

Experiment zum Nachmachen
und Nachdenken:

Das kreative Uhrwerks- universum

MANFRED EULER

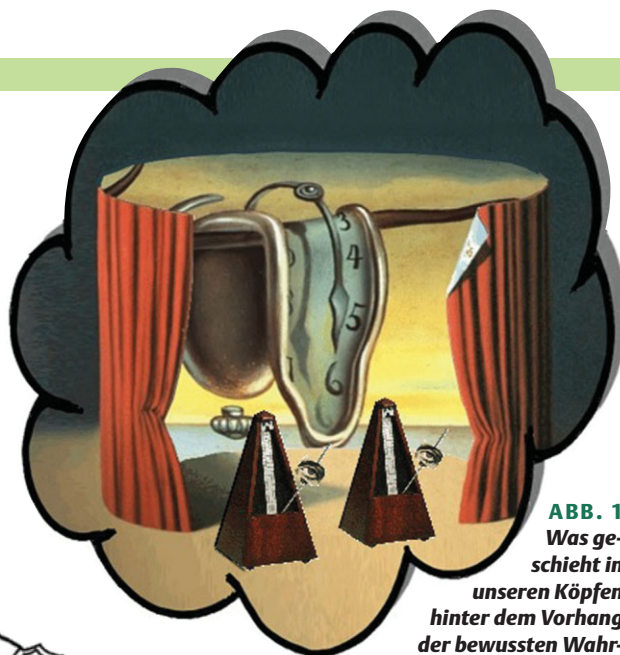


ABB. 1
Was geschieht in unseren Köpfen hinter dem Vorhang der bewussten Wahrnehmung? Uhren, die sich selbst steuern, modellieren erstaunlich gut adaptive, dynamische Prozesse im Gehirn.

Experimente können manchmal eine subversive Rolle spielen und das Denken nachhaltig verändern. Um ein solches Experiment geht es hier. Es hat einige nicht ganz unbeabsichtigte Nebenwirkungen, zumindest was das Denken über das Denken betrifft. Auf den Punkt gebracht zeigt der Versuch, unter welchen Bedingungen Uhrwerke, also tote und „harte“ Materie, etwas Unerwartetes leisten. Sie regeln ihr Verhalten selbst und werden „weich“ und anpassungsfähig. Sie entwickeln Funktionen, die wir gewöhnlich nur bei lebenden und intelligenten Systemen für möglich halten.

*Nichts aber ist dem Geist angenehmer
außer der Harmonie.*

G. W. Leibniz

Die meisten Menschen würden entrüstet widersprechen, wenn man die Arbeitsweise des menschlichen Gehirns mit einem System von Uhrwerken vergleicht (Abbildung 1). Ist das Uhrwerksbild nicht hoffnungslos reduktionistisch, ja lächerlich und geradezu eine Kränkung für unser Denkorgan?

Und dennoch: Ein einfaches Experiment mit gekoppelten Metronomen demonstriert überraschende Wechselwirkungen. Analoge dynamische Prozesse spielen auch in der Funktion unseres Gehirns auf ganz unterschiedlichen Ebenen eine zentrale Rolle. Wir sind sogar in der Lage, die entsprechenden Muster und Wechselwirkungsprodukte, wie sie die Metronome erzeugen, bei uns selbst per Introspektion wahrzunehmen, wenn wir nur gelernt haben, die Signale richtig zu deuten. Der Versuch ist mit ein wenig technischem Geschick als Heimexperiment durchführbar.

Experiment 1: Man nehme vier (oder noch mehr) Metronome und stelle sie ungefähr (aber nicht genau) auf die gleiche Taktrate ein. Wenn sie nebeneinander auf einem

stabilen Tisch stehen, wird jedes Metronom als autonome Einheit agieren, die für sich schwingt und einen eigenen Takt unabhängig von den anderen produziert. Die Überlagerung der verschiedenen Taktschläge wirkt wie ein chaotisches Durcheinander. Unser Gehirn versucht ständig, in dem scheinbaren Chaos eine Ordnung zu finden. Wir nehmen rhythmische Muster wahr, beispielsweise trab- oder galoppartige Rhythmen, die für eine gewisse Zeit stabil zu bleiben scheinen, obwohl sie sich ständig ändern.

Der Komponist György Ligeti hat die Funktion unseres Gehirns, nach Ordnung und Struktur im Chaos der einströmenden Signale zu suchen, dazu genutzt, um auf minimalistische Weise Musik zu kreieren. In seinem bekannten „Poème Symphonique“ (siehe Kasten) erzeugen 100 einmal aufgezugene und dann sich selbst überlassene Metronome einen Fluss von Mustern in den Köpfen der Zuhörer. Je nachdem, wie viele Metronome noch am Laufen sind, empfinden wir ein chaotisches Geräusch oder mehr oder weniger rhythmische Muster. Die Uraufführung des Opus in Hilversum im Jahr 1963 führte zu einem Skandal (vielleicht auch deswegen, weil erwartungswidrig nicht die Musiker, sondern ausschließlich die Zuhörer aktiv werden mussten).

MECHANISCHE MUSIK

„Poème Symphonique für 100 pyramidenförmige mechanische Metronome habe ich 1962 komponiert. Die Partitur – eine Seite in Schreibmaschinenschrift – besteht aus Anweisungen, wie man die Metronome beschaffen, auf- und einstellen sowie aufziehen soll. Sobald die Apparate ticken, entsteht die musikalische Form automatisch, und wenn man die Einstellanweisungen streng befolgt, ist das resultierende Musikstück fast immer dasselbe.“

György Ligeti, „Mechanical Music“
Begleitheft zur gleichnamigen CD, Sony Classical

Was unser Geist kann, nämlich aus den einströmenden Signalen geordnete Strukturen erzeugen, das können allerdings bereits die Metronome quasi von selbst. Sie können ihr ungeordnetes Verhalten selbst organisieren, sich synchronisieren und als ein kohärentes Ganzes agieren, ohne dass ein externer „Uhrmacher“ eingreift, der ihr Verhalten regelt. Dazu ist lediglich eine geeignete Kommunikation – also eine physikalische Wechselwirkung – notwendig.

Experiment 2: Man stelle die Metronome auf eine Platte, die beweglich aufgehängt ist und wie eine Schaukel schwingen kann (Abbildung 2). Die Schwingungsebene der einzelnen Metronome und die der Schaukel sollten parallel sein. Nach kurzer Zeit ticken die Metronome auf der Schaukel wie durch Geisterhand in exakt synchronem Gleichtakt. Aus dem wilden Durcheinander der unabhängigen einzelnen Schläge hat sich ein neues wohlgeordnetes Verhaltensmuster entwickelt. Dies geschieht spontan und ohne äußeres Eingreifen.

Ein Experiment, das mit uns spricht

Die Taktschläge der sich synchronisierenden Metronome ziehen unsere Aufmerksamkeit magisch an. Auch ohne dass man den Effekt genauer versteht, spricht der Versuch für sich! Wie stimmen sich die einzelnen Uhren untereinander ab, ohne dass ein Regler oder ein externer Taktgeber vorhanden ist? Durch welche geheimnisvolle „magnetische“ Wirkung organisieren sich die unterschiedlichen Rhythmen und verschmelzen zu einem Muster?

Metronome und Uhren werden gemeinhin als das Paradigma von Regularität, Verlässlichkeit und Vorhersagbar-

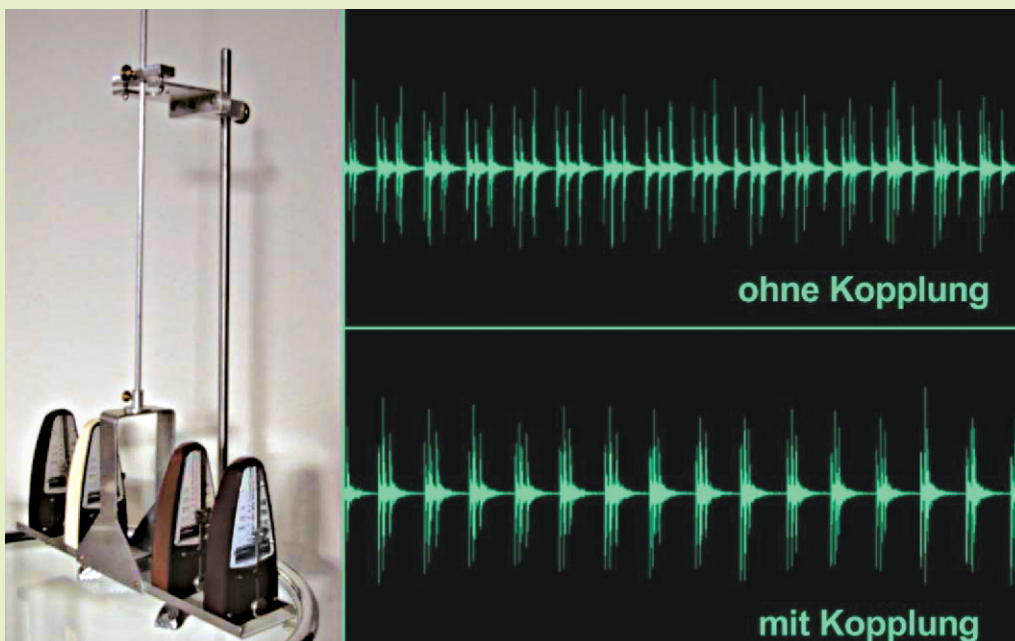
keit betrachtet. Der Begriff „Uhrwerksuniversum“ ist gewöhnlich negativ besetzt. Er wird benutzt, um die Grenzen eines mechanistischen Weltbilds aufzuzeigen, das als unzureichend angesehen wird, um Veränderung, Evolution und komplexes Verhalten adäquat zu modellieren. Unser Experiment macht nachdenklich, denn es zeigt, wie Entwicklung und Anpassung bereits auf mechanischer Ebene bei gekoppelten Uhren entstehen können. Uhrwerke sind also zu viel mehr fähig, als man gewöhnlich unterstellt. Als offene und nichtlineare Systeme sind sie wie unser Wahrnehmungs- und Erkenntnisapparat anpassungsfähig und „empfindlich“ für das, was draußen passiert, und sie können sogar in gewissen Grenzen ihr Verhalten darauf abstimmen.

Die gekoppelten Metronome sind ein Modell für Selbstorganisationsphänomene, eine universelle Erscheinung, die in offenen, hinreichend komplexen Systemen auftreten kann. Auf der Mikroebene wirken Teile des Systems bei geeigneten Randbedingungen so zusammen, dass auf der Makroebene neue Verhaltensweisen entstehen, ein Phänomen, das man als Emergenz bezeichnet. Zwar handelt es sich um ein physikalisches Experiment, doch es zeigt Bezüge zu biologischen Vorgängen. Prozesse, die wir der Domäne des Lebendigen und des Geistigen zuschreiben, sind offenbar schon auf materieller Ebene angelegt.

Selbstorganisation: das Ganze ist mehr als seine Teile

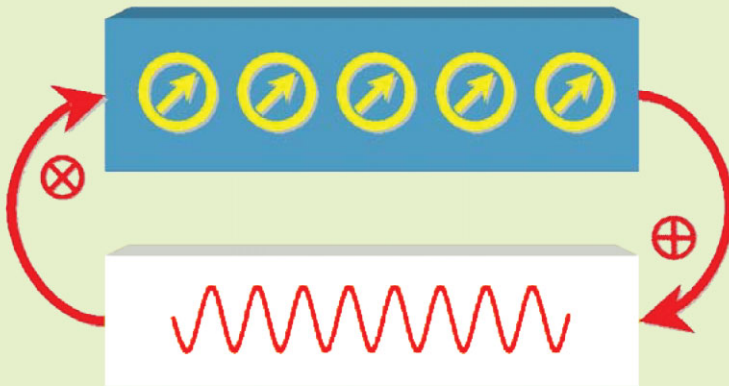
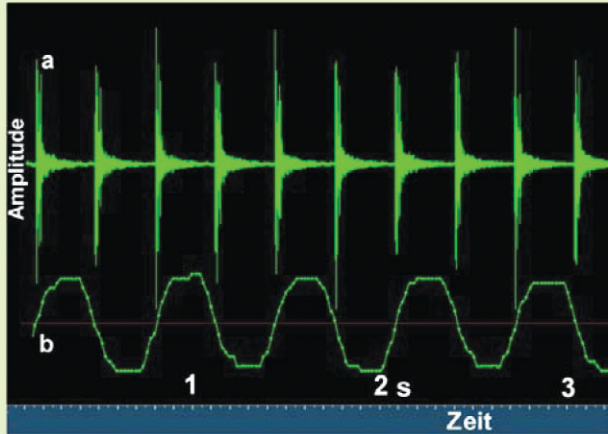
Vorgängerversionen dieses Versuchs finden sich in [3, 4]. Eine noch einfachere Methode der Kopplung ist in [9] abgehandelt. In allen Fällen handelt sich um eine mechani-

ABB. 2 | EIN „KREATIVES UHRWERKSUNIVERSUM“



Ohne Kopplung überlagern sich die Taktschläge der Metronome ungestört. Jeder einzelne Taktgeber agiert für sich. Stellt man die Metronome auf eine beweglich aufgehängte Platte, die wie eine Schaukel schwingt, so kann es zu einem neuen Verhaltensmuster kommen. Die Metronome synchronisieren sich selbstständig, ihre Schläge erfolgen im Gleichtakt.

ABB. 3 SYNCHRONISATIONSPROZESSE



Oben: Synchronisation der einzelnen Metronomtakte (a) mit der Pendelschwingung (b). Unten: Zusammenwirken von linearen (+) und nichtlinearen (⊗) Prozessen in einem Rückkopplungskreis bei der Entstehung kohärenter Schwingungen. Die synchronisierten Metronomschwingungen wirken zusammen (Überlagerung ⊕) und treiben die Pendelschwingung an. Umgekehrt wirkt die Pendelschwingung auf die Metronomschwingungen zurück und beschleunigt oder hemmt deren Phase (Modulation ⊗).

sche Realisation von Synchronisationsphänomenen, deren umfassende Theorie ein aktuelles Thema theoretischer Forschung ist [10]. Im vorliegenden Rahmen wollen wir nicht eine mathematische Theorie entwickeln. Vielmehr beschränken wir uns auf eine qualitative Deutung.

Stellt man die Metronome auf die Schaukel, so treiben die „kleinen“ Pendelschwingungen der einzelnen Taktgeber das große Pendel (Schaukel) an. Sein Schwingungszustand ergibt sich aus einer Überlagerung, einer Addition, der antreibenden Momente der einzelnen Schwinger. Das resultierende mittlere „Schwingungsfeld“, die Schwingung der Schaukel, wirkt wiederum auf die einzelnen Metronome zurück und beschleunigt oder hemmt deren Gang je nach individuellem Schwingungszustand. Sollte ein Taktgeber vorgehen, so wird er gebremst, sollte er nachgehen, so wird er beschleunigt. Wenn die Metronome nicht zu sehr verstimmt sind, entwickelt sich so in wechselseitiger Abstimmung ohne äußeren Eingriff ein gemeinsamer Schwingungszustand. Alle Metronome arbeiten im gleichen Takt. Die Schwingungen sind kohärent.

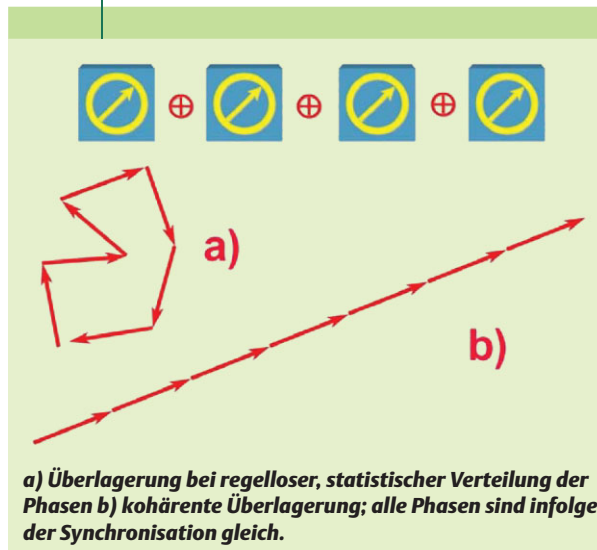
Das periodische Auf und Ab von Schwingungen lässt sich im Modell eines Zeigers beschreiben, der wie etwa der Zeiger einer Uhr gleichförmig umläuft. Der jeweilige Schwingungszustand (Phase) einer Welle entspricht der Stellung eines Zeigers. Die Synchronisation sorgt dafür, dass die Zeigerstellungen der einzelnen „Uhren“ alle in die gleiche Richtung zeigen. Abbildung 3 zeigt diesen Vorgang schematisch: die Schaukelschwingungen synchronisieren die Taktschläge der Metronome und umgekehrt führen die synchronisierten Pendelbewegungen der Metronome eine große Amplitude der Schaukel herbei.

Jedes einzelne Metronom ist ein offenes System, durch das bei Betrieb Energie strömt. Beim Aufziehen des Metronoms wird eine Feder gespannt. Ähnlich wie bei einem Uhrwerk erhält das Pendel des Metronoms in jedem Nulldurchgang einen „Tritt“ in die richtige Richtung. Diese Energiezufuhr gleicht die Folgen der allgegenwärtigen Reibung aus. Beim Zustandekommen des kohärenten Schwingungszustands des Gesamtsystems wirken zwei Funktionsprinzipien in einem Rückkopplungskreis zusammen:

- ein linearer Prozess (⊕): Überlagerung (Addition) der Schwingungszustände der einzelnen Uhren zu einem mittleren Feld, das wiederum die einzelnen Akteure steuert.
- ein nichtlinearer Prozess (⊗): Steuerung der Energiezufuhr zum einzelnen Metronom nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip, sobald ein bestimmter Schwingungszustand erreicht ist.

Es entsteht ein Regelkreis, der selbsttätig die Steuerung der Energiezufuhr der einzelnen, offenen Teilsysteme übernimmt. Die Schwingungen der Metronome verschmelzen mit dem großen Pendel zu einer Einheit. Der kohärente Zustand ist eine neue, emergente Eigenschaft. Das System reagiert als Ganzes und entwickelt Verhaltensmuster, die auf der Ebene der Komponenten noch nicht ersichtlich sind. Das Experiment ist ein einfaches Beispiel für ein adaptives

ABB. 4 ÜBERLAGERUNG VON SCHWINGUNGEN



a) Überlagerung bei regelloser, statistischer Verteilung der Phasen b) kohärente Überlagerung; alle Phasen sind infolge der Synchronisation gleich.

System und ein Modell für komplexe adaptive Prozesse, die in vielen biologischen Phänomenen eine zentrale Rolle spielen.

Im Zeigerbild lässt sich die Wechselwirkung von Schwingungen einfach beschreiben. Fasst man die Schwingungszustände der einzelnen Metronome als Zeiger auf, die bei der Überlagerung wie Vektorpfeile addiert werden, so erkennt man die dramatische Wirkung der Synchronisation (Abbildung 4). Ohne Phasenkopplung heben sich die voneinander unabhängigen Zeigerstellungen der einzelnen „Uhren“ praktisch auf. Im zeitlichen Mittel ist die resultierende Auslenkung null. Im kohärenten Zustand sind die Phasen synchron und die Zeiger weisen alle in die gleiche Richtung. Die mittlere Amplitude wächst mit der Zahl der synchronisierten Einheiten an; es kommt zu einer Verstärkung. Ein solches kohärentes Zusammenwirken von Teilen liegt beispielsweise technischen und biologischen Verstärkerprozessen zugrunde.

Anziehende Rhythmen

Ob die Metronome synchronisieren können, hängt davon ab, wie stark sie gegeneinander verstimmt sind, also wie stark sich ihre Taktraten unterscheiden. Außerdem ist die Synchronisation davon abhängig, wie stark die Metronome durch die gemeinsame Bewegung der Grundplatte gekoppelt werden. Diese Kopplungsstärke ist durch den Aufbau des Versuchs fest vorgegeben. Im folgenden Experiment wird untersucht, wie das Schwingungsverhalten von der Verstimmung der Metronome abhängt.

Experiment 3: Man stelle nur zwei Metronome auf die Schaukel. Das eine Metronom wird auf eine feste Frequenz (f_1) eingestellt. Die Taktrate des zweiten Metronoms wird stufenweise verändert (Frequenz f_2). Die Schwingungen des großen Pendels werden aufgezeichnet und einer Frequenzanalyse unterzogen. Zur Aufzeichnung wurde ein Low-Cost-Verfahren benutzt (Grafiktablett), das man auch im Unterricht oder in Heimexperimenten einsetzen kann [2].

Auf diese Weise wird das Verhalten des Systems in Abhängigkeit von dem eingestellten Frequenzunterschied $\Delta f = f_2 - f_1$, der Verstimmung der Metronome, bestimmt. Sind die Metronome stark gegeneinander verstimmt, so beeinflussen sie sich nur wenig. Es entstehen neue Kombinationsfrequenzen, deren Amplitude bei Verringerung der Verstimmung anwächst. Die Frequenzen dieser Kombinationsprodukte f_k sind gegeben durch

$$f_k = m f_1 \pm n f_2,$$

mit m, n kleine ganze Zahlen (Abbildung 5).

Bei abnehmender Verstimmung sieht es so aus, als würden sich die beiden Frequenzen f_1 und f_2 anziehen, bis sie bei einem kritischen Wert der Verstimmung zusammen mit den Kombinationsfrequenzen plötzlich zu einer einzigen Frequenz verschmelzen (Abbildung 6). Diese gemeinsame Frequenz f_g wird über einen gewissen Bereich der Verstimmung aufrechterhalten. Wird dann die Verstimmung weiter vergrößert, bricht der phasengekoppelte Zustand plötzlich wieder auf.

Im Ergebnis wirkt die Kopplung der Metronome so, als würden sich ihre Frequenzen anziehen. Der Effekt der Frequenzkopplung hat eine gewisse Ähnlichkeit zur Anzie-

ABB. 5 | FREQUENZANALYSE DER SCHWINGUNGEN DES GROSSEN PENDELS (SCHAUKEL)

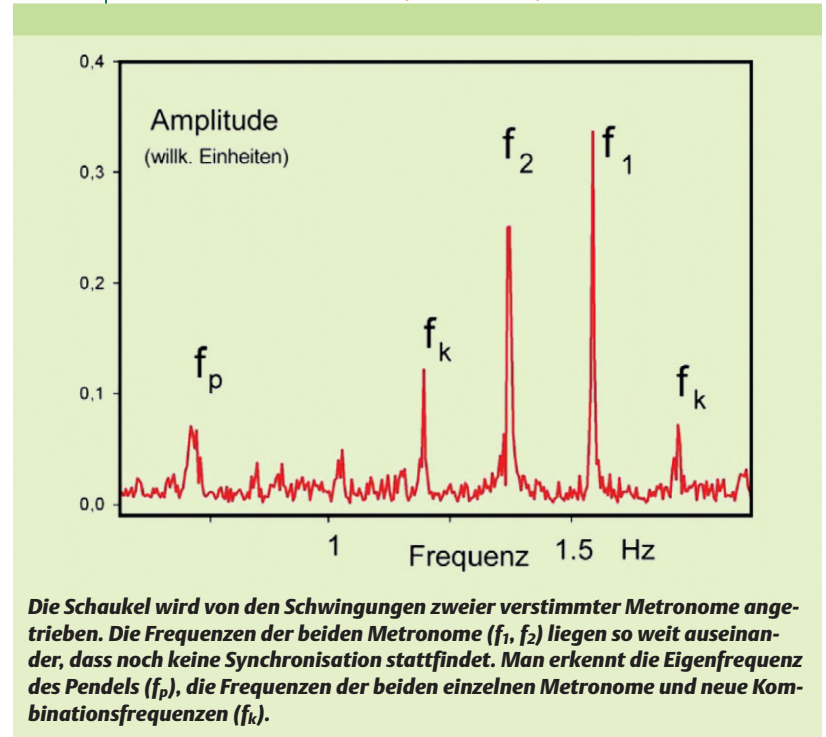
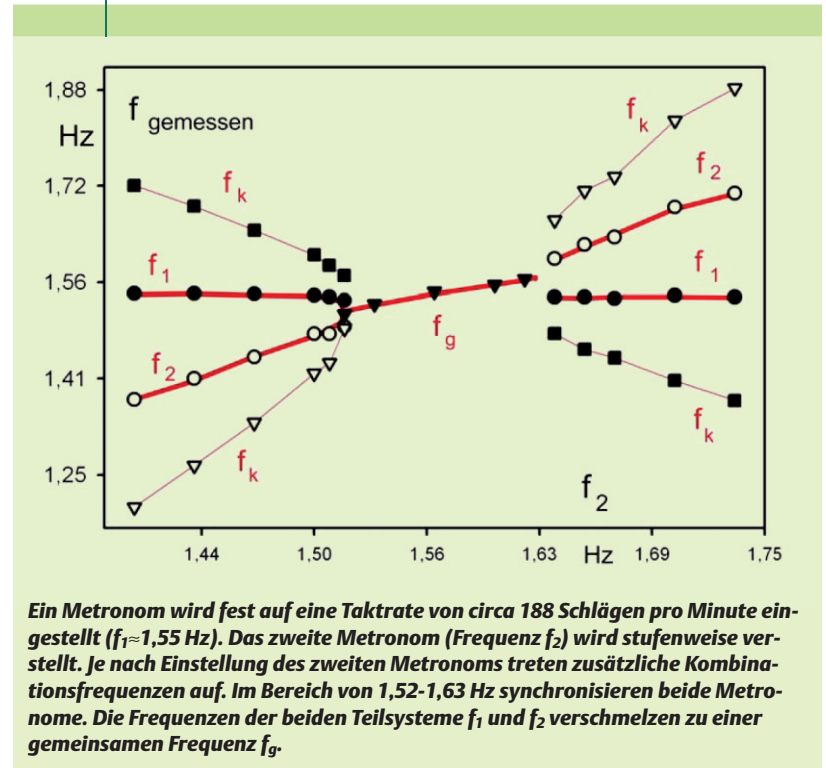


ABB. 6 | SYNCHRONISATIONSEFFEKT



hung zweier Magnete, die auf einer Unterlage liegen. Bei großem Abstand der Magnete reicht die magnetische Wechselwirkung nicht aus, um die Reibungskräfte mit der Unterlage zu überwinden. Nähert man die Magnete weiter an, so gibt es einen festen Abstand, bei dem sie plötzlich „zusammenschnappen“.

In der Biologie haben sichtbare periodische Abläufe und ihre Änderungen wie beispielsweise der Übergang von Schritt- zu Trab- und Galopprrhythmen bei Vierbeinern schon seit längerem das Interesse der Forschung auf sich gezogen. Der Biologe E. von Holst, der sich intensiv mit der Koordination rhythmischer Phänomene unter anderem bei der Flossenbewegung von Fischen auseinander gesetzt hat, fand ganz analoge Anziehungseffekte neben der linearen Überlagerung von Rhythmen. Er prägte daher die phänomenologische Bezeichnung Magnet-Wirkung (M-Effekt) für die Wechselwirkung von biologischen Rhythmen (vgl. dazu [12]). Wie kommt es zu der „magnetischen“ Anziehung der Rhythmen, wenn keinerlei Magnete im Spiel sind?

Ein Magneteffekt ohne Magnete: Phasenkopplung im Waschbrettmodell

Die Synchronisation selbsterregter akustischer Schwingungen wurde bereits in einem früheren Experiment in BIUZ [5] ausführlich diskutiert. Das dort beschriebene Phasenkopplungsmodell ist universell und gilt auch für die Kopplung zweier Metronome. Man kann die Phasendiffe-

renz in einer Energielandschaft darstellen, die sich je nach der Verstimmung und dem Kopplungsgrad der Taktgeber ändert. Die Form der Energielandschaft ergibt sich aus einer geeigneten mathematischen Näherung der nichtlinearen Bewegungsgleichungen (für eine elementare Darstellung vgl. [6]).

Bei zwei verstimmten Metronomen ohne Kopplung wächst der Unterschied in der Zahl der Taktschläge proportional zur Zeit an. Dies entspricht einer konstanten Änderungsrate der Phasendifferenz, ähnlich der Bewegung eines Körpers, der mit konstanter Geschwindigkeit in einem zähen Medium einen Hang mit konstantem Neigungswinkel hinableitet (Abbildung 7a). Der Neigungswinkel wird mit zunehmender Verstimmung immer größer. Das heißt, die Taktschläge der Metronome laufen immer schneller auseinander.

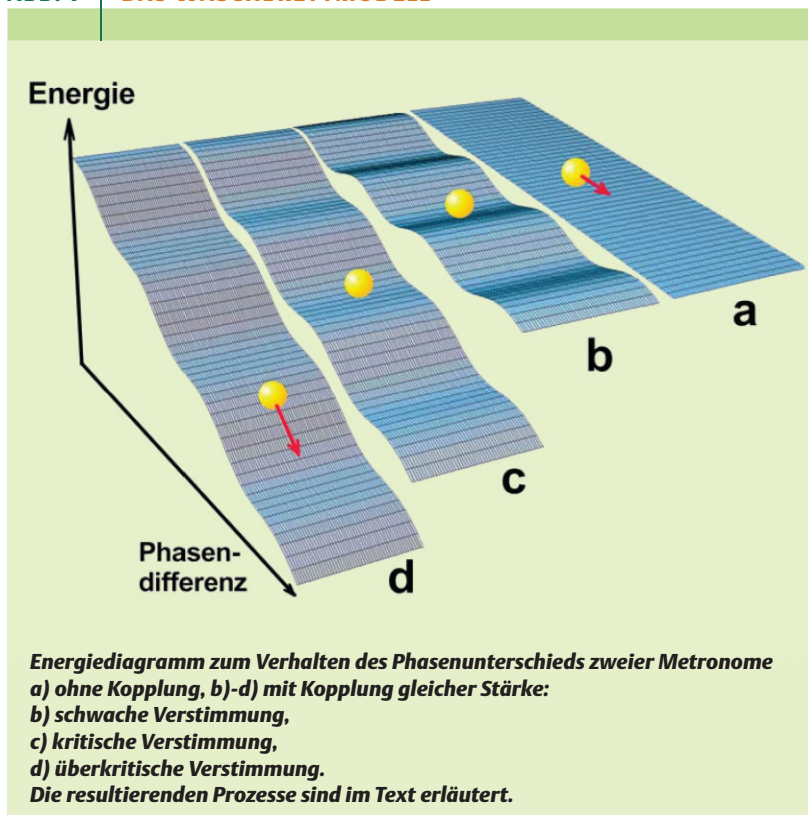
Die Kopplung der Metronome ändert die Energielandschaft. Je nach Phasenlage hemmt oder zieht das eine Metronom das andere. Dies führt im Energiediagramm zu einer periodischen Welligkeit, die sich dem konstant geneigten Abhang überlagert. Die Energielandschaft gleicht nun einem Waschbrett. Je nach Neigung des Waschbrettes (= Verstimmung der Metronome) kommt es zu unterschiedlichem Verhalten.

Legt man eine Murmel auf ein ebenes Waschbrett (Verstimmung 0), so bleibt sie in einem der Täler liegen. Dies entspricht der Synchronisation. Der Phasenunterschied der Metronome ändert sich nicht. Kippt man nun das Waschbrett (zunehmende Verstimmung), so bleibt die Murmel in einem gewissen Bereich der Neigung in dem Tal gefangen (Abbildung 7b). Analog bleibt der synchronisierte Zustand über einen gewissen Bereich der Verstimmung bestehen. Die Murmel kann erst wieder gleiten, wenn ein kritischer Neigungswinkel überschritten ist (Abbildung 7d). Entsprechend bricht der phasengekoppelte kohärente Zustand bei einem kritischen Wert der Verstimmung der Teilsysteme auf.

Das Modell der „gewellten“ Energielandschaft kann auch das Auftreten neuer Kombinationsfrequenzen erklären. Jenseits des kritischen Neigungswinkels spürt die gleitende Murmel noch immer die Welligkeit des Bodens. Sie entwickelt eine mittlere Geschwindigkeit, die periodisch zu- und abnimmt. Das entspricht einer periodischen Modulation des Frequenzunterschieds beider Metronome, die sich im Frequenzspektrum durch neue Linien (Kombinationsfrequenzen, Abbildung 5) bemerkbar macht.

Die rätselhafte „magnetische“ Anziehung der Schwingungen gekoppelter Metronome erfährt im Waschbrettbild eine perfekte Deutung. Es gibt einen klar abgegrenzten Bereich, in dem Kohärenz auftritt. Ändert man einen äußeren Parameter, so setzt Kohärenz wie bei einem Phasenübergang plötzlich ein. Auch wenn wegen zu großer Verstimmung die Synchronisation nicht eintritt, so gibt es in den Kombinationsfrequenzen bereits Vorboten dieses Phänomens. Die nichtlinearen dynamischen Prozesse machen sich als periodische Frequenzmodulation bemerkbar.

ABB. 7 | DAS WASCHBRETTMODELL



Universelle Synchronisation

In der Biologie gibt es eine Vielzahl von Synchronisationsphänomenen, die zu kohärentem Verhalten führen – von der molekularen Mikroebene bis hin zur Makroebene des Verhaltens. Zugespitzt könnte man sagen, biologische Systeme leben durch Kohärenz. Phänomene der Synchronisation werden aus den verschiedensten Gebieten beschrieben. Sie umfassen zum Beispiel Glühwürmchenpopulationen, die im Gleichtakt leuchten und die Beeinflussung von Tag-Nacht-Zyklen sowie vieler anderer zyklischer Prozesse [13].

Die Synchronisation von Uhren war bereits Huygens, dem ersten wissenschaftlichen Uhrmacher, bekannt. Während einer kurzen Krankheit ans Bett gefesselt, beobachtete er eine „seltsame Sympathie“ zwischen zwei Pendeluhren gleicher Bauart, die nebeneinander an einer Wand aufgehängt waren. Unabhängig davon, wie die Pendel der Uhren gestartet wurden, nach einiger Zeit arbeiteten beide exakt synchron, und zwar im Gegentakt. In einem Brief an seinen Vater teilte er seine Überraschung darüber mit: „...es braucht so wenig, um sie in einem immerwährenden Gleichklang zu halten [7]“. Das Huygens-Experiment wurde kürzlich einer erneuten Analyse unter der Verwendung moderner Pendeluhren unterzogen [1].

In diesem Zusammenhang vermittelt unser Metronomexperiment eine zentrale Botschaft. Es zeigt, wie in einem offenen, adaptiven Substrat neue Ebenen des Verhaltens und neue Quasi-Objekte spontan durch das geeignete Zusammenwirken von Komponenten auftreten können. Die von v. Holst so anschaulich als Magneteffekt beschriebene Wechselwirkung erzeugt wiederum neue Produkte, beispielsweise kohärente Zustände und Kombinationsprodukte, die ihrerseits als autonome Einheiten auf den nächsten Organisationsebenen weiter wirken. Objekte und Prozesse sind dabei wie in Abbildung 3 gezeigt komplementär miteinander verschränkt. Die auf den verschiedenen Ebenen entstehenden dynamischen Objekte entwickeln unterschiedliche Funktionen. In unserem Gehirn erfüllen sie auf vielfältige Weisen die Aufgabe, Wirklichkeit zu repräsentieren. Wir wollen kurz auf die Bedeutung dieser Konzepte für Wahrnehmungsprozesse und die Modellierung der Funktion unseres Gehirns eingehen.

Wiedererkennen von Bildern als aktive Resonanz

Auch bei der Wahrnehmung von Bildern kommt es zu Synchronisationseffekten.

Experiment 4: Blicken Sie auf Abbildung 8. Wenn man die Augen zusammenkneift oder das Bild aus großer Entfernung betrachtet, so dass die Rasterung verschwimmen kann, werden die meisten Leserinnen und Leser nach einer kurzen Zeitverzögerung schlagartig das verborgene Gesicht erkennen.

Es handelt sich um den vermutlich bekanntesten Physiker des 20. Jahrhunderts. Wenn man außerdem noch weiß, dass er einmal aufdringlichen Fotografen entnervt die

Zunge herausgestreckt hat, erschließt sich sogar auch dieses Detail.

Ein Bild, so heißt es, sagt mehr als tausend Worte. In Bildern steckt eine große Menge (potenzieller) Information. Man denke an die vielen Megabyte an Speicherplatz, die Bilder im Computer belegen können. Die tatsächlich für das Erkennen notwendige aktuelle Information ist viel kleiner. Bei dem gezeigten Rasterbild genügen circa 500 Bit, um Einstein zu erkennen (168 Pixel mit 3 Bit pro Rasterpunkt entsprechend $2^3 = 8$ Graustufen). Dies ist viel weniger Information, als in 1000 sinnvollen Worten enthalten

ist. Das Erkennen funktioniert aber nur, wenn entsprechendes Vorwissen vorhanden ist. Die interne Repräsentation des groben Bildes tritt in Wechselwirkung mit dem Vorwissen, und nach einer kurzen Inkubationszeit wird das Gesicht erkannt. Es gibt eine „Resonanz“ zwischen dem angebotenen Muster und dem vorhandenen Wissen.

Ist diese schlagartige Einsicht ein Synchronisationseffekt, also eine Art aktiver Resonanz? Es spricht viel dafür, dass die Synchronisation von neuronalen Oszillationen dabei eine ausschlaggebende Rolle spielt. In ähnlichen Wahrnehmungsexperimenten hat man Versuchspersonen visuelle Reize präsentiert, die entweder ein Nonsensmuster oder ein Gesicht darstellen [11]. Wird ein Gesicht erkannt, so sind nach etwa 200 Millisekunden kohärente Oszillationen im Bereich von 40 Hertz in den Gehirnströmen nachweisbar. Die Erkennung des Gesichts geht mit synchronisierten Entladungsmustern in Neuronenpopulationen einher.

Schlagartige dynamische Umschaltvorgänge, welche die Metronome über Prozesse der Selbstorganisation entwickeln, kennt jeder aus eigener Erfahrung: Dinge in unserem Kopf koexistieren zunächst unverbunden nebeneinander, doch plötzlich ist eine neue Einsicht aus deren Verbindung geboren, ähnlich wie der „Pixelhaufen“ in Abbildung 8 nach einem Moment in ein bekanntes Bild umspringt. Einen solchen „Schnapp-Effekt“ zeigen bereits Uhren!

Synchronisation und die Universalitätshypothese

Dass man wesentliche Aspekte derartiger komplexer Wahrnehmungs- und Wandlungsprozesse durch einfache mechanische Modelle wie gekoppelte Uhren beschreiben kann, hängt mit der Universalität zusammen, ein Phänomen, das man in der Physik erst in jüngerer Zeit umfassend

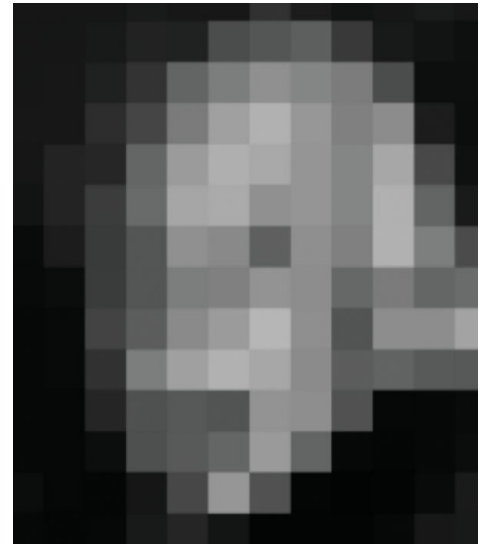


ABB. 8 Synchronisation im Kopf: Erkennen Sie den abgebildeten älteren Herren? Was tut er?

verstanden hat [14]. In der Nähe von kritischen Punkten kommt es zu universellem Verhalten. Auch sehr komplexe Systeme lassen sich durch wenige Größen (so genannte Ordnungsparameter) beschreiben, die sich auf charakteristische Weise an kritischen Punkten verändern, ähnlich etwa wie ein Magnet beim Überschreiten einer kritischen Temperatur seine Magnetisierung plötzlich verliert. Dieser Übergang erfolgt nach universell gültigen Skalengesetzen. Entsprechend wird ein hoch komplexes Netzwerk wie unser Nervensystem anpassungsfähig auf eine ähnliche Weise wie das viel einfachere und anders verknüpfte Netz der gekoppelten Metronome.

Das, was draußen in der Welt geschieht, wird durch analoge adaptive Prozesse drinnen in unseren Köpfen nachgebildet. Was das „denkende“ Substrat intern nachbildet, stimmt mit dem Verhalten der physikalischen Wirklichkeit in gewissen Grenzen überein. Die Universalität könnte ein wesentlicher Schlüssel dafür sein, dass unser Gehirn relevante Aspekte der Außenwelt erfassen, repräsentieren und letztendlich auch verstehen kann.

Uhrwerke als Modelle für Gehirnprozesse – welche eine Herausforderung für unseren Geist und welcher Anlass für Diskussionen! Unabhängig davon, ob man mechanischen Modellen kritisch oder enthusiastisch gegenübersteht, ihrer Faszination und der Lust am Nachdenken, die diese stimulieren, kann man sich kaum entziehen. In der Kulturgeschichte der Naturwissenschaft hat sich über die Jahrhunderte hinweg ein außerordentlich interessanter Diskurs zum Triumph und zur Krise der Mechanik entwickelt [8]. Die großen Fragen dieser Diskussion sind zeitlos und sollten gerade in unserer an Orientierung armen (noch) Informations- und (noch nicht) Wissensgesellschaft weitergeführt werden. Sie spannen den Bogen nicht nur vom Sein zum Werden, sondern auch vom Sein zum Sinn. Sie betten naturwissenschaftliche Kenntnisse in kulturgeschichtliche Kontexte ein und sind geeignet, fruchtbare Diskurse anzuregen, die verschiedene Wissenskulturen einbinden.

Im Kontext komplexer Phänomene sind die gekoppelten Metronome ein vergleichsweise einfaches Modell für Selbstorganisationsprozesse und für das Phänomen der Emergenz, das Entstehen neuer Eigenschaften aus dem Zusammenwirken der Teile. Als mechanisches Experiment macht es die Theorie der Entwicklung von kohärentem Verhalten und der Phasenübergänge von offenen Systemen fern vom Gleichgewicht begreifbar und konkret. Es elementarisiert und verkörpert somit eine höchst abstrakte Idee. Vielleicht spricht das Ticken der synchronisierenden Uhren uns deswegen so unmittelbar an, weil es in einer universellen dynamischen Sprache, nämlich über Rhythmen und ihre Modulation, mit uns kommuniziert. Es wirkt etwas außerhalb von uns, was wir auch als in uns wirkend erkennen. In einem Folgeartikel in der nächsten BIUZ werden weitere Experimente vorgestellt, welche die Rolle von Synchronisationsprozessen für unsere Wahrnehmung vertiefen.

Zusammenfassung

Es werden Experimente vorgestellt, die Phänomene der Selbstorganisation bei gekoppelten Metronomen untersuchen. Bei geeigneter Wechselwirkung sind diese mechanischen Uhren in der Lage, ihre Schwingungen zu synchronisieren und kohärentes Verhalten zu entwickeln. Der Vorgang der Synchronisation wird qualitativ im Waschbrettmodell diskutiert. Die Modellexperimente vermitteln Einsichten in die allgegenwärtige Rolle von Synchronisationsprozessen in der Biologie, insbesondere im Bereich der sensorischen Verarbeitung und bei kognitiven Prozessen.

Literatur

- [1] M. Bennett, M.F. Schatz, H. Rockwood, K. Wiesenfeld, Proc. Roy. Soc. Lond. **2002**, A 458, 563-579.
- [2] G. Braune, M. Euler, Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, MNU **2003**, 56, 273-277.
- [3] M. Euler, Physik in der Schule **1994**, 32, 32-37, 72-77.
- [4] M. Euler, In: R. Pinto, S. Surrinach (eds.) Physics Teacher Education Beyond 2000, Proceedings Int. GIREP Conference Barcelona 2000, Paris, 2001, 3-10.
- [5] M. Euler, Biol. Unserer Zeit **2000**, 30, 45-53.
- [6] M. Euler, Physik in der Schule **1995**, 33, 189-194, 237-242.
- [7] C. Huygens, Oeuvres complètes de Christiaan Huygens, Vol. 5, The Hague, 1893, 243.
- [8] K. von Meyenn, Triumph und Krise der Mechanik. Ein Lesebuch zur Geschichte der Physik, München, 1990.
- [9] J. Pantaleone, American J. Phys. **2002**, 70, 992-1000.
- [10] A. Pikovsky, M. Rosenblum, J. Kurths, Synchronization: A universal concept in nonlinear science, Cambridge, 2001.
- [11] E. Rodriguez et al., Nature **1999**, 397, 430-433.
- [12] R. Sinz, Zeitstrukturen und organismische Regulation, Berlin, 1978.
- [13] S. Strogatz, Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order, New York, 2003.
- [14] K. Wilson, Scientific American **1979**, 241(2), 156-179.

Der Autor



Manfred Euler, geb. 1948. Diplom und Promotion in Physik an der Universität Gießen. Habilitation (Didaktik der Physik, Duisburg 1981). 1987-1991 Professor für Physik an der FH Hannover, danach Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität Paderborn, seit 1997 Direktor am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel. Derzeit vor allem im Rahmen verschiedener nationaler und internationaler Projekte zur Verbesserung der Qualität des naturwissenschaftlichen Unterrichts tätig.

Anschrift:

*Prof. Dr. Manfred Euler
IPN, Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften an der Universität Kiel,
Olshausenstraße 62, 24098 Kiel
Email: euler@ipn.uni-kiel.de*