes gearbeitet, der Kombination von Verbrennungsmotor, Generator und Elektromotor. Neue Emissionsrichtlinien für Automobile machen neben dem Einsatz von Otto- und Dieselmotor im Hybrid-PKW auch Alternativen wie den Stirlingmotor attraktiv.

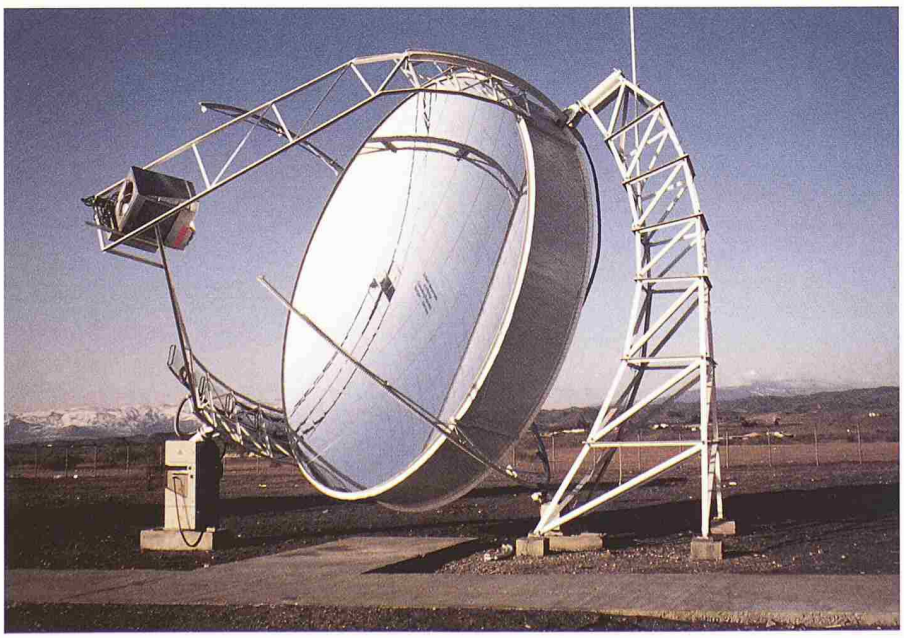


3
Schematische Darstellung eines Dish/Stirling-Systems [5] (Bild: Schlaich Bergermann und Partner)

Die positiven Eigenschaften des Stirlingmotors, seine geringen Abgas- und Geräuschemissionen, und seine Flexibilität gegenüber den unterschiedlichsten Brennstoffen haben in den vergangenen fünfundzwanzig Jahren immer wieder dazu geführt, dass Stirlingmotoren als Hybridantrieb von Fahrzeugen (PKW und Omnibusse) entwickelt wurden. Verschiedene aktuelle Arbeiten lassen erwarten, dass der Stirlingmotor auch in Zukunft eine Rolle bei Hybridfahrzeugen spielen kann.

U-Boot-Antriebe

Ein weitaus weniger bekanntes Einsatzgebiet, in dem der Stirlingmotor jedoch bereits Marktreife erlangt hat, ist der Antrieb von Unterseebooten während der Tauchfahrt. Hier sind vor allem zwei



4
9 kW Dish/Stirling-Einheit auf der Plataforma Solar in Almeria, Spanien, Entwicklung [5] (Bild: Schlaich Bergermann und Partner)

positive Eigenschaften des Stirlingmotors für seinen Einsatz ausschlaggebend: sein ruhiges geräuscharmes Laufverhalten und die Tatsache, dass die dem Erhitzer zugeführte Wärme nicht unbedingt aus einer Verbrennung mit Luft erzeugt werden muss. Dadurch kann das sonst notwendige Auftauchen zum Luftholen vermieden werden, was zu längeren Tauchzeiten und damit auch zu geringerer Entdeckungsgefahr führt.

Tests von Stirlingmotoren haben die Eignung als Unterseebootantrieb bestätigt und das steigende Interesse von Ländern wie Japan, Australien, Kanada und Grossbritannien zeigt, dass ein wachsender Markt zu erwarten ist. Ein schwedisches Unternehmen hat sich durch den Export von U-Booten mit Stirlingmotoren verpflichtet, diese für einen Zeitraum für mehr als 30 Jahre zu bauen. Der Antrieb erfolgt üblicherweise hybrid (Stirlinggenerator-Elektromotor-Einheit) die Leistungen liegen bei 75-100 kW je Antriebsmodul [6].

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Obwohl viele Stirlingmaschinen heute eine hohe technische Reife mit erzielbaren guten Wirkungsgraden erreicht haben, bestehen noch Defizite in der Herstellung von Komponenten aus der Peripherie der Maschine. Hier ist zum Beispiel das Zusammenwirken von Brenner und Erhitzerkopf zu nennen. Probleme wie Materialermüdung, Korrosion bei aggressiven Gasen und unerwünschte Ablagerungen an den Erhitzerköpfen bei der Feststoffverbrennung sind nur einige Hindernisse, die gegenwärtig noch zu hohen Entwicklungs-, Erprobungs- und Fertigungskosten von Stirlingmaschinen insbesondere bei der WKK führen. So ist zur Überwindung von Problemen, die ein Hersteller von Stirlingmaschinen oft selbst nicht hinreichend lösen kann (wie etwa die Anwendung effektiver Löttechniken für Wärmeübertrager) verstärkt die Einbeziehung von Zulieferbetrieben gefragt. Auch im Bereich der Steuer- und Regeltechnik zum Aufladen und zur Überwachung, der Leistungsregelung sowie zum Abschalten einer Stirlingmaschine ist von Entwicklern und Herstellern der Wunsch nach mehr Information und Kooperation geäussert worden.

Fazit

Die Stirlingmaschine ist heute technologisch beherrschbar. Wichtige Probleme, die über lange Zeit die Entwicklung von Stirlingmaschinen verzögert haben, wie zum Beispiel die Abdichtung bewegter Teile zum Kurbelgehäuse können als gelöst betrachtet werden. Anwendungsbereiche sind vor allem die Einsatzgebiete, in denen die Stirlingmaschine den herkömmlichen Aggregaten durch ihre besonderen Eigenschaften, wie zum Beispiel eine emissionsarme äussere Verbrennung und ein wartungsarmer Betrieb, überlegen ist.

Viele Entwickler und Hersteller von Stirlingmaschinen haben daher gegenwärtig einen Stand erreicht, in dem der Übergang vom fertigen und laborgetesteten Prototypen zum serienreifen Aggregat erfolgt. Damit wird jedoch auch eine verstärkte Zusammenarbeit im Verbund mit Zulieferindustrien notwendig.

Hier könnten im Rahmen von Kontaktveranstaltungen über die Zielsetzung bisheriger Konferenzen hinaus gezielt Problemfelder der Anlagenhersteller aufgegriffen und die daraus resultierenden Themen vor allem zum Zweck der Anbahnung von möglichen Firmenkooperationen dargestellt werden. Dieses Ziel hat sich auch das Europäische Stirling-Forum 2000 gesetzt. Die Konferenz wurde in Zusammenarbeit mit Instituten und Unternehmen aus Deutschland und den Niederlanden veranstaltet und durch das Interreg-II «People-to-People Aktionsprogramm» der Europäischen Union gefördert.

Adresse des Verfassers:
Peter Beck, Dipl.-Ing., Ecos GmbH, Westerbreite 7, D-49084 D-Osnabrück

Literatur

[1] *Laschütza, H., Bareiss, M.*: Technischer Stand von Miniatur-Stirling-Kühlern zur Kühlung von Tieftemperaturelektroniken. Tagungsband des Europäischen Stirling-Forums 1996

[2] *Binneberg, A.*: Konstruktion und erste Erprobungsergebnisse einer Stirling-Kältemaschine für eine Kühlleistung von 15 W bei 80 K. Tagungsband des Europäischen Stirling-Forums 1996

[3] *Carlsen, H.*: Status and prospects of small-scale power production based on Stirling engines - Danish experiences. Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering, 1998

[4] *Baumüller, A.*: Anwendungen und Märkte für stationäre Stirlingmaschinen heute - Aufbau der Heizkraft-Module und Solarmaschinen auf der Basis des Solo Stirling 161. Tagungsband des Europäischen Stirling-Forums 1996

[5] *Schiel, W.*: Übersicht über die Solare Dish/Stirling Entwicklung. Tagungsband des Europäischen Stirling-Forums 1996

[6] *Schiefelbein, K.; Siegel. A.*; Winnesberg, B.; Bruckmann, O.: Studie über den Stand der Stirling-Maschinen Technik. Universität GH Essen 1995

Europäisches Stirling-Forum 2000

Weitere Informationen zum Forum erhalten Sie unter folgender Adresse: c/o Ecos GmbH, Westerbreite 7, D-49084 Osnabrück, Tel.: 0049/541 9778 200, Fax: 0049/541 9778 202, E-Mail: info@ecos-consult.com, homepage: www.ecos-consult.com