

**Fritz Steimle (Hrsg.)**

# **Stirling-Maschinen- Technik**

**Grundlagen, Konzepte und Chancen**

**Autoren: Kai Schiefelbein  
André Siegel  
Björn Winnesberg**



**C. F. Müller Verlag Heidelberg**

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. Theorie des Stirling-Prozesses	3
1.1 Der ideale Stirling-Prozeß	3
1.2 Abweichungen vom idealen Stirling-Prozeß	9
1.3 Der Schmidt-Zyklus	14
1.4 Elementare Hilfsmittel für die Stirling-Maschinen-Analyse	23
1.5 Literaturverzeichnis	27
2. Maschinentypen	29
2.1 Bauarten von Stirling-Maschinen	29
2.2 Stirling-Maschinen mit kinematischem Getriebe	37
2.3 Freikolben-Stirling-Maschinen	43
2.4 Literaturverzeichnis	51
3. Berechnung von Stirling-Maschinen	53
3.1 Klassifizierung verschiedener Berechnungsverfahren	53
3.2 Der ideale Stirling-Zyklus	55
3.3 Der ideale adiabate Stirling-Zyklus	57
3.4 Simulationsprogramme dritter Ordnung	61
3.4.1 Mathematisches Modell einer Stirling-Maschine	61
3.4.2 Bilanzgleichungen für ein Volumenelement einer Stirling-Maschine	63
3.4.2 Berechnung der Druckverluste in Stirling-Maschinen	65
3.4.4 Berechnung des Wärmeübergangs in Stirling-Maschinen	72
3.4.5 Berechnung der Volumenänderung in den Arbeitsräumen	75
3.4.6 Numerische Lösungsverfahren für Stirling-Maschinen Simulationsprogramme	75
3.4.7 Ergebnisse von Stirling-Maschinen Simulationsprogrammen	76
3.4.8 Zusammenfassung und Ausblick	81
3.5 Literaturverzeichnis	84
4. Bauelemente in Stirling-Maschinen	87
4.1 Getriebe- und Zylinderbereich	88
4.1.1 Elemente des Kurbelgehäuses	88
4.1.2 Elemente im Zylinderbereich	93

4.2 Wärmeübertrager in Stirling-Maschinen	103
4.2.1 Wärmeübertrager zur Wärmeabgabe	104
4.2.2 Regeneratoren	107
4.2.3 Wärmeübertrager zur Wärmeaufnahme	113
4.2.4 Vorwärmer und Vorkühler	116
4.3 Literaturverzeichnis	118
5. Stirling-Maschinen bis 1984	121
5.1 Stirling-Maschinen im 19. Jahrhundert	121
5.2 Stirling-Maschinen im 20. Jahrhundert	128
5.2.1 Stirling-Maschinen von Philips	128
5.2.2 Philips-Lizenznehmer	160
5.2.3 Andere Stirling-Maschinenhersteller	174
5.3 Abschließende Bemerkung	182
5.4 Literaturverzeichnis	182
6. Anwendungsfelder für Stirling-Maschinen	185
6.1 Der Stirling-Motor im Automobil	189
6.1.1 Das "Automotive Stirling Engine Development Program"	190
6.1.2 Die Arbeiten von STM	201
6.1.3 Die Arbeiten von TEM	207
6.1.4 Zusammenfassung und Ausblick	208
6.1.5 Literaturverzeichnis	209
6.2 Der Stirling-Motor in der Kraft-Wärme-Kopplung	211
6.2.1 Die Arbeiten der Firma Solo	216
6.2.2 Die Arbeiten der Firma Heidelberg Motor GmbH	220
6.2.3 Die Arbeiten der Firma Ecker	222
6.2.4 Die Arbeiten der Firma Herrmann	228
6.2.5 Die Arbeiten von MTI	230
6.2.6 Die Arbeiten von Sanyo	234
6.2.7 Zusammenfassung und Ausblick	237
6.2.8 Literaturverzeichnis	241
6.3 Wärmepumpen mit Stirling-Motor-Antrieb	243
6.3.1 Die Arbeiten von Mitsubishi und der Osaka Gas Corporation	250
6.3.2 Aktivitäten von Tokyo Gas und Aisin Seiki	252

6.3.3 Arbeiten von Toshiba	256
6.3.4 Aktivitäten der Mechanical Technology Incorporated und des Oak Ridge National Laboratory	261
6.3.5 Zukunftsaussichten des Stirling-Motors als Wärmepumpenantrieb	263
6.3.6 Literaturverzeichnis	263
6.4 Dish/Stirling-Systeme	265
6.4.1 Funktionsweise von Dish/Stirling-Systemen	266
6.4.2 Dish/Stirling-Systeme bis 1988	272
6.4.2.1 Das Vanguard I 25 kW <sub>el</sub> System	272
6.4.2.2 Das McDonnell Douglas 25 kW <sub>el</sub> System	279
6.4.2.3 Das Schlaich Bergermann Partner 50 kW <sub>el</sub> Dish/Stirling-System	280
6.4.3 Aktuelle Dish/Stirling-Systeme	284
6.4.3.1 Das Schlaich Bergermann Partner 9 kW <sub>el</sub> Dish/Stirling-System	284
6.4.3.2 Das Cummins Power Generation 7.5 kW <sub>el</sub> System	295
6.4.3.3 Das Aisin Seiki Dish/Stirling-System	302
6.4.3.4 Das Stirling Thermal Motors 25kW <sub>el</sub> Solarenergie-Wandlungssystem	304
6.4.3.5 Sunset Powerstation	305
6.4.4 Überblick über die Dish/Stirling Technologie	308
6.4.5 Ausblick auf die Zukunft von Dish/Stirling-Systemen	311
6.4.6 Literaturverzeichnis	312
6.5 Unterseeboote mit Stirling-Motor-Antrieb	315
6.5.1 Besondere Anforderungen von U-Booten an die Antriebseinheit	315
6.5.2 Vergleich der möglichen Tauchfahrt-Antriebssysteme für nicht nuklear betriebene U-Boote	317
6.5.2.1 Energiequellen für einen Stirling-Motor in einem U-Boot	320
6.5.2.2 Die Abgasbehandlung in einem U-Boot	323
6.5.3 Entwicklungen von U-Booten mit Stirling-Motoren	324
6.5.3.1 Japanische Stirling-U-Boot Entwicklung	324
6.5.3.2 Die U-Boot Aktivitäten von Kockums Submarine Systems AB	328
6.5.4 Die Zukunft des Stirling-Motors im U-Boot-Einsatz	337
6.5.5 Literaturverzeichnis	337
6.6 Die Stirling-Maschine in der Kältetechnik	339
6.6.1 Miniatur-Kryokühler zur Kühlung von Sensoren und Elektronikbauteilen	341
6.6.2 Stirling-Kryokühler für die Gasverflüssigung	357
6.6.3 Stirling-Kältemaschine für die Kältetechnik bei umgebungsnahen Temperaturen	371
6.6.4 Zusammenfassung und Ausblick	394

---

6.6.5 Literaturverzeichnis	400
6.7 Sonderanwendungen von Stirling-Maschinen	405
6.7.1 Freikolben-Motoren für den Weltraumeinsatz	405
6.7.2 Stirling-Motoren mit Biomassefeuerung	413
6.7.3 Niedertemperatur Stirling-Maschinen	420
6.7.4 Die Zukunft der Stirling-Maschine in Sonderanwendungen	422
6.7.5 Literaturverzeichnis	423
7. Ausblick	425
Index	433
Formelverzeichnis	439
Anhang	443