



3. Internationales Jost-Bürigi-Symposium vom 4. Mai 2019

Zusammenfassungen der Vorträge

1. Einleitung.....	2
2. Günther Oestmann: Die „Planetenuhr“ und „Bergkristalluhr“ – Zwei Hauptwerke Jost Bürgis im Kunsthistorischen Museum zu Wien	3
3. Peter Plassmeyer: Ausgewählte Uhren aus dem Bestand des Mathematisch-Physikalischen Salons in Dresden.....	7
4. Peter Hürzeler: Schweizer Präzisionsmesstechnik im Hochleistungssportbereich.....	8
5. Beat Jeckelmann: Zeitdefinition und moderne Zeitmessung.....	12

1. Einleitung

Der Samstagvormittag bringt zuerst zwei Vorträge zu Bürgi und seiner Zeit: **Günther Oestmann**, Technische Universität Berlin, referiert über *Zwei Hauptwerke Bürgis im Kunsthistorischen Museum zu Wien: Die "Bergkristalluhr" von 1622/27 und die ihm zugeschriebene "Planetenuhr" von 1605*, beide von ihm auf dem Prager Hradschin gefertigt. Bei der Planetenuhr handelt es sich um die welterste Uhr, die den Planetenlauf um die Sonne anzeigt, während die Bergkristalluhr, ein Alterswerk Bürgis, von ihm selbst als seine perfektteste Uhr mit eingebautem Planetenglobus bezeichnet wurde.

Danach spricht **Peter Plassmeyer**, Direktor des Mathematisch-Physikalischen Salons der Staatlichen Kunstsammlung Dresden, über *Ausgewählte Uhren aus dem Bestand des Salons*, u.a. auch über eine Jost Bürgi zugeschriebene Uhr. Der 1728 gegründete Salon ging aus der in der Mitte des 16. Jahrhunderts stammenden Kunstammer im Dresdner Residenzschloss hervor und ist im weltberühmten Dresdner Zwinger beheimatet.



Der zweite Programmteil macht uns vertraut mit modernen Zeitmessmethoden, illustriert durch faszinierende Anwendungen aus dem Sport- und Wissenschaftsbereich:



Zuerst berichtet **Peter Hürzeler**, früherer Leiter und heutiges Mitglied des Verwaltungsrates der zur Swatch-Gruppe gehörenden Firma Swisstiming LTD, Corgémont im Kanton Bern, in seinem Referat *Schweizer Präzisionsmesstechnik im Hochleistungssportbereich über den Werdegang der Zeit- und Längenmessung bei Olympiaden und Weltmeisterschaften von Beginn an bis heute*.

Danach wird **Beat Jeckelmann**, Forschungsverantwortlicher des Eidgenössischen Instituts für Metrologie METAS, Bern, über *Zeitdefinition und moderne Zeitmessung inklusive Atomuhren* referieren. Sein auch für Laien verständlicher Vortrag wird zeigen, dass Schweizer Institutionen in der Nachfolge Bürgis stehend bei der Entwicklung modernster Messtechnik weltweit an der Spitze mitwirken



2. Günther Oestmann: Die „Planetenuhr“ und „Bergkristalluhr“ – Zwei Hauptwerke Jost Bürgis im Kunsthistorischen Museum zu Wien

(I) Die „Planetenuhr“ ist nicht signiert, aber aufgrund ihrer ausgefallenen Konstruktion, der hohen Qualität des Uhrwerks und dem Vorhandensein eines Remontoirs Jost Bürgi zugeschrieben worden. Das aus vergoldetem Messing bestehende, sehr fein gravierte Gehäuse wird als Prager Arbeit betrachtet. Da das kalendarische Zifferblatt auf der Rückseite mit dem Jahr 1600 beginnt, Bürgi jedoch erst 1604 in Prag lebte, wird ein Entstehungsjahr um 1605 angenommen.

Das größtenteils aus Eisen bestehende Uhrwerk mit sieben Tagen Gangdauer und Remontoir ist mit einer gewaltigen Antriebsfeder mit Darmsaite und hölzerner Schnecke ausgestattet. Die Uhr besitzt keine Hemmung, sondern deren Gang wird von einem rotierenden Windflügel kontrolliert. Auf dessen Achse sitzt eine kleine vergoldete Kugel, die im



Vorder- und Rückseite der Bürgi zugeschriebenen „Planetenuhr“ (Aufnahme: KHM-Museumsverband)

Kristallzylinder des bekrönenden Türmchens der Uhr sichtbar ist. Der Betrachter vermag nur an der rotierenden Kugel zu erkennen, daß in der Uhr etwas vor sich geht.

Auf der Vorderseite befindet sich oben ein heliozentrisches Planetarium. Dieses ist in der Forschung zunächst für eine Modifikation des copernicanischen Systems von Christoph Rothmann gehalten worden, eine Kompromißlösung zwischen dem ptolemäischen und copernicanischen System. Es scheint jedoch von Bürgi selbst konzipiert worden zu sein.

Auf der Vorderseite befinden sich weiterhin zwei kleine Zifferblätter, die links die Stunden und rechts die Sonntagsbuchstaben anzeigen.

Das untere Zifferblatt gibt die ekliptikale Position von Sonne und Mond an. Weiterhin ist ein Drachenzeiger zur Anzeige der Bewegung der Mondknoten vorhanden.

Auf der Rückseite der Uhr befindet sich ein großes, für den Zeitraum 1600–1640 gültiges Kalenderzifferblatt mit konzentrischen Ringen für die Angaben der Jahre, Epakten, Sonntagsbuchstaben, Osterdatum, Goldene Zahl und Sonnenzirkel nach dem Gregorianischen Kalender. Dieses ist jedoch nicht mit dem Uhrwerk verbunden, weshalb der Zeiger manuell nachgeführt werden muß. Unter dem Zifferblatt ist eine stilisierte Stadtansicht (Prag?) eingraviert.

An den Seitenflächen der Uhr steht in Nischen jeweils eine Silberstatuette vor einer gemalten Küstenlandschaft (links Apoll, dahinter die Gravur des Ikarusflugs; rechts Merkur mit einer Darstellung von Ganymed mit dem Adler). Die Oberseite der Uhr um das Türmchen ziert eine Darstellung der sieben Planeten.

Bei der Konstruktion des Räderwerks hat Bürgi mit jährlichen Fehlweisungen zwischen $1/10^\circ$ und maximal $4/5^\circ$ ein hervorragendes Ergebnis erzielt. Beim System Sonne – Mond ist beim Sonnenzeiger eine jährliche Fehlweisung von $1/4^\circ$ zu verzeichnen, und der Mondzeiger bleibt pro Jahr etwa 6 Stunden (entsprechend 2°) zurück. Der Umlauf der Knotenpositionen weicht jährlich um 3,5 Bogenminuten ab.

(II) Die sogenannte „Bergkristalluhr“ bildet den Gipfelpunkt von Bürgis Schaffen, mit der er eine überaus ansprechende Synthese von Technik, architektonischem Aufbau und Materialität geschaffen hat. Das Gehäuse der kleinformatischen Uhr (deren Höhe beträgt nur 18,3 cm) besteht aus einem achteckigen, durchbrochenen Sockel aus vergoldetem Messing, einem Mittelstück aus geschliffenem Bergkristall und einer ebenfalls aus Bergkristall bestehenden Kalotte, unter der sich Himmelsglobus dreht. Auch die Kugel des winzigen Globus mit einem Durchmesser von 5,6 cm besteht aus Bergkristall. Auf den Zifferblättern der Vorderseite werden (von oben nach unten) die Sekunden, Minuten und zwölf Stunden angezeigt. Die Indikation der Mondphasen erfolgt mittels einer halbvergoldeten Kugel auf der Rückseite. Ein darunterliegendes Zifferblatt mit Aspektarium zeigt das Mondalter und die Winkelstellung von Sonne und Mond an.

Das federgetriebene Uhrwerk mit Schnecke ist mit Kreuzschlaghemmung und einem Remontoiraufzug ausgestattet (wobei die Zugfeder des Gehwerks jede Viertelstunde vom Viertelschlagwerk aufgezogen wird). Es schlägt die Viertel-, wie auch vollen Stunden. Mit Remontoiraufzug und Kreuzschlaghemmung weist die Uhr zwei Spezifika der Uhrenkonstruktionen Bürgis auf, die von diesem um 1585 in Kassel erfunden worden sind.

Die Himmelskugel mit gravierten Darstellungen der Sternbilder ist aus zwei Halbschalen zusammengesetzt und führt an einem Sterntag (23 h 56 m) eine Umdrehung aus. Die beiden Halbschalen sind durch einen vergoldeten Ekliptikring mit Bezeichnung der zwölf Tierkreiszeichen getrennt, auf welchem sich das Sonnenscheibchen bewegt. Innerhalb der Kristallkugel befinden sich ein aus zarten Stahlreifen und -stangen gebildetes System der ekliptikalen Koordinaten und der vergoldete Reif des Himmelsäquators. Am Nordpol der Himmelsachse ist ein 24-Stundenzifferblatt montiert.

Das Uhrwerk ist zweimal signiert, so daß an der Autorschaft Bürgis kein Zweifel besteht. Einen Hinweis auf die Datierung gibt das Monogramm CC unter einem Fürstenhut und das Emblem des goldenen Vließ auf dem Sockel. Dieses läßt sich mit dem 1627 verstorbenen Fürst Carl I. von Liechtenstein in Verbindung bringen, dem der Orden 1622 verliehen wurde. Möglicherweise hat Fürst Carl I. die seit langer Zeit zum Bestand der kaiserlichen Schatzkammer gehörende Uhr zum Dank für kaiserliche Gunst als Geschenk für Ferdinand II. in Auftrag gegeben. Die geringen Abmessungen der Uhr verboten die Verwendung großer Zahnzahlen bei der Konstruktion des Räderwerkes für den Himmelsglobus. Trotzdem vermochte Bürgi hier eine sehr hohe Anzeigegenauigkeit zu erreichen. Die tropische Jahreslänge ist mit einer jährlichen Abweichung von ca. 44 Minuten gut getroffen, während bei der Sonnenbewegung ein jährlicher Fehler von etwa $\frac{1}{4}$ Tag (bzw. $\frac{1}{4}^\circ$) entsteht. Dies ist aber insofern unkritisch, als eine



Fehlweisung dieser Größe auf dem Ekliptikring, der nur einen Umfang von ca. 176 mm besitzt, erst nach sehr langer Zeit wahrnehmbar ist. Die mittlere Mondbewegung wird mit einer Abweichung von 57 Sekunden pro synodischem Umlauf außerordentlich präzise dargestellt.

Das äußere Erscheinungsbild der Uhr mit ihrem durchsichtigen Kristallgehäuse und transparenten Himmelsglobus ist sehr ungewöhnlich, und man fragt sich, was Bürgi zur Wahl dieses Materials bewogen haben mag (der Kristallschnitt ist dem Spätwerk des

„Bergkristalluhr“ von Jost Bürgi (Aufnahme: KHM-Museumsverband)

Goldschmieds und Steinschneiders Ottavio Miseroni zugeschrieben worden). Bürgi wurde 1586 von Landgraf Wilhelm IV. von Hessen als „zweiter Archimedes“ gerühmt, und dies weist auf eine spezielle Bedeutungsebene der „Bergkristalluhr“ hin. Bei der Eroberung von Syracus im Jahre 212 v. Chr. erbeutete der römische General Marcus Claudius Marcellus zwei von Archimedes verfertigte Sphären. Bei der einen handelte es sich um einen Himmelsglobus, bei der anderen um eine Art Planetarium, das angeblich eine Kugel aus Glas besessen haben soll. Die Sphaera des Archimedes genöß geradezu legendären Ruhm, besaß Vorbildcharakter und spielte als Stimulans für den Uhrenbau im 16. und 17. Jahrhundert eine nicht unbedeutende Rolle. Dieser Umstand dürfte bei der Wahl des Materials für die „Bergkristalluhr“ maßgeblich gewesen sein: Es galt, sich mit der Leistung und Komplexität des Himmelsmodells des großen antiken Vorgängers zu messen.

Die „Bergkristalluhr“ Bürgis gehört zu den frühesten Zeitmessern mit Sekundenanzeige. Der kaiserliche Mathematiker und Leibarzt Paulus Fabricius erwähnt 1557 erstmals eine Uhr, die Sekunden und sogar deren Bruchteile anzuzeigen vermochte.

Man kann sagen, daß der alte Meister – Bürgi war zur Zeit der Verfertigung der „Bergkristalluhr“ über 70 Jahre alt! – hier alle Register seines Könnens gezogen hat. Mit dem Einbau von Remontoir, Kreuzschlag und Sekundenzeiger präsentiert sich ein Uhrmacher, der energische Schritte hin zur Präzisionszeitmessung unternimmt, Wert auf die Genauigkeit astronomischer Anzeigen (insbesondere der Mondbewegung) legt und in der Lage ist, das alles auch noch in sehr kleinen Dimensionen auszuführen. Dabei spielt Bürgi virtuos mit der Materialität: Das kristallene Gehäuse macht die Mechanik transparent, es ermöglicht dem Betrachter Einblicke von allen Seiten, und doch vermag man nur sehr wenig von den technischen Bestandteilen wahrzunehmen. Wie bei der „Planetenuhr“ ist der eigentliche Funktionszusammenhang dem Betrachter entzogen. Bürgi hat es geschickt verstanden, den Antrieb und das Zusammenwirken der einzelnen Baugruppen zu verschleiern. Hinter Platinen mit kunstvollen à-jour Ornamenten liegt das Uhrwerk, dessen Antrieb im Sockel verborgen ist. Die beiden Unruhen des Kreuzschlages sind auf entgegengesetzten Seiten der Uhr getrennt angeordnet, und wie der kunstvolle Globus angetrieben und das Sonnenscheibchen bewegt wird, läßt sich bestenfalls erahnen.

Sowohl die „Planetenuhr“ als auch die „Bergkristalluhr“ sind exzeptionelle Beispiele für die Kreativität Bürgis und seine enormen handwerklichen Fähigkeiten.

3. Peter Plassmeyer: Ausgewählte Uhren aus dem Bestand des Mathematisch-Physikalischen Salons in Dresden

Kunsthistoriker und Wissenschaftshistoriker, seit 2001 Direktor des Mathematisch-Physikalischen Salons der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden.

Ausgewählte Uhren aus dem Bestand ...

... des Mathematisch-Physikalischen Salons der Staatlichen Kunstsammlung Dresden. Die Kunstammer der sächsischen Kurfürsten, die ab etwa 1560 im Dresdner Residenzschloss eingerichtet wurde, beinhaltete eine Menge mechanischer Uhren. Die vollständig erhaltenen Inventare geben uns darüber Auskunft. Unter den astronomischen Uhren, Automaten und Pretiosen befindet sich auch eine Uhr, die Jost Bürgi zugeschrieben wird. Die erhaltenen Uhren aus der Kunstammer befinden sich heute im Mathematisch-Physikalischen Salon und im Grünen Gewölbe.

4. Peter Hürzeler: Schweizer Präzisionsmesstechnik im Hochleistungssportbereich

WIE KAM DIE ZEIT ZUM SPORT?

Aus Aufzeichnungen berühmter Geschichts-Schreiber wissen wir, dass die alten Griechen schon 800 Jahre vor Christus Sportwettkämpfe durchgeführt haben. Da es damals noch keine Uhren gab (die ersten Chronographen wurden 1860 hergestellt), wurden bei einem Lauf die Ranglisten nach der Reihenfolge des Überquerens der Ziellinie jedes einzelnen Wettkämpfers erstellt. Die gleiche Regel gilt heute noch. Nicht die Zeit, sondern die Position (Brust bei der Leichtathletik) ist auf der Ziellinie entscheidend. An den Olympischen Spielen



1896 in Athen wurde zum ersten Mal beim 100-m-Lauf die Zeit gemessen. Am Ziel standen zwei Kampfrichter mit je einem Chronographen. Einer hat den Ersten, der andere den Zweiten gemessen. Für den Rest des Feldes wurde die Zeit geschätzt. Beim 100-m-Final 2010 an den Europa-Meisterschaften in Barcelona liefen hinter dem französischen Sieger Christophe Lemaitre (10,11) gleich vier Athleten genau die gleiche Zeit, nämlich 10,18 Sekunden. Erst der Zielfilm hat entschieden, dass Mark Lewis-Francis als Zweiter die Silber-, Martial Mbandjok als Dritter die Bronzemedaille erhielt, der Vierte (Francis Obikwelu) und Fünfte (Dwain Chambers) gingen jedoch leer aus. Das war sehr schwer, den Athleten sowie den Journalisten zu erklären. Aber das sind eben die Regeln! Der Zielfilm hat diese Rangfolge mit Tausendstel-Sekunden-Differenzen bewiesen.



Bis 1932 war jeder Kampfrichter auch Zeitmesser und kam mit seiner privaten Stoppuhr zu den Spielen, was verwirrende Resultate hervorbrachte. Aus diesem Grund wurden ganggenau kontrollierte Uhren notwendig.

1932 Olympische Spiele in Los Angeles – das war der Start für Omega als offizieller Zeitmesser. Das Organisationskomitee verlangte von der renommierten Herstellerfirma 30 kontrollierte Chronographen plus einen Uhrmacher.

An den **Olympischen Spielen Berlin 1936** wurden 150 Chronographen plus ein Uhrmacher gewünscht (in Berlin gabs auch die erste Fernsehübertragung – Empfang jedoch nur von Berlin bis Brandenburg).

1948 an den Olympischen Spielen in London kam erstmals eine Zielfilmkamera zum Einsatz, welche jedoch nur bei Unsicherheiten (z.B. zu enger Einlauf im Ziel) benutzt wurde. Die Zeit für das Entwickeln eines Films in einer Dunkelkammer dauerte damals 30 Minuten. Mit der dritten Kameraentwicklung von Omega im Jahr 1972 wurde diese Zeit auf eine Minute und 30 Sekunden reduziert. Dieses Resultat wurde erreicht, indem das Entwickler- und Fixierbad

direkt an der Kamera angebracht wurde. Bei der heutigen Digitalkamera dauert der Prozess noch sieben Sekunden.

Die Olympischen Spiele 1968 in Mexiko waren der Beginn der elektronischen Zeitmessung. Das Fernsehen wollte von Handzeitnehmern im Bild Abstand nehmen. Gegen diese Entscheidung gab es heftige Proteste seitens des Internationalen Leichtathletik-Verbandes. Aber mit X-Tausend Versuchen wurde festgestellt, dass die per Handstoppung gemessenen Zeiten um zwei Zehntel-Sekunden schneller waren als die elektronisch ermittelten Resultate. Die Erklärung ist einfach: Der Zeitmesser hat auf die Pistole geschaut – erst wenn Flamme und Rauch sichtbar waren, startete er die Uhr. Beim Gefühl, zu spät gewesen zu sein, kompensierte er dies am Ziel willkürlich mit einem früheren Stoppen.



1972 wurde **Swiss Timing** gegründet, was eine Zusammenlegung der beiden Zeitmess-Abteilungen der Swatch Group (Omega und Longines) zur Folge hatte. Heute ist Swiss Timing eine unabhängige Service-Gesellschaft der Swatch Group.

Um die Übersicht im Innenraum des Stadions zu verbessern, wurde hart daran gearbeitet, die Anzahl der Kampfrichter auf dem Wettkampfbahn zu reduzieren. Für die Zeitmess-Firma hatte das zur Folge, dass sie immer wieder zusätzliche Aufgaben übernehmen und lösen musste. Früher trugen die Athleten Startnummern, und auf Zielhöhe standen 6 Einlauf-Richter, welche die Nummern der Einlauf-Reihenfolge nach notierten. Das war notwendig, weil der Zielfilm die Athleten nur von der Seite sichtbar macht. Neuerdings trägt der Athlet nicht die Nummer, sondern seinen Namen an der Brust, was die Eingangskontrolle erschwerte – gar unmöglich machte. Die Lösung: Jeder Athlet erhält einen Transponder (10 g) in einer speziellen Tasche an der Startnummer auf seiner Brust. Das ermöglicht nicht bloss, die Schlusszeiten im Ziel noch schneller und exakter zu ermitteln, sondern bietet auch die Möglichkeit, absolut genaue Zwischenzeiten festzuhalten. Alle 100 m ist in der Laufbahn eine Antenne eingelegt, welche sämtliche Zwischen- und Endzeiten an die Zeitmesskabine liefert. Automatisch sieht man so die Rangfolge (Namen und Endzeit in Zehntels-Sekunden) auf der Anzeigetafel im Stadion.

1984 wurde an den **Olympischen Spielen in Los Angeles** zum ersten Mal Leica für die Weitemessungen eingesetzt. Noch wichtiger war die Leica-Messung beim Stabhochsprung. Es wurde dabei nämlich festgestellt, dass die an den Ständern, wo oben die Latte aufliegt, angezeigten Höhen nicht genau waren. Denn die zu überspringende Latte hing in der Mitte 10 bis 12 mm durch. Dank dem optischen Messsystem von Leica liess sich auch die Höhe in Lattenmitte millimetergenau justieren.

1986 war ein wichtiges Jahr für die Zeitmessung! Als bei der Uhrenindustrie Probleme auftraten, wollten die meisten Verwaltungsräte der SMH wegen des immer grösser werdenden Aufwands das Ende der Sport-Zeitmessung herbeiführen. Nicht so Nicolas Hayek. Mit seiner Weitsicht und seinem Feeling für die Bedeutung der Zeitmessung im Sport, setzte er sich für deren Fortbestand durch.

Die Vergabe der Zeitnahme an Olympischen Spielen wurde bis ins Jahr 2000 der Organisation der jeweiligen Austragungsländer überlassen. Nach mehreren Korruptionsfällen nahm

das IOC die Vergabe aber an sich und holte Offerten ein. In Konkurrenz mit einer japanischen Firma ging Omega dabei als Sieger hervor und schloss mit dem IOC einen Vertrag ab bis 2010, welcher in der Zwischenzeit bis 2020 und letztes Jahr bis 2032 erneuert worden ist. Bei dem gigantischen und immer noch weiter zunehmenden Aufwand an Technologie, Material und Manpower ist diese langfristige Kontinuität die einzig sinnvolle Lösung.

Omega war immer führend in der Entwicklung sämtlicher Zeitmess-Einrichtungen.

- 1945: erste Fotozelle (Ziel)
- 1952: erster mechanischer Drucker, welcher den Hundertstel anzeigte
- 1956: erstes Start-Tor für die Skirennen
- 1961: zum ersten Mal Zeiteinblendung im Fernsehen

Sämtliche Geräte und Innovationen, welche die **Zeitmessung** betreffen, werden von Swiss Timing entwickelt und gebaut. Die Uhr in einem Computer, zum Beispiel, wäre für die hohen Ansprüche der Sport-Zeitmessung zu ungenau.

So haben wir unter anderem eine „Atomuhr“ entwickelt, welche die Millionstel-Sekunde messen und anzeigen kann. Selbstverständlich wird für diese Uhr keine Werbung gemacht, sonst käme dann sofort die Entsorgungsfrage auf ...

Die Entwicklung seit den sportlichen Wettkämpfen ums Jahr 800 vor Christus bei den Griechen bis heute ist gigantisch. Aber noch längst nicht abgeschlossen.



Wie wird heute ein 100-m-Lauf gemessen?

Bei Olympischen Spielen werden im Stadion ca. 80 km Koaxialkabel verlegt. Die Zeitmessung eines Sprints findet nicht erst im Ziel statt, sondern bereits am Start. Mit dem elektronischen Startblock wird die Zeit zwischen Startschuss und Abstossdruck jedes Athleten in Tausendstelsekunden festgehalten. Der Abstossdruck ist ebenfalls messbar und beträgt bei den Männern 100 bis 140 kg. Erfolgt dieser

Druck auf den Startblock früher als 100/1000-Sekunden nach dem Startschuss, wird automatisch ein Fehlstart angezeigt und die Athleten werden an den Start zurückgerufen. Wissenschaftliche Untersuchungen haben nämlich gezeigt, dass ein Mensch nicht in weniger als 100/1000-Sekunden auf ein akustisches Signal reagieren kann. Auf Höhe der 50-m-Marke steht das Windmessgerät am Bahnrand. Die Windmessung beginnt automatisch mit dem Startschuss und läuft während 10 Sekunden (100-m-Lauf) und während 13 Sekunden (110-m-Hürdenlauf). Wenn der Wind stärker als 2 m pro Sekunde bläst, gilt die Zeit eines Athleten nicht als Rekord. Am Ziel sind am Rand der Innen- und der Aussenbahn jeweils zwei Fotozellen übereinander installiert. Sobald beide abgedeckt sind, hält die Zeit an - im Fernsehen sowie im Stadion (Anzeigetafel). Diese Zeit ist allerdings nur inoffiziell. Die offizielle Zeit wird mit den Zielfilmkameras, welche beidseitig auf die Ziellinie gerichtet sind, gemessen. Die ersten 8 mm der Ziellinie werden mit 20000 Bildern pro Sekunde fotografiert, was schliesslich den exakten Zielfilm ergibt.



Bis zum Olympia-Jahr 2000 war Omega nur zuständig für die Zeitmessung. Der neu abgeschlossene IOC-Vertrag bis 2032 beinhaltet auch das Datahandling sowie sämtliche graphischen Einblendungen (Start, Resultatlisten, laufende Zeit, Rekorde, Namen der eingebildeten Athleten). In der Leichtathletik werden die Felder zwischen den Weitenlinien bei den Würfeln in Farbe gestaltet, damit sich der Fernsehzuschauer besser orientieren kann. Bei den Schwimmwettkämpfen wird die Weltrekordlinie geliefert, sie läuft am Fernsehen bei jedem Rennen mit. Den Fernseh-Kommentatoren wird ein spezieller Informationskanal zur Verfügung gestellt, der alle Daten eines Wettkampfes enthält. Während Olympischen Spielen ist der Zugang zu allen Wettkampfstadien möglich. Biographien, Palmares und Leistungsentwicklung jedes Athleten können darauf abgerufen werden.

Mit all diesen Aufgaben hat sich der Aufwand für Personal und Material enorm gesteigert.

- 1948 – London: 6 Personen und 600 kg Material
- 1960 – Rom: 19 Personen und 3 Tonnen Material
- 1968 – Mexiko: 45 Personen und 8 Tonnen Material
- 1984 – Los Angeles: 80 Personen und 60 Tonnen Material
- 2016 – Rio: 425 Personen und 430 Tonnen Material (90 Anzeigetafeln)

Schlusswort

Obwohl also der Aufwand in der Sport-Zeitmessung stetig grösser wird, sind das die grossen Anstrengungen für Swiss Timing auch in Zukunft wert. Denn Zeit- und Weitenmessung sind eine absolute Vertrauenssache. Die Sportler selbst, die Coaches und Trainer, die Medien und die Zuschauer müssen sich zu 100 Prozent auf korrekt ermittelte Resultate verlassen können. Zweifel um irgendwie manipulierte oder schlampig gemessene Werte darf es nicht geben.

Genau deshalb unternimmt Swiss Timing für die Zukunft weitere Anstrengungen, die Zeit- und Weiten-Messung für alle Beteiligten – Athleten, Coaches, Fernsehen, Journalisten und Zuschauer im Stadion – transparent zu machen. Nicht bloss bei den Schlusszeiten, sondern auch durch das Aufzeigen von Zwischenzeiten, die Aufschlüsseln wie eine Leistung von A-Z zustande kommt. Schliesslich kommt das nicht nur den Statistikern und Aussenstehenden zugute. Auch Trainer und Sportler selbst können dank der Analyse von Zwischenzeiten erkennen, wo ein Sprinter noch Schwächen hat, wo sie im Training den Hebel ansetzen müssen, um die Leistungen noch besser zu optimieren.

5. Beat Jeckelmann: Zeitdefinition und moderne Zeitmessung

Die Zeitmessung hat eine für unsere Sinne unvorstellbare Genauigkeit erreicht. Wie zurzeit von Jost Bürgi sind noch heute die Navigation und die Astronomie die Hauptnutznießer der stetig verbesserten Uhrentechnik. In der Zeitmessung gilt wie auch sonst in der Messtechnik, dass ein Resultat nicht genauer sein kann als die zu Grunde liegende Einheitenrealisierung und die darauf aufbauende Messskala. Dem Stand der wissenschaftlich-technischen Entwicklung entsprechend waren die Definitionen der Zeiteinheiten und -skalen im Verlauf der letzten Jahrhunderte einem steten Wandel unterworfen.

Zeiteinheit und Zeitskalen

Der Begriff „Zeit“ wird in den exakten Wissenschaften unterschiedlich belegt. Zum einen kann er im Sinne eines Datums, das heisst als bezeichneter Punkt auf einer gedachten Zeitachse, verwendet werden. Die Spezialisten sprechen in diesem Fall von der Epoche. Man versteht darunter aber auch die Länge eines Zeitintervalls oder – gleichbedeutend – die Dauer zwischen zwei Ereignissen. Zur Beschreibung von physikalischen Sachverhalten muss die Zeit quantifiziert und damit der Begriff des Zeitintervalls eingeführt werden. Für die Messung von Zeitintervallen braucht es eine Einheit, die im internationalen Einheitensystem (SI) Sekunde (s) genannt wird.

Ein Konzept, mit dem einzelnen Ereignissen Daten (Epochen) zugeordnet werden können, wird „Zeitskala“ genannt. Bei der Bildung einer Zeitskala werden die Intervalle ab einem festgelegten Anfangspunkt weg aufsummiert. Von einem Kalender spricht man, wenn zusätzlich Regeln für die Nummerierung der Epochen auf der Zeitskala gelten.

Astronomische Zeitskalen (UT, UT1, UT2)

Die scheinbare Bewegung der Sonne am Himmel und der Wechsel von Tag und Nacht wird seit der Frühgeschichte der Menschheit für die Zeitbestimmung genutzt. Das Zählen der Tage, Monate und Jahre – ausgehend von einem willkürlich festgelegten Startpunkt – bildet eine natürliche Zeitskala. Das zu Grunde liegende Skalenmass ist der wahre Sonnentag, dessen Dauer durch die tägliche Beobachtung des Sonnenhöchststandes an einem fixen Standort bestimmt wird. Wegen der Neigung der Erdrotationsachse zur Bahnebene und der Elliptizität der Erdbahn ist die Länge des Tages nicht konstant, sie weicht im Verlauf des Jahres bis zu ± 30 s von der mittleren Tageslänge ab. Die über ein Jahr gemittelte Tageslänge wird mittlerer Sonnentag genannt, sie bildet das Skalenmass der Weltzeit UT (Universal Time). Die Skala ist auf den durch das Observatorium in Greenwich verlaufenden Nullmeridian bezogen und wird auch Greenwich Mean Time (GMT) genannt. Im metrischen System ist der Tag in 24 Stunden zu je 60 Minuten zu je 60 Sekunden aufgeteilt. Vor 1956 war die Sekunde entsprechend als der $86'400$. Teil des mittleren Sonnentages definiert. Im SI wurde diese Definition jedoch nie verbindlich festgelegt. Die Bestimmung des mittleren Sonnentages überliess man den Astronomen. In vielen Ländern basierte die gesetzliche Zeit auf der Weltzeit UT. Die lokale Zeit ergab sich aus UT durch Zuziehen oder Abziehen einer, je nach geographischer Lage des Landes, Anzahl ganzer Stunden.

Als Folge der Entwicklung von mechanischen Uhren wurde die Zeitmessung stetig genauer (Abb. 1). Die Entwicklung eines Uhrwerks mit Sekundenanzeige gelang 1585 erstmals dem Schweizer Jost Bürgi. Mit den weiteren Fortschritten wurde bald klar, dass UT nicht überall auf der Erde gleich ist.

Der Grund ist eine periodische Verlagerung der Rotationsachse innerhalb des Erdkörpers. Die dadurch verursachten ortsabhängigen Fehler sind in der Weltzeitskala UT1 korrigiert. Diese gegenüber UT viel gleichmässiger Zeitskala wurde 1956 eingeführt und ist noch heute in Gebrauch. UT1 ist wegen ihrer Beziehung zum Drehwinkel der Erde die Skala der Navigatoren.

Um 1930 war die Technik der Quarzuhren so weit fortgeschritten, dass erstmals Unregelmässigkeiten in der Erdrotationsfrequenz festgestellt wurden. Die Schwankungen weisen Perioden von einem halben und einem Jahr auf und sind auf Änderungen des Trägheitsmomentes der Erde zurückzuführen. Die relativen Schwankungen des mittleren Sonnentages betragen ca. 10^{-8} . Auch diese Unregelmässigkeiten können korrigiert werden und die Folge ist eine nochmals verbesserte Zeitskala UT2.

Nebst den bereits erwähnten Effekten gibt es eine Reihe von weiteren Störungen, die Unregelmässigkeiten in der Rotationsfrequenz der Erde verursachen. Zusätzlich verlangsamt sich die Erdrotation wegen der Gezeitenreibung kontinuierlich. Untersuchungen der Jahresringe an Fossilien haben gezeigt, dass ein Jahr vor 400 Millionen Jahren ca. 400 Tage lang war. Die Rotationsfrequenz nimmt also mit ca. 2×10^{-10} pro Jahr ab. Dies bedeutet, dass eine auf der Erddrehung basierende Zeitskala und eine ideale Zeitskala in 100 Jahren um ungefähr 30 s auseinanderlaufen.

Ephemeridenzeit (ET)

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts berechnete Simon Newcombe auf der Basis von astronomischen Beobachtungen und der Newton'schen Mechanik Tabellen mit den erwarteten Positionen der Sonne, des Mondes und einiger Planeten für die Zukunft. Tabellen dieser Art werden Ephemeriden genannt. Die Astronomen stellten nun allmählich Unterschiede zwischen den vorausberechneten und tatsächlichen Positionen fest, die nicht mit Messfehlern oder den Annäherungen in den Berechnungen erklärt werden konnten. Der Grund war, wie schliesslich die Messungen mit den neu entwickelten Quarzuhren zeigten, falsche Zeitmessungen als Folge der unregelmässigen Erdrotation. In der Folge wurde die Ephemeridenzeit eingeführt, wobei der Umlauf der Erde um die Sonne der als periodischer Vorgang für die Definition der Zeiteinheit genutzt wird. Auf Vorschlag der Astronomen definierte 1956 das Internationale Komitee für Mass und Gewicht die SI-Sekunde als einen bestimmten Bruchteil des tropischen Jahrs. Das tropische Jahr ist die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den mittleren Frühlingspunkt (Tag-Nacht-Gleiche). Die Umsetzung dieser Definition in die Praxis gestaltete sich als schwierig und das Konzept der Ephemeridensekunde wurde in der Folge recht schnell wieder fallen gelassen.

Atomzeit (TAI) und UTC

Alle bisher genannten Definitionen der Sekunde hängen von den Bewegungen der Erde ab. Gegen 1950 wurden die ersten Atomuhren erfolgreich in Betrieb genommen. In Atomen können verschiedene quantisierte Zustände der Elektronen auftreten. Strahlung mit einer bestimmten Frequenz wird beim Übergang von einem Zustand zum anderen abgestrahlt. Umgekehrt kann eine Zustandsänderung in einem Atom auch von aussen angeregt werden, wenn das Atom mit der exakt zum gewählten Übergang passenden elektromagnetischen Strahlung bestrahlt wird. Diesen Mechanismus macht man sich in einer Atomuhr zu Nutze, indem ein Oszillator (z.B. ein Quarz) über einen Regelkreis genau mit der Übergangsfrequenz eines ausgewählten Übergangs im Atom abgestimmt wird. Erste Zeitskalen auf der Basis von Atomuhren wurden in den 1950er Jahren realisiert. Ein Übergang im Cäsium-Atom mit einer Frequenz im GHz-Bereich erwies sich als besonders günstig für die praktische Nutzung, so dass schliesslich dieser Übergang als Basis für eine neue Sekundendefinition gewählt wurde. Zunächst galt es die Frequenz der ausgewählten Strahlung mit der Ephemeridensekunde als Einheit zu bestimmen. Die relative Unsicherheit wurde mit 2×10^{-9} angegeben, was – wie wir heute wissen –

etwas optimistisch war. Die 13. Generalkonferenz für Mass und Gewicht führte 1967 als neue Sekundendefinition im SI ein:

„Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer, der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.“

Diese Definition behält auch nach der im November 2018 beschlossenen umfassenden Revision des SI ihre Gültigkeit. Die SI-Sekunde dient als Skalenmass für die Atomzeitskala (Temps Atomique International: TAI). Heute wird TAI vom Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) aus den Daten von über 500 Cäsium-Uhren ermittelt. Die Uhren befinden sich in über 70 über die Welt verteilten Zeitlaboratorien und ihr Stand wird mit Hilfe von Satelliten ständig miteinander verglichen. Dabei trägt die Mehrzahl der Uhren zur Stabilität der Zeitskala bei. Einige ausgewählte Uhren, sogenannte Primärnormale, deren mögliche Abweichungen gegenüber der Sekundendefinition genau bekannt und korrigiert sind, definieren das Skalenmass.

Zusätzlich zu TAI braucht es eine Zeitskala, die von der Stabilität und Genauigkeit der atomar definierten Sekunde profitiert und gleichzeitig mit der astronomischen Zeitskala UT1 synchronisiert bleibt. Es wäre eher unpraktisch, wenn unsere Uhren nicht mehr im Takt mit der Sonne laufen würden. Eine Lösung wurde mit der Einführung der sogenannten koordinierten Weltzeit (Universal Time Coordinated: UTC) gefunden. UTC basiert auf der atomar definierten Sekunde wie TAI. Das Einfügen oder Weglassen von Schaltsekunden gewährleistet, dass der Unterschied zwischen UTC und UT1 genügend klein bleibt.

Stand der Uhrentechnik

In konventionellen, thermischen Cäsium-Uhren passieren die Cäsium-Atome die Mikrowellenkavität mit einer Geschwindigkeit von ca. 300 m/sec. Dementsprechend wenig Zeit bleibt für die Abstimmung der Kavität auf die Frequenz des Atomübergangs. In neueren Normalen werden die Atome zuerst mit Laserstrahlen abgebremst, d.h. auf tiefste Temperaturen von wenigen Mikrokkelvin heruntergekühlt. Die gekühlten Cäsiumatome werden mit einem Laserimpuls paketweise etwa einen Meter angehoben; anschliessend fallen sie unter dem Einfluss des Schwerfelds der Erde wieder zurück. Auf beiden Wegen passieren die kugelförmigen Atomwölkchen den Mikrowellen-Hohlraum, wo sie insgesamt während knapp einer Sekunde angeregt werden – tausendmal länger als im Fall ungebremster Atome in der konventionellen, thermischen Cäsiumuhr (Abb. 2 und 3). Auf diese Weise kann die Sekunde mit einer relativen Messunsicherheit von unter 10^{-15} realisiert werden, das entspricht einer Gangabweichung von einer Sekunde in 30 Millionen Jahren. Noch bessere Auflösung erreichen Atomuhren, die sich Atomübergänge im optischen Wellenlängenbereich zu Nutze machen (Frequenz im THz-Bereich). Eine Vielzahl von Übergängen wird zurzeit untersucht, mit dem Ziel, die bestehende Definition der Sekunde mittelfristig abzulösen.

Die Stabilität von Atomuhren ist heute derart gut, dass z.B. die allgemeine Gravitationstheorie mit grosser Genauigkeit geprüft werden kann. Ein Traum der Physiker ist eine grosse vereinheitlichte Theorie, die alle Grundkräfte der Natur vereinigt. Diese Theorien sagen in der Regel ein Versagen der untergeordneten separaten Modelle unter bestimmten Bedingungen vor. So sieht die String-Theorie eine Änderung der Feinstrukturkonstante über lange Zeiträume vor. Diese Konstante beschreibt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung. Auch hier muss die Theorie mit den genauen Messungen der Atomuhren übereinstimmen. Die neusten Experimente ermitteln eine relative Änderung der Konstanten von weniger als 10^{-16} pro Jahr, ein Wert, mit dem sich alle neuen Theorien messen müssen.

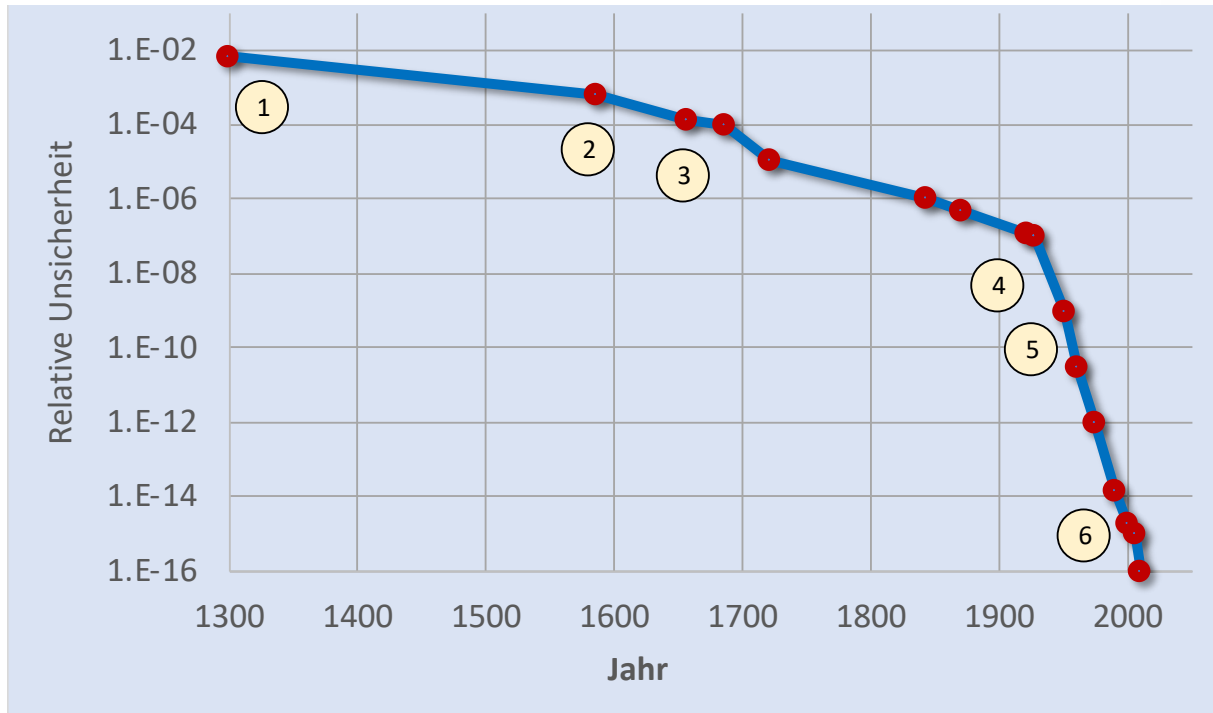


Abb. 1 : Verbesserung der Uhrengenauigkeit im Laufe der Zeit

- 1) Um 1300: Mechanische Uhr mit Spindelhemmung
- 2) 1585: erste mechanische Uhr mit Sekundenanzeige von Jost Bürgi
- 3) 1656: Pendeluhr, Ch. Huygens
- 4) 1927: Quartzuhr
- 5) 1955: Cs-Atomuhr
- 6) Um 2000: Cs-Uhr mit gekühlten Atomen

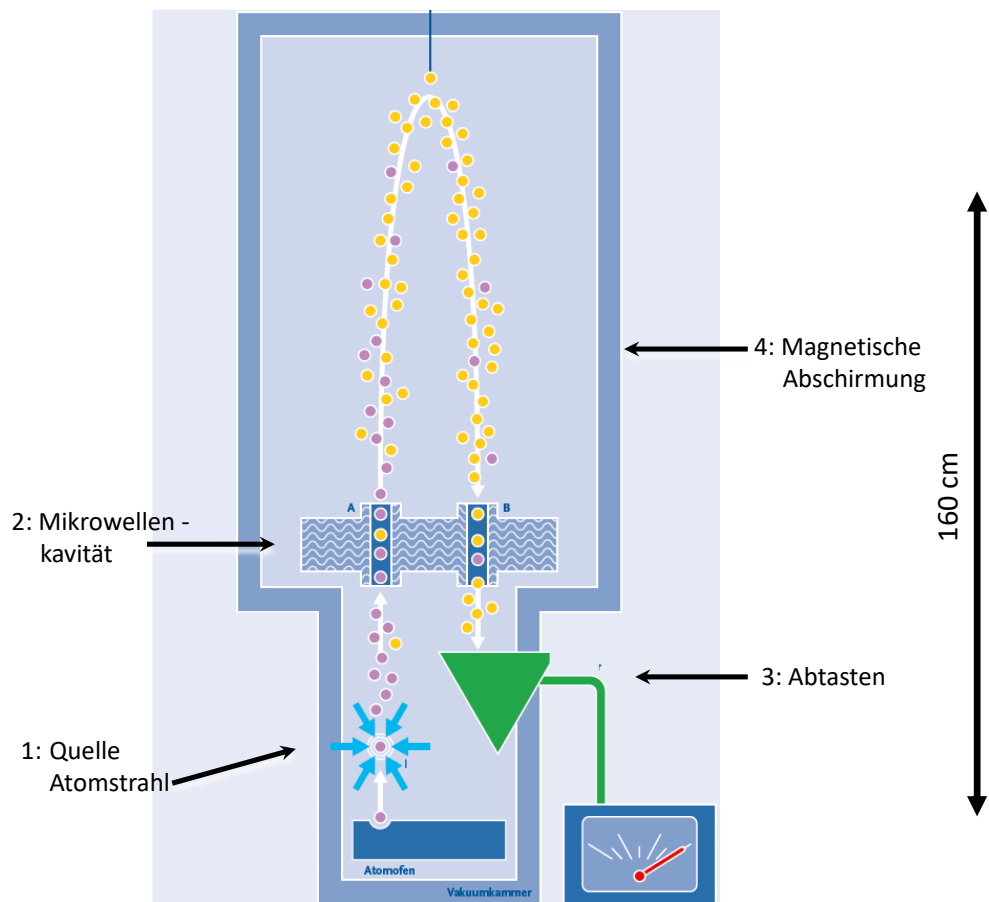


Abb. 2: FoCS-2 (Fontaine Continue Suisse), Cäsium-Uhr des METAS: Prinzipschema

- 1) Cäsium-Atome aus dem Atomofen werden durch Laserkühlung beinahe auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt. Durch einen Laserimpuls werden die abgekühlten Atome angehoben und auf einen Parabelflug geschickt. Die Atome befinden sich im Grundzustand.
- 2) Die Atome fliegen durch die Mikrowellenkavität (A beim Flug nach oben und B auf dem Rückweg nach unten). In der Kavität kommt es zur Wechselwirkung zwischen den Atomen und der Mikrowellenstrahlung. Ist die Kavität richtig getunt, gehen die Elektronen in den angeregten Zustand über.
- 3) Der Zustand der Elektronen wird abgefragt
- 4) Die magnetische Abschirmung schützt vor externen Magnetfeldern.

FoCS-2 ist weltweit die einzige Cäsium-Uhr, die mit einem kontinuierlichen Strahl von Cäsium-Atomen funktioniert. Die übrigen Normale arbeiten im gepulsten Betrieb, wobei bei jedem Puls ein Paket von Cäsium-Atomen die Kavität zweimal in senkrechter Richtung an derselben Stelle durchläuft.

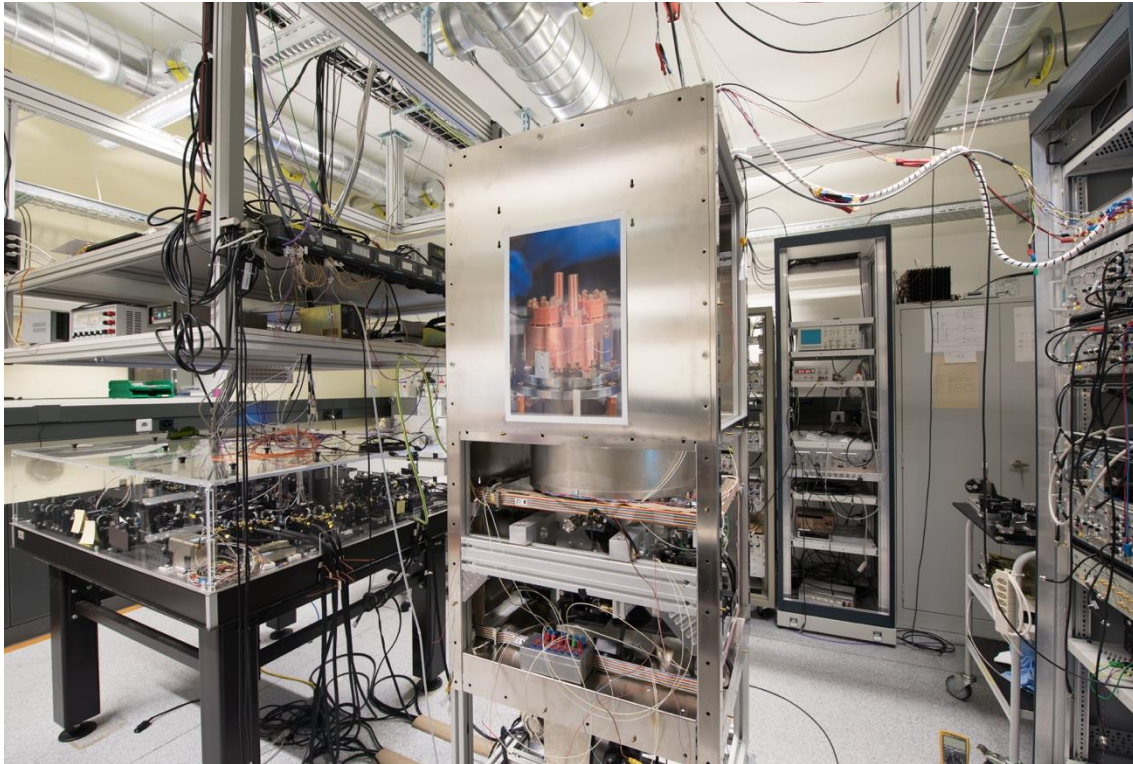


Abb. 3: Die Cäsium-Uhr FOCS 2 am METAS

In der Mitte sieht man die eigentliche Atomuhr mit den magnetischen Abschirmungen. Links steht der Tisch mit den Lasern und den optischen Elementen für die Vorbereitung der benötigten Laserstrahlen.