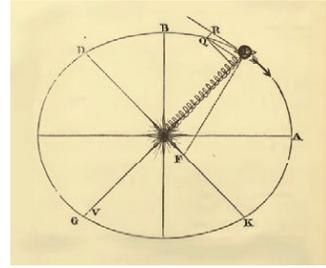


# Horloge neuchâteloise du XXI<sup>e</sup> siècle équipée de l'oscillateur IsoSpring<sup>®</sup>

Simon Henein et Ilan Vardi

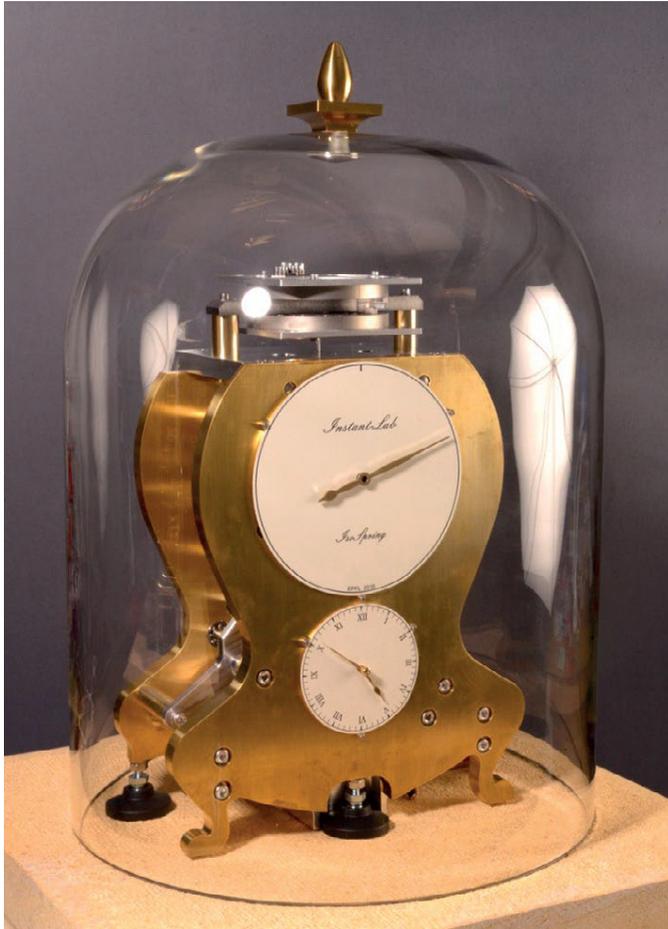
Deutsche Übersetzung Seiten 111-113



Le mécanisme *IsoSpring* est un microcosme continu et silencieux de l'univers dont il s'inspire (figure tirée de *Principia Mathematica* d'Isaac Newton, 1687 retouchée par les auteurs).

## Neuchâtel, creuset de la recherche horlogère

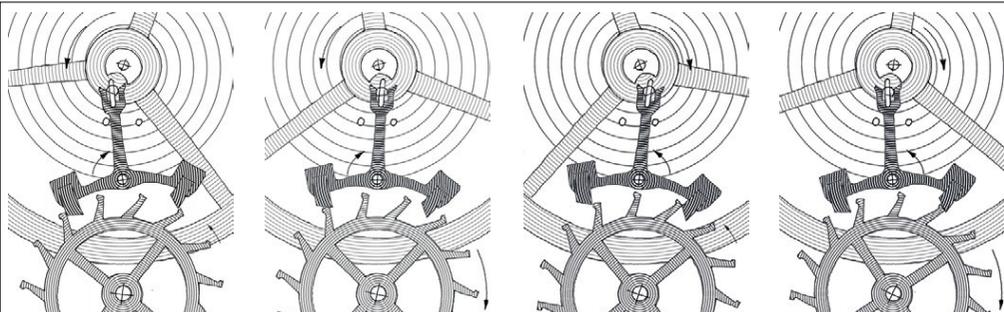
En 1919, Adrien Jacquero, recteur de l'Université de Neuchâtel, lance un appel à la Suisse pour qu'elle organise sa recherche horlogère, face à la concurrence étrangère. En 1939, le Laboratoire Suisse de Recherche Horlogère (LSRH) est fondé à Neuchâtel et en juillet 1967, la première montre à quartz y est inventée. Dans les années 80, les grands acteurs de la recherche horlogère que sont le CSEM (Centre suisse d'électronique et de microtechnique), l'ASRH (Association suisse pour la recherche horlogère) et la FSRM (Fondation suisse pour la recherche en microtechnique) sont fondés à Neuchâtel. En 2014, une antenne de l'EPFL s'établit dans le bâtiment Microcity mis à disposition par le canton de Neuchâtel. C'est en son sein que les chercheurs du laboratoire de conception micromécanique et horlogère (Instant-Lab) ont inventé, conçu et réalisé l'horloge équipée de l'oscillateur *IsoSpring*.



Le premier prototype de l'horloge neuchâteloise du XXI<sup>e</sup> siècle imaginé et réalisé à Neuchâtel par les chercheurs de l'EPFL est une horloge mécanique traditionnelle où le pendule est remplacé par un oscillateur d'un genre nouveau baptisé *IsoSpring*: « ressort isotrope ». Grâce à cette nouvelle base de temps fondamentalement différente de tous les oscillateurs utilisés en horlogerie, le temps redevient silencieux et continu: cet oscillateur fonctionne sans échappement et donc sans le fameux « tic-tac ». Il peut en outre être réalisé avec des guidages flexibles éliminant les pertes par frottement des paliers. Cette invention laisse envisager des garde-temps mécaniques plus simples à réaliser et dotés de performances inégalées en termes de réserve de marche et de précision chronométrique.



Exemples de pendules neuchâteloises du début du XX<sup>e</sup> siècle (tiré de *Histoire de la pendulerie neuchâteloise*, A. Chapuis, 1917).



Inventé en 1769 par Thomas Mudge, l'échappement à ancre est utilisé dans la majorité des montres mécaniques. Il arrête complètement le train d'engrenage de la montre, de manière intermittente : les rouages sont immobiles 90 % du temps ! Huit fois par seconde, le balancier libère le mouvement, reçoit une impulsion, et l'arrête à nouveau. C'est ainsi que le mouvement s'effectue par à-coups, source du caractère « tic-tac ». Les pertes d'énergie associées font que le rendement mécanique des échappements d'aujourd'hui ne dépasse pas 35 %.

## Le temps discret

La mesure du temps a son origine dans les cycles naturels : les 24 heures d'une journée correspondent au mouvement apparent du Soleil autour de la Terre, la durée des mois a son origine dans le cycle lunaire, et celle de l'année dans le retour des saisons. Pour s'affranchir de la dépendance de ces phénomènes dont l'observation requiert une météo clémente, des garde-temps sont inventés dès l'Antiquité, tels que le sablier ou l'horloge à eau.

Le Moyen-Âge voit naître les premières horloges mécaniques grâce à l'invention de l'échappement, le mécanisme produisant le fameux « tic-tac » des horloges et montres mécaniques. Ce bruit de chocs répétés est la manifestation sonore de la discrétisation du temps par l'échappement. Ce mécanisme arrête le mouvement de l'horloge pour ne laisser le temps s'écouler que par à-coups. Il a été raffiné au fil des siècles par les artisans jusqu'à atteindre une précision chronométrique acceptable pour la vie de tous les jours. Son efficacité énergétique est toutefois restée faible en raison de son fonctionnement intermittent. Les premières montres sont créées au début de la Renaissance et leur mécanisme suit le même principe que celui des horloges.

## Le temps scientifique

Une grande révolution horlogère est l'introduction de l'oscillateur comme base de temps par Christiaan Huygens en 1656. Il a appliqué le principe d'isochronisme formulé par Galilée en 1609 : les oscillations du pendule ont une période pratiquement indépendante de leur amplitude. Le pendule optimisé par Huygens a un rythme propre et la précision de l'horloge devient indépendante des inévitables fluctuations de la force motrice. Huygens a également découvert le principe de l'oscillateur harmonique, où une force de rappel proportionnelle au déplacement (le pendule, sous l'effet de la gravité, veut toujours retourner à son point mort) mène à un mouvement isochrone. Robert Hooke a découvert qu'une force de rappel proportionnelle au déplacement apparaît lors de la déformation élastique de la matière. Ainsi, des lames flexibles peuvent faire office de base de temps portative. Ceci mène Huygens et Hooke, vers 1675, à la découverte du spiral : lame élastique très longue enroulée sur elle-même, qui régule toutes les montres mécaniques depuis lors.

L'utilisation d'oscillateurs véritablement isochrones améliore la précision chronométrique de deux ordres de grandeur : elle passe de 15 minutes par jour

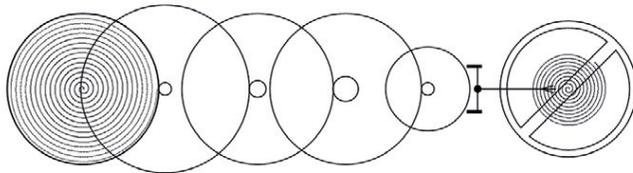
(15/(24 x 60) = 1 %) à 10 secondes par jour (10/(24 x 60 x 60) = 0,01 %).

Il s'agit d'une réelle conquête du temps, puisque les garde-temps deviennent plus précis que le Soleil qui produit des journées dont la durée varie de plus ou moins 30 secondes selon les périodes de l'année. Le résultat en est une révolution sociale, puisque le temps n'est plus dépendant des phénomènes naturels, mais basé sur une référence artificielle : l'horloge. L'établissement d'une théorie du temps n'a été possible qu'après que l'équation du mouvement de l'oscillateur, ainsi que les mathématiques requises pour la résoudre ont été maîtrisées. C'est par ce cheminement que l'horlogerie est devenue une science.

## Le temps technologique

Le mouvement de va-et-vient des oscillateurs du XVII<sup>e</sup> siècle nécessite des échappements performants et fiables, les échappements à détente et à ancre furent inventés et perfectionnés au XVIII<sup>e</sup> siècle par les horlogers anglais John Arnold, Thomas Earnshaw et Thomas Mudge, ainsi que par les horlogers d'origine neuchâteloise Ferdinand Berthoud et Abraham-Louis Breguet. Leurs avancées sont telles que la montre mécanique d'aujourd'hui est restée conceptuellement similaire à celle de 1800.

Les horloges et montres mécaniques fonctionnent grâce à un réservoir d'énergie constitué d'un ressort armé, ou d'une masse suspendue, dont l'écoulement est freiné par un échappement, qui lui-même, voit sa cadence contrôlée par une base de temps. Jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle la base de temps est un foliot : un balancier qui, par le biais du train d'engrenage et de l'échappement, est accéléré de manière alternée par la force du ressort ou du poids. La vitesse des aiguilles de ces horloges dépend directement de la force motrice. Huygens remplace le foliot par des bases de temps



beaucoup plus précises : le pendule dans l'horloge et le balancier-spiral dans la montre. Toutes les horloges et montres mécaniques

dépendent de l'échappement qui entretient les oscillations de la base de temps et compte ses oscillations pour afficher l'heure.

## Echapper à l'échappement

Si la montre mécanique actuelle est conceptuellement identique à celle de 1800, l'effet cumulatif d'avancées incrémentales est tel que la montre est devenue beaucoup plus précise et fiable. C'est un objet de détail: il y a 86'400 secondes par jour, donc pour atteindre une précision d'une seconde par jour, la précision d'une montre doit être de l'ordre de 0,001 %!

## A la recherche du temps continu

L'approche choisie par Instant-Lab a été de remettre en question la nécessité de l'échappement et de la discrétisation du temps intrinsèque à toutes les montres mécaniques existantes.

Ses chercheurs sont remontés au XVI<sup>e</sup> siècle: l'une des plus grandes révolutions scientifiques est la publication en 1687 par Isaac Newton de *Principia Mathematica*, où il démontre que des principes très simples expliquent la mécanique céleste. L'un de ses résultats les plus importants est la preuve des lois de Kepler du mouvement planétaire: la première loi exprime que les planètes suivent une orbite elliptique autour du Soleil.

Newton a démontré que l'ellipse est une conséquence de la loi d'attraction gravitationnelle, selon laquelle la force d'attraction diminue de manière

inversement proportionnelle au carré de la distance au Soleil. Mais Newton, n'étant pas sûr de cette loi, effectue une recherche pour trouver l'ensemble des lois produisant des ellipses. Il a prouvé que la loi de Hooke, où la force d'attraction est proportionnelle à la distance de la planète au Soleil, produit aussi des orbites elliptiques.

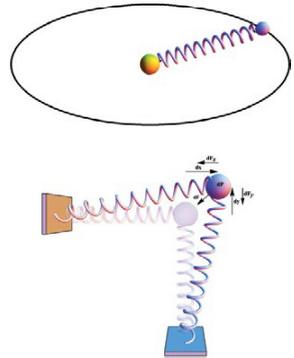
Ces deux lois d'attraction ont toutefois des implications différentes: la loi de gravité prédit que plus les planètes sont éloignées du Soleil, plus leur année longue (troisième loi de Kepler); tandis qu'avec la loi de Hook, l'année a la même durée pour toutes les planètes, quelles que soient leurs orbites.

Cette dernière propriété est le point de départ de l'invention d'*IsoSpring*: l'égalité des années pour toute orbite correspond exactement à la définition de l'isochronisme. Newton a décrit un système solaire isochrone, c'est exactement ce que cherche l'horloger! Il se trouve que dans le système solaire isochrone de Newton, le mouvement orbital est unidirectionnel: les planètes ne changent pas de sens! Riches de cette observation, les inventeurs font disparaître le mouvement de va-et-vient des bases de temps horlogères classiques. Ce mouvement unidirectionnel permet de s'affranchir de l'échappement: l'entretien se fait par la rotation continue d'une manivelle de propulsion.

Cor. 1. La force est donc comme la distance du corps au centre de l'ellipse & réciproquement; si la force est comme la distance, le corps décrira un arc d'ellipse dont le centre sera le même que le centre des forces, ou le cercle dans lequel l'ellipse peut se changer.

Cor. 2. Les temps périodiques des révolutions qui se font autour du même centre font égaux dans toutes les ellipses, car ces temps font égaux dans les ellipses semblables (par les Cor. 3. & 8. de la Prop. 4.); mais dans les ellipses qui ont le grand axe commun, ils font les uns aux autres directement comme les aires elliptiques usées, & inversement comme les parties des ces aires décrites en temps égal, c'est-à-dire directement comme les petits axes, & inversement comme les vitesses des corps dans les foyers principaux, ou directement comme les petits axes, & inversement comme les ordonnées au même point de l'axe commun. Mais ces deux raisons directes & inverses qui composent la raison des temps font alors égales; donc les temps font égaux.

Corollaires à la Proposition X, Livre I, de *Principia Mathematica*, Isaac Newton (1687).

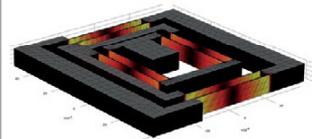


Concept *ressort fronde* tournant et concept *ressorts orthogonaux* matérialisant le système solaire isochrone de Newton.

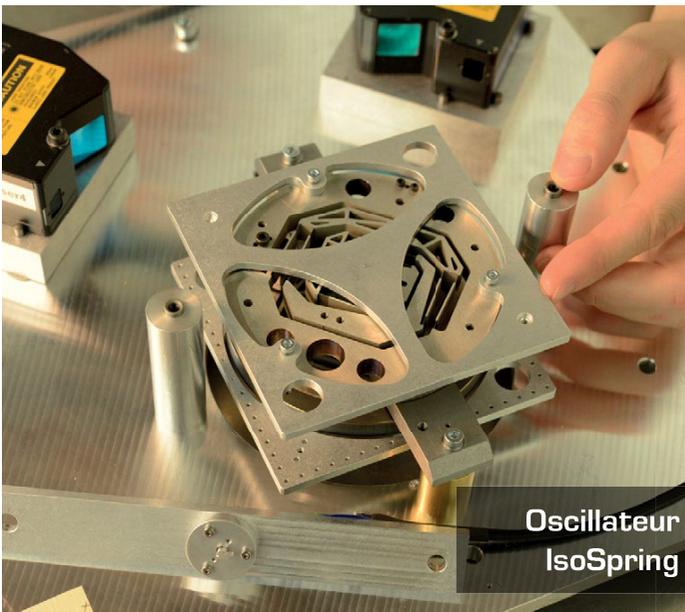
Cahier des charges du mécanisme matérialisant le système solaire isochrone imaginé par Newton:

### IsoSpring

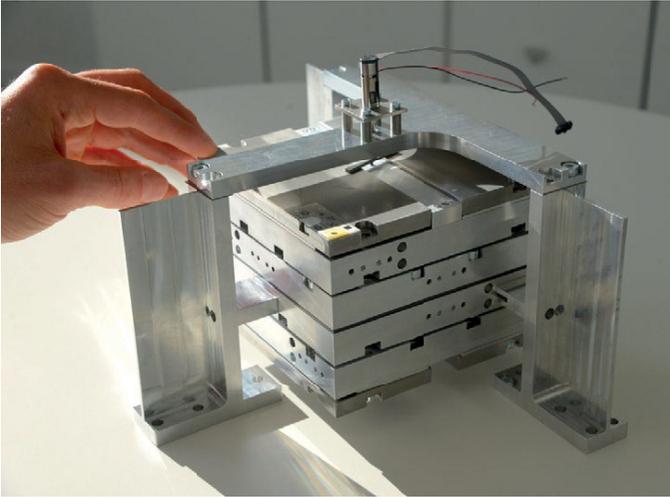
- Centre de force unique
- Force de rappel linéaire
- Force de rappel isotrope
- Masse ponctuelle
- Insensibilité à la gravité



Ressort *IsoSpring* à guidages flexibles orthogonaux utilisé dans l'horloge.



Oscillateur IsoSpring



Premier démonstrateur de l'oscillateur *IsoSpring* présenté publiquement par Instant-Lab le 6 février 2014.

## Un nouveau degré de liberté

La loi d'attraction linéaire peut être implémentée par un simple ressort. La force d'attraction du système solaire de Newton est donc réalisée à l'aide d'un ressort central où la force de rappel est toujours orientée vers le Soleil.

Le ressort doit être isotrope, ce qui veut dire que la loi d'attraction centrale doit être identique dans toutes les directions, d'où le nom d'*IsoSpring*.

Le recours aux guidages flexibles permet de réaliser, en une seule pièce, le ressort central isotrope et la suspension nécessaire au support de la masse mobile. Diverses architectures ont été élaborées, dont le r

Le concept *IsoSpring* nous fait passer des bases de temps traditionnelles dotées d'un seul degré-de-liberté et donc d'un mouvement alterné, à des bases de temps dotées de deux degrés-de-liberté aux trajectoires unidirectionnelles. Grâce au concept des coordonnées généralisées introduit par Lagrange, il est possible de faire abstraction de la situation exacte décrite par Newton. La porte s'ouvre alors sur un vaste champ d'oscillateurs fondamentalement nouveaux qui restent à imaginer et concevoir.



IsoSpring  
sphère



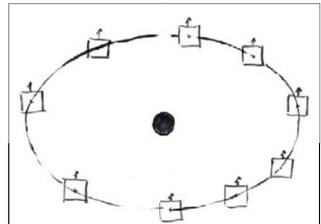
IsoSpring  
tige

Laboratoire de conception mécanique et horlogère  
EPFL STI INSTANT-LAB, Microcity,  
Rue de la Maladière 71b, 2000 Neuchâtel

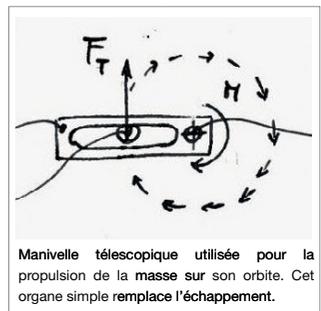
L'équipe dirigée par le Prof. S. Henein qui a conçu et réalisé ce prototype est la suivante : R. Bitterli, A. Crottini, N. Ferrier, R. Gillet, S. Henein, M. Kahrobaiyan, A. Maurel, B. Nussbaumer, L. Rubbert, E. Thalmann et I. Vardi. Graphisme : B. Tora

## Références

- [1] S. Henein, I. Vardi, L. Rubbert, R. Bitterli, N. Ferrier, S. Fifanski, D. Lengacher, « *IsoSpring* : vers la montre sans échappement », *Actes de la Journée d'Etude de la SSC 2014*, 49-58.
- [2] S. Henein, I. Vardi et L. Rubbert, *XY isotropic harmonic oscillator and associated time base without escapement or with simplified escapement*, brevet européen EP2894521, 16 juillet 2015.
- [3] S. Henein, I. Vardi et L. Rubbert, *General 2 degree of freedom isotropic harmonic oscillator and associated time base without escapement or with simplified escapement*, brevet européen EP2894521, 16 juillet 2015.
- [4] L. Rubbert, R. Bitterli, N. Ferrier, S. Fifanski, I. Vardi et S. Henein, « *Isotropic springs based on parallel flexure stages* », *Precision Engineering*, vol. 43 (2016), 132-145.



Pour que la planète se comporte comme une masse ponctuelle, il faut qu'elle se déplace en translation, sans tourner sur elle-même, telle une planète où les durées du jour et de l'année seraient identiques! Contrairement aux ressorts *frondes*, le ressort *IsoSpring* est doté de cette propriété remarquable.



Manivelle télescopique utilisée pour la propulsion de la masse sur son orbite. Cet organe simple remplace l'échappement.

# Neuenburger-Pendule des XXI. Jahrhundert versehen mit einem IsoSpring – Oszillator

Simon Henein und Ilan Vardi

Übersetzung Emanuel Bez

## Seite 107

---

Der erste Prototyp der Neuenburger-Pendule des XXI. Jahrhunderts, und in Neuenburg, nach Angaben von Forschern der EPFL hergestellt, ist ein traditionelles, mechanisches Uhrwerk, bei welchem das Pendel durch einen neuartigen Oszillator, mit dem Namen *IsoSpring*: «Iso-Feder», ersetzt wurde. Durch diese neuartige Zeiteinheit, welche, von den herkömmlichen Oszillatoren grundlegend verschieden ist, wird die Zeit geräuschlos und ununterbrochen: denn dieser Oszillator funktioniert ohne Hemmung und somit ohne das bekannte, «Tick-tack». Er kann auch beweglich gesteuert werden und somit die Reibungen der Lager auflösen. Diese Erfindung gibt Hoffnung für die Herstellung von einfacheren mechanischen Zeitmessern, versehen mit einer unerreichten Verbesserung der Gangreserve und der Präzision.

Der *IsoSpring* ist ein mikroskopischer Mechanismus, der von der bekanntesten und geräuschlosen Weltallbewegung inspiriert wurde (Abbildung aus dem «*Principia Mathematica*» von I. Newton, 1687).

## Neuchâtel, Ursprungsort der Forschungen in der Uhrenindustrie

Adrien Jacquerod, Rektor der Universität von Neuenburg, organisierte 1919, ein Wettbewerb, um die Forschung in der Uhrenfabrikation zu organisieren und der ausländischen Konkurrenz zu begegnen. Das 1939 in Neuenburg, gegründete Schweizerische Laboratorium der Uhren-Forschung (LSRH), hat die erste Quarzuhr erstellt. Im Laufe der 80er Jahren erfolgte auch in Neuenburg, der Zusammenschluss verschiedener Forschungsgesellschaften. 2014, in Zusammenarbeit mit der ETH in Lausanne, wurde im Gebäude der Microcity, in den vom Kanton Neuenburg zur Verfügung gestellten Räumlichkeiten, ein

neues Forschungszentrum eingerichtet. Die Forscher in diesem Laboratoriums haben die neue Uhr, mit den *IsoSpring*-Oszillator, erfunden und angefertigt.

Beispiele von Neuenburger-Pendule, Anfangs des XX. Jahrhunderts.

## Seite 108

---

Die von Thomas Mudge, 1769 erfundene Anker-Hemmung, wird in den meisten mechanischen Uhren verwendet. Sie stoppt den Ablauf des Räderwerkes, ab und zu: das Räderwerk ist zu 90 % angehalten! Die Unruhe befreit, acht mal pro Sekunde, diesen Zustand und das Räderwerk ist dann wieder im Stillstand. Auf diese Weise ergeben sich Stösse, die wir als Tick-tack wahrnehmen. Der entsprechende, mechanische Kraftverlust durch die Hemmung befindet sich unter 35 %.

## Der Zeiten Ablauf

Der Ursprung der Zeitmessung sind die Naturereignisse: 24 Stunden entsprechen einer Erdumdrehung der Sonne, die Monate einer Mondphase, und die Jahre, nach den wiederkehrenden Jahrzeiten. Um die Momente zeitlich festzuhalten, wurden, schon in der Antike, Zeitmesser erfunden und hergestellt, wie z.B. Sanduhren und Wasseruhren.

Durch der Erfindung von der Hemmung, erschienen im Mittelalter die ersten mechanischen Uhren deren Mechanismen das bekannte «tick-tack» der mechanischen Uhren erzeugen. Das Geräusch, dieser sich wiederholenden Schläge, bezeugen, durch die Funktion der Hemmung, den Ablauf der Zeit.

Dieser Mechanismus stoppt (hemmt) den Ablauf des Uhrwerkes, um es, von Zeit zu Zeit, «Portion mässig» und regelmässig, wieder frei zu geben. Die Hemmungen wurden im Laufe der Jahrhunderten verbessert und erreichten ausgezeichnete Gangergebnisse welche für den täglichen Gebrauch

erwünscht waren. Durch das nur zeitweise Funktionieren, blieb das Kraftmoment schwach.

Die ersten tragbaren Uhren, welche, zu Beginn der Renaissance erbaut wurden, waren mit denselben Funktionsprinzipien wie die Wanduhren versehen.

## Die wissenschaftliche Zeit

Die Einführung, der Schwingung als Masseinheit, durch Christian Huygens, 1656, war eine grosse Revolution. Er verwendete die durch Galilée, 1609, erstellte Isochronismus-Formel: die Schwingungsdauer eines Pendels ist praktisch unabhängig von der Schwingungsweite. Die Anwendung, durch Huygens, dieser Erkenntnis wurde, auch bei unterschiedlichen und unvermeidbaren Kraftmomenten, als selbständige und präzise Zeiteinheit erkannt. Huygens hat auch entdeckt, dass die Schwingungen harmonisch sind und die Rückführungskraft sich der Schwingungsweite anpasst. Die Schwingungsdauer ist nicht abhängig von der Schwingungsweite. Die Rückführungskraft erhöht sich bei grösserem Schwingungswinkel. Somit kann die Bewegung einer Klinge als Zeiteinheit betrachtet werden. Dies führte, dass Huygens und Hooke, um 1675, den Spiral entdeckt haben: eine lange Metalllamelle, zusammengerollt, welche seither bei mechanischen Uhren angewendet werden.

Durch Verwendung von verschiedenen Materialien, konnte die Gangresultate verbessert werden: von 15 Minuten, wurde bald 10 Sekunden pro Tag.

Es handelt sich um eine echte Errungenschaft in der Zeitmessung, wurden doch die Zeitmesser präziser als die Sonne, dessen Abweichung, je nach Jahreszeiten, von bis zu 30 Sek./Tag aufweist.

Dies ergab ein Umdenken, denn die Zeit ist nicht mehr abhängig von den Naturereignissen, sondern auf einer künstlichen Referenz: die Uhrzeit!

Die Erkennung der Theorie der genauen Zeitmessung war erst möglich, nachdem die Zeitgleichung (Unterschied mit der Sonnenzeit) erkannt, und dessen Grundlagen berechnet werden konnten. Dies ergab die wissenschaftliche Zeitmessung.

## Die technologische Zeit

Die hin und her Bewegung der Oszillatoren seit dem XVII. Jh., erfordern eine leistungsfähige und

zuverlässige Hemmungen. Die Chronometer-Hemmungen, im XVIII. Jh., wurden von den englischen Uhrmachern John Arnold, Thomas Earnshaw und Thomas Mudge, sowie von den Neuenburger Uhrmacher: Ferdinand Berthoud und Abraham-Louis Breguet, erfunden und verbessert. Die Fortschritte waren so überzeugend, dass die mechanischen Uhren, heute noch, grundlegend, wie diejenigen von 1800, hergestellt werden.

Mechanische Gross- und Kleinuhren funktionieren, dank der Kraftquelle, einer Zugfeder, oder eines Gewichtes, dessen Ablaufen durch eine Hemmung unterbrochen, und dessen Funktion durch den Rhythmus eine Zeitbasis kontrolliert wird. Bis in das XVII. Jh. war die Zeitbasis ein Schwingbalken, der sich, durch die vom Räderwerk und einer Spindel-Hemmung übermittelte Triebkraft, hin und her bewegte. Die Geschwindigkeit der Zeiger-Umdrehungen war durch die Kraft (Gewicht) der Energiequelle beeinflusst. Huygens ersetzte den Schwingbalken durch genauere Zeiteinheiten: das Pendel für Grossuhren und das Unruh-Spiralsystem für kleinere Uhren. Alle mechanischen Uhren benötigen eine Hemmung, welche die Schwingungen des Oszillators unterhält und ein Räderwerk, welches diese Schwingungen zählt und somit die Zeitangabe ermöglicht.

---

## Seite 109

### Die Hemmung umgehen

Obschon die heutigen mechanischen Uhren einen ähnlichen Aufbau haben wie diejenigen von 1800, haben verschiedene Verbesserungen die Präzision und deren Zuverlässigkeit bedeutend verbessert.

Eine Überlegung: der Tag hat 86400 Sekunden. Demzufolge, um eine Genauigkeit von einer Sekunde zu erreichen, muss die Präzision 0,001 % aufweisen.

### Die Suche nach der ununterbrochenen Zeit

Die Forschungsarbeiten im Instant-Labor waren, die Notwendigkeit einer Hemmung, für die eigentliche Zeitangabe der bestehenden Uhren, in Frage zu stellen.

Die Forscher fanden, dass schon im XVI. Jh. eine der revolutionärsten wissenschaftlichen Veröffentlichung von 1687: Principia Mathematica, durch

Erstes Demonstrations-Model des *IsoSpring*-Oszillators, das, vom Instant-Lab, am 6. Februar 1914, der Öffentlichkeit präsentiert wurde.

Isaac Newton, hingewiesen wurde, dass die Grundregeln der Himmelskörper-Prinzipien einfach zu erklären sind. Eine, der wichtigsten Erkenntnisse, ist der Beweis von Kepler-Gesetz, dass die Planeten eine elliptische Laufbahn um die Sonne ausführen.

Newton hat hingewiesen, dass die Ellipse eine Folge der Anziehung durch die Schwerkraft, bei welcher die Anziehungskraft sich, umgekehrt proportional im Quadrat der Distanz zur Sonne, vermindert. Newton hat die Theorie von Hooke überprüft und festgestellt, dass die Berechnung, mit der proportionaler Distanz des Planeten zur Sonne, auch eine elliptische Form aufweist.

Diese Erkenntnis ergibt den Ausgangspunkt zur Erfindung von *IsoSpring*: die jährliche Regelmässigkeit aller Umlaufbahnen, definiert genaustens die Beschreibung des Isochronismus. Newton beschreibt das Sonnensystem als Isochron, was der Uhrmacher eigentlich wünscht! In der Beschreibung von Newton ist auch erwähnt, dass im isochronen Sonnensystem die Umlaufbahnen einbahnig sind: die Planeten wechseln nie die Laufrichtung! Bereichert durch diese Erkenntnisse, lassen die Forscher die hin und her Bewegung vom Pendel oder Unruh-Spiral System verschwinden welche bis anhin in der Uhrmacherei als die klassische Zeiteinheit betrachtet wurde. Diese in derselben Richtung drehenden Bewegungen erlauben somit auf die Hemmungen zu verzichten: der Unterhalt geschieht durch die stetige Umdrehung einer Antriebskurbel.

Concept: -> Darstellung der Schleuderfeder im isochronen Sonnensystem, von Newton.

Pflichtenheft des materiellen Mechanismus vom isochronen Sonnensystem nach Newton:

### **IsoSpring**

- Einziges Kraftzentrum
- Lineare Rückführungs-Kraft
- Isotropische Rückführungs-Kraft
- Genaue Masse
- Der Gravitation unempfindlich

*IsoSpring*-Feder mit der in Uhrmacherei verwendeten beweglicher rechtwinkligen Führung.

## **Eine neue Stufe der Freiheit**

Das Gesetz der linearen Anziehungskraft, kann durch eine einfache Feder bereichert werden. Die Anziehungskraft des Sonnensystems von Newton ist mit einer zentralen Feder verwirklicht worden, dessen Anziehungskraft jeweils zu der Sonne weist.

Diese Feder muss Isotropische sein, d.h. die Anziehung zum Zentrum muss, in allen Richtungen, dieselbe sein, daher der Name von *IsoSpring*.

Die Verwendung eines beweglichen Lenksystems ermöglicht, in einem Bestandteil, die zentrale Isotrop-Feder und die Aufhängung der beweglichen Masse, herzustellen. Verschiedene Ausführungen wurden getestet, u.a. die bewegliche Orthogonal-Feder, die auch in den Uhren verwendet wird.

Das *IsoSpring*-Konzept führt uns von der ersten Freiheitsstufe, der traditionellen Zeiteinheit der mit wechselnden Bewegungen, in eine zweite Freiheitsstufe, der drehenden, nicht wechselnden, Laufbahn. Durch das von Lagrange eingeführte Konzept der allgemeinen Koordinaten, ist es möglich von den Erkenntnissen von Newton abzusehen. Somit sind die Türen offen für weitere Forschungen für grundlegende und neuartige Oszillatoren.

Damit sich ein Planet, wie eine Masse, pünktlich bewegt, muss sie sich geradlinig (Translation) verhalten, ohne sich um sich selbst zu drehen, wie bei den Planeten, wo die Dauer der Tage oder der Jahre gleich sein würden. Im Gegensatz zur Schleuderfeder ist die Feder der *IsoSpring* mit dieser ausgezeichneten Eigenschaft versehen.

Teleskopische Kurbel, um die Masse auf seine Umlaufbahn zu befördern. Dies einfache Element ersetzt die Hemmung.