

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 68

Untersuchung mechanisch-elektrischer Regelkreise zur
seismischen Messung mechanischer Schwingungen

von

Dr. W. HEUSLER

Berlin
1 9 6 3

H68

Untersuchung mechanisch-elektrischer Regelkreise zur
seismischen Messung mechanischer Schwingungen.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit die Eigenschaften eines seismischen Schwingungsaufnehmers durch einen mechanisch-elektrischen Regelkreis verändert werden können. Durch geeignete, auf elektrischem Wege durchzuführende mathematische Operationen können Federzahl, Masse und Dämpfung verändert werden. Die Untersuchungen erstrecken sich im wesentlichen darauf, auf diese Weise die Eigenfrequenz des Schwingungsaufnehmers möglichst weit herabzusetzen, um auch bei tiefen Frequenzen eine wegproportionale Anzeige zu erhalten. Gleichzeitig soll durch die Massenänderung die Relativbewegung zwischen Masse und Gehäuse verkleinert werden, um die bei tiefen Frequenzen auftretenden größeren Schwingwege noch messen zu können.

Unter Beachtung gewisser Stabilisierungsmaßnahmen gelingt es, eine Aenderung der Masse und der Federzahl jeweils um den Faktor 100 zu erreichen. Die Dämpfung kann dabei immer auf den hinsichtlich Amplituden- und Phasenverzerrung günstigsten Wert eingestellt werden. Die tiefste Eigenfrequenz beträgt 0,22 Hz. Die Relativbewegung wird dabei auf 1/100 reduziert. Bis zu einer Frequenz von 150 Hz ist der Amplitudenfehler kleiner als $\pm 5\%$, der Phasenfehler kleiner als 5° .

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. W.Heusler

(Dr. W. Heusler)

Der Abteilungsleiter

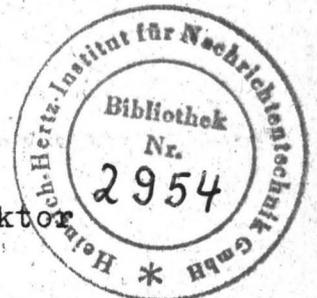
gez. Matthieu

(Prof. Dr.phil. P.Matthieu)

Der Institutsdirektor

gez. Gundlach

(Prof. Dr.-Ing. F.W. Gundlach)



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Theorie eines seismischen Schwingungsaufnehmers mit elektrischer Rückführung	2
3. Mechanisch-elektrische Wandlung und technische Ausführung des mechanischen Systems	6
4. Dimensionierung des Regelkreises und Eichung	10
4.1 Federänderung	
4.2 Massenänderung	
4.3 Dämpfungsänderung	
4.4 Tabellen zur Einstellung von Eigenfrequenz und Dämpfung	
5. Messung von Eigenfrequenz und Dämpfungsmaß	17
6. Betrachtungen zu Meßgenauigkeit und Stabilität	20
6.1 Grundsätzliche Ueberlegungen	
6.2 Massenänderung	
6.21 Forderungen an die Schleifenverstärkung des offenen Regelkreises	
6.22 Differenzierverstärker	
6.23 Frequenzgang des mechanischen Systems	
6.24 Maßnahmen zur Stabilisierung des Regelkreises bei Massenänderung	
6.3 Federänderung und Dämpfungsänderung	
6.4 Empfindlichkeit, Aussteuerungsbereich und Anzeigefehler	
6.5 Praktische Erprobung des Meßgerätes auf einem Schwingtisch	
7. Schaltungstechnik	41
7.1 Differenzierverstärker	
7.2 Endverstärker	
7.3 Regeleinheit	
8. Literaturverzeichnis	49

1. Einleitung

Zur Absolutmessung mechanischer Schwingungen bedient man sich bisher rein mechanischer seismischer Systeme mit elektrischer Anzeige. Für die Schwingwegmessung werden tief abgestimmte, für die Beschleunigungsmessung möglichst hoch abgestimmte Systeme verwendet. In den Technischen Berichten Nr. 51 und Nr. 66 wurden die technischen Möglichkeiten diskutiert, auf diese Weise sehr tieffrequente mechanische Schwingungen ($\gg 0,2$ Hz) zu messen. Dabei handelte es sich erstens um die Erstellung sehr tief abgestimmter mechanischer Systeme ($f_0 \approx 0,2$ Hz) und zweitens um die Entwicklung eines Beschleunigungsaufnehmers und eines Doppel-Integrators für tiefe Frequenzen und sehr kleine Beschleunigungen. Beide Verfahren haben Nachteile, die jedoch sehr verschiedener Natur sind.

Ein tiefabgestimmtes System hat oberhalb der Eigenfrequenz einen Übertragungsfaktor von 1, d.h. die Relativbewegung zwischen seismischer Masse und Gerätegehäuse ist gleich der Absolutbewegung. Da bei tiefen Frequenzen sehr große Schwingungsamplituden (bis zu einigen cm) auftreten, muß ein entsprechend großer linearer Federweg vorhanden sein. Demzufolge werden die Geräte groß und unhandlich und sind als Betriebsmeßgeräte nicht zufriedenstellend.

Bei Beschleunigungsaufnehmern ist die Empfindlichkeit umgekehrt proportional dem Quadrat der Eigenfrequenz. Wegen der sehr kleinen Beschleunigung bei tiefen Frequenzen muß die Eigenfrequenz des Systems ziemlich klein sein. Dadurch wird der Meßbereich frequenzmäßig stark eingeschränkt. Hinzu kommen die Nullpunktschwierigkeiten bei der zweifachen Integration.

Um die genannten Nachteile zu vermeiden, wurde ein neuer Weg beschritten, der den Vorteil der tiefabgestimmten Systeme - die direkte Wegmessung - ausnützt, dabei aber die dort genannten Schwierigkeiten vermeidet. Der mechanische Schwinger wird in einen mechanisch-elektrischen Regelkreis eingebaut, der es gestattet, Eigenfrequenz und Dämpfung des Systems in weiten Grenzen zu verändern. Gleichzeitig kann dabei der

Uebertragungsfaktor so verändert werden, daß die Relativbewegung der Masse im linearen Bereich des Feder-Masse-Systems liegt.

2. Theorie eines seismischen Schwingungsaufnehmers mit elektrischer Rückführung

Das Verhalten eines rein mechanischen federgefesselten Schwingungsaufnehmers mit relativer Dämpfung (seismischer Schwingungsaufnehmer) unter dem Einfluß einer am Gerätefußpunkt eingeleiteten mechanischen Schwingung $u(t)$ beschreibt folgende Differentialgleichung:

$$m\ddot{r} + b\dot{r} + cr = -m\ddot{u} \quad (1)$$

c , m und b sind die aus Bild 1 zu entnehmenden mechanischen Konstanten, $r(t)$ ist die der Messung zugängliche Relativbewegung zwischen seismischer Masse und Gerätegehäuse. Die Lösung dieser Differentialgleichung führt zu den bekannten Gleichungen für die Vergrößerungsfunktion und den Phasenwinkel eines seismischen Systems. Die Eigenschaften eines solchen rein mechanischen Schwingungsaufnehmers können auf elektrischem Wege verändert werden, wenn das Feder-Masse-System in einen Regelkreis eingebaut wird, wie es in Bild 1 dargestellt ist. Das Ziel ist, durch entsprechende elektrische bzw. elektromagnetische Kräfte, die als Folge einer Relativbewegung $r(t)$ auftreten, die mechanischen Konstanten m , c und b zu verändern, so daß die charakteristischen Größen des Schwingers (Eigenfrequenz und Dämpfung) nicht mehr ausschließlich von den mechanischen Werten abhängen.

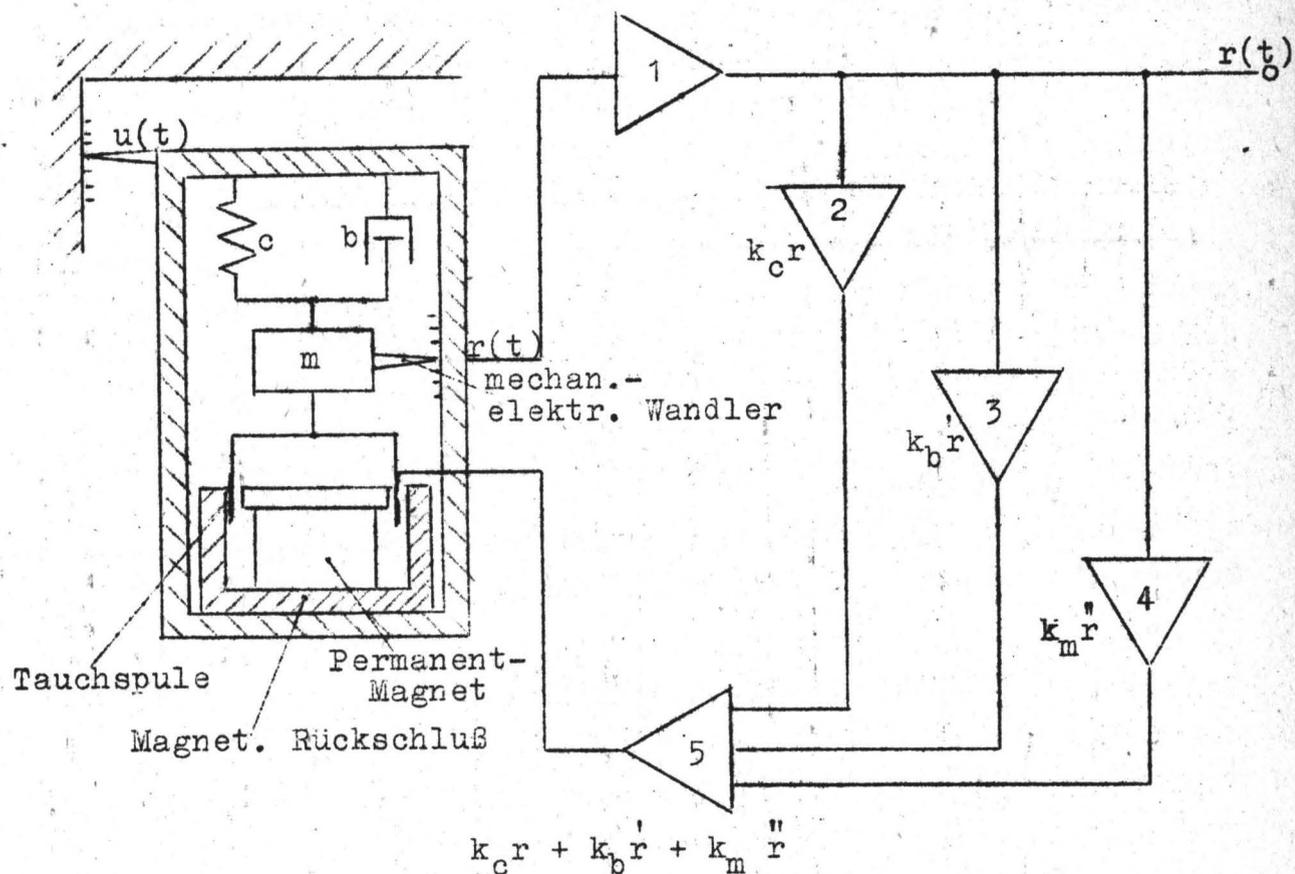


Bild 1: Prinzip-Schaltbild eines mechanisch-elektrischen Regelkreises zur Veränderung von m , c und b

Ursprung für die zusätzlichen Kräfte ist die Relativbewegung $r(t)$, die ja als einzige Größe gemessen werden kann, und die auch in der Differentialgleichung (1) auftritt. Aus dieser Größe müssen durch entsprechende mathematische Operationen die gewünschten Kräfte erzeugt und dem System zugeführt werden. Dazu ist für die Federkraft eine Multiplikation mit einem konstanten einstellbaren Faktor nötig, für die Dämpfungskraft eine einfache Differentiation und eine Multiplikation mit einem konstanten Faktor und für die Massenkraft eine zweifache Differentiation und eine Multiplikation mit einem konstanten Faktor. Für die einzelnen Größen muß evtl. noch eine Vorzeichenumkehr möglich sein, und die drei Größen müssen zum Schluß addiert werden.

Die Relativbewegung $r(t)$ kann z.B. mit einem trägerfrequenz-
gespeisten induktiven Wegaufnehmer gemessen werden. Dann ist
der Verstärker 1 durch die Trägerfrequenz-Meßbrücke gegeben.
Eine Vorzeichenumkehr ist der Einfachheit halber nicht in dem
Prinzip-Bild eingezeichnet.

Ausgehend von der Differentialgleichung (1) können die neuen
Kräfte nun einfach als Zusatzglieder aufgenommen werden. Sie
addieren sich direkt zu den mechanischen Kräften. Die Dif-
ferentialgleichung des gesamten Regelkreises lautet dann:

$$(m + k_m)\ddot{r} + (b + k_b)\dot{r} + (c + k_c)r = -m\ddot{u} \quad (2)$$

k_m , k_b und k_c können zunächst positiv oder negativ sein. Durch
Division mit $(m + k_m)$ erhält man aus Gleichung (2):

$$\ddot{r} + \frac{b + k_b}{m + k_m}\dot{r} + \frac{c + k_c}{m + k_m}r = -\frac{m}{m + k_m}\ddot{u}$$

Mit den üblichen Abkürzungen:

$$\omega_e^2 = \frac{c + k_c}{m + k_m}$$

$$D = \frac{\delta}{\omega_e} = \frac{b + k_b}{2(m + k_m)\omega_e} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{\omega}{\omega_e}$$

erhält man schließlich die Differentialgleichung:

$$\ddot{r} + 2\omega_e D\dot{r} + \omega_e^2 r = -\frac{m}{m + k_m}\ddot{u} \quad (4)$$

Für eine harmonische Störfunktion $u = U_0 \cos \omega t$ existiert ei-
ne eindeutig bestimmte partikuläre harmonische Lösung dieser
Differentialgleichung:

$$r = R_0 \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (5)$$

Dabei ist R_0 der Amplitudengang und ε der Phasengang des Uebertragungssystems:

$$R_0 = \frac{m}{m+k_m} U_0 \frac{\eta^2}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} = \frac{m}{m+k_m} U_0 V_1 \quad (6)$$

$$\operatorname{tge} \varepsilon = \frac{2D\eta}{1-\eta^2} \quad (7)$$

V_1 stellt die übliche Vergrößerungsfunktion eines seismischen Systems dar, wobei η und D nach Gleichung (3) durch die mechanischen und elektrischen Eigenschaften gegeben sind. Für $\omega \gg \omega_0$ wird $V_1 = 1$. Bei einem rein mechanischen System wäre dann auch $R_0 = U_0$; d.h. Relativbewegung = Absolutbewegung. Durch den elektrischen Kreis hat man nun die Möglichkeit, den Abbildungsmaßstab (Uebertragungsfaktor) verschieden von 1 zu machen und so dem jeweiligen Meßproblem anzupassen. Für langsame Schwingungen großer Amplituden kommt es darauf an, die Relativbewegung kleiner als die Absolutbewegung zu machen. Das erreicht man mit einem entsprechend großen positiven k_m . Dadurch wird erstens die Eigenfrequenz und zweitens der Uebertragungsfaktor herabgesetzt. Das ist der entscheidende Vorteil gegenüber dem mechanischen tief abgestimmten System.

Aus den Gleichungen (3) ersieht man, daß mit Hilfe der durch die elektronische Schaltung hergestellten Größen k_c und k_m die Eigenfrequenz verändert werden kann. Es ist:

$$\omega_e = \sqrt{\frac{c + k_c}{m + k_m}} \quad (8)$$

Um die Eigenfrequenz herabzusetzen, muß k_m also positives und k_c negatives Vorzeichen haben. Aus Stabilitätsgründen muß $(c-k_c)$ immer leicht positiv sein. Man kann also ein relativ hoch abgestimmtes mechanisches System benutzen und je nach dem Meßproblem durch Einstellen von k_c und k_m oder beider Größen die gewünschten Eigenschaften einstellen.

Die Dämpfung kann ebenfalls auf elektrischem Wege eingestellt werden. Aus Gleichung (3) erhält man:

$$D = \frac{b+k_b}{2(m+k_m)\omega_e} = \frac{b + k_b}{2\sqrt{(m+k_m)(c+k_c)}} \quad (9)$$

Für ein bestimmtes Dämpfungsmaß D muß bei jeder Einstellung von k_c und k_m auch k_b entsprechend verändert werden. In manchen Fällen (bei kleinem k_m und großem negativen k_c) wird sogar eine Entdämpfung durch negatives k_c nötig sein. Durch negatives k_m bzw. positives k_c kann die Eigenfrequenz des Schwingungsaufnehmers auch erhöht werden, so daß dasselbe System auch als Beschleunigungsaufnehmer zu verwenden ist. Durch negatives k_m hat man außerdem eine Empfindlichkeitssteigerung, was für einen Beschleunigungsaufnehmer sehr wünschenswert ist.

3. Mechanisch-elektrische Wandlung und technische Ausführung des mechanischen Systems

Die mechanisch-elektrische Wandlung könnte grundsätzlich weg- oder geschwindigkeitsproportional ausgeführt werden. Lediglich die darauffolgenden mathematischen Operationen müssen entsprechend angeglichen werden. Die direkte beschleunigungsproportionale mechanisch-elektrische Wandlung, die evtl. zur Massenänderung wünschenswert wäre, existiert als physikalisches Prinzip nicht. Führt man die Beschleunigungsmessung auf eine Kraftmessung zurück, so ist ein zweites hochabgestimmtes System notwendig, dessen Eigenfrequenz irgendwo im Uebertragungsbereich des Regelkreises liegt. Oberhalb der Eigenfrequenz tritt aber eine Phasendrehung um 180° auf, so daß aus einer Gegenkopplung eine Mitkopplung wird und das System instabil werden kann. Bei sehr hoher Abstimmung, wie sie bei Piezogebern vorliegt, ist die Empfindlichkeit bei tiefen Frequenzen viel zu gering.

Eine geschwindigkeitsproportionale Wandlung kann durch eine Tauchspule, die im Feld eines Permanent-Magneten schwingt, hergestellt werden. Damit könnte die Dämpfung durch direkte Rückführung über einen Verstärker geändert werden, für eine Massenänderung müßte eine einmalige Differentiation und für eine Federänderung eine einmalige Integration durchgeführt werden. Nachteilig dabei ist, daß zur Federänderung eine Integration und zur Dämpfungsänderung eine Gleichspannungsverstärkung notwendig ist. Sowohl ein Gleichspannungsverstärker als auch insbesondere ein Integrationsverstärker hat eine Nullpunktsdrift. Da in den meisten praktischen Fällen die Feder durch eine Mitkopplung weicher gemacht wird, wirkt sich die Drift besonders stark aus. Hinzu kommt, daß bei tiefen Frequenzen bei diesem

Verfahren nur sehr geringe Spannungen zur Verfügung stehen, was wiederum einen sehr empfindlichen Gleichspannungsverstärker bzw. Integrationsverstärker erfordert. Ferner können statische Verlagerungen der Masse nicht gemessen werden. Gerade die Einstellung der mechanischen Nulllage ist jedoch für den Betrieb von entscheidender Wichtigkeit, wie später noch gezeigt wird.

Aus diesen Gründen wird eine wegproportionale Wandlung mit Hilfe eines trägerfrequenzgespeisten Induktivaufnehmers verwendet. Es kann eine handelsübliche Trägerfrequenz-Meßbrücke benutzt werden. Diese Brücken erlauben eine sehr empfindliche Wegmessung und haben infolge der Wechsellspannungsverstärkung trotzdem eine ausgezeichnete Nullpunktstabilität.

Für die Ausbildung des mechanischen Systems sind einige Gesichtspunkte maßgebend. Theoretisch könnte ein beliebiges Feder-Masse-System verwendet werden, das mit einem wegproportionalen mechanisch-elektrischen Wandler und einer Tauchspule zur Kraftübertragung ausgerüstet ist. Damit die elektrisch aufzubringenden Kräfte jedoch klein bleiben, muß auch die Masse des Systems möglichst klein sein. Bei Verwendung üblicher induktiver Wegaufnehmer für Wege bis zu ± 1 mm und Leichtbauweise beträgt das Gewicht des gesamten Schwingers einige Gramm. Da für die Federänderung ebenfalls das Verhältnis von elektrischer und mechanischer Federzahl (k_c/c) maßgebend ist, soll auch die Federkonstante c klein sein.

Die Eigenfrequenz muß dabei so liegen, daß die statische Durchsenkung der Masse im Schwerfeld keine Zerstörung oder bleibende Veränderung der Federn bewirkt. Die Durchsenkung ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Eigenfrequenz. Bei $f_0 = 20$ Hz beträgt die Durchsenkung 0,6 mm. Das ist ein Wert, der in der Größenordnung der zu erwartenden Maximalauslenkung im Betrieb liegt. Größere Amplituden können durch entsprechende Massenvergrößerung auf diesen Wert reduziert werden. Ein System mit einer Eigenfrequenz von etwa 20 Hz ist einerseits klein und transportsicher auszuführen und kann andererseits, wie gezeigt werden soll, auf elektrischem Wege noch genügend tief abgestimmt werden.

Höchste Anforderungen werden an die Federn gestellt. In den weitaus meisten Fällen wird man mit Hilfe des Regelkreises eine weichere Feder herstellen wollen. Für die Gesamtfederkonstante ist also zu schreiben:

$$c_{\text{ges}} = c - k_c \quad (10)$$

Nun ist die mechanische Federzahl aber streng genommen auch bei kleinen Auslenkungen nicht konstant, sondern gegeben durch:

$$c = c_0 + \Delta c(x) \quad (11)$$

c_0 ist der konstante, Δc der von der Auslenkung abhängige Anteil. Das spielt im normalen Anwendungsfall überhaupt keine Rolle, da $c_0 \gg \Delta c$ ist. Durch die elektrische Feder wird aber der Einfluß des Δc hervorgehoben, wenn $(c_0 - k_c) \rightarrow 0$ geht. Es ist dann:

$$c_{\text{ges}} = c - k_c = \underbrace{(c_0 - k_c)}_0 + \Delta c(x)$$

Neben der Verzerrung der Kurvenform bei Anregung unterhalb der Resonanzfrequenz tritt auch sehr leicht Instabilität ein, da die Gesamtfederkonstante bei bestimmten Auslenkungen auch negativ werden kann. Es gilt also, Federn zu verwenden, bei denen das Δc innerhalb der Auslenkungsgrenzen möglichst klein ist, denn dadurch ist die Grenze in der Federänderung gegeben. Wenn es gelingt, eine 100-fache Massenvergrößerung herzustellen, so beträgt die Maximalauslenkung bei Schwingungswerten von einigen Zentimetern nur einige Zehntel Millimeter.

Bei den Versuchen wurden zunächst kreisrunde durchbrochene Membranfedern verwendet. Sie lassen sich bei relativ kleinen Abmessungen mit einer kleinen Federkonstante herstellen und ergeben eine genaue Geradföhrung der Masse. Ferner sind sie wegen der Kreisform sehr gut zu montieren. Als Material wurde normale Federbronze bzw. eine Beryllium-Kupfer-Legierung von 0,1 mm Stärke verwendet. Die Federn zeigten jedoch **Aurch-**weg einen sehr starken Einfluß des nichtlinearen Anteiles, der schon bei Herabsetzung der Federkonstante auf 1/16 d.h. $\omega_e = \omega_0 / 4$ unzulässige Verzerrungen hervorrief. Hinzu kommt, daß diese Federn oberhalb von 100 Hz eine große Zahl von Eigenfrequenzen haben, die das Uebertragungsverhalten des mechanischen Systems

sehr stark verändern. Darauf soll bei der Behandlung der Stabilität bei Massenrückkopplung noch näher eingegangen werden.

Wesentlich bessere Eigenschaften zeigten einseitig eingespannte Blattfedern. Die endgültige Konstruktion wurde deshalb auch mit solchen Federn ausgeführt. Bild 2 zeigt den mechanischen Aufbau.

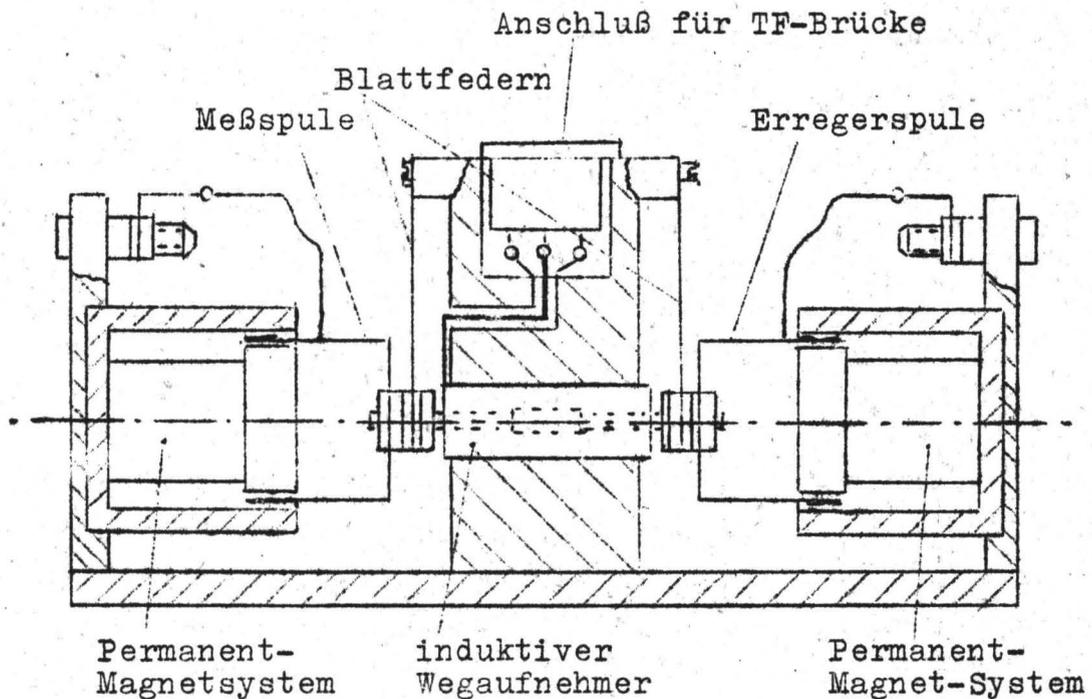


Bild 2: Konstruktive Ausführung des mechanischen Systems

Die Masse des mechanischen Schwingers wird durch die beiden Tauchspulen, die Verbindungsachse mit Muttern und Scheiben und den Kern des Wegaufnehmers gebildet. Die Federn sind in ihrer Länge so dimensioniert, daß bei den zugelassenen Ausschlägen noch keine Nichtlinearitäten infolge der Kreisbewegung auftreten können.

Als mechanisch-elektrischer Wandler wird ein induktiver Wegaufnehmer W 1 der Firma Hottinger verwendet. Eine Tauchspule dient zur Uebertragung der Rückführungskräfte, die andere kann als Meßsystem verwendet werden. Sie gibt eine geschwindigkeitsproportionale Spannung ab, die als Dämpfungskraft oder nach einmaligem Differenzieren als Massenkraft rückgeführt werden kann. Mit besonderer Sorgfalt müssen die Spulen-Zuleitungen ausgeführt werden. Sie dürfen keine zusätzliche Federwirkung ausüben,

denn das ergibt weitere Nichtlinearität und damit Verzerrungen. Es werden dafür 5 μ starke 1,5 mm breite Folien verwendet, wie sie im elektrischen Meßgerätebau für Systeme ohne Rückstellkraft eingesetzt werden.

Technische Daten des mechanischen Systems:

Eigenfrequenz:	22,0 Hz
Gewicht der Masse:	7,1 g
Federlänge:	25 mm
Dämpfung:	Geringe induktive Dämpfung durch die mit ca. 130 Ω abgeschlossene Spule (D = 0,125)
Erregersystem:	Tauchspulsystem 330 Ω max 0,5 W Permanent-Magnet ca. 4000 Gauß im Luftspalt
Meßsysteme:	1. Induktiver Wegaufnehmer W 1 (Fa. Hottinger) für ± 1 mm Weg 2. Tauchspulsystem 330 Ω Empfindlichkeit 5,8 mV/mm/sec
Abmessungen	115 x 56 x 60 mm
Gewicht:	580 g

4. Dimensionierung des Regelkreises und Eichung

4.1 Federänderung

Die Einstellung der Federkonstante durch elektronische Rückkopplung ist die technisch am einfachsten durchzuführende Operation. Die Federkraft ist proportional der Auslenkung, also kann direkt ein entsprechender Teil von $r(t)$ der Erregerspule zugeführt werden. Die Ausgangsspannung der Trägerfrequenz-Meßbrücke ist proportional $r(t)$. Mit einem Potentiometer kann eine Multiplikation mit einem Faktor < 1 durchgeführt werden. Nimmt man den Empfindlichkeitswähler der TF-Brücke hinzu, so können auch Multiplikationen mit Faktoren > 1 durchgeführt werden, so daß kontinuierlich die gewünschte Federkraft eingestellt werden kann. Aus Gleichung (8) erhält man für $k_m = k_b = 0$, für die neue Eigenfrequenz:

$$\omega_e = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{k_c}{c}} \quad (12)$$

Aus dieser Gleichung sieht man noch einmal deutlich, daß eine weiche Feder günstig ist, da dann k_c entsprechend kleine Werte annimmt. k_c setzt sich zusammen aus dem Produkt der Übertragungsfaktoren der Elemente im Regelkreis (Trägerfrequenz-Meßbrücke, Potentiometer, Endverstärker, Tauchspulsystem). Um die Eigenfrequenz herabzusetzen, muß k_c negativ sein, was durch entsprechende Polung des symmetrischen Endverstärkers erreicht wird. Bei festen Werten für die Übertragungsfaktoren von Trägerfrequenz-Meßbrücke, Endverstärker und Tauchspulsystem (die Dimensionierung muß auch mit Rücksicht auf die Massenänderung vorgenommen werden) ergibt sich der in Bild 3 dargestellte Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz und Potentiometerstellung γ_c .

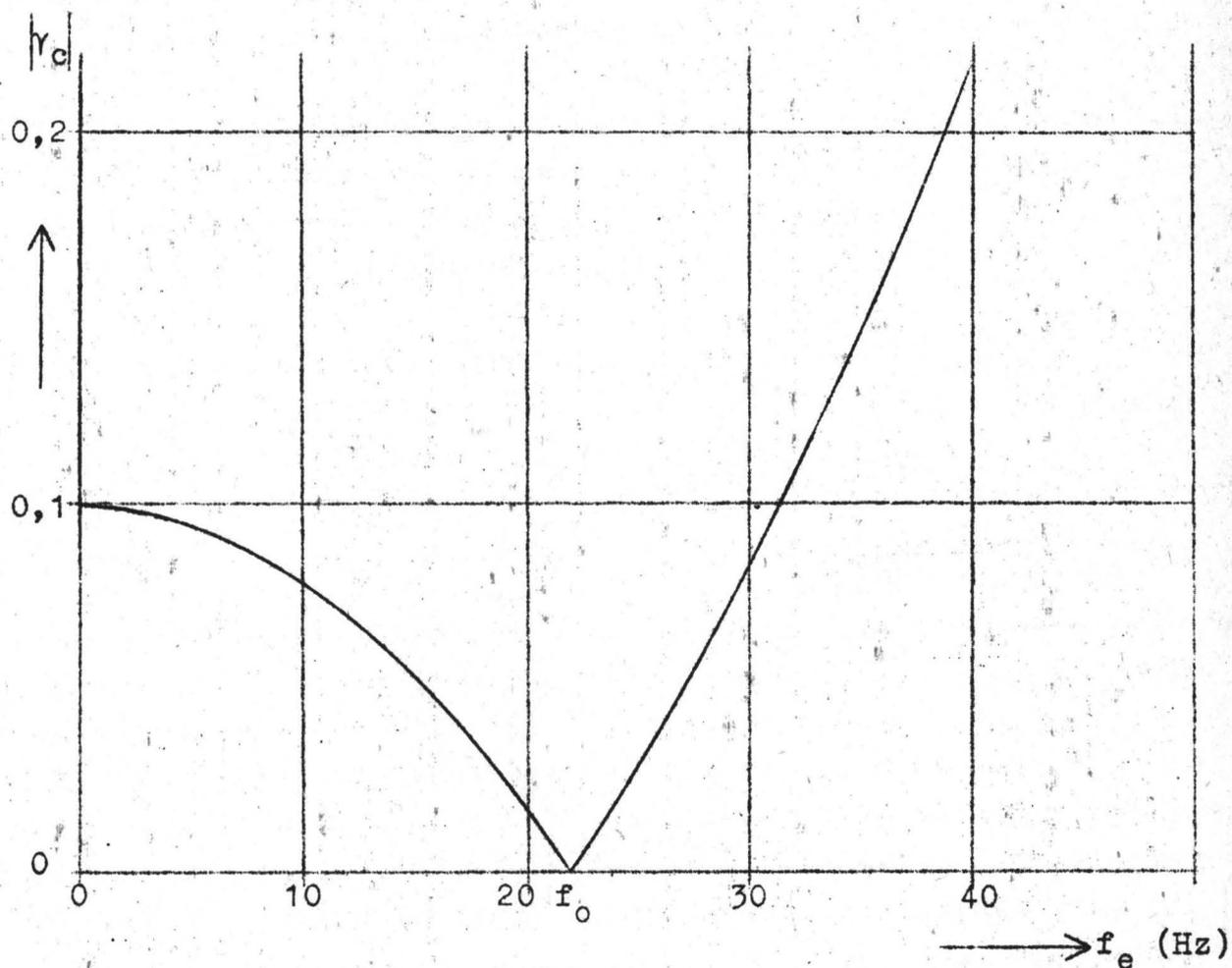


Bild 3: Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Potentiometerstellung bei Federänderung

Bei der Berechnung wurden folgende Zahlenwerte für die Konstanten benutzt:

$$\begin{aligned} f_0 &= 22,0 \text{ Hz} \\ m &= 0,000724 \text{ g sec}^2/\text{mm} \\ c &= 14,5 \text{ g/mm} \\ \alpha &= 0,925 \text{ g/m} && \text{(Tauchspulsystem)} \\ \beta &= 38,5 \text{ V/mm} && \text{(TF-Meßbrücke)} \\ \delta &= 4,1 \text{ mA/V} && \text{(Endverstärker)} \end{aligned}$$

Die empfindliche Stellung der Trägerfrequenz-Meßbrücke ist hier eigentlich nicht notwendig. Da sie aber bei der Massenänderung benötigt wird und die Stellung in beiden Fällen dieselbe sein soll, muß auch hier damit gerechnet werden.

Die Kurve zeigt, daß zu tiefen Eigenfrequenzen hin die Einstellung sehr kritisch ist. Es ist deshalb zweckmäßig, auf die kontinuierliche Verstellung der Federzahl zu verzichten und das Potentiometer durch einen festen Spannungsteiler zu ersetzen.

Mit Veränderung der Eigenfrequenz erhält man auch ein neues Dämpfungsmaß D (s. Gl. 3). Um ein konstantes Dämpfungsmaß von $D = 0,6$ einzustellen, muß k_b mit verändert werden.

4.2 Massenänderung

Aus der Betrachtung im Kapitel 2 geht hervor, daß die Veränderung der Masse des mechanischen Systems mit wesentlich größerem technischen Aufwand verbunden ist als die Federänderung. Sie ist jedoch notwendig, da mit der Federänderung allein die Eigenfrequenz noch nicht genügend tief gelegt werden kann. Noch wesentlicher ist jedoch, wie schon erwähnt, die Verkleinerung der Relativbewegung gegenüber der wahren Bewegung des Gerätegehäuses.

Verwendet man als mechanisch-elektrischen Wandler wieder den induktiven Wegaufnehmer in Verbindung mit der Trägerfrequenz-Meßbrücke, so muß die Brückenausgangsspannung zweimal differenziert werden. Das kann mit Hilfe zweier aufeinanderfolgender Differenzierverstärker durchgeführt werden. Hinter dem ersten Differentiator kann dann - entgegen der Darstellung in Bild 1 -

eine Spannung zur Dämpfungsänderung abgenommen werden. Unter Annahme idealer Elemente im Regelkreis erhält man aus Gleichung (8) für $k_c = k_b = 0$ für die neue Eigenfrequenz:

$$\omega_e = \omega_o \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{k_m}{m}}} \quad (13)$$

Man sieht auch hier, daß für die Änderung der Eigenfrequenz das Verhältnis von k_m/m maßgebend ist. Deshalb ist eine möglichst kleine Masse günstig. Für eine Herabsetzung der Eigenfrequenz, muß k_m positiv sein. Gegenüber der Federänderung muß die Rückführung zur Massenänderung um 180° phasenverschoben sein, um die gleiche Tendenz zu erzielen. Der Endverstärker wurde deshalb mit einem Differenzeingang ausgeführt. k_m entsteht wieder durch das Produkt der Übertragungsfaktoren der Elemente. Gegenüber der Federänderung kommt hier die Zeitkonstante der beiden Differenzierverstärker hinzu. Mit denselben Zahlenwerten wie bei der Federänderung und $K_D = (RC)^2 = 0,625 \times 10^{-5} \text{ sec}^2$ ergibt sich für die Potentiometerstellung $\gamma_m = f(f_e)$ der in Bild 4 dargestellte Zusammenhang.

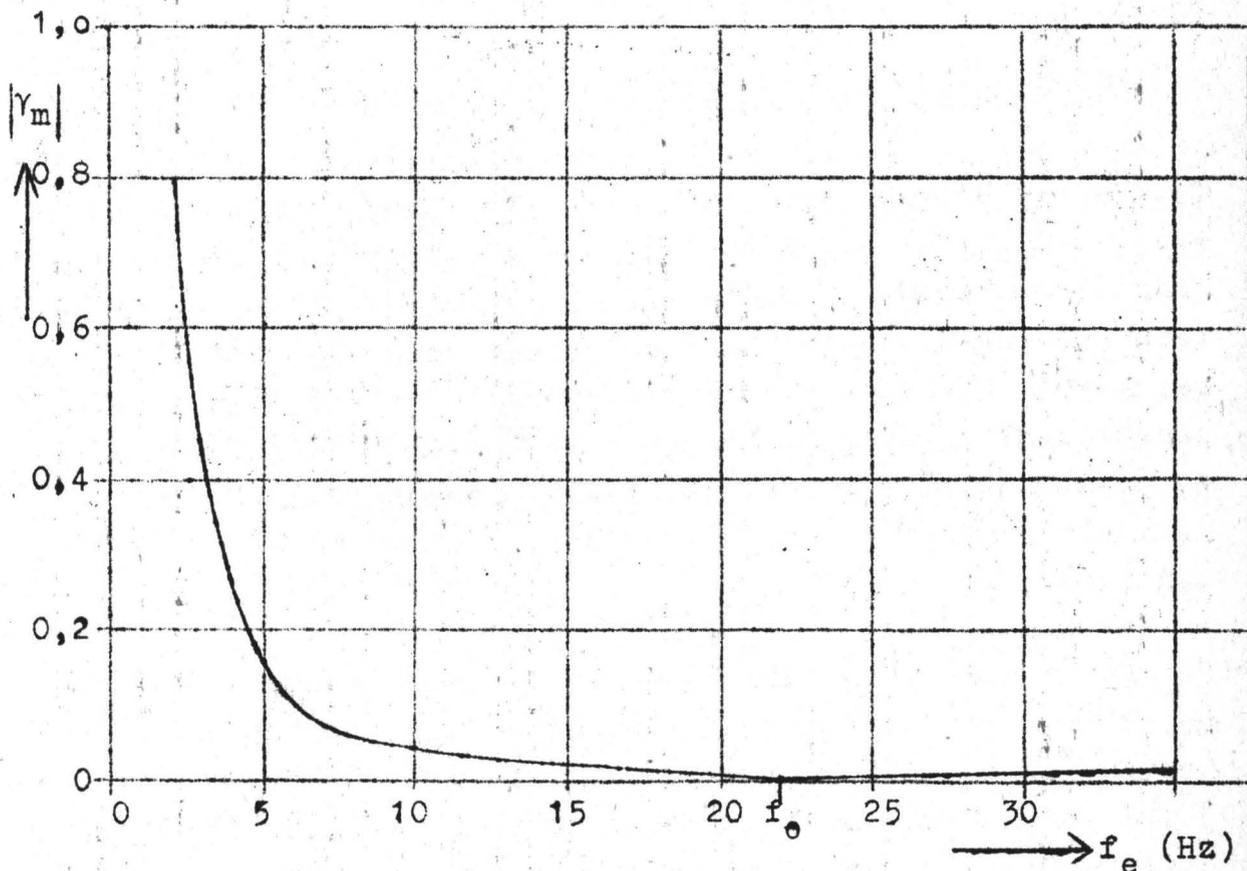


Bild 4: Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Potentiometerstellung bei Massenänderung

Aus dem Verlauf der Kurve kann man ersehen, daß hier tiefe Eigenfrequenzen sehr gut einstellbar sind. Das Dämpfungsmaß bei den neuen Eigenfrequenzen kann wieder aus Gleichung (9) berechnet werden. Wegen der Massenvergrößerung ist eine zusätzliche Dämpfung erforderlich, um ein D von 0,6 zu erhalten.

4.3 Dämpfungsänderung

Die Dämpfung des Systems wird eingestellt durch die Rückführung einer geschwindigkeitsproportionalen Größe, die aus der Relativbewegung $r(t)$ durch einmalige Differentiation gewonnen wird.

$$D = \frac{b}{2m\omega_0} + \frac{k_b}{2m\omega_0} \quad (14)$$

Für eine Dämpfungsvergrößerung ($k_b > 0$) muß die Rückführung auf denselben Eingang gegeben werden wie die Federrückführung. Ersetzt man ω_0 durch ω_e und fordert, daß $D = \text{const} = 0,6$ sein soll, so kann man k_b bzw. γ_b als Funktion von ω_e berechnen. Aus Gleichung (8) erhält man unter Verwendung der bereits angegebenen Zahlenwerte:

$$\gamma_b = 0,33 \sqrt{(m + k_m)(c + k_c)} - 0,007 \quad (15)$$

4.4 Tabellen zur Einstellung von Eigenfrequenz und Dämpfung

Für die Praxis ist es besser, die Potentiometer, die eine kontinuierliche Einstellung von Feder und Masse erlauben, durch feste umschaltbare Spannungsteiler zu ersetzen. Nur dadurch ist eine sichere Reproduzierbarkeit in der Einstellung der Eigenfrequenz gewährleistet. Mit Hilfe der folgenden Tabelle kann man direkt aus der Stellung der Schalter für γ_c und γ_m die Eigenfrequenz ablesen. Die Schaltstellungen sind für γ_c und γ_m mit 1 - 5 bezeichnet, und $\bar{\gamma}_c$ bzw. $\bar{\gamma}_m$ genannt.

Tabelle 1: f_e (Hz) als Funktion der Feder- u. Masseneinstellung

$\bar{\gamma}_c \backslash \bar{\gamma}_m$	1	2	3	4	5
1	22	15,0	8,8	4,65	2,2
2	14,6	10,1	5,8	3,1	1,45
3	10,3	7,0	4,1	2,15	1,03
4	5,5	3,7	2,0	1,13	0,55
5	2,2	1,3	0,73	0,4	0,22

In der Tabelle sind die Eigenfrequenzen angegeben, die am fertigen Gerät gemessen wurden in den verschiedenen Kombinationen von $\bar{\gamma}_c$ und $\bar{\gamma}_m$. Die Spannungsteiler wurden so aufgebaut, daß möglichst glatte Widerstandswerte verwendet werden können. Dadurch ergeben sich die nichtganzzahligen Eigenfrequenzen.

Bild 5 gibt die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Massenvergrößerung wieder.

Für jede Kombination der $\bar{\gamma}_c$ und $\bar{\gamma}_m$ -Schalterstellungen muß auch die Dämpfung eingestellt werden, damit immer die für das Übertragungsverhalten des Systems günstigste Dämpfung von $D = 0,6$ gegeben ist.

Nach Gleichung (15) kann die Dämpfungseinstellung berechnet werden. Die Größen $(m + k_m)$ und $(c + k_c)$ haben für die eingeführten Schaltstellungen ganz bestimmte Werte, die leicht zu berechnen sind. Für die größte zusätzliche Dämpfung ergibt sich ein γ_b von 0,35. Im den ganzen Bereich des Potentiometers auszunutzen, wird vorher noch eine feste Teilung von 1:3 vorgenommen. In der folgenden Tabelle sind die experimentell gefundenen Werte eingetragen. Sie stimmen mit den nach Gl. (15) berechneten gut überein.

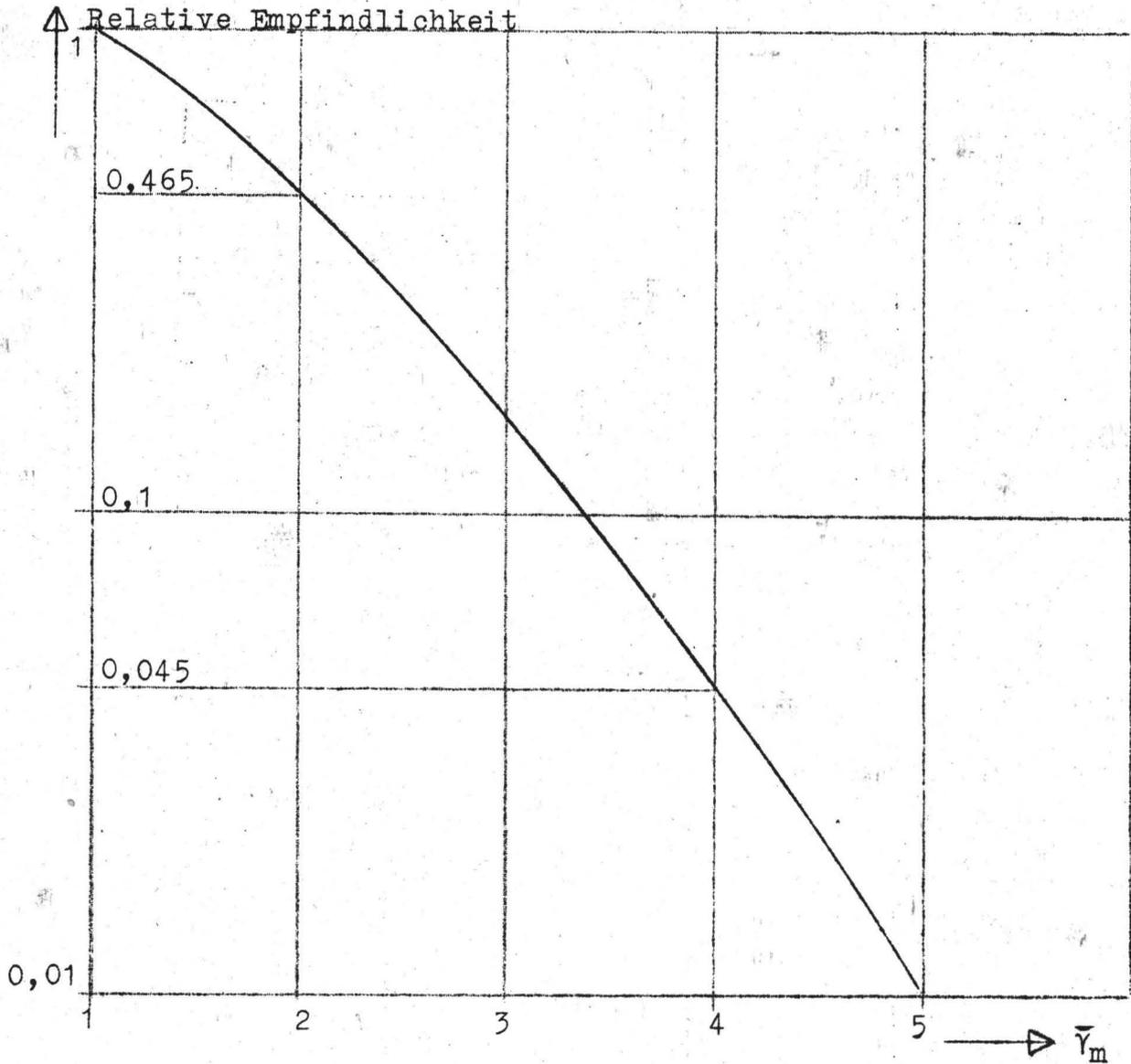


Bild 5: Empfindlichkeit als Funktion der Massenvergrößerung

Tabelle 2: γ_b als Funktion der Feder- und Masseneinstellung

$\bar{\gamma}_c \backslash \bar{\gamma}_m$	1	2	3	4	5
1	+0,095	+0,138	+0,250	+0,500	+1,000
2	+0,050	+0,085	+0,160	+0,314	+0,710
3	+0,027	+0,050	+0,010	+0,230	+0,480
4	+0,002	+0,012	+0,040	+0,100	+0,280
5	-0,015	-0,012	-0,007	+0,020	+0,170

Die 25 Werte werden am besten durch ein Wendelpotentiometer mit Digitalknopf eingestellt. Für die negativen Werte muß der zweite Eingang des Endverstärkers benutzt werden.

5. Messung von Eigenfrequenz und Dämpfungsmaß

Die experimentelle Untersuchung der bisher theoretisch behandelten Zusammenhänge kann auf einem Schwingtisch geschehen, der bei einer geeigneten Amplitude in einem Frequenzbereich von 0,2 Hz bis etwa 150 Hz einstellbar sein muß. Da jedoch hier - im Gegensatz zu einem üblichen seismischen System - die Möglichkeit besteht, über das Tauchspulsystem die Masse in Schwingungen zu versetzen, kann auf den mechanischen Schwingtisch verzichtet werden. Der Endverstärker braucht lediglich mit einem weiteren Eingang ausgerüstet zu sein. Um das Verhalten des seismischen Systems mit und ohne Regelkreis zu untersuchen, ist es völlig gleichwertig, ob eine mechanische Anregung über das Gerätegehäuse oder eine elektrische Anregung mit konstanter Kraft vorgenommen wird. Die Vergrößerungsfunktionen für diese beiden Fälle lassen sich ineinander überführen, wenn man in dem zweiten Fall γ durch $1/\gamma$ ersetzt.

Für die Eichung sowohl wie für den Betrieb des Meßgerätes ist es wegen der nichtlinearen Federkraft erforderlich, daß sich die Masse in der Ruhelage immer in der mechanischen Nullstellung befindet. Das kann entweder durch genaues Ausrichten in die waagerechte Lage oder aber durch eine konstante elektrische Kraft geschehen. Handelt es sich nur um kleine Verlagerungen aus der Nullstellung, so kann die Masse einfach durch Verschieben der Nulllage des Endverstärkers in die mechanische Nullstellung zurückgezogen werden. Die Anzeige der richtigen Nullstellung geschieht am Instrument der Trägerfrequenz-Meßbrücke. Für größere Verlagerungen, z.B. bei vertikalem Betrieb, muß aus einer konstanten Gleichspannungsquelle der zweiten Tauchspule ein entsprechender Strom zugeführt werden.

Die Messung der Eigenfrequenz des Systems und damit die Eichung des Potentiometers bzw. Spannungsteilers für γ_c geschieht am besten durch eine Phasenmessung. Erregerkraft (Erreger Spannung)

und Relativbewegung der Masse sind in der Resonanz um 90° phasenverschoben. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, je nach Genauigkeitsanforderung, wie die Phase gemessen werden kann. Am einfachsten ist es mit einem Oszillographen oder einem Phasemesser, genauer jedoch läßt sich eine Zeitdifferenzmessung mit einem elektronischen Zähler durchführen. Die Frequenz des Erregergenerators kann ebenfalls mit einem Zähler genau gemessen werden.

Die Dämpfung wird dadurch gemessen, daß bei konstanter Erregerkraft bei zwei verschiedenen Frequenzen ω_1 und ω_2 die Amplitude der Relativbewegung gemessen wird. Dadurch kann der Einfluß der Erregerkraft eliminiert werden. Als eine der beiden Frequenzen wählt man zweckmässigerweise die Resonanzfrequenz ω_e . Wenn A_e und A_1 die beiden gemessenen Amplituden sind, so erhält man über die Vergrößerungsfunktion für den Quotienten der beiden Ausschläge:

$$\frac{A_e}{A_1} = \frac{\sqrt{(1-\eta_1^2)^2 + 4D^2\eta_1^2}}{2D} \quad (16)$$

Daraus erhält man:

$$2D = \frac{1-\eta_1^2}{\sqrt{\left(\frac{A_e}{A_1}\right)^2 - \eta_1^2}} \quad (17)$$

Wird die zweite Frequenz ω_1 zu Null, wählt man also eine Auslenkung durch eine Gleichspannung, so erhält man die einfache Beziehung für das Dämpfungsmaß D:

$$D = \frac{A_e}{2A_e} \quad (18)$$

Die Versuchsergebnisse können am besten an Hand der folgenden Oszillogramme studiert werden.

Wegamplitude $\pm 80 \mu$

Dämpfung $D = 0,6$

Kurve 1: Schwingweg; Kurve 2: Anregungsspannung

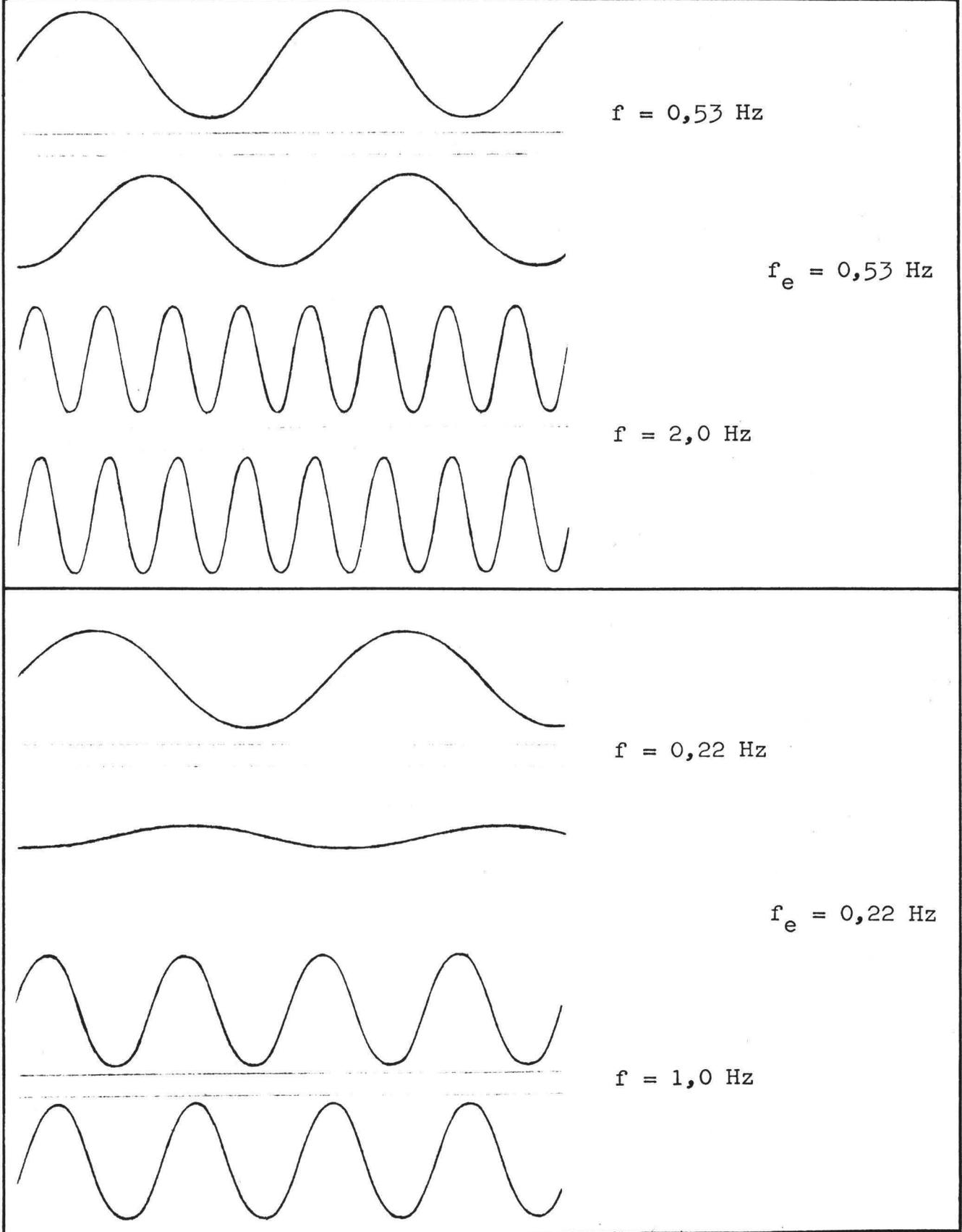


Bild 6: Oszillogramme bei Feder-, Massen- und Dämpfungsänderung

6. Betrachtungen zur Meßgenauigkeit und Stabilität

6.1 Grundsätzliche Ueberlegungen

Im Kapitel 4 wurde gezeigt, daß durch geeignete Dimensionierung der Elemente im Regelkreis Eigenfrequenz und Dämpfung des gesamten Systems in weiten Grenzen einstellbar sind. Das neue System verhält sich genau wie ein entsprechend abgestimmtes und gedämpftes mechanisches System, sofern die verwendeten Bauelemente ideal sind, d.h. sofern ihr Uebertragungsverhalten den theoretischen Größen entspricht. Da aber alle theoretischen Bauelemente und Schaltungen eine obere Grenzfrequenz haben, weicht das technische System bei höheren Frequenzen von den theoretischen Werten ab. Das Meßgerät hat also einen frequenzabhängigen Amplituden- und Phasenfehler, der je nach Art und Größe der verwendeten elektrischen Rückführung verschieden ist.

Durch die endliche obere Grenzfrequenz kann das an sich stabile System (es sei vorausgesetzt, daß $(m + k_m)$, $(c + k_c)$ und $(b + k_b)$ immer positiv sind) auch instabil werden, so daß man zu zusätzlichen Stabilisierungsmaßnahmen gezwungen ist, die wieder die Genauigkeit beeinträchtigen. Genauigkeits- und Stabilitätsfragen hängen also eng zusammen. Entscheidend für den Betrieb ist jedoch in erster Linie die Stabilität. Erst wenn Stabilität garantiert ist, kann die Genauigkeit, d.h. der Frequenz- und Phasengang der Anzeige, angegeben und evtl. - natürlich ohne Beeinträchtigung der Stabilität - verbessert werden. Deshalb wird im folgenden immer erst die Stabilitätsuntersuchung durchgeführt und im Anschluß daran die Genauigkeit betrachtet.

6.2 Massenänderung

6.21 Forderungen an die Schleifenverstärkung des offenen Regelkreises

Wegen der zweimaligen Differentiation im Regelkreis ist im Falle der Massenänderung die Gefahr der Instabilität am größten. Bei einer Massenvergrößerung liegt oberhalb der Eigenfrequenz des mechanischen Systems eine echte Gegenkopplung des gesamten Kreises vor. Der durch die Bewegung der Unter-

lage erzeugten Relativbewegung zwischen Masse und Gehäuse wirkt eine durch die elektrische Rückführung erzeugte Kraft entgegen, so daß die Relativbewegung kleiner wird. Es soll zunächst für ideale Schaltelemente die Stabilität untersucht werden.

Obwohl man schon direkt aus der Differentialgleichung (2) ablesen kann, so daß das System stabil ist, solange $(m + k_m)$ positiv ist, soll aus Gründen der Anschaulichkeit der Weg über die komplexe Schleifenverstärkung des Regelkreises beschrieben werden. Aus dem Verlauf der komplexen Schleifenverstärkung kann man sehr gut die Tendenz auch bei nichtidealen Elementen sehen.

Der Regelkreis wird an einer Stelle aufgetrennt. Aus dem komplexen Übertragungssystem der einzelnen Elemente gewinnt man durch Multiplikation das Übertragungsmaß des gesamten Regelkreises. Mit den bereits definierten Konstanten erhält man nach einiger Zwischenrechnung:

$$\underline{v}_s = \frac{k_m}{m} \eta^2 \frac{(1-\eta^2) - (i2D\eta)}{(1-\eta^2)^2 + 4D^2\eta^2} \quad (19)$$

Die Schleifenverstärkung läßt sich in der komplexen Zahlenebene darstellen. Für die Stabilität interessiert nur der Fall größter Massenvergrößerung. Für 100-fache Massenvergrößerung ($\omega_e = \omega_0/10$) ist $k_m/m = 99$. Mit $D = 0,125$, dem Dämpfungsmaß des ursprünglichen mechanischen Systems, ergibt sich die in Bild 7 dargestellte Kurve.

Mit Hilfe des Strecker-Nyquist-Theorems kann eine Aussage über die Stabilität des Systems gemacht werden:

Das rückgekoppelte System ist stabil, wenn beim Durchlaufen der Ortskurve in Richtung wachsender Frequenz der Punkt + 1 nicht umschlossen wird. Aus Bild 7 ist zu ersehen, daß das System stabil ist. Für andere Dämpfungen verläuft die Kurve in der unteren Halbebene etwas anders, schließt aber niemals den Punkt + 1 ein. Man sieht aber auch, daß die Schleifenverstärkung für $\omega \rightarrow \infty$ einen von Null verschiedenen Wert hat, was natürlich bei einem technischen System unmöglich ist. In Wirklichkeit haben alle im Regelkreis liegenden Elemente eine obere Grenzfrequenz, so daß trotzdem Instabilität auf-

treten kann. Nach unten kann der Übertragungsbereich bis zu 0 Hz ausgedehnt werden.

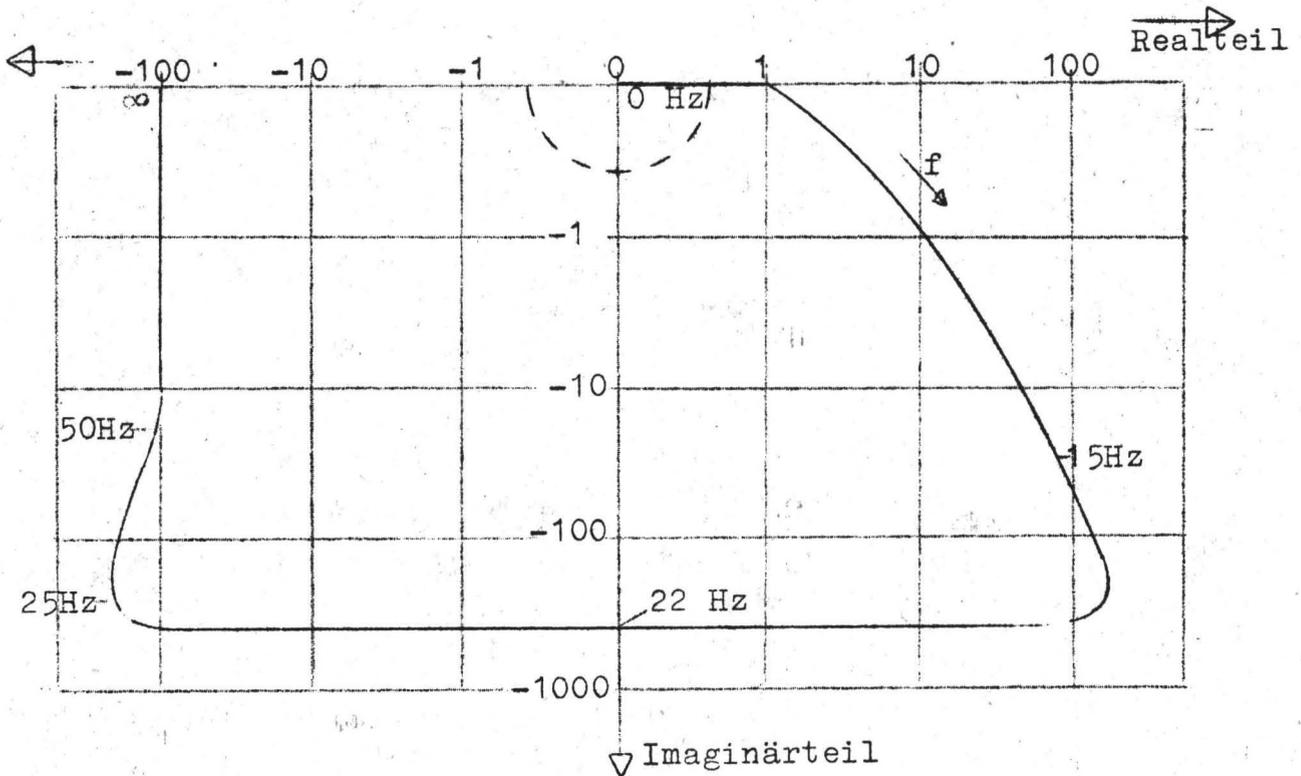


Bild 7: Verlauf der komplexen Schleifenverstärkung bei 100-facher Massenvergrößerung

Das wirkliche System kann nicht berechnet werden, sondern muß durchgemessen werden. Meßtechnisch ist es wesentlich bequemer nur den Betrag der Schleifenverstärkung zu messen. Betrag und Phase sind jedoch bei Netzwerken mit minimaler Phasendrehung eindeutig einander zugeordnet, und man kann aus dem Verlauf des Betrages der Verstärkung eine Aussage über die Stabilität machen. Nach Bode ist die minimale Phasendrehung als Funktion der Verstärkung bzw. des Verstärkungsabfalles gegeben durch:

$$B_c = \frac{\pi}{12} \left(\frac{dA}{d/u} \right)_c + \frac{1}{6\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\left(\frac{dA}{d/u} \right) - \left(\frac{dA}{d/u} \right)_c \right] \ln \coth \frac{|u|}{2} d/u \quad (20)$$

Die Gleichung ist in der von B o d e benutzten Bezeichnungsweise wiedergegeben. Es bedeuten:

B_c = Phasenwinkel im Bogenmaß bei der Frequenz f_c

A = Verstärkung in db

$\frac{dA}{d/u}$ = Verstärkungsverlauf in db/Oktave

u = $\ln f/f_c$

f = laufende Frequenz

f_c = Frequenz, bei der der Phasenwinkel gesucht wird

$\operatorname{Re} \coth \frac{u}{2}$ = Realteil der Funktion in $\frac{u}{2}$

Gleichung (20) zeigt, daß die minimale Phasendrehung aus zwei Komponenten zusammengesetzt ist. Der erste Anteil ist proportional dem Verstärkungsabfall in db/Oktave. Er liefert eine Phasendrehung von 180° , wenn die Verstärkung um 12 db/Oktave abfällt. Der zweite Anteil ist gegeben durch ein Integral über den gesamten Frequenzbereich. Der Integrand ist proportional der Bewertungsfunktion $\ln \left| \frac{u}{2} \right|$, die in Bild 8 dargestellt ist.

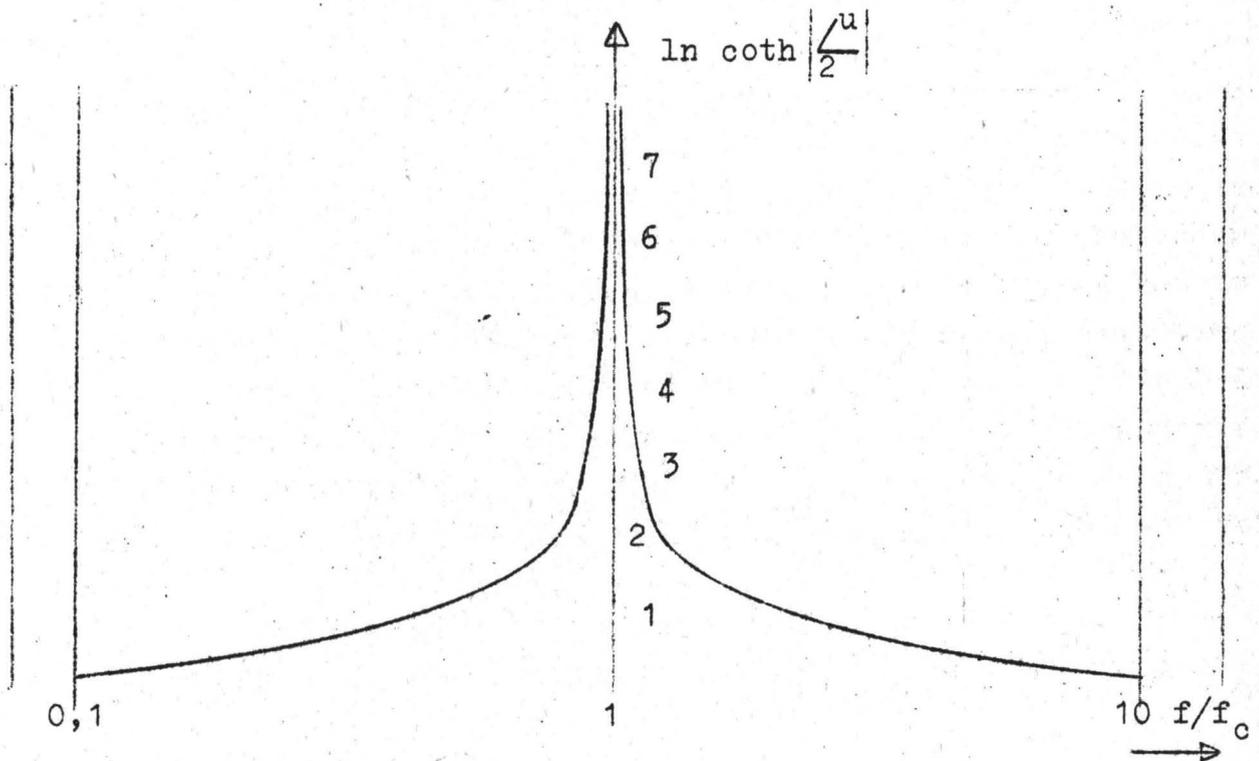


Bild 8 : Bewertungsfunktion

Die Bewertungsfunktion zeigt, daß Änderungen in der Steilheit des Verstärkungsverlaufes bei Frequenzen in der Nähe von f_c einen wesentlich größeren Einfluß auf die Phasendrehung haben als Änderungen bei entfernten Frequenzen. Ist $\frac{dA}{d\omega}$ konstant im gesamten Bereich, so ist die Phasendrehung allein durch den ersten Ausdruck in Gleichung (20) gegeben. Das gleiche gilt, wenn die betrachtete Frequenz genügend weit entfernt von einer Steilheitsänderung ist.

Damit ein gegengekoppeltes System stabil ist, darf bei einem Verstärkungsabfall die zusätzliche Phasendrehung niemals größer als 180° sein, solange der Betrag der Schleifenverstärkung >1 ist. In praktischen Fällen muß eine gewisse Sicherheit gefordert werden. Läßt man eine Phasendrehung von 150° zu, so entspricht das einem Verstärkungsabfall von 10 db/Oktave (entsprechend dem ersten Ausdruck in Gleichung (20)). In dem kleinen Übergangsbereich von 0° bis 150° darf der Verstärkungsabfall etwas steiler sein (entsprechend dem Anteil des zweiten Ausdrucks in Gleichung (20)).

In Bild 9 ist der Betrag der Schleifenverstärkung der aufgetrennten Rückkopplungsschleife als Funktion der Frequenz aufgetragen. Je nach Größe der Massenänderung ist der absolute Wert der Schleifenverstärkung verschieden groß. Das mechanische System wurde in diesem prinzipiellen Bild als ideal angenommen. Der Verstärkungsabfall bei hohen Frequenzen ist umso steiler je mehr Verstärkerstufen vorhanden sind, denn jede Röhrenstufe liefert oberhalb ihrer Grenzfrequenz einen Beitrag von 6 db/Oktave und eine zusätzliche Phasendrehung von 90° . Der wirkliche natürliche Verstärkungsabfall ist steiler als 10 db/Oktave. Deshalb müssen besondere Stabilisierungsmaßnahmen ergriffen werden, die den gewünschten Verlauf herstellen. Resonanzen der Federn wurden noch nicht berücksichtigt.

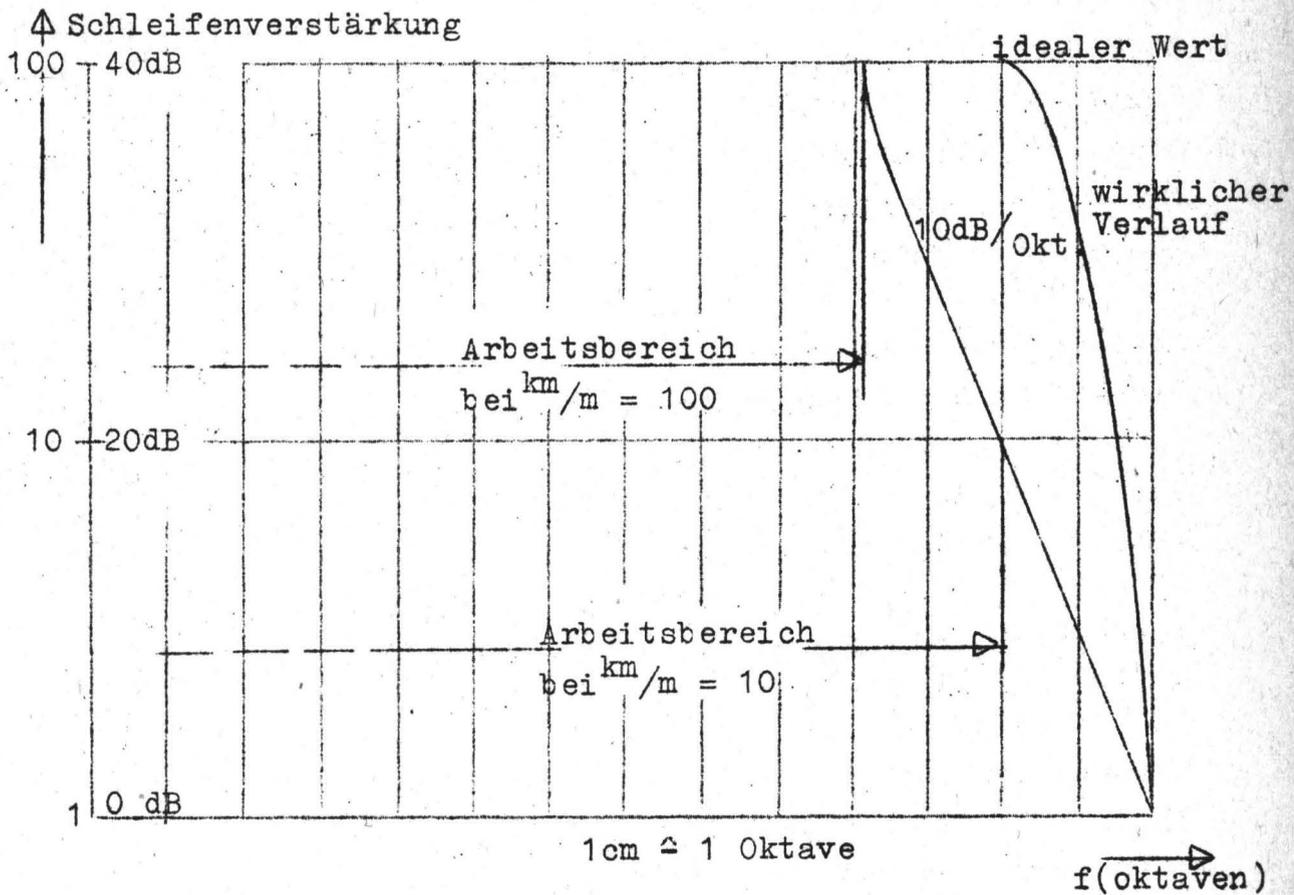


Bild 9: Betrag der Schleifenverstärkung als Funktion der Frequenz (prinzipielle Darstellung)

Der Arbeitsbereich endet natürlich da, wo der Verstärkungsabfall anfängt. Im wirklichen System gibt es eine Uebergangszone, da der Verlauf des Verstärkungsfaktors kontinuierlich ist. Je größer die Schleifenverstärkung und damit die Massenvergrößerung ist, desto größer wird der Frequenzbereich, über den sich der geforderte Amplitudenabfall von 10 db/Oktave erstreckt. Der Arbeitsbereich wird dadurch stark eingeschränkt. Bei einer Massenvergrößerung von 100 ist die Schleifenverstärkung ungefähr 10^2 , d.h. 40 db.

Für den definierten Abfall von 10 db/Oktave, müssen also vier Oktaven zur Verfügung gestellt werden. Hinzu kommt der ziemlich breite Uebergangsbereich, der ja für den Arbeitsbereich ebenfalls verloren geht. Der Arbeitsbereich endet da, wo im Uebertragungsmaß Phasenfehler von einigen Grad auftreten. Dem Verstärkungsabfall von 10 db/Oktave entspricht eine Phasendrehung von 150° . Man benötigt weitere 4 bis 5 Oktaven, um diese

Phasendrehung rückgängig zu machen. Soll also z.B. der Arbeitsbereich bis 25 Hz reichen, dann muß der Frequenzgang etwa bis 10 kHz kontrolliert werden, damit keine Selbsterregung auftreten kann. Der Arbeitsbereich wird umso größer sein, je höher die obere Grenzfrequenz der Schleifenverstärkung ist.

Aus dieser Betrachtung ersieht man, daß es unbedingt erforderlich ist, eine 50 kHz-Trägerfrequenz-Meßbrücke zu verwenden, da die 5 kHz-Brücke bei 2,5 kHz bereits eine Phasendrehung von 90° aufweist. Die 50 kHz-Brücke hingegen kann in dem genannten Uebertragungsbereich als ideal angesehen werden und liefert keine zusätzliche Phasendrehung. Der Endverstärker läßt sich ebenfalls genügend breitbandig auslegen. Es bleiben also als frequenzgangbestimmende Glieder übrig:

1. 2 Differenzierverstärker
2. das mechanische System

6.22 Differenzierverstärker

Nach dem unter 6.21 Gesagten kommt es darauf an, Differenzierglieder herzustellen, die bis zu möglichst hohen Frequenzen richtig differenzieren, um die Grenzfrequenz der Schleifenverstärkung möglichst hoch zu legen. Bei Verwendung eines einfachen RC-Gliedes würde der Amplitudenverlust bei tiefen Frequenzen zu groß sein. Deshalb wurde der Differentiator ähnlich aufgebaut, wie die bei Analogrechnern üblichen Integratoren.

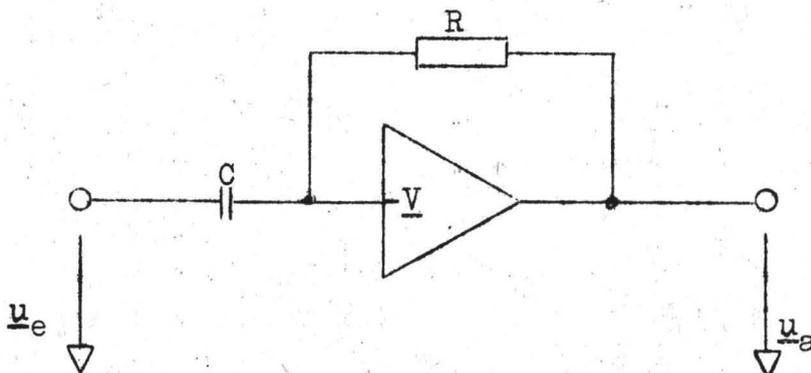


Bild 10: Prinzipschaltung eines Differenzierverstärkers

Das Uebertragungsverhalten des in Bild 10 dargestellten Differenzierverstärkers läßt sich leicht berechnen. Unter Anwendung der Kirchhoff'schen Gesetze für lineare Wechselstromschaltungen erhält man:

$$\underline{u}_a = i\omega RC \underline{u}_e + \underbrace{\frac{i\omega RC}{\underline{y}} \underline{u}_a}_{\text{Fehler}} \quad (21)$$

Der Innenwiderstand von \underline{u}_e ist zu Null angenommen. Der Differenzierfehler wird mit wachsender Frequenz größer, weil erstens ω wächst und zweitens \underline{y} abnimmt. Die Abnahme von \underline{y} ist aus Stabilitätsgründen nötig, wenn man mehrstufige Verstärker benutzt, da auch in diesem rein elektrischen Kreis die Schleifenverstärkung nur 10 db/Oktave abfallen darf. Bei einem einstufigen Verstärker kann höchstens ein Abfall um 6 db/Oktave eintreten bei hohen Frequenzen. Deshalb braucht dort kein künstlicher Verstärkungsabfall vorgesehen zu werden. Man erreicht allerdings im mittleren Frequenzbereich eine geringere Verstärkung und vergrößert dadurch den Fehler. Die Versuche haben ergeben, daß ein einstufiger Verstärker trotzdem am günstigsten ist.

Aus Gleichung(21) ersieht man, daß der Fehler konstant wäre, wenn \underline{y} mit ω ansteigen würde. Das läßt sich über einen kleinen Frequenzbereich durch geeignete Dimensionierung der Kathoden- und Schirmgitter-Kondensatoren erreichen. Ueber die Schaltung soll später berichtet werden.

Bild 11 zeigt den Phasengang und Bild 12 den Frequenzgang des Differenzierverstärkers bei optimaler Dimensionierung.

Der Differentiator hat also bei 200 Hz erst einen Phasenfehler von 7° . Die Phase wird bei tiefen Frequenzen allerdings etwas stärker gedreht. Der maximale Phasenfehler ist kleiner als 90° bis zu sehr hohen Frequenzen. Das wurde durch die einstufige Schaltung erreicht. Bei 6,5 Hz ist die Verstärkung $|\underline{u}_a/\underline{u}_e| = 1$.

Zur Massenänderung müssen zwei solcher Differenzierverstärker hintereinandergeschaltet werden. Bild 13 zeigt den Verlauf des Verstärkungsfaktors zweier Differenzierverstärker.

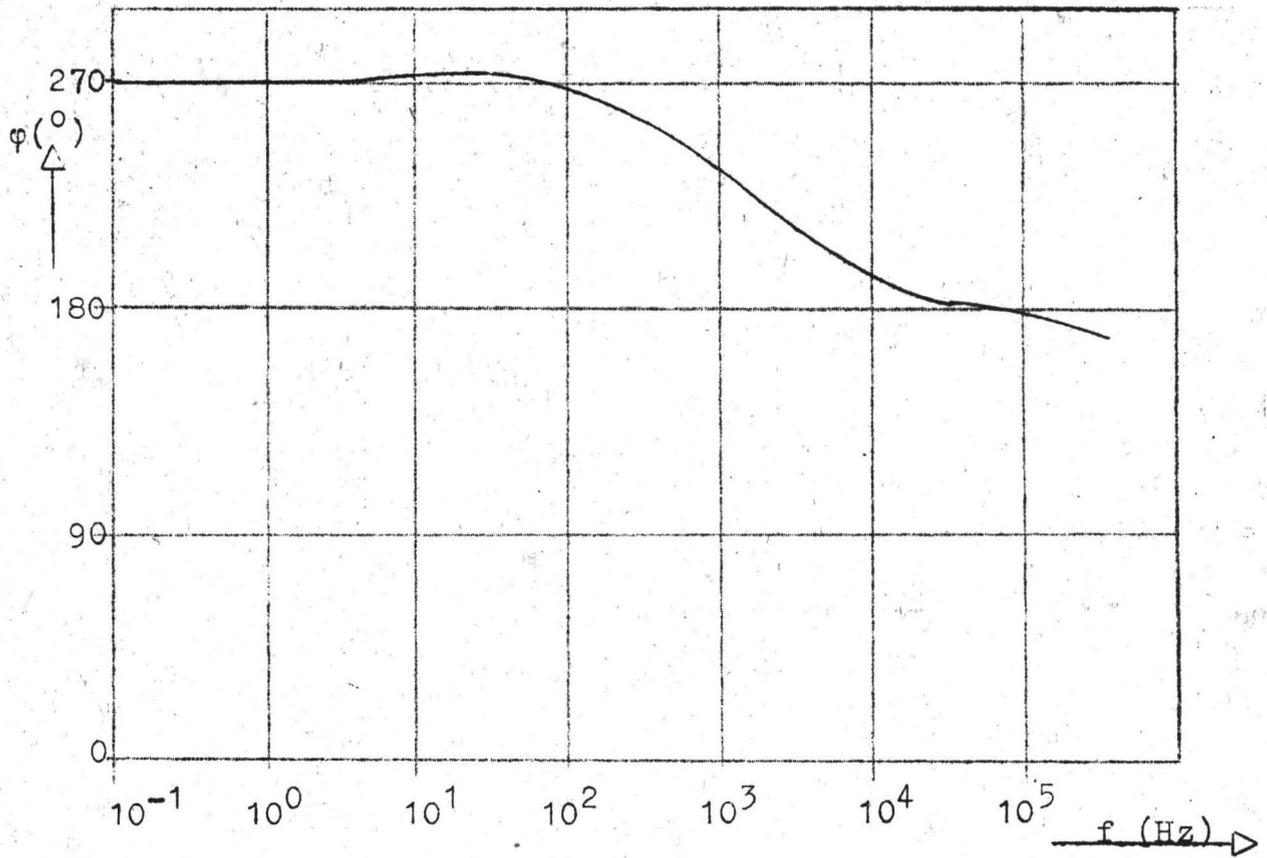


Bild 11: Phasengang des Differenzierverstärkers

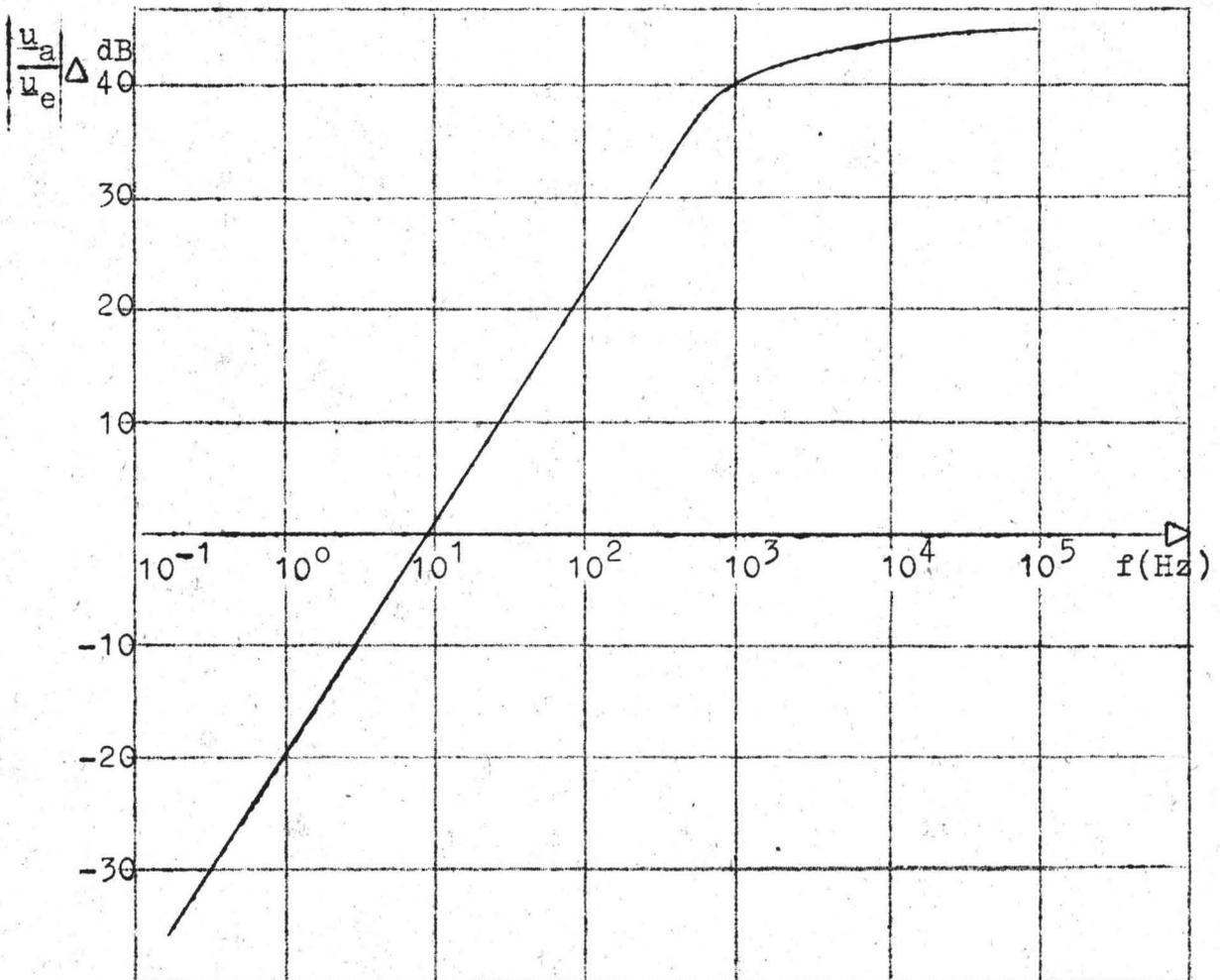


Bild 12: Frequenzgang des Differenzierverstärkers

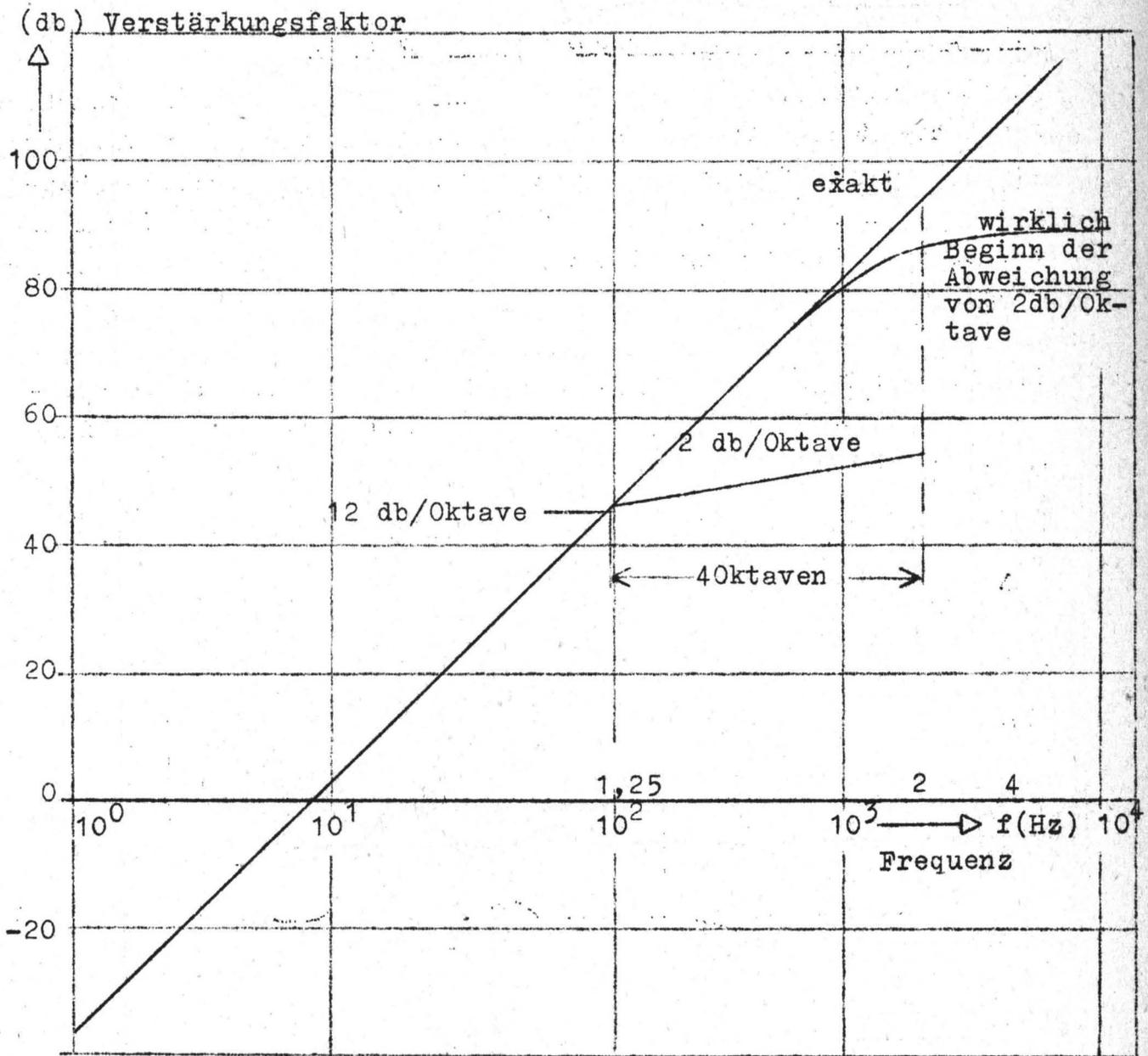


Bild 13: Verstärkungsfaktor zweier Differenzierverstärker

Aus dem Diagramm entnimmt man, daß die Differenzierverserker in dieser Form den Ansprüchen noch nicht genügen, da der Anstieg der wirklichen Kurve teilweise flacher ist als 2 db/Oktave. Da von den 12 db/Oktave, die sich bei einer exakten zweimaligen Differentiation ergeben, aus Stabilitätsgründen maximal 10 db/Oktave abgezogen werden dürfen, so ergibt sich ein endgültiger Anstieg von 2 db/Oktave. Es müßte also eine Korrektur angebracht werden. Da jedoch auch das mechanische System nicht ideal ist, muß dessen Uebertragungsverhalten mit in die Betrachtung hineingenommen werden.

6.23 Frequenzgang des mechanischen Schwingers

Um den Frequenzgang des mechanischen Schwingers zu untersuchen, wurde die Masse auf elektrischem Wege in Schwingungen versetzt, wie es bereits früher beschrieben wurde. Dabei wurde der Phasenwinkel zwischen der Erregerkraft und der Bewegung der Masse gemessen. Bild 14 zeigt den Verlauf in Abhängigkeit von der Frequenz.

Die Abweichungen von der theoretischen Kurve sind durch Resonanzen der Federn und die endliche Steifigkeit der Einspannung zu erklären.

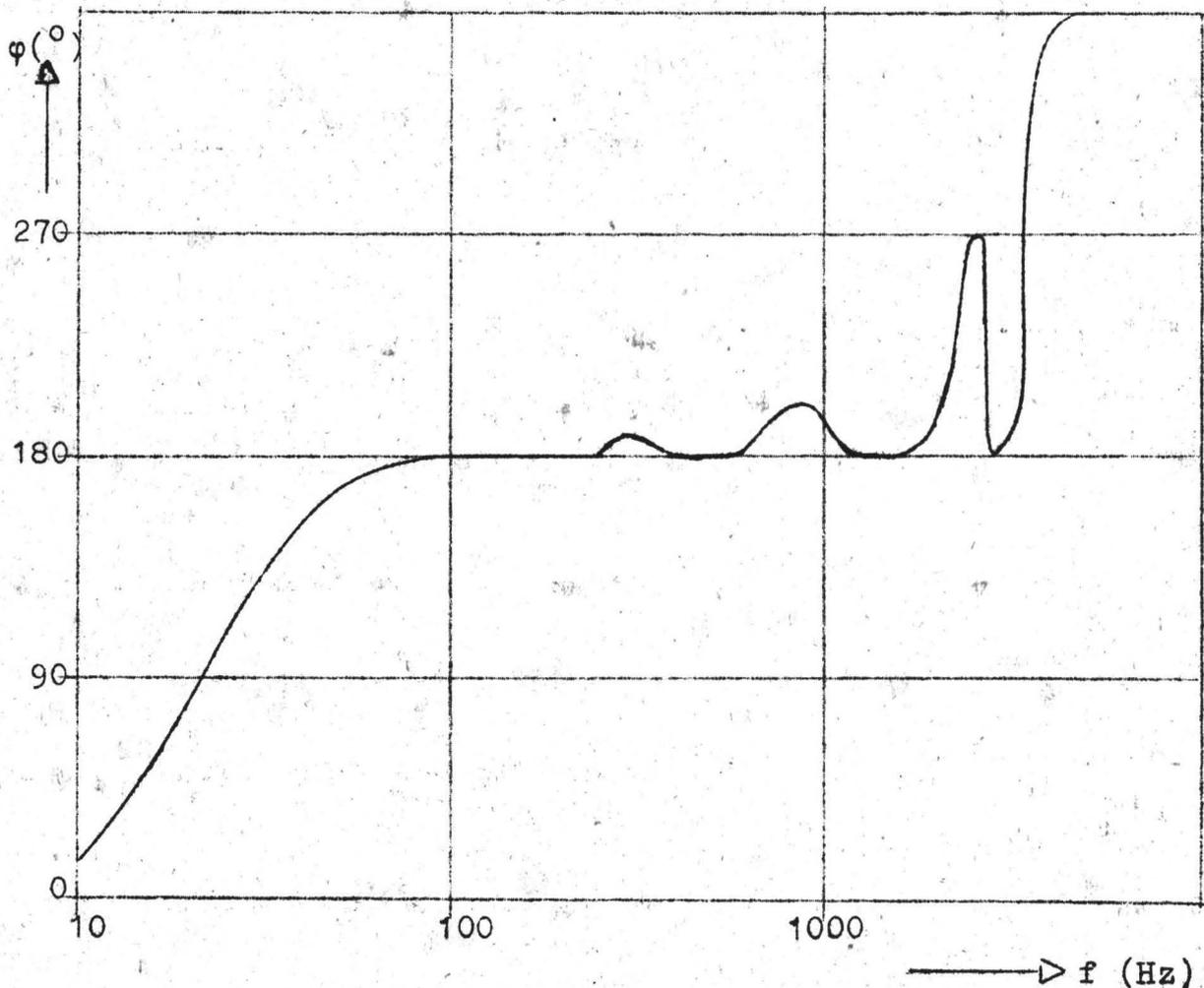


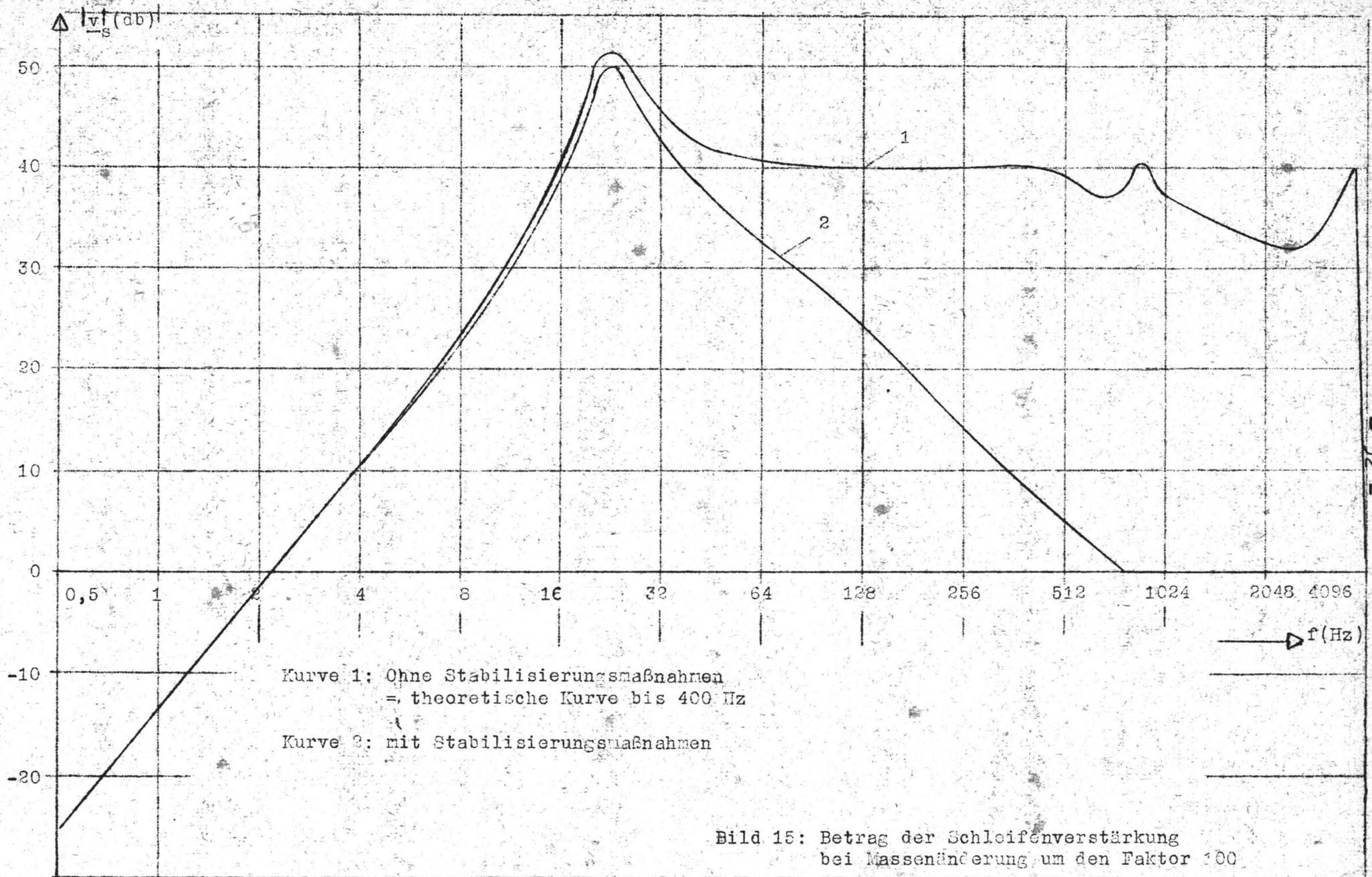
Bild 14: Phasengang des mechanischen Systems bei Anregung über das Tauchspulsystem

Die Resonanzen der Federn lassen sich nicht vermeiden, da ja jede Feder massebehaftet ist. Im folgenden Abschnitt soll nun gezeigt werden, wie man trotz dieser Schwierigkeiten einen stabilen Kreis aufbauen kann.

6. 24 Maßnahmen zur Stabilisierung des Regelkreises bei Massenänderung

In Bild 15 ist der Frequenzgang der gesamten Schleifenverstärkung dargestellt. Die Kurve 1 stimmt mit der nach Gleichung (19) berechneten theoretischen Kurve bis zu einer Frequenz von ca. 400 Hz gut überein, Nun tritt aber schon bei 830 Hz durch eine Resonanz der Blattfedern eine Anhebung und danach ein ziemlich steiler Abfall der Verstärkung auf. Die zusätzliche Phasendrehung beträgt zwar bei dieser Frequenz erst 90° , bringt man jedoch jetzt ein weiteres Tiefpaßglied an, um den Betrag der Schleifenverstärkung bei der nächsthöheren Resonanzfrequenz von ca. 3000 Hz auf eins herabzusetzen, weil dort die Stabilitätsbedingungen nicht mehr erfüllt sind, so erzeugt dieses Netzwerk auch bei der Frequenz von 830 Hz eine zusätzliche Phasendrehung von 90° . Der Regelkreis schwingt dann mit einer Frequenz von etwa 800 Hz. Aus diesen Gründen kommt man nicht umhin, den Betrag der Schleifenverstärkung schon bei 800 Hz auf 0 db herabzusetzen durch einen definierten Abfall um 10 db/Oktave. Dazu wird zwischen die beiden Differenzierverstärker ein Tiefpaß geschaltet, dessen Grenzfrequenz je nach Massenvergrößerung umgeschaltet wird. Ferner werden die Differenzierverstärker etwas anders dimensioniert (siehe Schaltbild). Die günstigsten Werte können nur durch Versuche gefunden werden.

In Bild 15 ist die durch die Stabilisierungsmaßnahmen erzielte Kurve mit eingezeichnet (Kurve 2). Diese Kurve stimmt mit der theoretischen nur bis zu einer Frequenz von ca. 6 Hz überein. Der Bereich, in dem die gewünschte Massenvergrößerung wirklich vorhanden ist, reicht von einer unteren Frequenz ($< 0,1$ Hz) bis etwa 6 Hz. Die untere Grenze ist durch die Differenzierverstärker gegeben. Oberhalb von 6 Hz wird die Massenvergrößerung mehr und mehr unwirksam, was sich in der Anzeige als



Amplituden- und Phasenfehler bemerkbar macht (siehe Bild 16). Wichtig ist, daß die Rückkopplung bei tiefen Frequenzen bis unterhalb von 0,1 Hz richtig arbeitet, da durch eine zusätzliche Federänderung die Eigenfrequenz auf 0,22 Hz gelegt werden soll.

Bild 16 zeigt den Phasengang der Anzeige des rückgekoppelten Schwingungsaufnehmers bei maximaler Massenvergrößerung. Die Dämpfung von $D = 0,6$ wurde ebenfalls auf elektronischem Wege eingestellt.

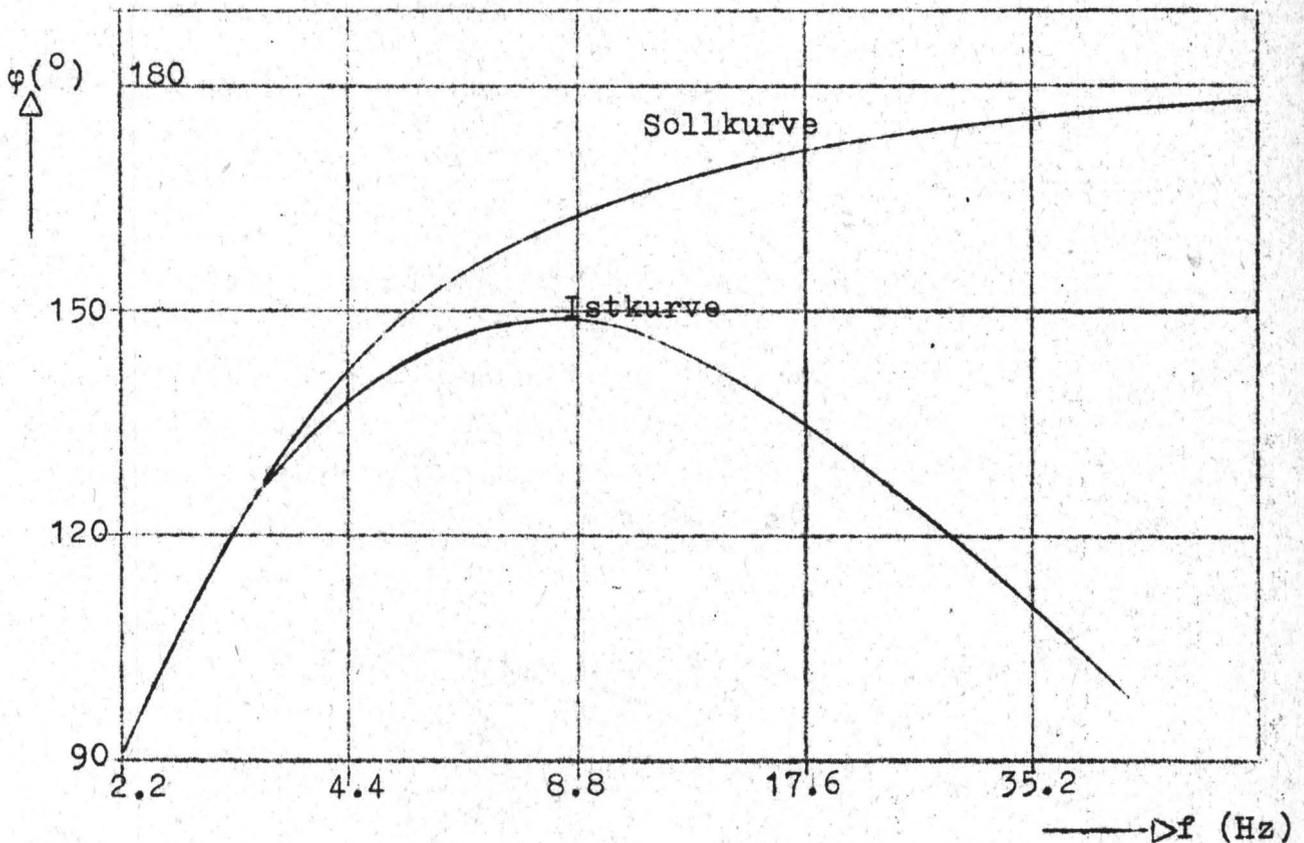


Bild 16: Phasengang des rückgekoppelten Systems bei maximaler Massenvergrößerung und $D = 0,6$

Das geregelte System zeigt also schon bei **relativ niedrigen Frequenzen** beträchtliche Phasenfehler infolge der Stabilisierungsmaßnahmen. Durch eine Frequenzgangkorrektur, die außerhalb des Regelkreises am Ausgang der TF-Meßbrücke vorgenommen wird und dadurch die Stabilität nicht beeinflusst, läßt sich aber trotzdem ein wesentlich größerer Frequenzbereich für die

Schwingungsmessung ausnutzen. Wie aus Bild 16 ersichtlich ist, kommt es darauf an, die höheren Frequenzen etwas abzuschwächen. Die beste Dimensionierung des Korrektur-Netzwerkes kann nur durch Versuche ermittelt werden. Je nach Größe der Massenrückführung muß das Netzwerk entsprechend umgeschaltet werden. Bild 17 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

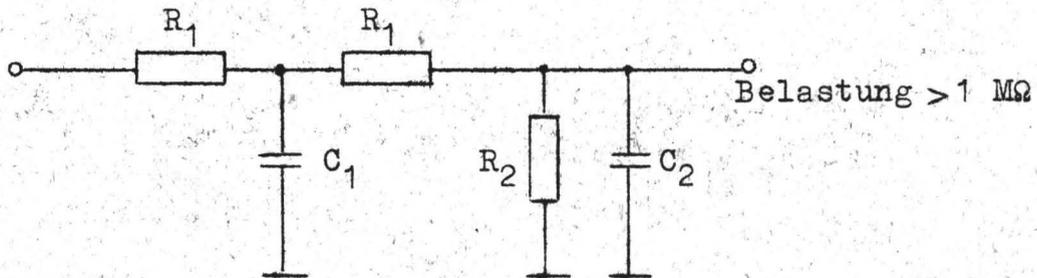


Bild 17: Netzwerk zur Frequenzgangkorrektur

Durch diese Korrektur erreicht man auch bei der enormen Massenvergrößerung von 1:100 bis etwa 150 Hz eine richtige Anzeige. Der Phasengang des korrigierten rückgekoppelten Systems ist in Bild 18, der Amplitudenfehler in Bild 19 dargestellt.

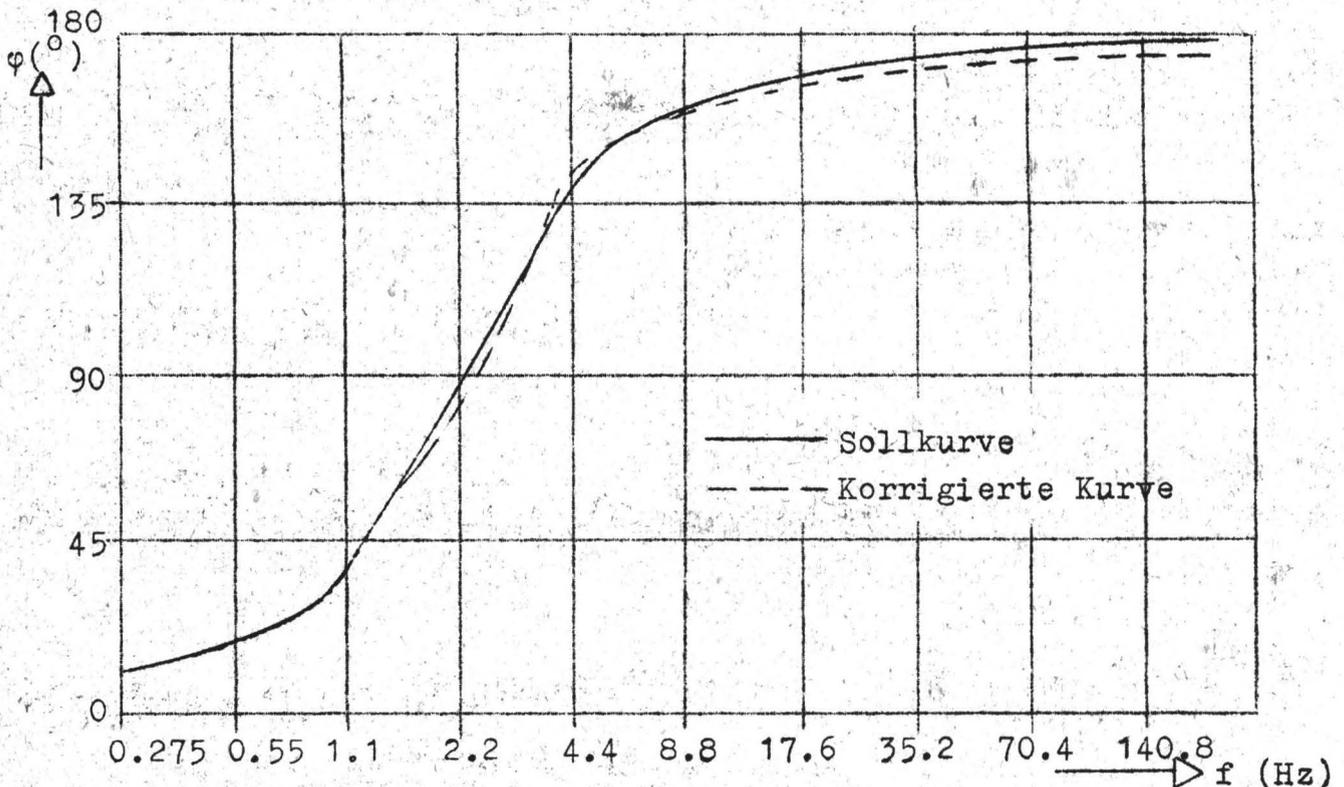


Bild 18: Phasengang des korrigierten rückgekoppelten Systems bei maximaler Massenvergrößerung und $D = 0,6$

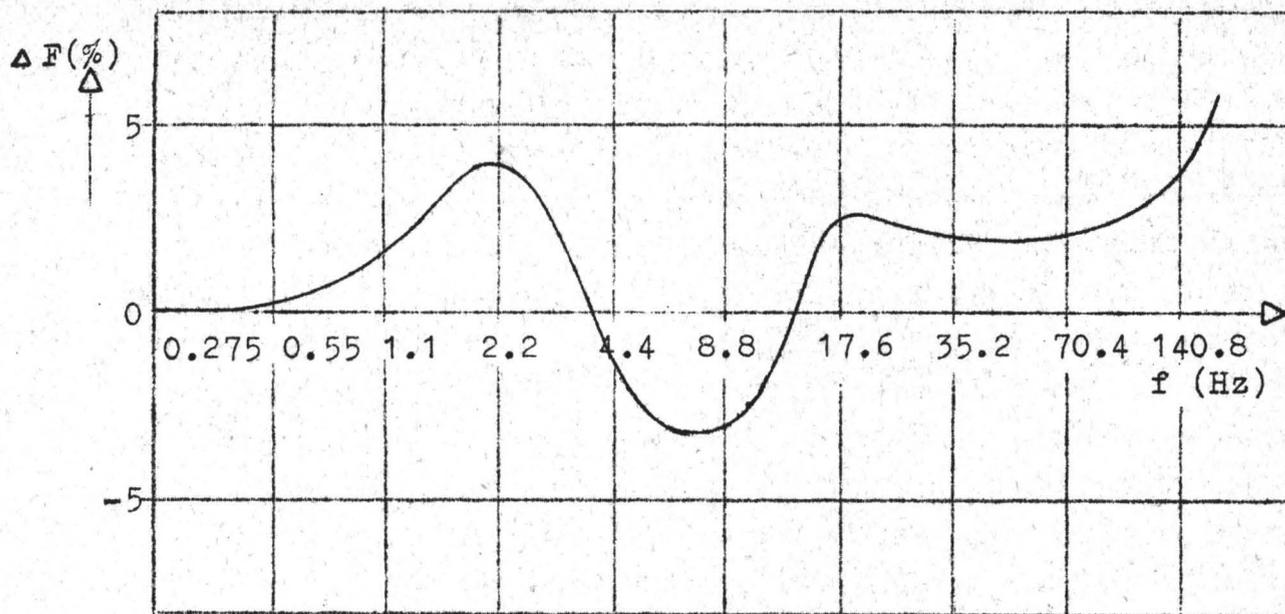


Bild 19: Amplitudenfehler des korrigierten rückgekoppelten Systems bei maximaler Massenvergrößerung und $D = 0,6$ bezogen auf ein entsprechendes mechanisches System

Bei Einstellung einer anderen Massenvergrößerung mit einem entsprechenden Korrektur-Netzwerk verläuft die Fehlerkurve ähnlich. Der Fehler ist in dem angegebenen Frequenzbereich immer kleiner als $\pm 5\%$. Wird die Eigenfrequenz durch eine zusätzliche Federänderung weiter herabgesetzt, so ändert sich die Fehlerkurve nicht, da in dem hinzukommenden Frequenzbereich die Massenrückkopplung richtig arbeitet.

Der zu Beginn des Abschnittes 6.24 erwähnte Tiefpaß hat neben der Stabilisierung des Regelkreises noch eine zweite Aufgabe. Bisher wurde noch nicht erwähnt, daß am Ausgang der Trägerfrequenz-Meßbrücke eine geringe Störspannung liegt. Diese besteht aus einem Frequenzgemisch von 50 kHz und 100 kHz und einem Rauschanteil. Insgesamt liegt eine Störspannung von $2 \text{ m}\hat{V}$ am Eingang des ersten Differentiators. Die Verstärkung für hohe Frequenzen liegt aber bei 4×10^4 , so daß am Ausgang des zweiten Differentiators ca. $80 \hat{V}$ auftreten und der

zweite Verstärker übersteuert wird. Durch den Tiefpaß wird der Übertragungsbereich so stark beschnitten, daß die Störspannung unschädlich ist.

6.3 Federänderung und Dämpfungsänderung

Die Schleifenverstärkung geht bei Federänderung für $\omega \rightarrow \infty$ gegen Null infolge des Tiefpaßverhaltens des mechanischen Systems. Wegen der geringen Größe der Schleifenverstärkung ist der Betrag der Verstärkung schon bei einer Frequenz von etwa 30 Hz kleiner als eins, so daß die im vorigen Abschnitt diskutierten Probleme hier nicht auftreten. Die Meßgenauigkeit ist bei der reinen Federänderung lediglich vom Frequenzgang des mechanischen Systems abhängig. Aus Bild 14 kann entnommen werden, daß ein Phasenfehler von 5° erstmalig bei 250 Hz auftritt. Wird außerdem die Dämpfung auf elektrischem Wege verändert; so muß zusätzlich der Fehler des ersten Differentiators berücksichtigt werden. Der Phasenfehler beträgt dann bei 300 Hz ca. 5° , da der Phasenfehler des Differentiators zunächst kompensierend wirkt.

Die Dämpfungsänderung ist immer im Zusammenhang mit einer Feder- bzw. Massenänderung zu betrachten. Für die Stabilitätsuntersuchung sind zwei charakteristische Betriebsfälle zu unterscheiden:

- a) maximale Federänderung ohne Massenänderung
- b) maximale Massenvergrößerung ohne Federänderung

Der Fall a) erfordert die maximale Entdämpfung. Im Fall b) muß die größte zusätzliche Dämpfung aufgebracht werden.

Berechnet man für beide Fälle die Schleifenverstärkung, so sieht man, daß der Fall a) im Prinzip der reinen Federänderung gleicht, also ohne besonderen Maßnahmen stabil ist. Der Fall b) gleicht dem im Abschnitt 6.2 behandelten Fall der reinen Massenänderung und erfordert, wie dort gezeigt wurde, entsprechende Stabilisierungsmaßnahmen. Der Verlauf der Schleifenverstärkung ist ähnlich der in Bild 15 wiedergegebenen Kurve.

Für die Stellungen $\bar{\gamma}_m = 4$ und $\bar{\gamma}_m = 5$ ist die Leistungsgrenze des Endverstärkers für die zulässige Maximalbeschleunigung maßgebend. Bei der vorliegenden Konstruktion des Gebers und des Endverstärkers kann über die Tauchspule maximal eine Beschleunigung von 2,6 g ($1 \text{ g} = 981 \text{ cm/sec}^2$) erzeugt werden. Die Schwingbeschleunigung darf dann um 4,5 % bzw. um 1 % größer sein. In den Stellungen $\bar{\gamma}_m = 1$ bis 3 ist die Aussteuerungsgrenze des zweiten Differenzierverstärkers entscheidend, da der Spannungsteiler für die Masseneinstellung aus schaltungstechnischen Gründen hinter dem Differenzierverstärker liegt. Die Maximalleistung des Endverstärkers kann deshalb für diese Stellungen nicht ausgenutzt werden. In den Stellungen $\bar{\gamma}_m = 1$ und 2 streben die Kurven bei hohen Frequenzen wieder einem konstanten Schwingweg zu. Die beiden Differenzierverstärker arbeiten dann zusammen mit den Tiefpaßgliedern annähernd als Linearverstärker, d.h. die Ausgangsspannung des zweiten Differenzierverstärkers steigt bei konstanter Schwingamplitude nur noch wenig mit wachsender Frequenz. Das macht sich besonders stark in der Stellung $\bar{\gamma}_m = 1$ bemerkbar, weil dort die Massenvergrößerung ausgeschaltet ist. In den anderen Stellungen wird dieser Einfluß kompensiert, da gleichzeitig die elektrisch erzeugte Gegenkraft kleiner und damit bei gleichem Schwingweg die Relativbewegung der Masse größer wird. Die Vergrößerung der Relativbewegung bei hohen Frequenzen, die für die Anzeige die erwähnte Korrektur notwendig macht, erbringt den Vorteil, daß die mit dem mechanisch-elektrischen Wandler zu messenden Wege ebenfalls größer sind.

Die kleinsten noch meßbaren Größen sind durch die Nullpunktstabilität des geregelten Aufnehmers gegeben. Die Nullpunktschwankungen sind am größten in Stellung $\bar{\gamma}_c = 5$. Die Feder ist dann so weich (145 mg/mm), daß schon sehr kleine Spannungsschwankungen beträchtliche Verlagerungen der Masse bewirken. Die kurzzeitigen Schwankungen der wegproportionalen Ausgangsspannung liegen bei $\pm 70 \text{ mV} \Delta \pm 2 \mu$. Wird zusätzlich die Masse um den Faktor 100 geändert ($\bar{\gamma}_c = 5$, $\bar{\gamma}_m = 5$), so werden die Schwankungen etwas größer, da der Einfluß des zweiten Differenzierverstärkers hinzukommt. Die wegproportionale Ausgangsspannung am Ausgang x_k wandert dann kurzzeitig um $\pm 80 \text{ mV} \Delta \pm 300 \mu$.

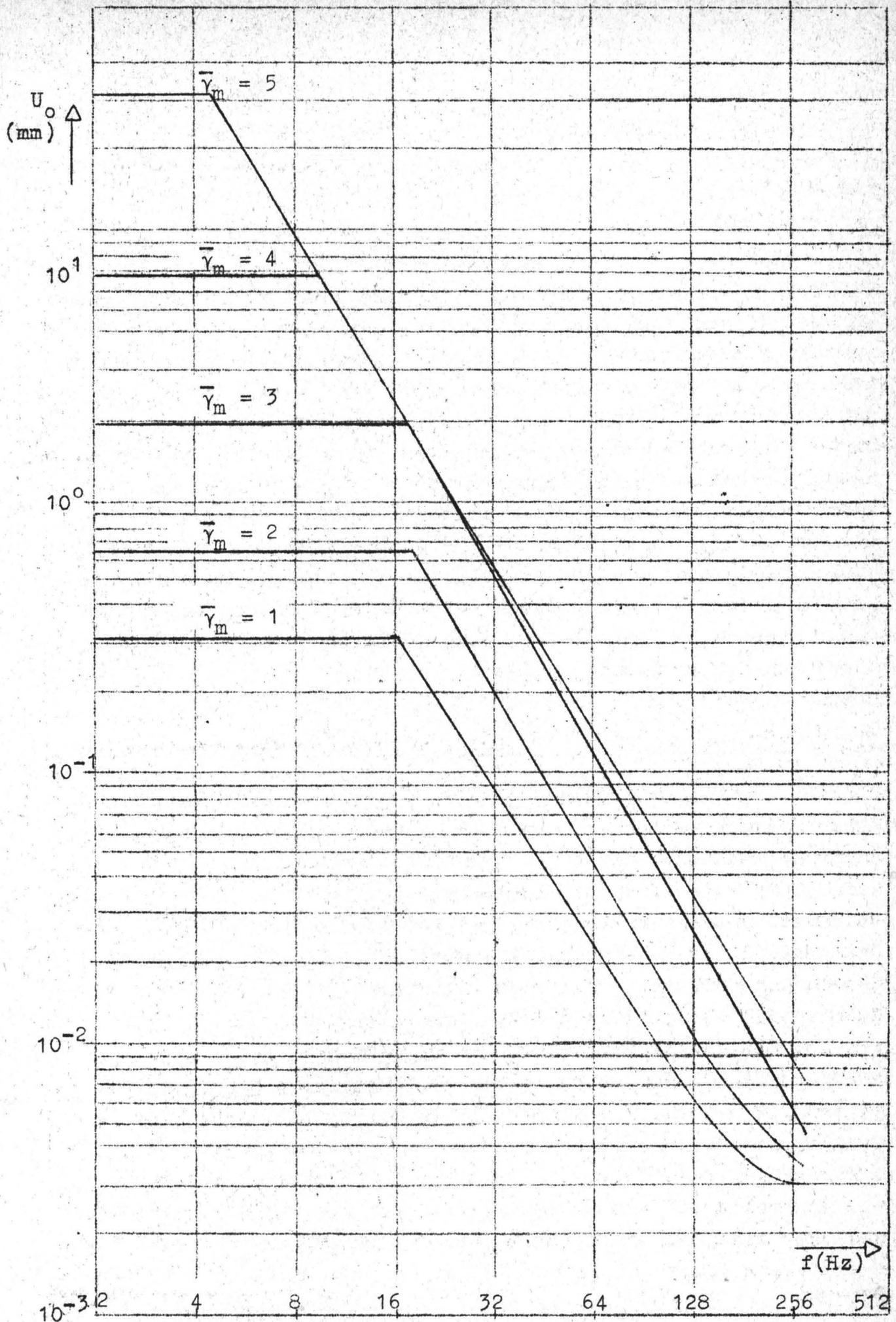


Bild 20: Maximaler Schwingweg als Funktion d. Frequenz u. d. Masseneinstellung

Der Ausgang x zur Abnahme einer geschwindigkeitsproportionalen Spannung darf nur verwendet werden, solange keine Massenänderung vorgenommen wird ($\bar{\gamma}_m = 1$), da keine Korrektur entsprechend dem Ausgang x_k vorgesehen ist. Die Empfindlichkeit beträgt 5,8 V/mm/sec.

Der für die Schwingungsmessung ausnutzbare Frequenzbereich hängt ab von der Stellung $\bar{\gamma}_c$ und $\bar{\gamma}_m$. Die untere Grenze ist durch die jeweilige Eigenfrequenz gegeben, die aus Tabelle 1 zu entnehmen ist. Die obere Grenze liegt für $\bar{\gamma}_m = 1$ und beliebiges $\bar{\gamma}_c$ bei 300 Hz, für $\bar{\gamma}_m = 2$ bis 5 und beliebiges $\bar{\gamma}_c$ bei 150 Hz. Bezieht man den Anzeigefehler auf die Anzeige eines rein mechanischen Systems entsprechender Eigenfrequenz und Dämpfung, so ist der Amplitudenfehler bis zu einer Frequenz von 300 Hz bzw. 150 Hz kleiner als $\pm 5\%$. Der Phasenfehler ist kleiner als 5° (siehe auch Bild 18 und 19). In der Nähe der jeweiligen Eigenfrequenz ist der absolute Anzeigefehler durch die Vergrößerungsfunktion eines seismischen Systems mit einer Dämpfung von $D = 0,6$ entsprechend den Gleichungen (6) und (7) gegeben.

6.5 Praktische Erprobung des Meßgerätes auf einem Schwingtisch

Die bei den beschriebenen Versuchen benutzte elektromagnetische Anregung des Schwingungssystems ist zwar ideal geeignet, um Eigenfrequenz, Dämpfungsmaß und Frequenzgang des geregelten Aufnehmers zu bestimmen, sie gestattet es aber nicht, die Amplitude der Anzeige in Abhängigkeit vom Schwingtisch direkt zu überprüfen. Der Schwingungsaufnehmer wurde deshalb auf einem mechanischen Horizontal-Schwingtisch erprobt. Die Amplitude des Schwingtisches wurde auf einen festen Wert eingestellt, der mit der Meßuhr ausgemessen wurde; er betrug $\pm 4,99$ mm. Am Schwingungsaufnehmer wurde die tiefste mögliche Eigenfrequenz ($f_e = 0,22$ Hz) und die entsprechende Dämpfung eingestellt. Die Oszillogramme in Bild 21 geben die Anzeige des Gerätes bei verschiedenen Erregerfrequenzen wieder. Die Tischamplitude wurde als Kontrolle mit einem Philips-Verlagerungsaufnehmer gemessen, der über eine mechanische Untersetzung angebracht war. Die höchste Meßfrequenz liegt bei 10 Hz, da bei der benutzten Amplitude dort die Grenze für die zulässige Tischbeschleunigung erreicht ist.

Aus der Tabelle 3 ist zu entnehmen, daß bei der gewählten Eigenfrequenz die Empfindlichkeit 210 mV/mm beträgt. Eine Auswertung der Diagramme ergibt, daß die Anzeige bei höheren Frequenzen bis auf - 2 % genau ist. In der Nähe der Eigenfrequenz erfolgt eine Bewertung entsprechend dem durch das gewählte Dämpfmaß von $D = 0,6$ gegebenen Frequenzgang. Die Meßergebnisse stimmen also mit den im vorigen Abschnitt gemachten Fehlerangaben überein.

7. Schaltungstechnik

7.1 Differenzierverstärker

Bild 22 zeigt die Schaltung eines Differenzierverstärkers. In der ersten Stufe ist eine Pentode sehr großer Steilheit eingesetzt. Dadurch kann trotz eines kleinen Anodenwiderstandes eine hohe Verstärkung erreicht werden, und die Stufe hat eine hohe obere Grenzfrequenz. Die zweite Stufe ist ein Kathodenverstärker. Sie ist notwendig, um einen niedrigen Ausgang herzustellen. Die obere Grenzfrequenz dieser Stufe liegt jedoch so hoch, daß sie für die Stabilität des ganzen gegengekoppelten Verstärkers keine Rolle spielt. Die Kopplkapazität ist so groß bemessen, daß sie auch bei sehr tiefen Frequenzen noch keinen Einfluß hat. Die Längskapazität am Eingang muß möglichst klein sein, damit ihr Widerstand auch bei hohen Frequenzen noch groß ist gegen den Innenwiderstand der Spannungsquelle. Der Innenwiderstand der jeweiligen Spannungsquelle addiert sich als Reihenwiderstand zu der Eingangskapazität und bewirkt einen zusätzlichen Differentiationsfehler bei hohen Frequenzen. Die endgültige Dimensionierung weicht aus Gründen der Stabilität des Regelkreises von der idealen etwas ab. Frequenz- und Phasengang wurden bereits in Bild 18 und 19 wiedergegeben. Die zweite halbe ECC 83 ist leider nicht für den zweiten Differenzierverstärker zu verwenden, da durch die Kopplung von Eingang und Ausgang in der Röhre starke Schwingneigung besteht. Sie wird aber in der Gesamtschaltung des Regelkreises noch verwendet als Trennstufe.

$$f_e = 0,22 \text{ Hz}, \quad D = 0,6$$

Schwingtischamplitude: $\pm 4,99 \text{ mm}$

Papiergeschwindigkeit: 12,5 mm/sec, 25 mm/sec u. 100 mm/sec

Kurve 1: Relative Vergleichsmessung, Kurve 2: Absolutmessung

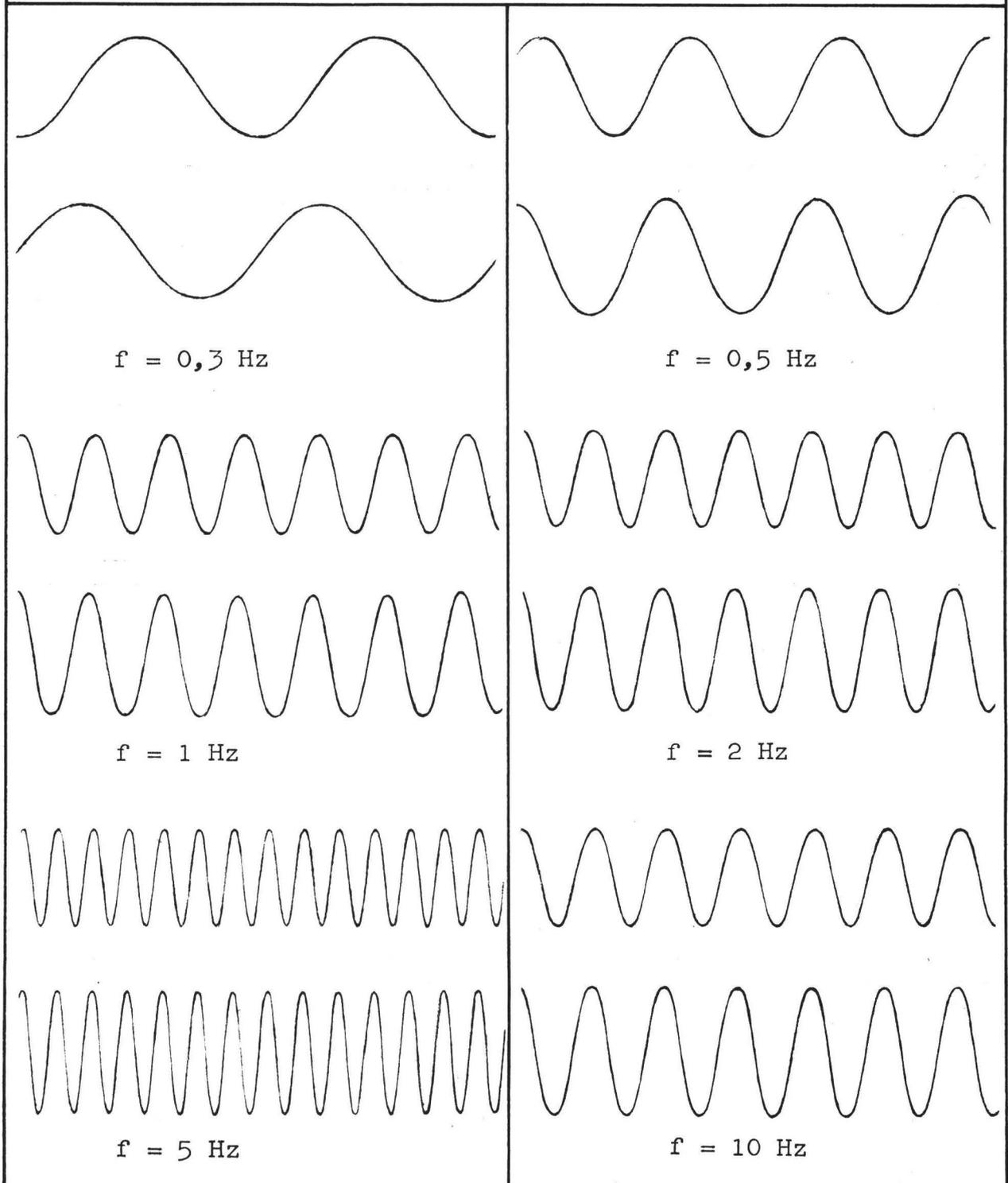
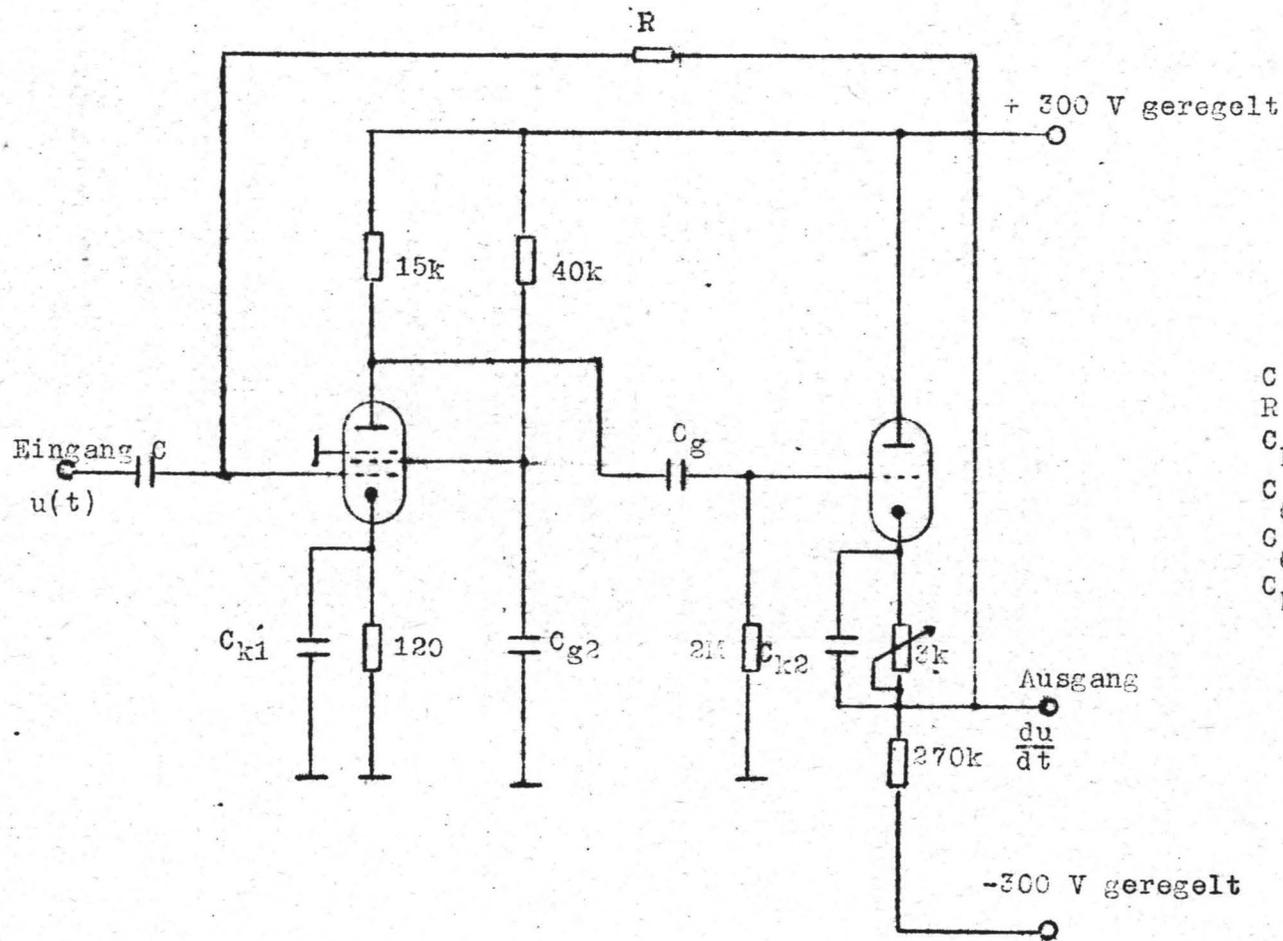


Bild 21: Messungen auf einem mechanischen Schwingtisch



Dimensionierung

	optimal	endgültig
C	5000 pF	5000 pF
R	5 MΩ	5 MΩ
C _{k1}	100 /μF	100 /μF
C _{g2}	0,1 /μF	0,01 /μF
C _g	1 /μF	1 /μF
C _{k2}	0,68 /μF	0,68 /μF

E 180 F

1/2 E 83 CC

Bild 22: Schaltung eines Differenzierverstärkers

7.2 Endverstärker

Bild 23 zeigt die Schaltung des Endverstärkers. Die Endstufe ist symmetrisch ausgeführt, damit Schwankungen der Versorgungsspannungen sich nicht als Nullpunktsschwankungen auswirken können. Durch eine Gegenkopplung von der Kathode der einen Röhre auf das Gitter der anderen werden kleine Schwankungen der Phasenumkehrstufe geglättet. Der Innenwiderstand der so gegengekoppelten Endstufe beträgt 13Ω . Der maximale unverzerrte Ausgangsstrom liegt bei $\pm 20 \text{ mA}$. Als Phasenumkehrstufe dient eine symmetrische gleichtaktkompensierte Differenzverstärkerstufe. Durch eine geringe Verstellung der Symmetrier-Potentiometer kann der Nullpunkt des Endverstärkers eingestellt werden. Das kann wie erwähnt, in kleinen Grenzen dazu verwendet werden, eine statische Verlagerung der Masse rückgängig zu machen. Die zwei Eingänge der Differenzverstärkerstufe sind noch einmal aufgeteilt, damit eine Umpolung der Dämpfung vorgenommen werden kann. Der Verstärkungsfaktor des Endverstärkers wird dadurch noch einmal halbiert. Die Spannungsstromverstärkung beträgt bei einem Lastwiderstand von 330Ω $4,1 \text{ mA/V}$. Wegen der großen Entkopplungswiderstände von $3 \text{ M}\Omega$ im Eingang zur Summation, die zusammen mit der Eingangskapazität ein Abfallen der Verstärkung schon bei relativ niedrigen Frequenzen bewirken, muß eine Frequenzgangkorrektur vorgenommen werden. Das geschieht am besten an den Symmetrier-Widerständen der Phasenumkehrstufe. Der Frequenzgang verläuft dann bis etwa $2,5 \text{ kHz}$ gerade. Darüber wird er entsprechend den Stabilitätsforderungen im Regelkreis ausgebildet. Als Symmetrier-Widerstände werden Metallschicht-Widerstände verwendet, die gegenüber den normalen Kohleschicht-Widerständen einen wesentlich kleineren Temperatur-Koeffizienten haben.

7.3 Regeleinheit

Die unter 7.2 und 7.3 beschriebenen Bausteine werden zu der in Bild 24 im Gesamtschaltbild gezeigten Regeleinheit zusammengefügt. Die Regeleinheit ist so aufgebaut, daß eine Herabsetzung der Eigenfrequenz durch Feder- und Massenänderung und eine Dämpfungsänderung möglich ist. Am Eingang liegt ein Hauptpotentiometer, mit dem der gesamte Regelkreis unterbrochen werden kann.

Vor jeder Einstellung von Feder oder Masse soll der Regelkreis immer aufgetrennt werden, damit Schaltstöße vermieden werden. Danach wird die Schleifenverstärkung über das Hauptpotentiometer P_3 kontinuierlich bis zum jeweiligen Maximalwert vergrößert. Zwischen dem ersten Differentiator und dem Endverstärker ist ein Kathodenfolger als Trennstufe eingeschaltet, um eine Kopplung vom Ausgang des zweiten Differentiators auf seinen Eingang über die Additions-Widerstände $R_{A1} + R_{A4}$ zu vermeiden. Der Kathodenfolger vor dem ersten Differentiator ist notwendig, um einen niedrigen Quellwiderstand zu schaffen.

Die Federeinstellung erfolgt über den Schalter $S1$. Die Dämpfung wird an einem 10-Gang-Wendelpotentiometer P_4 mit einem Digitalknopf eingestellt. Ueber einen zweipoligen Umschalter $S3$ kann die Dämpfung umgepolt werden. Gleichzeitig wird damit die Schaltbuchse $B3$ für den Prüfgenerator umgeschaltet. Der Schalter $S2$ ist ein zweipoliger 2-Ebenen-Schalter. Damit wird die Massenvergrößerung ($S2_1$) und das Stabilisationsnetzwerk ($S2_2$) sowie das Korrektornetzwerk ($S2_3$ und $S2_4$) umgeschaltet. Der Nullpunkt des ersten und zweiten Differentiators kann an je einem Potentiometer mit Feintrieb (P_1 und P_2) eingestellt werden. Zum Anschluß eines Instrumentes sind zwei Meßbuchsen $B1$ und $B2$ vorgesehen. Der Nullpunkt des Endverstärkers ist mit Hilfe des Potentiometers P_5 einstellbar.

Die Bilder 25 bis 27 zeigen die gesamte Meßeinrichtung.

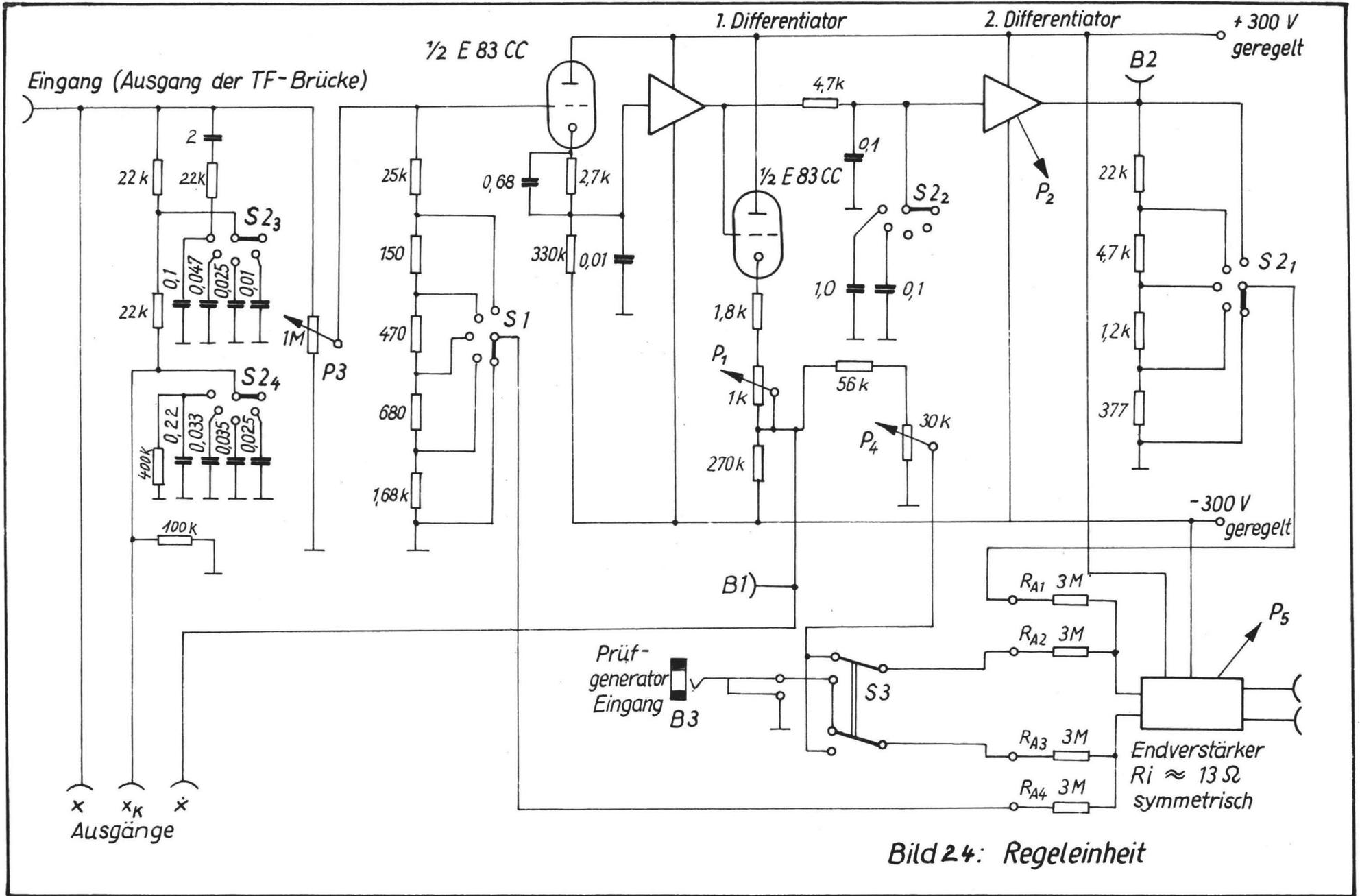


Bild 24: Regelgerät

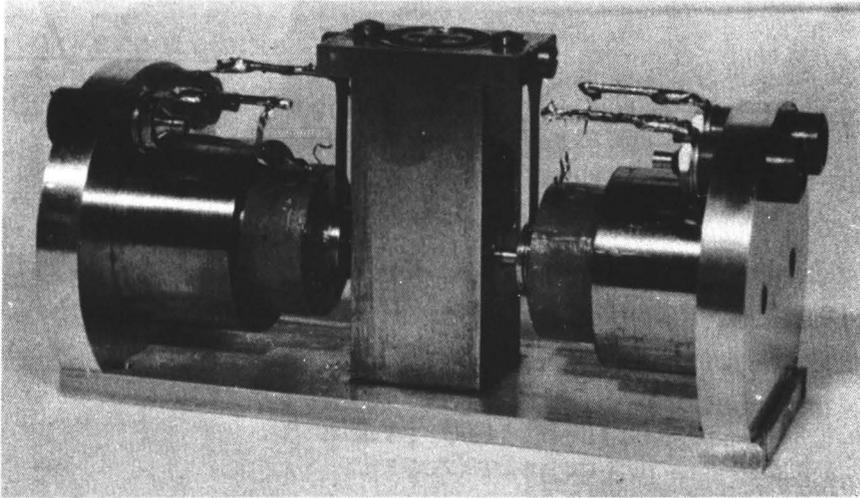


Bild 25: Mechanisches System

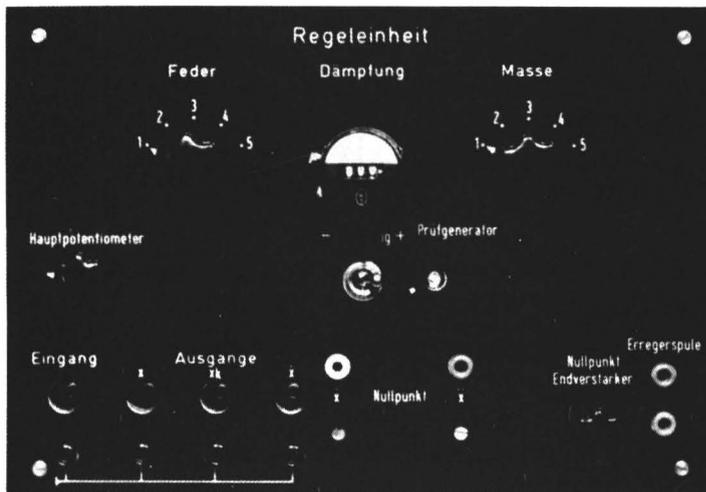


Bild 26: Regeleinheit

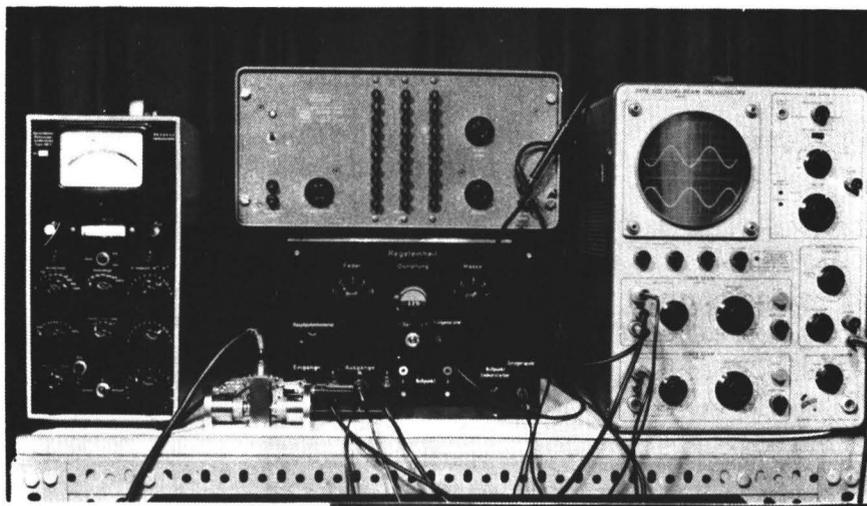


Bild 27: Versuchsaufbau mit Aufnehmer, Trägerfrequenz-Meßbrücke, Regeleinheit, Erregergenerator und Kathodenstrahloszillograf

Literaturverzeichnis

- /1/ C.v. Basel Neue Möglichkeiten in der Bauart von Schwingungsmeßgeräten
Archiv für technisches Messen 1958/1959
Lieferung 273 und 276, V 170 - 6/7
- /2/ H.W. Bode Network Analysis and Feedback Amplifier Design
D. van Nostrand Company, Inc. New York, 1947
- /3/ Donner Donner Linear Servo Accelerometer
Donner Scientific Company
Concord California
(Werksunterlagen)
- /4/ C.M. Harris Shock and Vibration Handbook, Vol. 1
C.E. Crede Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
New York/Toronto/London 1961
- /5/ K. Klotter Technische Schwingungslehre
1. Band, Springer-Verlag
Berlin/Göttingen/Heidelberg
- /6/ H. Köhler Grundzüge der Erschütterungsmessung
Akademische Verlagsgesellschaft
Geest u. Portig KG, Leipzig 1956
- /7/ F.F. Liu Extending Transducer Transient Response by
T.W. Berwin Electronic Compensation for High-Speed
Physical Measurements
The Review of Scientific Instruments
Vol. 29, No. 1, January 1958
- /8/ J. Peters Einschwingvorgänge, Gegenkopplung und
Stabilität
Springer Verlag 1954
Berlin/Göttingen/Heidelberg
- /9/ F.E. Terman Radio Engineer's Handbook
Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
New York and London 1943
- /10/ W. Mindt Seismische Messung langsamer Schwingungen
durch sehr tief abgestimmte mechanische
Systeme
Technischer Bericht Nr. 51
- /11/ W. Heusler Seismische Messung langsamer Schwingungen
durch Beschleunigungsmessung und zwei-
malige elektrische Integration
Technischer Bericht Nr. 66
- /12/ W. Heusler Untersuchung mechanisch-elektrischer Regel-
kreise zur seismischen Messung mechanischer
Schwingungen
Dissertation TU Berlin 1963

