

sprünglichen Sonnenwindpartikel; ihre Geschwindigkeit in Erdnähe ist etwa um eine Größenordnung geringer.

Die betreffenden IBEX-Messungen hat Eberhard Möbius von der University of New Hampshire in Durham zusammen mit Kollegen ausgewertet. Wie der Physiker erläutert, entsteht der beobachtete interstellare »Wind« dadurch, »dass die Sonne durch eine Gaswolke in unserer interstellaren Nachbarschaft pflügt, wobei die Relativgeschwindigkeit zwischen beiden etwa 26 Kilometer pro Sekunde beträgt«. Die Richtung, aus der die extrasolaren Teilchen eintreffen, kann IBEX auf ein zehntel Grad genau mes-

Auf ihrem Weg durch die Milchstraße pflügt die Sonne durchs interstellare Medium. Ein vom Satelliten IBEX entdecktes Band, aus dem besonders viele Neutralteilchen zur Erde gelangen (ihre Anzahl nimmt von blau über grün und gelb nach rot zu), ist hier auf der Oberfläche der blasenartigen Heliosphäre dargestellt. Diese wird vom galaktischen Magnetfeld verformt. Die beiden Voyager-Sonden haben das Sonnensystem an Stellen verlassen, die außerhalb des Bands liegen.

sen. Wie sich zeigte, erreichen diese Partikel seine Sensoren nicht auf geradem Weg, sondern werden unterwegs in einer Weise abgelenkt, die sich mit der Gravitation und dem Strahlungsdruck der Sonne erklären lässt (Kasten S. 18).

Durch die neuen Erkenntnisse stehen nun auch die Vorstellungen über die großräumige Gestalt der Heliosphäre zur Disposition. Nach bisheriger Ansicht sollte sie derjenigen eines Kometen ähneln, mit einem halbkugelförmigen »Kopf« in Richtung des anströmenden interstellaren Mediums und einer Art Schweif auf der Gegenseite. Nun vermuten einige Astronomen, dass die Helio-

sphäre vom galaktischen Magnetfeld gestaucht wird. Hinweise auf eine unregelmäßige Form ihrer Grenzregion lieferten schon die Voyager-Sonden. Voyager 1 durchflog den Termination Shock in einer Sonnendistanz von 94 Astronomischen Einheiten (dem 94-fachen Bahnradius der Erde). Dagegen erreichte Voyager 2, der das Sonnensystem in einer etwas anderen Richtung verlässt, die Stoßwelle schon nach 84 Astronomischen Einheiten.

Bisher sind zwei Jahre für die IBEX-Mission vorgesehen. Aus Sicht der beteiligten Forscher wäre jedoch eine Verlängerung sinnvoll, insbesondere weil durch den elfjährigen Sonnenfleckenzyklus die Aktivität unseres Zentralgestirns in den kommenden Jahren deutlich zunehmen dürfte. Das letzte Minimum war ungewöhnlich lang, scheint nun aber zu Ende zu gehen. Eine aktivere Sonne sollte Größe und Gestalt der Heliosphäre beeinflussen – erste Anzeichen für zeitliche Veränderungen sind in den IBEX-Daten schon erkennbar.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und als Wissenschaftsautor in Heidelberg tätig.

PHYSIOLOGIE 🎧 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Herzen von Mutter und Fötus im Gleichtakt

Obwohl das Herz des Ungeborenen schneller schlägt als das der werdenden Mutter, versucht es sich an dessen Rhythmus anzupassen. Dadurch werden beide immer wieder kurzfristig synchronisiert. Das geschieht umso öfter, je schneller die Mutter atmet.

Von Peter van Leeuwen
und Jürgen Kurths

Am Anfang des Lebens bildet die werdende Mutter die unmittelbare Umwelt für ihr Kind. Während der Schwangerschaft kann man sie und den Fötus als ein zusammengehöriges System mit vielfältigen internen Wechselwirkungen auffassen. Aktivität und Befinden der Mutter stecken die physikalischen und physiologischen Rahmenbedingungen für die Entwicklung des Ungeborenen ab und sollten es deshalb stark beeinflussen. Beispielsweise hat sich gezeigt, dass die fötale Herzfrequenz bei körperlicher oder psychischer Belastung der Mutter zunimmt.

Allerdings ist der quantitative Nachweis einer direkten Interaktion zwischen den beiden Individuen schwierig, weil er eine zuverlässige Messung physiologischer Parameter bei jedem von ihnen erfordert.

Das embryonale Herz schlägt bereits mit sechs Wochen, und nach zehn Wochen ist das Herz-Kreislauf-System des Ungeborenen funktionsfähig. Seit einigen Jahren untersuchen wir die kardiale Aktivität von Föten anhand der Magnetokardiografie (MKG). Damit lässt sich schon ab der 16. Schwangerschaftswoche der Herzschlag des Ungeborenen nicht-invasiv und belastungsfrei aufnehmen. So genannte SQUIDS (*super conducting quantum interference devices*) zeichnen

dabei schwache Magnetfelder, die durch die elektrische Aktivierung des fötalen Herzens erzeugt werden, mit hoher Präzision auf. Da wir bei unseren Messungen mit dem Herzschlag des Fötus auch den der Mutter aufnehmen, eröffnet sich die Möglichkeit, Korrelationen zwischen beiden zu analysieren.

Systeme, die einen gleichartigen Takt oder Rhythmus aufweisen, bezeichnet man als synchronisiert. Ein Beispiel einer solchen Synchronisation hat schon 1665 Christiaan Huygens entdeckt und erforscht, dafür allerdings den Ausdruck Sympathie benutzt. Der berühmte holländische Physiker, Astronom und Mathematiker beschäftigte sich damals in-

tensiv mit der Konstruktion hochseetauglicher Pendeluhr. Dabei bemerkte er zufällig in seinem Fachwerkhaus, dass zwei solche Uhren, die an einem gemeinsamen Holzbalken hingen, im Gleichtakt schwangen. Tatsächlich genügt, wie Huygens durch gezielte Experimente herausfand, die ziemlich schwache Wechselwirkung über den Balken für die Synchronisation der Pendel. Die Dynamik dieses Systems ist allerdings viel einfacher als beim menschlichen Herzschlag.

Auch nach Huygens erforschten Physiker lange Zeit ausschließlich die Kopplung zwischen periodischen Schwingungen. Erst jüngst reifte die Erkenntnis, dass Synchronisation nur in nichtlinearen Systemen auftreten kann. Daraufhin wurde dieses Phänomen vor wenigen Jahren auch bei komplexeren, insbesondere chaotischen Schwingungen gefunden.

Derartige Synchronisationen sind allerdings nicht mehr direkt sichtbar. Deshalb wurden Nachweismethoden für sie entwickelt, welche nichtlineare Dynamik und Informationstheorie mit mathematischer Statistik verbinden. Sie ermöglichen es, Synchronisation auch in ökologischen Zyklen wie der Population von Hase und Luchs in Kanada, im Herz-Kreislauf-System, im Gehirn und im Klimasystem nachzuweisen.

Daraus ließen sich jeweils wichtige Schlüsse über die Funktionsweise der zu Grunde liegenden dynamischen Rückkopplungen ziehen. Das gilt etwa für die Erkenntnis, dass das El-Niño-Phänomen im Pazifik in bestimmten Zeitspannen über schwache, aber weit reichende Wechselwirkungen, so genannte Telekonnektionen, mit dem indischen Monsun synchronisiert ist.

Synchronisation höherer Ordnung

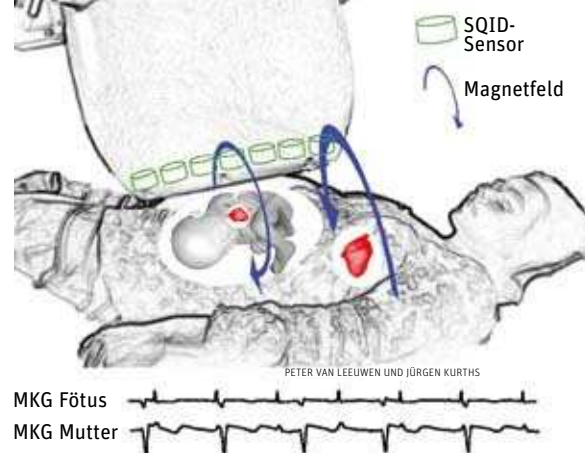
Die Untersuchung zeitlicher Beziehungen zwischen mütterlicher und fötaler Herzfrequenz stellt besondere Anforderungen an die Analysemethoden. Einerseits schwankt die Herzfrequenz nämlich recht stark, andererseits generieren beide Herzen keinen identischen Rhythmus: Das fötale schlägt deutlich schneller als das mütterliche. Man muss also nach Episoden suchen, in denen eine Synchronisation höherer Ordnung auftritt, beispielsweise im Verhältnis fünf zu drei; in diesem Fall kämen auf fünf Herzschläge des Fötus drei der Mutter. Derartige Beziehungen zwischen zwei unabhängigen, aber schwach gekoppelten

Systemen lassen sich mittels Synchronogrammen aufspüren.

Bei einer ersten Untersuchung waren in fast allen Messreihen kurze Episoden der Synchronisation zwischen den Herzschlägen von Mutter und Kind zu erkennen. Unsere Begeisterung darüber wurde freilich durch die Einsicht gedämpft, dass solche Übereinstimmungen auch rein zufällig auftreten können. Wie mitunter die Blinker von Autos in der Abbiegespur an einer Ampel vorübergehend alle gleichzeitig leuchten, besteht die Möglichkeit, dass die Herzen von Mutter und Fötus kurzfristig im Takt schlagen, ohne gekoppelt zu sein.

Um dies zu überprüfen, erweiterten wir unser Analyseinstrumentarium um eine spezielle statistische Methode, die auf besonders konstruierten Ersatzdaten beruht, so genannten Surrogaten. Dabei werden die Herzschlagreihen der Föten mit denen fremder Mütter verglichen; unter diesen Umständen ist jede Verbindung zwischen beiden Herzen ausgeschlossen. Eine detaillierte Prüfung zeigte, dass sich mindestens ein Teil der in den echten Datenreihen identifizierten Synchronisationsepisoden deutlich von den Surrogatereihen unterscheiden. Die Synchronisation ist in diesen Fällen also statistisch gesichert (bei einem Signifikanzniveau von fünf Prozent).

An dieser Stelle fragten wir uns, ob sich vielleicht Bedingungen schaffen lassen, die eine physiologische Interaktion im Mutter-Fötus-System fördern oder unterdrücken. Eine naheliegende Idee war, die bekannte Respiratorische Sinus-Arrhythmie (RSA) zu nutzen, wonach sich die Herzfrequenz beim Einatmen beschleunigt und beim Ausatmen verlangsamt. In einem zweiten Versuch baten wir deshalb die Mütter, nicht spontan zu atmen, sondern ihre Atemfrequenz an einen akustischen Taktgeber anzupassen. So variierten wir diese Frequenz zwischen 10, 12, 15 und 20 Zügen pro Minute.



Damit überdeckten wir den Bereich von einer sehr langsamen über die normale bis zu einer sehr schnellen Atmung.

Wie sich herausstellte, hängt das Ausmaß der Synchronisation in der Tat deutlich vom Atemrhythmus ab. Bei raschem Luftholen treten ungewöhnlich viele Synchronisationsepisoden auf, bei zehn Atemzügen pro Minute dagegen nur wenige. Dieses Ergebnis überprüften wir mit einem verbesserten statistischen Verfahren: so genannten Zwillingssurrogaten. Dabei erzeugt ein Algorithmus aus der gemessenen Herzschlagzeitreihe der Mutter eine neue, bei der wesentliche Eigenschaften wie die Herz- oder Atemfrequenz unverändert sind.

Reifung des Nervensystems

Auf diese Weise ließ sich das Resultat statistisch absichern: Bei schnellerer mütterlicher Atmung zeigten sich in den echten Daten signifikant mehr Synchronisationsepisoden als in den Zwillingssurrogaten (auch hier betrug das Signifikanzniveau fünf Prozent). Das ist ein klares Indiz für eine direkte physiologische Interaktion zwischen der mütterlichen und der fötalen Herzaktivität.

Die stärkere Synchronisation bei erhöhter Atemfrequenz der Mutter hängt vermutlich damit zusammen, dass bei höheren Atemfrequenzen der mütterliche Herzschlag ziemlich gleichmäßig ist. An den weitgehend konstanten Rhythmus kann sich das Herz des Fötus dann relativ gut anpassen. Eine solche Anpassung gelingt viel schwerer, wenn die mütterlichen Herzschläge – was bei niedrigen Atemfrequenzen die Regel ist – stark variieren.

Wozu ist die beobachtete Synchronisation gut? Wie man weiß, feuern im Gehirn ausgedehnte Verbände von Nervenzellen im Gleichtakt. Dahinter steckt eine physiologische Optimierung, durch die Informationen zusammengeführt und Vorgänge koordiniert werden. Ähnliches dürfte für die kardiale Mutter-Kind-Syn-