

# Ein erleichtertes „Aha-Erlebnis“

## Eine lernpsychologisch günstige Art, den Stirlingmotor zu erklären

Von Urs Aeschbacher und Daniel Wagner

*Die Komplexität technischer Apparaturen hält viele davon ab, sich mit Technik auseinanderzusetzen. Entsprechend distanziert bleibt das Verhältnis. Wenn es jedoch gelingt, zentrale Teile einer Apparatur als Lösung einer ursprünglichen Problemstellung zu präsentieren, kommt es zu einem «Aha-Erlebnis». Dieser didaktische Vorschlag wird hier lernpsychologisch begründet und auf die Erklärung des Heißluftmotors angewendet.*

Erklären ist nicht gleich Erklären; immer wieder gibt es „Erklärungen“, die den Lernenden das Verstehen unnötig erschweren. Soll es aber seinen wörtlichen Zweck, das „Klarmachen“ erreichen, muss es gewisse Qualitätskriterien erfüllen. Hier werden zwei lern-

psychologisch begründete Wege vorgestellt, wie das Erklären technischer Apparaturen verständnisfördernd gestaltet werden kann. Zum einen geht es um didaktische Reduktion bzw. Vereinfachung. Die Erklärung sollte nicht von der vollständigen Apparatur aus-

gehen, weil deren Komplexität oftmals schnell das Arbeitsgedächtnis bzw. die Verarbeitungskapazität der Lernenden überfordert. Stattdessen sollten zuerst nur Kernkonzepte herausgegriffen werden. Zum zweiten geht es darum, das Verständnis der herausgegriffenen Teile zu vertiefen, indem man jeweils herausarbeitet und möglichst anschaulich zur Darstellung bringt, welches (Teil-)Problem sie lösen. Eine technische Vorrichtung auf die ihr zugrundeliegende Problemstellung beziehen und als deren Lösung erkennen zu können, ist der klassische Auslöser eines sogenannten „Aha-Erlebnisses“; es ist der Ausdruck tiefen Verstehens eines Sachzusammenhangs. Es folgt hier zunächst die konkrete Anwendung dieser beiden Gestaltungsvorschläge auf die Erklärung des Heißluftmotors, und danach die lernpsychologische Diskussion.

### Erklärung des Stirlingmotors als Beispiel

Stirlingmotoren gibt es in verschiedenen Typen, und sie können einfach oder auch hochkomplex aufgebaut sein. In zweierlei Hinsichten stimmen alle überein: Erstens wird das im Zylinder eingeschlossene Gas durch Verdrängung zwischen einem kalten und einem heißen Bereich hin und her geschoben, und zweitens findet in irgendeiner Weise eine automatische Steuerung dieser Verschiebungsbewegungen statt. Diese beiden Kernkonzepte werden hier für einen einfachen Heißluftmotor des  $\beta$ -Typs erläutert.

#### Der „Trick“ des Hin-und-her-Schiebens

Der naturgesetzliche Effekt, der im Heißluftmotor technisch genutzt wird, besteht in der Temperaturabhängigkeit des Gasvolumens: Wie jedes Gas dehnt Luft sich aus, wenn sie erhitzt wird, und zieht sich zusammen, wenn sie gekühlt wird. Findet eine solche Ausdehnung erwärmter Luft in einem Arbeitszylinder statt, stößt diese den Arbeitskolben nach außen; wird die Luft sodann abgekühlt, zieht sie sich zusammen, und der Innendruck im Arbeitszylinder sinkt. Sobald der Innendruck kleiner ist als der äußere

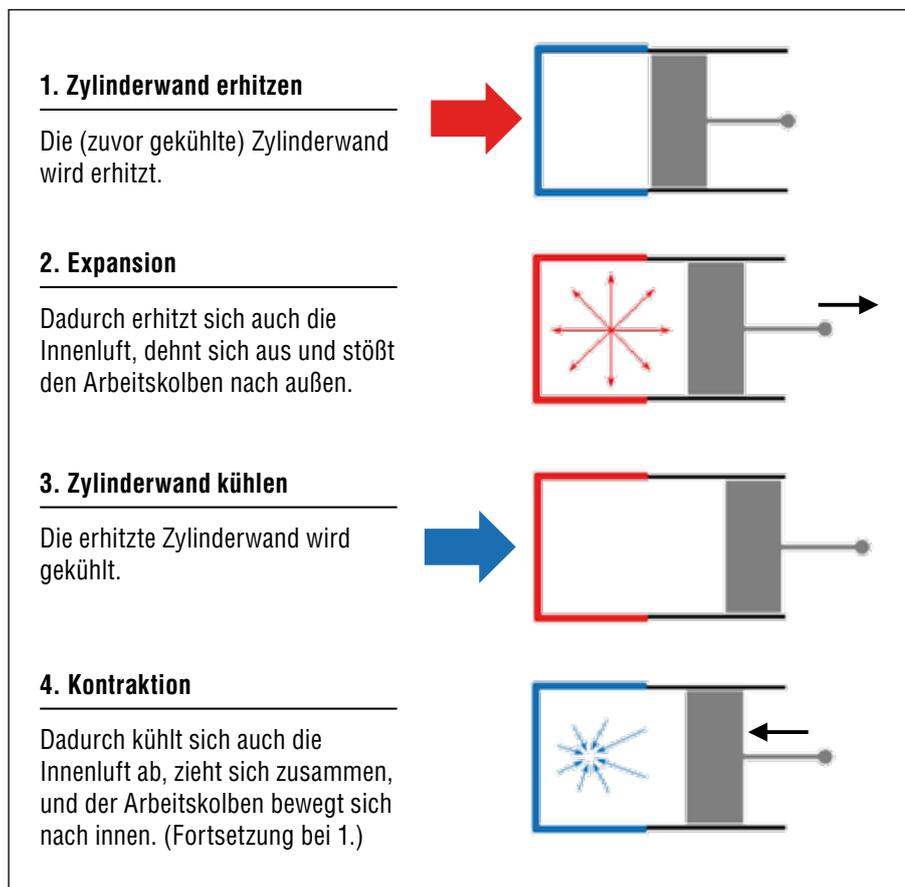
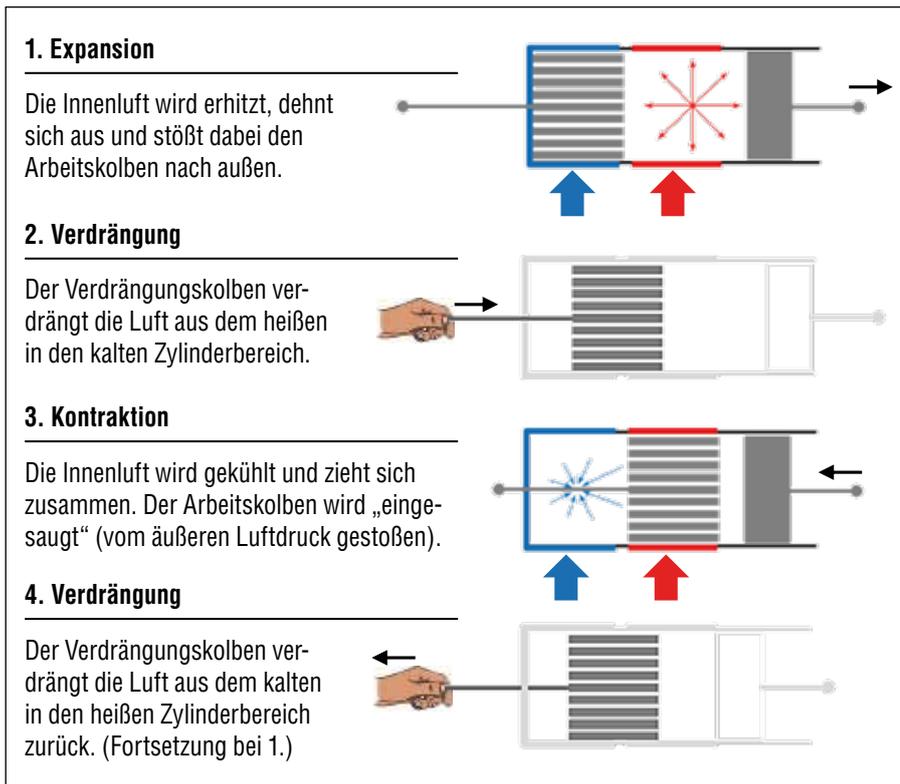


Abb. 1: Problemstellung bei Stirlings grundlegender „Heißluftmotor-Idee“. Die Hin-und-her-Bewegung des Arbeitskolbens wäre viel zu langsam und ineffizient, weil die Zylinderwand stets mit erwärmt und wieder abgekühlt werden müsste.



**Abb. 2: Problemlösung bei Stirlings grundlegender „Heißluft-Motor-Idee“.** Die Innenluft wird nicht am selben Ort erhitzt und wieder gekühlt, sondern zwischen einem dauererhitzten und einem dauergekühlten Bereich des Zylinders mithilfe eines Verdrängerkolbens hin und her geschoben.

Luftdruck, stößt Letzterer den Arbeitskolben zurück. Durch periodisches Erhitzen und Abkühlen der im Arbeitszylinder eingeschlossenen Luft ließe sich somit eine Hin-und-her-Bewegung des Arbeitskolbens erzeugen, und damit hätte man einen primitiven Heißluftmotor (vgl. Abb. 1).

Die in Abb. 1 skizzierte Rohform eines Heißluftmotors würde zwar im Prinzip funktionieren, allerdings viel zu langsam und mit viel zu großem Energieverlust, denn offensichtlich müsste auch die ganze Zylinderwand abwechselnd erhitzt und wieder gekühlt wer-

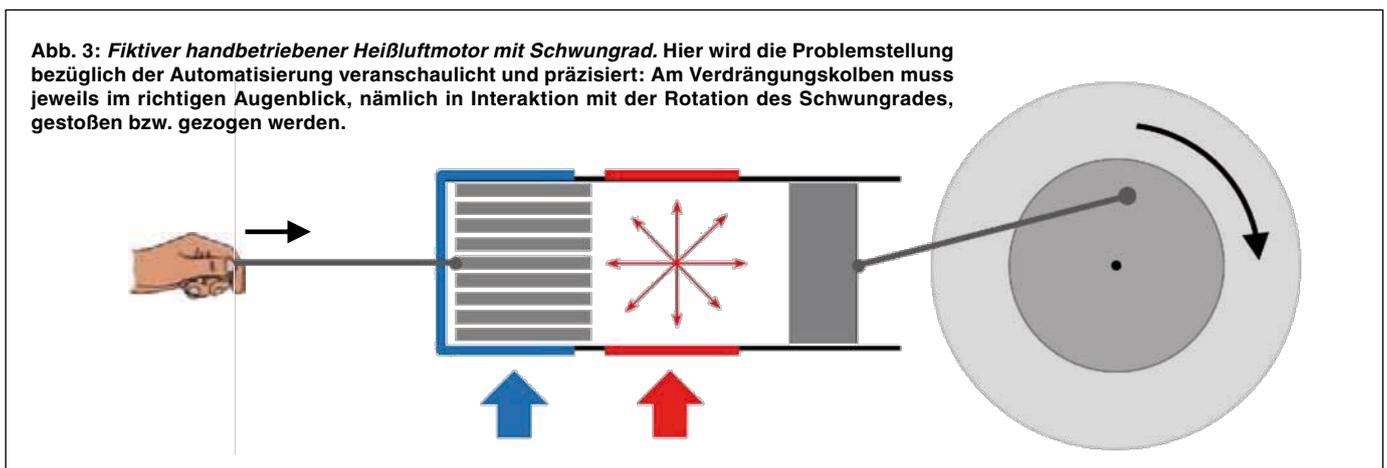
den. Es stellt sich also ein Problem, das sich wie folgt präzisieren lässt: In einem geschlossenen Arbeitszylinder sollte Luft möglichst schnell erhitzt und wieder abgekühlt werden, um auf diese Weise durch periodische Expansion und Kontraktion einen Arbeitskolben hin und her zu bewegen. Damit es schnell geht, sollte es eine Methode sein, ohne die Zylinderwand stets mit-erhitzen und -abkühlen zu müssen.

Vor diesem Hintergrund verblüfft und besticht die Idee, welche der schottische Pfarrer Robert Stirling (179–1878) ca. im Jahre 1816 patentieren

ließ. Ein Teil der Zylinderwand wird dauerhaft erhitzt, und ein anderer, vom heißen Teil thermisch isolierter Wandteil dauerhaft gekühlt. Die Luft im Zylinder wird sodann durch einen hin und her wandernden Verdrängungskolben vom kalten in den heißen Zylinderteil verdrängt und umgekehrt. Dadurch wird sie einmal erhitzt und dehnt sich aus und dann wieder gekühlt und zieht sich zusammen. Der Erhitzung/Abkühlung bzw. Expansion/Kontraktion der Luft und den damit bewirkten Bewegungen des Arbeitskolbens muss also jedes Mal eine Verschiebung des Verdrängungskolbens vorangehen. Dieses vorbereitende Hin-und-her-Schieben der Luft durch den Verdrängungskolben braucht keinen großen Kraftaufwand; es könnte im Prinzip auch von Hand ausgeführt werden. Wenn das in einem gewissen Takt geschähe, könnte mit einem solchen „handgesteuerten Heißluftmotor“ regelmäßige und relativ rasche Folge kräftiger Stöße des Arbeitskolbens bewirkt werden (vgl. Abb. 2), die sich im Prinzip für eine Arbeitsleistung nutzen ließen.

### Der «Trick» der automatischen Steuerung

Als ersten Schritt zu einem Getriebe hin könnte man sich vorstellen, mittels des skizzierten handbetriebenen Heißluftmotors (Abb. 2) ein Rad zu drehen. Hierzu müsste das Rad lediglich durch eine Pleuelstange an den Arbeitskolben gekoppelt sein, und es müsste sich um ein Schwungrad handeln, damit die beiden Totpunkte überwunden werden könnten (vgl. Abb. 3). Es könnte sich als reizvoll erweisen,



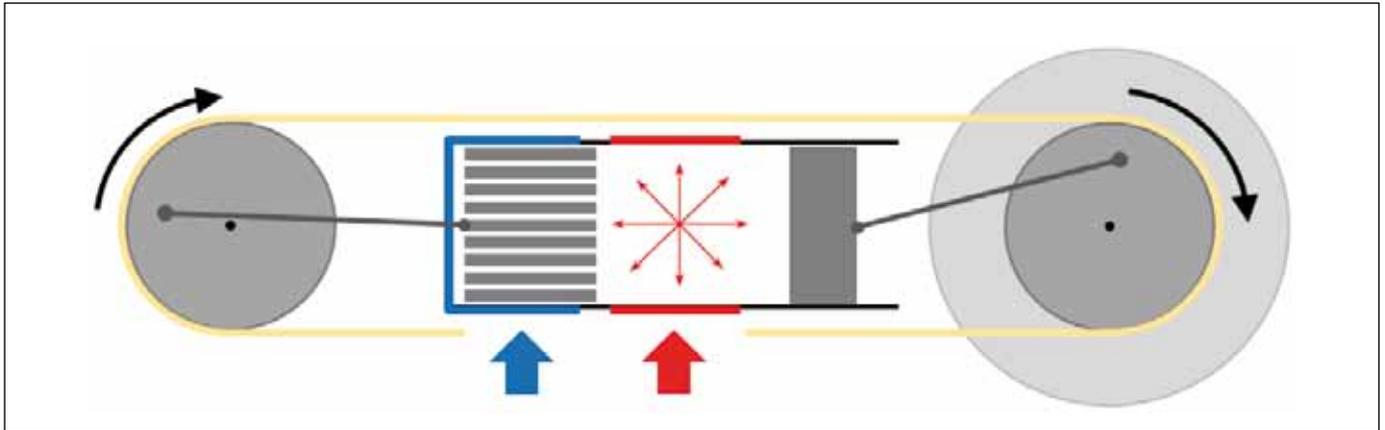


Abb. 4: *Fiktiver automatischer Heißluftmotor*. Der Vergleich mit Abbildung 3 lässt gut erkennen: Das synchron mitdrehende Hilfsrad mit der um einen Viertelkreis versetzten Aufhängung der Pleuelstange ersetzt die „Handsteuerung“ des Verdrängungskolbens.

ein solches Gerät tatsächlich zu basteln und zum Laufen zu bringen. Es würde dabei unmittelbar erlebbar, dass die Verschiebungen des Verdrängungskörpers zu den richtigen Zeitpunkten und im richtigen Rhythmus erfolgen müssen, nämlich eben immer dann, wenn das Schwungrad einen Totpunkt durchläuft bzw. wenn der Arbeitskolben an einem seiner beiden Umkehrpunkte angelangt ist.

Aber von einem Motor im eigentlichen Sinne kann man natürlich erst sprechen, wenn das Hin und Her des Verdrängungskörpers nicht mehr von Hand geleistet wird, sondern automatisch erfolgt, sodass das Gerät von selbst läuft. Damit ist das Grundproblem des Getriebes gestellt: Auf welche Weise können die oszillierenden Bewegungen der beiden Kolben mechanisch so mit der Drehbewegung des Schwungrades gekoppelt werden, dass der Verdrängungskolben automatisch und mit der richtigen Phasenverschiebung mitbewegt wird? Eine denkbare Lösung ist in Abb. 4 skizziert. Ein vom Schwungrad via Treibriemen synchron mitbewegtes Hilfsrad ersetzt gewissermassen den menschlichen Akteur, d. h. es stößt und zieht mittels einer zweiten Pleuelstange den Verdrängungskolben jeweils zu den richtigen Zeitpunkten hin und her. Entscheidend ist dabei, dass der Aufhängungspunkt dieser Verdrängungskolben-Pleuelstange am Hilfsrad gegenüber dem Aufhängungspunkt der Arbeitskolben-Pleuelstange am Schwungrad um einen Viertelkreis versetzt ist. Dadurch wird erreicht, dass die in Abb. 2 skizzierten vier Phasen automatisch und in fort-

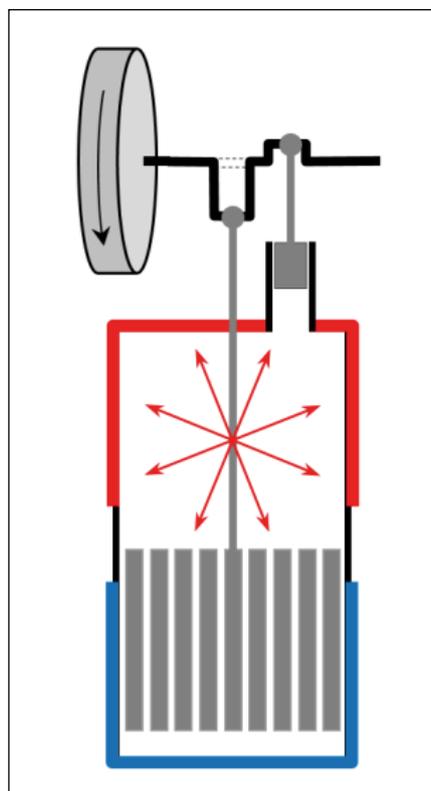


Abb. 5: *Realistischer Heißluftmotor mit klassischem Kurbelwellen-Pleuelstangen-Getriebe*.

gesetzter Wiederholung ablaufen. Immer wenn der Aufhängungspunkt der einen Pleuelstange einen Viertelkreis durchläuft, welcher den einen Totpunkt enthält, d. h. wenn er sich überwiegend quer zur Zylinderachse bewegt (mit minimaler Auslenkung des entsprechenden Kolbens), bewegt sich der Aufhängungspunkt der anderen Pleuelstange einen Viertelkreis lang überwiegend parallel zur Zylinderachse (mit deutlicher Verschiebung des entsprechenden Kolbens): Der relativen Ruhe des einen Kolbens in der Nähe seines Umkehrpunktes

entspricht immer eine maximale Verschiebung des anderen Kolbens zwischen dessen Umkehrpunkten.

Vom Phantasie-Stirlingmotor der Abbildung 4 aus ist sodann die realistischere Version von Abbildung 5 leicht zu verstehen. Der „Trick“ des Getriebes ist derselbe: die um einen Viertelkreis gegeneinander versetzten Aufhängungspunkte der beiden Pleuelstangen – sei es an Rädern oder an einer Kurbelwelle.

### Lernpsychologisch-didaktischer Kommentar

Das Arbeitsgedächtnis entlasten durch das (anfängliche) Trennen verschachtelter Funktionen

Geht man beim Erklären des Stirlingmotors von einem vollständigen, funktionsfähigen Modell aus, so wird es den Lernenden schwergemacht, alle Teilereignisse des Ablaufs zu überblicken und miteinander in Beziehung zu setzen. Zum Beispiel müssen sie bei jeder Bewegung des Verdrängungskolbens die komplizierte Bewegung seiner Pleuelstange mitbeachten, deren eines Ende eine lineare Hin-und-her-Bewegung und deren anderes Ende eine Rotationsbewegung ausführt. Zusätzlich muss die Bewegung der Pleuelstange des Arbeitskolbens beachtet werden, welche gleichzeitig in die richtige Position wandert, um in der nächsten Phase den Arbeitskolbenstoß weiterleiten zu können. Wie komplex das Geschehen ist, wird erlebbar,