

VIII Messgröße Frequenz

VIII.1 Kalibrierverfahren

VIII.1.1 Zeitbasen

Die Kalibrierung von Zeitbasen erfolgt durch direkte Messung mit dem Universalzähler PM6680B (Bild VIII.1). Der Zähler wird mit dem Rubidiumstandard als externe Referenz auf die Frequenz von DCF-77 rückgeführt. Das Messergebnis des Zählers umfasst 10 Stellen, durch Subtraktion mit der MATH-Funktion des Zählers können zwei weitere (sonst nur intern vorhandene) Stellen zur Anzeige gebracht werden, MATH (K·X+L)/M mit K=1; L= -10E6; M=1:

Messunsicherheiten durch Triggerfehler sind aus den Daten des Messsignals (Amplitude, S/N, Frequenz und Signalform) und der Messdauer abzuschätzen und anzugeben. Wenn Messdauer und Signalform es ermöglichen kann der Zähler über wiederholte Messungen (z.B. 100 Messungen à 10 s) mit seiner STAT-Funktion selbstständig die Standardabweichung berechnen, sie ist der tatsächliche Wert für die Messunsicherheit der Messung, enthält jedoch noch keinen Anteil für die Unsicherheit der Referenzfrequenz. Die Einstellungen am Zähler (z.B. Filter, Kopplungsart usw.) werden im Kalibrierschein vermerkt.

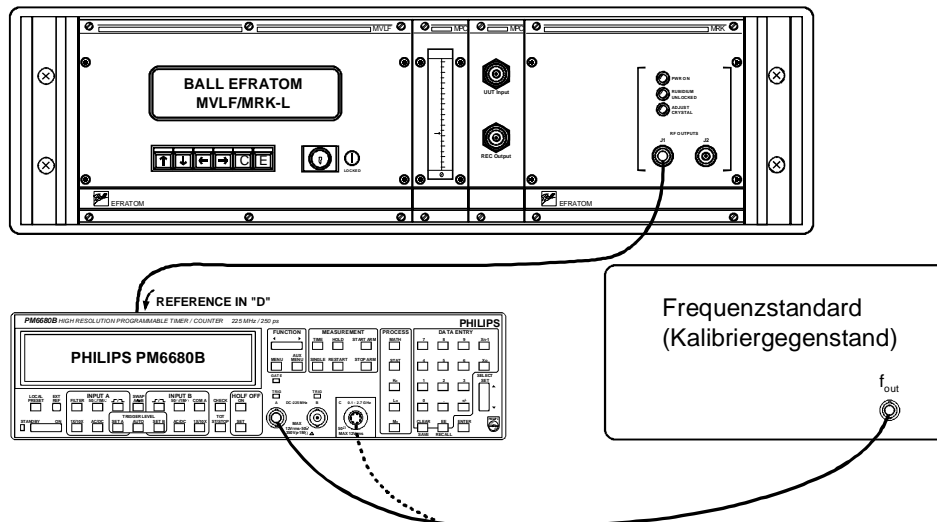


Bild VIII.1: Kalibrierung von Zeitbasen/Frequenzstandards

Bei niedrigen Frequenzen ($f \leq 10$ MHz) kann die Bestimmung der relativen Frequenzunsicherheit durch Phasenzeitdifferenzmessungen erfolgen. Die relative Frequenzdifferenz ergibt sich dabei aus der zeitlichen Änderung der gemessenen Phasenzeitdifferenzen dividiert durch die Messzeit gemäß der Formel

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\varphi(t_2) - \varphi(t_1)}{2\pi \cdot f \cdot (t_2 - t_1)}$$

Der Wert der Phasenzeit $\frac{\varphi}{2\pi \cdot f}$ wird durch eine Zeitintervallmessung mit dem Universalzähler

PM6680B oder mit dem Phasenkomparator MPC-10 ermittelt. In Letzterer Methode ergibt sich mit dem analogen Spannungsausgang am Schreiber die relative Frequenzabweichung zu

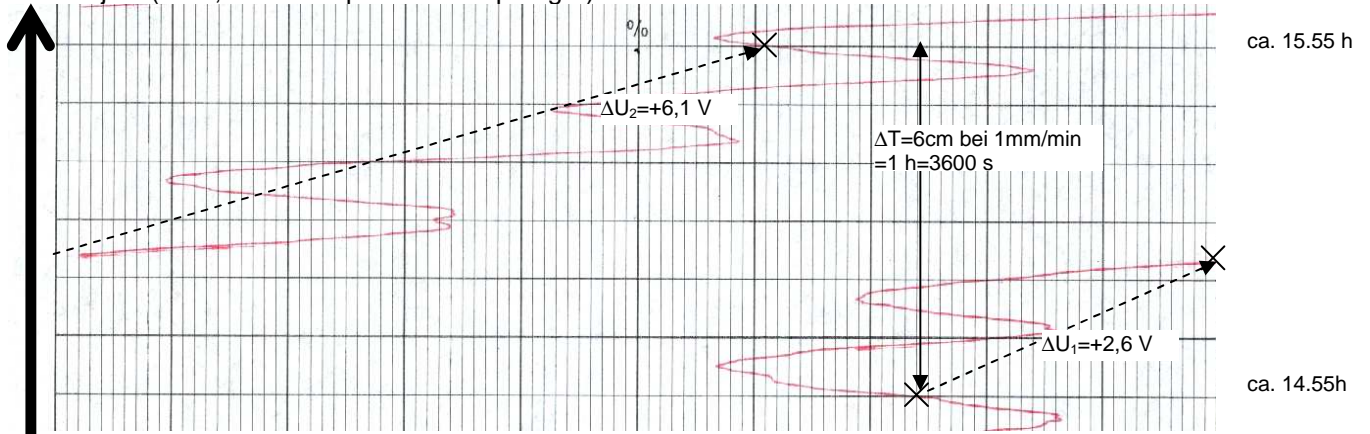
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{10V \cdot 10MHz \cdot (t_2 - t_1)} \text{ bzw.}$$

$\Delta f = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{10V \cdot \Delta T}$ mit U als Spannung am Analogausgang und ΔT als Zeitintervall zwischen den gemessenen Spannungen.

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	1 von 16

Messbeispiel bei 1mm/min, Messzeit 1 Stunde

Messobjekt (DUT, GPS disziplinierter Empfänger)



$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta U_{gesamt}}{10V \cdot 10MHz \cdot \Delta T} = \frac{6,1V + 2,6V}{10V \cdot 10MHz \cdot 3600s} = 2,4 \cdot 10^{-11}$$

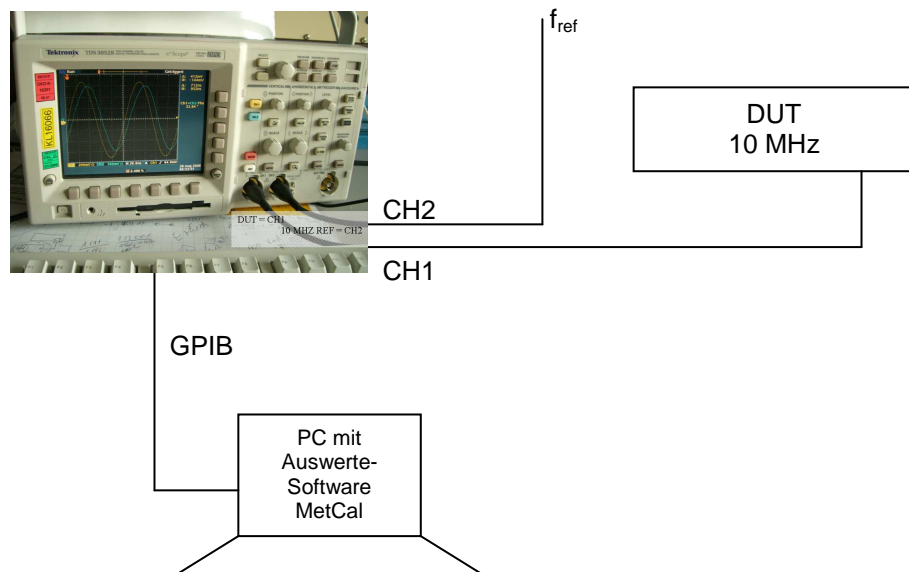
relative Frequenzabweichung $\Delta f_{rel} = +2,4 \cdot 10^{-11}$

mittlerer Frequenzausgang des Messobjektes:

$$f_{DUT} = 10MHz + (10MHz \cdot \Delta f_{rel}) = 10MHz + (10MHz \cdot 2,4 \cdot 10^{-11}) = 10,00000000024MHz$$

Phasendifferenzzeitmessung am Oszilloskop

Alternativ kann an einem Oszilloskop über die kontinuierliche Aufzeichnung und Ermittlung der Phasendifferenz zwischen Test- und Referenzsignal die relative Frequenzabweichung ermittelt werden:



Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: KR am: 13.03.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 13.03.2009	Kapitel VIII - Messgröße Frequenz	Seite 2 von 16
---------------------------	--	--	---	--------------------------

VIII.1.2 Frequenzzähler

Frequenzzähler werden am Signalgenerator Marconi 2031, Rohde & Schwarz SMP04 und/oder Wavetek 395 kalibriert (Bild VIII.2). Die Generatoren können durch PLL-gesteuerte Synthesizer Frequenzen im Bereich von 1 MHz bis 40 GHz aus der auf DCF-77 rückgeführten Referenzfrequenz Frequenzen erzeugen.

Für die Bestimmung der Messunsicherheit muss der Einfluss von Triggerfehlern bestimmt werden. Dabei erfolgt entweder eine Abschätzung anhand der Gerätespezifikationen oder die Ergebnisse mehrerer Messungen werden durch statistische Methoden analysiert.

Die Frequenz der internen Zeitbasis wird mit dem Universalzähler PM6680B vermessen, wenn sie extern am Kalibriergegenstand verfügbar ist.

Die Einstellungen des Kalibriergegenstandes (z.B. Filter, Kopplungsart, Triggerpegel usw.) werden im Kalibrierschein vermerkt, sie richten sich nach den Vorschriften des Herstellers, Abweichungen können auf Wunsch des Kunden erfolgen.

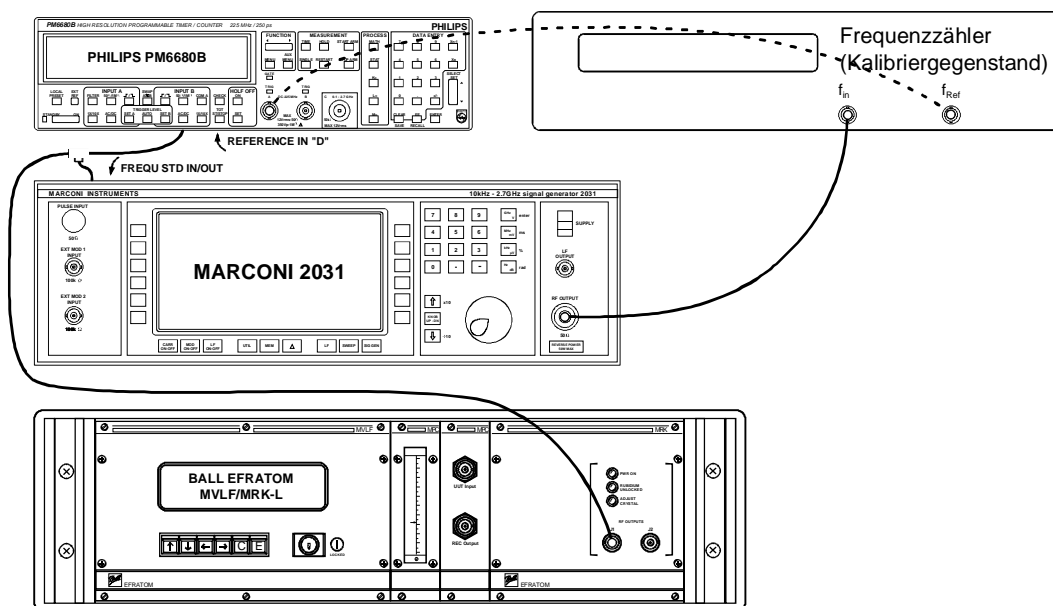


Bild VIII.2 Kalibrierung von Frequenzzählern

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: KR am: 13.03.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 13.03.2009	Kapitel VIII - Messgröße Frequenz	Seite 3 von 16
---------------------------	--	--	---	--------------------------

VIII.2 Messunsicherheit

VIII.2.1 Erzeugung von Frequenzen im Bereich 0,1 Hz bis 40 GHz

Grundlage: Ball EFRATOM, PTB Bulletin, Phasenschrieb des Normals

Das Frequenznormal besteht aus einem hochstabilen Rubidiumoszillator, der nach den Spezifikationen des Herstellers eine Drift von weniger als $4 \cdot 10^{-11}$ pro Monat erreicht. Die Kurzzeitstabilität liegt für eine Messdauer von 100 s bei $3 \cdot 10^{-12}$.

Um den absoluten Wert der Referenzfrequenz bei 10 MHz zu halten wird durch einen Empfänger vom Typ Ball Efratom MVLf die Phasenlage zwischen der empfangenen Trägerfrequenz von DCF-77 und dem lokalen Oszillator ausgewertet. Der Empfänger gibt eine zur Phasendifferenz proportionale Spannung aus, die durch einen Schreiber aufgezeichnet werden kann. Zusätzlich werden die daraus bestimmten stündlichen Mittelwerte gespeichert und täglich von einem PC ausgelesen. Aus den rund 700 Stundenmittelwerten eines Monats wird dann am PC ein Diagramm erstellt und zusammen mit dem PTB Bulletin archiviert. Die ermittelten Werte bleiben in der EDV gespeichert und können so bei Bedarf näher analysiert werden. Das Diagramm zeigt die Phasenwinkeldifferenz bei 77,5 kHz über einen ganzen Monat (lineare Interpolation zwischen den Messwerten).

Zur Regelung der Oszillatorfrequenz bildet der Empfänger einen ausreichend langen Mittelwert (laut Efratom GmbH einen Dreitagesmittelwert), um die Ausbreitungsschwankungen des DCF-77 Signals zu eliminieren. Somit wird der Absolutwert der Referenzfrequenz ausreichend stark an DCF-77 gekoppelt, die Ausbreitungsschwankungen werden jedoch durch die Kurzzeitstabilität des Rubidiumoszillators eliminiert. Täglich um 0:00 Uhr wird dann die Regelspannung so korrigiert, dass die Phasenabweichung des Oszillators minimiert wird. Die Regelspannung wird von einem im Empfänger integrierten Mikroprozessor berechnet und über einen 14 Bit DAC zum Oszillator geleitet.

Um den Anschluss an die Normalfrequenz von DCF-77 nachzuweisen wurde über einen Zeitraum von 9 Tagen die Phasendifferenz zwischen Rubidiumoszillator und empfangener Referenzfrequenz aufgezeichnet. Die täglichen Korrekturen können ohne Umbau am Gerät nicht aufgezeichnet werden, da die Regelspannung nur im Gerät vorhanden ist. Der Empfänger gibt jedoch den Wert der Regelspannung (0 V - 5 V) auf dem Display aus. Der Regelbereich liegt bei $\pm 2 \cdot 10^{-9}$, damit ergibt sich für die Regeländerungen eine Empfindlichkeit von $8 \cdot 10^{-10}/1$ V.

Die beobachteten Änderungen lagen im Durchschnitt bei ca. 0,45 mV pro Tag, damit ergibt sich eine tägliche Frequenzkorrektur $< 4 \cdot 10^{-13}$. Über den beobachteten Zeitraum von 9 Tagen änderte sich die Regelspannung um 4 mV, dies entspricht einer Korrektur von $< 3,5 \cdot 10^{-12}$. Der Empfänger speichert den Wert der täglichen Korrektur in einer Logdatei, jedoch beträgt die Auflösung dabei nur $1 \cdot 10^{-12}$, so daß Änderungen Oszillatorfrequenz $< 5 \cdot 10^{-13}$ nicht in der Logdatei erkennbar sind.

Aus der Aufzeichnung der Phasenzeitdifferenz zwischen dem empfangenen DCF-77-Träger und dem Rb-Oszillator wurde folgende Messreihe entnommen:

Datum	Phasenzeitdifferenz	Abweichung (24 h-Mittel)
12.9.97	5,06 μ s	---
13.9.97	5,00 μ s	$-6,9 \cdot 10^{-13}$
14.9.97	5,10 μ s	$1,2 \cdot 10^{-12}$
15.9.97	4,95 μ s	$-1,7 \cdot 10^{-12}$
16.9.97	5,06 μ s	$1,3 \cdot 10^{-12}$
17.9.97	4,94 μ s	$-1,4 \cdot 10^{-12}$
18.9.97	5,06 μ s	$1,4 \cdot 10^{-12}$

Zur Erzeugung anderer Frequenzen bis 2,7 GHz wird ein Signalgenerator MARCONI 2031 benutzt. Er leitet aus der externen Referenzfrequenz des Rubidiumstandards durch PLL-Synthese eine sinusförmige Spannung im Frequenzbereich von 10 kHz bis 2,7 GHz ab. Die korrekte Funktion wird

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	4 von 16

durch Kurzschlussmessungen mit dem Universalzähler Philips PM6680B überprüft, wobei dieser ebenfalls das 10 MHz-Signal des Rubidiumstandards als externe Referenz verwendet.

Für den Frequenzbereich 10 MHz bis 40 GHz stehen ein Signalgenerator Rohde & Schwarz SMP 04 (extern mit dem Rubidiumstandard synchronisiert) sowie ein Mikrowellenzähler HP 5361B (ebenfalls mit externer Referenz) zur Verfügung. Durch die PLL-Synthese wird die erzeugte Frequenz rückgeführt auf die 10 MHz-Normalfrequenz, die Messunsicherheit wird durch Kurzschlussmessung mit dem Zähler überprüft.

Laut Marconi ergibt sich durch die PLL-Kopplung beim 2031 keine höhere Unsicherheit für die erzeugte Frequenz, Messungen mit dem Zähler konnten dies jedoch nicht vollständig bestätigen. Die statistische Auswertung der gemessenen Frequenzen zeigte, dass bei Frequenzen unterhalb von 1 MHz bei Messzeiten bis 100 s durchaus erhöhte Messunsicherheiten auftreten. Aufgrund der vom Zähler berechneten Standardabweichungen werden folgende Messunsicherheiten erreicht:

Referenzfrequenz:

Wert	Normal	U_{Gesamt}
10 MHz	Ball EFRATOM MFS bestehend aus MRK-L, MVLF, MBF und MPC-10	$5 \cdot 10^{-11}$

abgeleitete Frequenzen:

Bereich	Normal	U_{Gesamt}
0,1 Hz bis 40 MHz	Wavetek 395	$2 \cdot 10^{-9} \cdot f$
10 kHz bis 1 MHz	Marconi 2031	$2 \cdot 10^{-9} \cdot f$
1 MHz bis 2,7 GHz		$1 \cdot 10^{-10} \cdot f$
10 MHz bis 40 GHz	Rohde & Schwarz SMP 04	1 Hz

VIII.2.2 Frequenzmessung durch Phasenzeitdifferenzmessung

Grundlage: Ball EFRATOM, PTB Bulletin, Phasenschrieb des Normals

Die Messung der Frequenzen 1 MHz, 2 MHz, 3 MHz, 4 MHz, 5 MHz, 6 MHz, 7 MHz, 8 MHz, 9 MHz und 10 MHz kann mit dem Phasenkomparator MPC-10 durch eine Phasenzeitdifferenzmessung erfolgen.

Dabei entstehenden drei Anteile für die Messunsicherheit. Der wesentliche Faktor ist die Unsicherheit der Referenzfrequenz des Rubidiumoszillators (u_{Ref}). Es sind weitere Unsicherheiten für die Bestimmung der Messzeit (u_T) sowie für die Ablesung der Phasenzeitdifferenz (u_ϕ) zu beachten, die abgeschätzt und experimentell überprüft werden.

Die mittlere relative Frequenzabweichung der zu messenden Frequenz berechnet sich gemäß der Formel

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta T}{t} \quad \text{mit den Größen } \Delta T \text{ (Phasenzeitdifferenz) und } t \text{ (Messzeit).}$$

In der Praxis bedeutet dies, dass die Anzeige der Phasenzeit am MPC-10 notiert wird und nach Ablauf der Messzeit t erneut abgelesen wird. Die Differenz der beiden Phasenzeiten ergibt die Phasenzeitdifferenz ΔT . Daraus kann gemäß obenstehender Formel dann die mittlere relative Frequenzabweichung für die Messzeit t berechnet werden.

Die Ablesung der Phasenzeit erfolgt im Bereich von -50 ns bis +50 ns auf einem Drehspulinstrument, dessen Skala Teilstriche im Abstand von 2 ns enthält. Der Abstand zwischen den Teilstrichen beträgt ca. 1 mm, so dass beim Ablesen der Phasenzeit eine Unsicherheit von weniger als 1 ns (1/2 Skalenteil) ohne Schwierigkeiten erreicht wird. Die Unsicherheit des Instruments wird jedoch mit 5%

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	5 von 16

vom Skalendendwert (2,5 ns) spezifiziert. Damit ergibt sich für Messzeiten von mehr als 3600 s ein Wert von

$$u_{\varphi} = \frac{2,5ns}{3600s} = 6,9 \cdot 10^{-13}$$

Die Messzeit t muss ausreichend groß sein, sie wird am Einfachsten mit einer Stopuhr bestimmt. Im Rahmen der Akkreditierung müssen Messzeiten von mindestens einer Stunde eingehalten werden. Die Bestimmung der Messzeit mit der Stopuhr unterliegt einer Unsicherheit von wenigen Zehntelsekunden, da gleichzeitig aber auch der Wert am Phasenkomparator abgelesen werden muss, wird ein Wert von 2 s für die Unsicherheit bei der Bestimmung der Messzeit abgeschätzt. Die relative Messunsicherheit ergibt sich damit bei Messzeiten von mehr als 3600 s (1 h) zu

$$u_T = \frac{2s}{3600s} = 5,6 \cdot 10^{-4}$$

Diese Unsicherheit der Zeitmessung ergibt einen zusätzlichen Ablesefehler bei der Bestimmung der Phasenzeitdifferenz. Die Phasenzeitdifferenzmessung wird in der Regel nur bei der Kalibrierung von Referenzfrequenzen eingesetzt, deshalb wird hier eine relative Frequenzunsicherheit der zu messenden Frequenz von maximal 10^{-9} angenommen. Dies ergibt bei der minimalen Messzeit von 1 h eine Phasenzeitdifferenz von 3,6 μ s. Die Änderung der Phasenzeitdifferenz im Ablesezeitraum von 2 s beträgt unter diesen Voraussetzungen maximal 2 ns. Dies entspricht einer zusätzlichen Unsicherheit von $5,6 \cdot 10^{-13}$. Zusammen mit dem Unsicherheitsanteil bei der Ablesung u_{φ} ergibt sich damit eine Unsicherheit von $1,2 \cdot 10^{-12}$.

Da diese Unsicherheit wesentlich kleiner ist als die Unsicherheit der Referenzfrequenz u_{Ref} ($5 \cdot 10^{-11}$) kann sie vernachlässigt werden.

Zur experimentellen Bestätigung dieser Abschätzungen wurde die Referenzfrequenz des Rubidiumoszillators über den Trennverstärker MBF auf den UUT-Eingang des MPC-10 gegeben. Es wurde eine Phasenzeit von -4 ns angezeigt, die sich auch im Verlauf der Messzeit von einer Stunde nicht erkennbar veränderte. Somit war keine Abweichung zwischen dem Ausgang des Trennverstärkers und der intern verbundenen Referenz des Phasenkomparators nachweisbar.

Es wurden folgende Unsicherheiten für Messzeiten >1 h akkreditiert:

Wert	Normal	U_{Gesamt}
1 MHz bis 10 MHz in Schritten von 1 MHz	Ball EFRATOM MFS bestehend aus MRK-L, MVLF, MBF und MPC-10	$5 \cdot 10^{-11} \cdot f$

VIII.2.3 Frequenzmessung mit Philips PM6680B bis 2,7 GHz

Grundlage: Philips Spezifikationen, Ball EFRATOM, PTB Bulletin, Phasenschrieb des Normals

Zur Messung von Frequenzen wird der Universalzähler Philips PM6680B verwendet. Zur Rückführung der Frequenz wird der Zähler mit der externen Referenzfrequenz des Rubidiumoszillators verwendet.

Im Gegensatz zu vielen einfacheren Zählern verwendet dieses Gerät zur Verringerung des digitalen Messfehlers ein Interpolationsverfahren, wodurch sich auch bei relativ kurzen Messzeiten hohe Auflösungen erzielen lassen. Dieses Verfahren bewirkt einen Quantisierungsfehler, der von Philips mit $250 \text{ ps} \cdot t^{-1}$ spezifiziert wird ($t =$ Messzeit). Dieser Wert wird bei den folgenden Betrachtungen verdoppelt, da er eine sehr optimistische Abschätzung darstellt.

Das Rauschen der Eingangsstufen wird mit einem RMS-Wert von 200 μ V angegeben, dadurch ergibt sich mit dem Rauschen des Messsignals eine zusätzliche Unsicherheit bei der Triggerung. Da der Zähler bedingt durch die reziproke Zählung auf den Start- und auf den Stoppunkt triggern muss ist

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	6 von 16

diese Unsicherheit pro Messung zweimal anzusetzen. Durch das Rauschen in den Eingangsstufen am Triggerpunkt und die Hysterese ergibt sich damit für die Triggerunsicherheit u_{Trig} folgende Formel:

$$u_{Trig} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(200\mu V)^2 + U_{Rauschen}^2}}{\text{Flankensteilheit}}$$

Die Rauschspannung kann evtl. aus dem Signal-Rauschverhältnis S/N (angegeben in dB) abgeschätzt werden:

$$S / N = 20dB \cdot \log \frac{U_{Rauschen}}{U_{Signal}} \Rightarrow U_{Rauschen} = U_{Signal} \cdot 10^{\frac{S/N}{20dB}}$$

Die Flankensteilheit in V/s ist abhängig von der Signalform und der Signalamplitude. Bei sinusförmigen Signalen gelten folgende Überlegungen:

Die höchste Flankensteilheit eines Sinussignals wird im Bereich von $-\pi/8 \dots +\pi/8$ erreicht. Für die Spitzenspannung \hat{U} ergibt sich eine Spannungsänderung

$$\Delta U = \hat{U} \cdot (\sin \pi/8 - \sin -\pi/8) = 2 \cdot \hat{U} \cdot \sin \pi/8,$$

$$\Delta t = 2 \cdot T \cdot \frac{\pi/8}{2\pi} = \frac{T}{8} = \frac{1}{8f}$$

für die Zeitdifferenz ergibt sich der Wert

Daraus lässt sich nun die Flankensteilheit berechnen:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = 2 \cdot \hat{U} \cdot \sin \pi/8 \cdot 8 \cdot f \approx 6,12 \cdot \hat{U} \cdot f \approx 8,66 \cdot U_{eff} \cdot f \quad (\text{sinusförmige Signale})$$

Bei der Messung von Rechtecksignalen verwendet man zweckmäßigerweise die Anstiegszeit und den Spitze-Spitze-Wert des Messsignals zur Berechnung der Flankensteilheit:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{U_{PP}}{t_{Rise}} \quad (\text{rechteckförmige Signale})$$

In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Bestimmung der Größe S/N verhältnismäßig aufwendig ist. Die tatsächliche Triggerunsicherheit lässt sich mit den Statistikfunktionen des Zählers sehr viel einfacher bestimmen. Man wählt eine ausreichend große Zahl von Messungen aus und lässt dann den Zähler aus den Messwerten automatisch die Standardabweichung berechnen. Diese kann dann zur Abschätzung der Triggerunsicherheit u_{Trig} verwendet werden.

Mit der akkreditierten Unsicherheit der Referenzfrequenz u_f ($k=2$) berechnet sich die gesamte Messunsicherheit dann bei einer Messzeit t nach folgender Formel:

$$u_{Gesamt} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u_f}{2}\right)^2 + \frac{(500ps)^2 + u_{Trig}^2}{t^2}}$$

Rechenbeispiel:

Es wird ein sinusförmiges Signal mit folgenden Parametern gemessen:
 $f=10$ MHz; $S/N = 40$ dB; $U_{eff} = 0,5$ V; $t=10$ s

Ausgabe:	erstellt	geprüft/ genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	7 von 16

$$U_{Rauschen} = U_{Signal} \cdot 10^{\frac{S/N}{20dB}} = 0,5V \cdot 10^{\frac{40dB}{20dB}} = 5mV$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = 8,66 \cdot U_{eff} \cdot f = 8,66 \cdot 0,5V \cdot 10^7 s^{-1} = 43,3 \cdot 10^6 v/s$$

aus diesen Werten ergibt sich:

$$u_{Trig} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(200\mu V)^2 + U_{Rauschen}^2}}{Flankensteilheit} = 2 \cdot \frac{\sqrt{(200\mu V)^2 + (5mV)^2}}{43,3 \cdot 10^6 v/s} = 2,3 \cdot 10^{-10} s$$

$$u_{Gesamt} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u_f}{2}\right)^2 + \frac{(500ps)^2 + u_{Trig}^2}{t^2}} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{5 \cdot 10^{-11}}{2}\right)^2 + \frac{(500ps)^2 + (2,3 \cdot 10^{-10} s)^2}{100s^2}} = 5,1 \cdot 10^{-11}$$

Auf der Basis dieser Abschätzung wird eine Messunsicherheit von $1 \cdot 10^{-10}$ erreicht.

Bereich	Normal	u_{Gesamt}
0,1 Hz - 2,7 GHz	Philips PM6680B	$1 \cdot 10^{-10} \cdot f + u_{Tf}$

Zum Nachweis der einwandfreien Funktion von Zähler und Signalgenerator wurde eine Messreihe erstellt, die die Einhaltung der akkreditierten Messunsicherheiten experimentell bestätigt. Die Werte der Messreihe sind auf der folgenden Seite zusammengestellt.

VIII.2.4 Frequenzmessung mit HP 5361B bis 40 GHz

Grundlage: HP-Spezifikationen, Ball EFRATOM, PTB Bulletin, Phasenschrieb des Normals

Zur Messung von Frequenzen über 10 MHz kann der Mikrowellenzähler HP 5361B verwendet werden. Zur Rückführung der Frequenz wird der Zähler mit der externen Referenzfrequenz des Rubidiumoszillators verwendet.

Für Frequenzen unter 500 MHz wird ein direktes Zählverfahren, je nach Frequenz evtl. mit einem eingeschalteten Vorteiler, verwendet. Bei Frequenzen ab 500 MHz wird das Eingangssignal über einen eingebauten Mischer umgesetzt und die Zwischenfrequenz direkt gemessen. Die Einstellung des Mixers erfolgt vollautomatisch oder manuell.

Das Rauschen der Eingangsstufen ist nicht spezifiziert, so dass die Messunsicherheit durch eine Messreihe abgeschätzt wird. Die tatsächliche Triggerunsicherheit lässt sich mit etwas Statistik einfach bestimmen. Man wählt eine ausreichend große Zahl von Messungen aus und berechnet daraus die Standardabweichung. Diese kann dann zur Abschätzung der Triggerunsicherheit u_{Trig} verwendet werden.

Um die Triggerunsicherheit abzuschätzen wurde eine Messreihe aufgenommen, bei der mit dem Signalgenerator SMP 04 ein Signal von 0 dBm abgegeben wurde. Die gemessenen Frequenzen lagen im Bereich von 500 MHz bis 40 GHz. Es zeigte sich, dass die Schwankungen der Anzeige des Zählers lediglich bei einem Digit der letzten Stelle lagen. Da die Auflösung des Zählers auf 1 Hz beschränkt ist, liegt die kleinstmögliche Messunsicherheit bei 1 Hz.

Bereich	Normal	u_{Gesamt}
500 MHz - 40 GHz	HP 5361B	$1 \text{ Hz} + u_{Tf}$

Verifikation zur Bestätigung der Messunsicherheiten vom 09.02.2008
Gegenseitige Kontrollmessung

- DCF77 Rubidiumnormal Ball Efratom MFS mit MRK-L, MVLF, MPC-10 und MBF, PM-Nr.: DL22004
- gegen
- GPS disziplinierter 10 MHz-Empfänger Datum 9390-52054, DL22026

Frequenzabweichung in Phasendifferenzmethode (6h Messdauer): $2,4 \cdot 10^{-12}$

Messreihe zur Bestätigung der Messunsicherheiten vom 19.06.97

Primärnormal: Ball Efratom MFS mit MRK-L, MVLF, MPC-10 und MBF SN: 2877 PM-Nr.: DL22004

Synthesizer: Marconi 2031 SN: 119300020 PM-Nr.: KL17002

Zähler: Philips PM6680B SN: SM622328 PM-Nr.: KL15007

Die Messungen erfolgten bei einem eingestellten Pegel von 0 dBm, der Zählereingang A wurde DC-gekoppelt mit einer Impedanz von 50 Ω und einem Triggerpegel von 0 V, Triggerung auf positive Flanke, betrieben. Frequenzen größer als 200 MHz wurden am Eingang C gemessen. Die Meßzeit wurde auf 30 s gesetzt. Es wurden für jede angegebene Frequenz rechnergesteuert 25 Messungen ausgeführt und aufgezeichnet. Synthesizer und Zähler wurden erst nach einer Aufwärmzeit von mehr als 30 Minuten benutzt, das Rb-Normal ist dauernd eingeschaltet. Die Auswertung erfolgte mit Microsoft Excel.

Frequenz (Synth.)	min. Zähleranzeige	max. Zähleranzeige	rel. Unsicherheit
10,0 kHz	9,9999999859 kHz	10,0000000137 kHz	$< 1,4 \times 10^{-9}$
50,0 kHz	49,9999999850 kHz	50,0000000130 kHz	$< 3,0 \times 10^{-10}$
100,0 kHz	99,9999999920 kHz	100,0000000170 kHz	$< 1,7 \times 10^{-10}$
500,0 kHz	499,9999999700 kHz	500,0000000200 kHz	$< 6,0 \times 10^{-11}$
1,0 MHz	999,9999999700 kHz	1,0000000000 MHz	$< 3,0 \times 10^{-11}$
5,0 MHz	4,9999999997 MHz	5,0000000000 MHz	$< 6,0 \times 10^{-11}$
10,0 MHz	9,9999999996 MHz	10,0000000001 MHz	$< 4,0 \times 10^{-11}$
50,0 MHz	50,0000000000 MHz	50,0000000000 MHz	$< 2,0 \times 10^{-12}$
100,0 MHz	99,9999999990 MHz	100,0000000000 MHz	$< 1,0 \times 10^{-11}$
200,0 MHz	199,9999999960 MHz	200,0000000010 MHz	$< 2,0 \times 10^{-11}$
300,0 MHz	299,9999999940 MHz	300,0000000040 MHz	$< 2,0 \times 10^{-11}$
400,0 MHz	400,0000000000 MHz	400,0000000000 MHz	$< 2,5 \times 10^{-13}$
500,0 MHz	499,9999999900 MHz	500,0000000100 MHz	$< 2,0 \times 10^{-11}$
600,0 MHz	600,0000000000 MHz	600,0000000100 MHz	$< 1,7 \times 10^{-11}$
700,0 MHz	699,9999999900 MHz	700,0000000100 MHz	$< 1,4 \times 10^{-11}$
800,0 MHz	799,9999999900 MHz	800,0000000000 MHz	$< 1,3 \times 10^{-11}$
900,0 MHz	899,9999999900 MHz	900,0000000100 MHz	$< 1,1 \times 10^{-11}$
1,0 GHz	999,9999999900 MHz	1,0000000000 GHz	$< 1,0 \times 10^{-11}$
1,5 GHz	1,5000000000 GHz	1,5000000000 GHz	$< 6,7 \times 10^{-12}$
2,0 GHz	1,9999999999 GHz	2,0000000000 GHz	$< 5,0 \times 10^{-11}$
2,5 GHz	2,4999999999 GHz	2,5000000000 GHz	$< 4,0 \times 10^{-11}$
2,7 GHz	2,6999999999 GHz	2,7000000000 GHz	$< 3,7 \times 10^{-11}$

Zusätzlich zur Messreihe mit dem Synthesizer wurde auch der Referenzgang des Rb-Standards vermessen. Die Zählereinstellungen waren identisch mit denen der oben aufgeführten Messreihe.

Frequenz (Rb-Std.)	min. Zähleranzeige	max. Zähleranzeige	rel. Unsicherheit
10,0 MHz	9,9999999999 MHz	10,0000000000 MHz	$< 1,0 \times 10^{-11}$

Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	9 von 16

Messreihe zur Bestätigung der Messunsicherheiten vom 18.09.98

Primärnormal: Ball Efratom MFS mit MRK-L, MVLF, MPC-10 und MBF SN: 2877 PM-Nr.: DL22004
Synthesizer: Rohde & Schwarz SMP 04 SN: 828863/011 PM-Nr.: KL17043
Zähler: HP 5361B SN: 3023A00346 PM-Nr.: KL15010

Die Messungen erfolgten bei einem eingestellten Pegel von 0 dBm am Zählereingang 2. Die Auflösung des Zählers wurde mit der Funktion Resolution auf 1 Hz gesetzt. Es wurden für jede angegebene Frequenz rechnergesteuert 50 Messungen ausgeführt und aufgezeichnet. Synthesizer und Zähler wurden erst nach einer Aufwärmzeit von mehr als 30 Minuten benutzt, das Rb-Normal ist dauernd eingeschaltet. Die Auswertung erfolgte mit Microsoft Excel.

Frequenz (Synth.)	min. Zähleranzeige	max. Zähleranzeige	rel. Unsicherheit
500 MHz	500,000000 MHz	500,000000 MHz	$< 2,00 \cdot 10^{-9}$
600 MHz	600,000000 MHz	600,000000 MHz	$< 1,67 \cdot 10^{-9}$
700 MHz	700,000000 MHz	700,000000 MHz	$< 1,43 \cdot 10^{-9}$
800 MHz	799,999999 MHz	800,000000 MHz	$< 1,25 \cdot 10^{-9}$
900 MHz	899,999999 MHz	900,000000 MHz	$< 1,12 \cdot 10^{-9}$
1000 MHz	1,000000000 GHz	1,000000000 GHz	$< 1,00 \cdot 10^{-9}$
1500 MHz	1,500000000 GHz	1,500000000 GHz	$< 6,67 \cdot 10^{-10}$
2000 MHz	2,000000000 GHz	2,000000000 GHz	$< 5,00 \cdot 10^{-10}$
2500 MHz	2,499999999 GHz	2,500000001 GHz	$< 4,00 \cdot 10^{-10}$
3000 MHz	2,999999999 GHz	3,000000000 GHz	$< 3,34 \cdot 10^{-10}$
3500 MHz	3,500000000 GHz	3,500000000 GHz	$< 2,86 \cdot 10^{-10}$
4000 MHz	3,999999999 GHz	4,000000001 GHz	$< 2,50 \cdot 10^{-10}$
4500 MHz	4,499999999 GHz	4,500000001 GHz	$< 2,23 \cdot 10^{-10}$
5000 MHz	4,999999999 GHz	5,000000001 GHz	$< 2,00 \cdot 10^{-10}$
5500 MHz	5,499999999 GHz	5,500000001 GHz	$< 1,82 \cdot 10^{-10}$
6000 MHz	6,000000000 GHz	6,000000000 GHz	$< 1,67 \cdot 10^{-10}$
6500 MHz	6,500000000 GHz	6,500000000 GHz	$< 1,54 \cdot 10^{-10}$
7000 MHz	7,000000000 GHz	7,000000000 GHz	$< 1,43 \cdot 10^{-10}$
7500 MHz	7,500000000 GHz	7,500000000 GHz	$< 1,34 \cdot 10^{-10}$
8000 MHz	7,999999999 GHz	8,000000001 GHz	$< 1,25 \cdot 10^{-10}$
8500 MHz	8,500000000 GHz	8,500000001 GHz	$< 1,18 \cdot 10^{-10}$
9000 MHz	8,999999999 GHz	9,000000000 GHz	$< 1,12 \cdot 10^{-10}$
9500 MHz	9,500000000 GHz	9,500000000 GHz	$< 1,06 \cdot 10^{-10}$
10000 MHz	9,999999999 GHz	10,000000001 GHz	$< 1,00 \cdot 10^{-10}$
15000 MHz	14,999999999 GHz	15,000000000 GHz	$< 0,67 \cdot 10^{-10}$
20000 MHz	20,000000000 GHz	20,000000000 GHz	$< 0,50 \cdot 10^{-10}$
25000 MHz	24,999999999 GHz	25,000000001 GHz	$< 0,40 \cdot 10^{-10}$
30000 MHz	29,999999999 GHz	30,000000001 GHz	$< 0,34 \cdot 10^{-10}$
35000 MHz	34,999999999 GHz	35,000000001 GHz	$< 0,29 \cdot 10^{-10}$
40000 MHz	39,999999999 GHz	40,000000001 GHz	$< 0,25 \cdot 10^{-10}$

VIII.3 Kalibrierung von Drehzahl

Die Messgröße Drehzahl kann direkt auf die stabilisierte Frequenzmessung rückgeführt werden.

VIII.3.1 Kalibrierung von Stroboskopen

Zur Kalibrierung von Stroboskopen steht ein Fototransistor TFK BPW 14A 622 in open-collector Schaltung zur Verfügung, dessen Ausgangssignal direkt auf einen der elektronischen Zähler gekoppelt werden kann. Im üblichen Arbeitsbereich von 1 U/min bis 100000 U/min (ca. 0,02 s⁻¹ bis 1700 s⁻¹) garantiert der Empfänger verlässliche Ergebnisse.

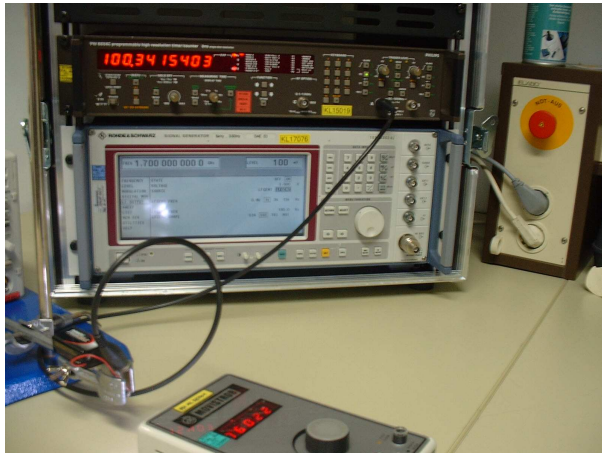


Bild VIII.3.1a Stroboskop über Fototransistor am Zähler

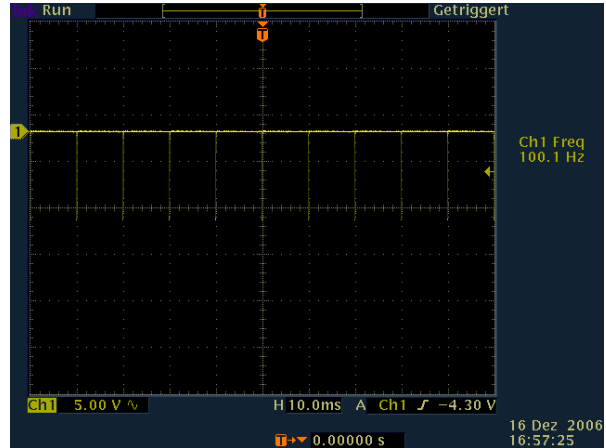


Bild VIII.3.1b Ausgangssignal am Oszilloskop

Die Modellgleichung dieses Messverfahrens formuliert sich als

$$f_{\text{Stroboskop}} = f_{\text{Zähler}} + \delta f_{Uf} + \delta f_{\text{Stab}} + \delta f_{\text{System}} + \delta f_{\text{Res}}$$

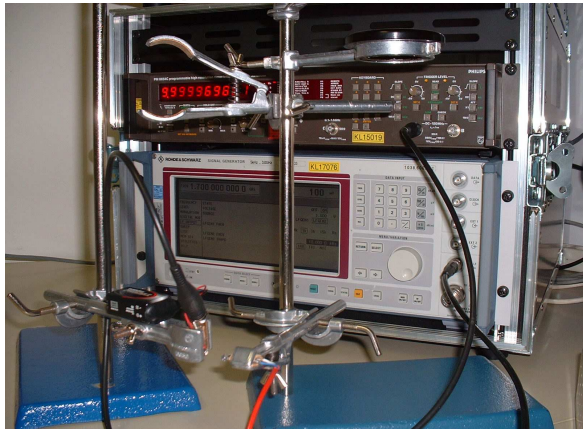
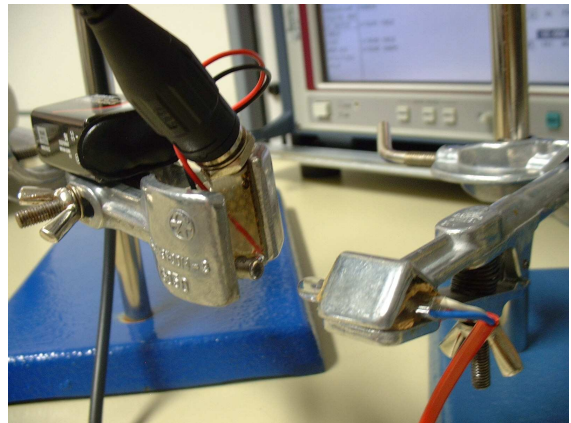


Bild VIII.3.2 Systemverifikation am Zähler über Sendediode als Lichtimpulsgeber



δf_{Res} Rundungsabweichung durch die letzte dokumentierte Stelle des Ergebnisses (max. ± 1 Digit)

Messunsicherheitsbudget:

Für die dem Ergebnis beizulegende Standardmessunsicherheit ergibt sich mit allen Sensitivitätskoeffizienten $|c_i|=1$ daraus:

$$u_{f, \text{Strobo}}^2 = u_f^2 + u_{\text{Stab}}^2 + u_{\text{System}}^2 + u_{\text{Res}}^2$$

Mit den oben aufgeführten Größen ergibt sich gemäß DKD-3:2002 Abschnitt 4 aus der Modellgleichung für die dem Ergebnis ΔY beizulegende erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) die **relative erweiterte Messunsicherheit (k=2)**:

$$W_{\text{rel}}(f_{\text{Strobo}}) = 2 \frac{u_{f, \text{Strobo}}}{f_{\text{Strobo}}}$$

eingesetzt ergibt sich im Idealfall, z.B. 1 Hz:

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: KR am: 13.03.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 13.03.2009	Kapitel VIII - Messgröße Frequenz	Seite 11 von 16
---------------------------	--	--	---	---------------------------

$$W_{rel}(f_{Strobo}) = 2 \frac{1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}}{1 \text{ Hz}} = 3,7 \cdot 10^{-6}$$

VIII.3.2 Kalibrierung von Drehzahlmessgeräten

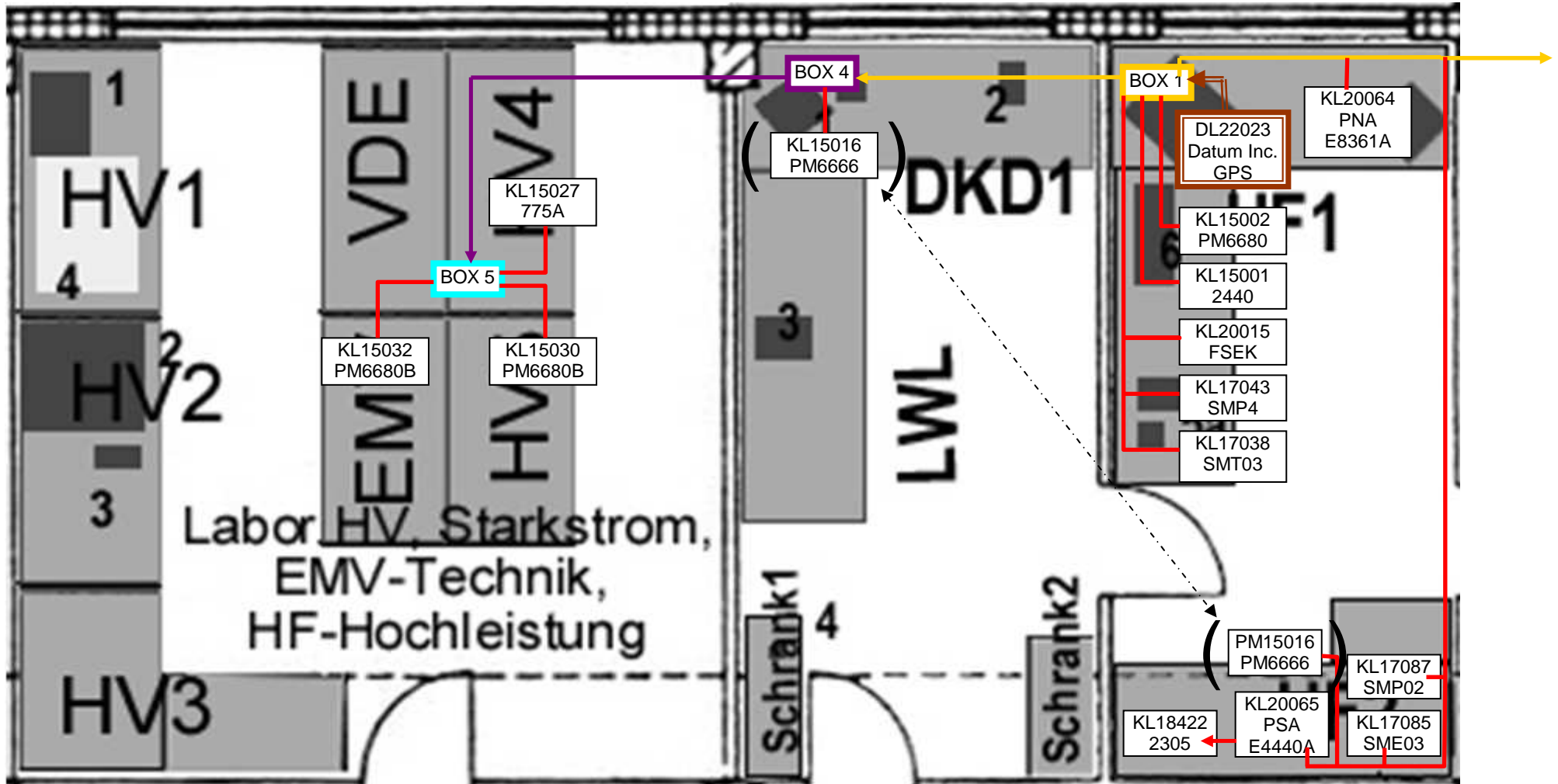
Sofern der optische Aufnehmer von Drehzahlmessgeräten empfindlich genug ist, dass der in XXIII.1 genannte Lichtimpulsgeber Einsatz finden kann ist mit keinen weiteren Einflüssen zu rechnen. Muss das eigene Stroboskop verwendet werden so ergibt sich bei gleichzeitiger Aufnahme der Lichtblitze über den Fototransistor am Zähler eine durch die Instabilität des Stroboskops erhöhte Unsicherheit von etwa

$$U_{f,Drehzahl}^2 = U_f^2 + 2 \left(\frac{0,03 \text{ s}^{-1}}{\sqrt{3}} \right)^2 = 0,035 \text{ s}^{-1}$$

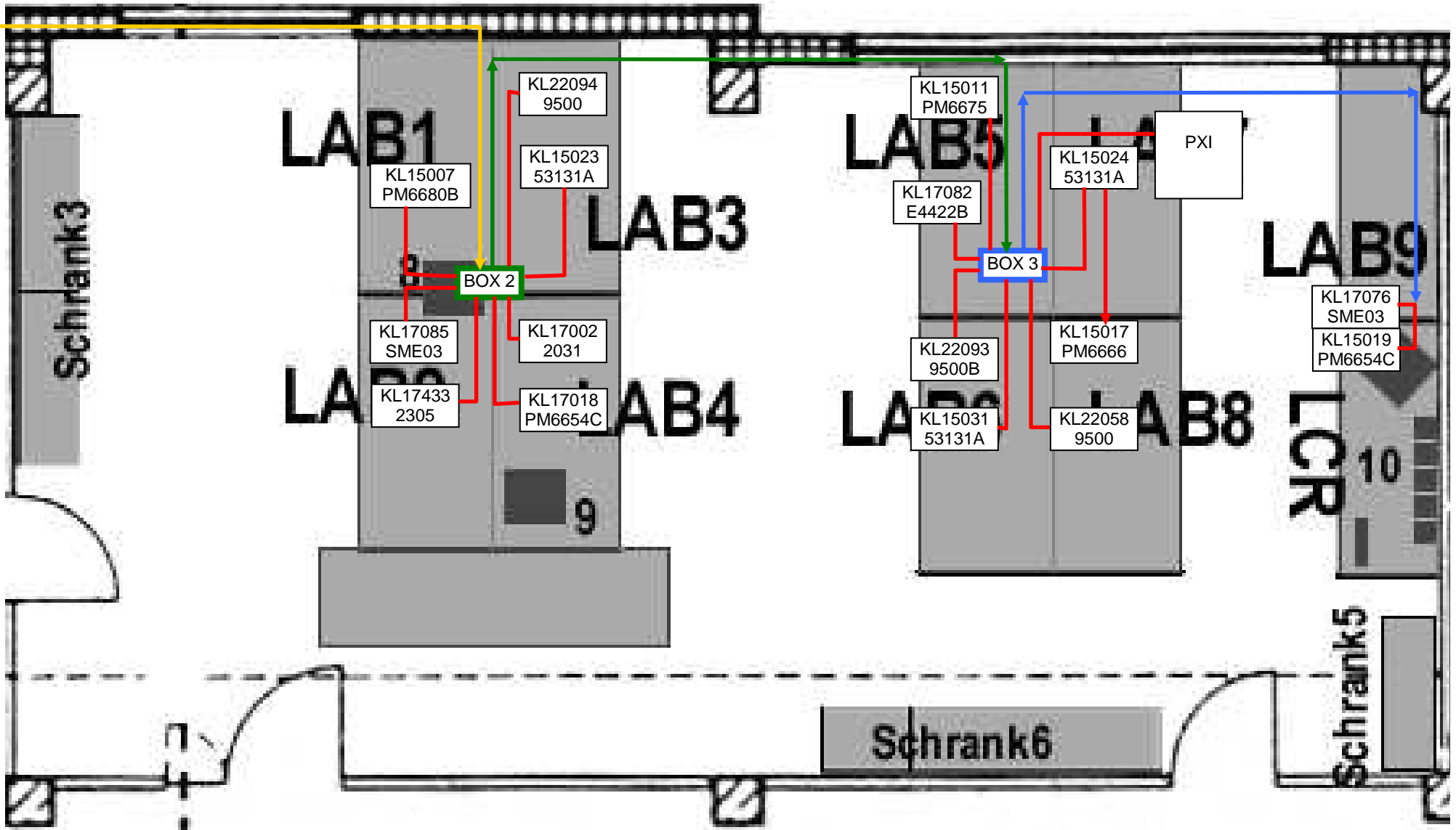
Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: KR am: 13.03.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 13.03.2009	Kapitel VIII - Messgröße Frequenz	Seite 12 von 16
---------------------------	--	--	---	---------------------------

VIII.4 Verteilung der Referenzfrequenz im Kalibrierlabor Eichenau

VIII.4.1 Laborplan



Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	13 von 16



Ausgabe:	erstellt	geprüft/genehmigt	Kapitel	Seite
5.5.11	von: KR am: 13.03.2009	von: PF am: 13.03.2009	VIII - Messgröße Frequenz	14 von 16

VIII.4.2 Spezifikationen und Messwerte der an die Referenzfrequenz angeschlossenen Prüfmittel

Beschreibung	Hersteller	Modell	Spec.-Eingang	Eingangsimpedanz-Spec.	Spec.-Ausgang	PM-Nr.	Standort	Eingang gemessen mit TDS3052 KL16053, parallel in 1M Ω m		
								RMS	Amplitude pp	
Counter	Philips	PM6680	0,5Vrms-10Vrms	1k Ω m, wenn < 1Vrms; 500 Ω m, wenn > 1Vrms	>0,5Vrms in 50 Ω m	KL15002	HF1	1,7Vrms	4,8V	
							KL15030	Dräger	1,0Vrms	2,8V
							KL15032	Dräger	1,0Vrms	2,9V
							KL15007	Lab1	1,7Vrms	4,9V
	Philips	PM6666	>0,5Vrms	300 Ω m	n.a.	KL15016	DKD1 / HF2	0,9Vrms / 0,8Vrms	2,6V / 2,2V	
							KL15017	Lab8	1,3Vrms	3,8V
							KL15018	Lab4	1,6Vrms	4,7V
	Philips	PM6654C	n.a.	n.a.	n.a.	KL15019	Mobil/Lab9	0,7Vrms	1,8V	
							KL15011	Lab5	0,9Vrms	2,4V
	Philips	PM6675	0,5Vrms	2k Ω m	n.a.	KL15027	Dräger	0,8Vrms	2,5V	
							KL15023	Lab3	1,7Vrms	4,9V
	Philips	Keithley	755A	n.a.	n.a.	2V in 100 Ω m	KL17089	Lab6	0,8Vrms	2,1V
KL15024								Lab7	0,8Vrms	2,1V
KL15001								HF1	1,0Vrms	2,8V
Philips	HP	53131A	0,2-10Vrms	1k Ω m	1Vpp in 50 Ω m	KL17002	Lab3	1,1Vrms	1,9V	
							KL17038	HF1	1,1Vrms	3,0V
							KL17037	Lab2	1,6Vrms	4,6V
Philips	Marconi	2440	150mVrms-3Vrms	100 k Ω m	n.a.	KL17087	HF2	0,7Vrms	2,0V	
							KL17043	HF1	0,9Vrms	2,5V
Scope Kalibrator	Fluke/Wavetek	9500/9500B	90mV-1Vpp	n.a.	1Vpp in 50 Ω m	KL17002	Lab3	1,1Vrms	1,9V	
							KL22094	Lab3	0,9Vrms	2,8V
							KL22093	Lab6	0,5Vrms	1,0V
Signalgenerator	Rohde&Schwarz	SME03	0,1Vrms-2Vrms	200 Ω m	1Vrms in 50 Ω m	KL17085	HF2	0,7Vrms	1,9V	
							KL17076	Mobil/Lab9	0,6Vrms	1,3V
							KL17038	HF1	1,1Vrms	3,0V
							KL17037	Lab2	1,6Vrms	4,6V
	Rohde&Schwarz	SMT03	0,1Vrms-2Vrms	200 Ω m	1Vrms in 50 Ω m	KL17087	HF2	0,7Vrms	2,0V	
							KL17043	HF1	0,9Vrms	2,5V
	Rohde&Schwarz	SMP02	0,1Vrms-2Vrms	200 Ω m	1Vrms in 50 Ω m	KL17043	HF1	0,9Vrms	2,5V	
KL17043							HF1	0,9Vrms	2,5V	
Signalgenerator	Marconi	2031	0,22Vrms-1,8Vrms	1k Ω m	2Vpp in 50 Ω m	KL17002	Lab3	1,1Vrms	1,9V	
							KL17082	Lab6	0,6Vrms	0,8V
Signalgenerator	HP	E4422B	>0,15Vrms	50 Ω m	0,35V in 50 Ω m	KL17082	Lab6	0,6Vrms	0,8V	

Funktionsgenerator	Wavetek	395	1Vpp-10Vpp	5kOhm	1,2Vpp in 50Ohm	KL17046	veränderlich	n.a.	n.a.
Modulation Meter	Marconi	2305	0,1Vrms-1Vrms	50Ohm	0,1Vrms	KL18422	HF2	0,6Vrms	1,6V
						KL18433	Lab2	1,4Vrms	4,3V
Spektrum Analyzer	Agilent	E4440A	0,13Vrms-0,71Vrms	50Ohm	0,22V in 50Ohm	KL22065	HF2	0,7Vrms	1,9V
	Rohde&Schwarz	FSEK30	>0,22Vrms	50Ohm	0,71Vrms	KL20015	HF1	0,8Vrms	2,3V
Network Analyzer	Agilent	E8361A	40mVrms-2,24Vrms	200Ohm	>224mVrms in 50Ohm	KL20064	HF1	0,9Vrms	4,8V

		Eingang gemessen mit TDS3052 KL16053, parallel in 1MOhm				
		Ausgang in 50 Ohm		Ausgang in 1MOhm		
BOX	RMS	Amplitude pp	RMS	Amplitude pp	RMS	Amplitude pp
1	2,4Vrms	6,7V	0,8Vrms	2,4V	1,8Vrms	5,1V
2	1,5Vrms	4,4V	0,8Vrms	2,4V	1,9Vrms	5,3V
3	1,3Vrms	3,9V	0,4Vrms	1,1V	0,8Vrms	2,3V
4	1,6Vrms	4,6V	0,5Vrms	1,3V	1,4Vrms	3,9V
5	1,0Vrms	2,8V	0,4Vrms	1,1V	1,2Vrms	3,4V

GPS-Referenznormal Datum Inc. 9390 Spec.:
DL22023 **3Vpp in 50Ohm OUT**

DCF77-Normal Ball Efratom MVLF Spec.:
DL22004 **> 0,4Vrms in 50Ohm OUT**

Stand: 07.01.09 KR

Ausgabe: 5.5.11	erstellt von: KR am: 13.03.2009	geprüft/ genehmigt von: PF am: 13.03.2009	Kapitel VIII - Messgröße Frequenz	Seite 16 von 16
---------------------------	--	--	---	---------------------------