

Bild 1 Bauformen der Spulenschwinger, von links nach rechts: Großer Spulenschwinger, Spulenschwinger M919, Spulenschwinger M07359

Inhalt

	Seite
Teil 1 Spulenschwinger für Lichtstrahl-Oszillographen, Auswahl und Benutzung	3
1. Verwendung	3
2. Ausführung	3
3. Eigenschaften und technische Daten	3
3.1. Erläuterungen zur Tafel 1	
4. Auswahl der Schwinger	5
4.1. Wiedergabetreue	5
4.2. Auswahl nach Eigenfrequenz	5
4.3. Nutzbarer Frequenzbereich	5
4.4. Verzögerungszeit	6
4.5. Wiedergabe von Rechteckimpulsen	6
4.6. Einstellung des Dämpfungsgrades $\alpha = 0,7$	6
5. Messungen mit höchster Genauigkeit	8
6. Adapter	8
7. Störeinflüsse	8
Teil 2 Theorie der Schleifen- und Spulenschwinger	9
1. Einleitung	9
2. Konstruktion und Arbeitsweise	9
2.1. Schleifenschwinger	9
2.2. Spulenschwinger	9
3. Physikalische Zusammenhänge	10
3.1. Schwingungsgleichung	10
3.2. Wiedergabe für Drehspulenschwinger	10
3.3. Amplitudenfrequenzgang	11
3.4. Frequenzgang der Verzögerung	11
4. Meßtechnische Eigenschaften und Aufbau der Schwinger	12
4.1. Dämpfungsarten	12
4.2. Anforderungen an das Dämpfungsmittel	13
4.3. Konstruktive Durchführung der Öldämpfung	13
4.4. Das anomale Dämpfungsverhalten ölgedämpfter Spulenschwinger	13
4.5. Das elastisch viskose Verhalten des Dämpfungöls	13
4.6. Hochfrequente Meßwerke mit normalem Dämpfungsverhalten	14
4.7. Die obere Frequenzgrenze des Schwingers	14
4.8. Verfälschung der Aufzeichnung durch Eigenerwärmung des Spulenschwingers	14
4.9. Elastische, plastische Verformungen	15

Bedienungshinweise zum Universal-Anpassungssteller für elektrodynamisch gedämpfte Spulenschwinger enthält die Betriebsanleitung Ms1 A7201/1d.

Teil 1 Spulenschwinger für Lichtstrahl-Oszillographen, Auswahl und Benutzung

1. Verwendung

Spulenschwinger sind schnell-schwingende Drehspulgalvanometer. Sie werden als Registriermeßwerke in Lichtstrahl-Oszillographen zum Aufzeichnen zeitlich veränderlicher Meßgrößen verwendet. Infolge ihrer hohen Meßempfindlichkeit sind sie noch zum direkten Messen vieler Größen geeignet, die von Schleifenschwingern oder anderen Registriermeßwerken nur unter Verwendung von Verstärkern registriert werden können. Wegen ihrer kleinen, besonders schlank geformten Gehäuse können selbst in kleine Geräte zahlreiche Meßwerke eingebaut werden, so daß Spulenschwinger-Oszillographen auch überall dort zu empfehlen sind, wo viele zusammengehörige Meßvorgänge gleichzeitig registriert werden müssen.

So sind Spulenschwinger-Oszillographen außer in der Elektrotechnik, wo sie zum Aufzeichnen niedriger Spannungen und kleiner Ströme und zum Untersuchen zeitlicher Zusammenhänge der verschiedensten elektrischen Impulse und anderer veränderlicher Vorgänge benötigt werden, besonders vorteilhaft geeignet zum Registrieren mechanischer und geophysikalischer Größen. Da diese zum Messen in elektrische Größen umgewandelt werden müssen, stehen zum Registrieren meist nur sehr kleine Ströme zur Verfügung. Mit Spulenschwingern können alle diese Größen, Druck, Beanspruchung, Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung usw., ohne die aufwendige Verwendung von Verstärkern aufgezeichnet werden.

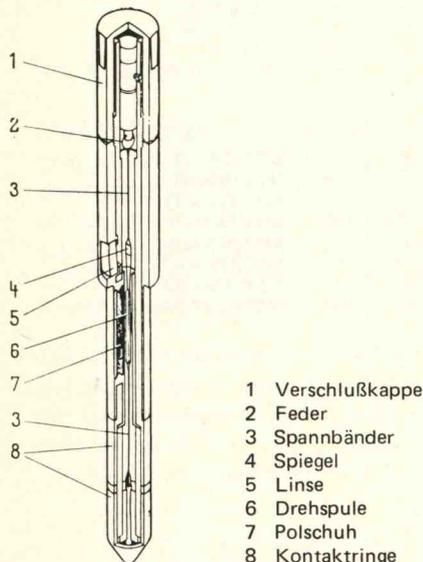


Bild 2 Schnitt durch einen Spulenschwinger

2. Ausführung

Bild 2 zeigt den Schnitt durch einen Spulenschwinger M919. In einem isolierenden Preßstoffrohr von der Größe eines Taschenbleistiftes (größter Außendurchmesser 7 mm, Länge 73,5 mm) ist zwischen Spannbändern eine kleine Drehspule aus dünnstem Draht gelagert. Über ihr ist ein Spiegel befestigt, der den anzeigenden Lichtstrahl reflektiert. Die Verbindung zu den Anschlüssen stellt der untere, zweigeteilte metallene Schaft her. Diese Schwinger werden in einen getrennten Magnetblock eingesteckt, der je

nach Aufgabenstellung mit verschiedenen Einsätzen bestückt werden kann. Um den magnetischen Fluß möglichst vollständig durch den schmalen Luftspalt zu leiten, ist ein schmales Polschuhpaar in das Schwingergehäuse eingelassen.

In dieser Ausführung (vgl. Bild 3 Mitte) werden die Spulenschwinger in den Lichtstrahl-Oszillographen OSCILLOFIL[®], OSCILLOPORT[®] und OSCILLOMAT[®] benutzt. Sie können in Magnetblöcke zur Aufnahme von 6 kleinen Spulenschwingern eingesetzt werden. Für die großen Spulenschwinger C70241-... (vgl. Bild 3 links) sind Galvanometereinschübe zur Aufnahme von jeweils 2 Schwingern vorgesehen. Auf diese Weise können die Oszillographen mit kleinen und großen Spulenschwingern in verschiedenen Kombinationen ausgerüstet werden. An Stelle der großen Spulenschwinger lassen sich auch Schleifenschwinger einsetzen, wodurch die Bestückungsmöglichkeiten der Lichtstrahl-Oszillographen noch erweitert werden. Andererseits kann die hohe Stromempfindlichkeit der Spulenschwinger auch für ältere Oszillographen nutzbar gemacht werden, da die großen Spulenschwinger die gleichen Gehäuseabmessungen wie die Schleifenschwinger haben. Das Magnetsystem der großen Spulenschwinger ist im Gehäuse eingebaut (Bild 5); die Kraftlinien schließen sich über das Gehäuse aus weichem Eisen.

Bild 4 zeigt die verschiedenen Galvanometereinschübe, wie sie bei den 19''-Einschubtechnik ausgebildeten Lichtstrahl-Oszillographen (OSCILLOFIL, OSCILLOPORT und OSCILLOMAT) verwendet werden, rechts im Bild den Magnetblock für die Aufnahme von 6 kleinen Spulenschwingern M919, in der Mitte den Einschub für 2 große Spulenschwinger oder Schleifenschwinger (Prüfspannung 2 kV) und links den hochisolierten Einschub für 2 große Spulen- oder Schleifenschwinger, ausgelegt für 10 kV Prüfspannung.

3. Eigenschaften und technische Daten

Die Tafel 1 gibt die Kenndaten der zur Zeit lieferbaren Spulenschwinger wieder. Die Schwinger mit Eigenfrequenzen bis 350 Hz werden, wie bei Galvanometern üblich, elektrodynamisch gedämpft. Entsprechend den Listenangaben für Galvanometer muß auch bei den Angaben dieser Schwinger für die Eigenfrequenz, den Schwingerwiderstand, die Stromempfindlichkeit und den Abschlußwiderstand für die Einstellung der günstigsten Dämpfung eine gewisse Streuung in Kauf genommen werden.

Obgleich daher diese Daten bei der Herstellung der Schwinger nicht genau eingehalten werden müssen und nur als Richtgrößen vom Benutzer zu beachten sind, ist es wegen der Reproduzierbarkeit der Anzeige doch erforderlich, die Anzeige des Schwingers durch gute technische Eigenschaften im Aufbau unbeeinflussbar durch störende Einflüsse zu machen. Bei seiner Fertigung sind deshalb durch sorgfältige Auswahl des Materials und präzisesten Auf- und Zusammenbau der Einzelteile alle Unsicherheiten der Anzeige infolge Eisenverunreinigung, durch Erschütterung, Überlagerung der Meßströme von Fremdströmen, durch Übergangswiderstände und Thermospannungen an den Kontakflächen sowie durch Nachwirkungserscheinungen im beweglichen Organ soweit wie nur möglich ausgeschaltet.

Um diese Eigenschaften möglichst voll auszunutzen, sind für die zweckentsprechende Auswahl und Anwendung der Schwinger in den nachfolgenden Ausführungen die notwendigen Hinweise gegeben.

	Typ	Nutzbarer Frequenzbereich bei einem Amplitudenfehler von		Systemwiderstand R _i	Erforderlicher Abschlußwiderstand R _a	Strom- und Spannungsempfindlichkeiten S _i und S _u bei 1 m Lichtzeigerlänge		Zulässiger Ausschlag A _{max} ¹⁾ bei einer Oszillographen-Lichtzeigerlänge L von			Zulässiger Strom I _{max} ²⁾	Bestell-Nr.
		5%	30% (3 dB)			S _i	S _u (= $\frac{S_i}{R_i}$)	50 cm	30 cm	20 cm		
Elektrodynamische Dämpfung	Spulenschwinger	Hz	Hz	Ω	Ω	$\frac{\text{mm}}{\mu\text{A}}$	$\frac{\text{mm}}{\text{mV}}$	mm	mm	mm	mA	
		0 bis ...	0 bis ...									
	S 10	6	10	46	70	13	285	± 125	± 75	± 50	2	M919-A1
	S 30	18	30	46	350	18	392	± 125	± 75	± 50	2	M919-A2
	S 80	50	80	11	35	3,8	345	± 125	± 75	± 50	2	M919-A3
	S 120	70	120	46	250	7,2	157	± 125	± 75	± 50	10	M919-A4
	S 250	150	250	44	100	2,0	45	± 125	± 75	± 50	15	M919-A5
	S 350	210	350	44	70	1,0	23	± 125	± 75	± 50	15	M919-A6
	S 120s	70	120	220	1100	14	63,6	± 125	± 75	± 50	2	M919-A8
	S 250s	150	250	220	340	3,1	14,1	± 125	± 75	± 50	5	M919-A9
	S 150b	90	150	35	120	5,0	132	± 125	± 75	± 50	10	M919-A10
	S 250b	150	250	44	120	2	45	± 125	± 75	± 50	15	M919-A13
	Flüssigkeitsdämpfung	Spulenschwinger	Hz	Hz	Ω	Ω	$\frac{\text{mm}}{\text{mA}}$	$\frac{\text{mm}}{\text{mV}}$	mm	mm	mm	mA
		0 bis ...	0 bis ...									
S 750		450	750	40	> 100	90	2,22	± 125	± 75	± 50	± 20	M919-A22
S 1200		720	1200	40	> 50	40	1,0	± 125	± 75	± 50	20	M919-A23
S 2000		1200	2000	40	> 15	18	0,46	± 125	± 75	± 50	60	M919-A24
S 4000		2400	4000	28	> 100	5,5	0,19	± 125	± 75	± 50	50	M919-A25
S 5000		3000	5000	35	> 10	4,0	0,11	± 100	± 60	± 40	50	M919-A26
S 10000		6000	10000	57	beliebig	1,5	0,026	± 30	± 18	± 12	40	M919-A27
S 15000		9000	15000	57	beliebig	0,8	0,014	± 16	± 9,6	± 6,4	40	M919-A28
S 2000v		1200	2000	2	beliebig	4,2	2,1	± 125	± 75	± 50	60	M919-A32
S 5000v		3000	5000	1,8	beliebig	1,0	0,56	± 35	± 21	± 14	70	M919-A33
Große Spulenschwinger		Hz	Hz	Ω	Ω	$\frac{\text{mm}}{\text{mA}}$	$\frac{\text{mm}}{\text{mV}}$	mm	mm	mm	mA	C70241 - ...
		0 bis ...	0 bis ...									
S 150T	90	150	55	120	2700	49	± 125	± 75	± 50	5	-A516-V12	
S 350T	210	350	34	120	400	11,8	± 125	± 75	± 50	10	-A516-V13	
S 2000T	1200	2000	30	beliebig	12	0,40	± 125	± 75	± 50	40	-A516-V10	
S 5000T	3000	5000	30	beliebig	2,2	0,08	± 55	± 33	± 22	50	-A516-V17	
S 10000T	6000	10000	55	beliebig	1,4	0,026	± 28	± 16,8	± 11,2	40	-A516-V18	
S 15000T	9000	15000	55	beliebig	1,0	0,018	± 20	± 12	± 8	40	-A516-V19	
S 1000Tv	600	1000	2,4	beliebig	1,3	5,4	± 125	± 75	± 50	70	-A516-V14	
S 4000Tv	2400	4000	1,9	beliebig	1,4	0,74	± 100	± 60	± 40	70	-A516-V15	
	Spulenschwinger	Hz	Hz	Ω	Ω	$\frac{\text{mm}}{\text{mA}}$	$\frac{\text{mm}}{\text{mV}}$	mm	mm	mm	mA	
		0 bis ...	0 bis ...									
	100 M	60	100	40	120	2600	65	± 333	± 200	± 133	10	M07359-A3
	200 M	120	200	40	40	600	15	± 333	± 200	± 133	15	M07359-A8
	500 M	300	500	40	10	105	2,63	± 333	± 200	± 133	20	M07359-A11
	1000 M	600	1000	35	100	22	0,63	± 333	± 200	± 133	20	M07359-A15
	2000 M	1200	2000	35	100	5,1	0,146	± 250	± 150	± 100	50	M07359-A16
	4000 M	2400	4000	35	100	1,8	0,0515	± 125	± 75	± 50	50	M07359-A20
	10000 M	6000	10000	55	beliebig	0,6	0,0109	± 50	± 30	± 20	50	M07359-A23
	20000 M	12000	20000	55	beliebig	0,15	0,0027	± 12,5	± 7,5	± 5	50	M07359-A24

1) Bei sinusförmigem Wechselstrom darf der zulässige Ausschlag um den Faktor $\sqrt{2}$ größer sein

2) Gleichstrom oder Effektivwert bei sinusförmigem Wechselstrom

Für Ausschläge $\leq A_{max}$ und bei senkrechter Stellung des elektrisch nicht ausgeleakten Lichtzeigers zum Registrierpapier sind die Fehler für Linearität $\leq \pm 2\%$ und für Symmetrie $\leq \pm 3\%$.

Bei der Betriebstemperatur von 40 °C (geregelter Heizung) für flüssigkeitsgedämpfte Schwinger sowie bei richtigem Abschlußwiderstand R_a für elektrodynamisch gedämpfte Spulenschwinger beträgt das Überspringen 4,6% (Dämpfungsgrad $\alpha = 0,7$).

Kennbuchstaben: v für höhere S_u-Werte, s für höhere S_i-Werte
b für Anschluß an DMS-Brücken (120 Ω)

Lichtzeigerlängen: L = 50 cm für OSCILLOMAT U
L = 30 cm für OSCILLOMAT E, OSCILLOFIL S, OSCILLOFIL E, OSCILLOFIL L, OSCILLOFIL V (27 cm)
L = 20 cm für OSCILLOPORT E

Tafel 1 Elektrische Kenndaten der zur Zeit lieferbaren Spulenschwinger

Höherfrequente Spulenschwinger (ab 750 Hz) lassen sich nicht mehr elektrodynamisch dämpfen, sie werden vielmehr, wie Schleifenschwinger, mit Öl gedämpft. Außer einer höheren Stromempfindlichkeit (bei einer Eigenfrequenz entsprechend der eines Schleifenschwingers) haben sie diesen gegenüber noch den Vorzug, daß die Eigenfrequenz durch die Ölfüllung nicht in gleichem Maße abfällt wie bei Schleifenschwingern. Sie erlauben noch verzerrungsfreie Aufzeichnungen bei gleicher prozentualer Ausnutzung der Frequenzbereiche wie bei den elektrodynamisch gedämpften Schwingern, wobei allerdings darauf geachtet werden sollte, daß die Öltemperatur möglichst konstant gehalten wird. Auch die zulässige Amplitude (Schreibbreite) ist wesentlich größer als bei Schleifenschwingern. Diese ölgefüllten Spulenschwinger sind dafür bestimmt, den Anwendungsbereich auch auf höhere Frequenzen auszudehnen.



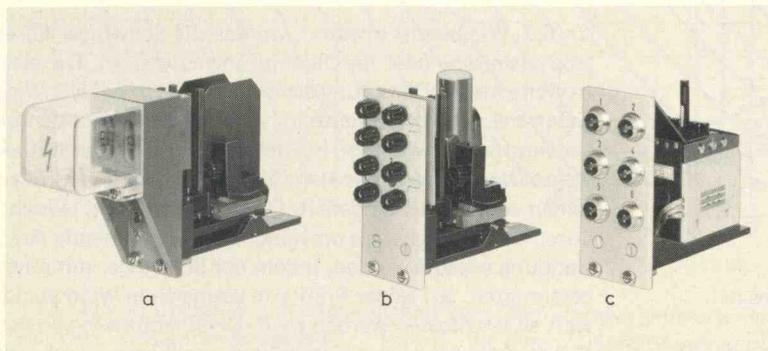
Bild 3 Die drei Bauformen der Spulenschwinger

3.1. Erläuterungen zur Tafel 1

Die Empfindlichkeitsangaben gelten nur unter der Voraussetzung, daß für alle Pollöcher des Magnetblocks etwa gleiche magnetische Verhältnisse bestehen. Hierzu ist es erforderlich, in alle nicht benutzten Löcher Adapter (Blindeinsätze) einzustecken. Sie haben gleiche Polschuhe wie die Schwinger, sichern daher für alle Pollöcher unveränderten Kraftfluß und verhindern zugleich deren Verschmutzung.

Die Angaben für die Spannungsempfindlichkeit S_U und die Spannungskonstante C_U gelten nur für den Fall, daß der Geberwiderstand dem erforderlichen Abschlußwiderstand entspricht bzw. bei den ölgefüllten Schwingern einen Mindestabschlußwiderstand einhält. Es ist dann

$$S_U = \frac{S_i}{R_i + R_a} \quad \text{und} \quad C_U = C_i (R_i + R_a)$$



- a Einschub, hochisoliert (10 kV Prüfspannung) für zwei große Spulenschwinger oder Schleifenschwinger
- b Einschub für 2 kV Prüfspannung, Schwingerbestückung wie bei a
- c Einschub für 6 kleine Spulenschwinger

Bild 4 Galvanometereinschübe

Die elektrodynamisch gedämpften Spulenschwinger können mit mehr als dem 1000fachen der üblichen Betriebsströme belastet werden, ohne daß sie beschädigt werden (vgl. vorletzte Spalte der Tafel 1).

Neben den genannten Daten ist für die Beurteilung der Schwinger noch die Kenntnis der Linearität und der Unsymmetrie von Bedeutung.

Als linear gelten Schwinger, deren Lichtstrahlausschläge streng proportional den Veränderungen des Meßstromes folgen. Die Linearität ist abhängig vom Aufbau der aktiven Teile des Meßwerks und von der Justierung der Optik. Die Nichtlinearität beträgt bei unseren Spulenschwingern höchstens $\pm 2\%$ vom Ausschlag.

Die Unsymmetrie sagt darüber aus, um wieviel die Ausschläge bei gleichen Strömen verschiedener Richtung voneinander abweichen. Sie beträgt max. $\pm 3\%$ vom Ausschlag.

4. Auswahl der Schwinger

4.1. Wiedergabetreue

Soll ein Vorgang wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden, so ist Voraussetzung, daß der Schwinger für alle interessierenden Frequenzen eine nahezu gleiche Empfindlichkeit und eine gleiche Verzögerungszeit zwischen erregendem Strom und Schwingerausschlag beibehält. Beide Forderungen werden gut erfüllt, wenn ein Schwinger unter ganz bestimmten Dämpfungsverhältnissen betrieben wird.

4.2. Auswahl nach Eigenfrequenz

Andererseits wird man die Eigenfrequenz nur so hoch wählen, wie es die jeweilige Meßaufgabe unbedingt erfordert, weil die Stromempfindlichkeit S_i mit wachsender Eigenfrequenz f_u quadratisch abnimmt:

$$S_i = \frac{A}{f_u^2}$$

Hierin ist A eine Konstante, die einen Gütevergleich zwischen Schwingern gestattet, bei denen die Zahlenangaben für Empfindlichkeit und Eigenfrequenz nicht ganz übereinstimmen.

4.3. Nutzbarer Frequenzbereich

Ein großer nutzbarer Frequenzbereich ergibt sich bei einem Dämpfungsgrad $\alpha = 0,7$ (Bild 6). Läßt man noch, wie bei Oszillographen üblich, einen Amplitudenabfall von

3 db = 30 % zu, so reicht der Bereich bis zur Eigenfrequenz des Schwingers. Wird nur ein Amplitudenabfall von 5 % zugelassen, so können noch Frequenzen bis zu 60 % der Eigenfrequenz aufgezeichnet werden.

1. Beispiel: Es soll eine Meßgröße mit einer Frequenz von 50 Hz aufgezeichnet und dabei die 3. Harmonische noch unverzerrt wiedergegeben werden. Der nutzbare Frequenzbereich müßte also bis zu 150 Hz reichen. Wird der nutzbare Frequenzbereich mit einem Amplitudenabfall oder -anstieg von nur 5 % verstanden, so muß der Schwinger, da hierbei die noch nutzbare Frequenz 60 % der Eigenfrequenz beträgt, eine Eigenfrequenz von mindestens 250 Hz haben (150 Hz = 60 % von 250 Hz). Es kommt also der Schwingertyp S250 in Betracht (vgl. Tafel 1).

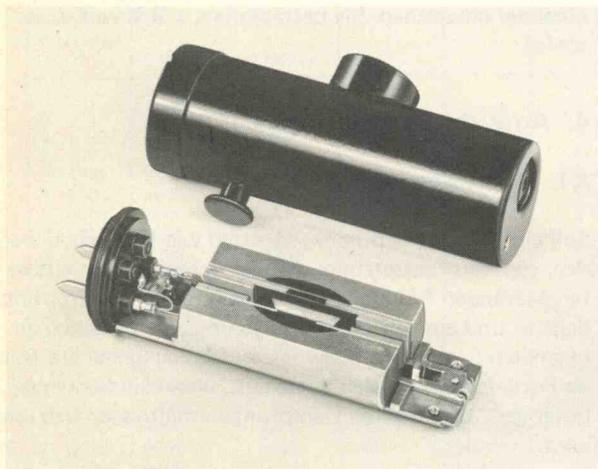


Bild 5 Großer Spulenschwinger, Gehäuse abgezogen

4.4. Verzögerungszeit

Angestrebt wird eine gleichmäßige Verzögerungszeit unabhängig von der Meßfrequenz. Auch diese Forderung wird bei einem Dämpfungsgrad $\alpha = 0,7$ gut erfüllt (Bild 7).

Werden Schwinger verschiedener Eigenfrequenz mit der gleichen Meßfrequenz betrieben, so tritt eine Phasenverschiebung zwischen beiden auf, deren Größe Bild 7 entnommen werden kann.

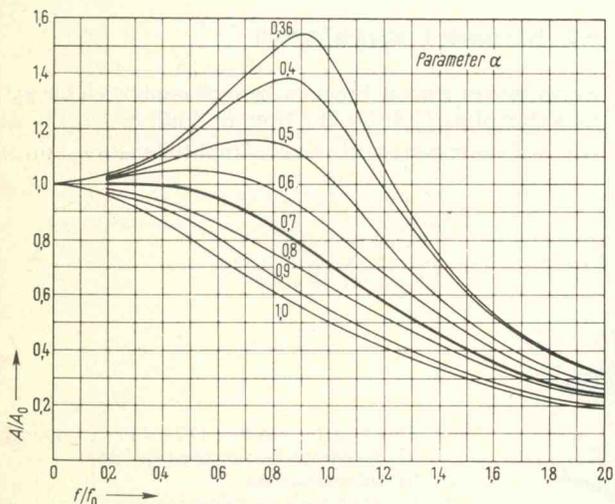


Bild 6 Frequenzgang des Amplitudenverhältnisses bei Wiedergabe sinusförmiger Meßgrößen
A/A₀ Amplitudenverhältnis, f/f₀ Frequenzverhältnis

2. Beispiel: Mit einem Schwinger Typ S 120 mit $f_0 = 120$ Hz und einem des Typs S 350 Hz werden 50-Hz-Schwingungen aufgenommen. Beide Schwinger sind mit $\alpha = 0,7$ gedämpft.

Beim 120-Hz-Schwinger beträgt das Produkt aus Verzögerungszeit und Eigenfrequenz $t \cdot f_0 = 0,23$ für $f : f_0 = 50 : 120 = 0,42$ (Bild 7).

Die Verzögerungszeit ist also

$$t = \frac{0,23}{f_0} = \frac{0,23}{120} = 1,9 \text{ ms.}$$

Beim 350-Hz-Schwinger ergibt sich für $\frac{f}{f_0} = \frac{50}{350} = 0,14$

eine Verzögerungszeit von $t = \frac{0,225}{350} = 0,64 \text{ ms.}$

Die Phasenverschiebung zwischen beiden Systemen:

$$1,9 - 0,64 = 1,26 \text{ ms.}$$

4.5. Wiedergabe von Rechteckimpulsen

Auch für das Registrieren von Rechteckimpulsen ist der gewählte Dämpfungsgrad $\alpha = 0,7$ vorteilhaft, weil sich hierbei ein Optimum an Ansprechzeit bei kleinster Überschwingung (etwa 4,6 %) ergibt.

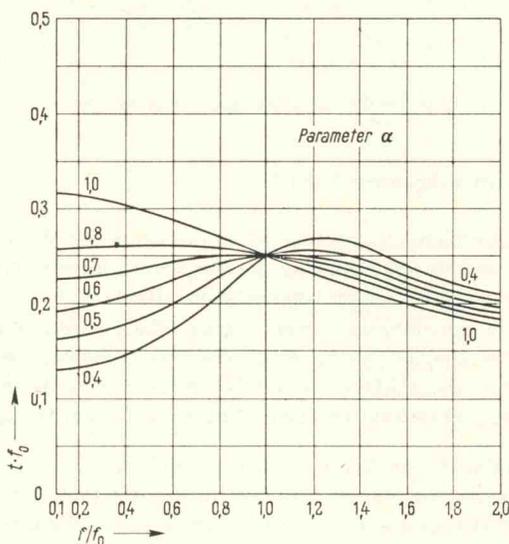


Bild 7 Frequenzgang der Verzögerung bei Wiedergabe sinusförmiger Meßgrößen
t Verzögerungszeit, f₀ Eigenfrequenz

4.6. Einstellung des Dämpfungsgrades

$\alpha = 0,7$. Wie bereits erwähnt, werden die Schwinger für elektrodynamische oder für Öldämpfung ausgeführt. Die elektrodynamische Dämpfung sichert eine bestmögliche Wiedergabetreue, weil der Gütefaktor A im Gegensatz zu den ölgedämpften Schwingern, bei denen sich durch das mitbewegte Dämpfungöl das Nennträgheitsmoment vergrößert, seinen vollen Wert beibehält. Dieser Vorteil muß jedoch durch eine zunächst als umständlicher erscheinende Anwendung erkauft werden, indem der Schwinger mit einem bestimmten, auf seiner Prüfkarte vermerkten Widerstandswert abgeschlossen werden muß. Diese Anpassung an den Geberwiderstand kann mit stetig einstellbaren Anpassungs-

stellern erfolgen, die neben der Anpassung auch eine Empfindlichkeitseinstellung in gewissen Grenzen erlauben. Bei den ölgefüllten Schwingern braucht der Meßschaltungswiderstand nur einen Mindestwert einzuhalten.

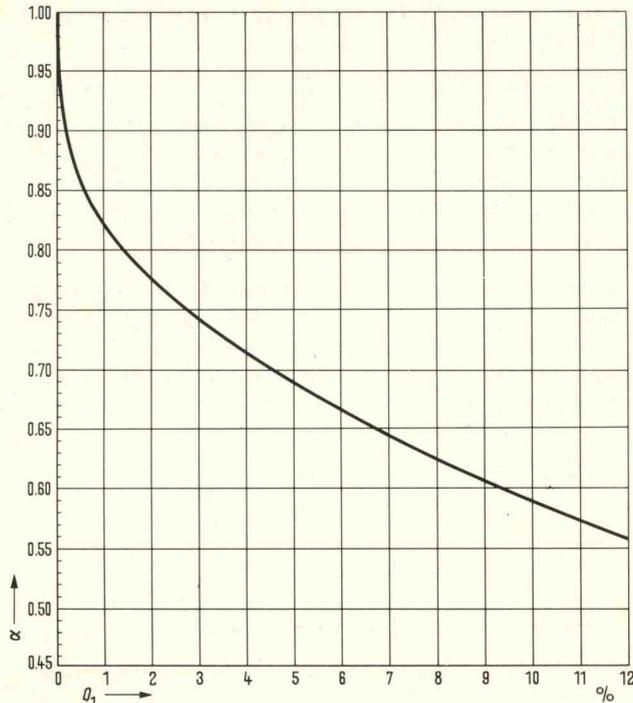


Bild 8 Überschwung U_1 in Abhängigkeit vom Dämpfungsgrad α

3. Beispiel: An einen Geber mit einem Innenwiderstand $R_G = 80 \Omega$ soll ein Schwinger des Typs S 120, auf dessen Prüfkarte ein Abschlußwiderstand von 185Ω eingetragen ist, angeschlossen werden. Hier muß ein Vorwiderstand von 105Ω vorgesehen werden. Soll der gleiche Schwinger an einen Geber mit einem Innenwiderstand von 240Ω angeschlossen werden, so ist ein Parallelwiderstand anzuordnen, der sich nach der Formel

$$R_{\text{parallel}} = \frac{R_{\text{Abschluß}} \cdot R_{\text{Geber}}}{R_{\text{Geber}} - R_{\text{Abschluß}}}$$

zu 807Ω errechnet.

Wenn es erforderlich wird, den Schwinger mit Vor- oder Nebenwiderständen anzupassen, so ändern sich damit natürlicherweise auch die Werte für die Strom- bzw. Spannungsempfindlichkeit der Gesamtschaltung gegenüber den in der Prüfkarte angegebenen Werten. Diese Empfindlichkeit läßt sich einfach aus den Widerstandsverhältnissen ermitteln.

Aus der Überschwungung von $4,6\%$ (vgl. "Wiedergabe von Rechteckimpulsen"), die man recht einfach durch Registrieren eines Gleichstromstoßes messen kann, läßt sich der Dämpfungsgrad direkt bestimmen. Der Schwinger wird mit seinem auf der Prüfkarte angegebenen Abschlußwiderstand $R_V (\geq 100 \cdot R_a)$ an eine Gleichspannung gelegt. Für die beim Einschalten gemessene Überschwungung (in % vom statischen Ausschlag) wird im Bild 8 der Dämpfungsgrad abgelesen.

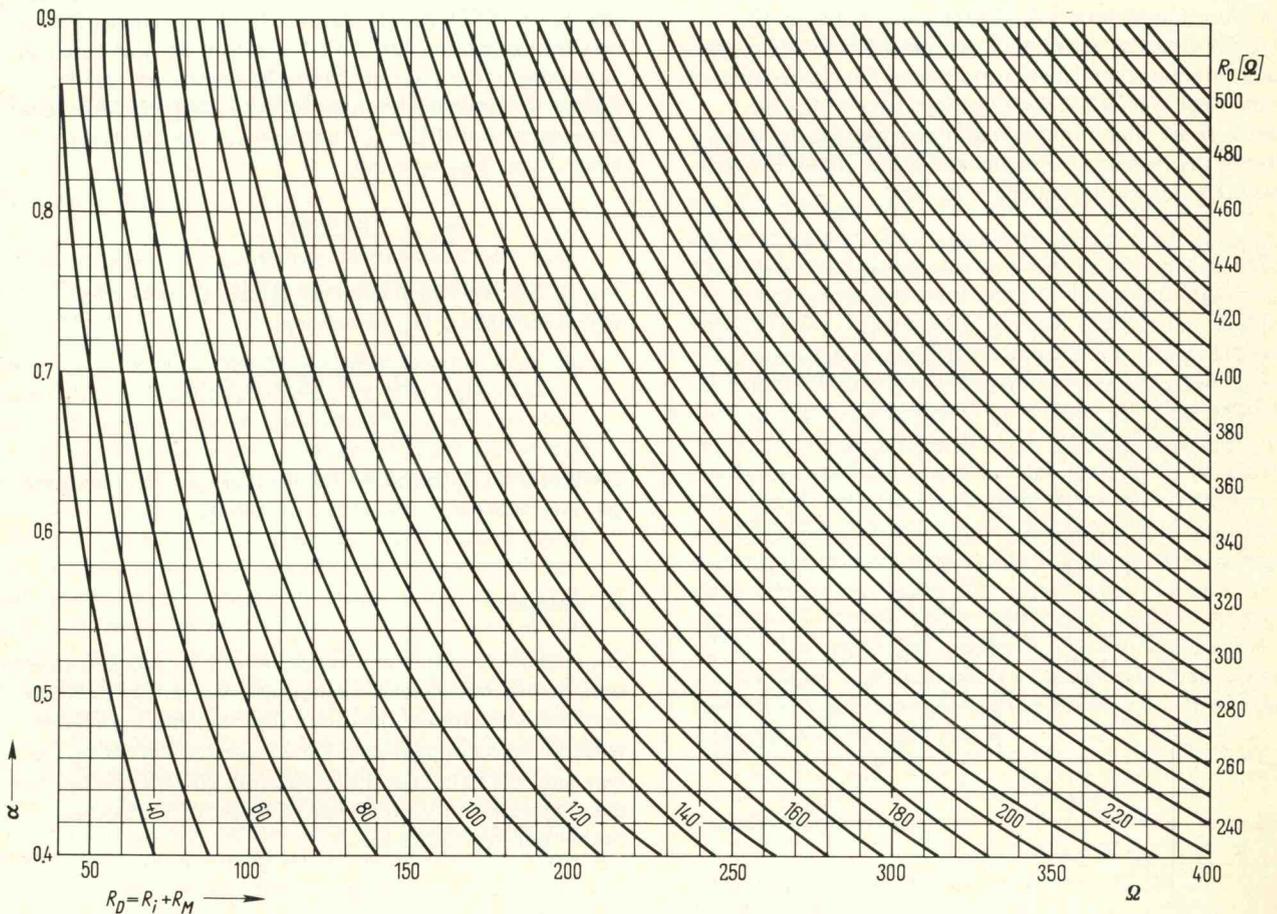


Bild 9 Dämpfungsgrad α in Abhängigkeit vom Dämpfungswiderstand R_D
Parameter: Gesamtwiderstand $R_0 = R_i + R_a$ bei einem Dämpfungsgrad $\alpha = 0,7$

Bei orientierenden Aufnahmen, die keine genaue Auswertung der Schwingerausschläge erforderlich machen, wird man oft auf die optimale Wiedergabetreue verzichten können, so daß sich eine genaue Dämpfungsanpassung erübrigt. In diesen Fällen kann man aus Bild 9 ersehen, welchen Dämpfungsgrad eine Fehlanpassung mit sich bringt. Dabei ist der Dämpfungsgrad in Abhängigkeit vom Dämpfungswiderstand R_D (Summe aus Schwingewiderstand R_i und Meßschaltungswiderstand R_M) aufgetragen. Als Parameter wird der aus den Daten der Prüfkarte sich ergebende Dämpfungswiderstand $(R_i + R_a)$ für $\alpha = 0,7$ benutzt.

4. Beispiel: Für eine Dehnungsmeßstreifenbrücke mit einem Brückenausgangswiderstand von 120Ω soll ein Schwinger des Typs S 120 als Nullindikator benutzt werden. Auf der Prüfkarte des Schwingers sind folgende Daten eingetragen: $S_i = 5,0 \text{ mm}/\mu\text{A} \cdot \text{m}$; $f_0 = 120 \text{ Hz}$; $R_i = 40 \Omega$; $R_a = 90 \Omega$; d. h. $R_0 = R_i + R_a = 130 \Omega$.

Der Benutzer verzichtet auf höchste Wiedergabetreue und möchte von der genauen Anpassung seiner Dehnungsmeßstreifenbrücke an den Wert des Abschlußwiderstandes absehen und den Spulenschwinger direkt an die Brücke anschließen. Er möchte aber wissen, wie groß bei dieser Vereinfachung der nutzbare Frequenzbereich ist, wenn ein Amplitudenanstieg oder -abfall von $\pm 5 \%$ als noch tragbar angesehen wird.

Der Dämpfungswiderstand R_D beträgt hier $R_i + R_M = 40 + 120 = 160 \Omega$, der Gesamtwiderstand R_0 laut Daten der Prüfkarte 130Ω . Für diese Werte wird im Bild 8 ein Dämpfungsgrad $\alpha = 0,57$ abgelesen. Aus Bild 10 wird für dieses α der Wert für die obere Grenze des nutzbaren Frequenzbereiches entnommen. Für das Beispiel beträgt der Wert 42% der Eigenfrequenz = $50,4 \text{ Hz}$. (Bei exakten Dämpfungsverhältnissen beträgt die obere Grenze des nutzbaren Frequenzbereiches dieses Schwingers 60% der Eigenfrequenz = 72 Hz).

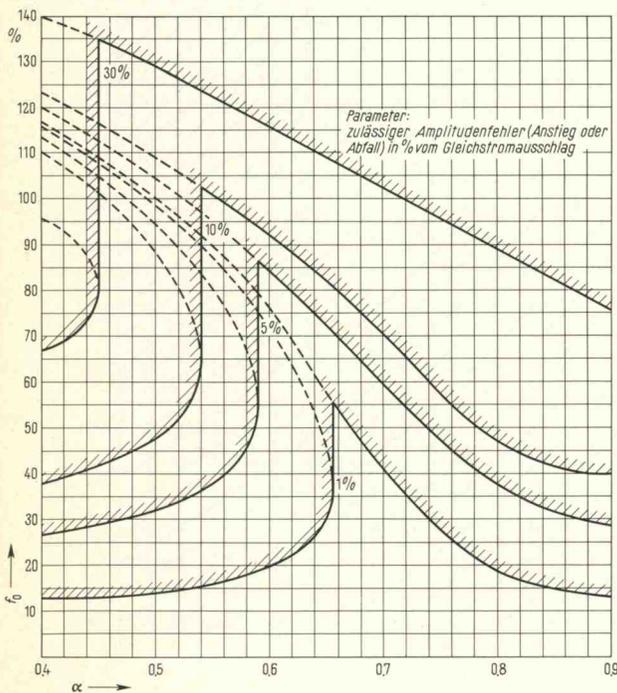


Bild 10 Nutzbarer Frequenzbereich f in % der Schwinger-eigenfrequenz in Abhängigkeit vom Dämpfungsgrad α für 1 %, 5 %, 10 % und 30 % Amplitudenfehler

5. Messungen mit höchster Genauigkeit

Für sehr genaue Messungen, bei denen es auf beste Wiedergabetreue ankommt, genügt es nicht allein, den Schwinger mit dem auf der Prüfkarte vermerkten Abschlußwiderstand abzuschließen.

Die auf der Prüfkarte angegebenen Werte für die Stromempfindlichkeit und den Abschlußwiderstand gelten für einen Normalmagnetblock mittlerer Luftspaltinduktion. In den einzelnen Pollöchern kann die Induktion hiervon jedoch je nach Lage des Polloches mehr am Rande oder in der Mitte des Blockes in gewissen Grenzen abweichen.

Wird Wert auf die Erzielung höchster Meßgenauigkeit gelegt, so ist daher zu empfehlen, vor der Messung die Stromempfindlichkeit S_i im jeweils benutzten Polloch zu bestimmen. Die Messung von S_i kann auf einfachste Weise nach Bild 11 erfolgen.

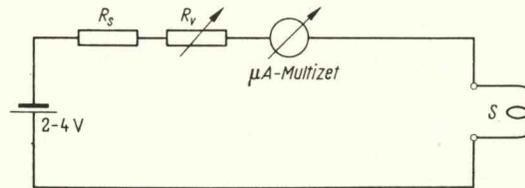


Bild 11 Schaltung zum Bestimmen der Stromempfindlichkeit

Über einen festen Schutzwiderstand R_s von etwa 1 bis 2 $k\Omega$, einen Stellwiderstand R_v von etwa 500 $k\Omega$ und einen empfindlichen Strommesser, z. B. das $\mu\text{A-MULTIZET}$ Bestell-Nr. M05819-A4, wird der Spulenschwinger S an eine Gleichspannung von 2 bis 4 V gelegt. Es wird dann der Ausschlag a [mm] auf der Mattscheibe oder im Oszillogramm für einen bestimmten Strom i [μA] abgelesen. Die Stromempfindlichkeit S_i' , bezogen auf die Lichtzeigerlänge Z von 1 m, ist dann:

$$S_i' = i \frac{a \text{ [mm]}}{[\mu\text{A}] \cdot Z \text{ [m]}}$$

Aus S_i' läßt sich dann auch der genaue Wert für den Abschlußwiderstand R_a' berechnen:

$$R_a' = \frac{R_i + R_a}{S_i^2} \cdot S_i'^2 - R_i \text{ [\Omega]}$$

Die Werte für S_i [$\text{mm}/\mu\text{A} \cdot \text{m}$], R_i [Ω] sind der dem Schwinger beigegebenen Prüfkarte zu entnehmen.

6. Adapter

Grundsätzlich sollten alle Pollöcher mit Schwingern besetzt sein, damit stets gleiche magnetische Verhältnisse vorliegen und eine Verschmutzung durch Eisenteilchen vermieden wird. Wenn nicht genügend Schwinger zur Verfügung stehen, sind die Pollöcher durch Adapter zu verschließen, die die magnetischen Verhältnisse eines Schwingers genau nachbilden (vgl. Seite 5).

7. Störeinflüsse

Soll die hohe Empfindlichkeit der Spulenschwinger voll ausgenutzt werden, so empfiehlt es sich, die Meßschal-

tung sorgfältig auszuwählen und aufzubauen, und zwar besonders dann, wenn mit hohen Meßspannungen gearbeitet wird. Kapazitäten zwischen benachbarten Leitungen sind weitgehend zu vermeiden. Auch induktive Einstreuungen sind möglichst auszuschließen. Die Widerstände in der Meßschaltung sollten bifilar gewickelt sein. Wo der Anpassungssteller nicht zur Verfügung steht, passe man mit Kohleschichtwiderständen an. Es ist zweckmäßig, diese so dicht wie nur möglich an den Meßklemmen des Oszillographen anzuschließen. Die Zuleitungen wird man verdrillt verlegen und Schleifen vermeiden. Vielfach liegt die Ursache für eine der Nulllinie oder dem Meßvorgang überlagerte Wechselstromgröße in einem nicht ganz einwandfreien Schaltungsaufbau.

Schaltelemente, wie Schiebewiderstände und unifilar gewickelte Drahtwiderstände, gehören nicht in eine Meßschaltung mit hochempfindlichen Spulenschwingern. Der Benutzer muß sich beim Arbeiten mit Spulenschwingern über deren hohe Empfindlichkeit, die in den Bereich eines Spiegelgalvanometers fällt, im klaren sein.

Wie beim Übergang vom üblichen Drehspulinstrument zum Galvanometer neue Probleme auftreten (Isolationswiderstände, Schirmfragen, Thermospannungen), so auch beim Übergang von den Schleifenschwingern zu den hochempfindlichen Spulenschwingern. Außer den genannten Punkten spielen hier noch, weil es sich um Wechselströme handelt, Kapazitäten und Induktivitäten eine Rolle. Der Benutzer tut gut daran, seine Meßschaltung unter diesen Gesichtspunkten auszuwählen und aufzubauen. In besonders ungünstigen Fällen wenden Sie sich, bitte, mit Ihren Fragen an uns.

Teil 2 Theorie der Schleifen- und Spulenschwinger

1. Einleitung

Spulen- und Schleifenschwinger sind mechanische Registriermeßwerke, um zeitlich veränderliche Meßgrößen aufzunehmen.

Wenn man das Wort "mechanische Meßwerke" hört, stellt man sich unwillkürlich die Frage, ob eine Entwicklung auf diesem Gebiete heutzutage überhaupt noch sinnvoll ist, ob nicht vielmehr durch Fortschritte der Elektronenstrahloszillographie diese Art der Registrierung längst überholt sei.

Dies ist nicht der Fall. Im Gegenteil, das Anwendungsgebiet der mechanischen Registriermeßwerke hat sich gerade in den letzten Jahren sehr ausgedehnt. Das ist einmal auf die erheblichen Fortschritte, die man bei den elektrischen Daten erzielt hat, zurückzuführen. Es ist möglich, Frequenzen bis über 15 kHz mit solchen Meßwerken aufzuzeichnen. Die große Empfindlichkeit erspart in vielen Fällen teure Verstärker. Die Meßwerke können potentialfrei an die Meßgröße angelegt werden. Ein besonderer Vorteil der Spulen- und Schleifenschwinger liegt in der Möglichkeit – dank der heutigen Miniaturbauform der Meßwerke – 18 und mehr Schwinger in kleinen tragbaren Geräten unterzubringen und dadurch ebenso viele zusammenhängende Meßgrößen gleichzeitig auf einem Oszillogramm zu registrieren.

Dies ist besonders für das Messen mechanischer Größen in Verbindung mit den verschiedensten Gebern für die

Geophysik, den Karosserie-, Motoren- und allgemeinen Maschinenbau interessant. Man kann mechanische und geophysikalische Größen wie Druck, Dehnung, Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und jegliche Art von Materialbelastungen registrieren. Ein weites Gebiet wurde der Lichtstrahloszillographie durch die Erfindung des Dehnungsmeßstreifens erschlossen.

2. Konstruktion und Arbeitsweise

Zur Arbeitsweise der Meßwerke sei folgendes ausgeführt: In den meisten Fällen sind es Schleifen- und Drehspulgalvanometer, beides Meßprinzipien, die seit Jahrzehnten bekannt sind. Bild 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau der beiden Meßwerke.

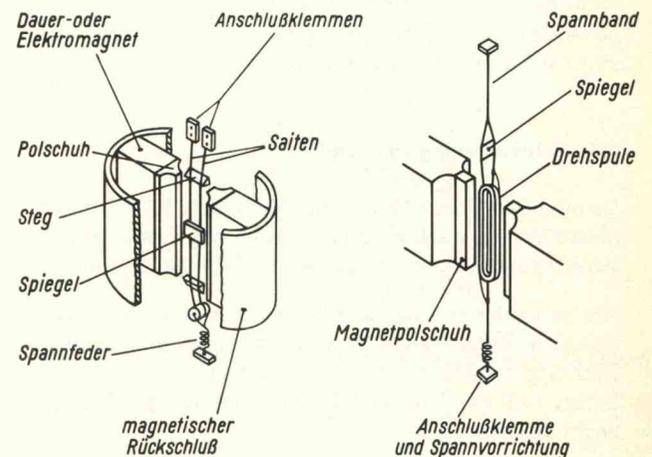


Bild 12 Schleifenschwinger und Spulenschwinger Prinzip

2.1. Schleifenschwinger

Das Schleifengalvanometer oder auch Doppelsaitengalvanometer genannt, ist im wesentlichen ein niederohmiges Drehspulgalvanometer mit nur einer Windung und bifilarer Aufhängung. Man nennt das Galvanometer nach dieser Drahtschleife – Schleifenschwinger. Die Schleife besteht aus den beiden gespannten Saiten, die gleichzeitig zur reibungslosen Aufhängung des aus der Schleife selbst und dem Spiegel bestehenden Organs dient. Zwei Stege geben der Schleife eine definierte Länge. Mittels einer Feder wird das System gespannt. Über Anschlußklemmen erfolgt die Stromzuführung. Das bewegliche Organ befindet sich im Luftspalt eines Magnetsystems, bestehend aus dem Dauermagnet, den Polschuhen und dem Gehäuse, welches gleichzeitig den magnetischen Rückschluß bildet. Leitet man nun einen Strom durch die Schleife, so wird sie im Magnetfeld ausgelenkt und mit ihr der Spiegel. Werden die beiden Saiten nun dicht nebeneinander gelegt, so führen sie als bifilares System betrachtet bei kleinen Drehungen Torsionsschwingungen aus.

2.2. Spulenschwinger

Der Aufbau eines Spulenschwingers entspricht dem eines Spiegelgalvanometers, allerdings mit einer außerordentlich kleinen Drehspule. Die Drehspule ist zwischen Spannbandern gelagert. Auch hier wird die Bandspannung von einer Feder (Ringfeder!) aufrechterhalten. Gleichzeitig schützt die Feder das System vor Zerstörung, wenn das Meßwerk

einmal hinfällt. Das bewegliche Organ schwingt ebenfalls im Luftspalt eines Dauermagneten. Ein entscheidender Vorzug des Spulenschwingers ist es, daß die Spiegelebene im Gegensatz zu den Schleifenschwingern konstruktiv leicht senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes angebracht werden kann. Ein Spulenschwinger kann deshalb wesentlich schmaler gebaut werden, wodurch auf gleichem Raum mehr Meßkanäle zur Verfügung stehen. Ohne die Zahl der Meßkanäle verringern zu müssen, können kräftige Magnet-systeme verwendet werden, deren räumliche Ausdehnung nicht stört.

3. Physikalische Zusammenhänge

Bevor die Anforderungen und die meßtechnischen Eigenschaften, die an ein Registriermeßwerk zu stellen sind, behandelt werden, soll kurz auf einige physikalische Zusammenhänge eingegangen werden:

3.1. Schwingungsgleichung:

Da die beweglichen Organe der Meßwerke träge Massen darstellen, die elastisch gelagert sind, hat man es mit schwingungsfähigen mechanischen Gebilden zu tun.

Am beweglichen Organ des Schwingers greift nun das äußere, von der Meßgröße hervorgerufene elektrische Drehmoment M_E an, das mit der Zeit t veränderlich ist. Dieses muß mit folgenden Drehmomenten im Gleichgewicht stehen:

3.1.1. Mit dem elastischen Drehmoment M_D , das dem Ausschlagwinkel aus der Ruhelage proportional ist.

$$M_D = D \cdot \varphi = \text{Richtmoment}$$

D ist hierbei das Rückstellmoment bezogen auf die Winkeleinheit.

3.1.2. Mit dem Massendrehmoment M_Θ , das der Winkelbeschleunigung proportional ist.

$$M_\Theta = \Theta \cdot \ddot{\varphi}$$

Θ = Trägheit des Systems einschließlich etwa anhaftender Ölteilchen.

3.1.3. Mit dem Dämpfungsdrehmoment M_b , das der Winkelgeschwindigkeit proportional ist:

$$M_b = b \cdot \dot{\varphi} \quad b = \text{Dämpfungsfaktor.}$$

Die Zusammenfassung der verschiedenen Momente in einer Differentialgleichung ergibt die bekannte Schwingungsgleichung:

$$\Theta \ddot{\varphi} + b \dot{\varphi} + D \varphi = M_E(t) \quad (1)$$

3.2. Wiedergabe für Drehpulschwinger

Das Meßwerk soll möglichst eine völlig zeitlich naturgetreue Aufzeichnung des Meßvorganges geben. Um diese Bedingung erfüllen zu können, müßte der Ausschlag des Schwingers proportional dem äußeren Drehmoment M_E sein. Aus der Gleichung (1) sieht man aber, daß durch das Hinzukommen des Trägheitsmomentes und des Dämp-

fungsmomentes notgedrungen eine Abweichung zwischen dem wirklichen und angezeigten Wert des Meßvorganges entstehen muß.

Ersetzt man den Winkel φ durch den Ausschlag y auf dem Registrierpapier aus der Beziehung $y = 2 \varphi \ln$ und faßt die drei Parameter in Gleichung (1) im Dämpfungsgrad α zusammen:

$$\alpha = \frac{b}{2\omega_0 \Theta} \quad (2)$$

Mit der Eigenfrequenz des ungedämpften Systems

$$\omega_0 = 2 \pi f_0 = \sqrt{\frac{D}{\Theta}}$$

erhält man die Gleichung

$$\ddot{y} + 2 \alpha \omega_0 \dot{y} + \omega_0^2 y = 2 \ln \frac{\omega_0^2}{D} \cdot M_E(t) \quad (3)$$

Ferner hat es sich als zweckmäßig erwiesen, einen dimensionslosen Zeitmaßstab einzuführen, der eine Beziehung zwischen dem zeitlichen Verlauf des Meßvorganges und der Eigenschwingungsdauer T_0 des Schwingers herstellt:

$$\tau = \frac{2 \pi}{T_0} \cdot t = \omega_0 \cdot t \quad (4)$$

Wird noch das äußere Drehmoment M_E durch den Sollwert Z des Ausschlages ersetzt, so erhalten wir das Wiedergabegesetz für Drehpulschwinger:

$$y''(\tau) + 2 \alpha y'(\tau) + y(\tau) = Z(\tau) \quad (5)$$

Der vom Schwinger angezeigte Wert y deckt sich demnach nur dann mit dem wahren Augenblickswert der Meßgröße bzw. dem entsprechenden Ausschlag Z , wenn $y'' + 2 \alpha y' = 0$ ist. Dies ist nur selten der Fall.

Die praktische Bedeutung des Wiedergabegesetzes beruht nun auf der Möglichkeit, die zu erwartende Entstellung von Lichtstrahloszillogrammen beurteilen und gegebenenfalls sogar berichtigen zu können.

Beispiel: Eine rein sinusförmige Meßgröße:

$$\begin{aligned} A_0 &= \text{Sollwert der Amplitude} \\ \omega &= \text{Kreisfrequenz des eingepprägten Wechselstromes} \end{aligned}$$

dann gilt: $Z(t) = A_0 \sin \omega t$ bzw. mit (4) (6)

$$Z(\tau) = A_0 \sin \frac{\omega}{\omega_0} \tau \quad (7)$$

Wir bezeichnen $\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0} = \chi$ das Frequenzverhältnis bei Sinusform (8)

und erhalten das Wiedergabegesetz in folgender Form:

$$y'' + 2 \alpha y' + y = A_0 \sin \chi \tau$$

Die Gleichung der erzwungenen Dauerbewegung des Schwingers lautet dann:

$$y = A \sin \chi (\tau - \tau^*) \quad (9)$$

A = tatsächliche Amplitude

τ^* = Verzögerungszeit zwischen Sollwert und angezeigtem Wert.

Wie aus Gleichung (9) hervorgeht, vollführt der Schwinger ebenfalls eine sinusförmige Schwingung. Das Oszillogramm ist formgetreu. Aber die Amplitude und Phasenlage weichen vom wahren Vorgang ab.

Differentialgleichung: $\Theta \ddot{\varphi} + b \dot{\varphi} + D \varphi = M_E(t)$

Ausschlag auf dem Registrierpapier: $y = 2 n L \varphi$
(L Lichtzeigerlänge, n Berechnungsindex des Linsenfensters)

Sollwert des Ausschlages: z

Auf die Eigenschwingungsdauer bezogene Zeit:
 $\tau = \omega_0 t = \sqrt{\frac{D}{\Theta}} t$

Dämpfungskonstante: b

Dämpfungsgrad: $\alpha = \frac{b}{2 \cdot \omega_0 \cdot \Theta}$

Wiedergabegesetz:

$$y''(\tau) + 2\alpha y'(\tau) + y(\tau) = z(\tau)$$

Beispiel: $z(\tau) = A_0 \sin \chi \tau$, $y(\tau) = A \sin \chi(\tau - \tau^*)$

Amplitudenkurve $|G(i\omega)| = \frac{A}{A_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-\chi^2)^2 + (2\alpha\chi)^2}}$

Phasenkurve $\varphi(\omega) = \tau^* = \frac{1}{\chi} \arctan \frac{2\alpha\chi}{1-\chi^2}$

3.3. Amplitudenfrequenzgang:

Das Verhältnis von $\frac{A}{A_0}$ für sinusförmige Meßgrößen errechnet sich aus:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-\chi^2)^2 + (2\alpha\chi)^2}} = M$$

M = Abbildungsmaßstab

Tragen wir M als Funktion des Frequenzverhältnisses χ auf, mit dem Dämpfungsgrad α als Parameter, so erhalten wir den Amplitudenfrequenzgang.

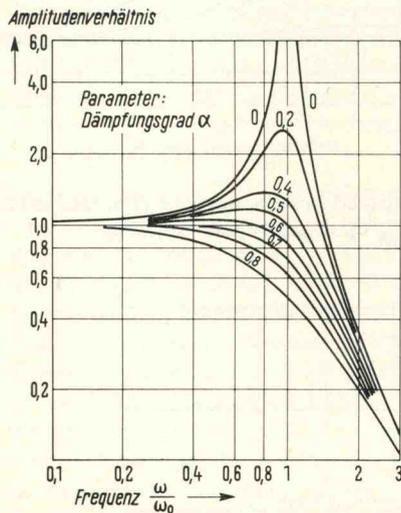


Bild 13 Amplitudenkurven bei verschiedenen Dämpfungsgraden

$$|G(i\omega)| = \frac{A}{A_0} = a = \frac{1}{\sqrt{(1-\chi^2)^2 + (2\alpha\chi)^2}}$$

Mit $\frac{A_0 - A}{A_0} = r$ und $2\alpha^2 - 1 = \beta$:

$$\chi = \sqrt{\beta + \sqrt{\beta^2 + \frac{2r-r^2}{(1-r)^2}}}$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ gibt } \beta = 0$$

$$\chi = 4 \sqrt{\frac{2r-r^2}{(1-r)^2}}$$

$$r \ll 1: \quad \chi \approx 1,19 \sqrt[4]{r} \quad r \approx 0,5 \chi^4$$

r [%]	1	2	3	5	10
χ [%]	38	45	50	57	70

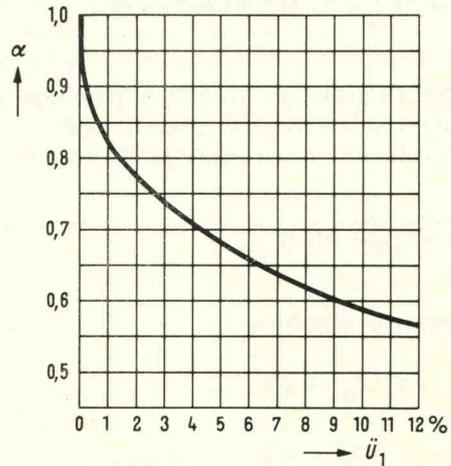


Bild 14 Überschwingung \ddot{U}_1 in Abhängigkeit vom Dämpfungsgrad α

Wir sehen, daß die Kurve $\alpha = 0,7$ am wenigsten von dem Sollwert abweicht.

$$\alpha = 0,707 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Andere Firmen dämpfen ihre Schwinger auf $\alpha = 0,64$.

3.4. Frequenzgang der Verzögerung:

Aus der Beziehung

$$\tau^* = \frac{1}{\chi} \arctan \frac{2\alpha\chi}{1-\chi^2}$$

erhalten wir den Frequenzgang der Verzögerung für sinusförmige Vorgänge.

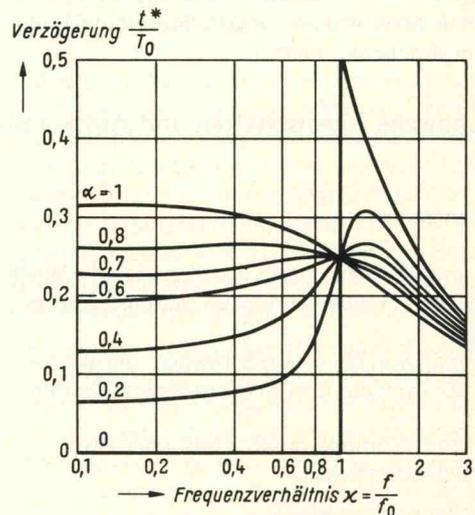


Bild 15 Frequenzgang der Verzögerung
Parameter: Dämpfungsgrad α

Auf der Ordinate in Bild 15 ist aufgetragen:

$$\frac{Z^*}{T_0} = \frac{\tau^*}{2\pi}$$

Auch hier ist der Dämpfungsgrad $\alpha = 0,7$ verhältnismäßig günstig.

Angestrebt wird eine gleichmäßige Verzögerungszeit unabhängig von der Meßfrequenz. Betreibt man Schwinger verschiedener Eigenfrequenz f_0 mit der gleichen Meßfrequenz, so tritt eine Phasenverschiebung zwischen beiden Schwingern auf. Die Größe der Phasenverschiebung kann aus dem Diagramm Bild 15 entnommen werden

Zum Beispiel:

Sinusförmige Meßfrequenz von 50 Hz (z. B. Wechselstrom) wird mit einem S 120 (120 Hz) und einem S 2000 (2000 Hz) aufgenommen. Beide Schwinger haben $\alpha = 0,707$.

$$\text{S 120: } \frac{f}{f_0} = \frac{50}{120} = 0,42$$

Aus dem Diagramm zu entnehmen:

$$\frac{t^*}{T_0} = t^* \cdot f_0 = 0,23$$

$$t^* = \frac{0,23}{f_0} = \frac{0,23}{120} = 1,9 \text{ ms}$$

$$\text{S 2000: } \frac{f}{f_0} = \frac{50}{2000} = 0,025$$

$$t^* \cdot f_0 = 0,225$$

$$t^* = \frac{0,225}{2000} = 0,1 \text{ ms}$$

$$1,9 - 0,1 = 1,8 \text{ ms}$$

Die Phasenverschiebung beträgt 1,8 ms.

Bei 10/ms Papiargeschwindigkeit wären es 18 mm Spitzendifferenz. Dieses Beispiel zeigt, daß die Wahl der richtigen Eigenfrequenz eine große Bedeutung für die Wiedergabe hat. Andererseits darf man jetzt nicht in den Fehler verfallen, prinzipiell nur hochfrequente Schwinger zu verwenden, da dann in vielen Fällen die Schwinger keine ausreichende Empfindlichkeit haben.

4. Meßtechnische Eigenschaften und Aufbau der Schwinger

4.1. Dämpfungsarten

Die Kurven und Beispiele zeigen deutlich, daß die Wiedergabetreue von der Frequenz und vom richtigen Dämpfungsgrad abhängt.

Wie erreicht man nun bei einem Schwinger die genaue Dämpfung? Er kann auf drei Arten gedämpft werden:

- 4.1.1. elektrodynamisch durch Kreis- oder Abschlußwiderstände,
- 4.1.2. mechanisch mittels Öl,
- 4.1.3. indem man eine Kombination von elektrodynamischer und Öl-Dämpfung vornimmt.

Zu 4.1.1.: Die elektrodynamische Dämpfung beruht auf der in dem Schwinger durch das konstante permanente Magnetfeld während der Bewegung induzierten Spannung. Man erhält den Ausdruck:

$$\alpha_{el} = \frac{(BnF)^2}{2\omega_0 \Theta (R_i + R_M)}$$

- B Induktion im Luftspalt
- n Windungszahl
- F Spulenfläche

Wird die Eigenfrequenz des Meßwerkes erhöht, muß bei gleichbleibender Bauform des Schwingers der Abschlußwiderstand R_M verkleinert werden, um den gleichen Dämpfungsgrad beizubehalten. Man nähert sich dann einem Grenzwert, der ungefähr bei 500 Hz liegt. Bis etwa 500 Hz können also die Schwinger elektrodynamisch gedämpft werden. Oberhalb dieser Frequenz muß der Schwinger zusätzlich mechanisch mittels Öl gedämpft werden.

$$\alpha_{oel} + \alpha_{el} = \frac{b}{2\omega_0 \Theta} + \frac{(BnF)^2}{2\omega_0 \Theta (R_i + R_M)}$$

Bei höherfrequenten Schwingern nimmt der Einfluß der elektrodynamischen Dämpfung mehr und mehr ab und der der Öldämpfung zu.

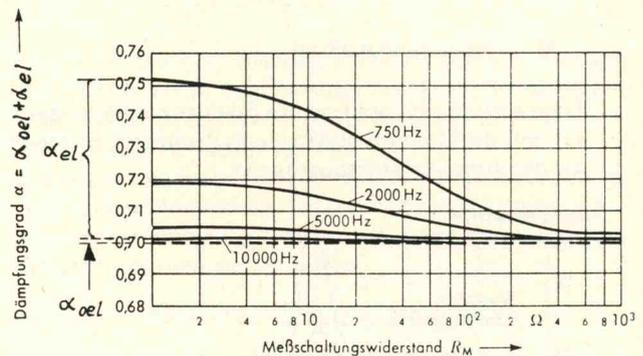
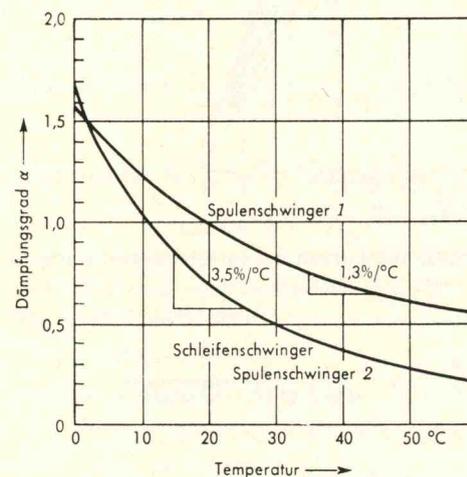


Bild 16 Dämpfungsgrad in Abhängigkeit vom Meßschaltungswiderstand R_M für ölgedämpfte Schwinger



- 1 mit Siliconöl
- 2 mit Oppanol-/Dekalinöl

Bild 17 Temperaturabhängigkeit des Dämpfungsgrades

4.2. Anforderungen an das Dämpfungöl

Welche Eigenschaften muß das Öl besitzen?

1. Für die Fertigung muß die Viskosität des Öles leicht durch Mischen den Schwingertypen angepaßt werden können.
2. Ferner muß es chemisch neutral sein zur Vermeidung von Schäden am System.
3. Keine elektrische Leitfähigkeit.
4. Gute Wärmeleitfähigkeit.
5. Die Viskosität muß bei gegebener Temperatur zeitlich konstant sein.
6. Weitgehendst temperaturunabhängig (kleiner Temperaturkoeffizient).
7. Glasartige Beschaffenheit (durchsichtig).

4.3. Konstruktive Durchführung der Öldämpfung

Bei den meisten Spulenschwingertypen wird ein Ölrohr, welches einen Teil des schwingenden Organes umschließt, mit einem Öl, dessen Zähigkeit der Eigenfrequenz des Schwingers entspricht, gefüllt. Diese Ölfüllart hat den Vorteil, daß die Justierung der Dämpfung durch unterschiedlich hohen Ölstand im Ölrohr erfolgen und somit ein geforderter Dämpfungsgrad exakt eingestellt werden kann.

Bei den Schleifenschwingern und seit kurzer Zeit auch wieder bei einigen Spulenschwingerarten wird das Meßwerk ganz mit Öl gefüllt, so daß das gesamte bewegliche Organ in Dämpfungöl schwingt.

4.4. Das anomale Dämpfungsverhalten ölgedämpfter Spulenschwinger

Die meisten z. Z. auf dem Markt angebotenen hochfrequenten Spulenschwinger sind mit Silikonöl gefüllt und mit einer Ölrohrdämpfung ausgerüstet. Diese Spulenschwinger zeigen bei Eigenfrequenzen über 3000 Hz bei der Wiedergabe schnell veränderlicher Vorgänge erhebliche anomale Verzerrungen.

Besonders deutlich sind diese Effekte bei der Registrierung eines Rechtecksprunges zu erkennen: einer kleinen Überschwingung folgt eine sehr große Unterschwingung, wobei die Spitze der ersten Überschwingung unter dem Endwert des Ausschlages liegt. Das bewegliche Organ des Schwingers kriecht noch nach und nähert sich exponentiell der Endlage, die dem Sollwert der konstanten Meßgröße entspricht. Bei einem normalen Einschwingungsvorgang mit einem Dämpfungsgrad von $\alpha = 0,7$ beträgt die Überschwingung 4,3 % des Gesamtausschlages. Die darauffolgende Unterschwingung ist kaum wahrnehmbar. Dämpft man den Schwinger besonders schwach, um die Spitze der ersten Überschwingung über den Endwert des Ausschlages zu heben, so erhält man unzulässige Resonanzüberhöhungen bei der Aufzeichnung des Amplitudenfrequenzganges.

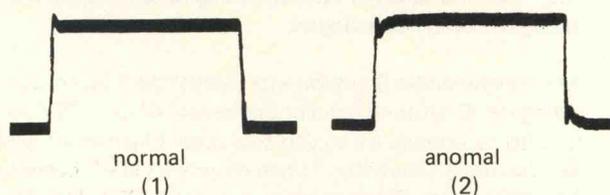
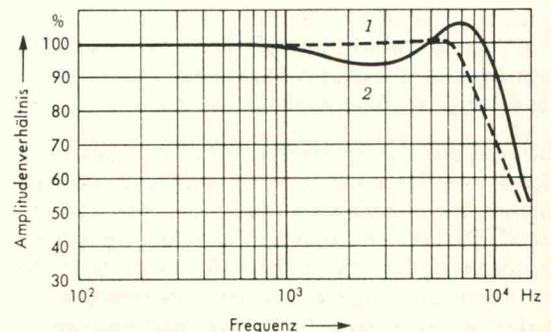


Bild 18 Dämpfungsverhalten schnell-schwingender Galvanometer

In dem Oszillogramm des Rechtecksprunges folgt der ersten Über- und Unterschwingung eine starke Verzitterung der Registrierlinie, welche erst nach einer relativ langen Zeit abklingt. Die Verzitterungen können von Nickschwingungen des Systems herrühren, die durch die einseitige Systemdämpfung begünstigt werden. Andererseits ist zu vermuten, daß auch hier die elastisch-viskosen Eigenschaften des Öles eine Rolle spielen. Das anomale Dämpfungsverhalten zeigt sich auch deutlich im Amplitudenfrequenzgang des Schwingers: die Amplitude fällt in Frequenzbereichen bei etwa 30 bis 60 % der Eigenfrequenz des ungefüllten Schwingers erheblich ab, bei denen normal gedämpfte Schwinger, z. B. elektromagnetisch gedämpfte, sinusförmige Meßgrößen fehlerfrei wiedergeben. An diesem Amplitudenabfall schließt sich eine Resonanzüberhöhung an, welche den nutzbaren Frequenzbereich (-3 dB Amplitudenabfall) weit über die Eigenfrequenz des Schwingers drängt.



- 1 Großer Spulenschwinger 10 000 Hz
- 2 Spulenschwinger 10 000 Hz mit Ölrohrdämpfung

Bild 19 Abhängigkeit der Stromempfindlichkeit von verschiedenen Meßfrequenzen.

Außer der Frequenz wirkt sich auch die Schreibbreite auf das Dämpfungsverhalten ungünstig aus. Mit wachsender Schreibbreite nimmt die Umfangsgeschwindigkeit des schwingenden Organes zu. Eine Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit begünstigt aber ein elastisch-viskoses Verhalten des Dämpfungöles. So kann z. B. ein Spulenschwinger mit einer Eigenfrequenz von 3000 Hz einen schnellveränderlichen Vorgang bei einer kleinen Schreibbreite noch fast unverfälscht registrieren, während er bei größerer Schreibbreite den gleichen Vorgang stark verzerrt wiedergibt.

4.5. Das elastisch viskose Verhalten des Dämpfungöles

Mehrere synthetische Flüssigkeiten – so auch das Silikonöl – zeigen bei ihrer Verwendung als Dämpfungöl gegenüber idealen Flüssigkeiten ein erheblich abweichendes Verhalten. Die Ursache hierfür ist in der Struktur des Dämpfungöles zu suchen. Das Silikonöl ist aus linearen Makromolekularketten aufgebaut. Diese Fadenmoleküle sind miteinander verfilzt, wodurch ihre Bewegungsfreiheit gehemmt wird. Mit zunehmender Viskosität werden die Molekülketten länger, die Verfilzung inniger und das Molekulargewicht größer und damit das abweichende Verhalten. Durch diese Molekularstruktur verliert das Newton'sche Reibungsgesetz bei diesen Flüssigkeiten seine Gültigkeit. Schubspannung und Geschwindigkeitsgefälle sind nicht mehr proportional. Außerdem spielen noch Relaxationserscheinungen eine Rolle in der Art, daß sich elastische Eigenschaften den viskosen der Flüssigkeit überlagern. Mit zunehmender Viskosität wächst die Relaxationszeit und damit das elastische Verhalten.

Diese Eigenschaften bedeuten für die Spulen- und Schleifschwinger:

1. Die dynamische Viskosität nimmt mit zunehmender Frequenz des Schwingers bei dessen Beanspruchung des Öles auf Scherschwingungen ab.
2. Mit zunehmender Frequenz wachsen die elastischen Eigenschaften der Flüssigkeiten und es tritt eine allmähliche Erhöhung des rückstellenden elastischen Drehmomentes des Schwingers auf, wodurch die Resonanzfrequenz über die Eigenfrequenz des ungedämpften Meßwerkes hinauswachsen kann. Gleichzeitig nimmt die Stromempfindlichkeit durch die zunehmende Rückstellkraft mit wachsender Frequenz ab.

4.6. Hochfrequente Meßwerke mit normalem Dämpfungsverhalten

Seit einigen Jahren hat die Firma Siemens AG eine neue Spulenschwingerserie unter der Bezeichnung "Großer Spulenschwinger" in ihrem Lieferprogramm.

Die Schwinger dieser Ausführung erlauben eine unverzerrte Wiedergabe der Meßvorgänge trotz eines großen Nutzfrequenzbereiches von 0 bis 15 000 Hz bei einem Amplitudenabfall von 3 dB. Das anomale Dämpfungsverhalten ist kann noch wahrnehmbar. In Bild 18 und 19 (gestrichelte Linie 1) sind zum Vergleich die Rechteckimpulse und Amplitudenfrequenzkurven des "großen Spulenschwingers", denen des Schwingers von gleicher Frequenz, aber mit Ölrohrfüllung gegenübergestellt. Bei diesem Schwinger ist das gesamte Meßwerk mit Öl gefüllt. Hierdurch wird die Reibungsfläche zwischen dem beweglichen Organ und dem Dämpfungsoil erheblich vergrößert. Außerdem wirkt der Spiegel wie ein Dämpfungsfächer. Auf diese Weise kann Öl niedriger Viskosität verwendet werden, bei welchem die elastischen Eigenschaften noch sehr klein sind. Da manche Öle, besonders das Silikonöl, zu starkem Kriechen neigen, wurde ein besonderes, das bewegliche Organ und den Magnetkreis umhüllendes Gehäuse konstruiert, das mit einem Deckel öldicht verschraubt werden kann. Gleichzeitig dient es als magnetischer Rückschluß für den Magnetkreis. Auf diese Weise werden Klebestellen vermieden, die notgedrungen bei den kleinen Spulenschwingern durch deren Bauform nicht umgangen werden können.

Die Erweiterung des Nutzfrequenzbereiches über die Eigenfrequenz des ungedämpften Meßwerkes entfällt durch das Fehlen übermäßiger Elastizität des Öles. Um trotzdem den gleichen Frequenzbereich wie vorher ausnutzen zu können, muß das Rückstellmoment des beweglichen Organes erhöht werden, was zu einer Abnahme der Stromempfindlichkeit von etwa 50 % führt. Da aber der gesamte Schwinger mit Öl gefüllt ist, wird der Raum zwischen Spiegel und Linse mit Flüssigkeit ausgefüllt, und es ergibt sich auf Grund der geänderten Lichtbrechungsverhältnisse eine Erhöhung der Empfindlichkeit etwa um den Faktor 1,5. Dem noch verbleibenden Restverlust kann durch Verkleinerung des Luftspaltes zwischen den Polschuhen begegnet werden, da ein Ölrohr bei dieser Öfüllart hinfällig wird. Weitere unliebsame Effekte konnten nicht festgestellt werden, wie z. B. Schlierenbildung zwischen Spiegel und Linse durch Eigenerwärmung der Drehspule bei max. Belastung und Verwirbelung des Öles in Spiegelumgebung bei hohen Frequenzen und eine daraus resultierende optische Beeinflussung der Schriftqualität bei der Registrierung.

4.7. Die obere Frequenzgrenze der Schwinger

Die obere Frequenzgrenze wird bei den Schwingern durch ihre Eigenerwärmung festgelegt. Deshalb muß der Leistungsverbrauch

$$N_e = J^2 \cdot R_i \sim \frac{\omega_0^4 \cdot \Theta^2}{(B \cdot n \cdot F)^2}$$

so klein wie möglich gehalten werden.

Der Leistungsverbrauch im Meßwerk steigt mit der vierten Potenz der Eigenfrequenz und mit dem Quadrat des Trägheitsmomentes. Die Systeme müssen also möglichst schlank und trägheitsarm gebaut sein. Andererseits wird gerade für hohe Eigenfrequenzen ein relativ großes Rückstellmoment und damit ein stabiler Aufbau des beweglichen Organes notwendig, was schließlich einer weiteren Trägheitsverkleinerung eine Grenze setzt.

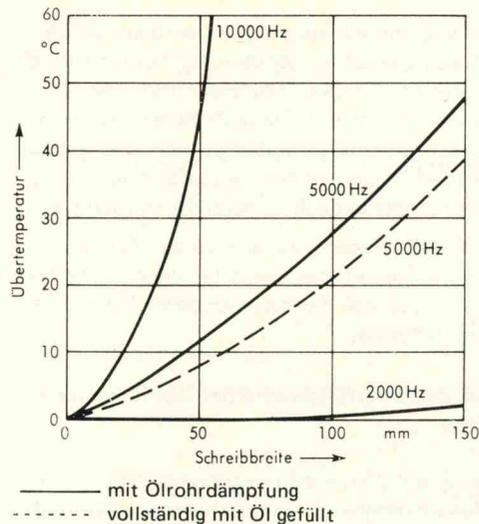


Bild 20 Übertemperatur in Abhängigkeit von der Schreibbreite

Das Bild 20 (durchgezogene Linie) zeigt die Übertemperatur infolge der Eigenerwärmung des schwingenden Systems über der Schreibbreite von Spulenschwingern mit Ölrohrdämpfung. Etwa günstigere Schreibbreiten werden mit Schwingern erzielt, deren Drehspulen vollständig mit Öl umgeben sind und deren Ölvolumen, verglichen mit dem Volumen des beweglichen Organes, ein Vielfaches beträgt. Bei diesen Schwingern leitet das Öl als guter Wärmeleiter die Eigenerwärmung des Systems ab. Das Bild 20 (gestrichelte Linie) veranschaulicht die Übertemperatur eines Schwingers, der in seinem Aufbau genau dem des 500-Hz-Schwingers mit Ölrohrfüllung entspricht, nur mit dem Unterschied, daß sein bewegliches Organ ganz von Öl umschlossen war.

4.8. Verfälschung der Aufzeichnung durch Eigenerwärmung des Spulenschwingers

Mit zunehmender Schreibbreite wächst die Eigenerwärmung der Drehspule bei den Spulenschwingern. Wie aus Bild 20 zu ersehen ist, macht sich diese Eigenschaft gerade bei den hochfrequenten Typen besonders stark bemerkbar, bei solchen Schwingern also, die mit Öl gedämpft werden müssen. Bei allen hochfrequenten Spulenschwingern wirkt die Dämpfungsflüssigkeit auf die Spule der

Schwinger. Bei einer Erwärmung der Spule überträgt sich die Wärme auf das sie umgebende Öl und beeinflusst dessen Viskosität. Daher nimmt mit zunehmender Schreibbreite die Dämpfung ab.

Außer den angeführten Faktoren hängt die Erwärmung des Öles auch von der Belastungsart des Schwingers ab. Bei einer Beaufschlagung des Schwingers mit Wechselstrom, dessen Frequenz ≥ 5 Hz ist, oder mit Gleichstromimpulsen, deren Frequenz ≥ 10 Hz ist, ist eine Dämpfungsänderung bei mittleren Schreibbreiten (halbe maximale Belastung des Schwingers) kaum noch sichtbar. Bei diesen Frequenzen wird das Öl schon so heftig verwirbelt, daß eine ausreichende Wärmeableitung im Öl stattfindet.

Der Firma Siemens AG gelang es bei der Konstruktion ihres neuen "Großen Spulenschwingers", eine Dämpfungsanordnung zu entwickeln, bei welcher der Dämpfungsanteil, der durch die Spulenreibung im Öl entsteht, nur einen Bruchteil der gesamten Dämpfungsmomente darstellt. Auf diese Weise wird der Einfluß der Spulenerwärmung auf die Dämpfung der Schwinger bei zunehmender Schreibbreite kleingehalten.

4.9. Elastische, plastische Verformungen

Die Spulen der Schwinger werden aus Gründen der Stabilität mit Kunstharz ausgefüllt. Aus dem gleichen Grunde werden ebenfalls die Verbindungsstellen von Spule zu Spanndraht mit Kunstharz überzogen.

Bei großen Schreibbreiten erreicht die Eigenerwärmung der Spule Temperaturen, bei denen der Kunstharz seine feste Konsistenz verliert und plastische Eigenschaften annimmt. Die Folge auf die Meßeigenschaft des Schwingers ist unzulässige Vergrößerung der Amplitude bei längeren Gleichstromausschlägen (größer 1 Minute). Daher haben wir die Eigenerwärmung durch die max. Stromangabe begrenzt. Bei diesem Strom treten reversible Verformungen auf, die bei Dauerbelastungen (< 5 Minuten) kleiner als 1 % sind.

All diese Verzerrungen, Erwärmungen und andere unliebsame Effekte zeigen, daß die heutige Technik trotz neuer Werkstoffe, kostspieliger Präzisionswerkzeuge und ausgeklügelter Arbeitsmethoden mit den derzeitigen Bauformen der Spulenschwinger nur noch auf Kosten der Schreibbreite eine Erhöhung der Nutzfrequenz erreichen kann.

