

Ulrich E. Stempel

**FRANZIS**  
EXPERIMENTE



# Experimente mit dem Stirlingmotor

- Über 100 Experimente und Schritt-für-Schritt-Anleitungen rund um den Stirlingmotor
- Experimente mit dem Stirlingmotor als Motor, Wärmepumpe und Kühlmaschine
- Praxisanwendungen der Stirlingtechnik

# Vorwort

Stirlingmotoren sind Wärmekraftmaschinen, die, im Gegensatz zu Explosionsmotoren, ohne innere Verbrennung arbeiten. Mechanische Energie wird durch Gasdruck (Luftdruck) bereitgestellt. Es können die unterschiedlichsten Wärmequellen genutzt werden, um den Motor anzutreiben, so alle flüssigen, festen und gasförmigen Brennstoffe. Stirlingmaschinen sind wie kein anderer Energiewandler in der Lage, Solarenergie und nachwachsende Brennstoffe emissionsarm und klimaneutral für unsere Zwecke umzuwandeln.

Die unterschiedlichen Konstruktionen von Stirlingmotoren haben ein Grundprinzip gemeinsam: Es gibt eine warme und eine kalte Seite. Dadurch, dass beide Seiten im Wechsel genutzt werden, kann mechanische Energie bereitgestellt werden.

Ich benutze absichtlich nicht den Begriff „erzeugt“, denn es findet immer nur eine Umwandlung der Energieform statt. Seit Stirling – und eigentlich auch schon viel früher – wurden zahlreiche Maschinen, denen dieses Prinzip zugrunde liegt, erfunden und entdeckt. Es wurden immer wieder neue, speziellere Formen ausgetüftelt sowie mit unterschiedlichen Arbeitsmedien wie Luft, Wasserstoff, Helium, Gasgemischen und sogar mit flüssigen Medien experimentiert.

Die Funktion der Stirlingmaschine ist mit dem vorliegenden Buch leicht nachzuvollziehen. Ich lade Sie ein, die Umsetzung mit einfachsten Materialien und Werkzeugen gemeinsam anzugehen und anhand der Experimente und funktionierenden Modelle eigene Erfahrungen zu machen. Die im Buch verwendeten Bauteile lassen sich kostengünstig einkaufen oder können zum Teil auch kostenfrei aus recycelten Materialien, wie z. B. von defekten Computern, stammen.

Mit den im Buch aufgezeigten Bauanleitungen erfahren Sie auf spielerische Weise das Funktionsprinzip und bringen nebenbei Ihren Stirlingmotor zum Laufen. Die Bauanleitungen wurden bewusst so ausgearbeitet, dass Spezialwerkzeuge und – nicht für jeden zugängliche – Arbeitsverfahren, z. B. Schweißen oder die Herstellung von feinmechanischen Drehteilen, nicht erforderlich sind.

Auf zu viel trockene Theorie, Fremdwörter und komplizierte Erklärungen habe ich hier bewusst verzichtet. Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Durchlesen und Experimentieren und mit Ihren eigenen, ganz besonderen Stirlingmotoren.

Ihr Ulrich Stempel

## Wichtige Hinweise:

- Die Konstruktionen, Schaltungen und technischen Angaben in diesem Buch wurden vom Autor mit großer Sorgfalt erforscht und entwickelt, getestet, verbessert und zusammengestellt. Fehler sind dennoch nicht gänzlich auszuschließen. Verlag und Autor müssen weisen deshalb darauf hin, dass sie weder eine Garantie noch juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für Folgen, die auf fehlerhafte Angaben oder Experimente zurückzuführen sind, übernehmen können. Für die Mitteilung bezüglich eventueller Fehler sind Autor und Verlag jedoch dankbar.
- Einige der Anwendungen und Verfahren in diesem Buch sind vom Autor selbst entwickelt oder weiterentwickelt worden. Weitere wiedergegebene Konstruktionen, Schaltungen und Verfahren werden ohne Rücksicht auf die Patentlage mitgeteilt. Sie sind ausschließlich für Amateur- und Experimentierzwecke bestimmt und dürfen nicht gewerblich genutzt werden. Bei gewerblicher Nutzung ist vorher die Genehmigung des Autors oder der möglichen Lizenzinhaber einzuholen.
- Schützen Sie sich bei den entsprechenden Arbeiten. Es ist wichtig, bei Bohr- und Sägearbeiten eine Schutzbrille und bei Arbeiten mit heißen Metallen und scharfen Blechen Handschuhe zu verwenden.
- Lötdämpfe können giftig sein! Es gibt aber auch „umweltfreundliches“ Lötzinne z. B. mit der Bezeichnung Sn 60 Pb32 Cu2 oder weitere bleifreie Lötzinne.
- Beim Umgang mit Maschinen sollten die Sicherheitshinweise berücksichtigt werden. So ist es z. B. sinnvoll, kleinere Metallteile beim Bohren in einen Maschinenschraubstock einzuspannen oder mit einer Zange zu fixieren.
- Beim Umgang mit Spannung und Strom, vor allem ab 42 V Gleichspannung und bei der 230 V Wechselspannung aus dem Stromnetz, sowie im Umgang mit Feuer sollten Sie die notwendige Sorgfalt und Vorsicht walten lassen.

# Inhalt

<b>1 Grundlagen zum Stirlingmotor</b> .....	11
1.1 Prinzip und Wirkungsweise .....	11
1.2 Grundbegriffe zur Stirlingmaschine .....	13
1.2.1 Theoretische Grundlagen .....	14
1.2.2 Praktische Eigenschaften des Stirlingmotors .....	20
1.3 Systemvarianten .....	22
1.3.1 Alpha-Typ .....	22
1.3.2 Beta-Typ .....	23
1.3.3 Gamma-Typ .....	23
1.3.4 Ringbom-Typ .....	24
1.3.5 Thermoakustischer Stirlingmotor .....	25
<b>2 Grundmodelle, Komponenten und Grundexperimente</b> .....	27
2.1 Komponenten des Modellmotors .....	27
2.2 Basisplatten: obere und untere Grundplatte .....	28
2.3 Verdrängerzylinder und -kolben .....	30
2.3.1 Praktische Funktion und Wirkungsweise der Verdrängerkolben ...	32
2.3.2 Verdrängerkolben für den Niedertemperaturstirling herstellen ....	33
2.3.3 Verdrängerkolben für den Mitteltemperaturstirling herstellen .....	34
2.4 Der Regenerator bringt besseren Wirkungsgrad .....	41
2.5 Dichthülsen und Gleitlager .....	42
2.6 Die Pleuelwelle, schnell gebogen .....	44
2.7 Pleuel aus Messingdraht gebogen .....	50
2.8 Arbeitskolben und -zylinder .....	54
2.8.1 Membran, dicht und flexibel .....	55
2.8.2 Materialien für den Arbeitszylinder .....	58
2.9 Das Schwungrad zum Energieausgleich .....	61
2.9.1 Kunststoffschwungrad .....	62
2.9.2 Das Metallschwungrad .....	64
2.9.3 Ausgleichsgewichte für das Schwungrad .....	67
2.9.4 Propeller zum Schwungrad .....	69
2.10 Heizuntersatz .....	70
2.10.1 Praktischer Heizuntersatz mit Halogenlicht .....	72
2.10.2 Heizuntersatz mit Teelicht/Spiritusbrenner .....	75

<b>3</b>	<b>Modellstirlingmotoren</b>	80
3.1	Modellbausatz mit Pappe	81
3.2	Modifiziertes Pappmodell	104
3.3	Handstirling	107
3.4	Dosenstirling für den Mitteltemperaturbereich	123
3.4.1	Herstellungsschritte Dosenstirling	124
3.4.2	Experimente mit dem Dosenstirling	139
3.5	Stirlingmodell mit Power	144
<b>4</b>	<b>Grundlagen zur Leistungssteigerung</b>	156
4.1	Maßnahmen zur Leistungssteigerung	157
4.1.1	Diskontinuierliche Verdrängersteuerung	160
4.1.2	Niedertemperaturstirling zur Energieausnutzung	161
<b>5</b>	<b>Stirlingmotoren und das Messlabor</b>	163
5.1	Drehzahl des Stirlingmotors messen	163
5.2	Temperaturmessung unten – oben, Temperaturdifferenz	167
5.3	Messungen mit dem PC	172
<b>6</b>	<b>Praktische Nutzung von Stirlingmodellen</b>	178
6.1	Elektrischer Strom vom Stirlingmodell	180
6.2	Strom für eine LED-Beleuchtung	181
6.3	Spannungswandler für den Stirling	185
6.4	Antrieb einer Wasserpumpe mit dem Stirling	190
6.5	Influenz/Hochspannung mit dem Stirling	192
6.6	Experimente mit Wärmepumpe/Kühlmaschine	194
6.6.1	Kühlmaschine	198
6.6.2	Wärmepumpe	199
6.6.3	Auswertung der Experimente	200
<b>7</b>	<b>Solartechnik und Stirlingmotor</b>	202
7.1	Solarstirling – eigene Experimente	204
7.1.1	Fresnellinse – Konzentratortechnik für den Solarstirling	207
7.1.2	Parabolantenne (Satellitenschüssel)	210
7.1.3	Sonnennachführung	215
<b>8</b>	<b>Nutzanwendungen mit dem Stirlingmotor</b>	219
8.1	Stirlingmotoren in Serie?	219
8.2	<i>SUNPULSE™ water</i> – die solare Stirlingpumpe	221
8.3	Stirlinggenerator	224

8.4	Aussichten .....	226
8.4.1	Nutzung heizungsunterstützender Solaranlagen für den Stirling ...	226
8.4.2	Freie Energie und Stirlingprinzip .....	227
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>228</b>
9.1	Problembewältigung und Checkliste .....	228
9.2	Materialien/Liefernachweise .....	232
9.2.1	Recycling-Materialien .....	234
9.3	Adressenverzeichnis Lieferfirmen (Komponenten) .....	234
9.3.1	Adressen und Internetlinks .....	235
9.4	Bauanleitungen – Modellmotoren .....	236
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>238</b>

## 4 Grundlagen zur Leistungssteigerung

Wenn das Stirlingmodell erst einmal läuft, entwickelt sich schnell der Wunsch, die Leistung und den Wirkungsgrad zu verbessern. Es kann auch sein, dass bei Ihrem Stirlingmotor – bei längeren Laufzeiten – die Leistung oder die Drehzahl geringer wird und Sie herausfinden möchten, was sich verändern lässt.

Um eine dauerhaft bessere Leistungsabgabe zu erreichen, ist es sinnvoll, die dafür verantwortlichen Gründe näher zu untersuchen. Ungenügende Dichtigkeit des Systems und zu große Reibungswiderstände können wie folgt begründet sein:

- Der Arbeitskolben wird in seinem Arbeitseifer gebremst. Die Ausbuchtung der Kurbelwelle ist schlecht dimensioniert, z. B. zu gering. Der Weg der Membran oder die Bewegung des Kolbens wird bei längerem Betrieb und weiterer Ausdehnung der Luft zu klein und abgebremst (eingeschränkter Hub).
- Bei zunehmender Erwärmung wird die Wärme am oberen Teil des Verdrängerzylinders nicht mehr genügend abgeführt. Die Wärmedifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Zylinderteil wird geringer. Damit sinken der Wirkungsgrad und die Leistungsabgabe des Stirlingmotors.
- Die seitliche Lagerung der Kurbelwelle und die Pleuel an der Kurbelwelle laufen heiß, die Reibung wird höher.
- Die Metallteile dehnen sich durch große Hitze aus, dadurch streift z. B. der Verdrängerkolben im Zylinder.

Leistungssteigerung wird vor allem durch die Verbesserung der Energienutzung verwirklicht. Natürlich läuft die Maschine mit mehr zugeführter Power (Heizleistung) erheblich besser, d. h., mit einer heißeren Heizquelle wie z. B. einem Spiritus- oder Alkoholbrenner. Je nach Konstruktion ist es möglich, die Stirlingmaschine auch kurzzeitig mit höheren Temperaturen zu betreiben. Sind die Komponenten für einen Niedertemperaturstirling optimiert, besteht die Gefahr, dass Verdränger oder Basisplatten unter zu großer Hitzeeinwirkung Schaden nehmen.

Spannender ist es, die Maschine mit einfachen Änderungen so zu verbessern, dass sie bei geringerer Energiezufuhr noch besser läuft. Diese Verbesserungen lassen sich mit einfachen Messmethoden (siehe weiter unten) überprüfen.



Abb. 4.1: Windschutz auf der „heißen“ und Zusatzkühlung auf der „kalten Seite“

## 4.1 Maßnahmen zur Leistungssteigerung

Im Wesentlichen geht es darum, durch geeignete Maßnahmen die zugeführte Wärme besser zu nutzen und durch eine bessere Wärmeabgabe auf der kalten Seite die Temperaturdifferenz im System zu erhöhen. Weitere Maßnahmen gelten, wie bei jeder mechanischen Maschine, der Reduzierung der Reibungsverluste. Nachfolgend einige mögliche einfache Maßnahmen zur Leistungssteigerung:

1. Wärmedifferenz verbessern. Den unteren Bereich des Verdrängerzylinders mit Mineralwolle und Aluminiumfolie dämmen. Im oberen Bereich zusätzliche Kühlfahnen anbringen.
2. Mit Peltier-Elementen die Wärme schneller und effektiver abführen. Natürlich ist diese Methode aus energetischer Sicht nicht sinnvoll. Im Experimentierstadium geht es zunächst aber erst einmal darum, was die Maßnahmen bewirken. In weiteren Schritten kann und sollte darüber nachgedacht werden, wie die Maßnahmen auch energetisch sinnvoll zu realisieren sind.

3. Die Kühlfahnen mit einem kleinen Computerlüfter anblasen und damit die Luftumwälzung erhöhen. Den Strom für den Lüfter durch ein Peltier-Element bereitstellen.
4. In Kombination mit einem Wasserverdampfer wird eine sehr gute Kühlung erreicht.
5. Dünne Kupferrohre um den oberen Bereich des Verdrängerzylinders wickeln und mit einer kleinen Pumpe Kühlwasser durchfließen lassen, ähnlich wie die leisen Computerkühler. Auch gibt es im Bereich des Modellbaus Zubehör für die Wasserkühlung von Elektroleistungsmotoren bei Rennbooten.
6. Regenerator einbauen. Einen oder mehrere weitere Verdrängerkolben anfertigen und alternativ mit Bohrungen und Stahlwolle umgestalten. Vielleicht ist der Durchmesser einer der Verdrängerkolben versehentlich zu klein geraten? Diesen mit blankem Kupferdraht umwickeln oder mit Fliegengitter (aus Metall) oder mit Lochblech ausstatten. Den kompletten Verdrängerkolben aus Lochblech zusammenfügen und mit Stahlwolle füllen (Vorsicht –Gewicht!). Je besser aber der Wirkungsgrad des Regenerators, desto mehr Strömungswiderstand am Verdrängerkolben. Dies wirkt vor allem dann kontraproduktiv, wenn durch die vorgesehenen Maßnahmen die Drehzahl erhöht werden soll.
7. Lagerungen optimieren: Lagerung der Pleuel. Pleuel optimieren: Lagerung der Pleuel. Material der Pleuel: dünner Messingdraht. Verbindung von Pleuel und Verdrängerkolbenstange.
8. Arbeitskolben verbessern: Experimente mit anderen Membranmaterialien. Befestigungsalternativen vom Pleuel auf der Membran.
9. Gleitmittel wie z. B. Silikonspray im Bereich der Pleuel/Kurbelwelle aufbringen. Öl wirkt eher bremsend und verschmutzt alles.
10. Maßnahmen am Heizuntersatz. Z. B. die Öffnung zwischen Heizuntersatz und Motorboden so herrichten, dass die Heizenergie seitlich nicht austreten und ungenutzt verschwinden kann.
11. Mit diskontinuierlicher Verdrängersteuerung experimentieren (siehe auch weiter unten).

Leistungssteigerung bedeutet auch, die Parameter des Stirlingmotors weiter zu verbessern, sodass der Wirkungsgrad höher wird. So könnte man die heißen Teile der Maschine gegen die Wärmeabstrahlung dämmen. Das ist zwar auch wichtig, doch auch in der Maschine selbst – in ihrem Arbeitsprozess – stecken noch viele weitere Möglichkeiten, die zugeführte Energie besser zu nutzen.



**Abb. 4.2:** Versuche mit speziellem Pleuel zur diskontinuierlichen Verdrängersteuerung

Beobachten und experimentieren wir mit den Stirlingmodellen, entdecken wir, dass der Ablauf von Verdrängerbewegung und Arbeitszylinder nicht immer optimal abgestimmt ist. Wenn der Verdränger auf und ab bewegt wird (z. B. von Hand, unabhängig von der Kurbelwelle), kann man erkennen, dass sich der Arbeitszylinder mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung bewegt. Das liegt daran, dass das Gas (Luft) Zeit braucht, um sich zu erwärmen oder die Wärme abzugeben und sich abzukühlen.

### 4.1.1 Diskontinuierliche Verdrängersteuerung

Man kann den Verdränger von außen gesteuert auf- und abschnellen lassen und ihn in jeder Endstellung so lange stillhalten, bis der Arbeitskolben ungefähr auch diese Endstellung – oben bzw. unten – erreicht hat. Dies kann man z. B. mit einer Magnetsteuerung realisieren.



**Abb. 4.3:** Einfache Magnetsteuerung mit Hand, Arbeitskolben ist die Membran

Diese „manipulierte“ Verdrängersteuerung sollte folgendermaßen funktionieren, um einen idealen Prozess und guten Wirkungsgrad zu erzielen:

- Wenn der Arbeitskolben unten ist und sich nach oben bewegen soll, muss der Verdränger hochschnellen. Dann gelangt alle Luft in den heißen Bereich. Sie wird erwärmt, der Luftdruck steigt, das Luftvolumen expandiert, was durch die Bewegung des Arbeitskolbens nach oben sichtbar wird. Die Kurbelwelle dreht sich.
- Der Verdränger muss so lange in der oberen Stellung verharren, bis der Arbeitskolben oben angekommen ist. Dann sollte er nach unten schnellen und dabei die

Luft aus dem heißen Bereich in den kalten schieben. In der unteren Stellung sollte der Verdränger ebenfalls eine Weile stehen bleiben. Die Luft kühlt sich ab, der Luftdruck sinkt und der Arbeitskolben bewegt sich aufgrund der einsetzenden Kontraktion nach unten. Die Kurbelwelle dreht sich weiter.

- Wenn der Arbeitskolben unten angekommen ist, beginnt das Spiel von Neuem. Es beginnt wieder mit dem Hochschnellen des Verdrängers und dem Verdrängen der Luft aus dem kalten in den heißen Bereich.

Diese Art der Steuerung wird als *diskontinuierliche Verdrängersteuerung* bezeichnet. Die Verdrängerbewegung verläuft nicht kontinuierlich zur Arbeitskolbenbewegung, sie ist durch Stillstand und Bewegung gekennzeichnet. Es gibt eine ganze Reihe von Stirlingkonstruktionen, in denen dieses Prinzip mehr oder weniger angewendet wird.

Ein realer Stirlingmotor, den man mit einer diskontinuierlichen Verdrängersteuerung ausstattet, muss, besonders in Bezug auf die Verdrängersteuerung, einige Kompromisse eingehen. Denn bei einer sehr schnellen Bewegung und Abbremsung treffen sehr hohe Kräfte auf den Verdränger und dies würde – je nach Konstruktion – den Verdränger zerstören. Eine nahezu diskontinuierliche Verdrängersteuerung ist in dem langsam laufenden Flachplatten-Stirlingmotor von Ivo Kolin von der Universität Zagreb realisiert. Er forschte und entwickelte an Niedertemperatur-Differenzstirlingmotoren (NTD, englisch: LTD – low temperature differential) über einen Zeitraum von 12 Jahren und baute und erprobte ca. 16 unterschiedliche Versuchsmotoren. Das Ergebnis seiner Arbeit war 1983 die Entwicklung eines Motors, der mit einer Temperaturdifferenz von 15 °C arbeitete.

### 4.1.2 Niedertemperaturstirling zur Energieausnutzung

Ein typischer Niedertemperatur-Differenzstirlingmotor arbeitet mit einer langsamen Drehzahl von unter 100 U/min und einer Temperaturdifferenz von weniger als 50 °C. Ein NTD-Motor muss bestimmte Bedingungen erfüllen, um einwandfrei laufen zu können. In der Anfangszeit der NTD-Entwicklung wurden diese Bedingungen nur durch versuchsweise Annäherung erfüllt. Durch die Arbeiten von Professor Ivo Kolin und Prof. James R. Senf (University of Wisconsin of Riverfalls) sind wir heute in der Lage, diese Bedingungen durch Berechnung zu erfüllen.

Ein NTD-Motor muss notwendigerweise ein geringes Verdichtungsverhältnis und ein relativ großes Verhältnis von Verdrängervolumen zu Hubvolumen des Arbeitskolbens haben. Bedingt durch die geringe Temperaturdifferenz sind in NTD-Stirlingmotoren sehr kurze Verdrängerkolbenlängen möglich. Das wiederum erfordert große Verdrängerkolbendurchmesser, um die erforderliche Größe der Heiz- und

Kühlflächen zu erreichen. Dadurch erklärt sich die typische Form eines NTD-Stirlingmotors: großer Verdrängerkolbendurchmesser, geringer Verdrängerkolbenhub, plattenförmige Heiz- und Kühlflächen. Ohne zusätzliche Vergrößerung der Wärmeübertragungsflächen erhalten wir so Motoren mit relativ geringen Drehzahlen. Vorteilhaft für solche Motoren sind diskontinuierliche schnelle Bewegungen des Verdrängers mit einer Verweildauer in den Totpunkten.

## 5 Stirlingmotoren und das Messlabor

Um den Stirlingmotor zu begreifen, zu verbessern und praktisch zu nutzen, ist es sinnvoll, einige Parameter zu ermitteln. Beim Stirlingmotor sind folgende Messungen von Interesse:

Übersicht Parameter:

1. Temperaturmessungen z. B. analoge Messung mittels Temperaturspannungskonverter
  - Oberfläche Basisplatte (Wärmezufuhr)
  - Oberfläche Basisplatte (Wärmeabgabe)
  - Innenraum heiße Seite
  - Innenraum kalte Seite
  - Wenn vorhanden, Regenerator heiße Seite
  - Wenn vorhanden, Regenerator kalte Seite
2. Druckmessung, z. B. analoge Messung mittels Differenzdrucksensor
3. Positionsmessung der mechanischen Elemente
4. Drehzahlmessung
5. Strom/Spannungsmessung am Generator

Abgesehen von der Druckmessung, die einen speziellen Drucksensor benötigt, sind alle anderen Messaufgaben mit einfachen Mitteln zu realisieren.

### 5.1 Drehzahl des Stirlingmotors messen

Eine der einfachsten Möglichkeiten ist die Messung der Drehzahl mit einem Fahrradtacho. Selbst einfache Fahrradcomputer haben meist mehrere Messfunktionen. Neben Stundenkilometern, Streckenlänge und anderem mehr kann auch die Drehzahl angezeigt werden. Die Messmethode (Magnet/Sensor) am Fahrrad kommt uns für die Drehzahlmessung am Stirlingmotor entgegen. Am Fahrrad gibt es einen kleinen Magneten, der an einer Speiche befestigt wird, und den Magnetsensor, der an der Gabel oder am Rahmen des Fahrrads montiert wird. Jedes Mal, wenn das Rad eine Umdrehung macht, gibt es einen Impuls, der vom Fahrradcomputer verarbeitet wird. In der Regel sind beim Fahrradtacho folgende Funktionen verfügbar:

Funktion	direkt nutzbar für	Nutzbar mit Anpassung
a	Momentangeschwindigkeit	Frequenzanzeige über Faktor des Radumfangs*)
b	Maximalgeschwindigkeit	Max. Frequenzanzeige über Faktor des Radumfangs*)
c	Durchschnittsgeschwindigkeit	–
d	Gesamtstrecke	–
e	Teilstrecke	–
f	Triptimer	Betriebsstunden-zähler
g	Stoppuhr	Betriebszeit der Messung
h	Uhrzeitfunktion	
i	Radumdrehungszähler	als Drehzahlmesser

Anzahl der Magnete	Eingabe „Radumfang“ in cm	Anzeigewert auf Display, für
1	278*)	Hz

\*)Die Konstante für den Radumfang und unsere Anwendungen errechnet sich aus 1.000/3,6 (Stunde auf Minute und Minute auf Sekunde)

Wird der Computer für das Fahrrad genutzt, muss für die km/h-Angabe und die Streckenangaben die Reifengröße eingegeben werden. Für die Drehzahlmessung (Drehzahl pro Minute) spielt dies aber keine Rolle, sodass der Fahrradacho ohne weitere Einstellungen zum Messen der Drehzahl für den Stirlingmotor verwendet werden kann.

Die praktische Anwendung ist unkompliziert. Man muss nur einen kleinen Magneten am Schwungrad des Stirlingmotors anbringen. Er kann gleichzeitig als Ausgleichsgewicht dienen und so werden gleich zwei Funktionen mit einer Maßnahme erledigt.

Ob der Abstand zwischen Magnet und Sensor stimmt – und die Messung durchgeführt werden kann –, wird meist durch ein Symbol im Display des Fahrradcomputers angezeigt. Der Sensor kann dann fest mit der Basisplatte verbunden oder so zum Schwungrad positioniert werden, dass die Messung durchgeführt werden kann.



Abb. 5.1: Fahrradtacho mit Anzeige der Drehzahl rechts unten (RPM, 555)



Abb. 5.2: Fahrradtacho in der Funktion; Drehzahlmesser – der rote Pfeil zeigt auf das Symbol der Impulsanzeige.

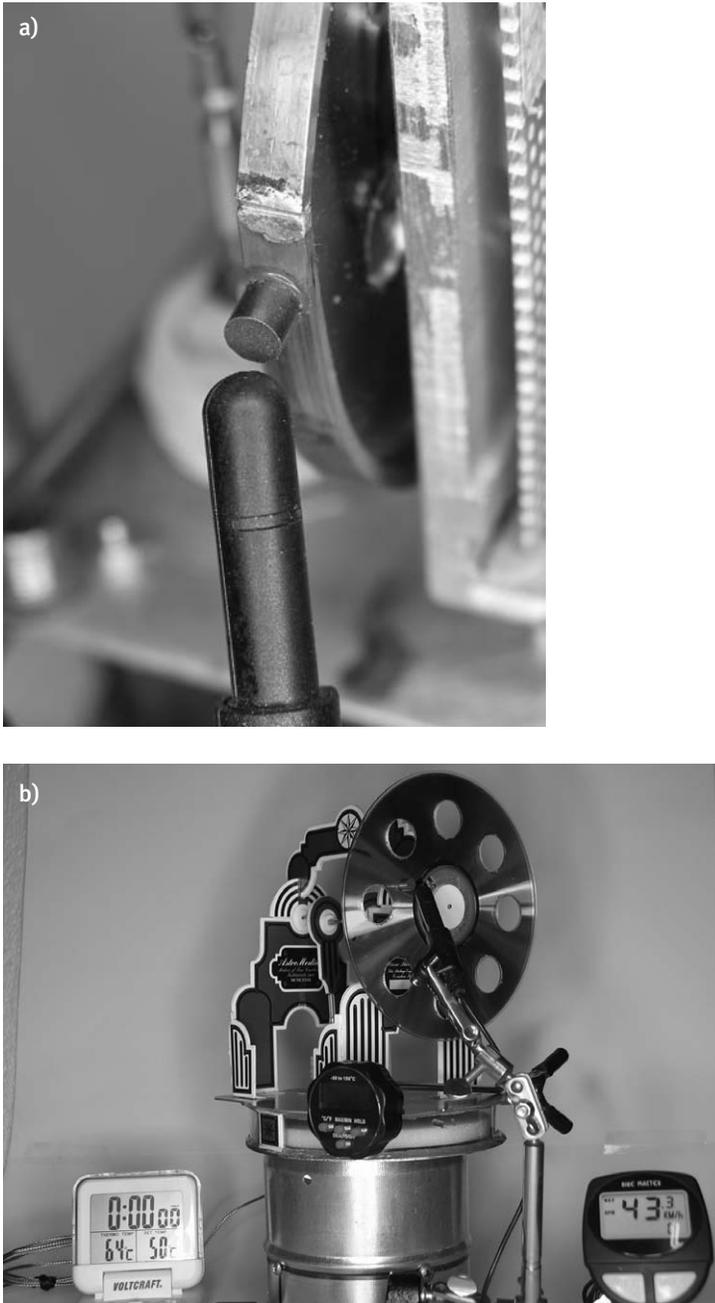


Abb. 5.3: Magnet am Schwungrad für die Drehzahlmessung; a) Detail, b) Gesamtansicht

Soll die Drehzahl gemessen und zusätzlich am PC ausgewertet werden, ist es sinnvoll, dies mit einer Reflexlichtschranke und einer einfachen Elektronik zu realisieren, deren Signal dem PC zugeführt wird. Dazu wird auf das Schwungrad des Stirlingmotors z. B. ein Stück Tesakrepp geklebt, das zur Hälfte schwarz angemalt wird. Die Drehzahl kann bis zu einer Entfernung von einigen Zentimetern gemessen werden, wenn Sende- und Empfangsdiode der Reflexlichtschranke darauf ausgerichtet werden.

Das Signal des Drehzahlmessers kann z. B. mit der Soundkarte des PCs verbunden werden (Line-in-Eingang). Die Auswertung kann mit einem einfachen selbst entwickelten Programm oder einem Freeware-Oszillatorprogramm, das man aus dem Internet herunterladen kann, erfolgen.

## 5.2 Temperaturmessung unten – oben, Temperaturdifferenz

Wie schon weiter oben ausgeführt, ist der Stirlingmotor eine Maschine, die durch unterschiedliche Temperaturpotenziale oder einfacher durch eine Temperaturdifferenz funktioniert. Eine Herausforderung sind z. B. Niedertemperatur-Stirlingmotoren, die mit möglichst geringen Temperaturunterschieden zwischen der kalten und warmen Seite in Gang kommen. Spezielle Handstirlingmotoren arbeiten schon mit einem Temperaturunterschied von unter 5 K.

So verdient die Temperaturmessung an den Stirlingmodellen besondere Aufmerksamkeit. Mit ihr kann man herausfinden, wie effektiv die Maschine arbeitet oder ob Verbesserungsmaßnahmen erfolgreich waren. Zur Messung der Temperaturen gibt es mehrere Möglichkeiten. Einige werden nachfolgend beispielhaft dargestellt.

- mit einzelnen Temperatursensoren über eine Schnittstelle zur Anzeige und Auswertung am PC
- mit mehreren separaten digitalen Temperaturmessgeräten
- mit einem Infrarotmessgerät

Zum Thema Messsensoren, Anzeige und Auswertung am PC finden Sie weiter unten detaillierte Angaben. Eine einfache und unkomplizierte Vorgehensweise ist, mehrere separate digitale Temperaturmessgeräte zu verwenden.

Im Handel werden preiswerte Messgeräte einschließlich Messfühler zur Messung von Oberflächentemperaturen und Kochgut angeboten. Wichtig bei der Wahl ist, ob die Temperaturbereiche der Messgeräte für die Messaufgabe ausreichend sind. Für Messaufgaben bei Niedertemperatur-Stirlingmotoren reichen 0 °C bis 100 °C aus. Im Mitteltemperaturbereich sollte die Temperaturskala – zumindest für die



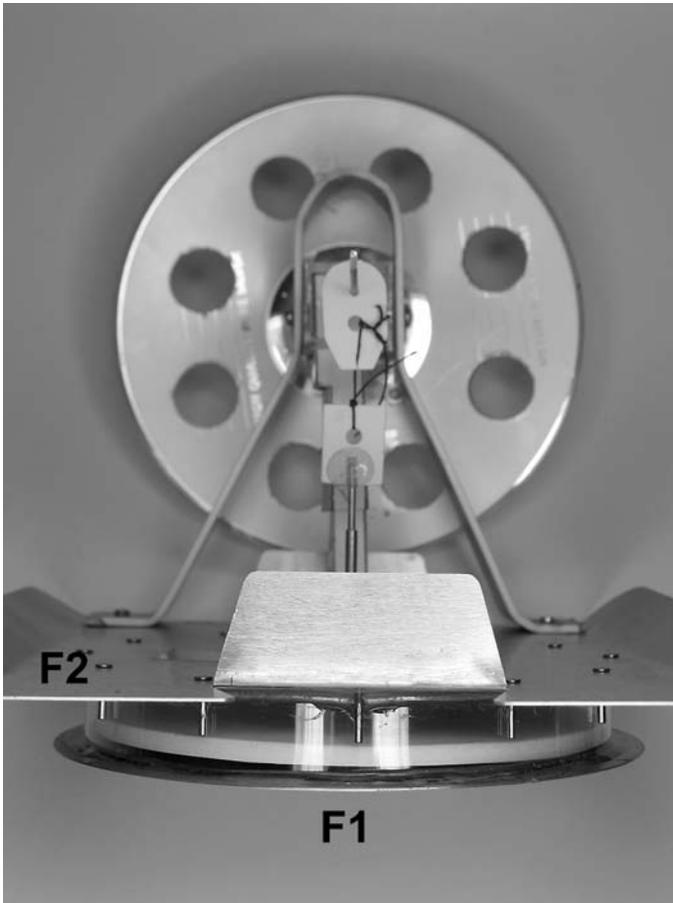
**Abb. 5.4:** Verschiedene Temperaturmessgeräte: a) Oberflächenthermometer, b) Thermometer mit einstellbarem Grenzwert und Messfühler, c) Oberflächenthermometer mit Solarstromversorgung, d) Infrarotthermometer mit Laserstahl zur punktgenauen Messung

heiße Seite – bis 400 °C reichen. Damit das Thermometer komfortabel eingebaut und abgelesen werden kann, wurde z. B. der Schaft eines Thermometers nach unten und der des anderen um 90° nach oben gebogen. Um das dünne Rohr dabei nicht zu knicken, sollte man es stramm mit dickem Kupferdraht umwickeln und dann mit den Händen vorsichtig Stück für Stück viertelkreisförmig biegen.



**Abb. 5.5:** Der Schaft eines Oberflächenthermometers wurde vorsichtig gebogen. Durch die Drahtumwicklung knickt das dünne Rohr beim Biegen nicht ab.

Die wichtigsten Messpunkte sind an der Basisplatte der heißen Seite mit F1 und auf der Basisplatte der kalten Seite mit F2 bezeichnet.



**Abb. 5.6:** Messpunkte F1 und F2 am Stirlingmodell

Der ermittelten Temperaturen von F1 und F2 können aufgezeichnet und z. B. in eine Excel-Tabelle eingetragen werden. Mit einem Infrarotmessgerät – sinnvoll mit einem Ziellaser – können weitere Wärmepunkte im Betrieb des Stirlingmotors untersucht werden, z. B. die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmeübergänge der Konstruktion.



Abb. 5.7: Infrarotthermometer in der Anwendung

Interessant ist es, gleichzeitig die Temperaturen und die Drehzahl des Stirlingmotors zu ermitteln und aufzuzeichnen.



Abb. 5.8: Gleichzeitige Ermittlung von Temperatur und Drehzahl

### 5.3 Messungen mit dem PC

Für Messungen mit dem PC brauchen Sie natürlich einen PC. Es kann ein älteres Exemplar wie z. B. ein 3–86er mit 16 MHz Taktfrequenz sein. Außerdem benötigen Sie eine Datenerfassung/Umwandlung, um die Daten zum Rechner übertragen und nutzen zu können. Sinnvoll wird diese Messmethode dann, wenn mehrere Messensoren gleichzeitig überwacht und dann auch noch über einen gewissen Zeitraum aufgezeichnet und ausgewertet werden sollen.

Im Handel gibt es zahlreiche Datenerfassungs- und Schnittstellenkarten und sonstige Möglichkeiten, um dies zu realisieren. Auch sind unzählige Programmiersprachen entwickelt worden, um die PC-Messtechnik komfortabel zu machen. Für den Fall, dass Sie sich damit intensiver beschäftigen möchten, gibt es gute Anleitungen und Bücher zum Thema z. B. „Messen, Steuern und Regeln mit dem PC“ im Franzis Verlag.

Für das Messlabor mit dem PC sind als Erstes Sensoren erforderlich, wie z. B. Temperaturfühler, die die Temperatur am Stirlingmotor „fühlen“ und in einen elektrischen Wert umwandeln oder direkt ausgeben. Dann folgt die Aufgabe, die von den Sensoren kommenden Messwerte dem PC so zu servieren, dass er damit etwas anfangen kann. Es braucht einen elektronischen Wandler, der die analogen Signale in digitale umwandelt, z. B. mit einem 10-Bit-Datenerfassungssystem, das an die serielle, neunpolige Schnittstelle des Rechners angeschlossen werden kann. Für Rechner, die nur eine USB-Schnittstelle haben, gibt es auch Datenerfassungssysteme. Die Bausteine – sie sind im Elektronikfachhandel erhältlich (z. B. bei Conrad Electronic) – können acht oder mehr analoge Signale in einem Spannungsbereich von 0 V bis 5 V erfassen. Zum Einlesen und Auswerten der Daten mit dem Rechner sind den Bausteinen meist Beispielprogramme auf einer CD-ROM beigelegt. Die Programmiersprache ist z. B. QBasic, das mit fast allen anderen Basic-Dialekten identisch ist. Das dem Baustein beiliegende Beispielprogramm läuft auf fast jedem Rechner auf der DOS-Ebene. Damit ist es möglich, 1 bis 8 verschiedene zu messende Spannungen auf dem Bildschirm in verschiedenen Arten anzuzeigen, zu speichern und auszuwerten. Wenn Sie die Beispielprogramme selbst umgestalten möchten, ist dies in der Regel über ein einfaches Textprogramm oder grafische Baukastensysteme möglich. Um diese umgestalteten Programme dann laufen zu lassen, braucht es auf dem Rechner den Interpreter, z. B. für QBasic. Wenn dieser nicht bereits installiert ist, kann er aus dem Internet heruntergeladen und installiert werden.

Im ersten Schritt können Sie sich auch damit begnügen, das Beispielprogramm so zu verwenden, wie es auf der CD-ROM vorhanden ist. Die Temperaturwerte werden dann als Spannungswerte angezeigt. Deutlich werden damit steigende oder fallende Temperaturen.

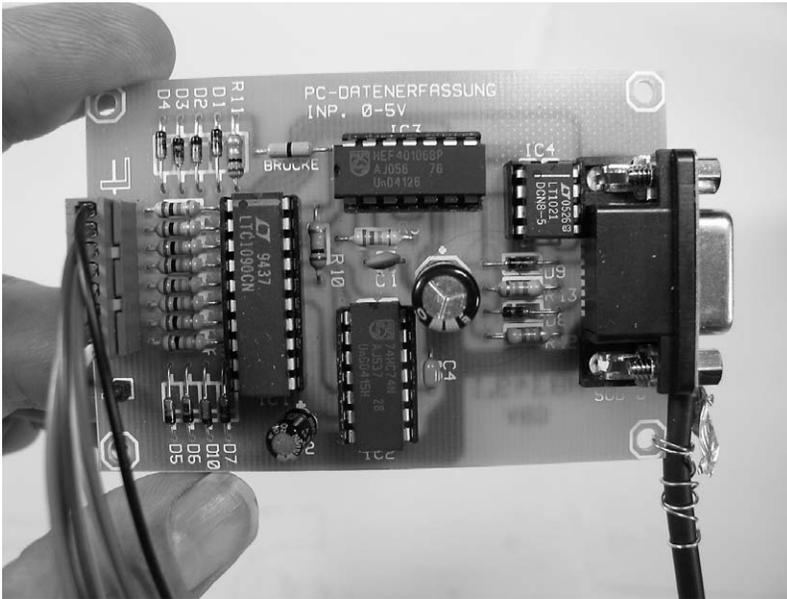


Abb. 5.9: 10-Bit-Datenerfassung als Baustein

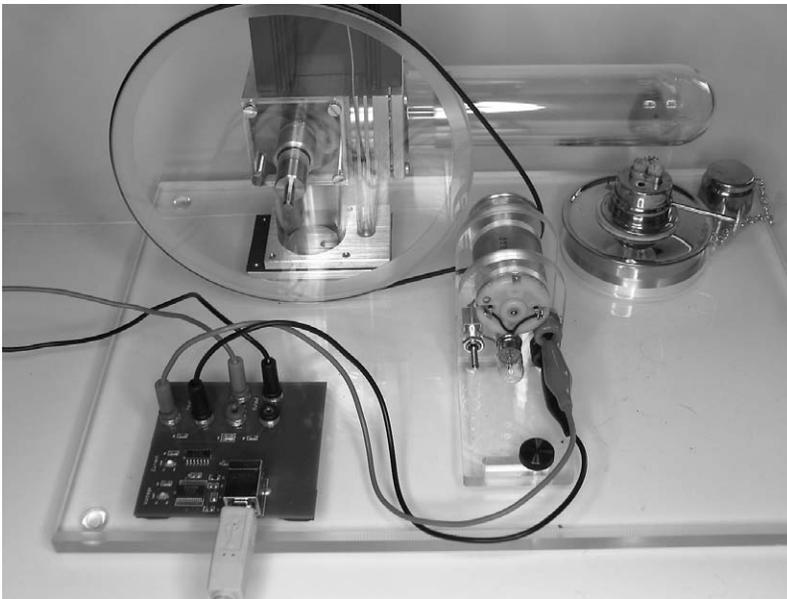


Abb. 5.10 Ermittlung von Strom, Spannung und elektrischer Leistung mit dem USB-Messadapter

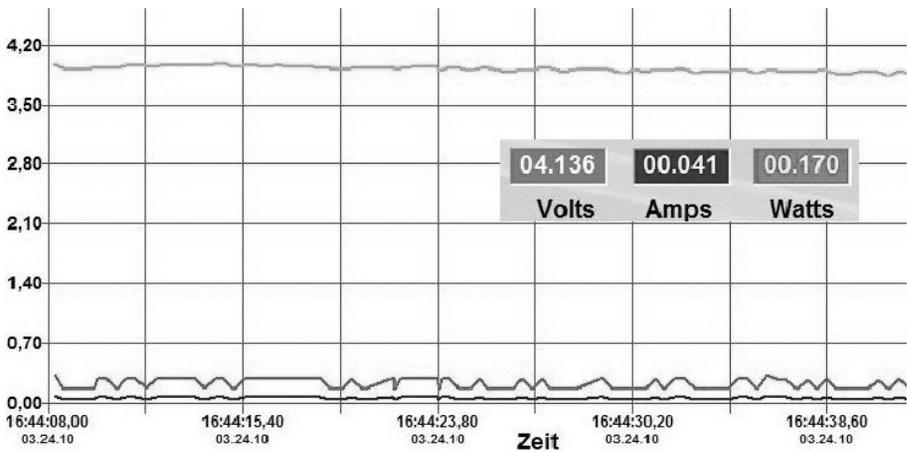


Abb. 5.11: Anzeige und Auswertung von Strom, Spannung und elektrischer Leistung am PC

Unabhängig davon, ob Sie das vorhandene Programm verwenden, es auf Temperaturanzeige umprogrammieren oder sich ein neues Programm schreiben: Es braucht die entsprechenden Sensoren, um die Messwerte wie z. B. die Temperatur zu ermitteln.

Auch hier gibt es einfache und preiswerte Komponenten. Mit einem NTC (Heißleiter) und einem Widerstand wird ein Spannungsteiler hergestellt, der die gemessene Temperatur als Spannung im Bereich von 0 – 5 V ausgibt. Für die Genauigkeit ist die Stabilität der Referenzspannung (z. B. die 5 V von der Schnittstelle) entscheidend. Bei Sensoren mit geringem Stromverbrauch, wie dem beschriebenen Temperatursensor, kann die 5-V-Spannung des Datenerfassungssystems (von der Schnittstelle des PCs) verwendet werden.

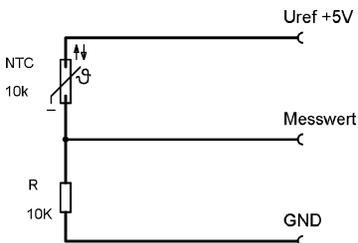


Abb. 5.12: Temperatursensor für den Messwertadapter

Hinweis zu Abb. 5.12:

Für den Abgleich der Temperatursensoren ist es empfehlenswert, anstatt des Festwiderstands R1 einen Spindeltrimmer zu verwenden.

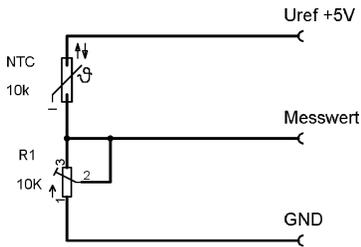


Abb. 5.13: Temperatursensor mit Spindeltrimmer

Die in *Abb. 5.13* vorgestellte Schaltung kann in mehrfacher Ausfertigung hergestellt und an den wesentlichen Messstellen des Stirlingmotors, der Wärmepumpe oder der Kühlmaschine angebracht werden. Im Experimentierbetrieb werden die Temperaturwerte über den Rechner aufgezeichnet und können dann z. B. in einer Excel-Tabelle grafisch ausgewertet und dargestellt werden.

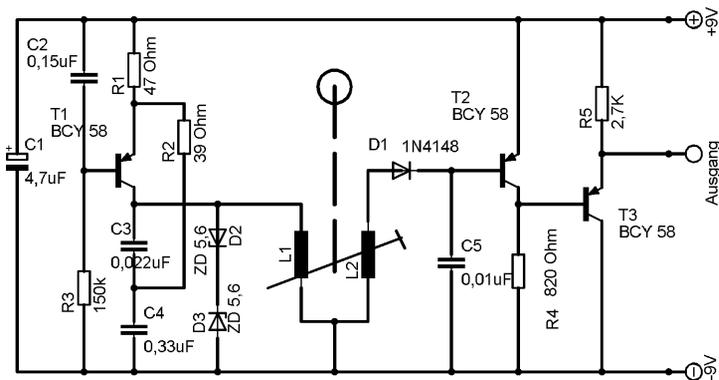
Zusätzlich zur Temperaturmessung sind Messwerte des Drucks in der Stirlingmaschine und auch der Weg oder die Lage des Verdrängerkolbens von Interesse. Mit den Werten Temperatur, Druck und Kolbenstand können Leistungsdiagramme für die Stirlingmaschine erstellt werden.

Für die Druckmessung gibt es im Handel Drucksensoren, die, wie der Temperatursensor, als Spannungsteiler aus Messfühler und Widerstand aufgebaut werden können. Für die Wegmessung des Kolbens gibt es professionelle Wegsensoren. Natürlich besteht auch die Möglichkeit, Drucksensoren und Wegsensor selbst anzufertigen.

Für Drucksensoren eignet sich Leitschaumstoff, wie er für empfindliche elektronische Bauteile zur Aufbewahrung verwendet wird. Der Schaumstoff ändert seinen Innenwiderstand (Leitfähigkeit) je nach Druck. Einfacher geht es mit einem fertigen Drucksensor aus dem Handel, der geeicht ist und entsprechend dem anliegenden Druck eine definierte Spannung liefert. Die Wegmessung ist am besten an der Pleuelstange mit einer zusätzlichen Pleuelstange zu realisieren. Damit dadurch keine zusätzliche Reibung entsteht, eignet sich gut die weiter unten beschriebene induktive Wegaufnahme, die auch an einen vorhandenen Pleuel angedockt werden kann.

Prinzip der Wegmessung:

Ein mit einem Pleuel kombinierter Eisen- oder Ferritkern taucht in zwei hintereinanderliegende Spulen ein. Durch den eintauchenden Kern kann eine Wechselspannung mehr oder weniger von der ersten in die zweite Spule übertragen werden. Bei entsprechender Eichung wird so der Weg in eine definierte Spannung umgewandelt, die durch ein Programm im Rechner als Standort des Kolbens angezeigt werden kann.



**Abb. 5.13:** Sensorschaltung für den Messwertadapter zur induktiven Wegaufnahme mit einem Ausgangssignal von 0,3 V bis 4,5 V Gleichspannung

#### Beschreibung der Funktion:

Der Kondensator C1 glättet die Versorgungsspannung. Der Transistor T1, zusammen mit den Kondensatoren C1, C2, C3 und den Widerständen R1, R2 und R3, bildet mit der Spule L1 einen kapazitiven Dreipunktschwinger. Die Amplitude der erzeugten Sinusspannung wird durch die beiden Zenerdioden D2 und D3 begrenzt. Dadurch werden die Auswirkungen einer schwankenden Versorgungsspannung unterdrückt. Mit einem Ferritkern, der mehr oder weniger weit in die beiden Spulen L1 und L2 eintaucht, lässt sich die magnetische Kopplung dieser beiden Spulen variieren. Das bedeutet, dass bei konstanter Spannung an L1 die Spannung an L2 durch das Verschieben des Ferritkerns von einem minimalen zu einem maximalen Wert gesteigert werden kann. Die Ausgangsspannung wird durch die Diode D1 gleichgerichtet und vom Kondensator C4 gesiebt. Der Transistor T2 bildet zusammen mit dem Widerstand R4 einen Impedanzwandler, der die Ausgangsspannung der Spule L2 auf einen niederohmigen Pegel herabsetzt. Der Transistor T3 bildet zusammen mit dem Widerstand R5 eine Anpassungsstufe. Dadurch wird erreicht, dass der induktive Wegaufnehmer in etwa dieselben Charakteristika zeigt wie ein Spannungsteiler aus Widerständen. Die Ausgangsspannung variiert zwischen 0,3 V und ca. 4,5 V, der Ausgangswiderstand beträgt ca. 1K.

Die angegebenen Transistoren stammen aus der Bastelkiste. Es handelt sich um PNP-Germanium-Transistoren. Als Vergleichstypen sind z. B. auch der AC 128, AC 153, AC 117R, 2N527, 2N618, 2N4106, 2N1373, AC 124 und andere Vergleichstypen geeignet. Für die Spulen sind Relaispulen ohne Eisenkern, Spulen aus einem Diskettenlaufwerk oder eine selbst gewickelte Spule geeignet. Die Spulen werden hintereinander angeordnet. Der Ferritkern kann von einer HF-Spule oder einem

alten Mittelwellenempfänger stammen. Die Schaltung eignet sich in Verbindung mit dem 8-kanaligen seriellen 10-Bit-System gut, um die Lage des Verdränger- oder des Arbeitskolbens mit dem Computer zu erfassen und auszuwerten.

Man kann die Sensoren in einer Computermouse auch so umfunktionieren, dass die Lage des Kolbens als verwendbarer Wert ermittelt und im Programm verarbeitet wird. Möglich ist auch, mit einem Spiegel, einem Laser und einer optischen Mouse eine Lagebestimmung zu realisieren.

# Stichwortverzeichnis:

## A

Absorberring 146  
 Achsenhalterung 89  
 Acrylglas 31  
 Arbeitsgas 21  
 Arbeitskolben 54  
 Arbeitszylinder 54

## B

BLDC 140  
 Blockheizkraftwerk 21  
 Boyle-Mariotte 18  
 Brennpunkt 212  
 Brushless DC-Motor 140

## C

Carnot, Sadi 15  
 Carnot-Prozess 15  
 Chemische Reaktion 20  
 Computerfestplatte 47  
 Computerlüfter 158  
 Computermaus 177

## D

Datenerfassung 172  
 Dauermagnet 32  
 Deponiegas 11  
 Dichthülse 42  
 Dichtigkeitstest 103  
 Differenzdrucksensor 163  
 Dimmer 72  
 Dosenstirling 124  
 Drehstromantrieb 140  
 Drehzahlmessung 164

Drehzahlregelung 195

Druckmessung 163  
 Drucksensor 175  
 Druckspitze 21  
 Druck-Volumendia-  
 gramm 14

## E

Edelgas 15  
 Elektromotor 64  
 Elektroniklot 56  
 Elektronischer Trafo 72  
 Energiedichte 20  
 Energiesparlampe 192  
 Entspannung 14  
 Expansionsraum 22  
 Exzenter 24

## F

Fahrraddynamo 180  
 Fahrradacho 163  
 Ferritkern 175  
 Fertigmodell 109  
 Festplatte 65  
 Flachplattenstirling 221  
 Flachplattenstirlingmo-  
 tor 202  
 Freie-Energie-Wellen 20  
 Freie Energie 227  
 Frequenzmesser 143  
 Fresnel, Augustin 207  
 Fresnellinse 154

## G

Gasleckage 25  
 Generatorbetrieb 145  
 Geräuschemission 21  
 Getriebe 185  
 Getriebeabdeckung 145  
 Gewindestangen 47  
 Gezeiten 20  
 Glas 31  
 Glaszylinder 60, 154  
 Gleitlager 42  
 Gleitmittel 158  
 Glockenankermotor 181  
 Gold-Cap 187  
 Gummihalterung 110  
 Gummimembran 29, 53

## H

Halogenlampe 72  
 Handstirling 107  
 Handwärme 107  
 Heißeleiter 174  
 Heizuntersatz 72  
 Helium 25  
 Hochspannungserzeu-  
 gung 192  
 Hochspannungsgenera-  
 tor 192  
 Hohlspiegel 210  
 Hub 13, 28

## I

Induktionsspannung 185  
 Influenzmaschine 192

- Infrarotmessgerät 167  
 Infrarotthermometer 30  
 Innendruck 25  
 Interpretier 172  
 Isochore Abkühlung 17  
 Isochore Erwärmung 17  
 Isotherme Expansion 14, 17  
 Isotherme Kompression 14
- K**
- Kalte Fusion 20  
 Kinetische Energie 25  
 Kolin, Ivo 161  
 Kompressionsraum 21  
 Kompressionsvorgang 14  
 Kondensator 185  
 Kreiselpumpe 191  
 Kreisprozess 14  
 Kühlfahne 157  
 Kühlkörper 151  
 Kühlmaschine 198  
 Kühlrippen 129  
 Kühlschrank 12  
 Kühltruhe 195  
 Künstliches Herz 219  
 Kunststoffachslager 81  
 Kurbelbiegung 47  
 Kurbelwelle 44  
 Kurzschlussstrom 141
- L**
- Lagebestimmung 177  
 Lagerhalter 117  
 LED 181  
 Leistungsabgabe 156  
 Leistungsdiagramm 175  
 Leuchtstofflampe 192  
 Lichtwellen 212
- LNB 212  
 Löthülse 53  
 LTD (low temperature differential) 161  
 Luftdichtigkeit 228  
 Luftlöcher 76  
 Luftmoleküle 30  
 Luftpumpe 190  
 Luftumwälzung 158
- M**
- Magnetbremse 141  
 Magnetismus 227  
 Magnetläufer 143  
 Magnetspule 186  
 Magnetsteuerung 160  
 Membran 55  
 Messfühler 167  
 Messingleithülse 42  
 Messingpleuel 51  
 Messingprofil 66  
 Messlabor 172  
 Messsensor 167  
 Messstutzen 146  
 Messung 140  
 Mittellagerung 49  
 Multivibrator 185
- N**
- Nachführungssteuerung 215  
 NTC 174  
 NTD-Motor 161  
 Nutzenergie 21
- P**
- Parabolspiegel 146, 210  
 PC-Messtechnik 172  
 Peltier-Element 74  
 Pleuel 50
- Plexiglashalterung 149  
 Plexiglasschwungrad 64  
 Pneumatikzylinder 59  
 Polyamidstab 43  
 Polymer-Gleitlager 43  
 Positionsmessung 163  
 Prozessorkühler 74  
 Prozesswirkungsgrad 18  
 Pulsierender Gleichstrom 185
- R**
- Raumfahrt 219  
 Rechteckgenerator 185  
 Referenzspannung 174  
 Reflexlichtschranke 167  
 Regenerator 16, 41  
 Reibungsverluste 21  
 Resonanzen 227  
 Resonator 25  
 Riemenantrieb 179  
 Riemenrille 64  
 Ringbom, Ossian 22  
 Ringbom-Stirling 22  
 Röhrenradio 11  
 Rückschlagventil 190  
 Rudermaschine 53
- S**
- Schallwellen 20  
 Schaumstoff 31  
 Schiffsantrieb 219  
 Schlauchanschluss 127  
 Schlauchschelle 128  
 Schnittstellenkarte 172  
 Schrittmotor 139  
 Schubstange 47  
 Schwerkraft 227  
 Schwingungsfrei 21  
 Schwungmasse 66

- Schwungrad 61  
Senf, James R. 161  
Solarstirling 212  
Solartechnik 202  
Solarventilator 69  
Solarzellen 215  
Sonnenkollektor 202  
Sonnennachführung 215  
Spannungsteiler 174  
Spannungswandler 185  
Spiegelkonzentrator 154  
Spindeltrimmer 174  
Spiritusbrenner 75  
Statische Ladungen 227  
Stellring 44  
Stern-Dreieckschaltung 143  
Stirling-Ladeschaltung 184  
Strombegrenzung 139  
Stromgenerator 178  
Strömungsverlust 21  
Strömungswiderstand 158  
Styropor 31, 196
- Sunpulse 204, 221
- T**  
Teelicht 75  
Temperaturmessgerät 167  
Temperaturmessung 163  
Temperaturskala 167  
Temperaturspannungskonverter 163  
Thermodynamik 18  
Totpunkt 13  
Trockenspirit 78
- U**  
Umwandelungskette 145  
Unterdruck-Folien-  
spiegel 219  
Unwucht 67
- V**  
Ventilator 11  
Ventilklappe 190  
Verbrennungsmotor 12  
Verdichtung 14
- Verdränger-Kolben 30  
Verdrängersteuerung 161  
Verdrängerzylinder 30  
Verwirbelungen 21
- W**  
Wärmeabstrahlung 98  
Wärmekontakt 98  
Wärmekraftmaschine 61  
Wärmepumpe 12, 199  
Warmluftkollektor 205  
Wasserförderung 190  
Wasserpumpe 178  
Wasserverdampfer 158  
Wechselstrommotor 180  
Wegmessung 175  
Wegsensor 175  
Westernrad 190  
Windrad 190
- Z**  
Ziellaser 170  
Zimmerspringbrunnen 11  
Zusatzkühlung 157



Ulrich E. Stempel

# Experimente mit dem Stirlingmotor

Stirlingmotoren zählen neben Dampfmaschinen zu den ältesten Wärmekraftmaschinen. Sie weisen in der theoretischen Berechnung einen höheren Wirkungsgrad auf als Dampfmaschinen und auch Verbrennungsmotoren wie Benzin- oder Dieselmotoren. Obwohl das Grundprinzip des Stirlingmotors schon relativ alt ist, ist die Anwendung heutzutage sinnvoller denn je. Der Grund: Stirlingmotoren können mit unterschiedlichen Primärenergiequellen betrieben werden. Das reicht von Holz und Reisstroh über Gas und Biogas bis hin zur Solarenergie. Und Stirlingmotoren lassen sich universell einsetzen: sowohl in der Haustechnik (Blockheizkraftwerk, Klimaanlage) als auch für die Antriebstechnik, z. B. im Auto, in Wasserfahrzeugen und für Arbeitsmaschinen.

Das Buch lädt mit seinen zahlreichen Bauanleitungen dazu ein, das Funktionsprinzip von Stirlingmotoren auf experimentelle Weise nachzuvollziehen. Es verzichtet auf den Einsatz von Spezialwerkzeugen und nicht für jedermann einsetzbare Arbeitsverfahren wie Schweißen oder die Herstellung von feinmechanischen Drehteilen. Die verwendeten Bauteile lassen sich kostengünstig einkaufen oder können zum Teil auch kostenfrei aus recycelten Materialien, wie z. B. von defekten Computern, stammen.

Das Buch beschreibt den Bogen von einfachen und gut nachvollziehbaren Modellmotoren bis hin zur Anwendung des Stirlingmotors im Alltag. Tauchen Sie ein in die Geheimnisse dieser Maschine, experimentieren Sie mit der Stirlingmaschine als Motor, Kühlmaschine und Wärmepumpe und bringen Sie mit einfachsten Werkzeugen Ihren eigenen Stirlingmotor zum Laufen.

## Aus dem Inhalt

- Theoretische Grundlagen zur Funktion und Wirkungsweise der Stirlingtechnik
- Umfangreiche Experimente rund um den Stirlingmotor
- Verschiedene Bauvarianten und Modelle, mit Zeichnungen und Fotos ausführlich vorgestellt
- Umfangreiche Anleitungen für die Komponenten der Stirlingmaschinen
- Experimente mit Stirlingmaschinen als Motor, Kühlmaschine und Wärmepumpe
- Stirlingmotoren, angetrieben mit Solarenergie
- Stirlingmotor mit einfachsten Werkzeugen zum Laufen bringen
- Messeinrichtungen und Auswertungen zu den Experimenten
- Praxisanwendung der Stirlingtechnik

ISBN 978-3-645-65020-5



9 783645 650205

29,95 EUR [D]

Besuchen Sie uns im Internet: [www.franzis.de](http://www.franzis.de)