



Prüfmethoden von mechanischen Uhren

Witschi Electronic AG, 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Grundlagen	4
Aufbau einer mechanischen Uhr	4
Oszillator und Hemmung	5
Frequenz	5
Schlagzahl	5
Messgrößen	6
Gangabweichung	7
Abfallfehler (Repère)	8
Amplitude	8
Akustische Messung	9
Das Schlaggeräusch der Schweizer Ankerhemmung	10
Gangabweichung	11
Abfallfehler (Repère)	11
Amplitude	12
Messparameter	13
Optische Messung mit Laser	14
Optisches Signal	15
Gangabweichung (optisch)	15
Amplitude (optisch)	15
Messparameter	16
Optische Messung mit Kamera	17
Zeigerstellung	17
Stroboskopeffekt	17
Hochgeschwindigkeitskamera	17
Darstellung der Resultate	18
Diagramm (DIA)	18
Trace (TRC)	19
Vario (VAR)	20
Sequenz (SEQ)	21
Scope (SCO)	23
Fast-Fourier-Transformation (FFT)	24
Isochronismus (ISO)	25
Berechnete Kennwerte	26
Mittelwert (X)	26
Maximale Differenz zwischen den Prüflagen (D)	27
Differenz vertikal zu horizontal (DVH)	27

Differenz zwischen den Prüflagen 6H und CH (Di)	27
Isochronismus	28
Maximum Isochronismus über die gemessenen Prüflagen (Im)	28
Isochronismus zwischen 0h und 24h (Ie).....	28
Differenz der Mittelwerte zwischen 0h und 24h (DX).....	29
Differenz zwischen ein- und ausgeschalteter Komplikation (DXC)	29
Maximale Gangdifferenz über alle Prüflagen (Pmax)	29
Qualitätsfaktor (N)	29
Gütefaktor (Q).....	30
Schwerpunktfehler (DVm, Φ).....	31
Witschi Messtipps.....	33
Standardtoleranzen.....	34
Typische Werte der Gangreserve	34
Messrelevante Faktoren, die die Schwingungsperiode der Unruh beeinflussen..	34
Fehlerfindung	35
Fehlerfindung mit Diagramm.....	35
Fehlerfindung mit Scope	37

Grundlagen

Aufbau einer mechanischen Uhr

Regulierorgan

Das Regulierorgan einer mechanischen Uhr, bestehend aus **Unruh** und **Spirale**, gewährleistet durch seine präzisen Schwingungen eine hohe Ganggenauigkeit.

Typische Frequenzen:

$2.5 - 5 \text{ Hz} = 18'000 - 36'000 \text{ A/h}$

(A/h für Halbschwingungen pro Stunde)

Hemmung

Die **Hemmung** bestehend aus Ankerrad und Anker überträgt die Energie des Räderwerks auf das Regulierorgan und gibt die Räderbewegung in präzisen Zeitintervallen frei.

Räderwerk und Zeigerwerk

Überträgt die Federkraft an die Hemmung und übersetzt die Drehbewegung des Räderwerks auf die Zeiger und sorgt für die korrekte Anzeige der Zeit auf dem Zifferblatt.

Antriebsfeder Federhaus

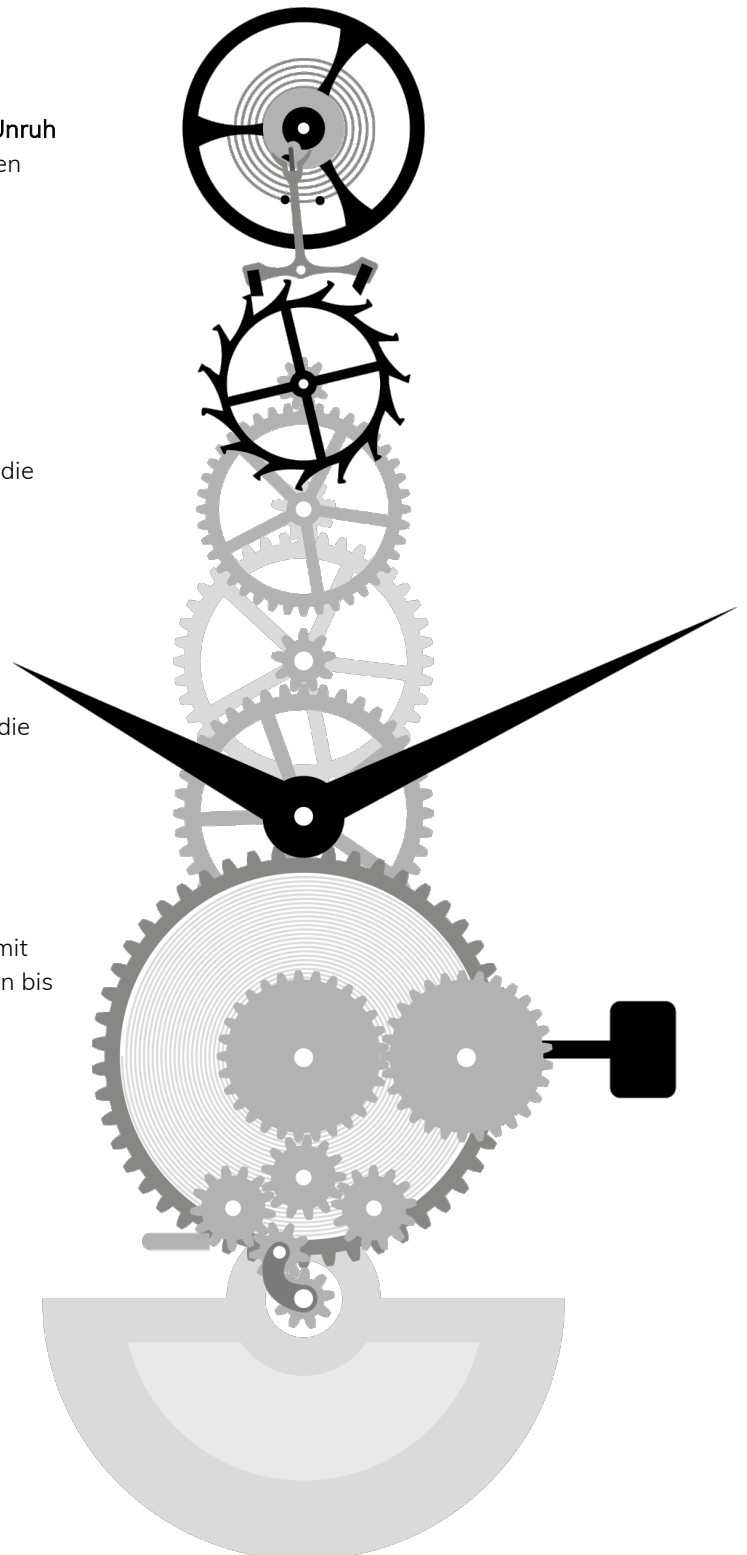
Liefert die Antriebsenergie für das ganze Uhrwerk. Die Gangreserve beträgt meistens rund 48 – 70 Stunden. Uhren mit einer besonders langen Gangreserve können eine Laufzeit von bis zu 8 Tagen ohne erneutes Aufziehen erreichen.

Aufzugswelle mit Krone

Die Antriebsfeder wird durch das manuelle Drehen der Krone gespannt, eine Funktion, die auch bei den meisten Automatikuhren genutzt werden kann.

Automatischer Aufzug

Automatischer Aufzug mit Schwungmasse und Untersetzungsgetriebe. Zieht die Antriebsfeder durch die Armbewegungen automatisch auf (nur bei Automatikuhren).



Oszillator und Hemmung

Als Taktgeber für die Zeitmessung dient in mechanischen Armbanduhren meist ein Drehpendel (Unruh). Die Hemmung gibt die Räderbewegung in präzisen Zeitintervallen frei und versorgt gleichzeitig die Unruh mit der erforderlichen Energie für den Betrieb. Es gibt eine Vielzahl von Hemmungen. Die üblichste Hemmungsart bei modernen mechanischen Armbanduhren ist die **Schweizer Ankerhemmung**. Die folgende Beschreibung der Funktionsweise und der erzeugten Geräusche gilt für diese Hemmung.

Frequenz

Die Anzahl der Schwingungen der Unruh pro Sekunde wird als **Frequenz** angegeben und in **Hertz (Hz)** gemessen. Somit ist die Frequenz der Kehrwert der Periodendauer oder der Dauer einer Schwingung. Oft wird für Uhrwerke und Uhren die **Schlagzahl** angegeben. Dies ist die Bezeichnung für die Anzahl der Halbschwingungen pro Stunde (A/h).

Die **Schwingung** der Unruh beschreibt die Bewegung eines Punktes von einem Wendepunkt zum anderen und zurück in die Ausgangsposition. (A – B – A).

Eine halbe Schwingung der Unruh wird als **Halbschwingung** bezeichnet (A – B).

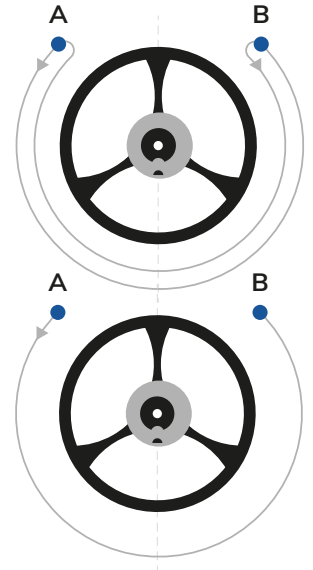
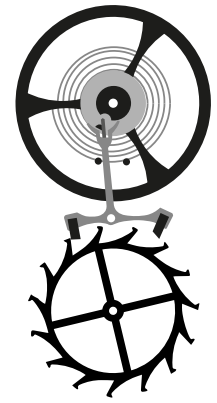
Schlagzahl

Die Umrechnung der Schlagzahl S (in Halbschwingungen pro Stunde) in die Frequenz f (in Hertz) erfolgt mit folgender Formel

$$(1) \quad f = \frac{S}{2 \cdot 3600}$$

Übliche Schlagzahlen bei Armbanduhren sind:

Schlagzahl (A/h)	Frequenz (Hz)
18'000	2
19'800	2.75
21'600	3
25'200	3.5
28'800	4
36'000	5
72'000	10



Messgrössen

Bei Zeitwaagen werden direkt die **Gangabweichung**, der **Abfallfehler** und die **Amplitude der Unruh** gemessen. In diesem Kapitel werden diese drei Messgrössen definiert. Die entsprechenden Messverfahren werden in späteren Kapiteln behandelt, da sie davon abhängen, ob die Messung akustisch oder optisch erfolgt.

Aus den direkt gemessenen Grössen lassen sich weitere Informationen über das Uhrwerk ableiten. So kann beispielsweise eine periodische Amplitudenänderung auf **Variationen der Kraftübertragung** durch die Zahnform im Räderwerk hinweisen. Messgeräte von Witschi bieten hierfür eine Vielzahl an Darstellungs- und Auswertefunktionen, um solche Effekte präzise zu analysieren.



Abbildung: ChronoMaster Auto. Kompaktes Tischgerät für die präzise und benutzerfreundliche Messung mechanischer Uhren.

Gangabweichung

Der **Gang** bzw. die **Gangabweichung** gibt an, um wie viel sich die angezeigte Zeit einer Uhr innerhalb eines Tages von der tatsächlichen Zeit unterscheidet.

Zur Bestimmung wird die auf der Uhr gemessene Zeitspanne T mit einer Referenzdauer T_0 (z. B. 86 400 s für 24 Stunden) verglichen. Die relative Gangabweichung¹ berechnet sich nach folgender Formel:

$$(2) \quad G = \frac{T - T_0}{T_0}$$

Um die Gangabweichung in der Praxis auszudrücken, wird der dimensionslose Wert G mit 86 400 multipliziert, wodurch sich die Angabe in Sekunden pro Tag (s/d) ergibt.

Bei einer Referenzdauer von exakt 24 Stunden ergibt sich der **mittlere tägliche Gang**. Kürzere Referenzzeiten ermöglichen die Analyse von kurzzeitigen Schwankungen im Gangverhalten, z. B. über Stunden oder Minuten.

Ein positiver Wert bedeutet, dass die Uhr vorgeht, ein negativer Wert, dass sie nachgeht. Die Gangabweichung ist eine zentrale Kenngrösse zur Beurteilung der Ganggenauigkeit einer Uhr. Geringe systematische Abweichungen lassen sich durch Regulieren oder Abgleichen korrigieren.

Beispiel zur Beurteilung von Präzision und Zuverlässigkeit

Ein Kunde sucht eine qualitativ hochwertige Armbanduhr mit hoher Ganggenauigkeit.

Um die Qualität verschiedener Modelle zu beurteilen, beobachtet er an fünf aufeinanderfolgenden Tagen jeweils um 12:00 Uhr mittags die Anzeige von vier Schaufensteruhren. Die Differenz zur tatsächlichen Zeit wird dokumentiert.

	Uhr 1	Uhr 2	Uhr 3	Uhr 4
Tag 1	12:00:00 (0 s)	12:01:10	12:03:30	12:05:00
Tag 2	12:00:00 (0 s/d)	12:01:15 (+5 s/d)	12:03:25 (–5 s/d)	12:05:50 (+50 s/d)
Tag 3	12:00:00 (0 s/d)	12:00:50 (–25 s/d)	12:03:30 (+5 s/d)	12:06:40 (+50 s/d)
Tag 4	12:00:00 (0 s/d)	12:01:20 (+30 s/d)	12:03:35 (+5 s/d)	12:07:30 (+50 s/d)
Tag 5	12:00:00 (0 s/d)	12:01:05 (–15 s/d)	12:03:30 (–5 s/d)	12:08:20 (+50 s/d)

Analyse der Uhren:

- Uhr 1: Zeigt konstant 12:00:00 – vermutlich stehen geblieben. Keine Aussage zur Gangqualität möglich.
- Uhr 2: Mittlerer Gang akzeptabel, doch der tägliche Gang schwankt erheblich (von –25 s/d bis +30 s/d).
→ Geringe Präzision, daher nicht verlässlich und schwer abgleichbar.
- Uhr 3: Zeigt eine deutliche Gesamtabweichung bei der Anzeige (über 3 Minuten), allerdings ist der tägliche Gang relativ konstant (± 5 s/d).
→ Gute mittlere Genauigkeit, aber mässige Präzision, nicht ideal zum Abgleichen.
- Uhr 4: Zeigt einen deutlichen, aber konstanten Vorgang von +50 s/d über alle Tage.
→ sehr hohe Präzision, gut kompensier- oder abgleichbar.

Der Kunde wird sich mit hoher Wahrscheinlichkeit für Uhr 4 entscheiden.

Uhr 4 erfüllt seine Anforderungen am besten: Sie zeigt über alle fünf Tage hinweg ein gleichmässiges Gangverhalten mit hoher Präzision, auch wenn der tägliche Vorgang deutlich ist. Da ihm eine möglichst hohe Ganggenauigkeit wichtig ist, bittet er den Händler, die Uhr vor dem Kauf einregulieren zu lassen, um die konstante Abweichung zu kompensieren. So erhält er eine präzise laufende Uhr mit verlässlicher Zeitbasis.

¹ Witschi verwendet durchgehend diese Konvention. In der Literatur ist teilweise auch die abweichende Konvention mit $G = (T - T_0) / T$ zu finden.

Abfallfehler (Repère)

Stimmt die **Ruhelage der Unruh** nicht mit der **Mittellage des Ankers** zwischen den Begrenzungsstiften überein, erfolgt der Impuls nicht exakt in der Ruhelage der Unruh. Dadurch unterscheidet sich die Zeitdauer zwischen den Schlaggeräuschen bei den beiden Halbschwingungen. Diese Asymmetrie wird als **Abfallfehler** oder **Repère** bezeichnet.

$$(3) \quad \text{Rep} = \left| \frac{t_{\text{TIC-TAC}} - t_{\text{TAC-TIC}}}{2} \right|$$

Das Messergebnis wird üblicherweise mit 1000 multipliziert und in **Millisekunden (ms)** angegeben. Grundsätzlich kann der Abfallfehler, unter Berücksichtigung der Schlagzahl und Amplitude, auch in einen Winkelfehler mit Einheit ° (sog. geometrischer Abfallfehler) umgerechnet werden.

Bei Pendeluhrn kann der Abfallfehler so gross sein, dass die Zeitunterschiede zwischen den Schlaggeräuschen hörbar werden. Dieses Phänomen wird als "Hinken" bezeichnet.

Der Abfallfehler wird traditionell **ohne Vorzeichen** und ohne spezifische Zuordnung zu Ein- und Ausgangspalette angegeben. Einige neuere Witschi-Geräte zeigen jedoch eine Information an, wenn sich das Vorzeichen des Abfallfehlers während des Abgleichens ändert.

Amplitude

Die Amplitude beschreibt die **Schwingungsweite des Oszillators** und wird als maximale Auslenkung in Bezug auf die Ruhelage der Unruh angegeben.

Sie entspricht dem Winkel zwischen der Gleichgewichtslage (Ruhelage der Unruh) und dem Wendepunkt der Schwingung. Bei den heute meistverbreiteten Uhrwerken liegt die Amplitude bei Vollaufzug typischerweise zwischen 270° und 310°.

Akustische Messung

Die akustische Messung ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Bestimmung der Gangabweichung, des Abfallfehlers und der Amplitude. Sie kann auch bei geschlossenen Uhren durchgeführt werden. Die Bedienung ist unkompliziert: Es reicht aus, die Uhr auf einem speziellen **"Mikrofon"** zu platzieren. Lediglich für eine präzise Amplitudenmessung muss der jeweilige Hebewinkel bekannt sein.

Das Messverfahren der akustischen Messung wird anhand der **Schlaggeräusche der Schweizer Ankerhemmung** erläutert. Andere Hemmungskonstruktionen können jedoch abweichende Schlaggeräusche erzeugen und erfordern entsprechend angepasste Auswertungsmethoden.

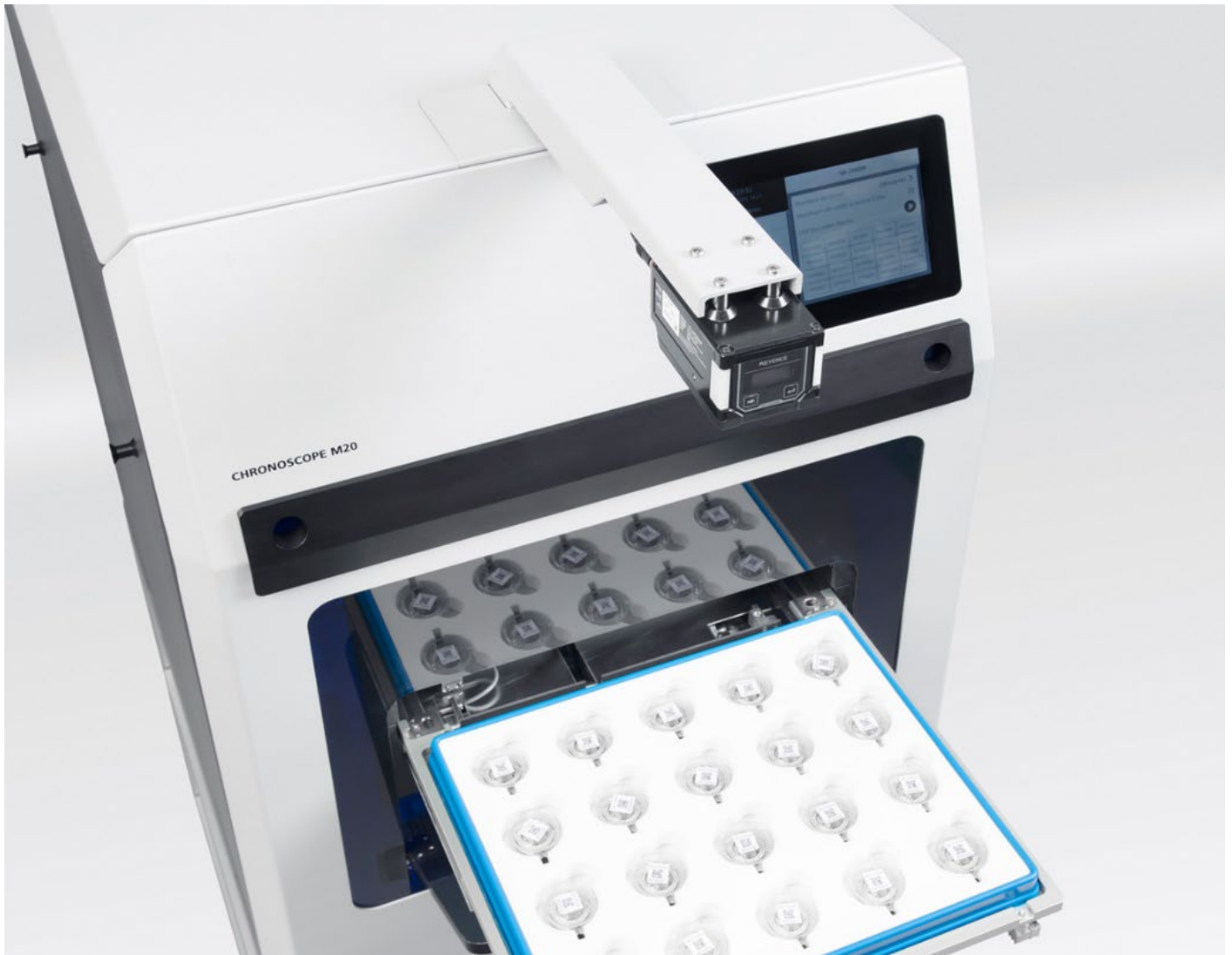


Abbildung: Chronoscope M20

Simultane Messung von 20 mechanischen Uhren mit integriertem Code-Scanner zur automatischen Identifizierung.

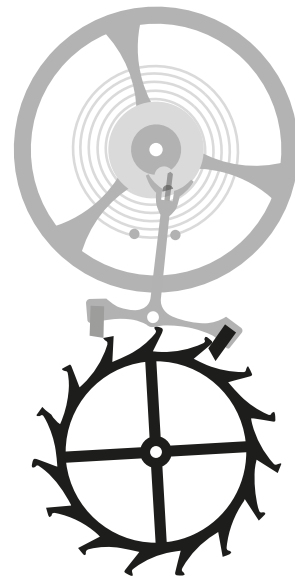
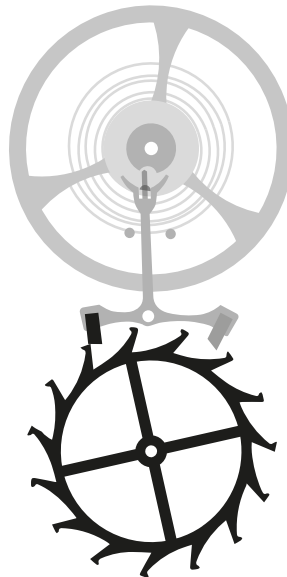
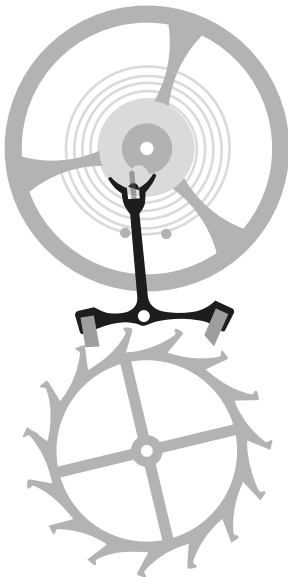
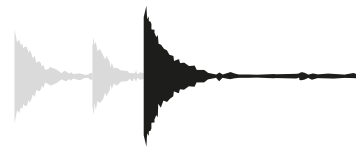
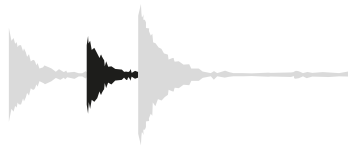
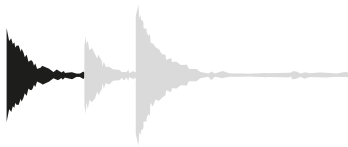
Das Schlaggeräusch der Schweizer Ankerhemmung

Das Schlaggeräusch der Schweizer Ankerhemmung besteht hauptsächlich aus **drei unterschiedlichen Impulsen**. Häufig sind zusätzliche Impulse erkennbar, die bestimmten Ereignissen zugeordnet werden können. Für die Erläuterung des Messverfahrens der akustischen Messung ist es jedoch ausreichend, sich auf diese drei Hauptimpulse zu beschränken.

Das **erste** Geräusch entsteht, wenn der Hebelstein der Rolle auf die Gabel des Ankers trifft. Dieses Geräusch ist zeitlich sehr präzise und wird daher für die Diagrammaufzeichnung und für die Berechnung der Gangabweichung sowie des Abfallfehlers benutzt. Dieses Geräusch entspricht der **Auslösung**.

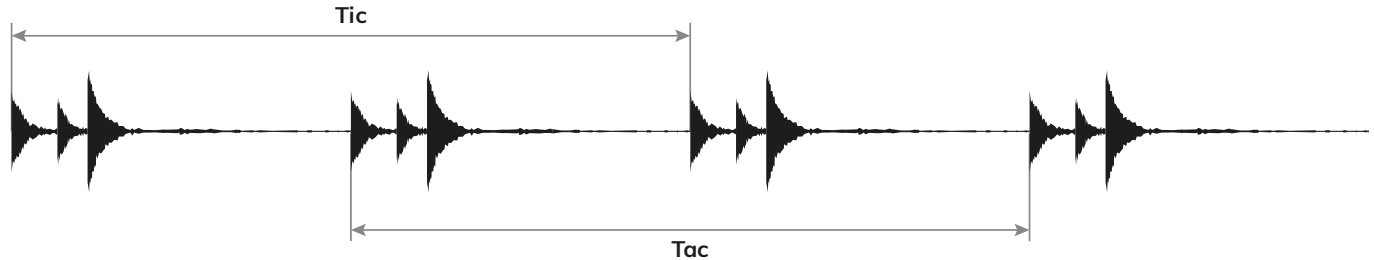
Ein **zweites** Geräusch entsteht, wenn ein Zahn des Ankerrades auf die Impulsfläche einer Palette trifft und die Ankergabel den Hebelstein berührt. Dieses sehr unregelmässige Geräusch (**Impuls**) wird für die Auswertung nicht benutzt. Dieses Geräusch entspricht dem Übertragen des Impulses vom Räderwerk auf die Unruhe.

Das **dritte** und stärkste Geräusch entsteht, wenn ein Zahn des Ankerrades auf die Ruhefläche der Palette fällt und die Ankerstange an einen Begrenzungsstift schlägt. Dieses Geräusch wird für die Berechnung der Amplitude ausgewertet. Dieses Geräusch entspricht dem **Fall**.



Gangabweichung

Für die Auswertung des Schlaggeräusches ist ein Messgerät (Zeitwaage) mit einer hochpräzisen Referenzfrequenz erforderlich. Entscheidend ist die zuverlässige Erfassung des Anfangs des ersten Geräusches (Auslösung). Falls dieses Geräusch bei einer Uhr sehr schwach ist oder die Uhr starke Nebengeräusche erzeugt, muss die Verstärkung entsprechend angepasst werden.

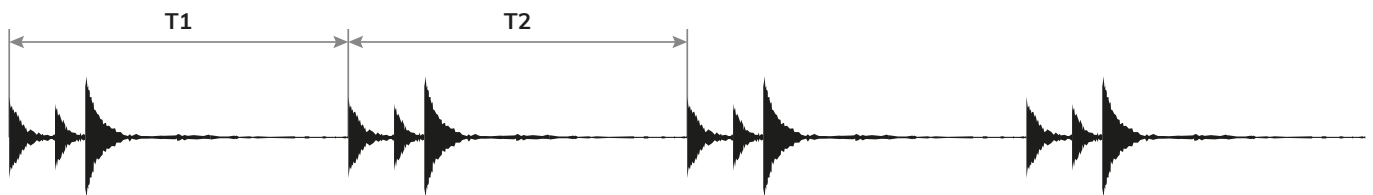


Zur Berechnung der Gangabweichung werden die Differenzen zwischen der gemessenen Periodendauer und dem Sollwert gemäss Formel (4) ermittelt und in Sekunden pro 24 Stunden (s/d) umgerechnet. Dies geschieht getrennt für den Gang TIC und den Gang TAC, um den Einfluss des Abfallfehlers auf die Berechnung zu vermeiden. Die Gangwerte über eine Periode werden über die eingestellte Integrationszeit gemittelt und anschliessend ausgegeben.

$$(4) \quad \text{Gang} = \left| \frac{\text{Gang}_{\text{TIC}} + \text{Gang}_{\text{TAC}}}{2} \right|$$

Abfallfehler (Repère)

Wie bereits beschrieben, entsteht der Abfallfehler durch ein asymmetrisches Schwingen, wenn die Ruhelage der Unruh nicht mit der Mittellage des Ankers übereinstimmt. Dadurch unterscheiden sich die Dauern der beiden Halbschwingungen. Hochwertige Uhren verfügen über eine spezielle Vorrichtung (Port-Piton) zur Einstellung des Abfalls. Der Zeitunterschied wird von der Zeitwaage gemessen und üblicherweise in Millisekunden (ms) ausgegeben.

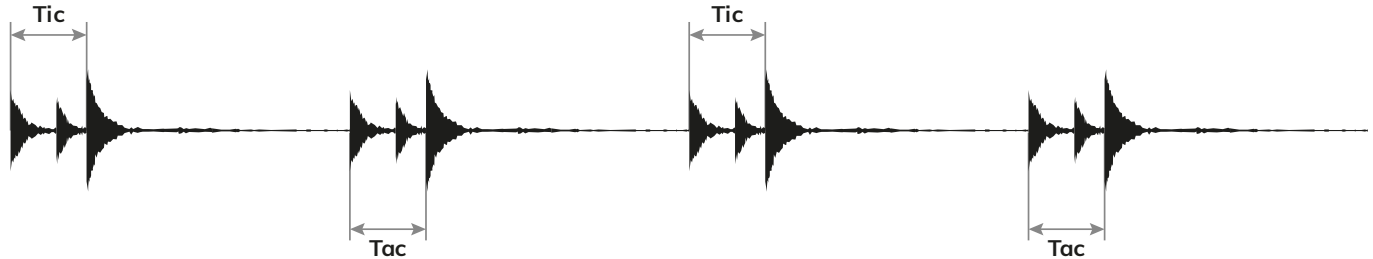


Die Grafik zeigt einen typischen Abfallfehler. Für einen nicht vorhandenen Abfallfehler (0.0ms) müssten **t1** und **t2** identische Werte aufweisen.

$$(5) \quad \text{Repère} = \left| \frac{t_1 - t_2}{2} \right|$$

Amplitude

Die Amplitude (Schwingsweite) beschreibt den Winkel zwischen der Gleichgewichtslage (Ruhelage der Unruh) und dem Wendepunkt. Bei modernen Uhrwerken liegt sie bei Vollaufzug typischerweise zwischen 270° und 310°. Mit der Alterung der Öle nimmt die Amplitude allmählich ab. Zur Berechnung der Amplitude wird die Zeit zwischen dem **ersten Impuls (Auslösung)** und dem **dritten Impuls (Fall)** im Schlaggeräusch gemessen.



Näherungsweise entspricht die **Dauer zwischen Auslösung und Fall** der Zeit, in der der Hebelstein (Ellipse) Kontakt mit der Ankergabel hat – die sogenannte Hebezeit der Unruh. Eine geringe Abweichung entsteht durch die kurze Zeit zwischen dem Verlassen der Ankergabel und dem Anschlagen dieser an den Begrenzungsstift (sog. verlorener Weg). Während der **Hebezeit** dreht sich die Unruh um den **Hebewinkel λ** , der konstruktionsbedingt festgelegt ist und als **Parameter für die Amplitudenmessung** dient. Bei den meisten modernen Uhrwerken beträgt er etwa **51°**.

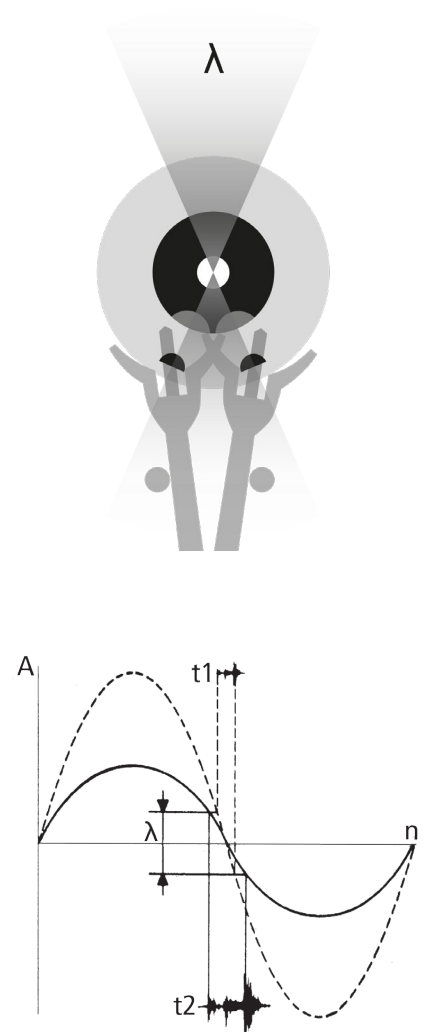
Die Hebezeit hängt von der Geschwindigkeit der Unruh beim Nulldurchgang ab, die wiederum direkt mit der Amplitude verknüpft ist. Je grösser die Amplitude der Unruh, desto grösser ist auch die Geschwindigkeit, mit welcher sie diesen Hebewinkel durchläuft und desto kleiner ist die Zeit, die sie zum Durchlaufen dieses Winkels benötigt.

Für die Berechnung der Amplitude wird angenommen, dass die Auslenkung der Unruh einem sinusförmigen Verlauf folgt. Dies trifft auf eine Unruh mit Spirale zu, sofern der abbremssende und beschleunigende Einfluss der Hemmung gering ist. In Abbildung rechts ist die momentane Auslenkung über die Zeit dargestellt. Die volle Linie entspricht einer schwachen Amplitude und die gestrichelte Linie einer grossen Amplitude. Der Hebewinkel ist mit λ dargestellt, wobei angenommen wird, dass der Nulldurchgang der Auslenkung mittig zwischen Auslösung und Fall passiert. Es wird deutlich, dass die Hebezeiten bei den beiden Amplituden unterschiedlich sind. Die Hebezeit t_1 bei grosser Amplitude ist kleiner als die Hebezeit t_2 bei schwacher Amplitude.

Es kann gezeigt werden, dass bei diesen Annahmen die Amplitude A aus der Hebezeit t , dem Hebewinkel λ und der Schwingungsfrequenz f als

$$(6) \quad A = \frac{\lambda}{2 \sin(\pi f t)} \approx \frac{\lambda}{2 \pi f t}$$

berechnet wird.



Messparameter

Für die Konfiguration der akustischen Messung stehen verschiedene Messparameter zur Verfügung. Oft genutzte Einstellungen können für einen schnellen Abruf gespeichert werden. Eine solche gespeicherte Konfiguration wird als „Programm“ bezeichnet. Je nach Gerät lassen sich 20 bis 99 Programme speichern und bei Bedarf wieder aufrufen.

Modus Schlagzahl	Aut	Automatische Bestimmung aus einer Liste von gängigen Schlagzahlen.
	Man	Manuelle Wahl einer beliebigen Schlagzahl zwischen 3'600 und 43'200 A/h (bei einigen Geräten 72'000 A/h).
	Frq	Modus zur automatischen Bestimmung einer unbekannten Schlagzahl. Die Schlagzahl wird so bestimmt, dass der Gang nahe bei 0 s/d ist.
Schlagzahl	nn	Nummerischer Wert der Schlagzahl, wenn der manuelle Modus Schlagzahl gewählt ist.
Testmodus	Stnd	Uhr mit Schweizer Ankerhemmung.
	Spe1	Uhr mit Co-Axial Hemmung.
	Spe2	Uhr mit AP-Hemmung.
	Spe4	Modus mit spezifischem Amplitudenfilter.
	Rate	Nur Gangmessung. Für Pendeluhrten oder Uhren mit unüblichen Schlaggeräuschen.
Hebewinkel	xx°	Eingabe des Hebewinkels, von 10° bis 90°.
Messzeit	xx s	Gesamtdauer der Messung in s
Integrationszeit	Aut	Zeitdauer zwischen Aktualisierung der Zwischenresultate Automatische Wahl der Integrationszeit anhand Messzeit
	xx s	Manuelle Wahl der Integrationszeit in s
	yy A	Manuelle Wahl der Integrationszeit in Halbschwingungen
Stabil. VV/HH	Aut s	Automatische Wahl der Stabilisationszeit durch Schlagzahl.
	Man	Manuelle Wahl der Stabilisationszeit, zwischen 1 und 99 s.
Stabil VH/HV:	Aut s	Automatische Wahl der Stabilisationszeit durch Schlagzahl.
	Man	Manuelle Wahl der Stabilisationszeit, zwischen 1 und 99 s.
Auflösung	s/d	Auflösung der numerischen Ganganzeige, 1 s/d, 0.1 s/d, 0.01 s/d
Prüflagen		Angefahrene Prüflagen für Sequenzen.
Verstärkung		Signalverstärkung. Vorgabewert ist 2. 1 für Uhren mit sehr starken Signalen. 3 oder 4 für Uhren mit schwachen Signalen.

Optische Messung mit Laser

Ein weiteres Messverfahren basiert auf der optischen Messung mit einem Laser. Dabei wird ein Laserstrahl auf ein bewegliches Bauteil gerichtet, und ein Detektor erfasst die Helligkeitsänderung, die durch die Positionsänderung dieses Teils entsteht. In der Regel wird ein periodisch bewegtes Bauteil bestrahlt. Falls sichtbar, eignet sich die Unruh mit ihren Speichendurchgängen besonders gut für diese Methode, da sie eine direkte Amplitudenmessung ermöglicht. Gangmessungen können jedoch auch anhand der Bewegung anderer Komponenten erfolgen, beispielsweise durch das Umschalten des Ankers oder sogar durch die Erfassung eines Zeigerdurchgangs.



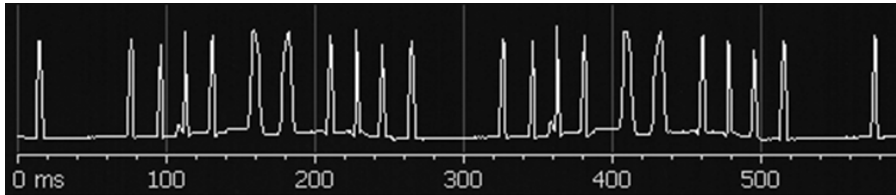
Abbildung: WisioScope S

Kombinierte akustische Messung der Schlaggeräusche und optische Messung der Unruh.

Optisches Signal

Das optische Signal des WisioScope S erfasst die Helligkeitsänderung, die durch die Bewegung eines vom Laser angestrahlten Bauteils entsteht. Die Signalqualität hängt daher stark davon ab, welches Bauteil bestrahlt wird. Im Folgenden wird angenommen, dass die Unruh als Referenz verwendet wird und der Laser gezielt auf eine Stelle gerichtet ist, an der ausschliesslich die Speichendurchgänge detektiert werden. Das bedeutet, dass keine Signalanteile von Masselots, der Spirale, dem Anker oder anderen beweglichen Teilen erfasst werden.

Idealerweise sieht das Signal wie in Abbildung unten aus, wobei jeder Speichendurchgang klar durch einen Ausschlag im Signal sichtbar ist.



Gangabweichung (optisch)

Werden Ereignisse im Signal identifiziert, kann die Gangabweichung mit demselben Verfahren wie bei der akustischen Messung bestimmt werden. Dabei wird die gemessene Dauer zwischen periodischen Ereignissen mit einer Referenzdauer verglichen und in eine Gangabweichung umgerechnet.

Eine alternative Methode basiert auf der Autokorrelation des Signals. Hierbei wird der Zeitversatz $\tau|tau$ bestimmt, für den die Autokorrelation maximal ist. Der Vergleich von $\tau|tau$ mit dem Sollwert ermöglicht die Berechnung der Gangabweichung.

Amplitude (optisch)

Die Messung der Amplitude setzt voraus, dass die Struktur des Signals bekannt ist und eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Nur so kann die Amplitude mittels optischer Messung zuverlässig berechnet werden.

Messparameter

Modus Schlagzahl	Aut	Automatische Bestimmung aus einer Liste von gängigen Schlagzahlen.
	Man	Manuelle Wahl einer beliebigen Schlagzahl zwischen 3'600 und 720'000 A/h.
Schlagzahl	nn	Nummerischer Wert der Schlagzahl, wenn der manuelle Modus Schlagzahl gewählt ist.
Testmodus	Aus	Keine optische Messung
	Unruh	Unruhe/Schwinger mit Speichen
	Teststruktur	Unruhe/Schwinger mit Teststruktur
	Zeiger	Messung eines 1-Sekunden Intervalls
	Asymmetrisch	Unruhe mit asymmetrisch verteilten Speichen
Laserposition	x,y	Auslenkung des Lasers

Optische Messung mit Kamera

Zeigerstellung

Eine direkte Methode zur Feststellung der Gangabweichung besteht darin, die angezeigte Uhrzeit zu festen Zeitpunkten zu notieren, beispielsweise täglich um 12:00 Uhr. Dadurch lässt sich die mittlere tägliche Gangabweichung direkt ablesen. Dieses Verfahren kann teilweise oder vollständig automatisiert werden. In einer teilautonomen Version nimmt eine Kamera in Verbindung mit einer hochpräzisen Referenzuhr die Bilder auf. In einer vollautonomen Version analysiert eine **Bildverarbeitung** selbstständig die Zeigerstellung und ermittelt die Gangabweichung.

In dieser einfachen Ausführung ist die Auflösung des Messverfahrens durch die Dauer einer Halbschwingung begrenzt, sofern sich der Sekundenzeiger in Sakkaden (Sprüngen) entsprechend den Halbschwingungen bewegt. Für eine typische Uhr mit 4 Hz (28'800 A/h) ergibt sich bei einer Messdauer von 1 Stunde eine Auflösung von 3 s/d und bei einer Messdauer von 1 Tag eine Auflösung von 0,125 s/d.

Um die Auflösung zu verbessern können zu gegebenen Zeiten anstelle eines Einzelbilds mehrere Bilder in schneller Folge aufgenommen werden. Somit ist der Zeitpunkt der Zeigerbewegung genauer bekannt.

Stroboskopeffekt

Wird ein Objekt, das eine periodisch wiederholende Bewegung durchführt, mit einem Stroboskop belichtet, so erscheint die Bewegung verlangsamt. Die sichtbare Frequenz ist die Differenz zwischen der Stroboskopfrequenz und der Objektfrequenz. Steht das Objekt scheinbar still, so stimmen die Frequenzen überein (respektive die Objektfrequenz ist ein Vielfaches der Stroboskopfrequenz). Durch diesen Effekt ist es möglich, zwei Frequenzen sehr genau zu vergleichen.

Anstelle eines Stroboskops kann auch eine Kamera mit ausreichend kurzer Belichtungszeit verwendet werden. Die Bildaufnahmefrequenz im Witschi **WisioScope S** wird anhand der angegebenen Schlagzahl so berechnet, dass die Bewegung der Unruh stark verlangsamt dargestellt wird.

Hochgeschwindigkeitskamera

Eine Hochgeschwindigkeitskamera nimmt Bilder mit einer hohen Bildwiederholrate auf und ermöglicht so die detaillierte Analyse kurzer zeitlicher Abläufe. Damit lassen sich beispielsweise die Phasen von Auslösung bis Fall präzise darstellen. Für längere Analysen, wie die Bestimmung der mittleren täglichen Gangabweichung, steigt jedoch der Aufwand für die Bildverarbeitung erheblich, da eine grosse Menge an Bilddaten verarbeitet werden muss.

Darstellung der Resultate

In den Witschi-Geräten werden die Messwerte graphisch aufbereitet und dem Benutzer übersichtlich präsentiert. In diesem Kapitel werden einige Darstellungsmöglichkeiten erläutert und ihren spezifischen Nutzen für die Analysen der Resultate hervorgehoben.

Diagramm (DIA)

Das Diagramm zeigt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Schlaggeräusche. Diese Darstellung eignet sich insbesondere beim Abgleich (Reglage) da jede Veränderung unmittelbar sichtbar ist.

Die Zeitinformation jeder Halbschwingung entspricht einem Punkt auf dem Diagramm. Die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Uhrenschlägen (Halbperiodendauer) wird gemessen und mit dem Sollwert für einen exakten Gang verglichen. Falls die gemessene Zeit dem Sollwert entspricht, wird der neue Punkt auf dem Diagramm rechts auf derselben Höhe wie der vorangehende Punkt gesetzt. Erfolgt der neue Schlag etwas zu früh oder zu spät, so wird der neue Punkt nach oben oder nach unten verschoben. Durch das Aneinanderreihen der Punkte ergibt sich meist eine Linie.

Die **Steigung** der Linie entspricht der Gangabweichung. Eine steigende Linie zeigt einen Vorgang, eine sinkende Linie einen Nachgang.

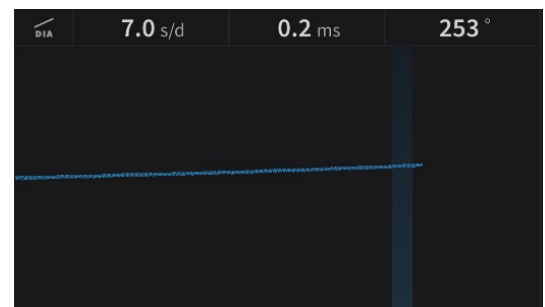
Manchmal sind **zwei Linien** sichtbar, so wie in Beispiel 2. Dies zeigt einen Abfallfehler, also einem Unterschied der beiden Halbperiodendauern.

Einzelne **Punkte über der Linie** zeigen Unregelmässigkeiten bei der Erfassung der Auslösung. Dies kann auf einen defekten Ankerradzahn hindeuten, von einem Geräusch vor der Auslösung stammen (z.B. Berührung der Spirale im Rücker) oder auch von einem externen Störgeräusch verursacht sein. Treten solche Punkte vermehrt über der Linie auf, sollte eine geringere Signalverstärkung getestet werden.

Einzelne **Punkte unter der Linie** zeigen nicht erfasste Geräusche der Auslösung. Treten solche Punkte unter der Linie vermehrt auf, so sollte eine höhere Signalverstärkung eingestellt werden.

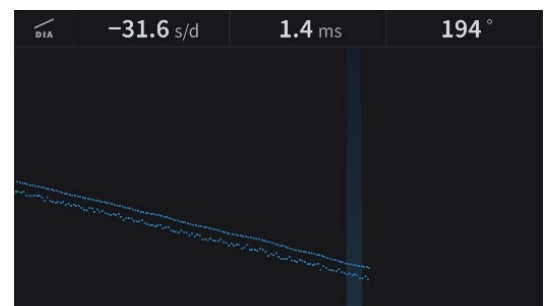
Beispiel 1: Regelmässiges Diagramm.

Leichter Vorgang, der konstant über die Zeit ist. Kaum Abfallfehler.



Beispiel 2: Unregelmässiges Diagramm.

Nachgang, schwankend über die Zeit. Hoher Abfallfehler



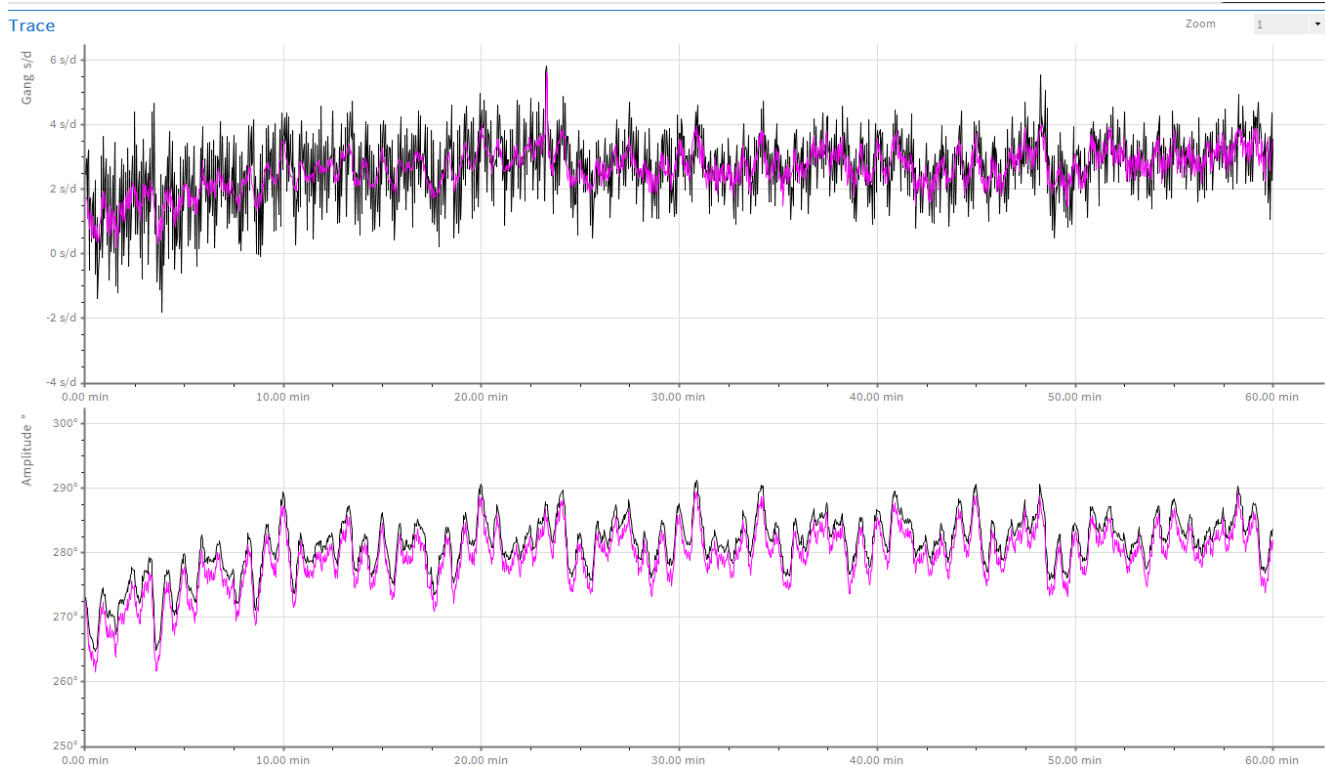
Weitere Beispiele sind im Abschnitt "Fehlerfindung mit Diagramm" gegeben.

Trace (TRC)

Trace zeigt den zeitlichen Verlauf von **Gang- und Amplitudenschwankungen** über eine längere Zeitspanne und ermöglicht die Überprüfung der Stabilität. Messzeiten von bis zu 300 Stunden sind möglich.

Die Integrationszeit liegt zwischen 2 und 60 Sekunden und wird meist automatisch anhand der Messzeit festgelegt. Sie definiert die Zeitspanne zwischen zwei Messresultaten.

Für Laboranwendungen kann eine Integrationszeit von 4A gewählt werden, bei der alle 4 Halbschwingungen ein Messwert erfasst wird. Bei den meisten Messgeräten ist die Messzeit in diesem Modus auf 8 Minuten begrenzt.



Im gezeigten Beispiel steigt die Amplitude in den ersten 10 Minuten, während gleichzeitig eine leichte Zunahme der Gangabweichung zu beobachten ist. Im weiteren Verlauf treten periodische Schwankungen auf, die durch Kraftschwankungen am Ankerrad verursacht werden.

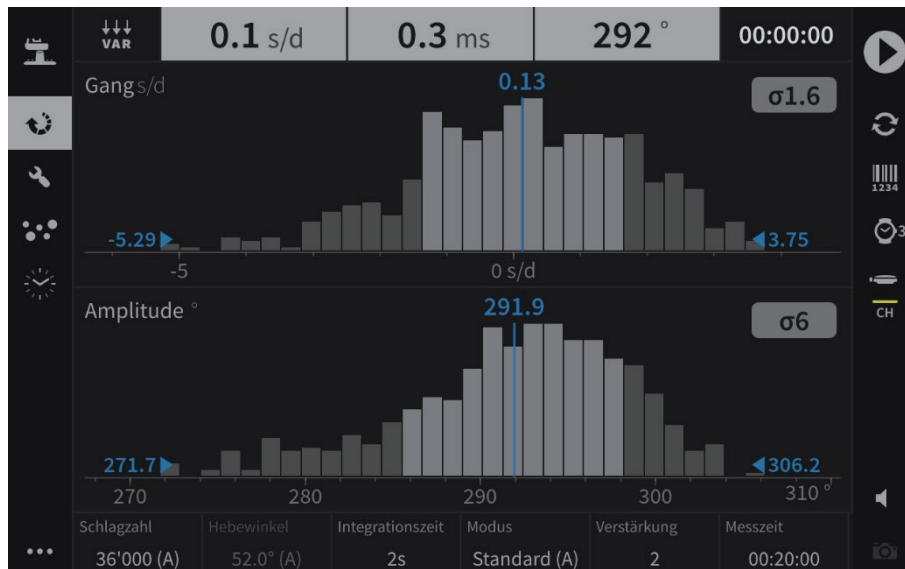
Vario (VAR)

Der Vario-Modus visualisiert die Messresultate über einen Zeitraum von bis zu 300 Stunden mithilfe eines Histogramms der Verteilungsfunktion.

Diese Darstellung erlaubt keine direkte zeitliche Interpretation, bietet jedoch eine klare Übersicht über die Verteilung der Messwerte.

Auf einen Blick ist der **häufigste Wert**, der **Mittelwert**, das **Minimum** und das **Maximum** erkennbar.

Das Histogramm erleichtert die Identifikation von Gangschwankungen über längere Zeiträume. Zusätzlich wird die **Standardabweichung** (σ) dargestellt, um die Stabilität der Messergebnisse zu bewerten.



Der Vario-Modus eignet sich besonders zur Erkennung systematischer Abweichungen, die durch Kraftveränderungen, Reibungseffekte oder Schmierungszustände verursacht werden, ohne dass einzelne Messzeitpunkte analysiert werden müssen.

Sequenz (SEQ)

Mechanische Uhren werden in verschiedenen Prüflagen gemessen, um die Ganggenauigkeit und Stabilität in realistischen Tragesituationen zu überprüfen.

Gründe für die Messung in mehreren Prüflagen (Sequenzmodus):

- **Einfluss der Schwerkraft**
Die Unruh und das Hemmungssystem werden durch die Schwerkraft unterschiedlich beeinflusst, je nachdem, ob die Uhr flach (Zifferblatt oben/unten) oder vertikal (Krone seitlich) liegt. Dies kann zu Abweichungen im Gangverhalten führen.
- **Unwucht der Unruh**
Selbst präzise gefertigte Unruhen können eine minimale Unwucht aufweisen, die sich in verschiedenen Lagen unterschiedlich auswirkt.
- **Reibung in den Lagersteinen**
Die Reibung in den Unruhlagern variiert je nach Lage der Uhr, was zu Änderungen in der Amplitude und Ganggenauigkeit führt.
- **Praxistaugliche Gangbewertung**
Eine Uhr wird am Handgelenk ständig in verschiedene Positionen bewegt. Die Messung in mehreren Prüflagen ermöglicht eine realistische Beurteilung der durchschnittlichen Ganggenauigkeit.
- **Qualitätskontrolle und Regulierung**
Hochwertige Uhren werden in mehreren Prüflagen reguliert, um eine möglichst gleichmässige Gangabweichung in jeder Lage zu erzielen.

X 2.3 s/d 0.2 ms 269° ✓							
PRÜFLAGE	GANG	REPERE	AMPL	PRÜFLAGE	GANG	REPERE	AMPL
CH	-0.0	0.3	276	X	2.3	0.2	269
CB	7.7	0.2	286	XH	3.8	0.2	281
9H	3.1	0.1	258	XV	1.5	0.2	263
6H	3.2	0.3	268	D	10.4	0.2	32
3H	-2.8	0.3	254	DH	7.7	0.1	10
12H	2.5	0.1	274	DV	5.9	0.2	19
				DVH	-2.3	-0.0	-18
				Di	3.2		
				DVm	7.2	Φ	354
N Mech 6 Lagen kurz				987A			
Kaliber 5Hz				0027			
				Hebewinkel			
				50.0°			

Typische Prüflagen sind:

Zifferblatt oben (CH), Zifferblatt unten (CB)
Krone unten (9H), Krone links (6H), Krone oben (3H), Krone rechts (12H)

Die Regulierung in den drei Haupt-Prüflagen **CH, 9H und 6H** gewährleistet eine möglichst praxisnahe Gangstabilität, da diese Lagen die häufigsten Tragesituationen einer Uhr repräsentieren und entscheidend für die tatsächliche **Ganggenauigkeit im Alltag** sind.

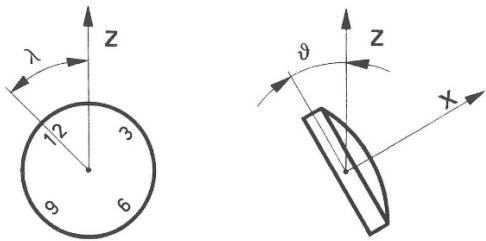
Bei Mikrofonen mit **automatischem Prüflagenwechsel** (z.B. ChronoMaster Auto) werden die Messungen selbstständig durchgeführt und die Ergebnisse aller Prüflagen zusammengefasst.

Bei Mikrofonen mit **manuellem Prüflagenwechsel** (z.B. ChronoMaster) steht teilweise ebenfalls ein Sequenzmodus zur Verfügung. Das Gerät fordert den Nutzer zur Änderung der Prüflage auf und erkennt automatisch, wenn die neue Prüflage erreicht wurde, woraufhin die nächste Messung selbstständig startet.

Mit ChronoMaster-Geräten in Kombination mit **Wicotrace 360°** können mechanische Uhren in frei definierbaren Prüflagen getestet werden.

Dabei werden der **Drehwinkel (Rotation Angle λ , Lambda)** und der **Kippwinkel (Tilt Angle ϑ , Theta)** für jede Messposition festgelegt, um eine umfassende Analyse der Gangwerte in unterschiedlichen Lagen zu ermöglichen.

Durch die flexible Kombination dieser beiden Winkel lassen sich alle denkbaren Prüflagen definieren – von klassischen Positionen wie Zifferblatt oben (CH) oder Krone unten (9H) bis hin zu individuell angepassten Speziallagen.



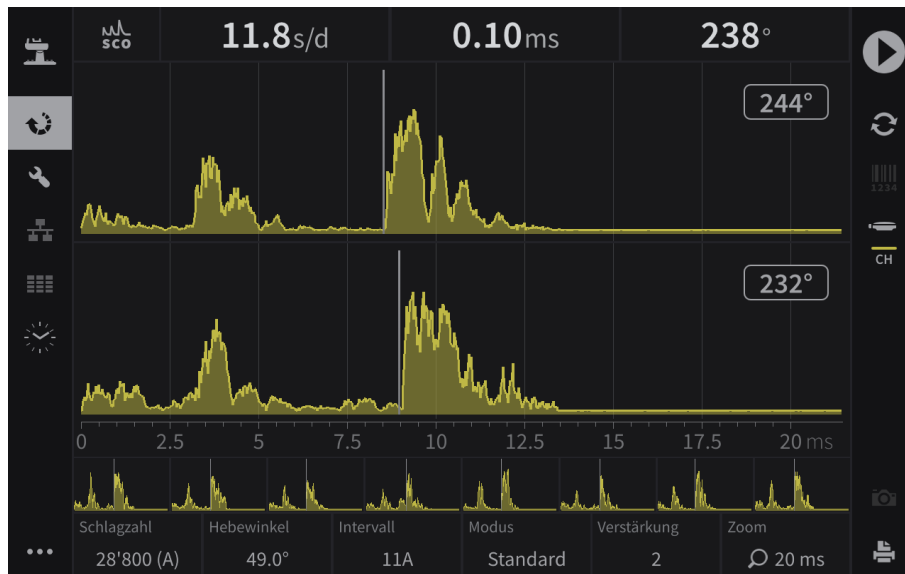
In der Abbildung unten sind 12 typische Prüflagen aufgeführt, die in der Uhrenindustrie zur Qualitätskontrolle genutzt werden.

 CH	 CB	 9H	 7:30H
$\lambda = 0^\circ$ $\vartheta = +90^\circ$	$\lambda = 0^\circ$ $\vartheta = -90^\circ$	$\lambda = 270^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$	$\lambda = 225^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$
 6H	 4:30H	 3H	 1:30H
$\lambda = 180^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$	$\lambda = 135^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$	$\lambda = 90^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$	$\lambda = 45^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$
 12H	 10:30H	 7:30H+45	 6H+45
$\lambda = 0^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$	$\lambda = 315^\circ$ $\vartheta = 0^\circ$	$\lambda = 225^\circ$ $\vartheta = +45^\circ$	$\lambda = 180^\circ$ $\vartheta = +45^\circ$

λ = rotation angle ϑ = tilt angle

Scope (SCO)

Die grafische Darstellung der Schlaggeräusche (Scope) zeigt jeweils zwei Impulse, einen für die Halbschwingung TIC und einen für die Halbschwingung TAC. Die Anzeige erfolgt wahlweise im Zeitbereich von 20, 200 oder 400 ms, wobei 20 ms der Standardwert ist.



Das Scope ermöglicht eine detaillierte Analyse der Hemmungsgeräusche, indem die akustischen Signale in definierten Intervallen erfasst werden. In diesem Beispiel erfolgt die Bildaktualisierung alle 11 Halbschwingungen (11A), wodurch periodische Muster und Abweichungen präzise erkannt und analysiert werden können.

Zusätzlich dient das Scope der Überprüfung der Geräteparametrierung, um sicherzustellen, dass Signalintensität und -qualität für eine präzise und zuverlässige Messung ausreichen.

Für jede Halbschwingung werden neben den Schlaggeräuschen auch die entsprechenden Amplituden dargestellt. Die Amplitude wird berechnet, indem die Zeitspanne zwischen dem ersten und dritten Impuls im Schlaggeräusch gemessen wird. Diese Impulse werden durch vertikale Linien markiert und dienen als Referenz für die genaue Bestimmung der Schwingungsweite.

Zudem werden die letzten 8 Schlaggeräusche in einem Band unterhalb der aktuellen Schlaggeräusche im Kleinformat dargestellt.

Nach Anhalten der Messung kann durch direktes Anklicken eines Kleinbilds das entsprechende Schlaggeräusch im Grossformat angezeigt werden.

Weitere Beispiele zur Fehleranalyse mit dem Scope sind im Abschnitt „Fehlerfindung mit Scope“ aufgeführt.

Fast-Fourier-Transformation (FFT)

Die **FFT-Darstellung (Fast Fourier Transformation)** berechnet aus den Gang- und Amplitudenwerten das zugehörige Frequenzspektrum und stellt es grafisch dar. So lassen sich **regelmässige Schwankungen** erkennen, die im normalen Zeitverlauf oft kaum sichtbar sind.

Solche periodischen Abweichungen entstehen häufig durch **mechanische Einflüsse im Räderwerk**, insbesondere durch die Art, wie Zahnräder ineinandergreifen. Bei jedem Eingriff kommt es zu leichten Drehmomentänderungen – typischerweise um 5–10 %. Über mehrere Räder hinweg kann dies zu Amplitudenvariationen von bis zu 30° führen. Diese Effekte sind konstruktionsbedingt und gelten als normal.

Die FFT-Analyse macht solche Einflüsse sichtbar, indem sie die Messdaten in ihre Einzelfrequenzen zerlegt – ähnlich wie ein Musiker einen Akkord in einzelne Töne auflöst.

Ein Beispiel aus Wicotrace 3 zeigt 15 verschiedene Perioden, die sich während einer mehrstündigen Amplitudenmessung feststellen lassen.

Die Darstellung ist besonders nützlich, um:

- Regelmässige Schwankungen im Gang oder in der Amplitude zu erkennen,
- Unregelmässigkeiten in Verzahnung oder Kraftfluss aufzuspüren,
- die Qualität des Räderwerks zu beurteilen – etwa bei Zahnformfehlern oder Reibung.

Die FFT-Darstellung ist somit ein effizientes Werkzeug für Uhrmacher, um Gangschwankungen gezielt zu analysieren und mechanische Ursachen sichtbar zu machen.

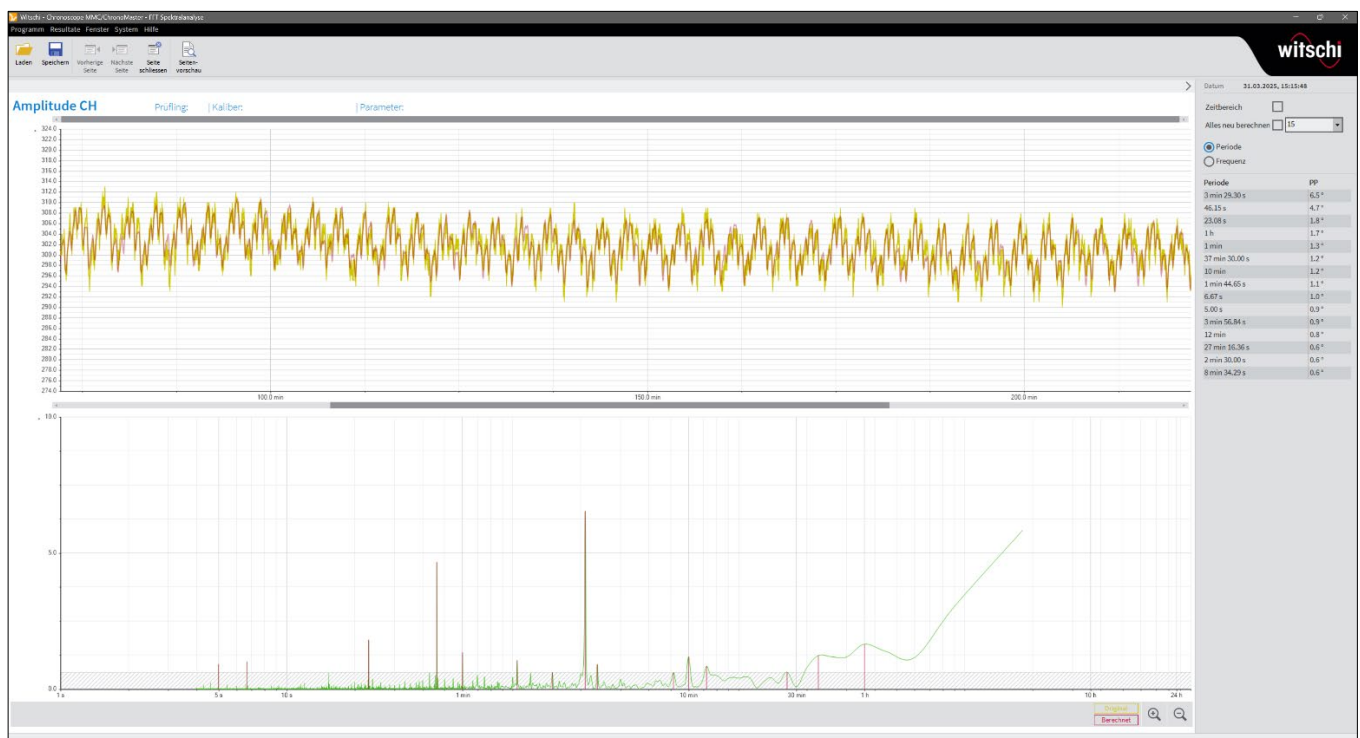


Abbildung: FFT-Darstellung mit 15 gefundenen Perioden einer mehrstündigen Amplitudenmessung in Wicotrace 3.

Isochronismus (ISO)

Der Isochronismus eines Unruh-Spiralfeder-Schwingsystems bedeutet, dass die Schwingungsdauer der Unruh unabhängig von der Amplitude ist.

In einem idealen isochronen System schwingt die Unruh stets mit der gleichen Periodendauer, unabhängig davon, ob die Amplitude gross oder klein ist. In der Praxis wird der Isochronismus jedoch durch verschiedene Faktoren beeinflusst, darunter die Elastizität der Spiralfeder, das Spiel der Spiralfeder im Rücker, Reibungseffekte sowie Luftverwirbelungen.

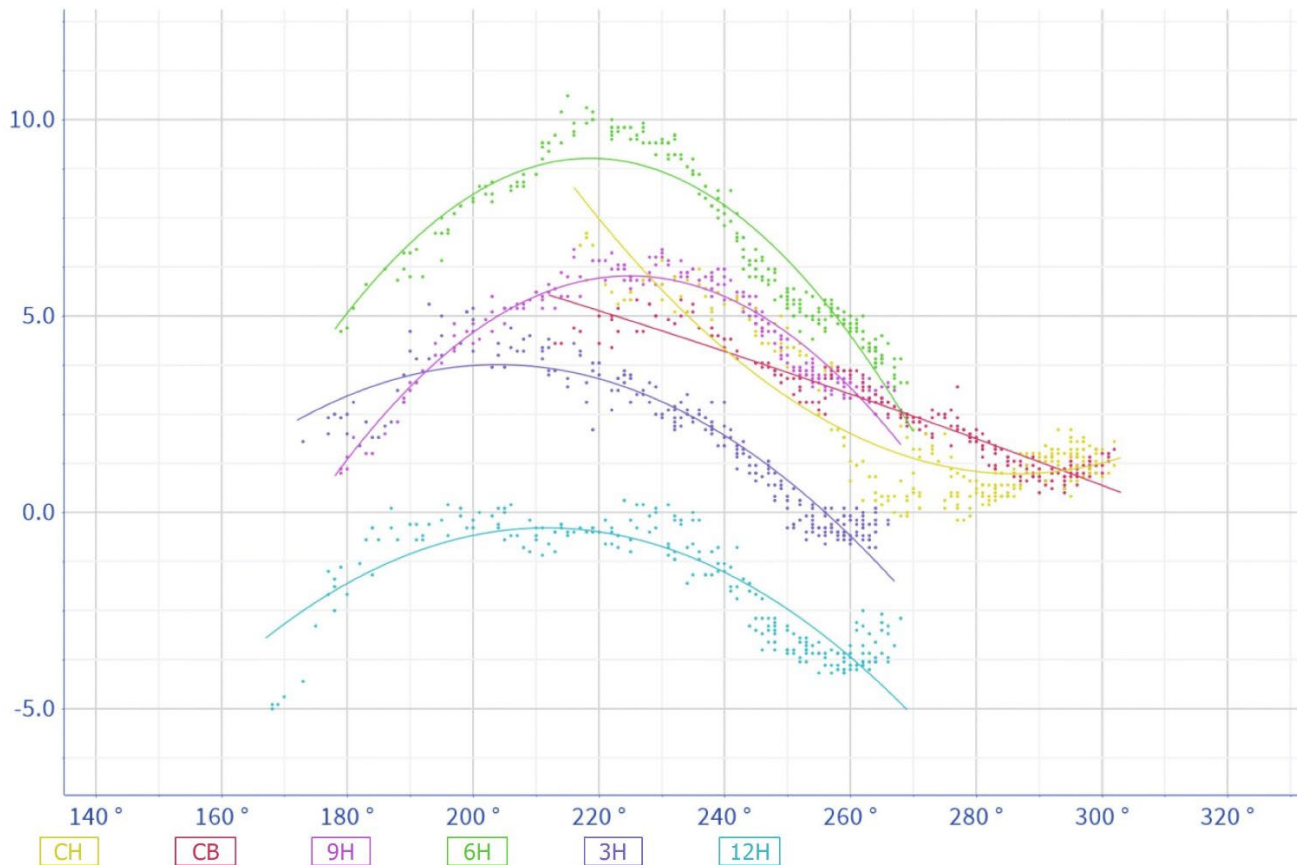


Abbildung: Isochronismus Diagramm in Wicotracer 3

Ein **Isochronismus-Diagramm** stellt die Gangabweichung in Abhängigkeit von der Amplitude dar und dient zur Analyse der Gangstabilität über verschiedene Schwingungsweiten hinweg.

Ein ideales isochrones Verhalten zeigt eine konstante Gangabweichung unabhängig von der Amplitude.

Diese Darstellung ermöglicht eine präzise Bewertung des Isochronismus-Verhaltens und hilft, Optimierungspotenziale in der Regulierung und Konstruktion des Uhrwerks zu identifizieren.

Berechnete Kennwerte

Neben verschiedenen grafischen Darstellungsmöglichkeiten stehen zahlreiche **Kennwerte** zur Verfügung, die rechnerisch aus den Messdaten ermittelt werden können. Sie ermöglichen eine kompakte, objektive und vergleichbare Bewertung der zeitlichen und lagenabhängigen Eigenschaften eines Uhrwerks. Durch die Standardisierung dieser Kennzahlen lassen sich Prüfergebnisse effizient analysieren und untereinander vergleichen.

Zur Veranschaulichung der Kennwertberechnungen wird im Folgenden auf ein einheitliches numerisches Beispiel Bezug genommen. Es wird angenommen, dass ein mechanisches Uhrwerk in sechs definierten Prüflagen sowohl bei Vollaufzug (0h) als auch nach 24 Stunden Laufzeit (24h) vermessen wurde. Die Messergebnisse umfassen die Gangabweichung (in s/d), den Abfallfehler (in ms) sowie die Amplitude (in Grad):

Prüflage	Resultate 0h			Resultate 24h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
CH (HH)	9.1	0.0	298	8.6	0.0	298
CB (HB)	10.0	0.0	294	11.7	0.0	286
9H (VB)	8.3	0.1	287	11.2	0.1	264
6H (VG)	3.2	0.1	283	2.6	0.1	268
3H (VH)	7.2	0.1	287	6.7	0.1	275
12H (VD)	11.2	0.1	278	11.1	0.1	279

Diese Datengrundlage dient im weiteren Verlauf als Referenz für die Definition und Berechnung sämtlicher Kennwerte.

Mittelwert (X)

Der Kennwert **X** bezeichnet den arithmetischen Mittelwert der Gangwerte G_i in allen geprüften Lagen (horizontal und vertikal):

$$(7) \quad X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i$$

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
XH	9.6	0.0	296	10.2	0.0	292
XV	7.5	0.1	284	7.9	0.1	272
X	8.2	0.1	288	8.7	0.1	278

XH: Mittelwert aller horizontalen Prüflagen.

XV: Mittelwert aller vertikalen Prüflagen.

Maximale Differenz zwischen den Prüflagen (D)

Der Kennwert **D** bezeichnet die grösste Differenz zwischen den Messwerten in den einzeln gemessenen Prüflagen. Er gibt Aufschluss über die Lagenabhängigkeit des Uhrwerks.

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
D	8.0	0.1	20	9.1	0.1	34

DV: Maximale Differenz zwischen allen gemessenen vertikalen Prüflagen.

DH: Maximale Differenz zwischen allen gemessenen horizontalen Prüflagen.

Differenz vertikal zu horizontal (DVH)

Der Kennwert **DVH** (Differenz Vertikal zu Horizontal) beschreibt die Gangabweichung zwischen den vertikalen und horizontalen Prüflagen eines Uhrwerks.

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
XV	7.5	0.1	284	7.9	0.1	272
XH	9.6	0.0	296	10.1	0.0	292
DVH	-2.1	0.1	-12	-2.2	0.1	-20

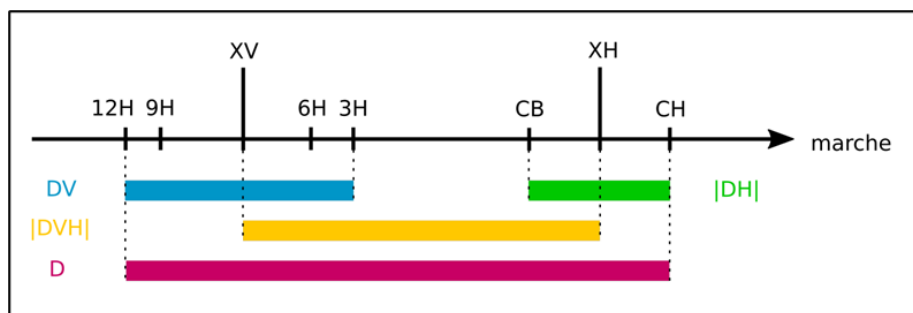


Abbildung: Visualisierung möglicher Kennwerte XH, HV, DH, DV, DVH und D

Differenz zwischen den Prüflagen 6H und CH (Di)

Die Gangdifferenz **Di** zwischen der Prüflage 6H (vertikal, Krone unten) und CH (horizontal, Zifferblatt oben) entspricht einem vergleichbaren Kennwert wie das Kriterium D der COSC-Norm ISO 3159, allerdings im Rahmen einer Kurzzeitmessung.

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
Di	-5.9			-6.0		

Isochronismus

Der Isochronismus bezeichnet die Differenz der Gangabweichung zwischen 0 Stunden (Vollaufzug) und 24 Stunden (bzw. nach einer definierten Laufzeit Nh) in derselben Prüflage.

Dieser Einzelwert ist zu unterscheiden von der grafischen Isochronismusedarstellung, bei der die Gangabweichung in Abhängigkeit von der Amplitude aufgetragen wird (siehe z. B. Diagramm, Seite 25).

Prüflage	Resultate 0h			Resultate 24h			Isochronismus (s/d)
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	
CH (HH)	9.1	0.0	298	8.6	0.0	298	0.5
CB (HB)	10.0	0.0	294	11.7	0.0	286	-1.7
9H (VB)	8.3	0.1	287	11.2	0.1	264	-2.9
6H (VG)	3.2	0.1	283	2.6	0.1	268	0.6
3H (VH)	7.2	0.1	287	6.7	0.1	275	0.5
12H (VD)	11.2	0.1	278	11.1	0.1	279	0.1
X	8.2	0.1	288	8.7	0.1	278	

Maximum Isochronismus über die gemessenen Prüflagen (Im)

Der Isochronismus-Kennwert **Im** (bzw. **I_{max}**) bezeichnet den grössten Isochronismuswert, der sich aus der Differenz der Gangabweichungen zwischen 0h und 24h in einzelnen Prüflagen ergibt.

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h			Isochronismus (s/d)
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	
Im							-2.9

Im berücksichtigt die Prüflagen gemäss Norm NIHS 93-10 (ohne 12H), während Im* alle gemessenen Prüflagen einbezieht.

Isochronismus zwischen 0h und 24h (Ie)

Der Isochronismus-Kennwert **Ie** beschreibt die Stabilität der Ganggenauigkeit eines Uhrwerks in Abhängigkeit vom Aufzugszustand. Er wird ermittelt, indem die Differenz der mittleren Gänge in allen sechs Lagen bei Vollaufzug (0h) und nach 24 Stunden Laufzeit (24h) gebildet wird. Die Berechnung erfolgt wie folgt:

$$(8) \quad Ie = Abs(X0h - X24h)$$

Dieser absolute Differenzwert (in s/d) gibt an, wie stark sich die Ganggenauigkeit über die Zeit verändert, und ist ein Mass für die Isochronie des Uhrwerks.

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h			Isochronismus (s/d)
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	
Ie							0.5

Differenz der Mittelwerte zwischen 0h und 24h (DX)

Der Kennwert **DX** bezeichnet die Differenz der Mittelwerte zwischen 0h (Vollaufzug) und 24h Laufzeit und wird je für Gang, Abfallfehler und Amplitude berechnet.

Kennwert	Resultate 0h			Resultate 24h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
X	8.2	0.1	288	8.7	0.1	278
DX				-0.5	0.0	10

Der Kennwert **DX** gibt Auskunft darüber, wie sich der mittlere Gang (Abfallfehler und Amplitude) des Uhrwerks im Verlauf von 24 Stunden verändert hat. Im Gegensatz zum **Isochronismus le**, der mit einem **absoluten Betrag** arbeitet, bleibt bei **DX** die Richtung der Veränderung erhalten.

Differenz zwischen ein- und ausgeschalteter Komplikation (DXC)

Der Kennwert **DXC** bezeichnet die Differenz der Mittelwerte von Gang, Abfallfehler und Amplitude zwischen Messungen mit eingeschalteter Komplikation (z. B. aktivierte Chronographenfunktion) und ohne Komplikation.

Maximale Gangdifferenz über alle Prüflagen (Pmax)

Pmax bezeichnet die grösste Gangdifferenz zwischen allen gemessenen Prüflagen zum Zeitpunkt 0h. (Dieser Kennwert entspricht funktional dem Wert D bei 0h)

Kennwert	Resultate 0h		
	Gang (s/d)	Abfallfehler (ms)	Amplitude (°)
Pmax	8.0		

Qualitätsfaktor (N)

(Entspricht auch Funktionsindex **Fm** gemäss Norm NIHS 93-10)

Der **Qualitätsfaktor N** ist ein normierter Kennwert zur Beurteilung der chronometrischen Qualität eines Uhrwerks. Je kleiner der Wert von N, desto besser ist das Gangverhalten des Uhrwerks im Hinblick auf Präzision und Lagenstabilität.

$$(9) \quad N = 0.15 |I_{\max}| + 0.1 P_{\max} + C$$

C ist der thermische Koeffizient. Berechnet in Prüflage 6H bei 38°C. Falls nicht bekannt, sollte für C der vom Spiralhersteller garantierte maximale thermische Koeffizient verwendet werden. Beispielsweise für die Qualität 1 ist der thermische Koeffizient C = 0.6.

$$N = 0.15 |-2.9| + 0.1 * 8.0 + 0.6 = 1.8$$

N berücksichtigt die Prüflagen gemäss Norm NIHS 93-10, während N* alle gemessenen Prüflagen einbezieht.

Gütefaktor (Q)

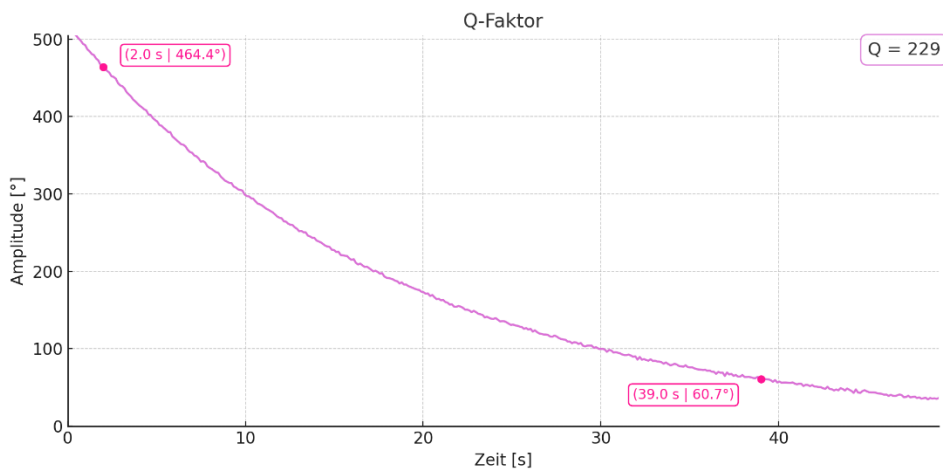
Der Gütefaktor (**Q-Faktor**) gibt an, wie effizient eine Unruh mit Spiralfeder schwingt, indem er das Verhältnis zwischen gespeicherter Energie und Energieverlust pro Schwingung beschreibt. Ein hoher Q-Faktor bedeutet, dass die Schwingung länger erhalten bleibt, da weniger Energie verloren geht. Das sorgt für eine stabilere Amplitude und verbessert die Ganggenauigkeit der Uhr.

Uhrmacher können den Q-Faktor erhöhen, indem sie Reibungsverluste minimieren oder die Schwingungsfrequenz erhöhen.

Mit **WisioScope Labor** kann der Q-Faktor gemessen werden, indem die Software die Amplitude der Schwingungen über die Zeit aufzeichnet und die Abklingrate analysiert.

Ablauf der Q-Faktor-Messung:

- Anker entfernen, Uhrwerk stabil positionieren
- Unruh manuell auslenken und frei schwingen lassen
- Berechnung des Q-Faktors aus der Abklingrate der Amplitude.



Typische Gütefaktoren (Q-Faktoren) für freischwingende Unruhen in mechanischen Uhrwerken liegen – abhängig von Bauart, Lagerung, Schmierung und Luftdruck – im Bereich von 150 ... 300.

Typische Gütefaktoren sind:

Oszillator Typ	Q
Serienmässige mechanische Uhr	150 ... 300
Sehr hochwertige mechanische Uhr	300 ... 600
Stimmgabeluhr	1'000 ... 2'000
Pendeluhr	3'000 ... 15'000
Quarzoszillator TCXO	$10^4 \dots 10^5$
Quarzoszillator OCXO	10^4
Rubidium-Oszillator	10^7
Cesium Beam Atomic Clock	10^8
Hydrogen Maser	10^9
Cesium Fountain Atomic Clock	10^{10}

Schwerpunktfehler (DVm, Φ)

Ist der Schwerpunkt des Schwingensystems (Unruhe und Spiral) nicht in der Drehachse, so kann dies einen beschleunigenden oder einen bremsenden Einfluss auf die Frequenz haben. Der Einfluss hängt von der Prüflage und der Amplitude ab.

Wird die Gangabweichung in vier vertikalen Prüflagen gemessen, so kann dies für die Berechnung des Schwerpunktfehlers und somit die nötigen Korrekturmassnahmen berechnet werden.

Unter der Annahme, dass einzig der Schwerpunktfehler die Unterschiede in den Messungen in den Prüflagen verursacht, können folgende Formeln aufgestellt werden.

$$\text{Erste Prüflage: } \varphi_1 = 0^\circ \quad \mu_1 = \mu_0 + MgaG(\theta_0) \cos(\phi_0 + \beta)$$

$$\text{Zweite Prüflage: } \varphi_2 = 90^\circ \quad \mu_2 = \mu_0 - MgaG(\theta_0) \sin(\phi_0 + \beta)$$

$$\text{Dritte Prüflage: } \varphi_3 = 180^\circ \quad \mu_3 = \mu_0 - MgaG(\theta_0) \cos(\phi_0 + \beta)$$

$$\text{Vierte Prüflage: } \varphi_4 = 270^\circ \quad \mu_4 = \mu_0 + MgaG(\theta_0) \sin(\phi_0 + \beta)$$

Die Materialmenge, die es zu entfernen gibt, ist

$$Mga = \frac{2}{|G(\theta_0)|} \sqrt{(\mu_1 - \mu_3)^2 + (\mu_4 - \mu_2)^2}$$

Wobei

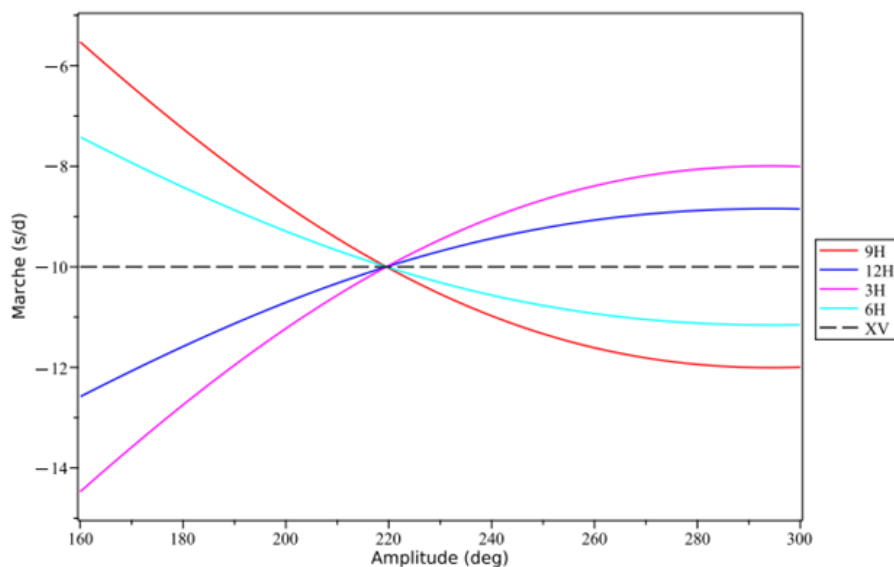
$$G(\theta_0) = \frac{86\,400 J_1(\theta_0)}{J_b \omega_0^2 \theta_0}$$

J_b ist das Massenträgheitsmoment der Unruhe, J_1 die Bessel-Funktion, ω_0 die Kreisfrequenz und θ_0 die Amplitude der Unruhe.

Die Richtung des Schwerpunktfehlers bezüglich der ersten Prüflage ist:

$$\tan(\phi_0 + \beta) = \frac{\mu_4 - \mu_2}{\mu_1 - \mu_3}$$

Der Einfluss eines Schwerpunktfehlers ist bei kleiner Amplitude am grössten. Mit steigender Amplitude nimmt der Einfluss ab und verschwindet bei 220° . Bei noch höheren Amplituden kehrt sich der Einfluss abgeschwächt um.



Wenn das Massenträgheitsmoment der Unruh nicht bekannt ist, kann der Schwerpunktfehler durch eine maximal daraus resultierende Gangdifferenz beschrieben werden, die als DVm bezeichnet wird.

DVm ist die theoretisch maximale Gangdifferenz, die durch den Schwerpunktfehler der Unruh bei einer Amplitude von 270° in vertikalen Lagen entsteht.

Phi (Φ) zeigt den Drehwinkel der Aufzugswelle relativ zur 3H-Position, an der sich der Schwerpunktfehler der Unruh im tiefsten Punkt der Senkrechten befindet.

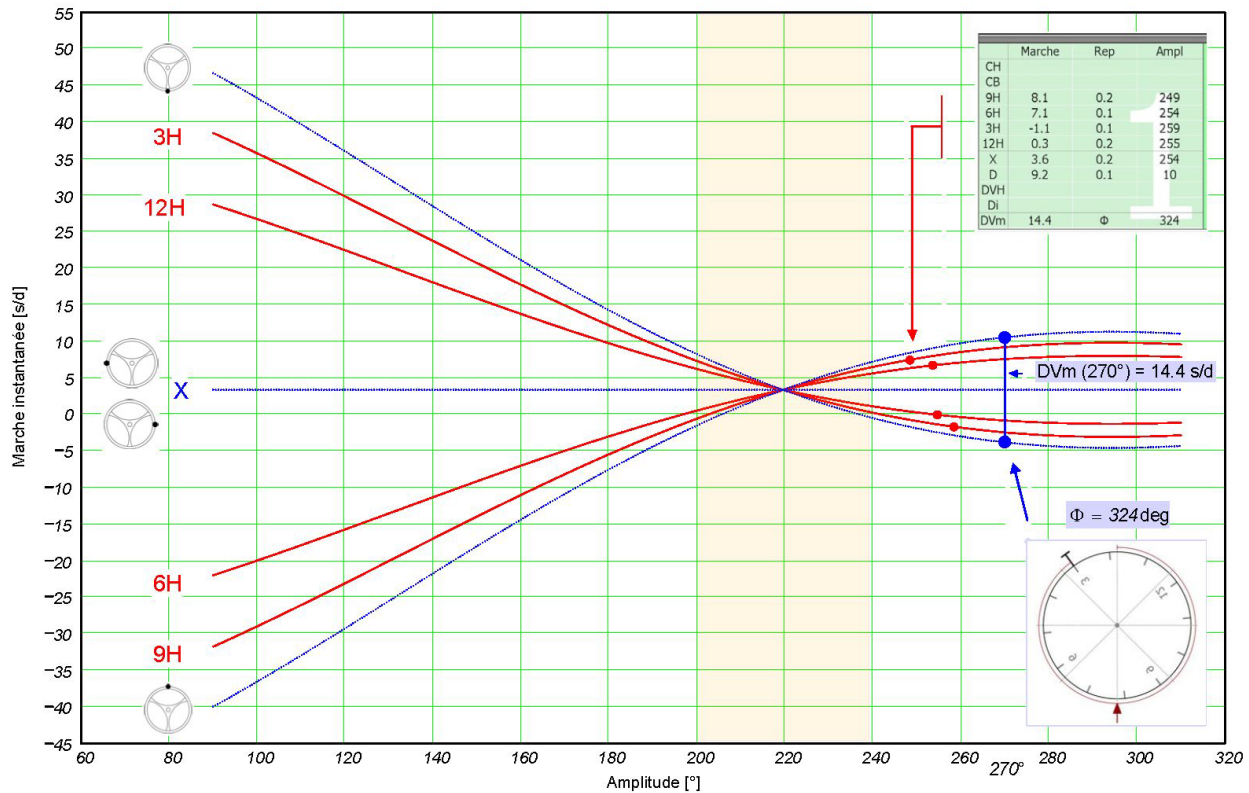


Abbildung: Beispiel wie aus den Gang- und Amplitudenwerten der vier vertikalen Prüflagen die Kennwerte DVm und Phi (Φ) bestimmt werden.

Im Sequenzmodus (z.B. auf dem Witschi Terminal) werden die Kennwerte DVm und Phi (Φ) automatisch aus den Messwerten der vertikalen Prüflagen berechnet und in einer Tabelle angezeigt.

PRÜFLAGE	GANG	REPERE	AMPL	PRÜFLAGE	GANG	REPERE	AMPL
CH	-0.0	0.3	276	X	2.3	0.2	269
CB	7.7	0.2	286	XH	3.8	0.2	281
9H	3.1	0.1	258	XV	1.5	0.2	263
6H	3.2	0.3	268	D	10.4	0.2	32
3H	-2.8	0.3	254	DH	7.7	0.1	10
12H	2.5	0.1	274	DV	5.9	0.2	19
				DVH	-2.3	-0.0	-18
				Di	3.2		
				DVm	7.2	Φ	354

Witschi Messtipps

Für präzise und wiederholbare Messresultate sind bestimmte Messvorgaben zu beachten. Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen, erläutert Einflussfaktoren auf die Messung und listet allgemeine Faktoren zur Beeinflussung der Schwingungsperiode der Unruh auf.

Prüfablauf für die Gangmessung und Qualitätskontrolle	Erklärungen
Zustand des Uhrwerks kontrollieren	Sauberkeit prüfen, Schmierzustand der Öle bewerten, mechanische Teile inspizieren. Falls erforderlich: Uhrwerk reinigen (Revidieren)
Uhrwerk aufziehen	0 bis 15 Umdrehungen der Krone, um eine ausreichende Spannung der Feder sicherzustellen.
Einlaufen lassen	Die Uhr vor der Messung für ca. 20 Minuten laufen lassen, damit sich die Gangwerte stabilisieren. Ein regelmässiges Diagramm wird dadurch aufgezeichnet.
Zeigerposition vor Mitternacht vermeiden	Während dem Datumswechsel kann die Messung für ein gewisse Zeit beeinflusst und verfälscht werden.
Krone in Nullposition (eingedrückt) bringen	In gezogener Position könnte das Uhrwerk gestoppt sein.
Entmagnetisieren (falls erforderlich)	Falls möglich, die Uhr mit einem geeigneten Gerät wie dem Witschi Teslascope entmagnetisieren. Magnetisierte Bauteile können die Ganggenauigkeit negativ beeinflussen.
Messparameter einstellen	Pro Prüflage: 20 Sekunden Stabilisationszeit, mindestens 40 Sekunden Messzeit für stabilere Ergebnisse festlegen.
Gangmessung in horizontaler Lage (CB)	Erste Messung in Lage Zifferblatt unten (CB) durchführen.
Uhrwerk regulieren	Abfallfehler justieren, um eine symmetrische Schwingung der Unruh sicherzustellen. Gang feinabstimmen, um die gewünschte Ganggenauigkeit zu erreichen.
Messsequenz in mehreren Lagen durchführen	Horizontale Lagen: Zifferblatt oben (CH) und unten (CB) und anschliessend in den vertikalen Lagen: 9H, 6H, 3H und 12h. Durch eine optimierte Reihenfolge (zuerst horizontal, dann vertikal) kann die Stabilisierungszeit zwischen den Lagen reduziert werden.
Falls notwendig, das Uhrwerk nachjustieren	Falls erforderlich, basierend auf den Ergebnissen der Sequenzmessung, das Uhrwerk nachjustieren, um eine optimale Ganggenauigkeit sicherzustellen.
Datumsschaltung und Zeiger prüfen	Funktionstest und Zeiger stellen
Tragsimulation und Automatischen Aufzug prüfen	Test des Automatikaufzugs mit einem Tragsimulator (z. B. Cyclomat), Handaufzugsuhrn manuell aufziehen.
Kontrolle nach 24 Stunden	Ganggenauigkeit, Zeit- und Datumsanzeige prüfen und abschliessenden Funktionstest durchführen.
(Optional) Gangreserve prüfen	Startzeitpunkt notieren, Uhr bis zum Stillstand laufen lassen und abgelaufene Zeit messen.

Standardtoleranzen

Die folgende Tabelle zeigt typische Messwertbereiche gut funktionierender, voll aufgezogener Uhrwerke.
Die angegebenen Werte können je nach Hersteller abweichen.

Uhren Kategorie	Gang in s/d	Amplitude H	Amplitude V	Repère
Herrenuhr	-5 ... +15	260° ... 320°	240° ... 280°	< 0.5 ms
Damenuhr (kleiner Durchmesser)	-5 ... +25	"	"	"
Chronometer COSC (Durchmesser über 20 mm)	-4 ... +6	"	"	"
Chronometer COSC (Durchmesser unter 20 mm)	-5 ... +8	"	"	"
Chronometer METAS	0 ... +5	"	"	"

Typische Werte der Gangreserve

Uhren Kategorie	Gangreserve
Standarduhren (einfaches Federhaus)	38 ... 48 Stunden
Hochwertige Manufakturwerke	60 ... 75 Stunden
Uhren mit erhöhter Gangreserve (optimierte Federhäuser, Doppel-Federhaus)	5 ... 8 Tage

Messrelevante Faktoren, die die Schwingungsperiode der Unruh beeinflussen

Faktoren	
Reibung	Lagerreibung, Luftwiderstand, Ölzustand
Hemmung	Impulseffizienz, Hemmungsfehler
Erschütterungen	Schläge, Stösse, Vibrationen
Unwucht der Unruh	Massenverteilung, Asymmetrien
Unwucht des Ankers	Gewichtsverteilung, Fertigungstoleranzen
Unwucht der Spiralfeder	Asymmetrien, Fertigungsfehler
Spiel der Spirale zwischen den Rückerstiften	Ungleichmässige Begrenzung
Änderungen der Elastizität der Spiralfeder	Durch Materialermüdung und Temperaturschwankungen
Temperaturschwankungen	Beeinflussung der Federelastizität und Ölviskosität
Zentrifugalkräfte	Bei starken Bewegungen des Trägers
Trägheit der Spiralfeder	Dynamische Einflüsse bei hoher Frequenz
Schwankungen des Luftdrucks	Veränderung des Luftwiderstands
Magnetfelder	Magnetisierung von Bauteilen, insbesondere der Spirale
Elektrostatische Felder	Wechselwirkungen mit nichtleitenden Materialien

(Diese Liste ist nicht abschliessend)

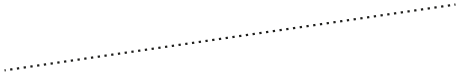
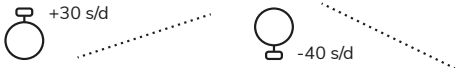
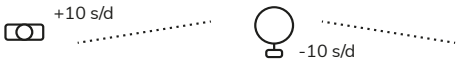
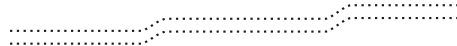
Fehlerfindung

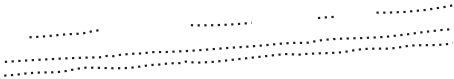
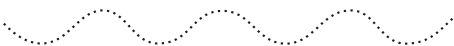
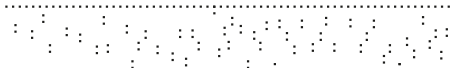
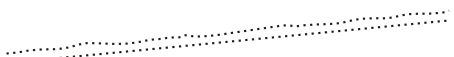
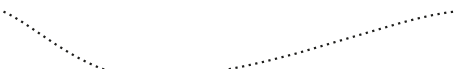
Die grafische Darstellung der Schlaggeräusche erlaubt eine eingehende Analyse über den Zustand der Hemmung. Die Auslösung und ihren Zeitpunkt kann mit der Darstellung **Diagramm** visualisiert werden. Den Verlauf eines einzelnen Schlaggeräuschs wird mit im **Scope** dargestellt. Im Folgenden werden Darstellung präsentiert und mögliche Ursachen für eine solche Darstellung erläutert. Diese Darstellung ist nicht abschliessend. Eine Vielzahl von weiteren Ursachen können in ähnlichen oder identischen Darstellungen resultieren.

Fehlerfindung mit Diagramm

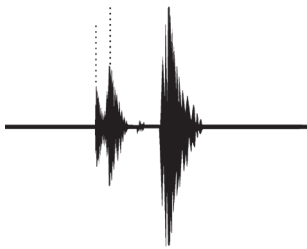
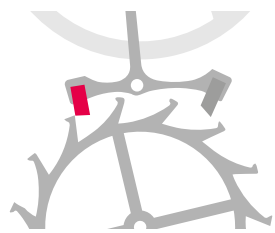
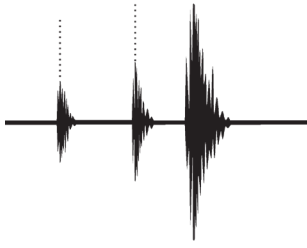
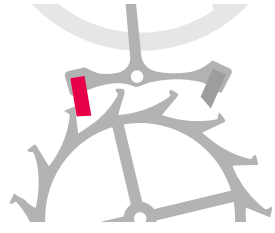
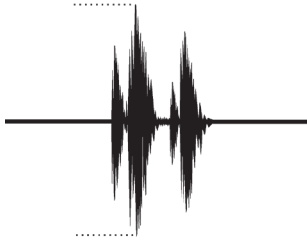
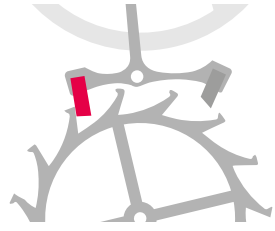
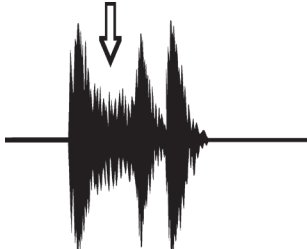
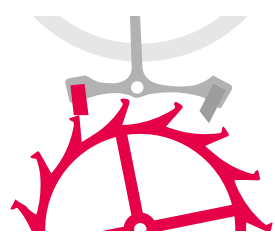
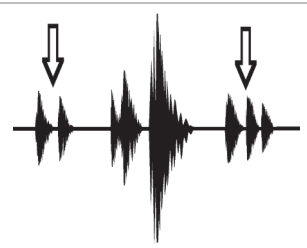
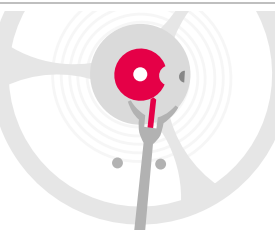
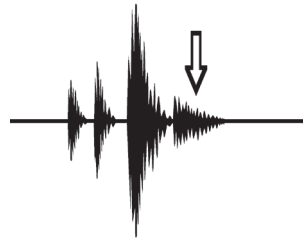
Einstellung der Signalverstärkung: Standardeinstellung ist 2.

Wenn kein sauberes Diagramm erscheint, muss die Signalverstärkung am Messgerät erhöht oder vermindert werden.

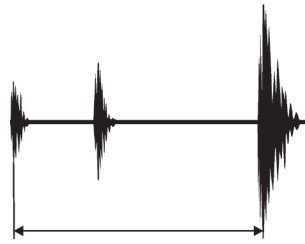
Fehler	Beschreibung Massnahme	Bild
Uhrwerk in gutem Zustand	Es sind keine Massnahmen nötig.	
Repère (Abfallfehler) zu gross (ca. 3 ms)	Zuerst Verstärkung am Messgerät prüfen. Sofern kein Einfluss erkennbar ist, Uhr Nachregulieren. Dabei muss zuerst das Repère korrigiert und anschliessend der Gang reguliert werden.	
Abgleich nötig	Uhrwerk links: starker Vorgang Uhrwerk rechts: starker Nachgang Nachregulieren auf gewünschten Gangwert z.B. +0 bis 10 s/d.	
Uhrwerk mit grossen Lagefehlern zwischen verschiedenen vertikalen Lagen	Zentrieren der Spiralfeder oder Auswuchten der Unruh oder Ersetzen des Regulierorgans.	
Uhrwerk mit Lagefehlern zwischen den vertikalen und horizontalen Prüflagen	Spiel der Spiralfeder im Rücker einstellen. Für DVH- Stifte zu resp. Spiel verkleinern für DVH+ Stifte auf resp. Spiel vergrössern	
Uhrwerk mit grossen, jedoch regelmässigen Gangschwankungen	Defekt im Räderwerk. Revision und eventuell Austausch von Räderwerkteilen.	
Uhrwerk mit sehr unregelmässigem Gang und Störungen	Die Amplitude ist dabei meistens ungenügend. Das Uhrwerk muss revidiert werden.	
Unruh "prellt" zeitweise	Zu hohe Amplitude der Unruh (>330°). Das doppelte "Tic-Tac" ist im Lautsprecher hörbar. Feder, Anker und/oder Ankerrad müssen ausgetauscht werden.	

Unruh "prellt" dauernd	Zu hohe Amplitude der Unruh (>330°) Das doppelte "Tic-Tac" ist im Lautsprecher hörbar. Feder, Anker und/oder Ankerrad müssen ausgetauscht werden.	
Ankerrad ist unrund	Ankerrad austauschen. (Hinweis: 15 bis 21 Zähne entsprechen einer Umdrehung des Ankerrads)	
Eingangspalette hängt schlecht ein oder ist "trocken" (verschmiert)	Hemmung reinigen oder Ankerrad austauschen.	
Spiralfeder streift	Meistens streift der Spiral. In diesem Fall an den Rückerstiften oder am Spiralkloben (Nebengeräusche im Lautsprecher). Spiral zentrieren, Gang richten.	
Langsames Einschwingen nach Positionswechsel	Unruhlager und Räderwerk sind eventuell schlecht oder nicht geölt. Reinigen und Ölen, ev. Revision.	

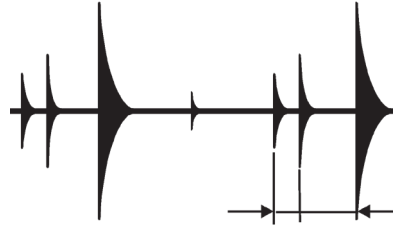
Fehlerfindung mit Scope

Fehler	Beschreibung Massnahme	Bild
Ruhe der Hemmung zu schwach		
Ruhe der Hemmung zu stark		
Auslösung zu stark		
Zusätzliche Reibung		
Sicherheitsstift berührt Rolle		
Kein Spiel zwischen Hörner und Hebelstift		

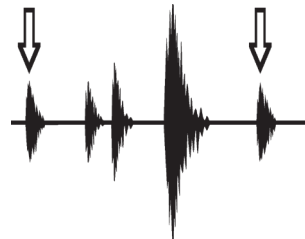
Schwache Amplitude



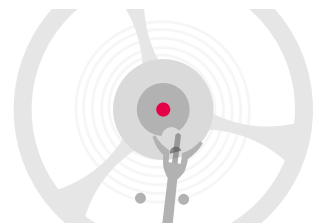
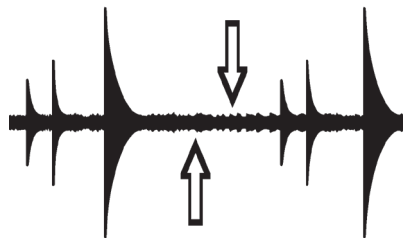
Spiel des Unruhzapfens zu gross



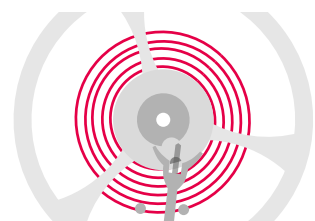
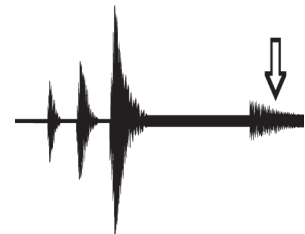
Gabelhorn berührt Hebelstein (prellt)



Rauer Unruhzapfen



Spiralfeder streift



Ein Ankerradzahn fällt direkt auf die Antriebsfläche

