

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR  
Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften  
**ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE**

---

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde  
Nr. 88

**Beiträge**  
**zum Problem der Astasierung von Seismographen**  
**und verwandten mechanischen Schwingern**

von

Erhard Unterreitmeier

Herausgeber: Der Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam

---

Als Manuskript gedruckt

Potsdam 1986

III-12-12 F 396/86

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Die Untersuchung bekannter Astasierungen	4
1.1. Die Aufgabe der Seismometrie und die Beziehung der Astasierung zu ihr	4
1.2. Die Auffassung von einer Astasierung bei Pendeln und Seismographen im historischen Überblick	7
1.3. Übliche Darstellungen mechanisch astasierter Seismographen	9
1.4. Astasierung bei geregalten elektronischen Seismographen	14
1.5. Grenzen bekannter Astasierungen	17
1.6. Erkenntnisse zum physikalischen Verständnis der Astasierung	24
1.7. Die Konsequenz dieser Erkenntnisse	37
2. Der dynamisch astasierte Seismograph	40
2.1. Die genäherte Übertragungsfunktion der Konfiguration HP2-HP1	40
2.2. Abschätzungen zur Stabilität	43
2.3. Untersuchung der Parametereinflüsse in der vollen Übertragungsfunktion mittels Rechnermodellierung	46
2.4. Vorschläge für technische Ausführungen dynamisch astasierter Seismographen	62
2.5. Modellierung auf einem Mikrorechner als Realisierungshilfe	74
3. Zum allgemeinen Anwendungsbereich des dynamisch astasierten mechanischen Schwingers	76
3.1. Anwendungskategorien	76
3.2. Rückschau und Ausblick	79
Literatur	82

## Zusammenfassung

Aus einer Analyse des Standes und der Grenzen von Astasierungen in Seismographensystemen wird ein Vorschlag für eine dynamische Astasierung abgeleitet. Diese wird theoretisch untersucht und für eine Anwendung auf einem Rechner modelliert. Eine Erhöhung der Eigenperiode  $T_g$  auf ca.  $5 T_g$  für den Nutzsignalbereich ist erreichbar. Die Anwendung auf andere mechanische Schwinger ist möglich.

## Summary

It is presented an analysis of wellknown methods and procedures to lengthen the period of seismometers, esp. those of LA COSTE type. By this way the seismometer with astatism appears as a feedback system with an internal positive feedback. From this results the idea for a dynamic astatism procedure to lengthen the period in a limited signalband. The derived solution is investigated theoretically as well as by computer simulation. A BASIC programm is helpfull for the design of such configurations with period lengthening factors of about 5. Application of the derived procedure is not limited to seismometers.

## Резюме

Проводён анализ известных методов и приборов для астазирования сейсмометров с целью повышения понимания физики астазирования. В результате анализа сейсмометр с увеличению периода является системой регулирования с внутренней положительной обратной связью. Об этом выводит предложение динамического астазирования для увеличения периода на 5 в ограниченной области сигналов. Динамическое астазирование исследовано теоретически и с моделированием на ЭВМ.

## 1. Die Untersuchung bekannter Aftasierungen

### 1.1. Die Aufgabe der Seismometrie und die Beziehung der Aftasierung zu ihr

Mit einer Definition von 1972 [41] kann man mit zulässiger Verallgemeinerung und inhaltlicher Raffung die wissenschaftliche Aufgabe der **S e i s m o l o g i e** hinreichend gut so umreißen: Die Seismologie beschäftigt sich mit dem Nachweis, der Beurteilung, Ortung, Verteilung und Entstehung von Erdbeben und verwandter Erscheinungen. Sie ist Grundlagenforschung mit dem Ziel der Untersuchung des Aufbaus, der Entstehung und des Verhaltens des Erdkörpers oder in neuester Zeit des Mondes und in der Zukunft anderer extraterrestrischer Objekte und ist durch Anwendung von gewonnenen Ergebnissen in der Lage, der Wirtschaft und Industrie ökonomisch bedeutende Hilfen zu geben. Das betrifft beispielsweise die erdbebensichere Bauweise, das Verhalten größerer geographischer Einheiten bezüglich seismischer Erregung, die Verhütung und Beurteilung natürlicher und künstlicher Erschütterungen im Bergbau, in der Industrie und im wissenschaftlichen Gerätebau, die Erkundung des näheren Untergrundes, die Überwachung von Kernexplosionen und eine gegenseitige Befruchtung von Theorie und Gerätebau mit Partnern in Wissenschaft und Forschung.

Die meßtechnische Seite der Seismologie, d. h. der Nachweis und die Registrierung von Erdbeben und die Gewinnung von exakten physikalischen Daten, wird von der **S e i s m o m e t r i e** wahrgenommen. Mit den instrumentellen Mitteln der Seismometrie, vor allem dem seismischen Sensor oder Seismometer/Seismograph als sensierendem Eingangselement der Meßkette "Seismisches Signal" ... "Daten", ist in einem weiteren Perioden- und Dynamikbereich alles an seismischen Signalen aufzunehmen, zu wandeln und zu speichern, was über dem natürlichen Rauschen oder dem künstlicher Quellen liegt und was daher nach der meßtechnischen Erfassung für eine Auswertung und Interpretation im Sinne der forschenden Aufgabenstellung der Seismologie für die Physik des Erdkörpers von Belang sein kann. Bei dieser meßtechnischen Aufgabe (Abb. 1) sind mit Seismometern - auf die wir uns hier beschränken - Signale von Erdbeben und verwandten Erschütterungen in einem Periodenbereich von ca. 0,01 ... 1000 s exakt zu messen. Dieser Messung stehen als nichtseismische Einflußgrößen Störsignale gegenüber, die mit gleichen Perioden auftreten und die Messung verfälschen können. Angefangen von unerwünschten mechanischen Störschwingungen der realen Seismometerkonstruktion geht es über Temperatur-, Luftdruck- und magnetische Einflüsse bis hin zu den elektronischen Rauschquellen der u. U. verwendeten Baugruppen der Meßkette. Darüber liegt dann noch der zeitliche Einfluß in der Variation dieser Einflüsse und in der Alterung der technischen Elemente des Seismometers.

Aus [2] und [13] entnehmen wir Angaben über die Bebenphänomene und deren Frequenz- bzw. Periodenbereiche, die durch die Seismometrie meßtechnisch zu erfassen sind.

10 Hz bis 100 Hz	Wellen aus Mikrobeben und von industriellen Sprengungen,
1 Hz bis 10 Hz	seismische Raumwellen aus Beben und Sprengungen bis etwa 1000 km; kurzperiodisches Rauschen aus Industrie und Verkehr,
1 s bis 10 s	Raumwellen von Erdbeben (Fernbeben), Mikroseismen, ...
10 s bis 100 s	mittelperiodische Oberflächenwellen,
100 s bis 1000 s	langperiodische Oberflächenwellen.

Die Intervallgrenzen verschieben sich noch nach beiden Seiten, wenn höherfrequente Ereignisse untersucht oder freie Schwingungen der Erde registriert werden sollen. Mit Seismometern wäre eine unverfälschte Aufzeichnung möglich, wenn sie in drei Komponenten zur

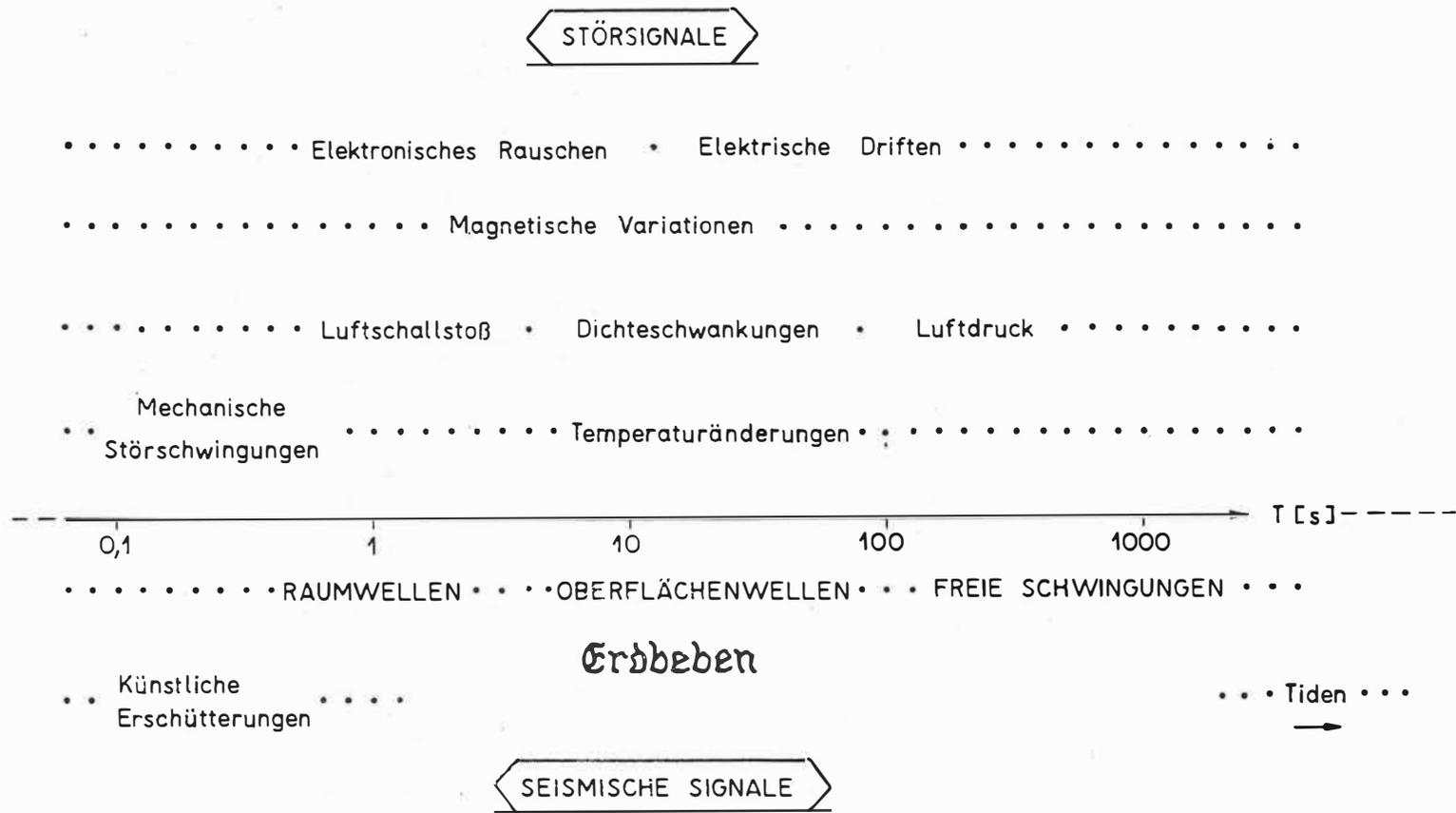


Abb. 1 Gegenüberstellung von seismischen Signalen und Störsignalen

Erfassung dieser im Grunde räumlichen Vorgänge eine entsprechende Bandbreite aufweisen würden. Das ist zusammen mit den gleichzeitig zu erhebenden Auflösungs- und Dynamikforderungen nur unvollkommen möglich.

Sowohl die o. a. Forderungen als auch deren Erfüllung sind Resultat eines Entwicklungsprozesses von etwa 100 Jahren [41]. Dabei ist die Forderung nach einer bestimmten Bandbreite eine der ersten, die zusammen mit der nach Linearität, Dynamik, Auflösung ... auf einen einzusetzenden (Abb. 2) oder erst zu entwickelnden Seismographen zukommen und denen je nach Einsatzbereich noch weitere folgen. Schon früh war klar, daß die unverfälschte Aufzeichnung von Erdbeben einen Referenzpunkt erforderte, der sich möglichst bei einem Erdbeben nicht mitbewegte [23] und der in Seismometern durch eine sehr hohe Eigenperiode des im Meßfall gedämpften Schwingers oder Pendels gegeben sein sollte. Da Seismometer auch stets unter dem Gesichtspunkt der Handlichkeit, also der Größe relativ zur installierenden oder justierenden Person, betrachtet und immer kleinere und besser anwendbare Geräte gefordert werden, entstand sehr früh das Suchen nach "astasierten" konstruktiven Lösungen [5] in denen an sich kurzperiodische physikalische Pendel durch konstruktive Kunstgriffe in längerschwingende Seismometer umgewandelt wurden. Während bei Horizontalseismographen ziemlich einfach und stabil mit Pendeln Eigenperioden  $T_s \geq 50$  s und damit ein nahezu "astatisches" Verhalten erreicht wurde, war das bei Vertikalseismographen wesentlich schwieriger und eine Vielzahl von Astasierungen [3] wurde erdacht und realisiert. Die Fortschritte bei dieser mechanischen Astasierung von Seismographen, insbesondere von Vertikalseismographen, sind im wesentlichen mit den Namen GRAY [11], EWING [6], WIECHERT [50], GALITZIN [8], WILIP [5], LA COSTE [17], MEISSER [21] ... verbunden. In dem Maße, wie man es schaffte, durch Astasierung ein stabiles langperiodisches Seismometer zu realisieren, kam man immer besser den seismologischen Forderungen nach.

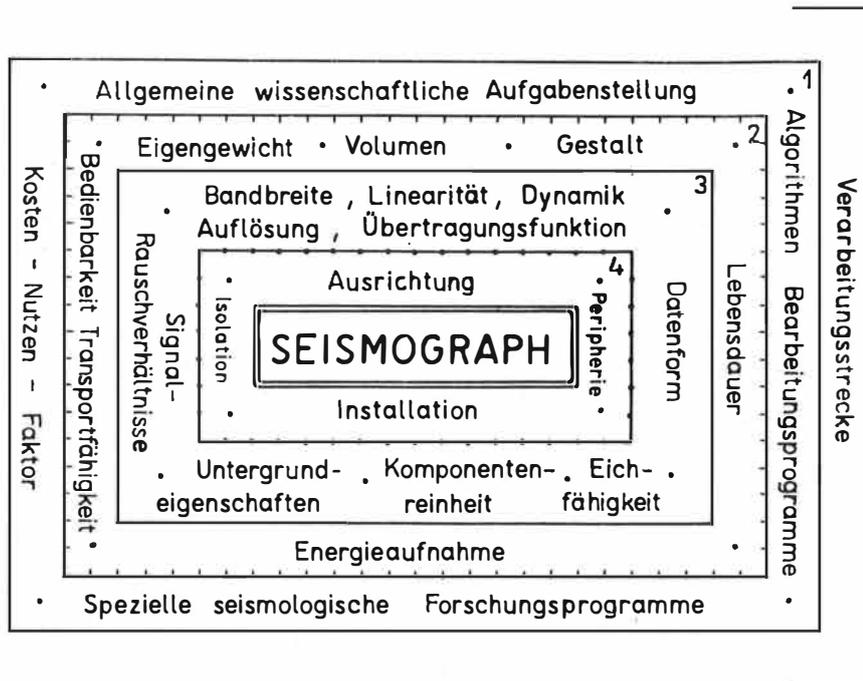


Abb. 2 Anforderungen an einen Seismographen bez. Einsatz oder Neuentwicklung

## 1.2. Die Auffassung von einer Astasierung bei Pendeln und Seismographen im historischen Überblick

Schon MILNE [23] drückte die Hauptschwierigkeit der Schaffung langperiodischer Seismometer bzw. Pendel treffend aus (S. 20):

... "It is not difficult to get a pendulum which will swing at the time of a moderately strong earthquake, but it is somewhat difficult to obtain one which will not swing at such a time" ...

(in BERLAGE [3] S. 337:

... Es ist nicht schwer, ein Pendel zu beschaffen, daß während eines mäßigen Bebens schwingt, schwieriger ist es, ein solches zu konstruieren, das unter diesen Umständen nicht schwingt ...).

BERLAGE schließt auch in seinem Abschnitt "Astasierungsvorrichtungen" daran an, indem er schreibt:

... "Als Ideal schwebt dem Seismologen von jeher eine v o l l k o m m e n s t a - t i o n ä r e Masse vor, d. h. eine solche, die überhaupt nicht an der Bodenbewegung teilnimmt, sondern einem mit dem Erdkörper als Ganzes starr verbundenen Koordinatensystem gegenüber in Ruhe verharret. Nur eine solche Masse würde gestatten, die Bodenbewegung getreu zu registrieren, ihre Bewegung relativ zum Boden und die wahre Bodenbewegung sind geradezu identisch. Astasierungsvorrichtungen haben nun den Zweck, die Eigenschwingungsperiode eines Seismographenpendels künstlich zu vergrößern. Man kann den Nutzen einer möglichst hohen Eigenperiode auch leicht gedanklich folgendermaßen einsehen. Es muß möglichst lange dauern, bis das Pendel selbst zu schwingen anfängt, günstigenfalls sollte die zu registrierende Erschütterung schon vorbei sein, bevor die Pendelmasse merklich von der Stelle gerückt ist." ...

Der vorwiegend technische Charakter der Astasierung, der sich bei BERLAGE in der Abschnittsüberschrift Astasierungsvorrichtungen widerspiegelt, wird auch in der Formulierung von GALITZIN [8] gut sichtbar (S. 200):

... "Es gibt jedoch ein einfaches Mittel, um die Eigenperiode eines solchen Vertikal-seismographen zu verlängern und ihn damit empfindlicher zu machen. Man braucht nämlich, ... , nur die Feder unterhalb der Verbindungslinie mit dem Punkte A angreifen zu lassen. Ändert man außerdem die horizontale Entfernung zwischen B und A, so kann man die Eigenperiode des Apparates innerhalb gewisser Grenzen regulieren und sie für spezielle seismometrische Zwecke genügend lang machen (bis etwa 24 Sekunden). Eine solche Verlängerung der Eigenperiode der Schwingungen heißt, die A s t a s i e - r u n g eines Instrumentes." ...

Im Englischen wird u. a. auch der Begriff der Periodenverlängerung verwendet. SOHON [29] schreibt über den Vertikalseismographen und dessen Eigenperiodeneinstellung (S. 33):

... "The period, neglecting terms of higher order than the first, is given by the relation ... so that by decreasing the perpendicular distance ... between the spring and the axis of rotation, we can make the first term decrease and the second term increase and i n t h i s w a y l e n g t h e n t h e period." ...

MARTIN [18] faßt diesen technischen Vorgang schon etwas allgemeiner auf (S. 67):

"Die Schwingungsdauer eines Systems kann man dadurch vergrößern, daß man die Direktionskraft durch eine ihr entgegengesetzt wirkende entsprechend verkleinert. Dieses Verfahren nennt man A s t a s i e r u n g ." ...

Nach der Erläuterung am Beispiel des astasierten Vertikalseismometers kommt er auch auf die damals schon länger bekannten Einschränkungen:

... "Sinusoidale Schwingungen führt ein solches Vertikalseismometer nur dann aus, wenn es nicht zu stark astasiert ist, denn dann kann das Glied mit ... vernachlässigt werden. Sonst hinkt der Apparat wie I. WILLIP [51] nachgewiesen hat." ...

Er schließt mit dem Parallelverweis auf KOHLRAUSCH [16]:

"Bei elektrischen Meßinstrumenten erreicht man eine Astasierung durch Anbringung eines Gegenfeldes." ...

LA COSTE [17], der wohl unbestritten durch Einführung der Nulllängen-Feder im Vertikal-seismographen den größten Anteil an der Schaffung sehr langperiodischer harmonischer Schwinger hat, vermeidet ganz einen verallgemeinernden Begriff, wie "Astasierung" oder "period lengthening" und schreibt sachlich:

... "A single spring vertical motion seismograph of theoretically infinite period is described." ...

HAGIWARA [12], der sich ausführlich mit den bekannten Lösungen für einen Vertikalseismographen beschäftigte, schreibt ähnlich:

... "Another way of increasing the free vibration period of pendulum of a vertical motion seismograph is to use the "zero-length-spring", as devised by La Coste." ...

Der technische Vorgang der Astasierung, Periodenvergrößerung, Periodenverlängerung, ... oder wie auch immer benennbar, hat durch MEISSER [20, 21] eine wesentliche mathematische Fundierung durch eine exakte Beschreibung des rücktreibenden Momentes beim Vertikalseismographen und eines daraus definierbaren *Astasierungsfaktors*  $N$  erfahren. Diese Ableitungen sind unbestritten und bis heute weiter verwendbar [3, 40]. Sie haben für sich den Vorteil, über den Astasierungsfaktor  $N$  die mit der Eigenperiode stark steigenden Empfindlichkeiten des Vertikalseismographen gegenüber Änderungen der Schwerkraft, Temperatur, Neigung, Luftdruck und der Alterung gut beschreiben und klären zu können. Während auch Mme. DUCLAUX [4] vom "astasierten Pendel" spricht und auch ARCHANGELSKIJ [1] die MEISSERSche Arbeit [20] zitiert, gibt es andere Darstellungsweisen, die nicht diese geschlossene Darstellung benutzen und die Einstellung der Eigenperiode  $T_g$  und ihrer Linearität mehr verbal erklären durch den Abgleich des Betrages und teilweisen Verlaufs zweier (natürlich mathematisch beschriebener) gegenläufiger Momente. Damit ist ein Astasierungsfaktor vermieden, aber keine größere Klarheit gegeben. Es sei besonders auf die Darstellungen von SAVARENSKIJ-KIRNOS [27] und MELTON [22] verwiesen. In Arbeiten des Verfassers [40, 42, 43] ist  $N$  mit Erfolg zur Beschreibung o.a. Störeffekte und der dynamischen Übertragung dieser Effekte durch den Seismographen benutzt worden und aus sprachlichen Gründen mit "Periodenverlängerungsfaktor" und "period lengthening factor" bezeichnet worden. TOBYAŠ [37] benennt  $N$ , indem er sich ebenso MEISSER anschließt, als "coefficient of astatism of the seismometer" und spricht von "astatism of a pendulum seismometer".  $N$  läuft dabei ohne Einschränkungen zwischen 0 und  $\infty$ . Auch der Wert von  $N < 1$  ist, als in einigen Fällen sinnvoll, betont.

Aus dieser Aufzählung und Erläuterung der Auffassungen von einer *Astasierung* und einem *Astasierungsfaktor* ist zu sehen, daß es sich - ob oben so bezeichnet oder nicht - bei Seismographen mit einer gegenüber der ursprünglichen Periode  $T_0$  als physikalisches Pendel wesentlich vergrößerten Eigenperiode  $T_g$  bei dem Vorgang der Astasierung um einen exakt zu beschreibenden, reproduzierbaren, in wesentlichen Bereichen linearen *technischen Vorgang* handelt, der durch äußere Einstellungen an Winkeln und Abständen innerhalb der Konstruktion und durch die relative Platzierung dieser *abgleichbaren Konstruktion* im Schwerfeld

am Aufstellungsort gekennzeichnet ist. Über diesen t e c h n i s c h e n V o r - g a n g ist der Begriff der A s t a s i e r u n g trotz einiger Ansatzpunkte nicht hinausgekommen. Die Astasierung ist bisher nicht als ein Vorgang im Seismographen gesehen worden, der physikalisch erklärt wäre. So fehlt auch "Astasierung" als Stichwort bei WESTPHAL [49].

### 1.3. Übliche Darstellungen mechanisch astasierter Seismographen

Die erwähnte exakte Darstellung der m e c h a n i s c h a s t a s i e r t e n Seismographen soll durch Beispiele belegt werden. Zur Übersicht sei auch auf die Ausführungen bei BERLAGE [3], SAVARENSKIJ-KIRNOS [27] und KISSLINGER [15] verwiesen. Den Vertikalseismographen und seine Beschreibung werden wir an einigen ausgewiesenen Beispielen vorstellen. Das einfache Pendel mit der Masse  $M$  (Massenpunkt) und Länge  $L$  vom Drehpunkt hat die Eigenperiode

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}.$$

Das physikalische Pendel mit dem Trägheitsmoment  $K$  und dem Abstand  $r$  des Massenmittelpunktes von der Drehachse hat die Eigenperiode

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{K}{Mgr}}.$$

Das horizontale Pendel mit dem Neigungswinkel  $i$  der Drehachse zur Vertikalen hat die Eigenperiode

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{K}{Mgr \sin i}}$$

und ist durch die Veränderung von  $i$  astasierbar. Das Torsionspendel mit vertikaler Achse hat mit der Torsionskonstante  $\tau$  des Torsionsdrahtes (-fiber) die Eigenperiode

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\tau}}.$$

Das Torsionspendel mit Neigung  $i$  der Drehachse hat die Eigenperiode

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{K}{Mgr \sin i + \tau}}$$

und ist über  $i$  astasierbar. Die Vertikalseismographen sollen genauer beschrieben werden. Wir schließen uns in der Darstellung hier MEISSER [20] an. Der einfache, vertikale Masse-Feder-Schwinger hat die Eigenperiode

$$T_S = 2\pi \sqrt{\frac{M}{f}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

mit  $f$  als Federkonstante und  $l$  als "reduzierte Pendellänge". Bei Vertikalseismographen, deren Konstruktion meistens eine Massenkombination darstellt, die um eine Achse mit dem Winkel  $\varphi$  drehbar gelagert ist, lautet die Bewegungsgleichung im ungedämpften Fall

$$K \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \mathfrak{M}(\varphi, g) = -Ms \frac{d^2z}{dt^2}$$

mit  $K$  als Trägheitsmoment bez. der Drehachse,  $s$  dem Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse und  $\mathfrak{M}$  dem Drehmoment aller am System angreifenden Kräfte und  $t$  der Zeit;  $z$  ist die Vertikalbewegung. Für den Ausschlag  $\varphi$  wird [3]

$$\mathfrak{M}(\varphi, g) = \mathfrak{M}(\varphi_0, g) + \frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial \varphi}(\varphi_0, g) \pm \dots$$

Die Eigenperiode ist

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{K}{\left(\frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial \varphi}\right)_{\varphi=0}}}$$

Die reduzierte Pendellänge ist

$$l = g \cdot \frac{Mq^2}{\left(\frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial \varphi}\right)_{\varphi=0}}$$

mit  $q$  als Trägheitsradius. Für das Moment in der Gleichgewichtslage  $\varphi_0$  ist

$$\mathfrak{M}(\varphi_0, g) = \mathfrak{M}_f - \mathfrak{M}_g = 0$$

zu erreichen.  $\mathfrak{M}_f$  ist das Moment einer Federkraft und  $\mathfrak{M}_g$  das der schweren Masse. ... "Die Schwingungsdauer des Systems ist bestimmt durch den Verlauf von  $\left(\frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial \varphi}\right)_{\varphi=0}$ , d. h. von den beiden Tangenten der beiden Momente  $\mathfrak{M}_f$  und  $\mathfrak{M}_g$  in  $D$ . Je kleiner der schraffierte Raum ist, um so größer wird die Schwingungsdauer ... Das Streben wird für eine "Astasierung" darauf hinauslaufen, den Verlauf von  $\mathfrak{M}_f$  und  $\mathfrak{M}_g$  in  $D$  möglichst weitgehend einander anzugleichen und geradlinig zu gestalten, so daß die höheren Ableitungen von  $\mathfrak{M}$  nach  $\varphi$  für  $\varphi = 0$  sehr klein sind, denn für nur  $\left(\frac{\partial \mathfrak{M}}{\partial \varphi}\right)_{\varphi=0} = 0$  wird die Empfindlichkeit sehr stark vom Ausschlag abhängig und das System kann zur Unstabilität neigen." ... (MEISSER [20], S. 224). Die Entwicklung bis zu einer Darstellung mit einem ausgewiesenen Astasierungsfaktor  $N$  nach MEISSER [20] und einer Konstruktion nach den Erkenntnissen von LA COSTE [17] ist durch unterschiedliche Beschreibungen gekennzeichnet. Mehrere dieser Darstellungen sind bei HAGIWARA [12] zu finden. Wir lassen die verwendeten Symbole in dieser Rückschau stehen und erläutern sie jeweils. Der Vertikalseismograph nach GRAY [11] hat die Eigenperiode (Abb. 3)

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\beta a^2}} = 2\pi \sqrt{\frac{mh^2}{\beta a^2}} = T_s = \sqrt{\nu} T_0; \quad \nu = \frac{h}{a}$$

mit  $I$  als Trägheitsmoment,  $\beta$  als Federkonstante und  $m$  als Punktmasse angenommen. Die Eigenperiode  $T_s$  ist  $\sqrt{\nu}$  mal größer als in dem Fall, wo die Feder direkt an  $M$  angreifen würde ( $T_0$ ). Der Vertikalseismograph mit EWINGScher Astasierung [6], der auch von TAMARU [32], RICHARDSON [26] und WILIP [51] behandelt wird, hat nach Abb. 4 für kleine Ausschläge die Eigenperiode

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{I}{fa^2 - P_0 d \left(1 - \frac{d}{l_0}\right)}}$$

und ist astasiert durch das, unterhalb der Verbindung  $\overline{OM}$ , Angreifen der Schraubenzugfeder um den Betrag  $d$  im Punkt  $a$ . Bekanntlich hinkt der Seismograph.

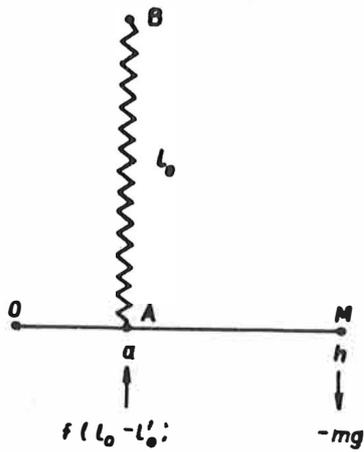


Abb. 3 Vertikalseismograph mit Astasierung über den Federangriff in A

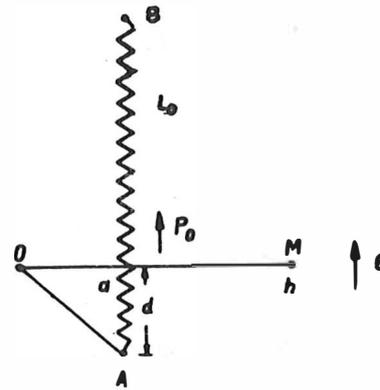


Abb. 4 Vertikalseismograph mit EWING'scher Astasierung

Wir überspringen einige Entwicklungsschritte und führen die Beschreibung von MARTIN [18] in Abb. 5 an. Mit  $\zeta$  als Ausschlag und den Bezeichnungen von Abb. 5 ist

$$M_\zeta = cab \sin(\gamma + \zeta) - \frac{cl_0 ab \sin(\gamma + \zeta)}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma + \zeta)}} - mgs \cos\zeta .$$

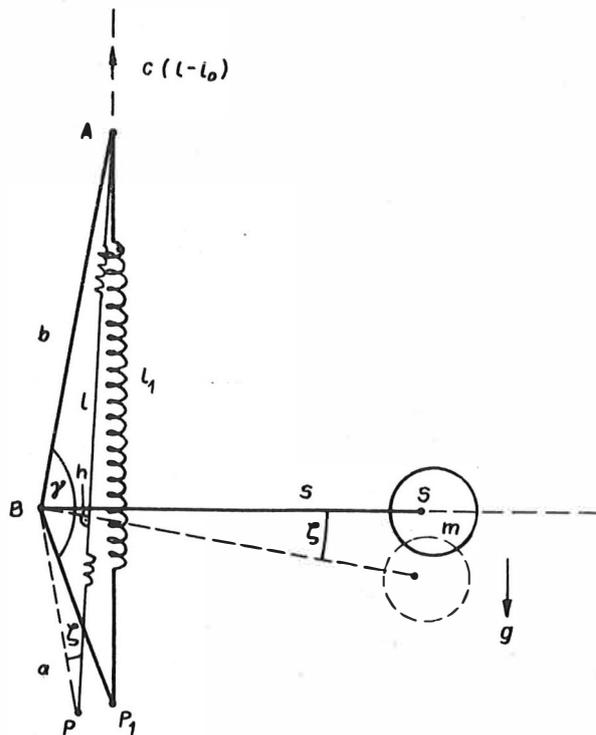


Abb. 5 Astasierter Vertikalseismograph nach MARTIN [18]

Das ist eine Darstellung, die nicht in Reihe nach dem Ausschlag  $\zeta$  entwickelt ist für kleine  $\zeta$  in der Nähe der Gleichgewichtslage. Daher ist nicht so ohne weiteres ein Astasierungsfaktor herauszuziehen. Ähnliche Darstellungen sind auch bei SAVARENSKIJ-KIRNOS [27] und MELTON [22] zu finden.

Die erste entwickelte Darstellung ist durch MEISSER [21] angegeben, der auch die LA-COSTE-Lösung [17] einarbeitete. Mit den Bezeichnungen von Abb. 6 ist das Moment der Federkraft

$$\mathfrak{M}_f(\varphi) = fcd \sin(\gamma + \varphi) \left[ 1 - \frac{L_0}{L} \right],$$

das der Schwerkraft

$$\mathfrak{M}_g(\varphi) = Mg(a \cos \varphi + b \sin \varphi)$$

mit der Gleichgewichtsbedingung  $\mathfrak{M}(\varphi=0) = 0$  wird

$$Mga = fcd \sin \gamma \left[ 1 - \frac{L_0}{L} \right],$$

was zur Substitution von  $f$  führt. Nach Reihenentwicklung in der Nähe von  $\varphi = 0$  ist für kleine  $\varphi$

$$\begin{aligned} T_\varphi = & 2\pi \sqrt{\frac{a}{g}} \cdot \left\{ \cot \gamma - \frac{b}{a} + \frac{L_0}{L} \cdot \frac{h}{L} \frac{1}{1 - \frac{L_0}{L}} - \frac{3}{2} \varphi \frac{L_0}{L} \cdot \frac{h}{L} \frac{h}{L} - \cot \gamma - \frac{\varphi^2}{6} \times \right. \\ & \left. \times \left[ \cot \gamma - \frac{b}{a} + \frac{L_0}{L} \frac{h}{L} \frac{1}{1 - \frac{L_0}{L}} + 3 \frac{L_0}{L} \frac{h}{L} \frac{1 - \cot^2 \gamma + 6 \frac{h}{L} \cot \gamma - 5 \left(\frac{h}{L}\right)^2}{1 - \frac{L_0}{L}} \right] + \dots \right\}^{-\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

und weiterhin

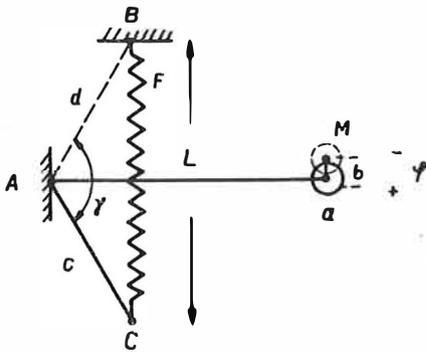


Abb. 6 Bezeichnungen am Vertikalseismographen nach MEISSER [21]

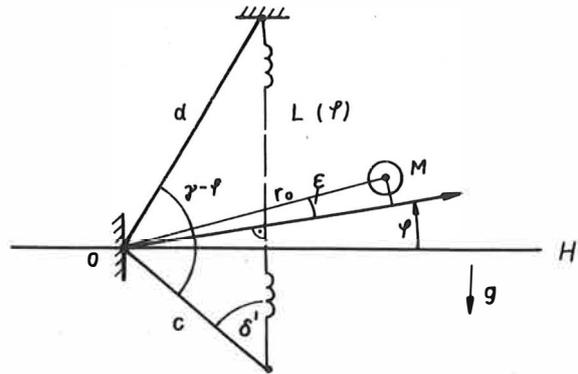


Abb. 7 Astasierter LA-COSTE-Seismograph nach TEUPSER [34]

$$\cot\gamma - \frac{b}{a} + \frac{L_0}{L} \frac{h}{L} \frac{1}{1 - \frac{L_0}{L}} = \frac{1}{N^2}, \quad 1 - \frac{L_0}{L} = K,$$

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{a}{g}} N \sqrt{1 - \frac{3}{2} \varphi N^2 \frac{L_0}{L} \frac{h}{L} \frac{1}{K} - \frac{\varphi^2}{6} (1 + \dots) \pm \dots}^{-1}$$

Die in Abb. 7 im Anschluß an MEISSER [21], DUCLAUX [4] u. a. entwickelte Darstellung von TEUPSER [34] hat den Vorteil größerer Übersichtlichkeit bei Berücksichtigung einer möglichen Erhebung von M um den Winkel  $\varepsilon$  gegenüber der Gleichgewichtslage. Nach Reihenentwicklung um  $\varphi = 0$  ist für kleine  $\varphi$  danach

$$\mathfrak{M}(\varphi) = -\frac{Mg_{ro}}{N^2} \varphi \cos\varepsilon \left[ 1 + \frac{3}{2} \varphi N^2 \frac{h_0 \lambda}{L_0} \frac{\frac{h_0}{L} - \cot\gamma}{L_0 - \lambda} - \frac{\varphi^2}{6} \times \right. \\ \left. \times \left( 1 + 3N^2 \frac{\lambda h_0}{L_0} \frac{1 - \cot^2\gamma + 6 \frac{h_0}{L_0} \cot\gamma - 5 \frac{h_0^2}{L_0^2}}{L_0 - \lambda} \dots \right) \right]$$

mit

$$N^2 = \frac{1}{\cot\gamma + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \operatorname{tge}\varepsilon}$$

Dabei ist  $\lambda$  die nach LA COSTE [17] geforderte Vorspannlänge als Differenz zweier Terme, die im Abgleichfall ( $\lambda \approx 0$ ) gleich sind (Linearitäts- und Harmonizitätsbedingung). Ist in der Konstruktion  $\varepsilon = 0$  gegeben, so hat der Astasierungsfaktor N die übersichtliche Gestalt

$$N = \sqrt{\operatorname{tany}}$$

für den Vertikalseismographen vom LA-COSTE-Typ, der breiteste Anwendung und unterschiedlichste Realisierung erfahren hat. Bei Berücksichtigung der Federmasse m, des Auftriebs an der Masse M und dem oft vorliegenden Fall einer nahezu gleichschenkligen Federeinspannung (Abb. 8) ist mit dem Ansatz [42]

$$\mathfrak{M}(\varphi) = [\bar{M}g_{ro} + \frac{1}{2} mga] \left[ \frac{h(L - \lambda)}{h_0(L_0 - \lambda)} - \cos\varphi \right]$$

nach Reihenentwicklung

$$\mathfrak{M}(\varphi) = -\frac{Mg_{ro} + \frac{1}{2} mga}{N^2} \left\{ 1 + \frac{\varphi^2}{2} N^2 \left[ \frac{3\lambda h_0}{L_0(L_0 - \lambda)} - \frac{h_0}{L_0} \right] + O(\varphi^3) \right\}$$

und

$$N^2 = \left[ \cot\gamma + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} \right]^{-1}, \quad T_s = 2\pi N \sqrt{\frac{1}{g}}$$

Der Astasierungsfaktor N bleibt ungeändert und hat bei Abgleich die oben angeführte Form, bei der mit dem Tangens des eingeschlossenen Winkels der Federenden die Eigenperiode  $T_s$  für  $\gamma \rightarrow 90^\circ$  und  $\lambda \rightarrow 0$  bekanntermaßen auf sehr große Werte gebracht werden kann.

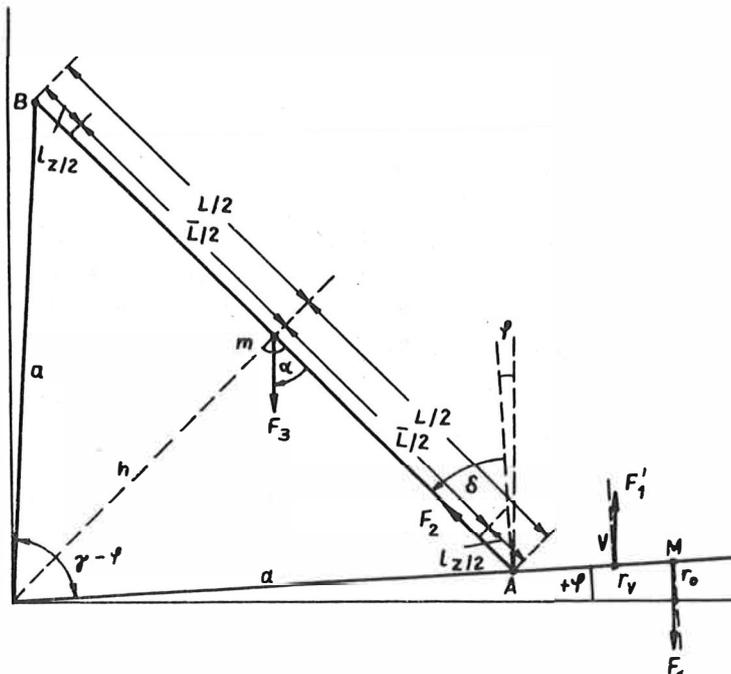


Abb. 8 Berücksichtigung von Auftrieb und Feder-  
masse für die Ableitung des Astasierungs-  
faktors nach [42]

#### 1.4. Astasierung bei geregelten elektronischen Seismographen

Bei geregelten elektronischen Seismographen, in denen Rückführungsfilter zur Erzielung veränderter, gewünschter Übertragungsfunktionen eingesetzt werden, hat sich ein bestimmter und allgemein als abgeschlossen gesehener Stand herausgebildet, der in üblicher Darstellung [7, 10, 36] skizziert werden soll.

Für ein geregeltes System mit  $R(s)$  (Eingangsgröße),  $C(s)$  (Ausgangsgröße),  $B(s)$  (Rückführungssignal),  $E(s)$  (Differenzsignal) und den Frequenzgängen/Übertragungsfunktionen  $G(s)$  (offenes System) und  $H(s)$  (Rückführungsfilter) ist die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}.$$

Mit  $R(s) = s^2 Y$ ,  $C(s) = X$  wird für das offene Seismometer bekanntermaßen

$$\frac{X}{Y}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\alpha_s \omega_s s + \omega_s^2}$$

mit  $X$  und  $Y$  als Laplace-Transformierten der Ausgangsgröße und Eingangsbeschleunigung. Das geregelte Seismometer hat die Gesamtübertragungsfunktion

$$R_E(s) = \frac{V_1}{Y}(s) = \frac{k_1 s^2}{s^2 + 2\alpha_s \omega_s s + \omega_s^2 + kF_2(s)}.$$

Darin ist  $V_1$  der Wandlerausgang,  $k_1$  dessen Steilheit,  $F_2(s)$  das Rückführungsfilter und  $k$  der Regelkreisfaktor. Die Philosophie des Systementwurfs (geregelter Seismograph) ist dabei die, daß das vorliegende, meist industriell gefertigte, mit bestimmten Kennwerten  $T_s$ ,  $\alpha_s$ ,  $V$ , für Eigenperiode, Dämpfung und Vergrößerung (z. B. die der Bodenverrückung) versehene Seismometer in der so erhaltenen Konfiguration akzeptiert wird, die Kennwerte  $T_s$ ,  $\alpha_s$  auf eine bestimmte stabile und der Aufgabe dienliche Größe gesetzt werden, und um das ungeänderte Seismometer herum außerhalb Rückführungsnetzwerke in der Regelung angeordnet werden, mit deren spezifischem Entwurf dem neuen, geregelten Seismometer geänderte Parameter  $T_s'$ ,  $\alpha_s'$ , gegebenenfalls  $V'$ , erteilt werden, die eine neue Übertragungskurve bestimmen, deren Form der seismologischen Aufgabenstellung besser angepaßt ist als es die ursprüngliche des offenen Seismometers war. Die Einstellung und der Abgleich erfolgt vorrangig in der Rückführungsschleife, bei Erfordernis auch am Seismometer; hier vorrangig zur systematischen Nachstellung der mechanischen Eigenperiode  $T_s$ .

Das Vorgehen in der Erzeugung "neuer" Übertragungscharakteristiken bei Seismometern läßt sich gut systematisieren, da die Möglichkeiten abzählbar sind und der wissenschaftlich-technische Stand allgemein abgeschlossen erscheint [24]. In Abb. 9 ist dazu die Darstellung im BODE-Diagramm über einen interessierenden Bereich von zwei Dekaden in  $\frac{\omega}{\omega_s}$  und Normierung von  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_s})$  auf 1 gewählt. Fig. 1 in Abb. 9 zeigt die bekannte Darstellung der Seismographenkurve. Für  $\frac{\omega}{\omega_s} \gg 1$  ist  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_s}) = 1$ , für  $\frac{\omega}{\omega_s} \ll 1$  ist  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_s}) \approx (\frac{\omega}{\omega_s})^2$ , zwischen  $\frac{\omega}{\omega_s} = 2\alpha_s$  und  $\frac{\omega}{\omega_s} = \frac{1}{2\alpha_s}$  dagegen bekanntlich  $\sim \frac{\omega}{\omega_s}$ . In der Darstellung ist der optimal flache Fall für die Übertragungskurve mit  $\alpha_s = \frac{1}{\sqrt{2}}$  gewählt. Die bekannte mechanische Astasierung besteht nun darin, daß die Übertragungskurve in ihrer vollen Gestalt - bei Anpassung der Dämpfung - zu kleinen  $\frac{\omega}{\omega_s}$ -Werten verschoben wird, indem der mechanische Empfänger des Seismographen in seiner Lage im Raum und insbesondere relativ zum Schwerevektor gezieht so verändert wird, daß er anstelle der Eigenperiode  $T_s$  eine verlängerte Eigenperiode  $NT_s = T_s'$  bekommt, also astasiert wird. Dabei wächst jedoch auch die Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen wie Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Neigungen und gegenüber Alterungserscheinungen, so daß dieser üblichen Astasierung bekanntermaßen Grenzen gesetzt sind. Werte für  $T_s'$  von 30 s ... (50 s) bei Abmessungen der Seismometer von 0,8 ... 1 m sind bei sehr guter Kontrolle der Störeinflüsse und einer alterungsarmen konstruktiven Lösung der Seismometer als Maximalwerte für Dauerbetrieb realisiert worden [33, 40, 42].

Eine Möglichkeit, einen größeren Spektralbereich mit einer gleichmäßigen Kurvengestalt zu erfassen, ist in Fig. 2 skizziert. Sie kann konventionell, aber besser durch elektronische Rückführung, realisiert werden. Der Seismograph wird dabei durch  $\dot{x}$ -Gegenkopplung stark bedämpft (große  $\alpha_s'$ -Werte) und damit der Verlauf mit  $\frac{\omega}{\omega_s}$ -Verhalten stark erweitert. Das ergibt zwischen den Eckpunkten eine sogenannte "geschwindigkeitsproportionale" Charakteristik ( $T^{-1}$ -Verlauf). Zwischen einigen Sekunden bis zu einigen Hundert Sekunden ist eine gleichgestaltete Charakteristik ( $\sim \frac{\omega}{\omega_s}$ ) zu erreichen. Dabei wird aber ein Teil der Informationsfläche unterdrückt, das Übergangsverhalten ist nicht optimal und die Übertragungscharakteristik ist vielen seismologischen Fragestellungen nicht angemessen. Seismographensysteme mit digitalem Ausgang erlauben es, die erhaltenen Werte zu integrieren, so daß bez.  $\frac{\omega}{\omega_s}$  zwischen den Eckpunkten ein konstantes Übertragungsverhalten

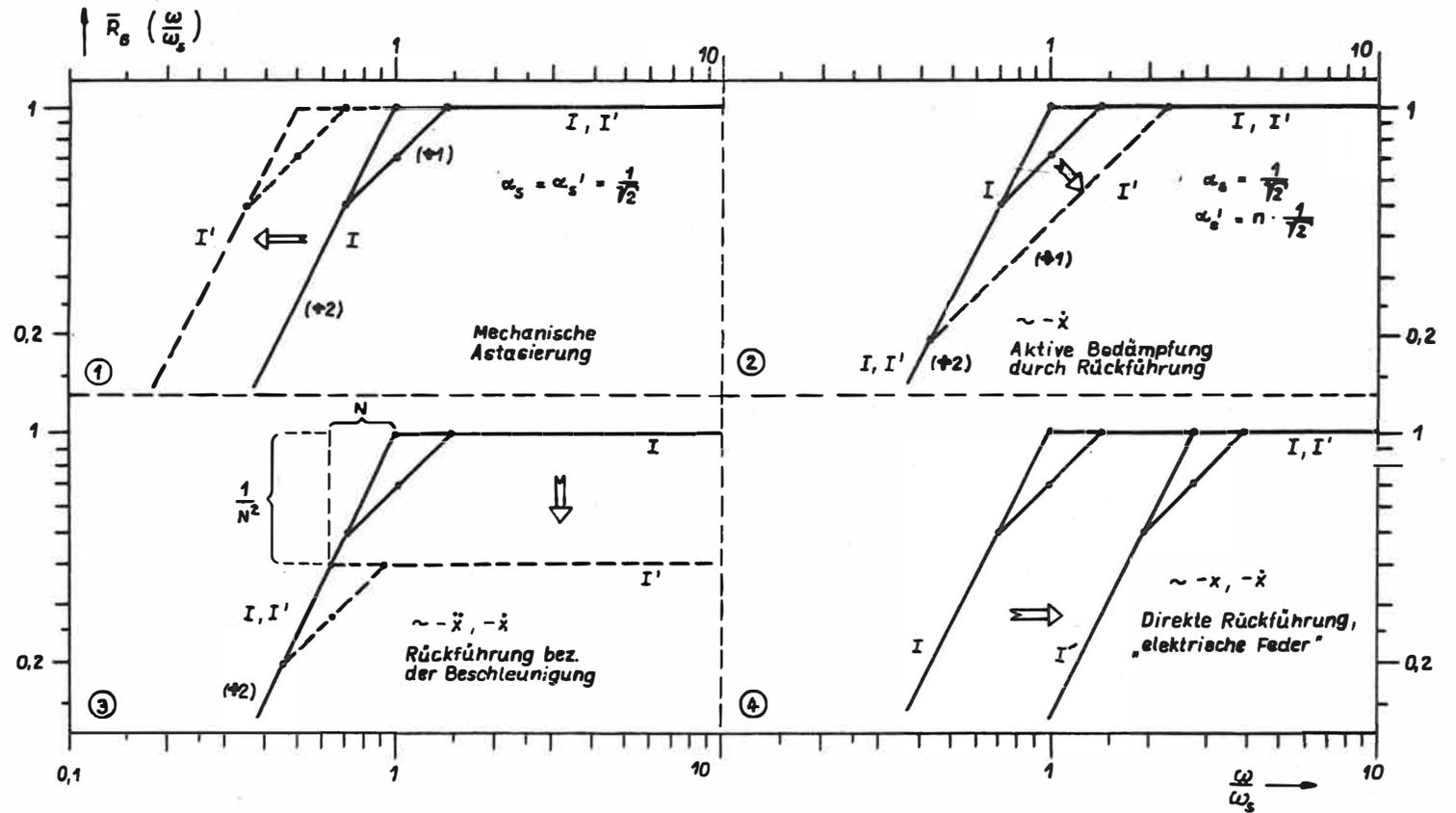


Abb. 9 Mechanische Astasierung und Rückführungen am Seismographen im schematischen Überblick

erzielt wird. Dieser Methode sind jedoch Grenzen in der Genauigkeit und im Aufwand gesetzt. Sie ist außerdem nur bei mechanischen Schwingern vom Sensortyp wie Seismometern anwendbar [2, 25, 28].

Fig. 3 zeigt eine Möglichkeit, eine um den Faktor  $N$  breitere Übertragungscharakteristik dadurch zu erzielen, daß man bez.  $\ddot{x}$  gegenkoppelt. Das ergibt durch Vergrößerung des Trägheitsmomentes eine auf  $NT_s$  vergrößerte Eckperiode  $T_s'$  und einen gleichzeitigen Abfall der Übertragungscharakteristik von 1 auf  $\frac{1}{N^2}$ . Dadurch ist die Empfindlichkeit der Messung leider eingeschränkt. Durch gleichzeitige Gegenkopplung  $\sim \dot{x}$  wird eine flache Charakteristik mit  $\alpha_s' = \frac{1}{\sqrt{2}}$  erreicht. Dazu laufen beide Gegenkopplungsarten parallel [25].

Bei einer direkten Rückführung des Ausschlages  $x$  (Fig. 4) läßt sich ein Teil der elastischen Kräfte im System durch elektrische direkt ersetzen, und das Seismometer arbeitet mit einer zum Teil "elektrischen Feder" in einem stabileren aber kürzerperiodischen Betrieb. Zusammen mit einer  $\dot{x}$ -Gegenkopplung zur Einstellung der Dämpfung ist damit eine breite "Beschleunigungscharakteristik"  $\sim (\frac{\omega}{\omega_s})^2$  über einen interessierenden Frequenzbereich zu erreichen. Dabei ist die Dynamik stark reduziert. Daten, die zu  $x$  proportional sind, können durch zweimalige Integration gewonnen werden. Diese Gegenkopplungsart, die schon länger bekannt ist [28], wurde weiter verfolgt und empfohlen [48].

Es hat Versuche gegeben, die direkte Rückführung auch in Richtung einer Periodenverlängerung/Astasierung wirken zu lassen, die sich jedoch nicht durchgesetzt haben. Zum einen sind die  $T_s'$ -Werte auf Grund der ebenso quadratisch mit  $N$  ansteigenden Empfindlichkeiten gegenüber Störeinflüssen auch nicht größer als bei einer mechanischen Astasierung, und zum anderen besteht ein tief verwurzeltes Mißtrauen, eine positive Rückführung anzusetzen, zumal Angaben zu Linearität und Zusatzrauschen sowohl auf Seiten der Anwender als auch auf denen der Kritiker nicht durch Berechnungen belegt sind [14].

Ein weiterer Einsatz von Regelungen in Verbindung mit der Astasierung ist die Langzeitstabilisierung des bis an die vertretbaren Grenzen von Linearität und Stabilität mechanisch astasierten Seismographen. Durch eine Tiefpaß-Gegenkopplung mit einer hohen Eckperiode wird der mechanische Empfänger für Einflüsse außerhalb des seismischen Spektrums in seiner Eigenperiode erniedrigt. Das bedingt durch das quadratische Abfallen der Störemfindlichkeit eine wesentliche Stabilisierung. Eckperioden von ca. 1000 ... 3000 s sind üblich. Diese Art der Rückführung wurde für einen Tiefpaß 1. Ordnung (TP 1) wie einen solchen 2. Ordnung (TP 2) ziemlich ausführlich untersucht [14, 3, 42].

### 1.5. Grenzen bekannter Astasierungen

Zur Darstellung der Grenzen von Astasierungen, insbesondere der der mechanischen Astasierung, greifen wir auf einen früheren Ansatz zurück [43]. Die Differentialgleichung für die Bewegung setzen wir an als

$$(1) \quad \frac{d}{dt} (\theta_s \dot{\varphi}) = - \sum_i M_i$$

mit  $\theta_s$  - Trägheitsmoment des Seismometergehanges,  $\varphi$  - Ausschlagwinkel,  $M_i$  - Momente am Gehänge bez. der Drehachse.

Über die einzelnen Momente muß angenommen werden, daß sie auch von den zeitlichen Ableitungen von  $\varphi$  und von Störgrößen  $s_j$  abhängen

$$(2) \quad M_i = M_i(\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \dots; s_j) .$$

Für einen Seismographen mit definierten Eigenschaften und Parametern ist einzuschränken, daß das rücktreibende Moment  $M_R$  und der Dämpfungsterm (-"moment")  $M_D$  als

$$(3) \quad M_R \sim \varphi, \quad M_D \sim \dot{\varphi}$$

in der Konstruktion realisiert sind. Dann ist es üblich, in der Nähe von  $\varphi = 0, s_j = 0$  für kleine Größen zu entwickeln und mit dem linearen Term abzubrechen, also

$$(4) \quad \bar{M}_R = M_R(\varphi, s_i) = \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial \varphi} \varphi + \sum_i \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial s_i} s_i ,$$

$$(5) \quad \bar{M}_D = M_D(\dot{\varphi}, s_j) = \frac{\partial M_D(0,0)}{\partial \dot{\varphi}} \dot{\varphi} + \sum_j \frac{\partial M_D(0,0)}{\partial s_j} s_j .$$

Bei Vernachlässigung äußerer seismischer Signale und bei einer Abhängigkeit nur von den Störsignalen, wie Luftdruck etc. im Übertragungsbereich, ist

$$(6) \quad \theta_s \ddot{\varphi} + \left( \frac{\partial M_D(0,0)}{\partial \dot{\varphi}} + \dot{\theta}_s \right) \dot{\varphi} + \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial \varphi} \varphi = - \sum_i \frac{\partial [M_D(0,0) + M_R(0,0)]}{\partial s_i} s_i .$$

Die DGL für seismische Signale  $x(t)$  bei Abwesenheit von Störsignalen hat die bekannte Form

$$(7) \quad \theta_s \ddot{\varphi} + \frac{\partial M_D(0)}{\partial \dot{\varphi}} \dot{\varphi} + \frac{\partial M_R(0)}{\partial \varphi} \varphi = - m r_0 \ddot{x}$$

mit  $m$  als Gehängemasse,  $r_0$  als Abstand des Massenmittelpunktes von der Drehachse. Wie üblich kann man nun abgekürzt umschreiben als

$$(8) \quad \ddot{\varphi} + \left( 2\alpha_s \omega_s + \frac{\dot{\theta}_s}{\theta_s} \right) \dot{\varphi} + \omega_s^2 \varphi = - \frac{1}{\theta_s} \sum_i \frac{\partial [M_D(0,0) + M_R(0,0)]}{\partial s_i} s_i$$

bzw.

$$(9) \quad \ddot{\varphi} + 2\alpha_s \omega_s \dot{\varphi} + \omega_s^2 \varphi = - \frac{\ddot{x}}{l}$$

mit den Abkürzungen

$$(10) \quad l = \frac{\theta_s}{m r_0}, \quad \omega_s^2 = \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial \varphi} = \left( \frac{2\pi}{T_s} \right)^2, \quad 2\alpha_s \omega_s = \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial M_D(0,0)}{\partial \dot{\varphi}}$$

für die reduzierte Pendellänge  $l$ , Kreisfrequenz  $\omega_s$  bzw. Eigenperiode  $T_s$  des ungedämpften Seismographen und die Dämpfung  $\alpha_s$  des Seismographen [40, 42, 43]. Für die Übertragung der Störgrößen  $s_i$  ergibt sich bei üblicher Vernachlässigung von  $\dot{\theta}_s$  und  $\partial M_D(0,0)/\partial s_i$  und bei Kenntnis von  $M_R(\varphi, s_i)$  aus der Konstruktion

$$(11) \quad \ddot{\varphi} + 2\alpha_s \omega_s \dot{\varphi} + \omega_s^2 \varphi = - \frac{1}{\theta_s} \sum_i \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial s_i} s_i .$$

Wenn nun  $W(\omega)$  die Signalübertragungsfunktion des Seismometersystems für sinusförmige Signale ist, so zeigt der Vergleich zwischen (9) und (11), daß die Störgrößen wegen der unterschiedlichen Eingangsgrößen ( $\ddot{x}$  und  $s_i$ ) mit  $W(\omega)/\omega^2$  übertragen werden. Folglich

ist eine Gehängebewegung durch Störungen  $\varphi^d$  im Signalbereich als

$$(12) \quad \varphi^d = - \frac{W(\omega)}{\omega^2} \left( \frac{1}{\theta_s} \sum \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial s_i} s_i \right)$$

vorhanden. Außerdem ist

$$(13) \quad \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial s_i} = \frac{\partial M_R(0,0)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial s_i} (0)$$

und für  $\frac{\partial \varphi}{\partial s_i} (0)$  kann man aus der Konstruktion konkrete Werte ermitteln [42]. Bei astasierten Seismographen ist danach

$$(14) \quad \frac{\partial \varphi}{\partial s_i} (0) = N^2 C_i$$

und die  $C_i$  sind die Empfindlichkeiten des betrachteten Seismometers als Ausdruck der konstruktiven Lösung gegenüber den Störgrößen  $s_i$ . Das ergibt mit (12) und (10)

$$(15) \quad \varphi^d = - W(\omega) \left( \frac{\omega_s}{\omega} \right)^2 N^2 C_i s_i .$$

Daraus läßt sich für sinusoidale Störgrößen und bei einem eingeschwungenen Zustand analog zu seismischen Signalen eine Störgrößenübertragungsfunktion  $G_d$  für die Übertragung dynamischer Störungen [43] definieren:

$$(16) \quad G_d(\omega) = W(\omega) \left( \frac{\omega_s}{\omega} \right)^2 .$$

Diese Funktion, die für die Übertragung von Störgrößen wie Luftdruckwellen ihr Maximum bei  $\omega_s$  oder in Seismometer-Galvanometer-Kombinationen an der niederfrequentesten Ecke des Übertragungsbandes hat, ist weitgehend untersucht worden [43], auch für elektronisch geregelte und astasierte Systeme. Entsprechend  $N$  wächst nach (15) der Ausschlag  $\alpha^d$ . Das ist unabhängig von der Art der Astasierung. Damit helfen gegenüber nichtseismischen Störungen im Signalband nur entsprechende Abschirmungen und Isolationen, die den Durchgriff der Störfaktoren auf das so isolierte Seismographeninnere stark herabsetzen. Das wird auch weiterhin für alle Seismographensysteme Gültigkeit haben.

Für langsame Änderung, wie sie oft Temperaturgänge am Installationsort darstellen, gibt (14) die resultierenden Ausschläge des Seismographen vom Drehschwingertyp wieder. Für Vertikalseismographen ist für die Störgröße  $\vartheta$

$$(17) \quad \frac{d\varphi}{d\vartheta} = N^2 \cdot \alpha^{seis}$$

mit  $C_\vartheta = \alpha^{seis}$  als TK des Seismographen.  $\alpha^{seis}$  läßt sich hinreichend genau aus der bekannten Geometrie der Seismographenkonstruktion berechnen und für Abschätzungen anwenden [40]. (17) ist für Installationshochrechnungen eine wichtige Beziehung zur Sicherung des Betriebes.

Mit wachsender Astasierung  $N$  steigen quadratisch die Einflüsse an. Wegen der nicht eliminierbaren Temperaturgänge am Installationsort, die die Gleichgewichtslage des Gehänges im Arbeitsbereich verschieben, ergeben sich bei gewähltem oder angestrebtem  $N$  nach (17) ganz konkrete Anforderungen an den TK des Seismographen, an die thermische Konstanz des Aufstellungsortes oder die Notwendigkeit von Hilfsmaßnahmen [42]. Eine erfolgreich ange-

wandte Maßnahme ist die elektronische Langzeitstabilisierung, die für sehr langwellige Störeinflüsse außerhalb des seismischen Bandes das Seismometer kurzperiodischer macht. Dabei bleibt  $N$  im Signalband erhalten, wird aber für Störvorgänge geringer, der Seismograph nach (17) damit stabiler [31]. Das schließt jedoch ein, daß im Signalband durch eine sehr gute Isolation Störeinflüsse so gemindert sind, daß sie das Seismometer in seinem Arbeitsbereich nicht übersteuern oder dessen Gleichgewichtslage wesentlich, und oft unkontrollierbar, verschieben.

Für einen langperiodischen Vertikalseismographen VSJ-I/L mit  $T_s = 30$  s,  $N = 14$  ist  $|\Delta\theta| \lesssim 0,5$  °C als Variation für 3 mm Ausschlagsbereich bzw.  $|\Delta\theta| \lesssim 0,12$  °C für 1 mm zu fordern [40]. Für einen elektronischen Seismographen EDS-1 mit vergleichbaren Werten von  $N$  bei kleineren Hebellängen und  $< 1$  mm Arbeitsbereich eines kapazitiven Wegaufnehmers war für stabilen Betrieb eine Langzeitstabilisierung notwendig, die für  $T > 300$  s die Eigenperiode von  $T_s = 10 \dots 15$  s auf  $T'_s \approx 3$  s verringerte [35, 44]. Das ist realisierbar, aber aufwendig bei großen Filterperioden und nur dann perspektivisch hoffnungsvoll als Methode, wenn sich dabei  $N$  mechanisch genügend groß wählen läßt. Gerade aber in der Wahl eines hinreichend großen  $T_s$  mit mechanischen Mitteln, im Sinne der Meßaufgabe der Breitbandseismometrie, gibt es in den bekannten Geräten prinzipielle Grenzen. Sie liegen in der Natur der Astasierung selbst, in der Konstruktion und wiederum im Einfluß der Störgrößen begründet. So sind für Vertikalseismographen, die sich hier empfindlicher zeigen als horizontale Seismographen - die nicht so temperaturempfindlich, aber um so mehr neigungsempfindlich nach (14) sind -  $T_s$ -Werte bei ca. 30 s für den Routinebetrieb im Observatorium das beherrschbare Maximum; bei Miniaturgeräten [14, 31] sinkt dieser Wert wegen der verringerten Hebellängen auf ca. 10 ... 15 s. Bei einem Vertikalseismographen vom LA-COSTE-Typ läßt sich hierzu noch mehr aussagen. Für die Eigenperiode gilt nach [20]

$$(18) \quad T_s = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}} \cdot N$$

mit

$$(19) \quad N^2 = \frac{1}{\cot\gamma + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda}}$$

und im linearisierten Zustand mit  $\lambda \rightarrow 0$

$$(20) \quad N^2 = \tan\gamma$$

Mit der Geometrie aus Abb. 10 ist

$$\tan\gamma = \tan(90^\circ - \gamma') = \cot\gamma' \approx \cot \frac{b'}{a} \approx \frac{a}{b'}$$

und für kleine Winkel  $\gamma'$  (langperiodischer Seismograph) ergibt sich

$$(21) \quad T_s \approx 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}} \sqrt{\frac{a}{b'}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}} \sqrt{a} b'^{-\frac{1}{2}} = T_0 \sqrt{a} b'^{\frac{1}{2}}$$

Die  $T_s$ -Einstellung erfolgt üblicherweise über  $b'$ , die Bedienungseinrichtung ist allgemein in Richtung zur Schwerkraft (unterer Federangriffspunkt) oder senkrecht dazu (oberer Federangriffspunkt) realisiert [17, 33, 42]. Alternativ wird auch die Fußschraube unter  $M$  am Gestell in ihrem Abstand zum Sockel verändert. Die Betrachtungen ähneln dann den folgenden und unterscheiden sich nur um einen Maßstabfaktor von ihnen.

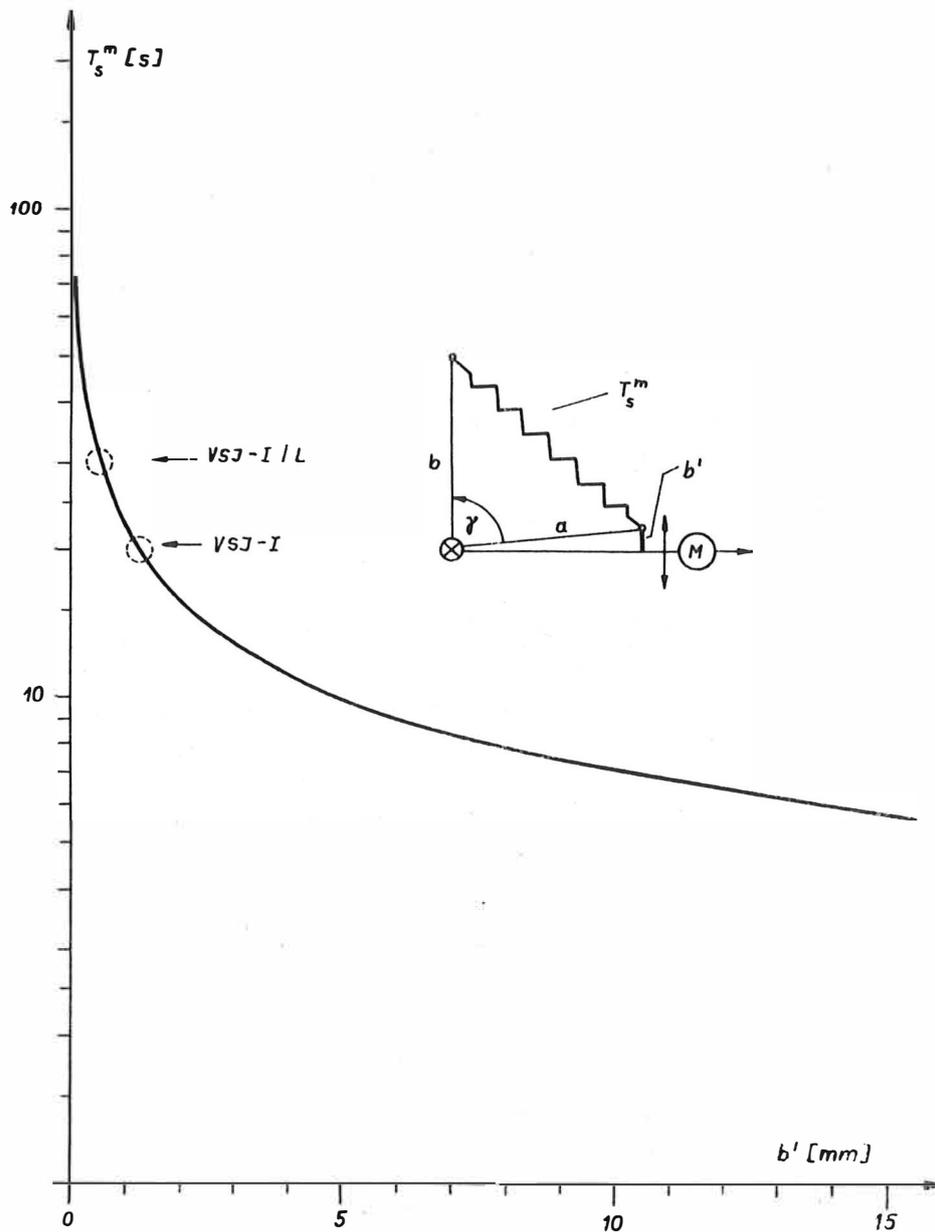


Abb. 10 Einstellung der mechanischen Eigenperiode  $T_s^m$  bei LA-COSTE-Seismographen VSJ-I

Wenn der Seismograph installiert ist, wird für den Bediener die Verschiebung von  $b'$  - zur Änderung des von der Feder aufgespannten Winkels  $\gamma$  bezüglich der Drehachse des Gehänges - in ihrer Wirkung auf  $T_s^m$  das Kriterium der Handhabung und Sicherung eines geforderten hohen  $T_s^m$ . Mannigfache Beobachtungen zeigen nun, daß mit steigendem  $T_s^m$  Handhabungsgrenzen auftreten, die offensichtlich einem nichtlinearen Verhalten entsprechen (Abb. 10). Aus (21) folgt für einen differentiellen Bediensschritt nämlich

$$\begin{aligned}
 (22) \quad \frac{dT_s}{db'} &= -2\pi\sqrt{\frac{1}{g}} \frac{1}{2} \sqrt{a} b^{-\frac{3}{2}} = -2\pi\sqrt{\frac{1}{g}} \left(\sqrt{\frac{a}{b'}}\right)^3 \cdot \frac{1}{2a} \\
 &= -\frac{1}{2a(2\pi\sqrt{\frac{1}{g}})^2} (2\pi\sqrt{\frac{1}{g}} \sqrt{\frac{a}{b'}})^3 = -\frac{1}{2aT_0^2} \cdot T_s^3.
 \end{aligned}$$

Das bedeutet folgendes. Während aus Abb. 10 schon ein nichtlineares Verhalten deutlich wird, ist die sich ändernde Empfindlichkeit in der Einstellung von  $T_s$  in Abb. 11 noch einmal gesondert dargestellt. Für den skizzierten VSJ-I ( $T_s \approx 20$  s) und VSJ-I/L ( $T_s \approx 30$  s) als Einsatzvarianten eines Gerätes sind die Arbeitspositionen indiziert [33]. Während die Einstellung in der Nähe von  $T_s \approx 20$  s sehr feinfühlig ist und zeitlich konstant bleibt, wird das bei  $T_s \approx 30$  s wegen der gestiegenen Steilheit der Kurve  $T_s(b')$  (Abb. 10) schon schwieriger. Mit den Werten der Konstruktion ( $T_0 = 1,392$  s,  $a = 260$  mm,  $T_s = 5 \dots 30$  s) wird das zahlenmäßig klar:

$$\begin{aligned}
 (23) \quad T_s \approx 20 \text{ s}: \quad \frac{dT_s}{db'} &\approx 8 \frac{\text{s}}{\text{mm}} = \frac{0,8 \text{ s}}{10 \text{ mm}}, \\
 T_s \approx 30 \text{ s}: \quad \frac{dT_s}{db'} &\approx 28 \frac{\text{s}}{\text{mm}} = \frac{0,28 \text{ s}}{100 \text{ mm}}.
 \end{aligned}$$

Hier zeigt sich für  $T_s \approx 30$  s, daß Einstelltoleranzen  $|\Delta T_s| \leq 0,2$  s schwer zu erreichen sind und eine zusätzliche Konstanz der gleichen Größenordnung unter den üblichen Temperaturvarianten einiger  $0,1$  °C über mehrere Tage am Aufstellort [42] nicht ohne Bedieneingriffe in den eingelaufenen Meßzustand gegeben sein kann. Das ist offensichtlich eine Grenze in der mechanischen Astasierung (in Abb. 10 als  $T_s^m$  indiziert), die auch durch verfeinerte Bauelemente (Getriebe o. ä.) und eine evtl. der Steilheit der  $T_s^m(b')$ -Kurve im Arbeitspunkt  $T_s$  besser angepaßte Verschiebungsrichtung nicht wesentlich überschritten werden kann. Bei Horizontalseismographen allein sind Werte  $T_s \approx 50$  s wohl möglich, jedoch richtet sich im Dreikomponentensatz mit einheitlichem  $T_s$  die Beurteilung nach dem schwächsten Glied des Satzes, eben dem vertikalen. Bei triaxialen homogenen Seismographensystemen sind die ehemals hohe Neigungsempfindlichkeit der Horizontalkomponenten der konventionellen Aufstellung und die hohe Temperaturempfindlichkeit der vertikalen Komponente auf die drei geneigten Empfänger vom Vertikaltyp etwa gleichmäßig verteilt und wirken demnach parallel und in Überlagerung ihrer Wirkungen! Die Einstellung von  $T_s^m$  ist jedoch ebenso mechanischer Art durch die Verschiebung eines Federangriffspunktes oder der Neigung des Gestells relativ zur Schwerkraftrichtung wie beim echten Vertikalseismometer, und die Grenzen in der  $T_s$ -Einstellung sind analoge [22, 35].

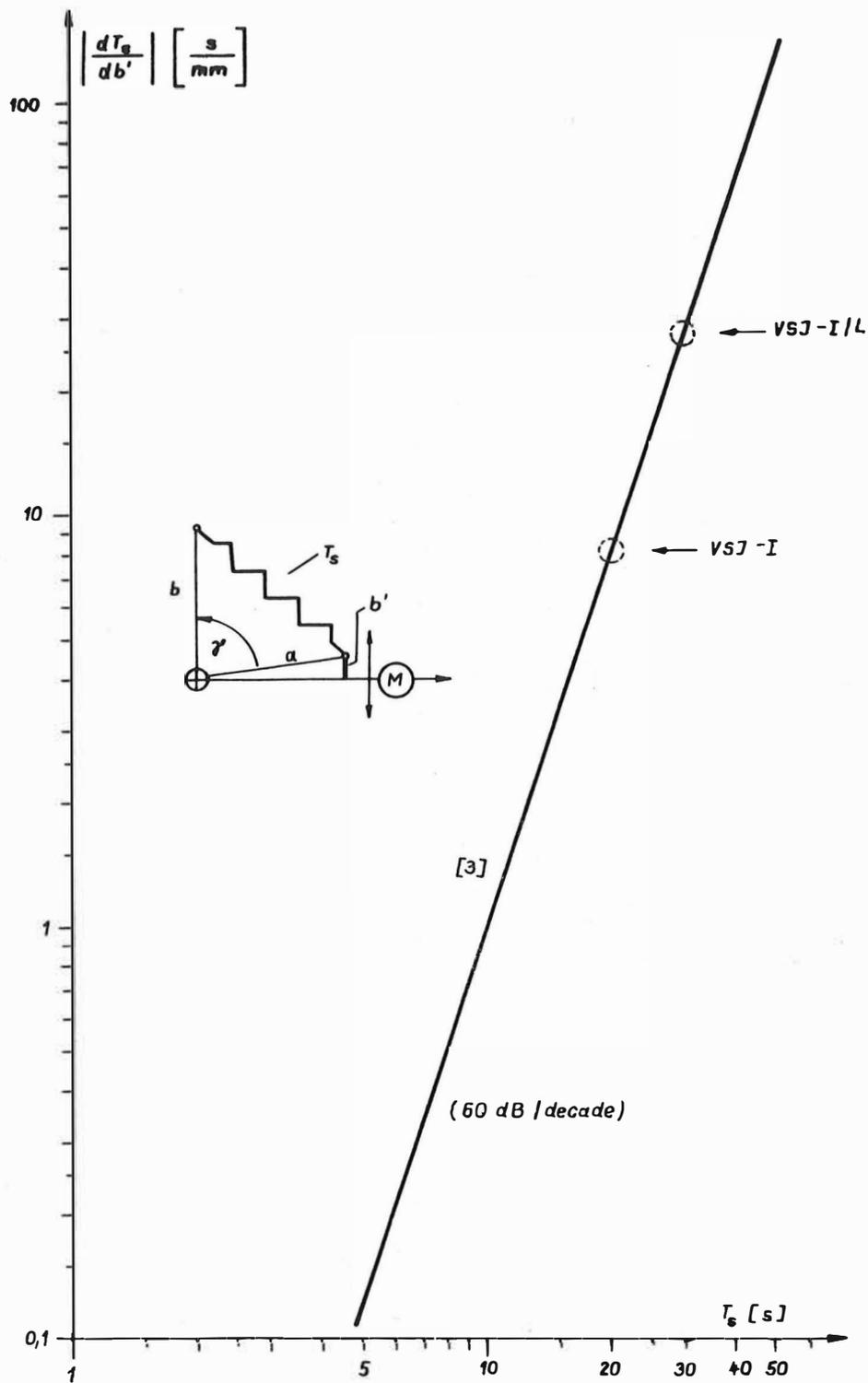


Abb. 11 Einstellsteilheit von  $T_s$  beim LA-COSTE-Seismographen VSJ-I

### 1.6. Erkenntnisse zum physikalischen Verständnis der Astasierung

Im Herbst 1971 gab es den Anlaß, das aus dem VSJ-I entwickelte Muster eines elektronischen Seismographen ES [42] - nach dem Anstoß durch das ALSEP [31] und ähnliche Vorläufer - mit dem System FBV von PLEŠINGER [25] und dem elektronischen Seismographen von JACOBY [14] zu vergleichen. In den Seismometer-Systemen spiegelt sich der Erkenntnisstand wider, daß es sinnvoll mit Experimenten belegt [25, 31] und ausführbar ist, elektronische Seismographensysteme als geregelte Systeme generell mit Gegenkopplung zu realisieren. Eine ebenso mögliche Kombination mit Rückführungs Zweigen in Mitkopplung ( $\sim + x$ ) wird mit Vorbehalten bez. Rauschen, Nichtlinearitäten u. ä. als unzulässig abgelehnt, auch nach den Ergebnissen von JACOBY [14] über eine mögliche Anwendung von Mitkopplung (positiver Rückkopplung) zur Einstellung einer vergrößerten Eigenperiode (von 5 s auf 20 s) mit dem Resultat, daß die Linearität nicht wesentlich schlechter wird und Grenzen vorrangig in der Empfindlichkeit gegenüber Installationsnebenbedingungen (Temperatur, Luftdruck, ...) liegen sollen, unabhängig davon, ob die Eigenperiode mechanisch oder elektronisch ( $\sim + x$ ) eingestellt wurde.

Betrachtet man die positive Rückführung  $\sim x$ , auch als direkte bezeichnet, unter dem Aspekt der Einstellung der Eigenperiode, so ergeben sich aus den in Abb. 12 gezeigten Abhängigkeiten für eine elektronische Periodenverlängerung mit den mechanischen Eigenperioden  $T_s = 5, 10, 15$  s als "Start"-Perioden, einige positive Merkmale. Die drei Kurven sind nur parallel zueinander verschoben, weisen somit gleiche Steilheit ab  $T_s = 15$  s auf. Da der untere Teil weniger gekrümmt ist, liegt es nahe, mit einer geringen Eigenperiode ( $\approx 5$  s) zu starten, und den Sprung auf z. B. 15 s erst einmal durch eine Grundeinstellung, etwa als festen Spannungsteiler, zu setzen. Die folgende steilere Einstellung, die der mechanischen gleicht (Abb. 10), auf größere  $T'_s$ , kann elektrisch wesentlich besser gehandhabt werden. Durch Spannungsteiler mit angepaßter, u. U. nicht-linearer Einstellsteilheit ist hier eine genügend feine Abgleichbarkeit des elektronisch vergrößerten  $T'_s$  zu erreichen. Außerdem kann man Spannungsteiler auch in bestimmten Grenzen thermisch kompensieren. Das sind Vorteile, die bei der konstruktiven Realisierung eines Seismographen durchaus eine Rolle spielen können.

Unbeschadet dieser Vorteile ist die Einsatzgrenze ( $T'_s$ -Wahl) weiterhin durch die Stabilität gegenüber Störgrößen gegeben und ist nur abhängig vom endgültigen  $T'_s$  des mechanischen Empfängers, nicht von der "Erzeugungsart"! Wenn durch die elektronische Einstellung die von JACOBY [14] berichtete gute Linearität nach dem Übergang von 5 s auf 20 s weiter besteht, so ist das zwar ein meßbares Plus, jedoch eben nicht allein entscheidend für die obere  $T'_s$ -Grenze. Die Verbesserungen einer Handhabung einer  $T_s$ -Einstellung mit einer elektronischen Rückführung, die u. U. sogar fernbedienbar gemacht werden kann, haben aber nicht zu einer Übernahme dieses, auch schon wesentlich früher einmal untersuchten [9] Prinzips in fernere Seismographen-Realisierungen geführt, es blieb ein Vorschlag, der nicht aufgegriffen wurde. Aus der heutigen Sicht ging es dabei um folgende Vorbehalte, denen in der eigenen Bearbeitung ab 1972 nachgegangen wurde:

1. Bei der Ablehnung der positiven, direkten Rückführung wird meist behauptet, daß die Linearitätsverhältnisse bez.  $T_s$  im Seismographen bei einer Gegenkopplung automatisch verbessert werden, während sie bei einer Mitkopplung automatisch verschlechtert werden. Diese Behauptung in ihrer Handhabung als ablehnendes Argument ist bisher nicht bewiesen worden. Sowohl JACOBY [14] von der praktischen Seite als auch ULLMANN [39] führen

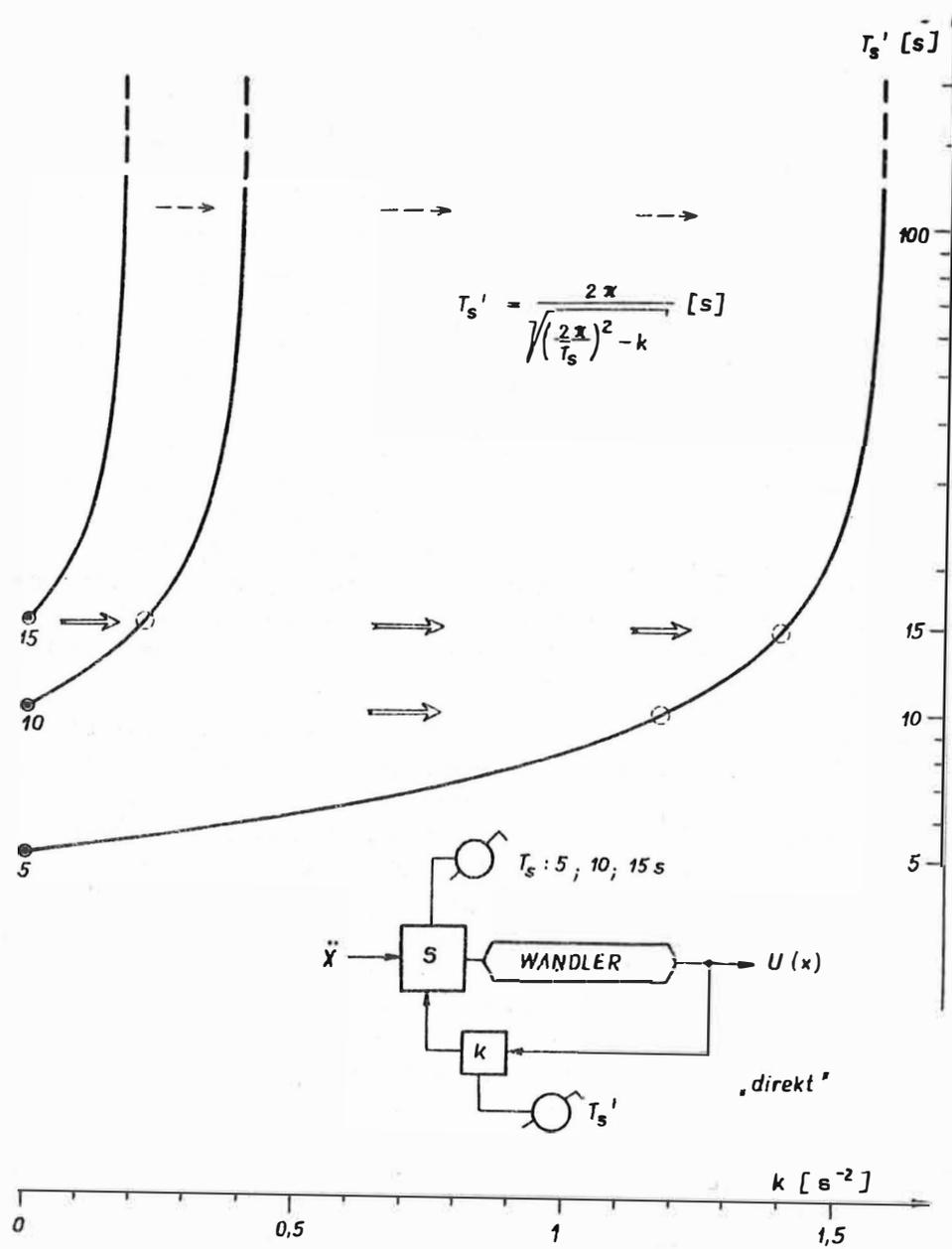


Abb. 12 Einstellung eines erhöhten  $T'_s$  durch direkte Rückführung

zu Recht an, daß eine Verbesserung der Linearität, d. h. Abstimmung einer Nichtlinearität, nur durch den Einsatz nichtlinearer Funktionselemente in der Rückführung erfolgen kann. Also kann sich mit einem konstanten linearen Zusatzmoment bei der Rückführung nach JACOBY [14] nur das Gesamtmoment verringern und die Eigenperiode  $T_s$  um eine Konstante erhöhen, die den relativen Linearitätsfehler verringern würde. Hier fehlen weitere Erkenntnisse als Basis für einen Vergleich zwischen Astasierungs-/Rückführungsverfahren und erst recht für ein beweisbares Aussondern einer neuen Methode aus einer Vielzahl möglicher oder bekannter.

2. Die Ablehnung der direkten Rückführung zur Periodenverlängerung ist ein subjektiver Vorbehalt, der offensichtlich seine Wurzeln in einer ungenügenden Kenntnis des gesamten Seismographensystems und seiner Physik hat. Da alle miteinander verglichenen Systeme mit astasierten Seismographen arbeiten, die ihre Eigenperiode durch die innere Geometrie erhalten, und die Rückführungsarten mit diesem so "fertigen" Seismographen als äußere Schaltungsmaßnahmen ausgeführt sind, die ebenso in die Astasierung eingreifen, es aber physikalisch keinen Grund zur Trennung in eine innere (mechanische) und eine äußere (elektronische) geben muß, ist es sicher notwendig, etwas mehr zur Wirkungsweise von Astasierungen freizulegen und dann erst in "erlaubtes" und "verbotenes" Vorgehen zu sortieren. Überdies gibt es ernstzunehmende Hinweise aus der Regelungstechnik [28] dafür, daß es sowohl in passiven als auch in aktiven Systemen beiderlei Arten von Rückführungen gibt und dabei durchaus bisher unbekannte Fakten vorliegen. Ein Grund mehr, eine genauere Analyse vorzunehmen.
3. Offensichtlich ist es vorteilhaft, für die  $T_s$ -Einstellung ein elektrisches Verfahren zu benutzen, bei dem sich  $T_s$  feinfühlicher, linearisiert und temperaturkompensiert einstellen läßt, mit ziemlich frei wählbarer Auflösung im Bedienschnitt. Auch kann die Temperaturkompensation des Teilers im Rückführkreis (k-Abgleich) so eingemessen werden, daß  $T_s$  insgesamt mit allen Einflußstellen (mechanischer Empfänger, Wandler, Regelkreisabgleich, Rückführglied) im zeitlichen Mittel thermisch wenig beeinflußt ist. Hat man schon bei der Temperaturkompensation der Gleichgewichtslage erdenkliche Mühe, eine praktische Lösung auch zu realisieren [40], so ist das für  $T_s$  kaum in Angriff genommen worden. Der Vorteil der elektrischen  $T_s$ -Einstellung erstreckt sich jedoch nicht weiter auf die Stabilität des Seismographen unter nichtseismischen Störeinflüssen. Diese hängt an  $T_s$ , unabhängig von der Erzeugungsart, ebenso wie die vorliegenden Nichtlinearitäten in  $T_s$ . Somit ist zwar für die Bedienung etwas verbessert, nicht aber für den stabilen Betrieb, und daraus entsteht die Frage nach der Notwendigkeit des elektronischen Aufwandes für ein nahezu gleiches Endresultat. Insgesamt erscheint aber das Verfahren der positiven Rückführung vorteilhaft und perspektivreich, jedoch irgendwo unvollkommen oder aber unvollständig.

Die Weiterführung durch zusätzliche logische Schritte gelang im Sommer 1972, ähnlich wie mit den heute zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln aus der erfinderischen Tätigkeit in Form des morphologischen Kastens [19] für das geregelte Seismographensystem durch folgende Kette:

- Es soll nicht ausgeschlossen werden, daß mit positiver Rückführung gearbeitet werden kann. Ohne Beweis wird daher vorausgesetzt, daß positive Rückführung nicht zu den "verbotenen" Handlungen gehört.
- Die Erfahrungen von JACOBY [14], und als Vorläufer GILMAN [9], werden akzeptiert und deren partielle Vorteile anerkannt. Sie werden jedoch unter kritischer Sicht als unvollständige und nicht beendete Lösungen eingestuft.

- Diese Hypothese der Unvollständigkeit erlaubt es, unter den möglichen Lösungen nach besseren Kombinationen der Systemteile im rückgeführten Seismographensystem weiter-zusuchen. Ansatzpunkt ist die Tatsache, daß sich ein mechanisch astasierter Seismo-graph und ein elektronisch teilweise astasierter Seismograph bei gleicher Eigenperio-de  $T_s$  nicht in bezug auf Langzeitstabilität unterscheiden und daß deshalb die Asta-sierungsgrenzen gleich sind. Andererseits ist es technisch durchaus üblich, in irgend-welchen Rückführungen mit Filtern zu arbeiten, die bestimmte Frequenzbereiche sperren oder durchlassen oder die Signale in diesen Bereichen frequenzmäßig degressiv oder progressiv beeinflussen.
- Die Aufgabenstellung wird überdacht und wie folgt geändert und neu gefaßt: Die Aufgabe soll also darin bestehen, eine Lösung für eine Regelkreisconfiguration eines elektro-nischen Seismographen zu finden, die folgendes sichert: a) elektronische Astasierung, b) wenig veränderte Empfindlichkeit des Seismographen gegenüber Störgrößen bei der Astasierung, c) höhere Astasierungsgrade des Seismographen bzw. höhere maximale  $T_s$ -Werte.
- Kreativer Schluß und technische Lösung: Zur stabilen elektronischen Astasierung von Seismographen wird eine Rückführung angewendet, bei der "die Verschiebung  $x$  zwischen Gestell und Gehänge im relevanten Signalbereich abgleichbar positiv" auf die seismische Masse rückgeführt wird. Zur Rückführung im relevanten Signalbereich, dessen langperi-odisches Ende der projektierten verlängerten Periode  $T'_s = NT_s$  entspricht, wird ent-weder ein Hochpaß verwendet, der das Signalband von störenden Driften trennt, mit  $T_h > T'_s$ , oder ein Bandpaß angewendet, der das Signalband gegenüber langperiodischen Driften abgrenzt und außerdem hochfrequente Störungen vor der Rückführung unterdrückt. Diese Lösung stellt eine Astasierung in Aussicht, die von der Langzeitstabilität des Seismographen getrennt und in der Anwendung entkoppelt ist.

Die Idee dieser positiven Paßband-Rückführung wurde zwischen 6. 7. 1972 und 8/72 an der Station Moxa an dem elektronischen Seismographen VSJ-I-ES durch Versuche bestätigt (Abb. 13). In der gezeigten Anordnung wurde über ein abgleichbares RC-Glied positiv rück-geführt und eine beträchtliche Periodenverlängerung erzielt. Es wurde dabei ein Bandpaß mit hoher Eckperiode aus dem Signalzweig benutzt, hinter dem die Anpassung erfolgte. Die Dämpfung wurde an einem separaten Spule-Magnet-System und am Rückführungsglied selbst vorgenommen. Über einen Vorwiderstand konnte außerdem für die Auslenkung des Gehänges zur Bestimmung der offenen Eckperioden  $T_s, T'_s$  eine Testspannung angelegt werden. Die Erzeugung  $T'_s \approx 120$  s aus  $T_s = 24,5$  s ist in der Kopie in Abb. 13 zu sehen (Experi-ment vom 12. 7. 1972).  $T_s \approx 150$  s war eine Grenze, die mit der vorhandenen Eckperiode des Rückführungsfilters ( $\leq 300$  s) nicht überstiegen werden konnte, da hierbei schon ein entdämpfender Anteil ( $\sim + \ddot{x}$ ) rückgekoppelt wurde. Beim Probelauf mit  $T_s$  blieb die vor-herige Stabilität des Seismographen entsprechend seiner mechanischen Eigenperiode  $T_s$  wie erwartet erhalten.

Zur Beurteilung dieser vorteilhaften Rückführungsvariante, die entsprechend dem Vor-gehen als eine "dynamische Astasierung" gesehen werden kann, war es notwendig, tiefer in den Forschungsgegenstand "Seismograph" einzudringen. Das gelang in Fortführung analyti-scher Arbeiten zur Geschichte, Entwicklung und Periodisierung der Seismometrie in den letzten 100 Jahren, die zu Tendenzen und Trends der Weiterentwicklung geführt haben [41, 45]. Abb. 14 zeigt ein aus diesen Analysen erarbeitetes allgemeines Schema für den For-schungsgegenstand "Seismograph", das es gestattet, die Seismographentypen vom mechanischen Seismographen bis hin zum elektronischen fernsteuerbaren Digitalseismographen mit verbind-

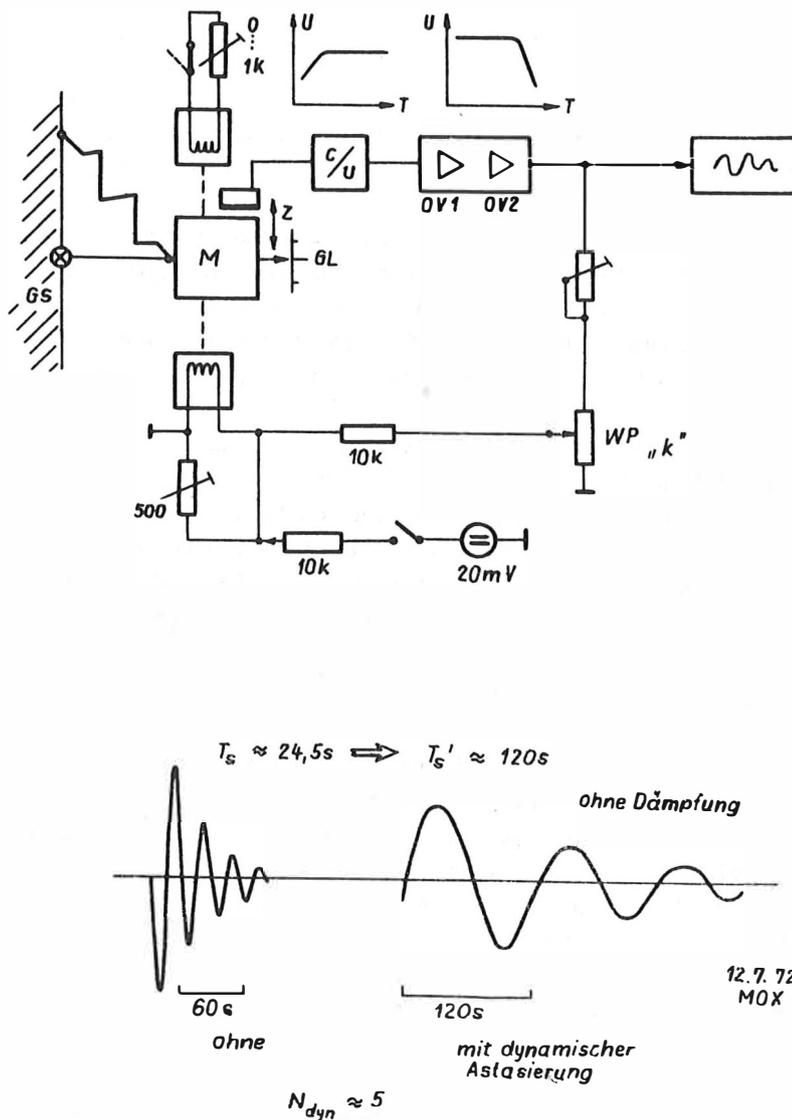


Abb. 13 Experimenteller Aufbau zur Bestätigung der positiven Paßband-Rückführung

lichen einheitlichen Kategorien zu beschreiben. Dabei taucht hier nicht weiter aufgespalten der "Mechanische Empfänger" mit "Signalwandler" und "Betriebs-, Eich-, Bedienvorrichtungen" als die Kategorie "SEISMOMETER" auf.

Abb. 15 zeigt das weiter aufgeschlüsselte "Seismometer" bei Vermeidung aller konstruktiven Einzelheiten in einem Deskriptoren-Schema. Im Mittelpunkt steht der eigentliche seismische Sensor, dem Betriebs- und Hilfsvorrichtungen, Abschirmungen und Ankopplungsmittel an den Untergrund beigeordnet sind, die hier nicht wesentlich sein sollen.

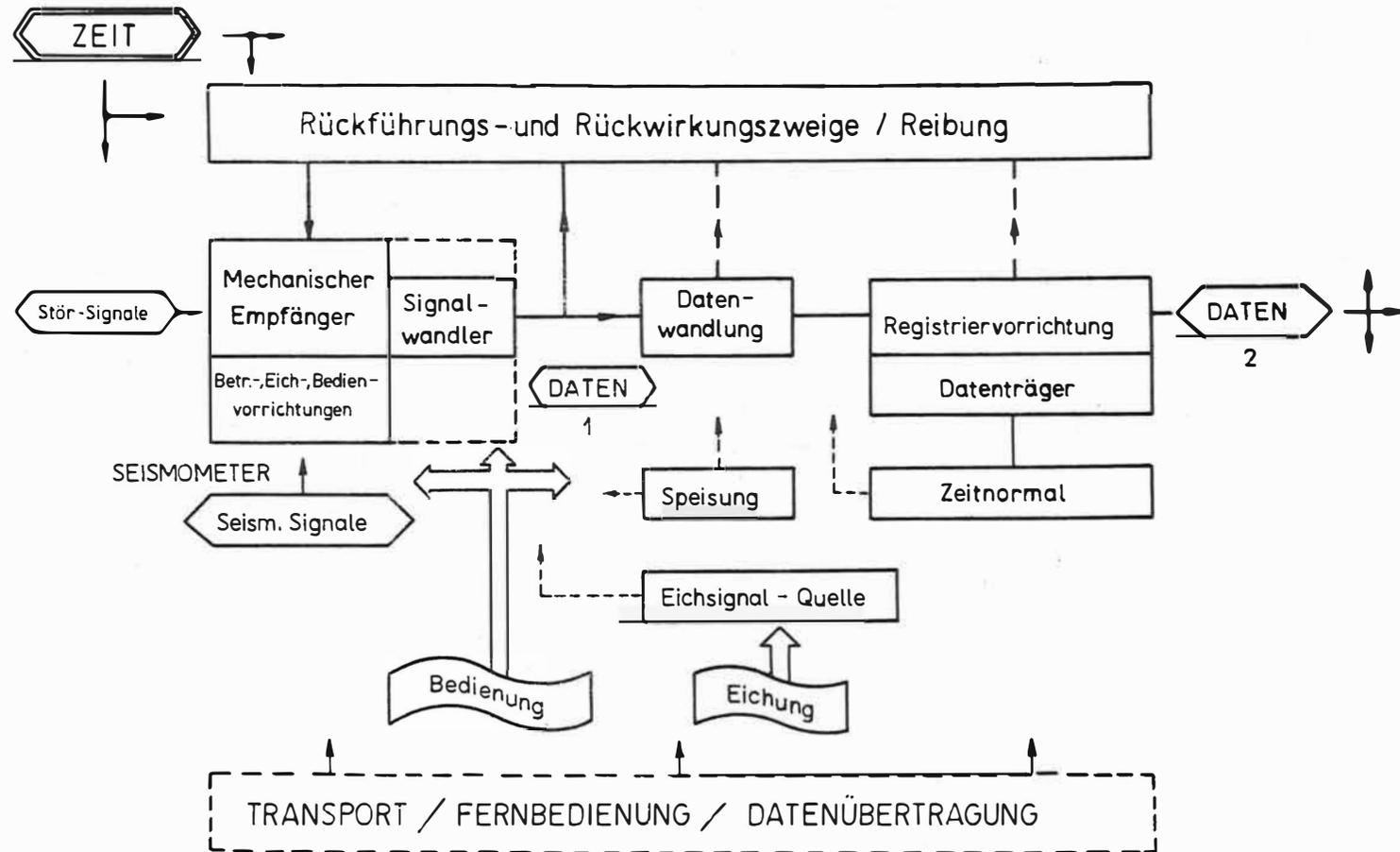


Abb. 14 Der Forschungsgegenstand "Seismograph" mit allgemeinen beschreibenden Einheiten

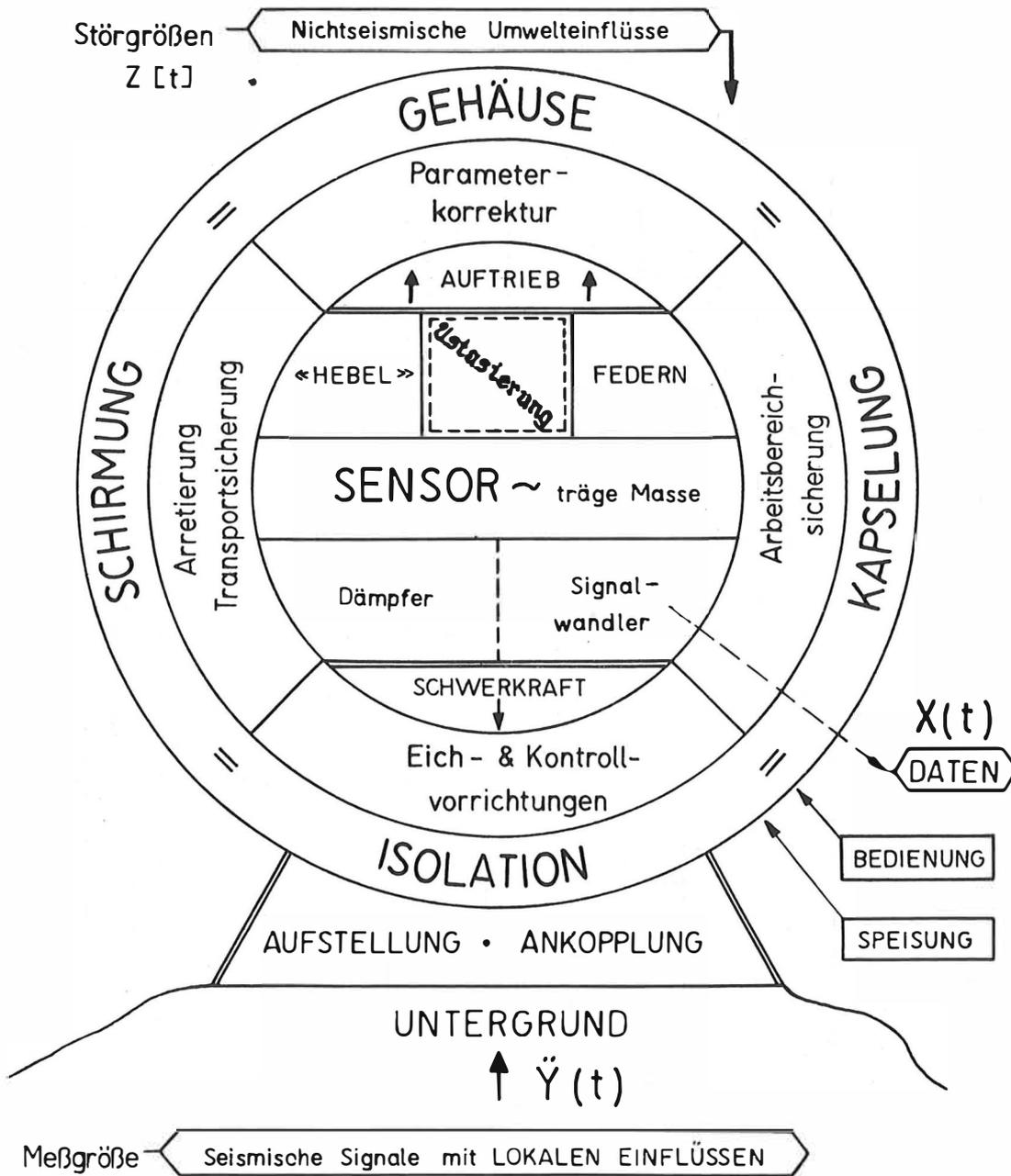


Abb. 15 Die Beschreibung der Einheit "Seismometer" durch Deskriptoren

Meßgrundlage ist die Eigenschaft der seismischen Masse, träge zu sein, d. h. in ihrer Lage zu verharren relativ zu einem raumfesten Inertialsystem, während sich das ortsfeste Gestell mit dem Untergrund relativ dazu bewegt. Die träge Masse wird durch Hebel und Federn allgemeiner Art definiert und reibungsfrei im Gestell geführt. An ihr greifen die örtliche Schwerkraft und der Auftrieb im Umgebungsmedium an. Hebel und Federn sichern in ihrer Bemessung und Geometrie ein schwingfähiges System, das durch Dämpfer je nach Einsatzzweck gedämpft wird und dessen relative Lageänderungen zum Gestell durch einen Wandler erfaßt und als Daten nach außen im Sinne der Abb. 14 weitergeführt werden. Die Astasierung ist irgendwie zwischen Masse, Federn, Hebeln angesiedelt als eine in der Handhabung überschaubare Maßnahme im konstruktiven und Bedienungsbereich. Während die anderen Kategorien benennbare körperliche und meßbare Eigenschaften besitzen, ist bei der hilfreichen Maßnahme "Astasierung" zur Einstellung einer möglichst großen Eigenperiode des Schwingers keine weitere physikalische Erklärung gegeben. Durch Astasierung wird aus einem Schwinger mit einer physikalischen Eigenperiode  $T_s$  einer mit einem größeren  $T'_s$ , allein durch eine technische Einstellung bez. der Geometrie des Schwingers relativ zum Schwerfeld ohne zusätzliche physikalische Erläuterung. Dabei kann beim vorliegenden Erkenntnisstand und der üblichen verbreiteten Sicht und Anwendung der Astasierung nicht ohne weiteres angenommen werden, daß "Astasierung" in Abb. 15 allein durch eine ausgefallene Darstellungsweise als eine Kernfrage in der Struktur des Seismometers erscheint. Unbestritten ist die Definition des Astasierungsfaktors  $N$  als

$$N = \frac{T_s}{T_{s0}}$$

entsprechend dem äußeren, meßbaren Erscheinungsbild des Schwingers. Üblich ist es auch, für  $N$  in

$$T_s = N \cdot 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

für Pendelseismographen einen analytischen Ausdruck zu entwickeln, indem bevorzugte Winkel aus der Geometrie eine  $N$ -Wahl erlaubt, wie der Neigungswinkel  $i$  bei Horizontalseismographen und der LA-COSTE-Winkel  $\gamma$  beim Vertikalseismographen [3, 20].

$$(24) \quad N_H^{-2} = \sin i \quad (\text{horizontal}), \quad N_V^{-2} = \tan \gamma \quad (\text{vertikal}).$$

Damit sind Ausdrücke bereitgestellt, in denen konstruktive Größen auftreten und es lassen sich Abschätzungen zur Erreichung eines projektierten  $T_s$  zu  $N$ , zu Hebellängen und Einstellungen (s. 1.5.) durchführen. Das ist offensichtlich ein Vorteil gegenüber den Darstellungen bei KIRNOS [27] oder MELTON [22], wo die Eigenperiode des astasierten Vertikalseismographen nur aus der Differenz zweier Terme einer Bestimmungsgleichung berechnet werden könnte.

Die Geschlossenheit und Eleganz der anderen Darstellungsform, die sehr gut bei MEISSER [21] und später bei DUCLAUX [4] herauskommt und gern übernommen wurde [34, 40, 42], verleitet jedoch dazu, die Definition von  $N$  und sich daran anschließende Betrachtungen als abgeschlossen und als eine vergangene wissenschaftshistorische Erscheinung mit unumstößlichem Ergebnis zu akzeptieren. Da jedoch diese Definition keinen Zugang zum physikalischen Vorgang bei der Astasierung hergibt, sind dazu Zweifel anzumelden.

Nach (24) ist  $N$  in keiner Weise wesentlich beschränkt außer auf positive Werte

$$(25) \quad 0 \leq N < \infty .$$

Praktisch ist

$$(26) \quad N \leq \hat{N}(\vartheta, t, \eta, \dots)$$

zu wählen, um einen stabilen Betrieb zu erreichen. Dabei hängt bekannterweise der Grenzwert  $\hat{N}$  von den Störgrößen Temperatur  $\vartheta$ , Zeit  $t$ , Neigung  $\eta$  ... über die Ausdehnung, Alterung, Neigung der Aufstellungsbasis ... ab. Es ist jedoch  $N \leq 0$  durchaus denkbar und durch die trigonometrischen Abhängigkeiten in (24) auch realisierbar. Wenn  $N$  aber als ein Astasierungs- oder Periodenverlängerungsfaktor eingeführt und schrittweise in der Entwicklung der Seismometrie durch sinnvolle Seismographenkonstruktionen mit immer höheren Werten realisiert wurde, um eine der Meßaufgabe angemessene Bandbreite zu erreichen, ist es nicht sinnvoll, daß das eingeführte  $N$  auch periodenverkürzend wirken kann oder soll! Hier muß in der jetzigen Darstellungsform eine Darstellungsschwäche vermutet werden. Es wird deshalb versucht, den Periodenverlängerungsfaktor/Astasierungsfaktor neu zu definieren und entsprechende praktikable analytische Ausdrücke anhand bekannter Seismometerlösungen abzuleiten. Es soll versuchsweise gelten

$$(27) \quad T_s = (1 + \bar{N})T_{s0}, \quad 0 \leq \bar{N} < \infty .$$

Das hat den Hintergrund, daß versucht wird, aus den vorliegenden  $T_s$ -Formeln eine Form (27) abzuspalten, die vom nichtastasierten Seismographen mit  $T_{s0}$  als einer Normalform ausgeht und die Astasierung  $\bar{N}$  als einen Zusatzterm ausweist. Das würde es dann erlauben, mit einem solchen Ausdruck in die Beurteilung und den Vergleich unterschiedlicher Regelkreisausführungen auf der Grundlage einer Ausgangslinearität (von  $T_{s0}$  ausgehend) mit spezifischen Zusätzen durch die jeweilige Regelkreisconfiguration zu gelangen. Mit (27) ist  $\bar{N}$  auch eindeutig als Periodenverlängerung anzusprechen. Zur Entwicklung vorliegender  $T_s$ -Formeln bei astasierten Seismographen beginnen wir mit dem LA-COSTE-Vertikalseismographen. Dazu wollen wir jedoch nicht von  $T_s$ , sondern von  $\omega_s^2$  ausgehen, da dieses primär in der DGL auftritt und  $T_s$  eine abgeleitete, anschauliche und gut meßbare Größe für langsame Schwinger ist. Dabei erwarten wir einen zu (27) ähnlichen Ausdruck für  $\omega_s^2$  mit einem Basisterm  $\omega_{s0}^2$  und "astasierenden" Zusätzen. Bekanntlich ist für den LA-COSTE-Seismographen nach (1.3.) und (19)

$$N^2 = \frac{1}{\cot \gamma + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \text{tg} \varepsilon} .$$

Wir definieren als Grenzfall: keine Astasierung  $\sim N = 1$ . Dafür haben wir keine handliche Form, denn  $\cot \gamma$  läuft unbeschränkt von  $\gamma = 0$  an und ergibt auch Werte  $N < 1$ . Wegen

$$(28) \quad \omega_s^2 = \frac{1}{N^2} \frac{g}{l} = \frac{g}{l} \left( \cot \gamma + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \text{tg} \varepsilon \right) \quad \text{und} \quad \cot 45^\circ = 1$$

substituieren wir und führen den neuen Astasierungswinkel  $\bar{\gamma}$  ein:

$$(29) \quad \gamma = 45^\circ + \bar{\gamma}, \quad 0 \leq \bar{\gamma} \leq 45^\circ .$$

Dann ist

$$(30) \quad \omega_s^2 = \frac{g}{l} \left[ \cot (45^\circ + \bar{\gamma}) + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \text{tg} \varepsilon \right]$$

und mit

$$(31) \quad \cot(45^\circ + \bar{\gamma}) = 1 - \frac{2}{1 + \cot \bar{\gamma}},$$

$$(32) \quad \omega_s^2 = \frac{g}{l} \left( 1 - \frac{2}{1 + \cot \bar{\gamma}} + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \operatorname{tg} \varepsilon \right)$$

$$(33) \quad \omega_s^2 = \omega_{s0}^2 - \frac{g}{l} \frac{1}{(N^*)^2}, \quad (N^*)^{-2} = \frac{2}{1 + \cot \bar{\gamma}} + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \operatorname{tg} \varepsilon.$$

Mit (33) ist aus der eleganten Formel (28) - ohne weitere Deutungsmöglichkeiten - durch die Substitution (29) mit dem neuen Winkel  $\bar{\gamma}$  und der Astasierungsforderung  $N^*(\gamma=0) = 0$  ein Ausdruck (33) entstanden, der für  $\lambda \approx 0$ ,  $\varepsilon \approx 0$  üblicher Konstruktionen die Forderung

$$(34) \quad \bar{\gamma} \rightarrow 0: \quad \omega_s^2 \rightarrow \omega_{s0}^2$$

erfüllt. Mit (33) liegt erstmalig eine Form vor, die Grundterm  $\omega_{s0}^2$  - entsprechend dem nichtastasierten Pendel - und Astasierung sinnvoll voneinander separiert und die Astasierung als Zusatzmaßnahme ausweist. Da im Rechengang  $\omega_s^2$  die aus dem Moment  $M_R(\varphi)$  abgeleitete Größe ist, versuchen wir unter Benutzung von (32) aus (1.3.) weiterzugelangen

$$M_R(\varphi) = - \frac{M_{gr0}}{N^2} \varphi \operatorname{cose} \left[ 1 + \frac{3}{2} \varphi N^2 \dots \right]$$

( $\varphi$  klein, Restglieder gegen 0 für  $\lambda \rightarrow 0$ )

$$M_R(\varphi) = - M_{gr0} \operatorname{cose} \left[ 1 - \frac{2}{1 + \cot \bar{\gamma}} + \frac{h_0}{L_0} \frac{\lambda}{L_0 - \lambda} - \operatorname{tg} \varepsilon \right] \varphi \left[ 1 + O(\varphi^2, \lambda) \right],$$

$$(35) \quad M_R(\varphi) = - M_{gr0} \operatorname{cose} \cdot \varphi + M_{gr0} \left( \frac{1}{N^*} \right)^2 \varphi \left[ 1 + O(\varphi^2, \lambda) \right].$$

Das ist entgegen den üblichen Darstellungen wie [42] ein überraschendes Resultat: Grundterm und Astasierungsterm sind voneinander getrennt, die Verknüpfung ist additiv, die Astasierung  $N^*$  ist nicht mehr bezüglich eines einheitlichen Ausdruckes multiplikativ. Die Astasierung ist ein zusätzliches Moment, das dem rücktreibenden Moment des nichtastasierten Pendels entgegengerichtet ist und mit wachsender Astasierung das resultierende Moment verringert und dadurch  $\omega_s$  verringert bzw.  $T_s$  vergrößert. Diese Aussage (35) ist bisher nicht getroffen worden, da das Streben nach einer möglichst eleganten geschlossenen Darstellung wie die von MEISSER [21] entweder nachvollzogen oder ohne wirkliche Alternative [1, 4, 22] abgelehnt wurde. Wir prüfen also gleich den Fall des astasierten Horizontalseismographen auf einen ähnlichen Sachverhalt. Mit  $i$  als Neigungswinkel des Gehänges bez. der Vertikale ist

$$(36) \quad \omega_s^2 = \frac{g}{l} \sin i.$$

Mit  $i \rightarrow 0$  geht bekannterweise  $\omega_s \rightarrow 0$  und  $T_s \rightarrow \infty$ . Auch hier ist die trigonometrische Darstellung übersichtlich und seit langem bekannt und akzeptiert. Jedoch ist auf den Astasierungswinkel  $i$  bezogen

$$(37) \quad N \approx 1; \quad i = 90^\circ$$

und die Aufspaltung in Basisterm und Anteil der Astasierung fehlt ebenfalls. Wir führen deshalb einen neuen Astasierungswinkel ein.

$$(38) \quad i = 90^\circ - \gamma .$$

Mit

$$(39) \quad \sin i = \sin(90^\circ - \gamma) = \cos \gamma$$

und

$$(40) \quad \cos \gamma = 1 - 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}$$

ist dann

$$\omega_s^2 = \frac{g}{l} (1 - 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}) ,$$

$$\omega_s^2 = \omega_{s0}^2 - 2 \frac{g}{l} \sin^2 \frac{\gamma}{2} ,$$

$$(41) \quad \omega_s^2 = \omega_{s0}^2 - \frac{g}{l} \left(\frac{1}{N^*}\right)^2 ,$$

$$(42) \quad (N^*)^{-2} = 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} .$$

Das ist die gewünschte Aufspaltung, die überdies für  $\gamma = 0$  den nichtastasierten Grundterm  $\omega_{s0}$  ergibt. Das resultierende Moment hat die Form für kleine  $\varphi$

$$(43) \quad \mathbb{M}_R(\varphi) = -M_{gr0} \varphi (1 - 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}) ,$$

$$(44) \quad \mathbb{M}_R(\varphi) = -M_{gr0} \varphi + 2M_{gr0} \sin^2 \frac{\gamma}{2} \cdot \varphi .$$

Das ergibt den Grundterm, der in  $\varphi$  linear ist, also die Basis-Linearität, und den Term der Astasierung, der  $\mathbb{M}_R$  mit wachsendem  $\gamma$  vermindert. Auch hier führt zum Verständnis nicht der historisch eingeführte Astasierungswinkel. Wie beim vertikalen Seismographen bringt auch beim horizontalen ein Ansatz die Klarheit, der  $\omega_s^2$  in ein  $\omega_{s0}^2$  und einen astasierungsabhängigen Term zerlegt. Ebenso ist die Situation beim geneigten triaxialen Seismographen vom Vertikaltyp. Für

$$(45) \quad \bar{N}^{-2} = \frac{\sin \delta}{\cos(\varepsilon + \delta)} ,$$

den Astasierungsfaktor des abgeglichenen geneigten (mit  $\varepsilon$ ) V-Seismographen vom LA-COSTE-Typ, wird bei der Forderung  $N = 1$  für den Astasierungswinkel gleich Null mit dem neuen Astasierungswinkel  $\bar{\delta}$

$$(46) \quad \delta \rightarrow \frac{\varepsilon'}{2} + \bar{\delta} , \quad \varepsilon' = 90^\circ - \varepsilon ,$$

$$(47) \quad \bar{N}^{-2} = \frac{\sin(\frac{\varepsilon'}{2} + \bar{\delta})}{\sin(\frac{\varepsilon}{2} + \bar{\delta})} .$$

Nach Umformung ist dann

$$(48) \quad \bar{N}^{-2} = 1 - \frac{2}{1 + \tan \frac{\varepsilon'}{2} \cot \bar{\delta}} .$$

Die Grenzen der Astasierung ist für  $\bar{\delta} \rightarrow \frac{\varepsilon'}{2}$  erreicht, es wird

$$\omega_s^2 \rightarrow 0 .$$

Wie beim LA-COSTE-Seismographen vom neuen Vertikaltyp ist auch beim geneigten der halbe von der Feder eingeschlossene Winkel als Ausgangswinkel anzusetzen, um zu einer Aufspaltung von  $N$  bzw.  $\bar{N}$  in einen Grundterm und einen Astasierungsterm zu gelangen.

$$(49) \quad \omega_s^2 = \omega_{so}^2 - \frac{g}{l} \left(\frac{1}{N^*}\right)^2, \quad (N^*)^{-2} = \frac{2}{1 + \tan \frac{\epsilon'}{2} \cot \delta}.$$

Für das resultierende Moment ist dann für kleine  $\varphi$  und einen abgeglichenen Zustand  $\lambda = 0$ ,

$$(50) \quad \mathfrak{M}_R(\varphi) = -Mg r_0 \cos \epsilon \varphi + Mg r_0 \left(\frac{1}{N^*}\right)^2 \varphi,$$

ebenso aufgespalten in einen Grundterm und einen Astasierungsterm in additiver Verknüpfung.

An drei Beispielen ist gezeigt worden, daß es möglich ist, o. B. d. A., von der aus dem postulierten Ansatz für das Gesamtmoment  $\mathfrak{M}_R$  benutzten linearen Superposition über die übliche geschlossene Darstellung von  $\varphi$  hinaus, die die Astasierung  $N$  als Multiplikator in  $\mathfrak{M}_R$  und  $T_s$  ausweist, über eine erweiterte Fragestellung für den Astasierungsfaktor und seinen Grenzwert zu einer Darstellungsforn zu gelangen, in der Grundterm (Ausgangspunkt: physikalisches Pendel) und Astasierungsterm (Anordnung des Pendels, mit zusätzlichen Hebeln und Federn als Ausdruck der individuellen konstruktiven Lösung im Schwerfeld) nebeneinander stehen und der Grundterm, wie gefordert, frei von der Astasierung ist und den Grenzfall für fehlende Astasierung darstellt.

$$(51) \quad \mathfrak{M}_R(\varphi) = \mathfrak{M}_R(\text{Pendel}) + \mathfrak{M}_R(\text{Astasierung}), \quad \omega_s^2 = \omega_{so}^2 - \omega_s^2(\text{Astasierung}).$$

Diese Darstellungen, die die derzeit üblichen o. B. d. A. unter spezieller Sicht weiterführen, lassen erstmals eine klare physikalische Deutung für die Astasierung zu; decken also das physikalische Wesen der Astasierung auf und geben eine Beschreibung in der Darstellungsweise der Regelungstechnik.

Bei der Astasierung von physikalischen Pendeln handelt es sich um eine Rückführungsmaßnahme im Sinne der Regelungstechnik, die für die spezifische Konstruktion charakteristisch ist und deren Stärke über einen geeignet definierten Astasierungsfaktor  $N^*$  eingestellt wird.

"Astasierung ist eine "festverschaltete" positive mechanische Rückführung im periodenverlängerten mechanischen Pendel, die über den geeignet separierten Astasierungsfaktor  $N^*$  in ihrer Stärke einstellbar ist. Jedes astasierte Seismometer ist nicht vorrangig nur eine genial ersonnene konstruktive Realisierung mit einem historisch eingeführten, äußerlich bedienbaren Astasierungswinkel, sondern grundsätzlich ein geregeltes physikalisches System mit einer festen, über den Astasierungsfaktor  $N^*$  setzbaren, positiven Rückführung."

Das ergibt nach ca. 100 Jahren astasierter Seismometer [6] eine zusätzliche physikalische Fundierung der Astasierung, die Aufhebung des Vorranges äußerer Rückführungsmaßnahmen gegenüber nicht bekannten oder akzeptierten inneren und die neue Akzeptanz positiver Rückführungen in Seismographensystemen.

Wichtigster Fakt ist der, daß der astasierte Seismograph ein rückgeführtes System mit positiver Rückführung ist, und daß mit diesem System bisher fast ausschließlich mit äußeren negativen Rückführungen gearbeitet wurde, was hiermit als instrumentelles Dogma mit Ausschließlichkeitscharakter fragwürdig wird. Es spricht nichts mehr dagegen, auch positive Rückführungen im Gesamtbereich der Astasierungen durch Rückführungen einzusetzen. Den derzeitigen Vorbehalten der Fachleute sei das Zitat eines Regelungstechnikers entgegengehalten:

"Feedback is a descriptive term embracing a group of system analysis and design philosophies [28]. Feedback may occur in both passive and active systems. It may appear as an inherent system characteristic or be purposely introduced to yield special effects. Some systems appear to contain feedback when viewed in one manner, but the effect appears to vanish if another approach is used. The distinguishing characteristic of the feedback is that some function of the system output is returned to the input in such a manner as to affect the system response."

Ebenso sind die Verhältnisse beim innerlich astasierten und äußerlich rückgeführten Seismographensystem einzuschätzen.

Durch die Freilegung dieser Wurzel der Breitbandseismometrie, des wesentlichen Kerns des Seismometers, ist erstmals eine Möglichkeit vorhanden, die erkannte innere positive Rückführung aus der spezifischen Geometrie der Konstruktion durch eine äußere elektrische mit höherer Linearität und unter Einsatz von Filtern abzulösen und bestehende Astasierungsgrade zu übersteigen und vorteilhafter auf die Gesamtfunktion bezogen zu erreichen. Bekanntlich hat die DGL des Seismometers die Gestalt (1.3.)

$$(52) \quad \Theta_S \ddot{\varphi} + D_S \dot{\varphi} + \mathbb{M}_R \varphi = -mg\ddot{x}$$

und hieraus

$$(53) \quad \ddot{\varphi} + 2\alpha_S \omega_S \dot{\varphi} + \omega_S^2 \varphi = -\frac{\ddot{x}}{I}, \quad \omega_S^2 = \frac{1}{\Theta_S} \left( \frac{\partial \mathbb{M}_R}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0}.$$

Durch die Aufspaltung von (51) ist

$$(54) \quad \mathbb{M}_R = \mathbb{M}_R(\text{Pendel}) + \mathbb{M}_R(\text{Astasierung}), \quad \mathbb{M}_R = \mathbb{M}_{R0} + \mathbb{M}_{RN}$$

und

$$(55) \quad \omega_S^2 = \omega_{S0}^2 - \omega_S^2(N).$$

Damit tritt der Term  $\mathbb{M}_{RN}$  im Ansatz und in der Gleichung so auf, wie in einem geregelten System mit der Übertragungsfunktion in Laplace-Transformation (1.4.)

$$(56) \quad \frac{X}{Y} = \frac{s^2}{s^2 + 2\alpha_S \omega_S s + (\omega_{S0}^2 - \omega_S^2(N))}, \quad \frac{X}{Y} = \frac{s^2}{s^2 + 2\alpha_S \omega_S s + \omega_{S0}^2 - \frac{1}{N^*2} \omega_{S0}^2}.$$

Das ist das behauptete geregelte System mit der offenen Übertragungsfunktion:

$$(57) \quad G(s) = (s^2 + 2\alpha_S \omega_S s + \omega_{S0}^2)^{-1}$$

und

$$(58) \quad H(s) = -\frac{1}{N^*2} \frac{g}{I}$$

als Rückführungszweig; mit der geschlossenen Übertragungsfunktion

$$(59) \quad R_G(s) = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)}, \quad R_G(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\alpha_s \omega_s s + \omega_{s0}^2 - \frac{1}{N^*} \frac{G}{I}}.$$

Aus dieser Darstellung des mit positiver Rückführung astasierten Seismometers mit der Eigenfrequenz

$$(60) \quad \omega_s^2(N^*) = \left( \omega_{s0}^2 - \frac{1}{N^*} \frac{G}{I} \right)$$

ist nicht mehr zu unterscheiden, ob der Regelkreisfaktor

$$(61) \quad k^* = \frac{1}{N^* - 2}$$

von einer vorzugsweise elektrischen Realisierung herkommt oder, wie auch die Konstante  $\omega_{sN}^2$ , eine Eigenschaft der Konstruktion des Sensors ist. Physikalisch gibt es hier keinen prinzipiellen Unterschied in den Rückführungsarten; erst bei der Beurteilung der Linearität und der Stabilität der Regelkreisparameter bez. nichtseismischer Störgrößen ist sorgsam zwischen den möglichen Rückführungsarten - mechanisch/äußere Rückführung - zu selektieren. Als innere Rückführungsfunktionen ergeben sich für Vertikalseismographen (LA-COSTE-Typ) ( $\varepsilon = 0$ ,  $\lambda = 0$ )

$$(62) \quad H(s) = -\frac{G}{I} \left\{ \frac{2}{1 + \cot \gamma} \right\} = -\frac{G}{I} \left( \frac{1}{N^*} \right)^2,$$

für Horizontalseismographen (geneigtes Pendel)

$$(63) \quad H(s) = -\frac{G}{I} \left\{ 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \right\} = -\frac{G}{I} \left( \frac{1}{N_H^*} \right)^2,$$

für geneigte Seismographen vom Vertikaltyp

$$(64) \quad H(s) = -\frac{G}{I} \left\{ \frac{2}{1 + \tan \frac{\varepsilon}{2} \cot \delta} \right\} = -\frac{G}{I} \left( \frac{1}{N^*} \right)^2.$$

Eine übersichtliche Darstellung zeigt Abb. 16. Für den LA-COSTE-Vertikalseismographen (V), für den astasierten Horizontalseismographen (H) vom H-Pendeltyp sowie für den triaxialen Seismographen vom Vertikaltyp (V\*) [17, 3, 35] ist die Wirkungsweise der mechanischen Astasierung N durch äußere Einstellung der Winkel  $\gamma$ ;  $i$ ;  $\delta$  skizziert (a), darunter die nachgewiesene positive Rückführung, die die Astasierung physikalisch erklärt mit den neueingeführten Winkeln  $\bar{\gamma}$ ;  $\bar{\gamma}$ ;  $\bar{\delta}$ , die dieses Verständnis über die Darstellung von  $N^*$  vermitteln.

### 1.7. Die Konsequenz dieser Erkenntnisse

Die Aufdeckung der mechanischen Astasierung als positive Rückführung hat eine ganze Reihe von Konsequenzen für die Beurteilung vorliegender astasierter Seismographensysteme, für die Schaffung neuer, verbesserter Konfigurationen und für andere technische Schwin- ger vom gleichen oder ähnlichen physikalischen Typ wie Seismographen.

a) Jedes mechanisch astasierte Seismometer mit  $T_s > T_{s0}$  ist als ein geregeltes System mit positiver mechanischer Rückführung zu betrachten und dementsprechend in der Anwendung und Beurteilung zu behandeln.

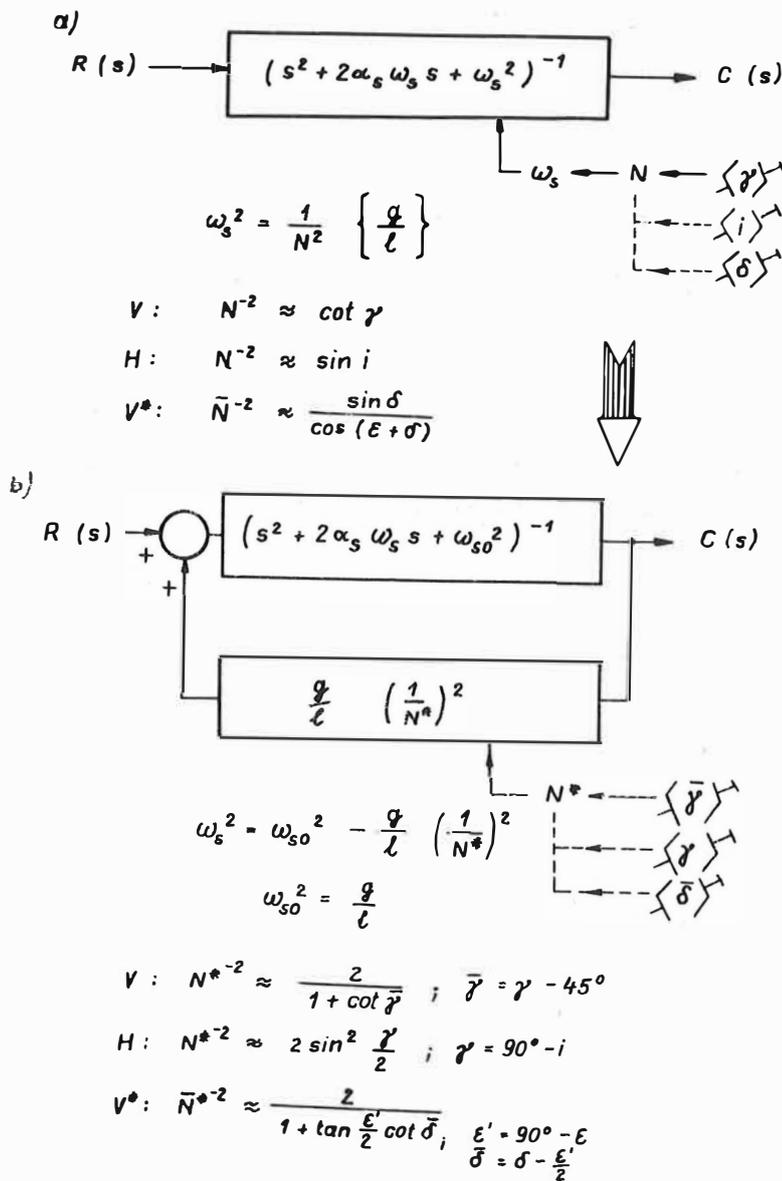


Abb. 16 Mechanische Astasierung als positive Rückführung

- b) Der Nachweis dieser mechanischen inneren Rückführung im astasierten Seismometer hebt den bisher kategorisch behaupteten Unterschied zwischen innerer mechanischer Astasierung und äußerer Rückführung am Seismometer auf. Insbesondere wird auch eine bisher vernachlässigte oder gar abgelehnte positive Rückführung im Seismographensystem zulässig, gestützt auf die guten Erfahrungen aus ca. 100 Jahren mit mechanisch hochastasierten Seismographen.
- c) Die Aufdeckung des Wesens der Astasierung geht einher mit der Aufspaltung der Astasierung in einen Grundterm und einen Astasierungsanteil in additiver Verknüpfung im Gegensatz zum üblichen Multiplikator bekannter Darstellungen astasierter Seismographen [21]. Darin legt der Grundterm die Anfangslinearität fest, die mit zunehmender Astasierung, je nach Wahl der konstruktiven Mittel, mehr oder weniger nichtlineare Zusätze erhält; bis hin zu einer gerade noch akzeptablen oberen Grenze der Astasierung für die Anwendung dieses Seismographentyps.
- d) Die Fortpflanzung von Nichtlinearitäten ist erstmalig in astasierten/rückgeführten Seismographensystemen nach Ermittlung des Grundterms für den Gesamtbereich der inneren und äußeren Rückführung exakt zu ermitteln; damit kann eine Ära der Spekulation beendet werden, in der Fachleute oft eine spezielle Rückführungskonfiguration als besonders vorteilhaft anpriesen.
- e) Die Nützlichkeit und Notwendigkeit von Rückführungen zur Periodenverlängerung, Periodenverkürzung (force balanced systems; direkte Rückführung; Kraftrückführung; elektrische Feder; Kompensationsseismograph) oder selektiver Periodenverkürzung (Langzeitstabilisierung) ist auf dem Hintergrund der positiven Rückführung mit ihren partiellen nichtlinearen Anteilen im mechanisch astasierten Seismographen zu beurteilen. Eine äußere lineare elektrische Rückführung am astasierten, d. h. positiv rückgeführten Seismographen zur Periodenverkürzung kann zwar einen Teil der inneren Astasierung kompensieren, jedoch nur bis auf den Grundterm (plus verbleibender Nichtlinearitäten) der ursprünglichen positiven Rückführung hin. Damit ist z. B. ein nichtastasierter, nichtgegekoppelter Seismograph mit einer geringen Eigenperiode und guter Linearität entsprechend dem Grundterm u. U. besser geeignet und linearer als z. B. ein "force-balanced-system" [43].
- f) Die Aufspaltung des Momentes und der Eigenfrequenz ( $\omega_B^2$ ) in einen Grundterm und einen Astasierungsterm zeigt schon an, in welcher Weise, evtl. vorteilhafter, die mechanische Astasierung in geregelten Seismographensystemen durch eine elektrische Rückführung abgelöst werden kann. Eine direkte Rückführung proportional der Verrückung zwischen Gestell und Gehänge (Seismometer-Ausschlag) leistet das nämliche, kann aber darüber hinaus noch den Vorteil bringen, daß der so erzeugte Astasierungsterm linearer ist als der ersetzte mechanische. So sind auch die Bemerkungen von JACOBY [14] zu werten, daß ein Seismograph mit einer durch positive Rückführung von 5 s auf 20 s verlängerten Eigenperiode eine dem Ausgangszustand vergleichbare gute Linearität auch in jenem langperiodischen Zustand hatte. Das war jedoch nur ein Ersatz der mechanischen Astasierung auf elektrischem Wege ohne sichtbare Vorteile und damals nicht voll akzeptiert. Jedoch läßt gerade die elektronische (auch hydraulische, pneumatische, ...) Astasierung die Anwendung der Varianten mit Filtern zu, die eine mechanische Astasierung nicht leisten kann, insbesondere die Beschränkung der Astasierung auf einen sinnvollen Nutzsinalbereich und die Trennung der Astasierung vom Einfluß der Langzeitstabilität durch Filter. Es wird erstmalig eine Bandbreitenvergrößerung nur im Signalbereich möglich, die **d y n a m i s c h e A s t a s i e r u n g** (Abb. 13).

- g) Der Grundgedanke der dynamischen Astasierung eines mechanischen Schwingers, insbesondere eines Seismometers, kann Vorbild für eine Vielzahl technischer Anwendungen bei ähnlichen Schwingern sein, die gleichen physikalischen Bedingungen genügen. Das betrifft auch Schwinger vom Typ mit verteilter Elastizität und verteilter Masse.

## 2. Der dynamisch astasierte Seismograph

### 2.1. Die genäherte Übertragungsfunktion der Konfiguration HP2 - HP1

Zur Untersuchung der Wirkung einer dynamischen Astasierung auf Seismographen berechnen wir die Übertragungsfunktion des geregelten Seismographen und versuchen Aussagen zur Parameterempfindlichkeit der Form der Kurve zu gewinnen. Mit  $V_1$  als gewandelte Spannung des Seismographen und  $Y$  als Eingangsgröße sowie  $F_2(s)$  als Übertragungsfunktion des Rückführungsfilters ist die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises [31]

$$(65) \quad \frac{V_1}{Y}(s) = \frac{k_1 s^2}{s^2 + 2\alpha_s \omega_s s + \omega_s^2 + k_1 k_2 k_3 k_4 F_2(s)}$$

Dabei sind die  $k_i$  die Verstärkungsfaktoren der einzelnen Stufen (Wandler, Filter, Anpassungsglieder, Rückführungseinrichtung). Der mechanische Empfänger des Seismographen ist als Hochpaß 2. Ordnung (HP2) angesetzt [30]. Entgegen den bekannten Lösungen [14, 24, 25, 31, 42, 48] für geregelte Seismographen wird für die dynamische Astasierung eine positive abgleichbare Rückführung - nur für einen interessierenden Frequenzbereich (Breitband-Betrieb) und mit Ausschluß sehr langperiodischer Vorgänge und quasistatischer Einflüsse von der Rückführung - im Regelkreis eingesetzt. Da das Interesse vorrangig der Erweiterung des langperiodischen Übertragungsbereiches dient, ist der Einsatz eines Hochpasses 1. Ordnung (HP1), also  $F_2(s)$ : HP1 mit

$$(66) \quad F_2(s) = \frac{s}{s + \omega_h}, \quad \omega_h \ll \omega_s$$

die einfachste Form der Realisierung einer dynamischen Astasierung, die untersucht wird. Aus (65) wird dann

$$(67) \quad R_G(s) = \frac{V_1}{Y}(s) = \frac{k_1 s^2}{s^2 + 2\alpha_s \omega_s s + \omega_s^2 + k \frac{s}{s + \omega_h}}$$

$k$  ist der Regelkreisfaktor, der für die positive Rückführung negativ gewählt ist. Auflösung von (67) ergibt

$$(68) \quad R_G(s) = k_1 \frac{s^3 + s^2 \omega_h}{s^3 + (2\alpha_s \omega_s + \omega_h) s^2 + (\omega_s^2 + 2\alpha_s \omega_s \omega_h + k) s + \omega_s^2 \omega_h}$$

Das ist die vollständige Übertragungsfunktion, die das Verhalten des mit dynamischer Astasierung versehenen Seismographen - oder eines ähnlichen mechanischen Schwingers - beschreibt. Formal ähnelt (67) dem Ausdruck für eine Regelkreis-Konfiguration zur aktiven Bedämpfung [24], jedoch ist dort  $\omega_h \gg \omega_s$  und es liegt negative Rückführung vor. Die Übertragungsfunktion dieses geregelten Systems im eingeschwungenen Zustand und für sinusförmige Signale ist dann wie üblich für  $s = j\omega$  berechenbar.

Es ist

$$(69) \quad R_G(j\omega) = k_1 \frac{-j\omega^3 - \omega^2 \omega_h}{-j\omega^3 - (2\alpha_s \omega_s + \omega_h)^2 + j\omega(\omega_s^2 + 2\alpha_s \omega_s \omega_h + k) + \omega_s^2 \omega_h}$$

und

$$(70) \quad R_G(j\omega) = k_1 \frac{-(\omega^2 \omega_h + j\omega^3)}{(\omega_s^2 \omega_h - 2\alpha_s \omega_s \omega^2 - \omega_h \omega^2) + j(\omega_s^2 \omega + 2\alpha_s \omega_s \omega_h + k\omega - \omega^3)}$$

Die Amplitudencharakteristik folgt aus dem Betrag

$$(71) \quad R_G(\omega) = |R_G(j\omega)|$$

zu

$$(72) \quad R_G(\omega) = k_1 \omega^2 \left\{ \frac{\omega_h^2 + \omega^2}{(\omega_s^2 \omega_h - 2\alpha_s \omega_s \omega^2 - \omega_h \omega^2)^2 + (\omega_s^2 + 2\alpha_s \omega_s \omega_h + k\omega - \omega^3)^2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Führen wir die Operationen im Nenner aus und sortieren nach Potenzen von  $\omega$ , so ist die volle Gleichung der Amplitudencharakteristik

$$(73) \quad R_G(\omega) = k_1 \omega^2 \left\{ \frac{\omega^2 + \omega_h^2}{\omega^6 + a_4 \omega^4 + a_2 \omega^2 + a_0} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$a_4 = 4\alpha_s^2 \omega_s^2 + \omega_h^2 - 2\omega_s^2 - 2k,$$

$$a_2 = 4\alpha_s^2 \omega_s^2 \omega_h^2 - 2\omega_s^2 \omega_h^2 + \omega_s^4 + k + 2k\omega_s^2 + 4\alpha_s \omega_s \omega_h k,$$

$$a_0 = \omega_s^4 \omega_h^2.$$

Man kann nun diese Charakteristik graphisch darstellen, dabei unterschiedliche Parameter  $\alpha_s$ ,  $\omega_s$ ,  $\omega_h$ ,  $k$  verwenden und sinnvolle Bemessungen für diese ermitteln. Das wird in 2.3. mittels Rechnermodellierung durchgeführt. Hier interessiert erst einmal das genäherte Verhalten des "periodenverlängerten" Seismographen. Wir wählen zu einer Näherung einen großen Abstand zwischen Seismometer und Rückführungsfiler. Es sei

$$0 < \omega_h \ll \omega_s$$

für

$$R_G(\omega) \rightarrow \tilde{R}_G(\omega),$$

mit

$$(74) \quad a_4 \rightarrow \bar{a}_4 = 4\alpha_s^2 \omega_s^2 - 2(\omega_s^2 + k),$$

$$a_2 \rightarrow \bar{a}_2 = (\omega_s^2 + k)^2,$$

$$a_0 \rightarrow 0, \quad \neq 0; \quad \text{vernachlässigt}$$

und damit

$$(75) \quad \tilde{R}_G(\omega) = k_1 \left\{ \frac{\omega^4}{\omega^4 + \bar{a}_4 \omega^2 + \bar{a}_2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

oder

$$(76) \quad \tilde{R}_G(v) = k_1 \left\{ \frac{v^2}{v^2 + \bar{a}_4 v + \bar{a}_2} \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad v = \omega^2.$$

Das ist die genäherte Gleichung des "neuen" Seismometers, biquadratisch in  $\omega$  mit der neuen erniedrigten Eigenfrequenz

$$(77) \quad \omega_s'^2 = \omega_s^2 + k = \omega_s^2 - \kappa; \quad \kappa = -k \geq 0,$$

$$\omega_s' = \sqrt{\omega_s^2 - \kappa}.$$

Das gilt im Rahmen der oben vereinbarten Näherungen.  $\tilde{R}_G(\omega)$  verhält sich an dieser neuen Eigenfrequenz ( $\omega = \omega_s'$ ) wie

$$(79) \quad \begin{aligned} \tilde{R}_G(\omega = \omega_s') &= k_1 \left\{ \frac{(\omega_s^2 - \kappa)^2}{(\omega_s^2 - \kappa)^2 + (\omega_s^2 - \kappa)(4\alpha_s^2 \omega_s^2 - 2\omega_s^2 + 2\kappa) + (\omega_s^2 - \kappa)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= k_1 \left\{ \frac{\omega_s^2 - \kappa}{4\alpha_s^2 \omega_s^2} \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ &= k_1 \left\{ \frac{1}{4\alpha_s^2} - \frac{\kappa}{4\alpha_s^2 \omega_s^2} \right\} \end{aligned}$$

oder unter Verwendung von

$$(80) \quad \frac{\sqrt{\omega_s^2 - \kappa}}{2\alpha_s \omega_s} = \frac{1}{2\omega_s} \frac{\alpha_s}{\sqrt{\omega_s^2 - \kappa}}$$

mit der "neuen" Dämpfung

$$(81) \quad \alpha_s' = \frac{\omega_s}{\sqrt{\omega_s^2 - \kappa}} \alpha_s = \frac{\omega_s}{\omega_s'} \alpha_s$$

wie

$$(82) \quad \tilde{R}_G(\omega = \omega_s') = k_1 \frac{1}{2\alpha_s'}.$$

Der Vergleich zum nichtrückgekoppelten Seismometer liefert den bekannten Wert

$$(83) \quad R(\omega_s) = \tilde{R}_G(\omega_s) \Big|_{\kappa=0} = k_1 \frac{1}{2\alpha_s}.$$

(79) kann man auch umschreiben in

$$(84) \quad \tilde{R}_G(\omega = \omega_s') = \frac{k_1}{2\alpha_s} \left\{ 1 - \frac{\kappa}{\omega_s^2} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad \kappa > 0,$$

$$\tilde{R}_G(\omega = \omega_s') = \frac{k_1}{2\alpha_s} \frac{\omega_s'}{\omega_s}, \quad \frac{\omega_s'}{\omega_s} < 1.$$

Damit ist  $\alpha'_s > \alpha_s$  im Rahmen der Näherung

$$(85) \quad \alpha'_s = N_{el} \alpha_s$$

mit dem elektronischen Periodenverlängerungsfaktor oder Astasierungsfaktor  $N_{el}$

$$(86) \quad N_{el} = \frac{\omega'_s}{\omega_s} = \frac{T'_s}{T_s} > 1.$$

(85) hat bez. der Dämpfung folgenden physikalischen Hintergrund. Beim Übergang von

$$(87) \quad \omega_s \rightarrow \omega'_s = \frac{1}{N_{el}} \omega_s < \omega_s$$

wirken infolge der verringerten Rückstellkräfte/-momente im Seismographen die für  $\omega_s$  bemessenen Dämpfungseinrichtungen bei  $\omega'_s$  ebenfalls proportional stärker entsprechend der Astasierung  $N_{el}$ ; im Geltungsrahmen der Näherung  $\omega_h \ll \omega_s$  und  $R_G(\omega) \rightarrow \tilde{R}_G(\omega; \omega_h \approx 0)$ . Da in der Praxis  $\omega_h$  niemals verschwindend klein ist und der HP1 der Rückführung relativ "rund" um  $\omega_h$  verläuft, bleibt ein Einfluß in der realen dynamischen Astasierung erhalten, der nur noch durch die Parametervariation in der Rechnermodellierung mit der vollen Übertragungsfunktion herauskommt. Das Verhalten des dynamisch astasierten ("Dynastie-") Seismographen weit oberhalb und unterhalb der Umgebung von  $\omega = \omega'_s$  läßt sich einfach abschätzen durch Näherung von (73).

Für schnelle Signale mit großem  $\omega$  ist

$$(88) \quad R_G(\omega > \omega_s) = k_1,$$

für sehr langwellige Vorgänge mit geringem  $\omega$  ist

$$(89) \quad R_G(\omega \ll \omega'_s) = k_1 \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2.$$

Während (88) anzeigt, daß für große  $\omega$  der Seismograph eine konstante Übertragung proportional der Eingangsverrückung der seismischen Masse hat - wir sehen dabei von den realiter vorhandenen Resonanzstellen aus der technischen Realisierung des mechanischen Empfängers ab, die eine obere  $\omega$ -Grenze darstellen - so zeigt (89), daß für Langzeitvorgänge keine Astasierung mehr vorliegt und damit der dynamisch astasierte Seismograph eine so gute Langzeitstabilität, geringe Neigungsempfindlichkeit bzw. einen so geringen Temperaturkoeffizienten hat, wie der nichtastasierte mechanische Seismograph der Eigenperiode  $\omega_s$ . Die übliche Erhöhung der Empfindlichkeiten gegenüber diesen erwähnten Störgrößen erfolgt nur im relevanten Signalbereich der dynamischen Astasierung. Dementsprechend sind dafür die Installationsbedingungen besser zu realisieren [42, 43].

## 2.2. Abschätzungen zur Stabilität

Wir gehen aus von der komplexen Übertragungsfunktion (68)

$$R_G(s) = k_1 \frac{s^3 + s^2 \omega_h}{s^3 + (2\alpha_s \omega_s + \omega_h) s^2 + (\omega_s^2 + 2\alpha_s \omega_s \omega_h - \kappa) s + \omega_s^2 \omega_h}.$$

Zur Überprüfung der Stabilität dieses geregelten Systems nehmen wir das Kriterium von HURWITZ in der Fassung von GÖLDNER [10]: "Ein System mit der charakteristischen Gleichung

$$N_*(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$$

ist (dann und nur dann) stabil, wenn sämtliche Koeffizienten  $a_k$  vorhanden sind und gleiches (als positiv angenommenes) Vorzeichen haben und außerdem folgende Determinanten positiv sind:

$$(90) \quad D_1 = a_1 > 0, \quad D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0, \quad D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0 \dots$$

(insgesamt  $n$  Determinanten)." Wenn wir das auf (68) anwenden ( $N_*(s)$  = Nennerpolynom), so erhalten wir die Forderungen

$$(91) \quad a_0 = \omega_S^2 \omega_h > 0, \quad a_1 = \omega_S^2 + 2\alpha_S \omega_S \omega_h - \kappa > 0, \\ a_2 = 2\alpha_S \omega_S + \omega_h > 0, \quad a_3 = 1 > 0.$$

Mit  $\omega_h > 0$  liegt die Existenz aller  $a_k$  vor. Die Forderung  $a_k > 0$  überträgt sich auf  $a_1$ , für  $a_0, a_2, a_3$  ist sie erfüllt.

$$(92) \quad a_1 \stackrel{!}{>} 0, \\ \surd \omega_S^2 + 2\alpha_S \omega_S \omega_h - \kappa > 0, \\ \kappa < \omega_S^2 + 2\alpha_S \omega_S \omega_h.$$

Das ist die Stabilitätsbedingung für die dynamische Astasierung mit HP1. Sie ist etwas "weicher" als die Forderung  $\kappa < \omega_S^2$  aus der direkten Rückführung ohne Filter. Die gleichzeitige Forderung

$$(93) \quad D_1 \dots D_3 > 0$$

ergibt

$$(94) \quad D_1 = a_1 > 0, \\ D_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 = (\omega_S^2 + 2\alpha_S \omega_S \omega_h - \kappa)(2\alpha_S \omega_S + \omega_h) - \omega_S^2 \omega_h > 0, \\ D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 D_2 > 0$$

$D_1 = a_1 > 0$  ist erfüllt durch die Beschränkung von  $\kappa$  durch (92).  $D_3$  führt auf  $D_2 > 0$ . Das ergibt in der Auflösung von (94) die Forderung

$$(95) \quad 2\alpha_S \omega_S (\omega_S^2 + \omega_h [2\alpha_S \omega_S + \omega_h]) - \kappa (2\alpha_S \omega_S + \omega_h) > 0.$$

Sortieren nach  $\kappa$  ergibt

$$(96) \quad \kappa < \frac{2\alpha_S \omega_S^3}{2\alpha_S \omega_S + \omega_h} + 2\alpha_S \omega_S \omega_h$$

und mit der Umformung

$$\frac{2\alpha_S \omega_S}{2\alpha_S \omega_S + \omega_h} \omega_S^2 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S}} \omega_S^2$$

lautet die obige Stabilitätsforderung

$$(97) \quad \kappa < \frac{1}{1 + \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S}} \omega_S^2 + 2\alpha_S \omega_S \omega_h .$$

Das ist eine leicht verschärfte Forderung gegenüber (92), die aber für kleines  $\omega_h$  und Vernachlässigung des entsprechenden Terms im Nenner in diese übergeht. Die Stabilitätsforderung (96) aus der Forderung  $D_2 > 0$  wollen wir zur Einhaltung eines genügend großen Abstandes zum Stabilitätsrand bzw. zur Ableitung von Dimensionierungshilfen noch durch Näherung im Sinne einer Verschärfung vereinfachen. Es ist offensichtlich

$$\kappa < \frac{1}{1 + \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S}} \omega_S^2 + 2\alpha_S \omega_S \omega_h \frac{1}{1 + \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S}} \omega_S^2 .$$

Also ist eine schärfere Forderung für den Regelkreisfaktor

$$(98) \quad \kappa < \frac{1}{1 + \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S}} \omega_S^2 .$$

Mit den Beziehungen für eine Näherung im Nenner

$$(99) \quad \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S} < \frac{\omega_S}{2\alpha_S \omega_S} = \frac{1}{2\alpha_S} ; \quad \omega_h < \omega_S$$

$$\frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S} < \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_h} = \frac{1}{2\alpha_S}$$

ist also eine verschärfte Stabilitätsforderung, die nun durch die Verschärfung von  $\omega_h$  unabhängig geworden ist,

$$(100) \quad \kappa < \frac{1}{1 + \frac{1}{2\alpha_S}} \omega_S^2 .$$

Andererseits läßt sich aber auch, wenn die Wahl eines passenden  $\kappa$  für stabilen Betrieb getroffen ist, ein Hinweis für die Wahl von  $\omega_h$  ableiten. Umstellung von (98) ergibt mit

$$1 + \frac{\omega_h}{2\alpha_S \omega_S} < \frac{\omega_S^2}{\kappa}$$

den Dimensionierungshinweis, bei stabilem Betrieb, für  $\omega_h$

$$(101) \quad \omega_h < \frac{2\alpha_S \omega_S}{\kappa} (\omega_S^2 - \kappa) .$$

Das ist natürlich keine weitere unabhängige Stabilitätsforderung, aber ein Hinweis für die Parameterwahl. Es ergibt sich, wie zu erwarten, daß  $\omega_h$  mit wachsender dynamischer Astasierung, bei der  $\kappa$  steigt und  $(\omega_S^2 - \kappa)$  fällt, auch kleiner zu wählen ist. Es ist gegenüber der neuen Frequenz  $\omega_S'$  immer ein gehöriger Abstand für  $\omega_h$  zu wahren. Das

zeigt sich dann auch in den auf einem Rechner modellierten Übertragungscharakteristiken bei Änderung der Regelkreisparameter (2.3.).

Die Abschätzung für ein günstiges  $\omega_h$  in einer technischen Realisierung nach der Pol-Nullstellen-Methode liefert einen  $\omega_h$ -Wert, der hinreichend dafür ist, daß das geregelte System stabil ist. Wie FÖLLINGER [7] ausführt, ist er aber nicht notwendig für die Stabilität. Da er für die technische Realisierung sehr extreme Werte hat (d. h. sehr große Zeitkonstanten im Rückführungsfiler), bleibt er hier für die Filterdimensionierung unbeachtet. Ein praktikabler Abstand von  $\omega_h$  zu  $\omega_s'$  wird hauptsächlich aus der Modellierung des Systems auf einem Rechner abgeleitet.

### 2.3. Untersuchung der Parametereinflüsse in der vollen Übertragungsfunktion mittels Rechnermodellierung

Um Hinweise für die sinnvolle Wahl der Parameter der dynamischen Astasierung mit HP1 in der Rückführung zu bekommen und evtl. quasi "optimale" Sätze von Parametern ( $\omega_h$ ,  $\alpha_s$ ,  $\kappa$ ) für geforderte Astasierungsgrade zu ermitteln, wurde die Übertragungscharakteristik mit wechselnden Parametern auf einem Rechner modelliert. Es wurde dabei die volle Amplitudencharakteristik (72) zugrunde gelegt. Die Zahlenausdrücke wurden in Kurven umgezeichnet, diese ausgewertet und für den nächsten Simulationsschritt auf dem Rechner bez. der Parametervariation spezifiziert. Gleichung (72) wird für die Diskussion durch  $\kappa_1 \equiv 1$  normiert und außerdem dimensionslos gemacht ( $R_G(\omega) \rightarrow \bar{R}_G(\varrho)$ ;  $a_i \rightarrow \alpha_i$ ):

$$(102) \quad \bar{R}_G(\varrho) = \varrho \left\{ \frac{\varrho + \beta_0}{\varrho^3 + \alpha_4 \varrho^2 + \alpha_2 \varrho + \alpha_0} \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad \varrho = \left( \frac{\omega}{\omega_s} \right)^2,$$

$$\alpha_4 = 4\alpha_s^2 + \left( \frac{\omega_h}{\omega_s} \right)^2 - 2\left(1 - \frac{\kappa}{2}\right),$$

$$\alpha_2 = 4\alpha_s^2 \left( \frac{\omega_h}{\omega_s} \right)^2 - 4\alpha_s \left( \frac{\omega_h}{\omega_s} \right) \left( \frac{\kappa}{2} \right) + \left( \frac{\kappa}{2} \right)^2 - 2\left( \frac{\omega_h}{\omega_s} \right)^2 + 1 - 2 \frac{\kappa}{\omega_s^2},$$

$$\alpha_0 \equiv \beta_0 = \left( \frac{\omega_h}{\omega_s} \right)^2.$$

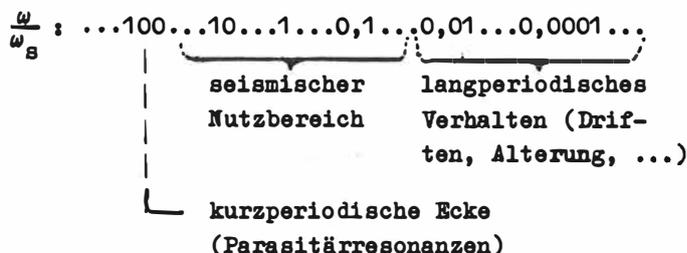
Das erlaubt die Einführung eines dimensionslosen Parameter-Satzes ( $\alpha_s, \beta, \gamma$ ) mit der Bedeutung:  $\alpha_s$ : Anfangsdämpfung des ungeredelten Seismographen,

$\beta = \frac{\omega_h}{\omega_s}$ : Abstand Filter/Seismometer,

$\gamma = \frac{\kappa}{2}$ : Stärke der Rückführung

Variable:  $\varrho = \left( \frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 \sim \bar{R}_G$  unabhängig vom aktuellen  $\omega_s$ .

Folgender Wertebereich ist relevant:



Kurzgefaßte Aufgabe: Berechnung von  $\bar{R}_G(\varrho)$  für obigen Wertebereich für variierte Parametersätze  $(\alpha_B, \beta, \gamma)$  von vorgegebenen interessanten Fällen einer dynamischen Astasierung ausführen; Ergebnisse darstellen; Ergebnisse diskutieren; schrittweise durch Spezifizierung nützliche Parametersätze ermitteln. Im ersten Rechengang wurden Kurven  $R_G(\varrho)$  für alle Kombinationen aus den Parameterbereichen

$\alpha_B$ :	0,01 ... 0,7	(16 Abstufungen)
$\beta$ :	0,001 ... 0,5	(10 Abstufungen)
$\gamma$ :	0,1 ... 0,96	(15 Abstufungen)

berechnet (2400 Fälle, Zahlenausdrucke). Die Auswertung und Darstellung als Kurven ergab zweifelsfrei die Aussage, daß mit wachsender Stärke  $\gamma$  der Rückführung - innerhalb des Stabilitätsbereiches - eine gewünschte Periodenverlängerung stattfindet, die Übertragungskurven mit  $\omega_B^i < \omega_B$  ergibt, die flach bis gering gewellt sind, wenn der Abstand von  $\omega_h$  zu  $\omega_B$  groß genug ist (kleine  $\beta$ -Werte). Die Darstellung von fünf entsprechenden periodenverlängerten Übertragungskurven zeigt Abb. 17. Die Stelle  $\frac{\omega}{\omega_B^i}$  wurde als -3db-Stelle gegenüber dem normierten Niveau aus der jeweiligen Kurve (1 - 5) ermittelt. Erwartet wird nach (77) und (86) eine Verringerung von  $\omega_B$  auf  $\omega_B^i$  von

$$(103) \quad N_{el} = (1 - \gamma)^{-\frac{1}{2}}; \quad 1 > \gamma \geq 0.$$

Dieser rechnerische Wert wurde dem ermittelten aus der HP1-Rückführung  $N_{dyn}$  aus den Kurven gegenübergestellt.

Variation:	$\alpha_B$	$\beta$	$< \gamma >$
	0,2	0,01	variabel
Kurven:	1 = 0,960	$N_{el} = 5,0$	/ $N_{dyn} = 7,14$
	2 = 0,950	$N_{el} = 4,55$	/ $N_{dyn} = 6,67$
	3 = 0,940	$N_{el} = 4,0$	/ $N_{dyn} = 6,25$
	4 = 0,920	$N_{el} = 3,57$	/ $N_{dyn} = 5,26$
	5 = 0,900	$N_{el} = 3,13$	/ $N_{dyn} = 4,35$

In diesem Kurvensatz erweist sich Nr. 4 mit

$$N_{dyn} \approx 5; \quad \alpha_B = 0,2, \quad \beta = 0,01, \quad \gamma = 0,920$$

als eine optimal flache Kurve, wie sie als Übertragungskurve für Seismographen gewünscht wird.

Für das Langzeitverhalten ergibt sich ein Einschwenken der periodenverlängerten Kurve für kleine Werte  $\frac{\omega}{\omega_B}$ . Etwa in der Größenordnung von  $\frac{\omega}{\omega_B} \approx \frac{\omega_h}{\omega_B}$ , also bei der Zeitkonstante der HP1-Rückführung, ist die entzerrte Kurve wieder auf die des nichtgeredelten

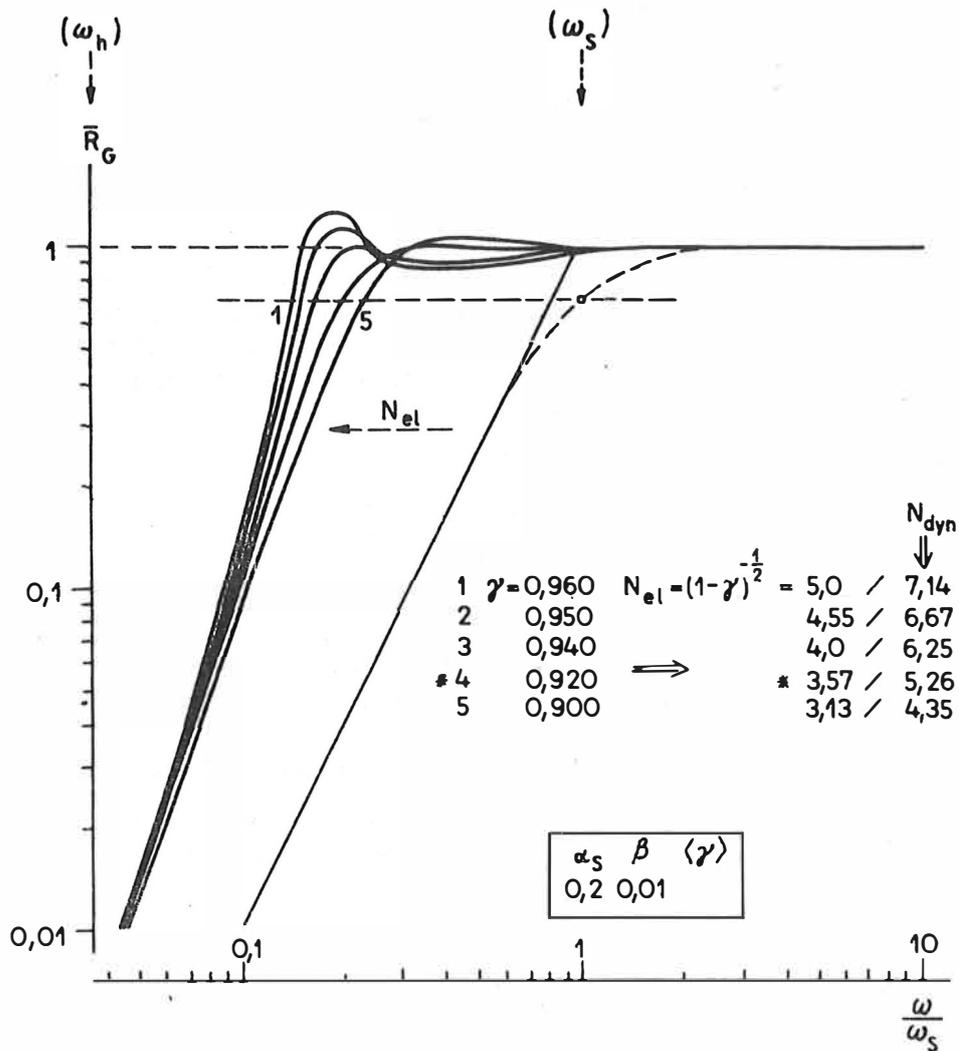


Abb. 17 Übertragungskurven  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_S})$  für verschiedene Stärken  $\gamma$  der Rückführung in der dynamischen Astasierung mit HP1.

Seismographen eingeschwenkt. Damit liegt für  $\omega \lesssim \omega_h$  die ursprüngliche, im allgemeinen zufriedenstellende, Langzeitstabilität gegenüber nichtseismischen Einflüssen vor [47]. Das Ergebnis des ersten Rechenganges ist folgendes:

- a) Es ergibt sich die erwartete  $\omega_S$ -Erniedrigung durch die vorgeschlagene dynamische Astasierung mit dem Astasierungsfaktor  $N_{dyn}$  zu  $\omega'_S = N_{dyn}^{-1} \omega_S$  für den Bereich  $N_{dyn} \approx 4 \dots 7$ .
- b) Gegenüber dem rechnerischen Astasierungsfaktor  $N_{el}$  ist  $N_{dyn}$  bei der HP1-Rückführung vorteilhaft größer:

$$N_{dyn} \approx 1,5 N_{el} = 1,5(1 - \gamma)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{im Bereich} \quad 4 \leq N_{dyn} \leq 7.$$

- c) Der Abstand von  $\omega_h$  zu  $\omega_B$ ,  $\omega_B'$  ist nach Abb. 17 offensichtlich genügend groß zu wählen ( $\beta \leq 0,01$ ). Größere  $\beta$ -Werte führen nach den Rechnungen zu Resonanzen in der Umgebung von  $\omega_B'$ .
- d) Mit wachsendem  $\gamma$  entsteht bei  $\omega_B'$  eine Resonanzspitze.
- 4) Es ergeben sich Anzeichen dafür, daß mit größer gewählter Anfangsdämpfung  $\alpha_B$  diese Resonanzspitze bei  $\omega_B'$  herabzudrücken ist.

Zur Erlangung größerer Klarheit über die Parametereinflüsse sind aber weitere Modellfälle in einer gewissen Variationsbreite von  $(\alpha_B, \beta, \gamma)$  nötig.

Eine zweite Berechnung erfaßte die Parameterbereiche (1848 Kurven)

$$\alpha_B : 0,2; 0,25 \dots 0,65; 0,7 \quad (11 \text{ Stufen})$$

$$\beta : 0,01; 0,02 \dots 0,3; 0,35 \quad (14 \text{ Stufen})$$

$$\gamma : 0,900; 0,920 \dots 0,985; 0,990 \quad (12 \text{ Stufen})$$

aus denen Hinweise für offenbar günstige Parametersätze zu entnehmen waren und denen in einer dritten Berechnung mit den Fällen

$$\alpha_B : 0,20; 0,25 \dots 0,65; 0,70 \quad (11 \text{ Stufen})$$

$$\beta : 0,010; 0,009 \dots 0,004 \quad (6 \text{ Stufen})$$

$$\gamma : 0,900; 0,920 \dots 0,985; 0,990 \quad (12 \text{ Stufen})$$

gezielt nachgegangen wurde (792 Kurven). Die erhaltenen Kurven  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_B})$  wurden unter dem Gesichtspunkt flach bzw. wellig durchgesehen und ihr festgestellter Verlauf entsprechend indiziert sowie in Abb. 18 als Abhängigkeit  $\gamma(\beta)$  dargestellt. Die Abb. 18 ist als eine Entscheidungshilfe zur Suche nach flachen Übertragungskurven bei der Anwendung von dynamischer Astasierung im Bereich  $N_{el} \approx 3,5 \dots 5,8$  zu sehen. Dabei durchläuft  $\gamma = 0,920 \dots 0,990$  bei  $\alpha_B = 0,2$ ; fest und  $\beta = 0,004 \dots 0,01$  als Bereich.  $N_{el}$  ist als zweite Skala zur Erläuterung hinzugefügt.

Folgende Indizierung wurde in Abb. 18 für die Fälle als Bewertung gewählt: + flach, . optimal flach bzw. letzte flache Kurve, (-) geringe Welligkeit, ⊖ wellig ... (resonant), (.) Sattel-Charakter. Die zwischen + und ⊖ durch die Punkte der optimal flachen Kurve I gezogene Grenzlinie gibt im Groben und für die Parameterauswahl, z. B. in  $\gamma$  begrenzt, eine Teilung in die Gebiete "flach" und "wellig". Unterhalb der Kurve I liegen  $(\gamma, \beta, \alpha_B)$ -Tripel, die flache Übertragungskurven erzeugen. Oberhalb der Kurve I weisen die erzeugten Übertragungskurven in ihrem Verlauf Welligkeiten auf bis hin zu resonanten Fällen. Um hier noch eine Stabilitätskurve in die  $\gamma(\beta)$ -Beziehung einzubauen, wurde die Abschätzung (101) für  $\omega_h$  aus dem HURWITZ-Kriterium weiter umgeformt. Es wird gefordert (101)

$$\omega_h < \frac{2\alpha_B \omega_B}{\kappa} (\omega_B^2 - \kappa)$$

und es sei durch die Erfüllung von

$$(104) \quad \kappa < \omega_B^2$$

Stabilität vorhanden. (101) läßt sich verschärfen, wenn die rechte Seite verkleinert wird:

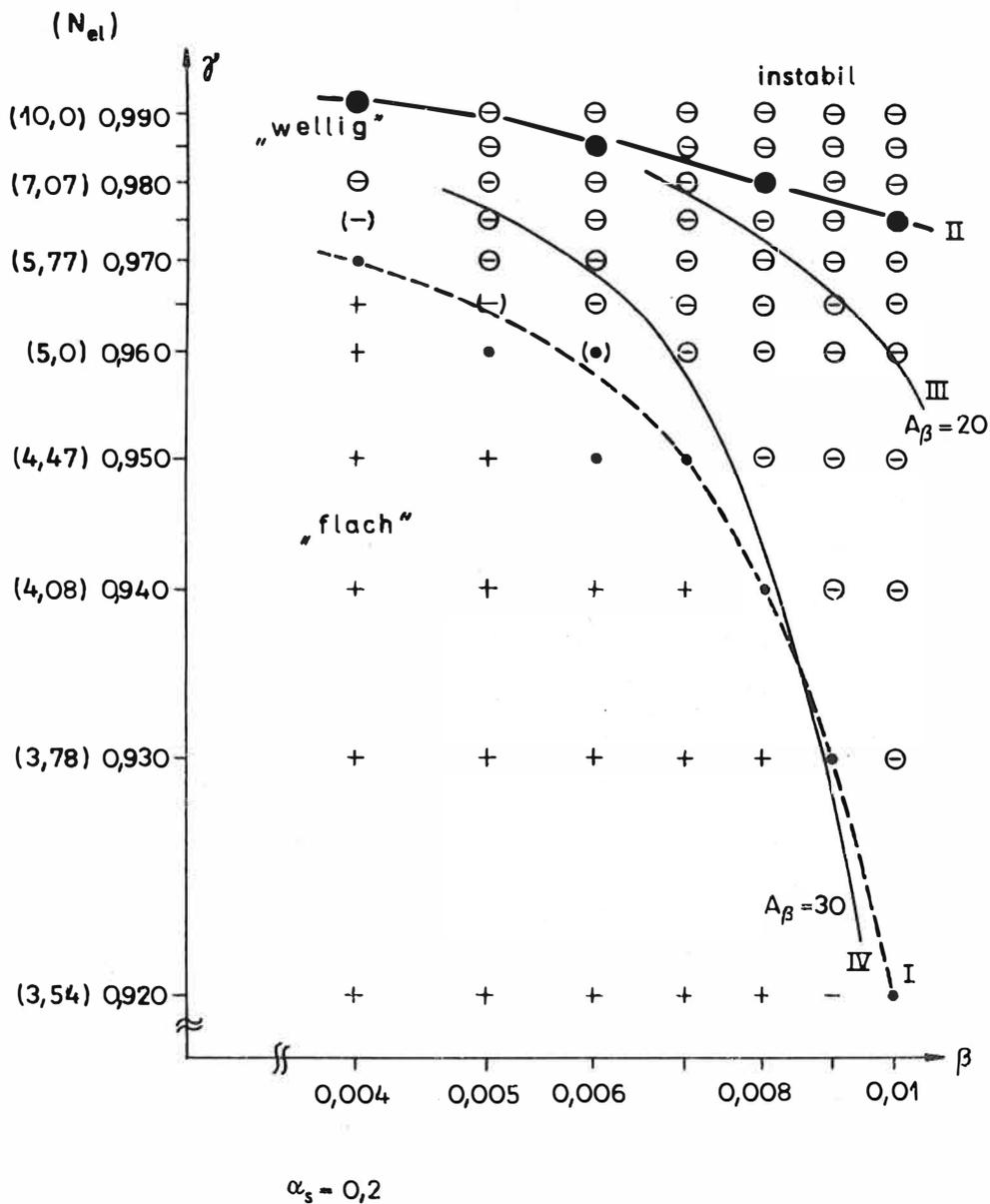


Abb. 18 Wahl eines Abstandes zwischen  $\omega_h$  und  $\omega_s$  für geforderte Astasierungen  $N_{el}$  für glatte (+) bzw. wellige (○) Übertragungskurven der dynamischen HP1-Astasierung

$$(105) \quad \omega_h < \frac{2\alpha_s \omega_s}{\kappa} (\omega_s^2 - \kappa) = \frac{2\alpha_s \omega_s}{\kappa} \omega_s'^2 = \frac{2\alpha_s \omega_s^3}{N^2 \kappa} > \frac{2\alpha_s \omega_s}{N^2}.$$

Wir fordern also in Verschärfung von (101)

$$(106) \quad \omega_h < \frac{2\alpha_s \omega_s}{N^2} = \frac{2\alpha_s}{N} \omega_s'$$

und

$$(107) \quad \beta \equiv \frac{\omega_h}{\omega_s} < \frac{2\alpha_s}{N}.$$

Führen wir einen Abstand  $A_\beta$  zwischen  $\omega_s'$  und  $\omega_h$  als Dimensionierungshilfe ein, mit

$$(108) \quad A_\beta = \frac{\omega_s'}{\omega_h},$$

so wollen wir fordern aus (106)

$$(109) \quad A_\beta > \frac{N}{2\alpha_s}.$$

In Abb. 18 ist (107) als Kurve II eingezeichnet und gilt im Rahmen der Abschätzungen als zulässige Aussage für den Stabilitätsrand. Alle  $\gamma, \beta$ -Werte unterhalb von Kurve II sind zulässig; unterhalb von Kurve I erhält man Übertragungskurven ohne Welligkeit. Für ein gewähltes  $\gamma$  in Abb. 18 erhält man nach (107) und (109) die Grenzwerte (Kurve II):

$$\begin{array}{lll} \gamma & : & 0,920 \dots 0,990 & \beta & < & 0,032 \dots 0,01 \\ N_{el} & : & 3,54 \dots 10 & A_\beta & < & 8,9 \dots 20,4 ; & \alpha_s & = & 0,2 \end{array}$$

Da wir als Orientierung Werte  $N_{el} \approx 5$  anstreben, werden wir nach der Vorstellung und Diskussion weiterer Übertragungskurven aus der weitergeführten Modellierung einen Richtwert für  $A_\beta$  vorschlagen (Kurven III, IV) und dazu Beispiele von Übertragungskurven zeigen.

In den folgenden Abbildungen sind zur Auswahl passender  $\bar{U}$ -Kurven der dynamischen Astasierung unterschiedliche Parametervariationen, z. B.  $\langle \alpha_s \rangle$  - variabel,  $\beta$  - fest,  $\gamma$  - fest, dargestellt. In Abb. 19 sind Kurven mit unterschiedlichem  $\alpha_s$  für ein hinreichend kleines  $\beta = 0,01$ , passend zu einem  $\gamma = 0,920$  - entsprechend einem  $N_{dyn} \approx 5$  bei flachem Verlauf ohne Resonanzstelle bei  $\frac{\omega_s'}{\omega_s}$  - gezeigt. Für  $\alpha_s = 0,2$  ist die Kurve (1) optimal flach. Bei Erhöhung der Ausgangsdämpfung  $\alpha_s$  von  $0,25 \dots 0,7$  (Kurven 2  $\dots$  7) wird die Kurve ebenso wie die eines nicht geregelten Seismographen gedrückt; bei noch höheren Dämpfungen ( $\alpha_s > 0,7$ ) ist auch ein geschwindigkeitsproportionaler Verlauf für  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_s})$  möglich, angedeutet durch eine gestrichelte Gerade mit dem Anstieg (+1). Für  $\frac{\omega}{\omega_s} < 0,05$  treffen sich die Kurven wieder; bei  $\frac{\omega}{\omega_s} \approx 0,1$  deutet sich eine gewisse Unregelmäßigkeit des Verlaufes an, die damit ein zweites Extremum andeutet. Der Zusammenhang zwischen einem solchen Extremwert und dem Anfangs- $\alpha_s$  war dabei nicht ohne weiteres nachzuweisen. So wurden die in den Rechnungen enthaltenen aussagefähigen Parametersätze als weitere Kurven dargestellt; dabei war außerdem der  $\beta$ -Einfluß von Interesse. Mit einem  $\gamma$ -Wert von  $\gamma = 0,960$  ( $N_{dyn} \approx 8$ ) wurde mit  $\alpha_s = 0,2$  der  $\beta$ -Wert variiert. Es erweist sich, daß in dem Maße, wie  $\beta$  an  $\frac{\omega_s'}{\omega_s}$  heranrückt, d. h.,  $\omega_h$  sich  $\omega_s'$  nähert,

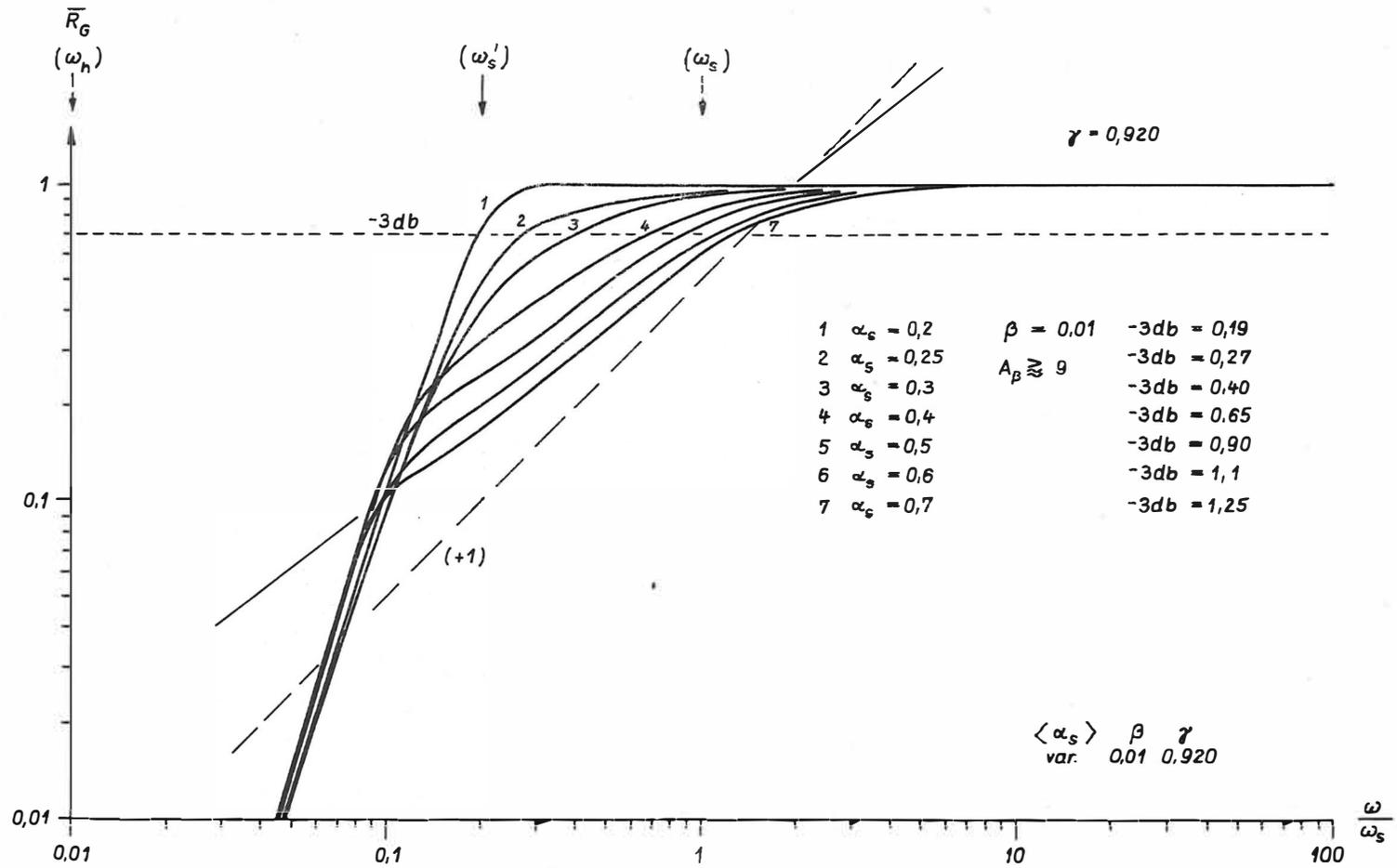


Abb. 19 Übertragungskurven mit  $N_{dyn} \approx 5$ ,  $A_\beta \approx 9$  bei unterschiedlicher Anfangsdämpfung  $\alpha_s$

die Kurve  $\bar{R}_G$  in der Nähe von  $\frac{\omega'_B}{\omega_B}$  resonant wird. Das weist auf den notwendigen Mindestabstand zwischen  $\omega_h$  und  $\omega'_B$  hin und auch darauf, mit dem noch verfügbaren  $\alpha_B$  diesen Extremwert (Resonanzstelle) eventuell zu bedämpfen (Abb. 20). Das ist in den Abbildungen 21 ... 25 zur Diskussion unterbreitet. In Abb. 21 ist für  $\gamma = 0,960$  eine etwas größere Anfangsdämpfung  $\alpha_B = 0,25$  gewählt. Die Aussage gleicht der in Abb. 20. Das Extremum ist nicht zu beseitigen; nur ab  $\frac{\omega}{\omega_B} = 1$  fällt  $\bar{R}_G$  schneller ab. Das ist in Abb. 22 mit  $\alpha_B = 0,5$ , in Abb. 23 mit  $\alpha_B = 0,7$  weiter untersucht. Die Lage des Extremwertes bleibt erhalten in der Nähe von  $\omega'_B$ , liegt jedoch mit höherem  $\alpha_B$  weiter unten auf der Flanke von  $\bar{R}_G$  in Richtung kleinerer  $\frac{\omega}{\omega_B}$ -Werte und ist umso schwächer ausgeprägt, je weiter  $\omega_h$  von  $\omega'_B$  entfernt, d. h., umso kleiner  $\beta$  ist. Die starke Bedämpfung von  $\bar{R}_G$  erlaubt somit auch hier die Erzeugung eines hinreichend langen Kurventeils mit einer Steigung (+1), wie er mitunter für Meßaufgaben im langperiodischen Teil (kleine  $\omega$ -Werte) erwünscht ist. In Abb. 23 verläuft er etwa bis  $\omega'_B \approx \frac{1}{10} \omega_B$ . Für eine mäßig starke Rückführung mit  $\gamma = 0,930$  ist mit einem  $\beta = 0,01$  bei einem  $N_{dyn} \approx 6$  für  $\alpha_B = 0,2 \dots 0,7$  eine Kurvenschar zu erhalten (Abb. 24) deren einzelne Kurven flach und kaum resonant verlaufen.  $\beta = 0,01$  ist für  $\gamma = 0,930$  offensichtlich günstig gewählt. Für  $\gamma = 0,960$  (Abb. 25) ergeben sich bei  $\beta = 0,004$  im Vergleich mit den Forderungen aus Abb. 18 (realisierbares  $\gamma$  bei gewähltem  $\beta$ ) ebenso noch akzeptable Übertragungskurven, die nur bei starker Dämpfung  $\alpha_B$  in der Nähe von  $\frac{\omega}{\omega_B} = 1$  einen Sattelpunkt aufweisen. Würde man  $\gamma$  hierbei noch weiter vergrößern, und  $\beta$  nicht wesentlich verkleinern, so würde dort ein Extremwert auftreten. Das könnte man für spezielle, seismologisch interessante, Übertragungskurven [2] unter Nutzung einer dynamischen Astasierung anwenden.

Die Auswertung der Rechenergebnisse, von denen die Kurven der hier diskutierten Fälle nur Teilresultate sind, bringt für die HP1-Rückführung mit ihrer geringen Flankensteilheit in der Trennung seismischer von nichtseismischen Signalen eine weitere Dimensionierungshilfe. Es ist hiernach die Wahl

$$(110) \quad \omega_h < \frac{1}{20} \omega'_B$$

für eine flache periodenverlängerte Kurve sinnvoll und auch bei der HP1-Rückführung notwendig. Die Kurven  $\gamma(\beta)$  für Abstände  $A_\beta = \frac{\omega_h}{\omega'_B} = 20; 30$  sind in Abb. 18 (III, IV) ergänzend eingezeichnet und vervollständigen die Hinweise für eine  $\beta$ -Wahl. Somit ergibt die 3. Berechnung Hinweise über die " $\beta$ -Wirkung" und die Vermeidung eines Extremums. Eine grob durchgeführte lineare Interpolation zwischen den ausgeführten Fällen weist auf "optimale" Parametersätze bei gewähltem  $\gamma$  (d. h. gefordertem  $N_{dyn}$ ) hin. Damit wurde in der weiteren Modellierung gearbeitet. Abb. 26 zeigt als Ausschnitt vier Kurvenscharen mit ausgewählten Parametersätzen ( $\alpha_B, \beta, \gamma$ ) für Astasierungsgrade  $N_{dyn} \approx 4 \dots 6$ . Es sind darin stets passende Übertragungskurven mit einem dynamisch verringerten  $\omega'_B$  zu finden. Zu beachten sind die Grenzen und Richtwerte für  $\beta$  bei der HP1-Rückführung aus Abb. 18, und es ist einzukalkulieren, daß die Anfangsdämpfung  $\alpha_B$  analog dem nichtgeregelten Fall wirkt und zur Erzeugung spezieller Übertragungskurven eingesetzt werden kann.

Aus der Gesamtheit der ausgeführten Modellierungsfälle ergibt sich als Resultat: Es sind Sätze hinreichend flacher Übertragungskurven für Astasierungsgrade  $N_{dyn} \approx 5 \dots (10)$  aus diesen ( $\alpha, \beta, \gamma$ )-Kombinationen selektierbar. Von diesen sind in Abb. 27

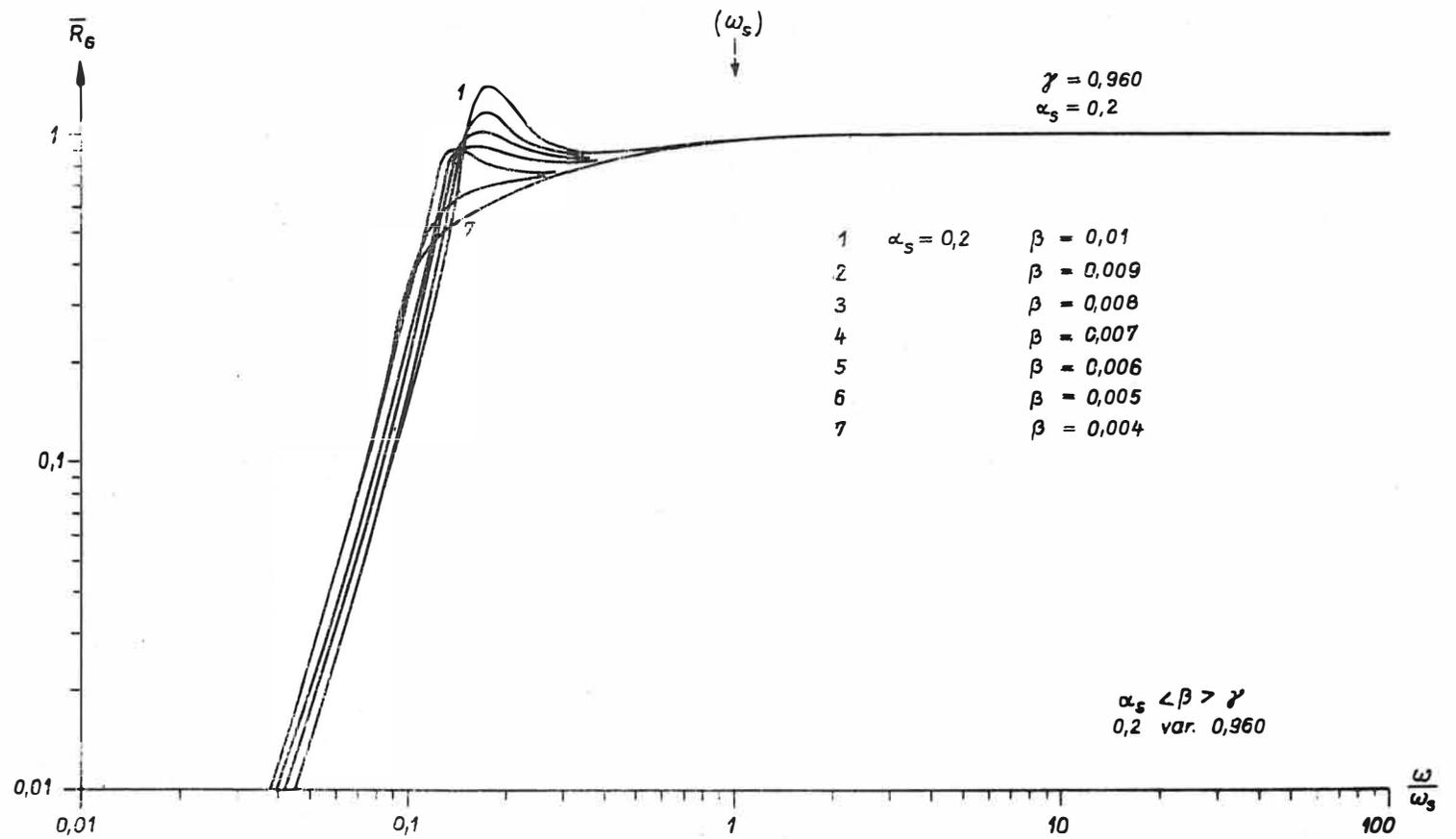


Abb. 20 Einfluß von  $\beta$  auf das Überschwingen der Übertragungskurve bei  $\omega'_s$ . Anfangsdämpfung  $\alpha_s = 0,2$

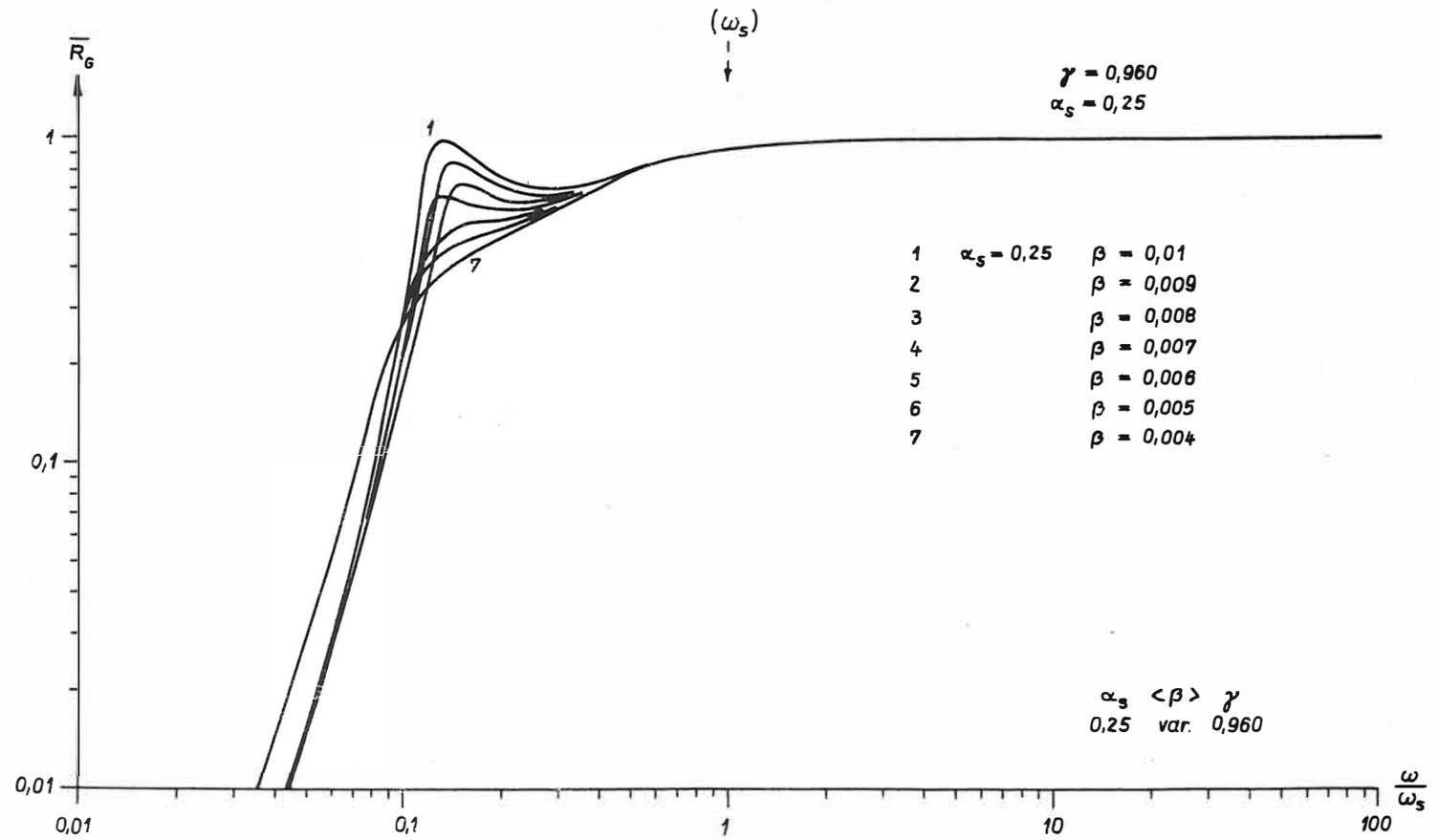


Abb. 21 Übertragungskurven bei einer Anfangsdämpfung  $\alpha_s = 0,25$

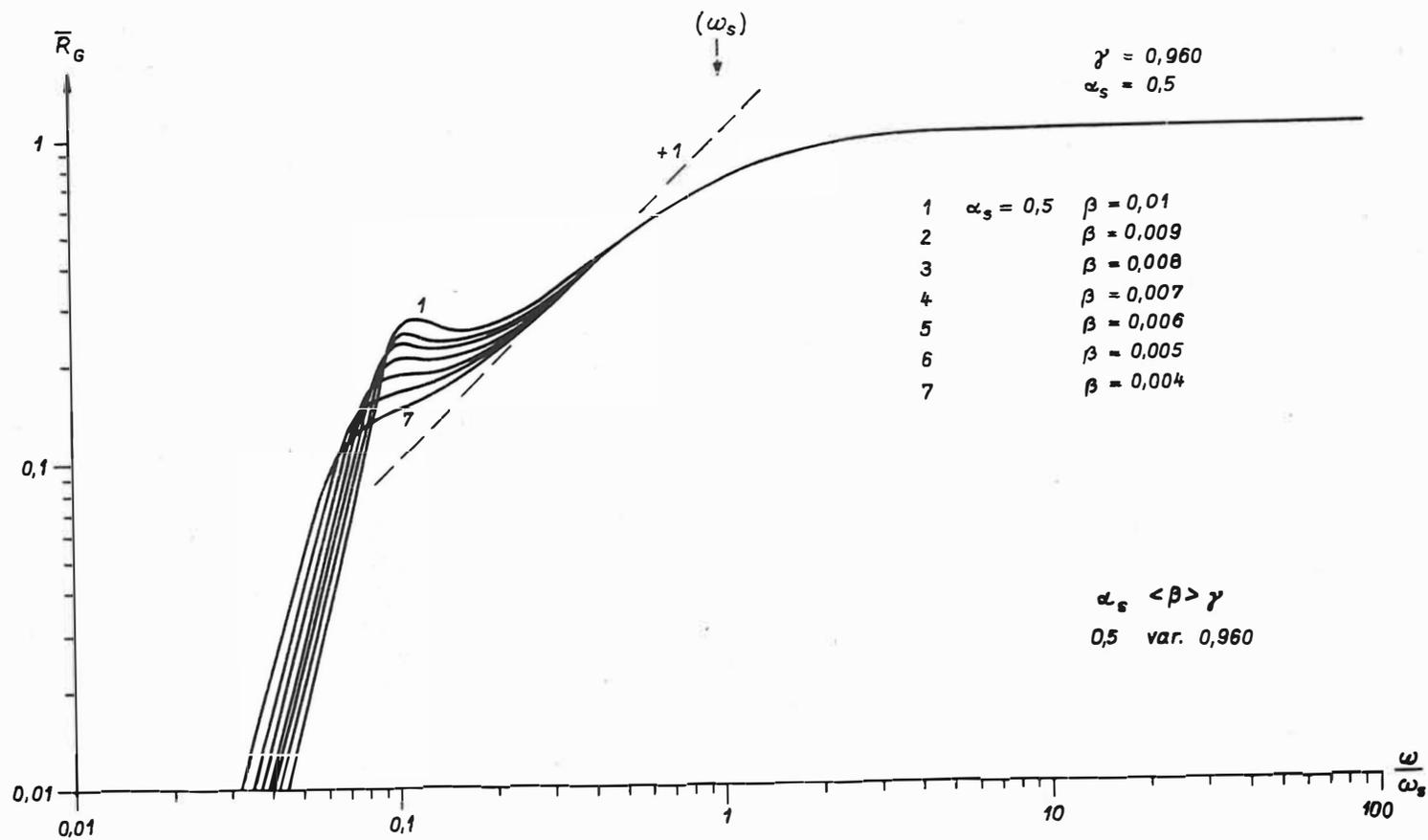


Abb. 22 Übertragungskurven bei einer Anfangsdämpfung  $\alpha_s = 0,5$

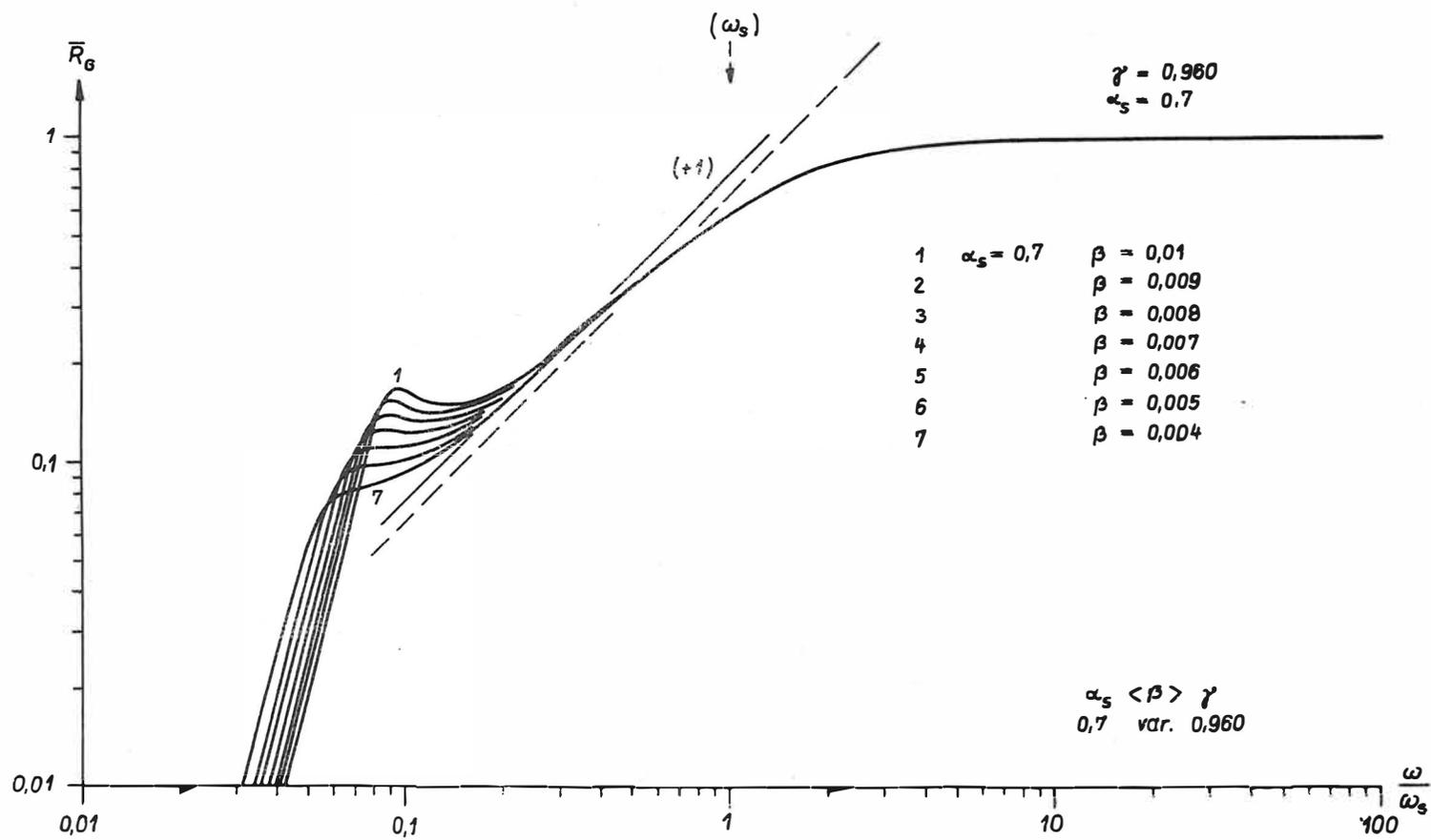


Abb. 23 Übertragungskurven bei einer Anfangsdämpfung  $\alpha_s = 0,7$  und variiertes Filtereckfrequenz  $\beta$

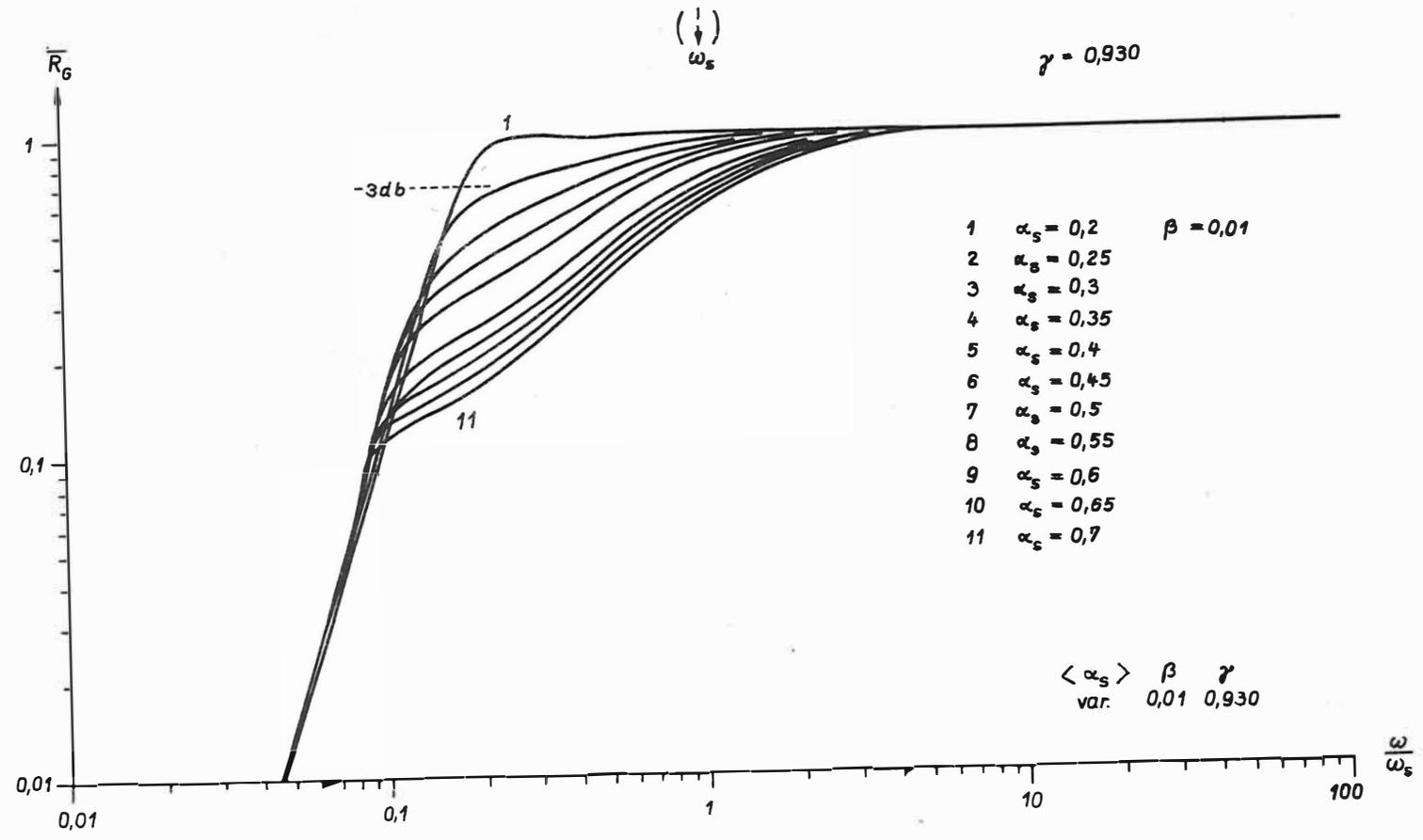


Abb. 24 Übertragungskurven für variierte Anfangsdämpfungen  $\alpha_s$  bei  $\gamma = 0,930$

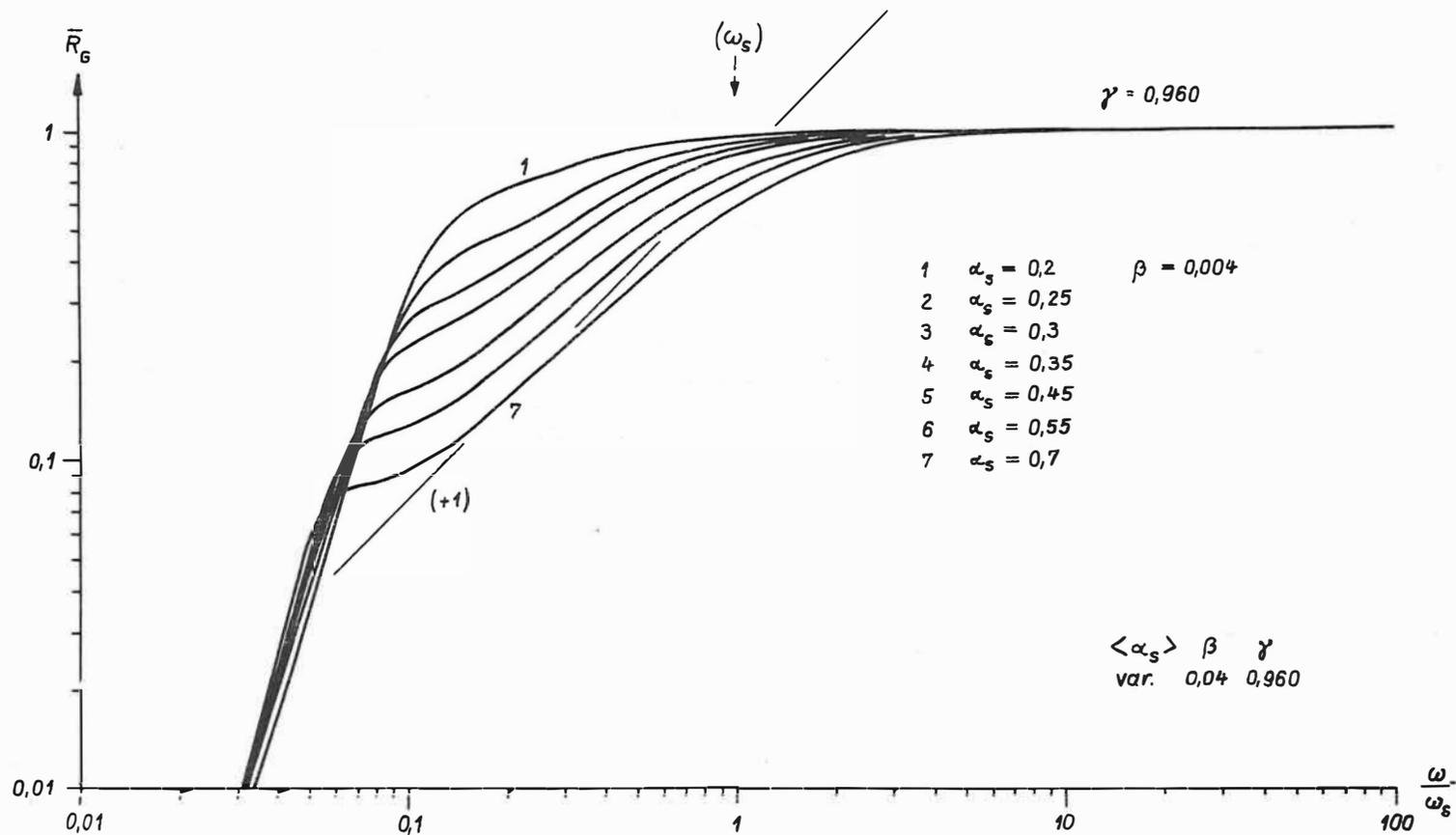


Abb. 25 Übertragungskurven für variierte Anfangsdämpfungen  $\alpha_s$  bei  $\gamma = 0,960$

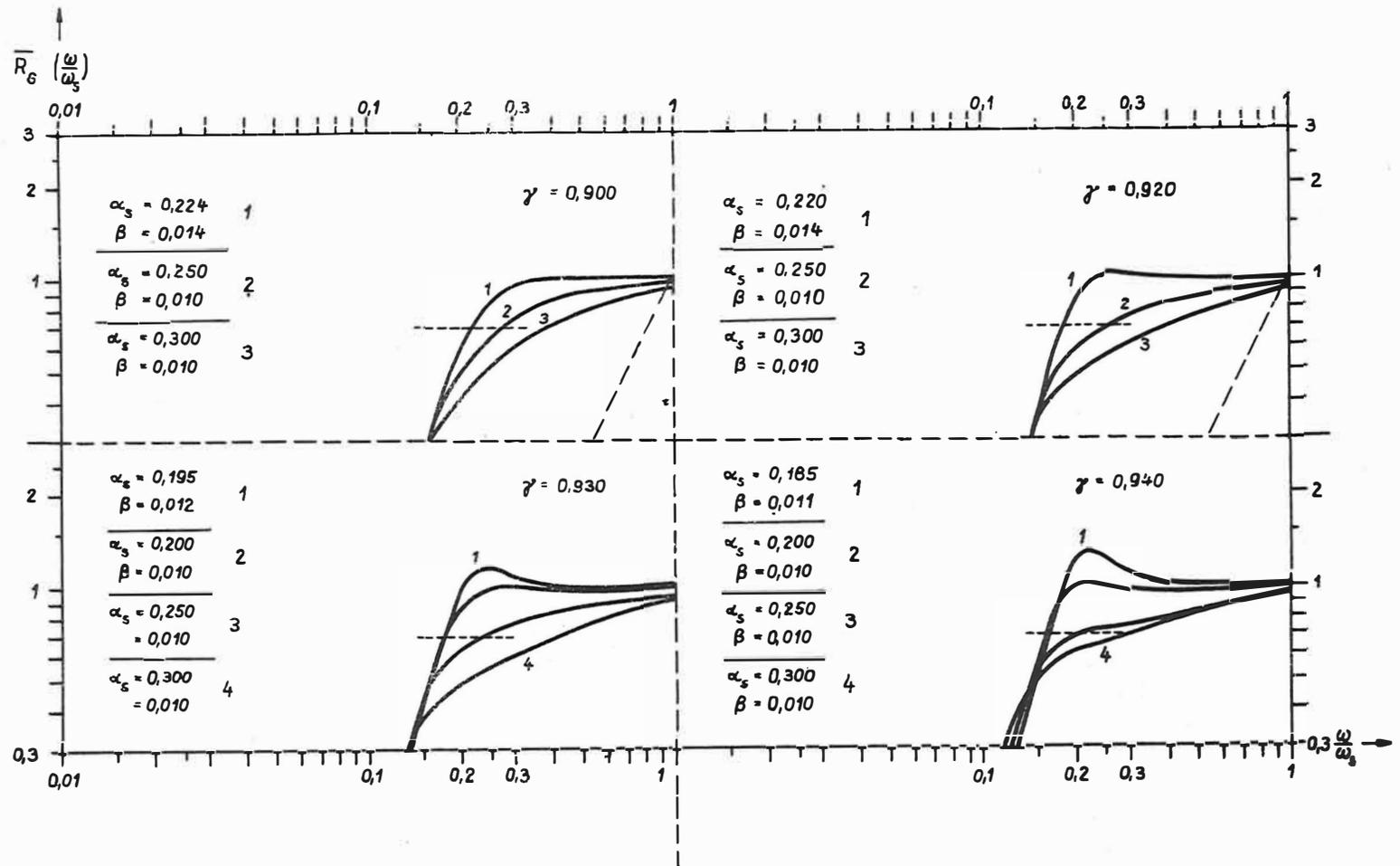


Abb. 26 Übertragungskurven mit ausgewählten Parametersätzen ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

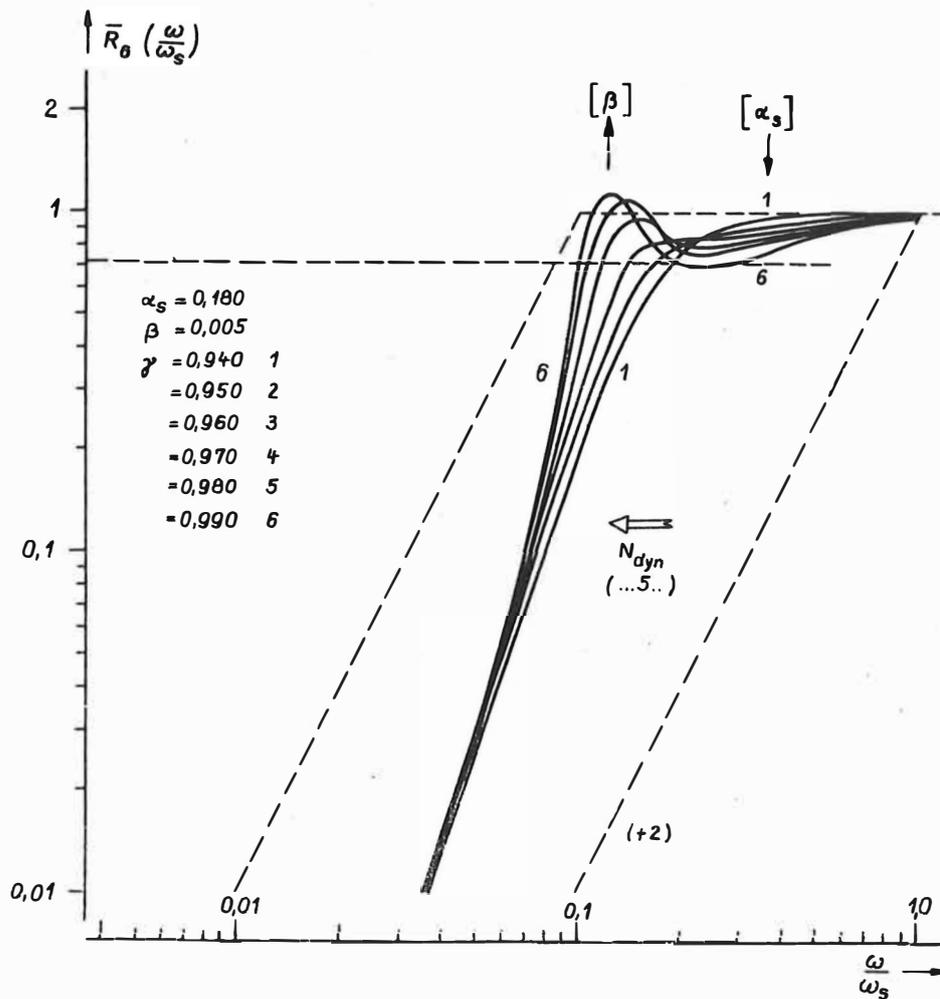


Abb. 27 Übertragungskurven für  $N_{dyn} \approx 5 \dots 10$   
mit  $[\beta]$ - und  $[\alpha_S]$ -Wirkung

einige mit flachem bzw. mäßig resonantem Verlauf dargestellt. Die Einflüsse von  $[\alpha_S]$  und  $[\beta]$  als Parameter sind angedeutet. Wachsendes  $[\alpha_S]$  drückt die Übertragungskurve  $\bar{R}_G(\frac{\omega}{\omega_S})$  vor oder bei  $\frac{\omega}{\omega_S} \approx 1$ , wachsendes  $[\beta]$  verstärkt das Überschwingen bei  $\frac{\omega}{\omega_S}$ . Das belegt die Richtigkeit der vorgeschlagenen neuen Lösung und zeigt mit den gefundenen Richtwerten für die Wahl der Filter-Eckfrequenz der HP1-Rückführung die Anwendungswege zur Realisierung einer dynamischen Astasierung mit Werten von  $N_{dyn} \approx 5$  auf. Durch die sich anschließende Vorstellung und Beschreibung praktischer Einsatzfälle wird das ergänzt.

#### 2.4. Vorschläge für technische Ausführungen dynamisch astasierter Seismographen

Seismographen weisen in den meisten Fällen die Baugruppen auf, die zur Anwendung einer dynamischen Astasierung vorhanden sein müssen, oder man kann sie leicht um diese erweitern. Bei fast allen derzeit eingesetzten Seismographen ist ein Spule-Magnet-System als Energiewandler und Dämpfungsvorrichtung da, das als Rückführglied im geregelten System einsetzbar ist. Wegproportionale Wandler sind in elektronischen Seismographen bereits enthalten und Wandler anderer Spezifikation sind über Modifikationen ebenso nutzbar. Andererseits sind handelsübliche Wandler/Wegaufnehmer Baueinheiten, die in vielen Fällen zur Nachrüstung des Seismographen mit ihren Abmessungen Platz in der Konstruktion finden. So läßt sich nahezu jeder bekannte kurz-, mittel- oder langperiodische Seismometertyp mit dynamischer Astasierung versehen. Dazu sind im folgenden Hinweise gegeben. Besonderer Nachdruck ist auf die passive Realisierung gelegt, um zusätzliche Rauschquellen zu vermeiden. In den Vorschlägen ist das Rückführungsfiler daher in den meisten Fällen passiv, als RC-Glied (Hochpaß 1. Ordnung - HP1), ausgeführt. Die Anwendung steilerer Filter höherer Ordnung in analoger oder digitaler Schaltungstechnik ist je nach Anwendungsfall möglich und in der Technik bekannt. Es kann partielle Vorteile mit sich bringen, ändert jedoch nichts an den grundsätzlichen Effekten und Ergebnissen [47].

Anwendungsbeispiel 1 ist der langperiodische Seismograph, insbesondere der vertikale vom LA-COSTE-Typ, der in Bezug auf Funktion, Stabilität, Linearität als einer der am besten theoretisch und praktisch untersuchten mechanischen, auch geregelten, Schwinger gilt. In Abb. 28 ist eine typische Ausführung der dynamischen Astasierung wiedergegeben. Das vertikale Seismometer 1 mit der Feder zwischen A und B, der Masse M, der Gleichgewichtslage GL ist mit einem Wandler-System 2, 2a und einer Rückführungseinrichtung 3 (Spule-Magnet-System) am Gestell GS versehen und als geregelter Seismograph ausgeführt. Es hat die Eigenperiode  $T_s$ , Dämpfung  $\alpha_s$  und Vergrößerung der Bodenbewegung V. Der Wandler 2 setzt Kapazitätsänderungen des vorzugsweise kapazitiven Sensorelementes in Spannungen um und erfaßt linear die Position von M relativ zu GS. Die erfaßten Eingangssignale werden nach einem Bandpaß-Filter 4 am Ausgang A1 registriert oder weitergeleitet. Zwischen Wandlerausgang 2 und der Rückführungseinrichtung 3 ist eine abgleichbare Regelstrecke mit einer RC-Kombination der Eckperiode  $T_h$  eingefügt.  $R_1$ ,  $R_v$ ,  $R_{as}$  bilden den abgleichbaren Teiler zur Einstellung des Regelkreisfaktors k und damit der neuen Eigenperiode  $T'_s$  des Seismographen, wie seiner Dämpfung  $\alpha'_s$ . Als Voraussetzung ist  $T_h \gg T_s$ , möglichst  $T_h \geq 20 T'_s$ .  $C_1 \dots C_4$  bilden im RC-Glied (Hochpaß 1. Ordnung) die Reihenkapazität.  $C_2 \dots C_4$  sind für Abgleichzwecke von  $C_1$  mit dem Schalter  $S_1$  abschaltbar. Die Rückführung ist so gewählt, daß im Signalband  $T \leq T_h$  die Verschiebung z der Masse M relativ zum Gestell GS positiv unter Beachtung der Stabilitätsbedingung abgleichbar auf die Masse M rückgeführt ist. Dadurch behält der dynamisch astasierte Seismograph 1 für Schwingungen mit  $T > T_h$  seine Ursprungstabilität bez. Temperatur- und Luftdruckänderungen wie Alterung; er hat jedoch im Bereich zwischen  $T_s$  und  $T_h$  eine neue Eigenperiode  $T'_s$ , die ca.  $5 T_s$  erreicht. Die Anfangsdämpfung  $\alpha_s$  wird dementsprechend zu etwa  $1/5 \alpha'_s$  eingestellt, d. h., der nicht geregelte Seismograph ist schwach gedämpft.

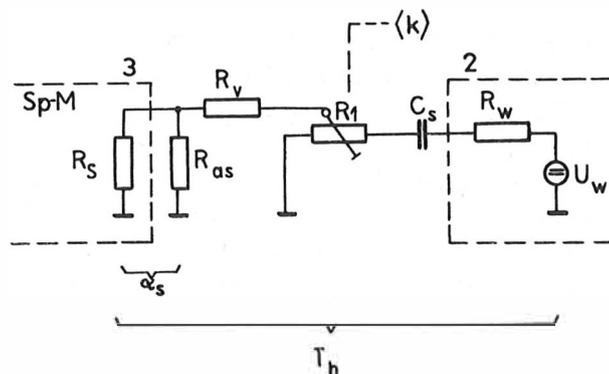
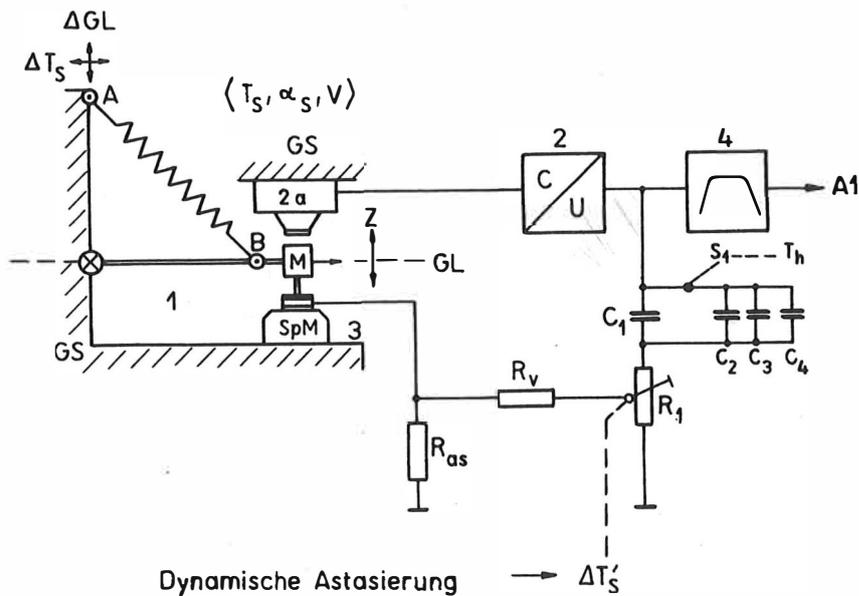


Abb. 28 Langperiodischer LA-COSTE-Seismograph mit dynamischer Astasierung

Der vorzugsweise eingesetzte Vertikalseismograph vom LA-COSTE-Typ ( $T_g \approx 10 \dots 30 \text{ s}$ ) erhält so eine neue ultralange Eigenperiode im Signalband von  $T'_g \approx 50 \dots 150 \text{ s}$ . Die Eckperiode des Rückführungsfilters sollte  $T_h \approx 1500 \dots 4500 \text{ s}$  gewählt werden (Kurve IV in Abb. 18). Der wesentliche Vorteil ist die Erhaltung der Vergrößerung  $V$  der Bodenbewegung bei der Periodenverlängerung und damit die der Auflösung oder Grenzempfindlichkeit des Seismographen (vgl. 1.6.).

Die Ausführung eines dynamisch astasierten Seismographen in einer vorteilhaften Paßbandausführung zeigt Abb. 29 (Anwendungsbeispiel 2). Der schematisch dargestellte Seismograph 1 mit seinen strukturellen Elementen Hebel, Drehzentrum, Feder an einem Gestell GS weist einen Wegaufnehmer 2 und eine Dämpfungs- und Rückführungseinrichtung 4 auf, die mit der seismischen Masse  $M$  gekoppelt sind. An den Wegaufnehmer 2 schließt sich ein Bandpaß 3 zur Trennung des relevanten Signalbandes von benachbarten Störsignalen

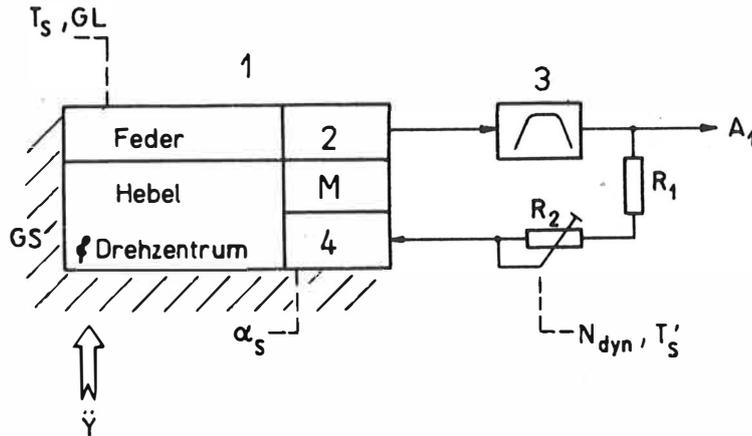


Abb. 29 Dynamisch astasierter Paßband-Seismograph

und Driften an. An 3 ist der übliche Signalausgang  $A_1$  vorhanden. Zwischen 3 und der Rückführungseinrichtung 4 sind die Regelkreiswiderstände  $R_1$  (fest) und  $R_2$  (variabel) eingefügt. Die Rückführung ist voraussetzungsgemäß so gewählt, daß sie positiv abgleichbar im Signalband bez. der Verschiebung der Masse  $M$  zum Gestell  $GS$  erfolgt. Die neue Eigenperiode  $T'_s$  wird durch die dynamische Astasierung  $N_{dyn}$  über die Einstellung an  $R_2$  erzeugt. Die Anordnung nutzt vorteilhaft den für die Signale vorhandenen Bandpaß 3 für die Rückführung aus, bezieht ihn mit in die Regelschleife ein und verzichtet auf ein spezielles Rückführungsfiler. Bei elektronischen Paßband-Seismographen bedeutet daher die Ausführung der dynamischen Astasierung nur die Einfügung von Abgleichwiderständen in die Regelschleife und die Wahl der erfindungsgemäßen Rückführung. Das ist schnell und ökonomisch einfach zu bewerkstelligen. Ein weiterer Vorteil ist der, daß nicht wie üblich Signalfilter und Rückführungsfiler so getrennt sind, daß im Signalfilter entstandene Driften und Störungen derart in die Registrierung eingehen, als könnten sie vom Seismographen selbst herrühren. Hier ist erfindungsgemäß der Ausgang des Bandpaßfilters  $A_1$  gleichzeitig der Regelkreisausgang und gibt den tatsächlichen Ausgang des ausgeregelten, also in seiner Eigenperiode von  $T_s$  auf  $T'_s$  erhöhten Seismographen wieder.

Die Realisierung eines langperiodischen Seismographen mit dynamischer Astasierung auf der Basis häufig vorhandener, meist weit verbreiteter und standardisierter elektrodynamischer Seismographen ist in Abb. 30 gezeigt. Neben der Anordnung und Schaltung der wesentlichen Baugruppen sind außerdem an drei markanten Punkten die Frequenzgänge als BODE-Diagramme hinzugefügt (Anwendungsbeispiel 3).

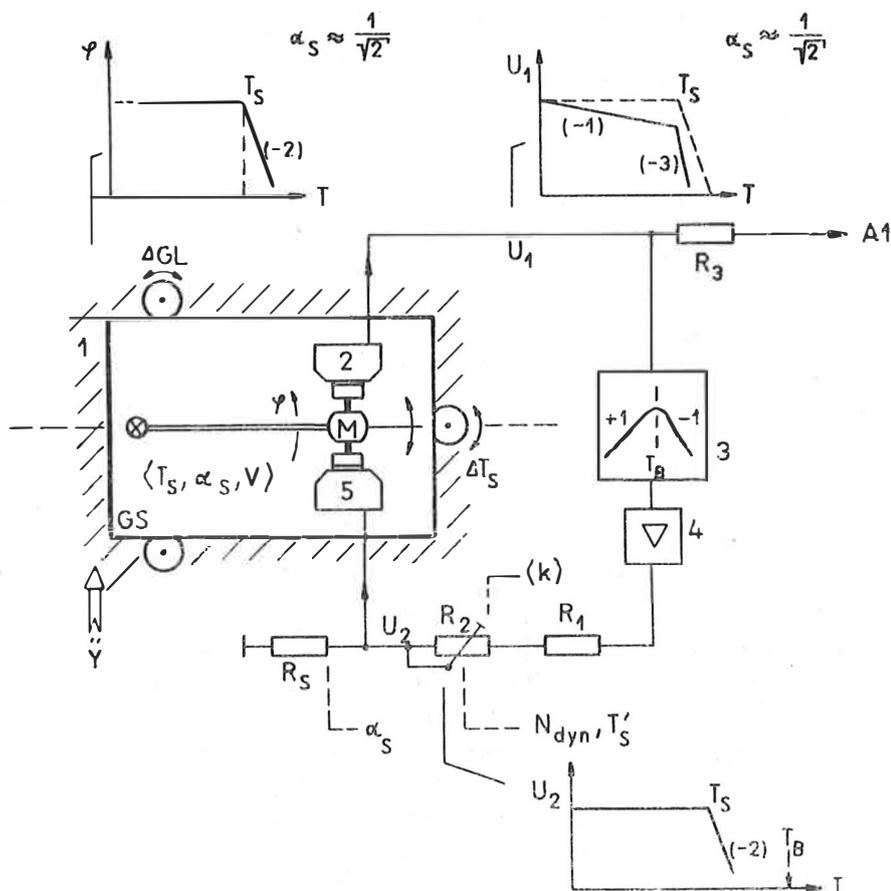


Abb. 30 Langperiodischer elektrodynamischer Seismograph mit dynamischer Astasierung

Der Seismograph 1 ist in der Aufsicht schematisch als ein Horizontalseismograph mit einem Gestell GS und einer seismischen Masse  $M$  an einem Hebel mit angedeutetem Drehzentrum zum Gestell GS dargestellt. Mit  $M$  sind die Induktionsspulen des Induktionswandlers 2 sowie der Rückführungs- und Dämpfungsvorrichtung 5 verbunden. Der Auslenkungswinkel von  $M$  aus der Nulllage ist  $\varphi$ . An der Grundplatte des Gestells GS sind Vorrichtungen zur Korrektur der Gleichgewichts-/Nulllage  $\Delta GL$  und der Eigenperiode  $\Delta T_S$  wie üblich vorhanden. Der abgegliche Seismograph ist durch seine Eigenperiode  $T_S$ , seine Dämpfung  $\alpha_s$  sowie eine Vergrößerung  $V$  der Bodenbewegung  $Y$  in Verbindung mit einer Registrier-/Verstärkereinheit gekennzeichnet. Der Ausgang der Spule des Induktionswandlers 2 ist über  $R_3$  mit dem Ausgang A1 und direkt mit dem Eingang des Filters 3 verbunden. Das Filter 3 ist ein an sich bekannter Bandpaß mit der Mittenperiode  $T_B$  sowie den Flankensteilheiten  $(+1)$ ,  $[\sim T]$ ;  $(-1)$ ,  $[\sim T^{-1}]$ . Dem Filter 3 ist eine Verstärkerstufe 4 nachgeschaltet. Dem folgt ein aus den Widerständen  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_S$  bestehender Spannungsteiler, dessen Ausgang mit dem Eingang der Rückföhreseinrichtung 5 verbunden ist. Die Einheiten 1, 2, 3, 4, der Spannungsteiler  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_S$  und 5 bilden den Regelkreis.  $R_3$  dient zur Einstellung von  $\alpha_s$ ,  $R_2$  (veränderbar) mit  $R_1$  zum Abgleich des Regelkreisfaktors  $k$ .

Für eine dynamische Astasierung ist die Polarität der Rückführung im Regelkreis positiv gewählt und die Mittenperiode  $T_B$  des Bandpaßfilters 3 zu  $T_B > T'_g$  mit  $T'_g$  als verlängerter Eigenperiode. Wirkt eine Eingangsbeschleunigung  $\ddot{Y}$  auf den Seismographen 1, so wird  $M$  relativ zum Gestell  $GS$  um den Winkel  $\varphi$  ausgelenkt. Dabei wird in 2 eine Spannung  $U_1 \sim \frac{d\varphi}{dt}$  induziert. Damit hat der Ausgang mit  $U_1$  die darüber angezeigte Übertragungscharakteristik mit einem Verlauf  $\sim T^{-1}$ ; (-1) bis ca.  $T_g$  (für den Fall  $\alpha_g \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$  und dann  $\sim T^{-3}$ ; (-3)). Durch den Bandpaß mit  $T_B > T'_g$ ;  $T_B \gg T_g$  erfolgt auf der Flanke  $\sim T$ ; (+1) eine Integration von  $U_1$ , der sogenannten Schwinggeschwindigkeit zu einem Signal  $U_2$  proportional  $\varphi$ , der Relativverschiebung zwischen  $M$  und  $GS$ . Das verdeutlicht die dritte Übertragungscharakteristik. Dieses Signal wird abgleichbar über  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_g$  und 5 auf  $M$  rückgeführt und bewirkt eine Periodenverlängerung zu  $T'_g > T_g$  mit einer Dämpfung  $\alpha'_g > \alpha_g$ . Diese Periodenverlängerung erfolgt durch die angewendete dynamische Astasierung  $N_{dyn}$  bis zu Werten  $T'_g (\hat{=}) T_B$  hin und gibt dem dynamisch astasierten, elektrodynamischen Seismographen die breitere Übertragungscharakteristik, die flach bis  $T = T'_g$  realisiert werden kann. Wahlweise können Signalwandlung und Filterung auch digital und nur der Regelkreisabgleich analog ausgeführt werden. Sowohl die analoge wie digitale Ausführung ist bekannterweise so zu realisieren, daß der Auslenkung  $\varphi = 0$  auch  $U_2 = 0$  entspricht (Offset-Abgleich). Die Anwendung der dynamischen Astasierung auch auf elektrodynamische Seismographen, die weltweit in großen Stückzahlen vorhanden sind, ist vorteilhaft für die Nutzung dieses Astasierungsprinzips in der Breite. Je nach Ausführung von 2 und 5 kann auch 3 passiv aufgebaut sein und der Anpaßverstärker 4 entfallen. Das ist dann eine Ausführung der dynamischen Astasierung ohne Hilfsenergie, da die Energie für die Astasierung durch den äußeren Prozeß über die Verrückung von  $M$  und die Induktion in 2 erzeugt ist. Da die Dämpfungs-/Rückführungseinheit 5 bei üblichen elektrodynamischen Seismographen für Grenzdämpfungen  $\alpha_g \gg \frac{1}{\sqrt{2}}$  eingerichtet ist (große elektrodynamische Konstante), liegt diese nahe.

Bei allen Ausführungen läßt sich die gewünschte Dämpfung  $\alpha'_g$  des Seismographen der neuen Eigenperiode  $T'_g > T_g$  mit  $R_g$  einrichten oder auch durch einen bekannten parallelen Rückführungszweig  $\sim -\dot{\varphi}$  aktiv abgleichen. Die Vergrößerung  $V$  der Bodenbewegung bleibt bei allen Ausführungen - abgesehen von eventuell auftretenden zusätzlichen Rauschquellen aus der technischen Realisierung des Regelkreises als mögliche Herabsetzung - vom Prinzip her im wesentlichen ungeändert als Vorteil gegenüber anderen Methoden der Periodenverlängerung mit quadratischer Herabsetzung von  $V$  (vgl. 1.4.). Die dynamische Astasierung kann wahlweise zur Erzielung besonders hoher Eigenperioden  $T'_g$  eingesetzt werden, oder aber zur Reduzierung der Abmessungen des Seismographen, oder für den Einsatz vorhandener kurzperiodischer Seismographen als universelle Sensoren auch für den mittel- und langperiodischen ( $T \geq 10$  s) Bereich.

In Abb. 31 wird als Ausführung der dynamischen Astasierung die Anwendung auf das bekannte nichtastasierte Geophon gezeigt (Anwendungsbeispiel 4). Das Geophon 1 besteht aus einem Gestell  $GS$ , dem Magnetsystem 2 und dessen Tauchspule 3, die an Federn  $F_e$  zum Gestell  $GS$  elastisch geführt ist und die gleichzeitig seismische Masse ist. Der Ausgang der Spule 3 ist nicht wie üblich mit der Registriereinrichtung verbunden, sondern dient zur Einspeisung der Rückführungsspannung im Regelkreis und zur Einstellung der Dämpfung  $\alpha_g$ . Das Geophon 1 steht mit seiner Hauptempfindlichkeitsrichtung parallel zum Schwerevektor  $g$ . Die einfallenden Signale/Bodenbeschleunigungen  $\ddot{y}$  ergeben

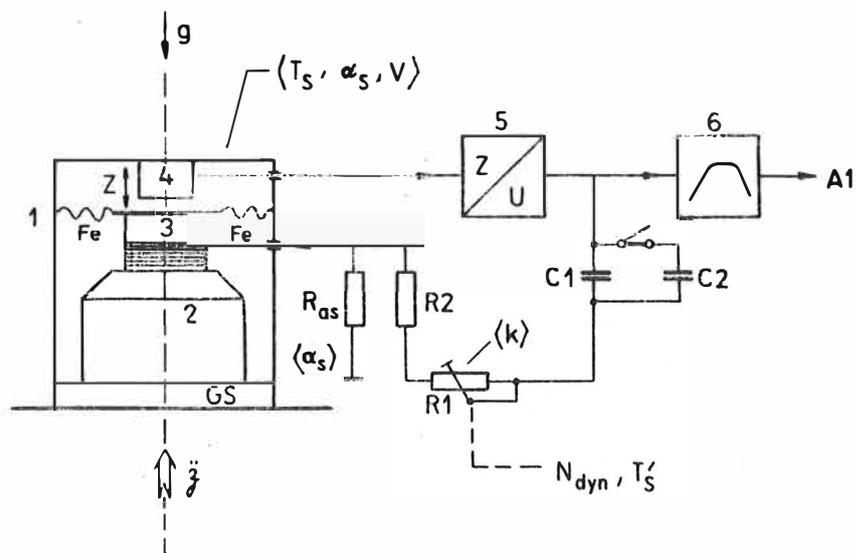


Abb. 31 Dynamisch astasiertes Geophon

Verrückungen  $z$  der Spulen-Masse relativ zu GS. Diese werden durch das Wegaufnehmer-element 4 des Weg-Spannungswandlers 5 erfaßt und in 5 gewandelt. Über ein Bandpaßfilter 6 erfolgt die übliche Registrierung am Ausgang A1. Die Ausgangsspannung  $U$  des Wandlers wird über das Rückführungsfilter, das aus  $C_1 \parallel C_2$  und dem Spannungsteiler  $R_1, R_2, R_{as}$  besteht, abgleichbar und als positive Rückführung auf die Spule 3 rückgeführt. Das Rückführungsfilter hat eine Hochpaßperiode, die größer als die angestrebte verlängerte Eigenperiode  $T'_s$  ist. Mit  $R_1$  ist wahlweise  $T'_s, N_{dyn}$  einstellbar, mit  $R_{as}$  insbesondere  $\alpha_s, \alpha'_s$ .  $C_2$  ist von  $C_1$  trennbar für Abgleichzwecke bez.  $T'_s$  (Messen der wenig gedämpften neuen Eigenperiode  $T'_s$ ). Das hier passiv ausgeführte Rückführungsfilter (Hochpaß 1. Ordnung) kann auch gegen ein ähnliches höherer Flankensteilheit und ebenso großer Eckperiode, analog oder digital, ausgetauscht werden. Die dynamische Astasierung des hier als Geophon betrachteten linearen Masse-Feder-Schwingers erlaubt es, eine höhere Bandbreite für die Messungen zu erzielen. Zum einen gelingt das durch die Erhöhung von  $T_s$  bis auf  $T'_s = N_{dyn} T_s$  für den langperiodischen Bereich und zum anderen alternativ durch die Wahl einer höheren mechanischen Eigenfrequenz des Schwingers mit anschließender dynamischer Astasierung zur Ausweitung des hochfrequenten Meßbereiches durch die nach oben geschobenen Parasitär-Resonanzen des technischen Schwingers. Diese bleiben, entgegen allen mechanischen Astasierungen, bei der dynamischen Astasierung, unabhängig von deren Stärke, dort wo sie einmal durch die gewählte Konstruktion und deren technische Realisierung hingelegt wurden. Das ist ein weiterer Vorteil neben dem der Erhaltung der asymptotischen Ausgangsstabilität des Schwingers.

Ein vertikales, allgemein nichtastasiertes Torsionsseismometer mit geringer Eigenperiode wird als Ausführung mit dynamischer Astasierung und wesentlich vergrößerter Eigenperiode in Abb. 32 vorgeschlagen (Anwendungsbeispiel 5). Auf Grund ihres Prinzips sind vertikale Torsionsseismometer auf kurzperiodische Ausführungen beschränkt, da sich große Hebellängen prinzipiell verbieten und andere, mechanische Astasierungen nicht bekanntgeworden sind. Hier bringt die dynamische Astasierung wesentliche Vorteile für breitbandigeren Einsatz.

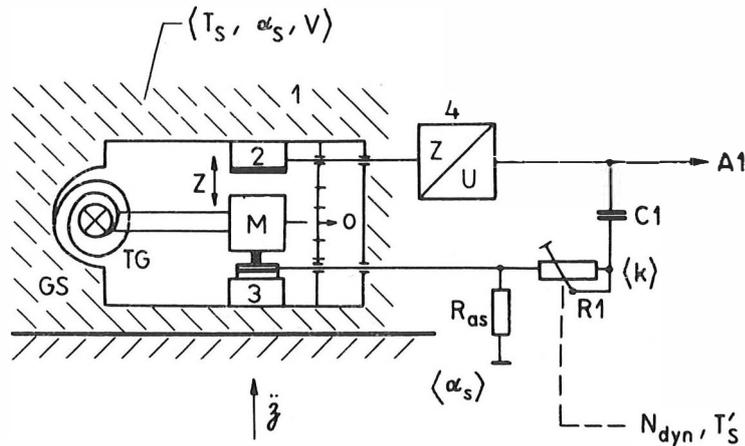


Abb. 32 Vertikales Torsionsseismometer mit dynamischer Astaticierung

Das Torsionsseismometer 1 hat mit dem Gestell GS verbundene Funktionseinheiten: die Spule-Magnet-Einrichtung 3 als Dämpfungs- und Rückführungseinrichtung, das Torsionsgelenk TG mit der über einen Hebel mit ihr verbundenen seismischen Masse M und das Wegaufnahmerelement 2 zur Erfassung der Relativbewegung  $z$  zwischen M und GS, die durch die Eingangsbeschleunigung  $\ddot{z}$  hervorgerufen wird. An 2 ist der Wandler 4 angeschaltet, dessen Ausgang A1 direkt registriert und gleichzeitig rückgeführt wird. Das Rückführungsfiter vom Hochpaßtyp (HP1) wird von  $C_1$  und  $R_1, R_{as}$  gebildet. Die Rückführung erfolgt positiv über die Einrichtung 3 auf M. Diese positive Rückführung ist durch das Filter begrenzt auf ein relevantes Signalband. Mit  $R_{as}$  ist  $\alpha_s, \alpha'_s$  eingestellt und mit  $R_1$  als einstellbarem Vorwiderstand wird der Regelkreisfaktor  $k$  gewählt und ist  $N_{dyn}, T'_s$  realisiert. Die Hochpaß-Eckperiode ist wesentlich größer als das angestrebte  $T'_s$  gewählt. Aktive Filter sind ebenso analog wie digital einsetzbar.

Einen dynamisch astasierten Blattfederseismographen zeigt Abb. 33 (Anwendungsbeispiel 6). Die Vorteile der Robustheit und Miniaturisierbarkeit von Blattfederseismographen bei Vermeidung von Spezialteilen haben im Gefolge, daß diese Seismographen kurzperiodischer sind als für Breitbandregistrierungen gewünscht. Mechanische Astaticierungsvorrichtungen sind nicht bekannt. Folglich ist hier vorteilhaft die Anwendung der beschriebenen dynamischen Astaticierung angezeigt. Der Seismograph 1 mit dem Gestell GS hat die Blattfedereinspannung 2 für die tragende Blattfeder 3 und deren Kopfmasse 4, die seismische Masse. Die Relativverschiebung  $z^*$  der Masse 4 relativ zum Gestell GS als Folge der Eingangsbeschleunigung  $\ddot{z}^*$  unter dem Winkel  $\varepsilon$  gegen die Schwerebeschleunigung  $g$  - speziell triaxialer Seismographentyp - wird über das Wegaufnahmerelement 5 des  $z^*/U$ -Wandlers in Spannungen  $U$  umgewandelt, die nach einem Trennverstärker am Registrierausgang A1 aufgezeichnet werden. Gleichzeitig wird die Spannung  $U$  des  $z^*/U$ -Wandlers über einen Hochpaß positiv im Signalband über die Rückführungseinrichtung abgleichbar auf die Masse M im Regelkreis rückgeführt. Der Hochpaß wird aus dem Rückführungskondensator  $C_1$  und dem Spannungsteiler  $R_1, R_2, R_{as}$  gebildet und hat eine Eckperiode, die wesentlich größer als die angestrebte verlängerte Eigenperiode  $T'_s$  ist.

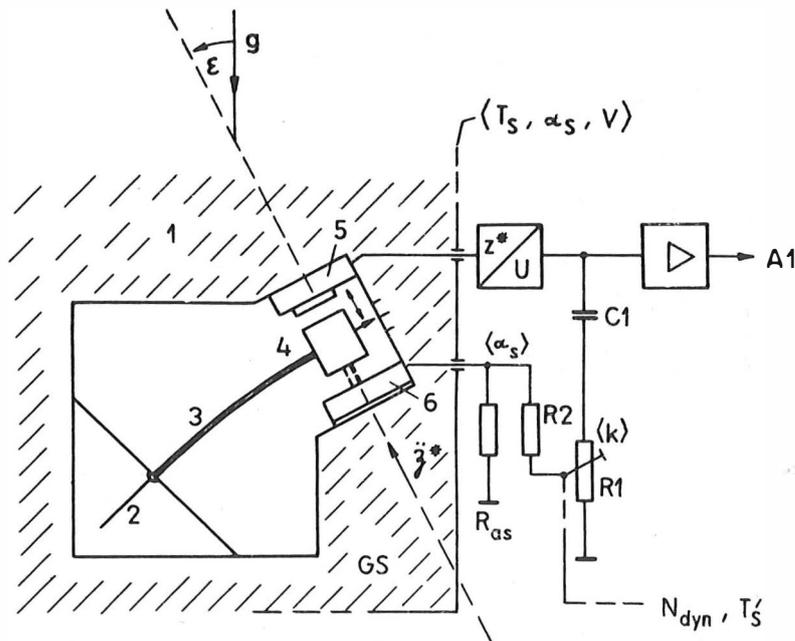


Abb. 33 Dynamisch astasierter Blattfederseismograph

Der Abgleich von  $N_{\text{dyn}}$  für  $T'_s$  erfolgt über den Regelkreisfaktor  $k$  am Teilerwiderstand  $R_1$ .  $R_{\text{as}}$  dient insbesondere zum Einstellen der gewählten Dämpfung  $\alpha_s$ ;  $\alpha'_s$ . Der so dynamisch astasierte Blattfederseismograph behält seine Ausgangsstabilität und hat mit der höheren neuen Eigenperiode  $T'_s$  ein breiteres Einsatzfeld in der Seismologie.

In Abb. 34 ist als Anwendung ein dynamisch astasiertes Pendel dargestellt (Anwendungsbeispiel 7). Dieses einfache Vertikalpendel 1 ist mechanisch nicht astasierbar und hat durch seine begrenzte Baulänge eine meist auf geringe Werte festgelegte Eigenperiode  $T_s$ . Zur Auswertung des Nachweisbereiches für kurzzeitige Neigungsänderungen und Horizontalbeschleunigungen bis hin zu längeren Signalperioden ist die vorgeschlagene dynamische Astasierung gut geeignet. Sie verlängert im gewählten Signalband die Eigenperiode  $T_s$  auf  $T'_s = N_{\text{dyn}} \cdot T_s$ , sichert die ursprüngliche Stabilität gegenüber Langzeiteinflüssen und erhält die ursprüngliche Vergrößerung  $V$ . Die Dämpfung  $\alpha_s$  für die Form der Übertragungskurve ist frei wählbar. Der seismischen Masse 2 des Pendels 1 stehen die auf dem Gestell GS befestigte Wandlereinheit 3 und die Rückführungs-/Dämpfungseinrichtung 5 gegenüber. Die Relativverschiebung  $y$  zwischen der seismischen Masse 2 und dem Gestell wird in 3 in eine Spannung  $U$  gewandelt, die über einen Trennverstärker 4 mit wahlweise Filtereigenschaften am Ausgang A1 registriert wird. Die Spannung  $U$  wird außerdem im Signalband abgleichbar positiv über 5 auf die Masse 2 rückgeführt. Die Verlängerung  $N_{\text{dyn}}$  der Eigenperiode auf  $T'_s$  wird im Regelkreis über den Faktor  $k$  an  $R_1$  eingestellt. Mit  $R_{\text{as}}$  ist die Dämpfung festgelegt. Die Begrenzung der Rückführung auf das relevante Signalband erfolgt durch einen Hochpaß mit großer Eckperiode, größer als  $T'_s$ , der durch  $C_1$ ,  $R_1$ ;  $R_{\text{as}}$  gebildet ist. Steilere Filter oder eine digitale Filterung in bekannter Ausführung sind ebenso anwendbar.

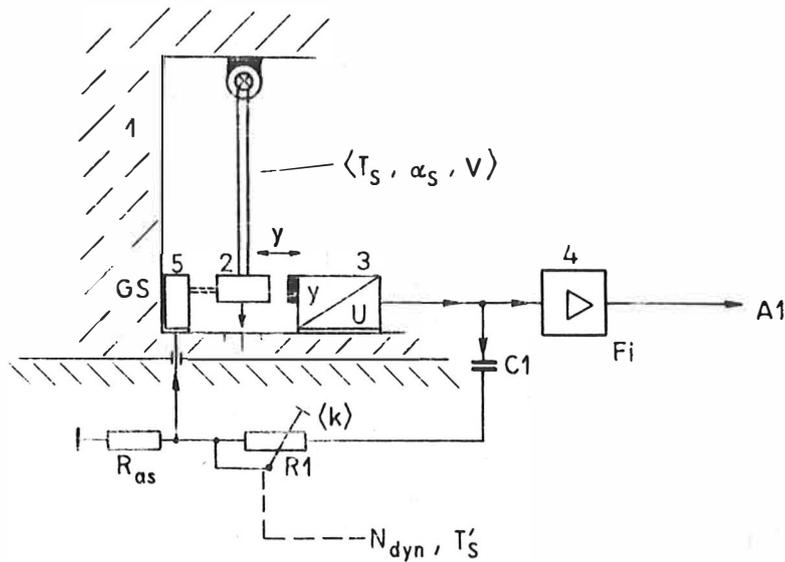


Abb. 34 Dynamisch astasiertes Pendel

Abb. 35 zeigt die dynamische Astasierung eines üblichen geregelten Breitbandseismographen auf der Basis eines elektrodynamischen Seismographen 1 mit direkter Verstärkung der Signale des Tauchspulwandlers 2 durch einen Galvanometerverstärker 3 (Anwendungsbeispiel 8) [25]. Diese Seismographen-Konfiguration ist speziell für die bekannte Periodenverlängerung über die negative Rückführung bez. des Trägheitsmomentes - Rückführung proportional der Beschleunigung  $\ddot{x}$  - eingesetzt worden. Deshalb wird hier die dynamische Astasierung im Vergleich für die gleiche Konfiguration vorgestellt (vgl. 1.4.). Die gewandelte Relativverschiebung  $x$  der seismischen Masse  $m$  im Seismographen 1 ist am Ausgang von 3 proportional  $\dot{x}$ . Sie ist über den Ausgangsfilterverstärker 4 an den Registrierausgang  $A_1$  geführt und weiter über das Rückführungsfilter 5 und Anpaßwiderstände  $R_1, R_{as}$  auf die Rückführungseinrichtung 6. Die Rückführung erfolgt positiv abgleichbar bez. der Relativverschiebung  $x$  im relevanten Signalbereich auf die seismische Masse  $m$ . Das Rückführungsfilter 5 ist dazu als Bandpaß 2. Ordnung gewählt, dessen Mittenperiode größer als das gewünschte verlängerte  $T'_s$  ist, so daß an seiner einen Flanke  $\sim T$  aus dem Signal  $\sim \dot{x}$  ein solches  $\sim x$  für den Signalbereich  $T \leq T'_s$  erzeugt wird, das über  $R_1$  - veränderbar zum Abgleich des Regelkreisfaktors  $k$  - auf die Rückführungseinrichtung 6 und positiv auf  $M$  rückgeführt ist. Durch diese erfindungsgemäße Rückführung ergibt sich also im Bereich unterhalb der Mittenperiode des Bandpaßfilters 5 eine langperiodische Seismographencharakteristik mit einer verlängerten neuen Eigenperiode/Eckperiode  $T'_s \approx \approx N_{dyn} \cdot T_s$  mit passend gewähltem  $\alpha_s$  entsprechend den Anforderungen an die Flachheit der Charakteristik. Die Vergrößerung  $V$  bleibt hierbei erhalten als Vorteil gegenüber der üblichen Methode der Periodenverlängerung über die Erhöhung des Trägheitsmomentes bei diesem Seismographentyp.

Die dynamische Astasierung in der Realisierung durch Mikrorechnerführung eines Schwingers, insbesondere eines Seismographen, zeigt Abb. 36 (Anwendungsbeispiel 9). Die seismische Masse  $M$  im Seismographen 1 besitzt neben der üblichen, hier nur angedeuteten Führung durch Hebel und elastische Glieder im Gestell GS von 1 einen Wandler 2 zur

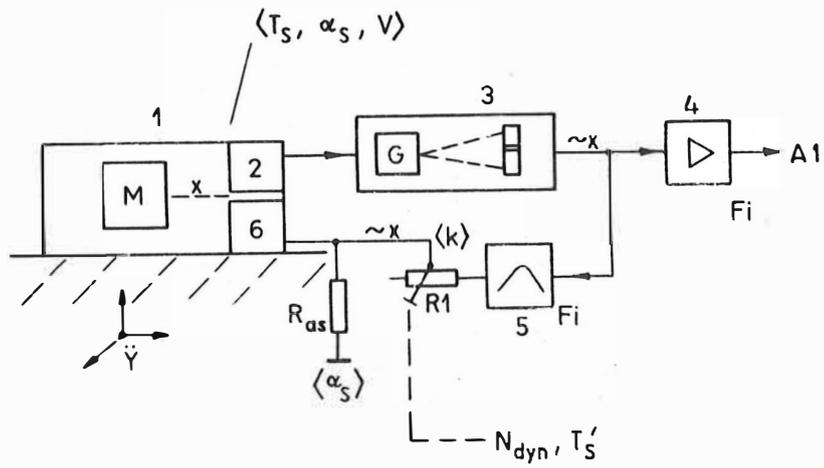


Abb. 35 Elektrodynamischer Seismograph mit Galvanometerverstärker und dynamischer Astasierung

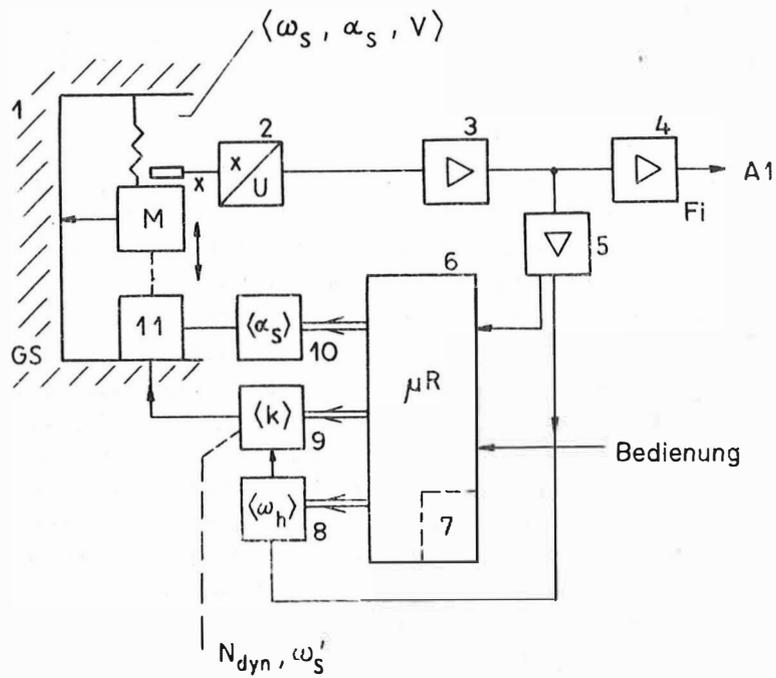


Abb. 36 Dynamisch astasierter Seismograph mit Mikrorechnerführung

Wandlung der Relativverschiebungen  $x$  von  $M$  gegenüber dem Gestell  $GS$  und eine Rückführungseinrichtung 11 bez.  $M$ , die beide vorzugsweise berührungslos und reibungsfrei arbeiten. Das aus  $x$  gewandelte Signal  $U$  wird in 3 verstärkt und über den Registrierverstärker 4 am Registrierausgang  $A1$  aufgezeichnet. Über einen Trennverstärker 5 ist gleichzeitig das Signal  $U$  auf die Einheiten 6, Mikrorechner und 8, RückführungsfILTER, 9, Regelkreisabgleich an die Rückführungseinrichtung 11 geführt. Der Hochpaß 8 hat eine umschaltbare Eckfrequenz  $\omega_h$ , der Regelkreisabgleich 9 einen wählbaren Regelkreisfaktor  $k$  und die Dämpfungseinheit 10 eine wählbare Dämpfung  $\alpha_B$ . Zur Erzielung unterschiedlicher Übertragungskurven des Schwingers 1 werden die Einheiten 8, 9, 10 zur Festlegung von  $\omega_h$ ,  $k$ ,  $\alpha_B$  von den Ausgängen des Mikrorechners 6 angesteuert. In Abhängigkeit von Bedienung und eingespeistem Regelkreissignal von 5 wählt der Mikrorechner einen der in einem Speicherbereich 7 abgelegten Sätze  $\omega_h$ ,  $k$ ,  $\alpha_B$  zur Erzielung einer gewünschten Übertragungskurve. Erfindungsgemäß ist die Regelschleife (2, 3, 5, 8, 9, 11,  $M$ ) so gewählt, daß positive Rückführung bezüglich der Verschiebung  $x$  von  $M$  im Schwinger 1 abgleichbar vorliegt. Das ergibt eine dynamisch, mit über  $k$  gewähltem dynamischen Astasierungsfaktor  $N_{dyn}$ , erniedrigte Kreisfrequenz  $\omega'_S$  mit  $\omega'_S = N_{dyn}^{-1} \omega_S$  für den Bereich  $\omega'_S > \omega_h$ , wobei die Dämpfung  $\alpha_B$  des Schwingers wählbar ist und die Vergrößerung  $V$  der Bodenbewegung erhalten bleibt. Diese Realisierung des dynamisch astasierten Schwingers ist weitreichend flexibel bezüglich Einsatz, spez. Meßaufgaben, und ist adaptiv - entsprechend den zunehmenden Erfahrungen und Erkenntnissen des Fachgebietes - dem realen Signalablauf anpaßbar. Der Schwinger kann insbesondere ein Seismograph oder verwandter seismischer Sensor wie Geophon, Beschleunigungsmesser oder Pendel sein, jedoch ebenso ein Vibrator oder Schwingungsdämpfer großer Eigenperiode/geringer Eigenfrequenz.

Abb. 37 zeigt einen elektronischen Seismographen 1 mit stufenweiser Astasierung (Anwendungsbeispiel 10). Die dynamische Astasierung von Schwingern hat, wie schon bemerkt, den einzigartigen Vorteil gegenüber den mechanischen Astasierungen über Einstellungen an konstruktiven Teilen des Schwingers, daß Parasitärerschwingungen aus der Konstruktion des Schwingers, insbesondere des Seismographen, durch diese Astasierungsart nicht verschoben werden. Da sie für die obere Einsatzfrequenz des Schwingers bestimmend sind, bleibt also bei einer Erniedrigung der unteren Grenzfrequenz durch dynamische Astasierung diese obere Grenzfrequenz als wichtige Größe gleichfalls konstant - wie auch die Vergrößerung  $V$ . Partiiell hat diesen Vorteil auch noch die direkte elektrische Astasierung durch positive Rückführung bez. der Auslenkung unter Einschluß der dargestellten Mängel. Somit sind im Anschluß an den bekannten Stand und durch die Anwendung der vorgeschlagenen dynamischen Astasierung Realisierungen von Seismographen und verwandten Schwingern möglich, die einerseits eine hohe obere Grenzfrequenz durch hochliegende Parasitärerschwingungen der Konstruktion und andererseits eine sehr tiefe untere Grenzfrequenz durch dynamische Astasierung aufweisen. Das ist in Abb. 37 detailliert ausgeführt. Anwendungsfall der dynamischen Astasierung ist der elektronische Seismograph mit einer direkten Periodenverlängerung durch Rückführung positiv zur Auslenkung der seismischen Masse.

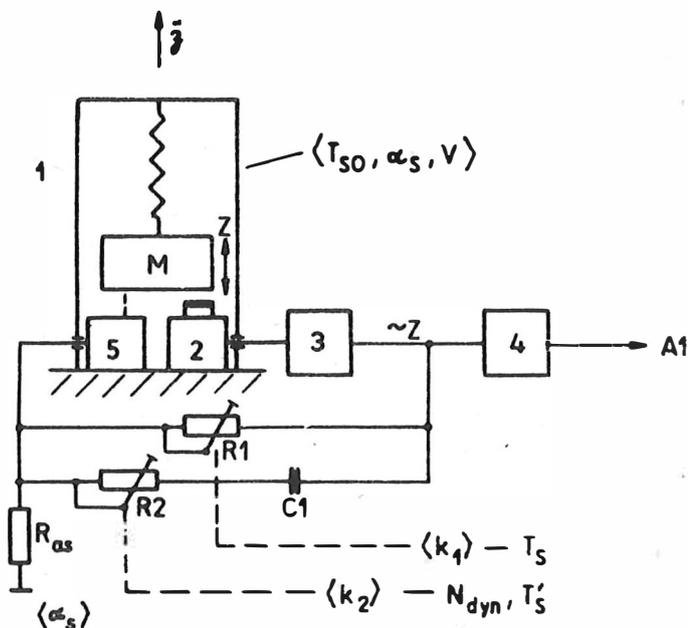


Abb. 37 Elektronischer Seismograph mit stufenweiser Astasierung

Der dargestellte Seismograph 1 ist ein elektronischer Seismograph vom Vertikaltyp, der über einen Wegaufnehmer 2, 3 und einer Rückführungseinrichtung 5 verfügt und den Aufbau von unterschiedlichen Regelkreisen gestattet. Relativverschiebungen  $z$  von  $M$  in 1 durch die Eingangsbeschleunigungen  $\ddot{z}$  werden durch den Wegaufnehmer 2, 3 in Spannungen  $\sim z$  umgewandelt, die über den Registrierverstärker 4 an A1 aufgezeichnet werden können. Zur Rückführung wird das gewandelte Signal  $\sim z$  der Rückführungseinrichtung 5 über ein RückführungsfILTER zugeführt. Im vorliegenden Seismographen wird über den Rückführungswiderstand  $R_1$  der mechanische Empfänger des Seismographen mit der Eigenperiode  $T_{SO}$  durch den Abgleich des Regelkreisfaktors  $k_1$  direkt auf die Eigenperiode  $T_S$  verlängert [14]. Dabei ist  $T_{SO}$  so klein gewählt, daß die Konstruktion sehr hohe Parasitärresonanzen, möglichst oberhalb der erforderlichen höchsten Signalfrequenz, besitzt und somit keine obere Einschränkung vorhanden ist. Mit  $k_1$  wird durch diese direkte Rückführung  $\sim z$  in bekannter Weise eine Eigenperiode  $T_S \gg T_{SO}$  eingestellt, bei der der elektronische Seismograph noch genügend linear und thermisch bzw. zeitlich stabil und parameterkonstant bleibt. Das ist bei Seismographen ein Einstell-Bereich von einigen Sekunden, während  $T_{SO}$  bis zu einigen 10 Hz gewählt werden kann. Dann liegen bei günstiger Konstruktion die Parasitärresonanzen bei einigen 100 Hz. Dieser Seismograph ist dann in der üblichen Auffassung ein kurzperiodischer Seismograph, dessen Eigenperiode  $T_S$  nicht wesentlich zu vergrößern ist. Hier wird nun als paralleler Rückführungszweig die dynamische Astasierung mit einem Faktor  $N_{dyn} \gg 1$  eingesetzt, um hinreichend große Eigenperioden des elektronischen Seismographen zu bekommen. Über  $C_1, R_2; R_{AS}$  als Hochpaß wird im Signalbereich das Signal positiv abgleichbar  $\sim z$  auf  $M$  über 5 rückgeführt. Mit  $R_2$  wird der Regelkreisfaktor  $k_2$  und damit ein  $N_{dyn}$  festgelegt, das die neue dynamisch erhöhte Eigenperiode  $T'_S$  bestimmt.  $T_S \approx 5 \dots (10) T'_S$  sind zu erreichen, wenn die Eckperiode des Hochpasses wesentlich größer als  $T'_S$  ist. Die Stabilität gegenüber langsamen Umgebungsänderungen ist weiterhin mit  $T_S$  gegeben. Mit  $R_{AS}$  wird die erd-

gültige Dämpfung eingestellt durch Wahl der Dämpfung  $\alpha_B$  des unregulierten Seismographen. Alternativ kann das auch durch bekannte Rückführungen bez. der Schwinggeschwindigkeit  $z$  erfolgen. Die Vergrößerung  $V$  der Bodenbewegung bleibt bei diesem elektronischen Seismographen mit stufenweiser Astasierung bei Erhöhung der Eigenperiode erhalten, und die nutzbare Bandbreite ist wesentlich größer als bei bekannten Seismographen. In der Rückführung läßt sich auch ein Hochpaß oder Bändpaß höherer Steilheit einsetzen. Der Bandpaß umfaßt mit seiner Bandbreite dann das vorliegende relevante Signalband. Die gesamte Realisierung der stufenweisen Astasierung kann auch digital erfolgen. Diese Astasierungsart ist nicht nur auf Seismographen und verwandte Sensoren begrenzt, sondern für jeden geregelten mechanischen Schwinger mit konzentrierter oder verteilter Masse sowie konzentrierter oder verteilter Elastizität anwendbar, der die benannten Funktionseinheiten des Regelkreises aufweist bzw. dem diese in dieser neuen Zielstellung nachgesetzt werden können. Das betrifft ebenso Vibratoren wie auch Schwingungsdämpfer und Membranschwinger [47].

## 2.5. Modellierung auf einem Mikroschreiber als Realisierungshilfe

Die in 2.3. auf einem größeren Rechner in FORTRAN durchgeführte Modellierung der dynamischen Astasierung läßt sich ebenso in BASIC auf einem Mikroschreiber realisieren. Ausgangspunkt ist wieder die volle Übertragungsfunktion aus Formel (102). Das Programm ASTA hat folgende Gestalt:

```

200 REM ASTA-MODELLIERUNG
300 INPUT "ALPHAS="; AS
305 PRINT "ALPHA S="; AS
310 INPUT "BETA="; B
315 PRINT "BETA="; B
320 INPUT "GAMMA="; C
325 PRINT "GAMMA="; C
330 PRINT " "
335 PRINT "ERRECHNETE ZWISCHENERGEBNISSE"
360 LET A0=B*B
370 LET A2=4*AS*B*(AS*B+C)+C*C-2*B*B+2*C+1
380 LET A4=4*AS*AS+B*B-2*(1+C)
410 INPUT "ANFANGSWERT FUER W/WS="; R0
415 PRINT "W/WS="; R0; "..."; 10*R0
440 LET Z=1.11588 :REM TEILUNG 21
450 PRINT "FREQUENZDEKADE(NORMIERT)VON"; R0;"BIS"; 10*R0
455 LET Y=R0
460 FOR N=0 TO 20
470 LET X=Y
480 LET RX=X*X
500 LET MX=RX*SQR((RX+A0)/(RX*RX+RX+A4*RX+RX+A2*RX+A0))
520 PRINT N+1, MX
525 LET Y=X*Z
530 NEXT N

```

Es verwendet keine speziellen BASIC-Befehle und läuft derzeit auf einem Heimcomputer C64 und auf ZX spectrum. Nach dem Start werden Eingaben für  $\alpha_B$ :AS,  $\beta$ :B,  $\gamma$ :C verlangt und die Angabe des Intervallanfangswertes  $\omega/\omega_g$ :W/WS. Es werden pro Dekade 21 Werte für die Übertragungsfunktion  $MX[(R_G(\frac{\omega}{\omega_g}) \equiv MX)]$  ausgegeben. Die 21-Teilung ergibt günstig auf Millimeterpapier mit 62,5 mm pro Dekade je  $\approx 3$  mm einen Zeichenpunkt. Der erste errechnete Wert liegt dabei auf dem Dekadenanfang, z. B. bei  $\frac{\omega}{\omega_g} = 0,01$  oder 0,1 oder 1; je nach Wahl (Eingabe) von  $R_0$ . Bei der Arbeit mit dem Programm ASTA wird zweckmäßigerweise von einer oben berechneten flachen Übertragungskurve ausgegangen. Für  $N_{dyn} \approx 5$  als Zielstellung ist das im folgenden der Wertesatz: AS = 0.2, B = 0.01, C = -0.93 (vgl. Abb. 19 als ähnlichen Fall).

Einige Beispiele aus dem Entwurf eines Dynastie-Seismographen zeigen die Abbildungen 38, 39. In Abb. 38 wird von dem oben angeführten Wertesatz ausgegangen (Kurve 3) und bei fester Dämpfung  $\alpha_s = \Delta S = 0,2$  und festem  $\beta = B = 0,01$  die Stärke der Rückführung  $\gamma = -C = 0,925 \dots 0,940$  variiert.  $N_{\text{dyn}}$  liegt zwischen 5 und 6. Die Kurven haben ein unterschiedliches Überschwingen in der Umgebung von  $\omega'_s$  und sind im niederfrequenten Bereich zueinander leicht parallelverschoben. Der Abstand  $A_\beta$  ist ca.  $16,5 \dots 19,5$  und liegt damit in der Nähe der empfohlenen Richtwerte. In Abb. 39 ist von Kurve 1 in Abb. 38 ausgegangen, und es wird  $\beta$  gezielt zwischen  $0,005$  und  $0,01$  verändert. Man kann erkennen, daß mit einem  $\beta \approx 20$  (Kurve 4), bei  $N \approx 6$ , eine Übertragungskurve mit einem langen flachen Verlauf und ohne wesentliches Überschwingen bei  $\omega'_s$  zu projektieren ist. Der Einfluß von  $\alpha_s$  war schon aus Abb. 24 abzuleiten.

Die Arbeiten am Bildschirm des Mikrorechners erfolgen im Dialog, und  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  werden jeweils in kleinen Schritten geändert, ausgehend von dem o. a. Wertesatz oder von einer anderen bekannten Übertragungskurve aus der obigen umfangreichen 1. Modellierung.

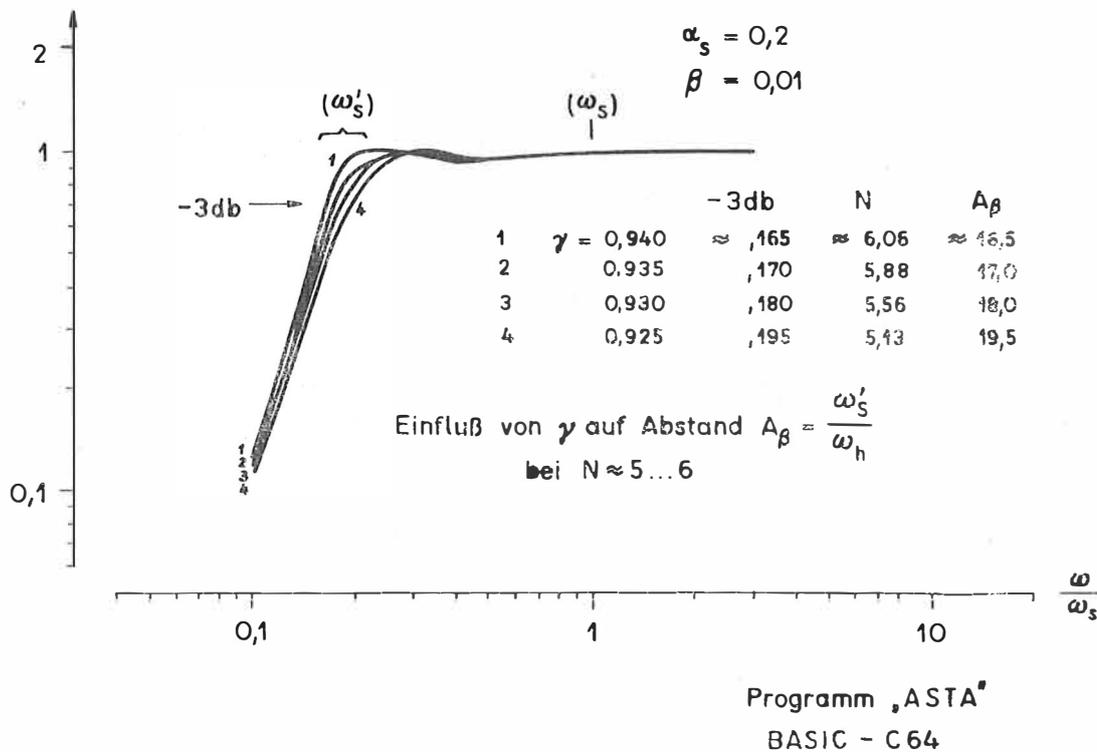


Abb. 38 Variation von  $\gamma$  zum Aufsuchen einer geeignet flachen Übertragungskurve mit einem Mikrorechner

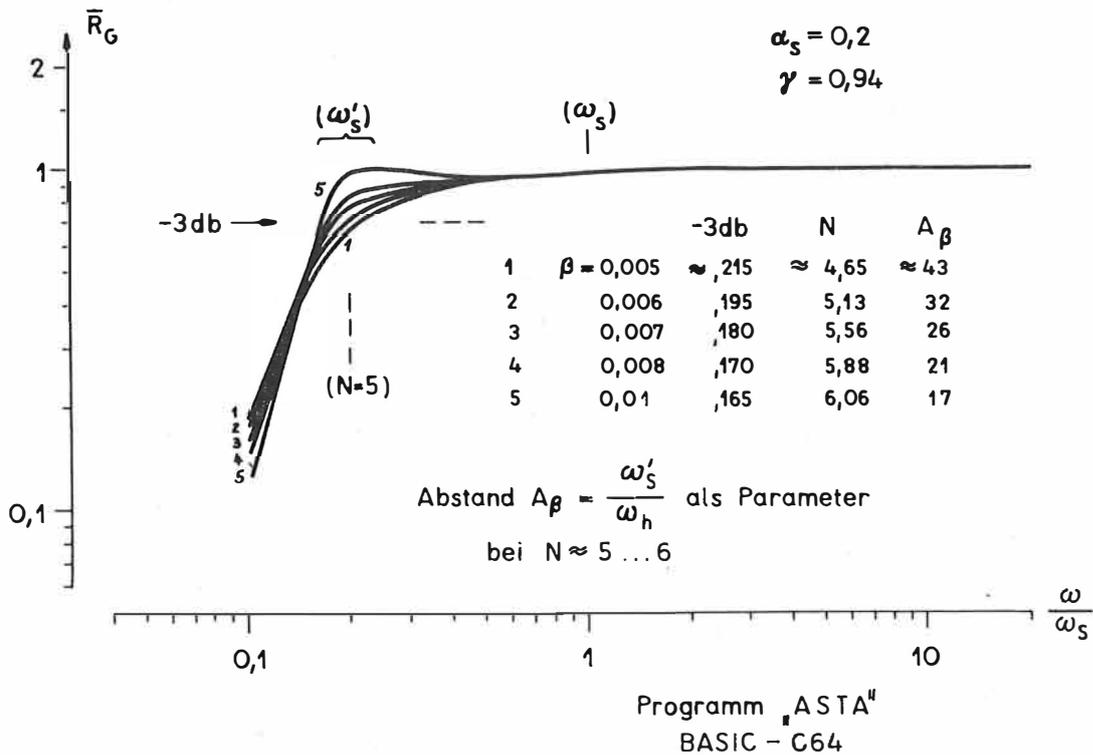


Abb. 39 Variation von  $\beta$  zur Untersuchung der Kurvenform auf einem Mikrorechner

### 3. Zum allgemeinen Anwendungsbereich des dynamisch astasierten mechanischen Schwingers

#### 3.1. Anwendungskategorien

Die Anwendung der dynamischen Astasierung ist in mehreren technischen Kategorien und unterschiedlichen Ausführungen möglich. Dabei sind verschiedene Effekte angestrebt und erzielbar, die jedoch eine gemeinsame Wurzel haben, die Erhöhung der Astasierung und vordergründig der Schwingungsdauer/Eigenperiode des regelbaren mechanischen Schwingers in einem begrenzten Signalband bzw. für einen Kurzzeitvorgang. Dabei können auch Ausführungen in den Blickpunkt kommen, die bisher nicht vorteilhaft realisierbar waren, aber nun mit dynamischer Astasierung interessant werden können [47]. Zur Veranschaulichung des derzeit überblickbaren Anwendungsspektrums sind die technischen Gebilde in drei Kategorien (Tabelle 1) unterteilt, die sich durch die Stellung der betrachteten Schwinger zu den Signalen unterscheiden.

Unter I. sind mechanische Schwinger zu zählen, die ihrer Natur nach inertielle Sensoren sind; in denen also die träge seismische Masse als Meßgrundlage für äußere seismische, akustische Signale vorhanden ist. Die Unterteilung in eine konzentrierte Masse und in eine verteilte Masse mit verteilter Elastizität führt zu den Gruppen der seismischen Sensoren und der Membran-Sensoren. Über den Dynastie-Seismographen mit seinen einzelnen

Tabelle 1 Anwendungskategorien

## I.

Inertiale Sensoren mit definierter Eigenperiode des mechanischen Systems:	→ konzentrierte Masse	→ Seismische Sensoren (Seismometer, Geophone, Pendel, ...)
	→ verteilte Masse und Elastizität	→ Membran-Sensoren (Mikrofone, Hydrophone, ...)

## II.

Inertiale Aktuatoren mit definierter Eigenperiode des mechanischen Systems:	→ konzentrierte Masse	→ Vibratoren (seismisch, akustisch, ...)
	→ verteilte Masse und Elastizität	→ Lautsprecher

## III.

Schwingungsfähige technische Systeme mit inertialen Massen unter Schwingungsbeeinflussung	→ stationär mit äußerer Beeinflussung	→ schwingungsgedämpfte Aufstellung empfindlicher Geräte u. dgl. aseismische Aufhängung für Geräte
	→ Beeinflussung in der Bewegung, beim Bewegungsablauf	→ Fahrzeugfederung u. dgl. auf Schiene, Straße, ...
	→ äußere starke seismische Einwirkungen u. dgl.	→ erdbebengeschützte Bauwerke, spez. Häuser, Bunker, Spezialbauten, ...
	→ von den inneren Eigenabläufen des technischen Systems her	→ schwingungsgedämpfte Aufstellungen von Maschinen, die selbst Vibrationen erzeugen, Schwingungsisolierung von Werkzeugen, Sitzen u. ä.

Ausführungen seismischer Sensoren ist in 2. ausführlich berichtet worden. Anwendungsziel ist eine hohe Astasierung bei stabilen Betrieb für entweder eine erhöhte Bandbreite im langperiodischen Bereich und/oder eine Verringerung der Abmessungen im unterschiedlich realisierten Seismometer. Membransensoren, wie Mikrofone und Hydrophone, sind hier mit unter die inertialen Sensoren gerechnet, wenn auch die verteilte Masse als Membran eher als einseitige Hülle für das Medium mit Signalvorgängen zu sehen ist. Trotzdem gibt es hier Analogien zu seismischen Sensoren mit ihren Grenzen in Abmessungen und Astasierung. Die Eigenfrequenz der Membransensoren ist abhängig von ihren geometrischen Abmessungen und der Steifigkeit. Zur Erlangung einer besonders geringen

Eigenfrequenz für tieffrequente Messungen ist daher eine Vergrößerung der Abmessungen oder/und eine Verringerung der Steifigkeit notwendig. Das schränkt aber sowohl den Einsatzbereich als auch die Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen stark ein. Daher ist die Ausführung mit dynamischer Astasierung bei Beibehaltung der Abmessungen ein Mittel zur Verringerung der Eigenfrequenz bei Erhaltung der Langzeitstabilität. Das kann von Interesse für die Registrierung und den Nachweis tieffrequenter schwacher Signale in Luft oder in flüssigen Medien sein.

Unter II. sind die inertialen Aktuatoren zu rechnen, d. h. schwingungsfähige Anordnungen mit konzentrierter oder verteilter träger Masse, die zur Übertragung bzw. Abstrahlung tieffrequenter Schwingungsenergie auf ein bzw. in einem Medium eingesetzt sind. Ihre durch die Konstruktion, die Abmessungen und die Eigenmasse festgelegte untere Grenzfrequenz bzw. Eigenfrequenz kann bei Erhaltung der Stabilität im geforderten tieffrequenten Signalbereich durch dynamische Astasierung beträchtlich verringert werden. Vibratoren können so besser tieffrequente Signale auf ein Medium übertragen und Lautsprecher - mit verteilter Masse und Elastizität - ohne Leistungseinbuße in einem breiteren Frequenzbereich mit kleinerer unterer Grenzfrequenz angesteuert und zur Schallabstrahlung eingesetzt werden. Das ist bislang technisch so nicht oder nur mit starken Einschränkungen oder negativen Nebeneinflüssen, wie etwa den Baßverlusten bei Lautsprechern, realisiert.

Unter III. sind technische Gebilde zusammengefaßt, die schwingungsfähig bzw. schwingungsempfindlich sind in dem Sinne, daß die Schwingungen für sie Störgrößen darstellen und ihre Wirkung auf das technische Gebilde weitgehend unterdrückt oder eliminiert sein soll. Das ist in mehrere Gruppen von Geräten, Vorrichtungen und Bauwerken unterteilt. Ist das technische Gebilde stationär und liegt äußere Beeinflussung durch Schwingungen über die Aufstellung vor, so liegt das Interesse darin, die Geräte u. ä. Gebilde schwingungsgedämpft bzw. aseismisch aufzustellen bzw. aufzuhängen und den so entstandenen Schwinger mit dynamischer Astasierung im relevanten Frequenzbereich niederfrequent zu machen. Das erlaubt mit der dabei vorhandenen Stabilität für Langzeitvorgänge eine wirksame Schwingungsdämpfung für die Geräte ohne wesentliche Vergrößerung ihrer Abmessungen und Massen. Rührt die Beeinflussung durch Schwingungen von der Bewegung oder aus dem Bewegungsablauf her, wie bei Fahrzeugen auf der Straße, Schiene oder am Tragseil, so wird üblicherweise mit Schwingungs- und Stoßdämpfern eine Fahrzeugfederung realisiert, die jedoch meist kurzperiodisch ist. Eine wirksame Verlängerung der Schwingungsperiode der Fahrzeugfederung bei Erhaltung der Abmessungen und der Stabilität ist mit der Anwendung der dynamischen Astasierung möglich. Verschiedene Ausführungen, auch unter Verwendung eines Dynastieseismographen als Referenzpunkt auf der Fahrzeugplattform, sind möglich. Damit kann eine weichere; langperiodische Fahrzeugfederung erreicht werden, bei der die Einwirkung von Schwingungen aus dem Bewegungsablauf auf der Trasse auf das Fahrzeuginnere gut gedämpft ist. Das ist vorteilhaft sowohl für den Personentransport als auch für die Beförderung schwingungsempfindlicher Güter.

Ist das schwingungsfähige technische System insbesondere ein Bauwerk und sind die äußeren Signale starke, das technische System im Zusammenhalt gefährdende, Einflüsse wie aus Erdbeben, Explosionen oder ähnlichen Vorgängen, so ist mit der Ausführung des Bauwerkes als gefedertes schwingungsgedämpftes System mit dynamischer Astasierung eine erdbebengeschützte, vorteilhafte Bauweise naheliegend. Die Aufstellung eines Bauwerkes

allein auf Schwingungsdämpfern oder -tilgern ist eine schon ausgeführte Maßnahme. Nur ist naturgemäß wegen der großen Last und der Erreichung eines Gleichgewichtszustandes im Ausschlagbereich der Federung das ganze System sehr kurzperiodisch. Mit Einsatz einer Regelung nach der Lösung der dynamischen Astasierung ist hier für dynamische Vorgänge die Eigenperiode der Aufstellung zu vergrößern und die Schwingungsunterdrückung zu verbessern. Der Aufwand ist beträchtlich und wird sehr genau am Nutzen zu messen sein. Daher wird eher an Spezialbauten, insbesondere schwingungsgefährdete Anlagen wie Schutzräume, Bunker, Teile von Kernkraftwerken und ähnliche wichtige Anlagen zu denken sein.

In vielen Fällen der Schwerindustrie sind es die Anlagen (Pressen, Rüttler, ...) selbst, die in ihrem Arbeitsablauf starke Vibrationen erzeugen und damit bei fester, nichtisolierender Aufstellung zur Quelle von störenden Untergrundschwingungen für die Umgebung werden. Eine gefederte und gedämpfte Aufstellung zur Schwingungsisolierung kann auch hier wegen der beträchtlichen Eigenmassen nur sehr kurzperiodisch sein. Mit Einsatz der dynamischen Astasierung ist für die vorliegenden Vorgänge eine gefederte Aufstellung langperiodischer, weicher, und mit höherer Schwingungsisolierung ausführbar. Dabei bleiben die statische Belastbarkeit und die Langzeitstabilität erhalten. Ähnlich wirkt sich die Realisierung einer Schwingungsisolierung für Werkzeuge, Sitze u. ä. unter Einsatz der dynamischen Astasierung positiv aus. Die Wirkung der Isolierung gegenüber dynamischen Vorgängen ist erhöht, ohne das technische System labiler oder größer in den Abmessungen zu machen.

### 3.2. Rückschau und Ausblick

Durch die jeweilige technische Realisierung existieren in jedem mechanischen Masse-Feder-(mit allgemeiner Feder) sowie in Membranschwingern und Pendeln endliche Rückstellkräfte, die zusammen mit den geometrischen Abmessungen eine Eigenperiode  $T_g$  (im ungedämpften Fall) festlegen. Eigenperiode  $T_g$  und deren Dämpfung  $\alpha_g$  bestimmen das Übergangs- und das Übertragungsverhalten. Ein mit  $\alpha_g \approx 0,5 \dots 0,7$  gedämpfter mechanischer Schwinger zeigt ein konstantes Übertragungsverhalten für Perioden  $T$  kleiner als seine Eigenperiode  $T_g$  und läßt sich gut als Hochpaß 2. Ordnung (HP2) darstellen [30]. In vielen Fällen der Elektroakustik, Schwingungsdämpfung, Luftschallmessung, Seismometrie u. ä. liegen jedoch Eigenperiode  $T_g$  der Sensoren oder Vorrichtungen noch innerhalb des vorliegenden - und als Meßaufgabe zu erfassenden - Signalbereiches ankommender elastischer Schall- u. ä. Wellen. Eine Überdeckung des Bereiches ist bei gleichbleibender Empfindlichkeit bisher noch nicht möglich, da durch technische wie physikalische Grenzen eine weitere Verringerung der Rückstellkräfte oder -momente auf mechanischem wie elektro-nischem (und prinzipiell auch hydraulischem) Wege ("geregelter" Schwinger) nicht soweit möglich wie erforderlich ist. Ein Hauptgrund sind die quadratisch mit der Eigenperiode  $T_g$  ansteigenden Empfindlichkeiten des Schwingers gegenüber unerwünschten Temperatur-, Neigungs- und Luftdruckänderungen und gegenüber den zeitlichen, der Alterung. Erfolgreiche Versuche, die Eigenperiode  $T_g$  eines Schwingers durch Rückführung z. B. bei Seismographen und Lautsprechern auf  $NT_g$  zu erhöhen, waren stets mit einer Einbuße an Empfindlichkeit quadratisch zum Faktor der Eigenperiodenverlängerung  $N$  verbunden - Abfall von 1 auf  $\frac{1}{N^2}$  im normierten Übertragungsniveau. Deshalb haben solche Methoden nur

beschränkt bzw. für spezielle Einsatzfälle Anwendung und Anerkennung gefunden. Sie lösen jedoch nicht die Aufgabe, über einen vorgegebenen Signälbereich eine gleichbleibende Übertragung und Empfindlichkeit bzw. Schwingungsdämpfung zu sichern, ohne daß die Meßempfindlichkeit usw. von der Methode der Erzeugung des Übertragungsverhaltens abhängt, statt vielmehr nur durch Sensor, Wandler und das Störspektrum als nicht zu umgehende Einflußgrößen gegeben zu sein. Diese Aufgabe konnte bei dem vorliegenden physikalisch-technischen Wissens- und Erkenntnisstand bisher nicht formuliert werden und müßte das Vorliegende auf diesem Gebiet übersteigen. So bleibt für Seismographen die Eigenperiode des Masse-Feder-Schwingers innerhalb des Spektrums der Erdbebenwellen, für Lautsprechersysteme die untere Grenzfrequenz des Spektrums ebenso außerhalb des Übertragungsverhaltens und bei schwingungsisolierenden Masse-Feder-Dämpfer-Vorrichtungen die Schwingungsperiode auf einige Hz beschränkt. Die ausgeführte neue Methode bewirkt etwas anderes und verfolgt ein anderes Ziel als die bekannten Lösungen und Schaltungsanordnungen zur Erhöhung der Astasierung, d. h. des Verhältnisses "erzeugte Eigenperiode zu ursprünglicher Eigenperiode".

Diese neue Lösung bewirkt eine positive Rückführung "im Signalband", abgleichbar bez. der neuen scheinbaren Eigenperiode  $T'_g$ . Nur innerhalb des Signalbandes wird rückgekoppelt und zwar relativ schwach zur Verringerung der Rückstellkräfte und in Verbindung mit Maßnahmen zur Dämpfung/Entdämpfung zur Erzeugung eines flachen oder eines anderen geforderten Verlaufes der Übertragungscharakteristik ohne einen Verlust an Empfindlichkeit wie bei bekannten Lösungen. Damit verhält sich der Schwinger, spez. Seismograph oder Lautsprecher usw., innerhalb des Signalbandes wie ein sehr langperiodischer Schwinger, dessen Eigenperiode am unteren Bandende liegt (langperiodische Ecke) und der weit außerhalb des Signalbandes nicht mehr rückgekoppelt ist, sondern dort für Störvorgänge, wie sehr langsame Temperatur-, Neigungsänderungen, Alterungen, wie der ursprünglich kurzperiodische Schwinger ohne Rückführung zufriedenstellend stabil ist. Technisch ausgeführt kann das durch elektrische oder anders realisierte Hochpässe (HP) oder Bandpässe (BP) werden, deren Durchlaßband das vorliegende bzw. zu erfassende Signalband überdecken. Anwendbar ist die dynamische Astasierung bei jeder Art Schwinger, bei dem eine Information über die Relativbewegung der konzentrierten oder verteilten Masse durch Wandlung ableitbar ist und diese Information nach Filterung (HP, BP) im Signalband positiv und proportional der Auslenkung der Masse zum ortsfesten Gestell auf diese Masse rückgeführt werden kann. Diese Methode wird als "dynamische Astasierung" bezeichnet und entsprechend aufgebaute Seismographen als "Dynastie-Seismographen" (Dyn. Astas. Idee), da sie den Charakter einer dynamischen Astasierung besitzt, d. h., einer Periodenverlängerung für dynamische Vorgänge, das sind die N u t z s i g n a l e, und nicht wie direkte positive Rückführung unvorteilhaft für a l l e Signale ohne Trennung zwischen Nutz- und Störsignalen. Dadurch bewirkt sie vom Effekt her etwas Ähnliches wie negative  $2P - RF$  mit großer Zeitkonstante, nämlich eine Langzeitstabilisierung. Nur ist bei dynamischer Astasierung der Zustand für Langzeitvorgänge der unregelmäßige und der der großen Eigenperiode im Signalband der geregelte, und dieser geregelte kann wesentlich größer gemacht werden als es der des unregelmäßigen Schwingers von der Mechanik her sein kann, also quasi ein "inverser" Vorgang. Diese neue Lösung ist ohne zusätzliche Rauschquellen realisierbar und bei spez. Seismographen massiv zwischen Wandlerausgang und Spule-Magnet-System einzufügen. Die Zeitkonstante sollte für den HP, BP größer als die größte Periode des Signalbandes sein. Da die Rückführung auch etwa proportional auf die Dämpfung wirkt, kann u. U. mit einer sehr kleinen offenen Dämpfung gestartet werden oder eine stark

gedämpfte ( $T^{-1}$ )-Übertragungskurve erzeugt werden, oder die endgültige Dämpfung über die HP-, BP-Ecke ( $T^{-1}$ -Anteil) exakt eingestellt werden (volle Übertragungsfunktion). Dieses Vorgehen bei Seismographen ist auf alle Schwinger mit verteilter oder konzentrierter Masse mit konkreter Feder oder verteilter Elastizität anwendbar und bewirkt stark erhöhte Eigenperioden im Signalband bei Erhaltung der Stabilität des Schwingers entsprechend dem unregelmäßigen, kurzperiodischen Zustand gegenüber Störvorgängen mit größerer Periodizität. Die mit der neuen Methode erreichten Astasierungen ( $T_g$ -Werte) liegen über den durch mechanische Vorrichtungen und heute schon übliche Regelungen erreichten Werten. Dadurch entstehen Schwinger mit vielfach "multiplizierter" Eigenperiode. Werte von  $N \approx 5$  für die Astasierung sind zu erreichen, auch bei an sich schon langperiodischen Schwingern. Orientiert man andererseits auf Schwinger mit nicht sehr großer Eigenperiode  $T_g$ , so kann unter Einsatz dieser Lösung mit ebenfalls einem solchen Faktor von  $N \approx 5$  der astasierte Schwinger in seinen Abmessungen auf ca.  $\frac{1}{N}$  verringert werden. Zur Registrierung von z. B. Schallwellen oder Erdbebenwellen in einem begrenzten Spektralbereich gelangt man also u. U. gut zu Miniatursensoren. Bei dem Einsatz für Schwingungsisolierung und -entkopplung im Gerätebau, im Fahrzeugbau und für allgemeine Anwendungen entstehen gegenüber dem heutigen Stand wesentlich "weichere" Aufhängungen über einen größeren Signalbereich und mit einer wesentlich höheren Eigenschwingungsperiode. Für allgemeine "Fahrgastzellen" im Schienen- und Automobilbau ist es möglich, die bisherigen Stoßdämpfer bzw. Schwingungsisolatoren so niederfrequent und außerdem stark gedämpft auszuführen, daß Erschütterungen u. ä. zu solchen langsamen Restreaktionen der Fahrgastzelle führen, daß sie vom Menschen nicht mehr als wesentlich störend empfunden werden (mehr in Richtung *s c h w e b e n d*). Bauwerke und Bunker sowie empfindliche Anlagen (Kernreaktoren) sind prinzipiell ebenso über einen breiten störenden Periodenbereich von z. B. Erdbeben "entkoppelt aufzuhängen". Bei stabilisierten, antiseismischen Plattformen ist ebenfalls eine bessere Entkopplung vom Untergrund, d. h., eine höhere Stabilisierung und eine längere "Entkopplungszeit", zu erwarten. Nach den derzeitigen Erkenntnissen kommt man auch zu einer weicheren Anordnung für die Systemteile z. B. eines "Fallgravimeters", zu Plattformen mit höherer Entstörung (Entkopplung gegen Reststörungen, wissenschaftliche Apparaturen in Satelliten u. ä.) und zu u. U. wesentlichen Verbesserungen bei Problemen der Kurzzeitnavigation und -peilung, -orientierung (z. B. Astronomie u. ä.) im Hinblick auf die verbesserte Positionierung bzw. Installation der dabei verwendeten Apparaturen [47].

#### D a n k

Für die interessante Aufgabenstellung und die Schaffung von Möglichkeiten zum konzentrierten Abschluß der Untersuchungen in den letzten zwei Jahren habe ich den Herren Professoren H. Kautzleben, Potsdam, Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde, und H. Stiller, Berlin, Vizepräsident der AdW der DDR zu danken. Wertvolle Hinweise zur Gestaltung und Abfassung der Ergebnisse verdanke ich Prof. P. Bormann, Potsdam, Leiter des Bereiches Seismologie und Physik des Erdinneren des ZIPE. Nützliche kritische Anmerkungen zur Darstellung und Abrundung der neuen technischen Lehre haben meine Kollegen Dr. habil. Ch. Teupser, Jena, und Dr. habil. H. Harwardt, Potsdam, in der Phase der Manuskriptgestaltung beigesteuert. Für die Hilfestellung bei der Rechnermodellierung der dynamischen Astasierung danke ich Dr.-Ing. D. Kracke, beim Einsatz eines Mikrorechners als Arbeitsmittel für die Realisierung der neuen Lösung Dipl.-Ing. B. Schönherr. Die Ausführung der Arbeiten zum Manuskript, Typoskript und den Abbildungen hatten dankenswerterweise Frau Ch.-M. Dietl, Frau U. Koch und Frau Ch. Model übernommen gehabt.

Literaturverzeichnis

- [1] ARCHANGEL'SKIJ, V.T.; Voprosi teorii dlinnoperiodnogo vertikal'nogo sejsmometra. IZV. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geof. (1960) 10, 1432-1441
- [2] BEKKHEMER, H.; The concept of wide band seismometry. In: XII. Ass. Gen. CSE, Luxembourg (1970), Obs. Royal de Belgique, Comm. Série A, No. 13, Série Géophys. No. 101, 214-220
- [3] BERLAGE, H.P. jun; Seismometer. In: Handbuch der Geophysik, Band IV, Abschnitt IV, 229-526, Berlin 1932
- [4] DUCLAUX, F. Mme.; Sismométrie théorique, Paris 1960, 14-20
- [5] EHLERT, R.; Zusammenstellung, Erläuterung und kritische Beurtheilung der wichtigsten Seismometer mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Verwendbarkeit. Beiträge zur Geophysik, III. Band, 350-474, Leipzig 1898
- [6] EWING, I.A.; Transaction of the Seism. Soc. Japan, 1 (1881), 38 pp.
- [7] FÖLLINGER, O.; Regelungstechnik, 4. verbess. Auflage, Hüthig: Heidelberg 1984
- [8] GALITZIN, B.; Vorlesungen über Seismometrie, dtsh. von O. Hecker, Leipzig 1914
- [9] GILMAN, R.; Report on some experimental long-period seismographs. Bull. Seism. Soc. Am. 50 (1960) 4, 553-560
- [10] GÖLDNER, K.; Mathematische Grundlagen für Regelungstechniker. Leipzig 1968
- [11] GRAY, T.; Trans. Seism. Soc. Japan, 3 (1881), 137
- [12] HAGIWARA, T.; A note on the theory of the vertical motion seismograph. Bull. Earthquake Research Institute, XX, 29 (1942), 337-346
- [13] HURDIG, E., STILLER, H.; Erdbeben und Erdbebengefährdung. Berlin 1984
- [14] JACOBY, H.-D.; Die Entwicklung eines kleinen Seismometers mit breitbandigem Ausgangssignal. Diss. Univ. Stuttgart (1971), 67 S.
- [15] KISSLINGER, C.; Lecture notes on seismological instrumentation. Seismology course 1966/67, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tokyo 1967
- [16] KOHLRAUSCH, F.; Praktische Physik, Bd. 1 u. 2, Leipzig 1950
- [17] LA COSTE, L.J.B.; A new type long period vertical seismograph. Physics 2 (1934), 178-180
- [18] MARTIN, H.; Schwingungslehre. In: Handbuch der Experimentalphysik, Band 17, 1. Teil: Schwingungs- und Wellenlehre. Ultraschallwellen; 3-171, Leipzig 1934
- [19] MEHLHORN, G., MEHLHORN, H.G.; Heureka. Berlin 1979
- [20] MEISSER, O.; Beitrag zur Theorie und Konstruktion von statischen Schweremessern. Z. Geophysik 11 (1935), 221-234
- [21] MEISSER, O.; Beiträge zur Konstruktion eines Vertikalseismometers. Gerlands Beiträge zur Geophysik XIII, (1937), 251-269
- [22] MELTON, B.S.; The La Coste suspension - principles and practice. Geophys. J. R. astr. Soc. 22 (1971), 521-543
- [23] MILNE, J.; Earthquakes and other earth movements. London 1886
- [24] NEUGEBAUER, H.; Verallgemeinerte Darstellung und Inversion von Seismometersystemen nach Methoden der Netzwerktheorie. Berichte des Inst. f. Meteorologie u. Geophysik d. Univ. Frankfurt/Main, Nr. 20, 1970

- [25] FLEßINGER, A.; Theory and realisation of broad-band feedback seismographs.  
In: XII. Ass. Gen. CSE, Luxembourg (1970), Obs. Royal de Belgique,  
Comm. Série A No. 13, Série Géophys. No. 101, 279-284
- [26] RICHARDSON, L.F.; Springs for vertical seismographs.  
Monthly notices of the Royal Soc. Geophysical Supplements I (1926) 8, 403-411
- [27] SAVARENSKIJ, E.F., KIRNOS, D.P.; Elemente der Seismologie und Seismometrie,  
Berlin 1960, 512 S.
- [28] SHOUMAN, M.L.; Feedback systems.  
In: Handbook of Telemetry and Remote Control, 15-88, Hrsg. E.L. Gruenberg,  
New York 1967
- [29] SOHON, F.W., S.J.; Seismometry.  
In: Introduction to theoretical seismology; I.B. Macelwane, S.J. and  
F.W. Sohn, S.J.; Part II, Saint Louis 1932
- [30] STRECKEISEN, G.; Untersuchungen zur Meßgenauigkeit langperiodischer Seismometer.  
Diplomarbeit (1974), Institut für Geophysik der ETH Zürich, 81 S.
- [31] SUTTON, G.H., LATHAM, G.V.; Analysis of a feedback controlled seismometer.  
J. geophys. Res. 69 (1964) 18, 3865-3882
- [32] TAMARU, T.; Über ein neues Vertikalseismometer.  
Verh. d. I. internat. Seism. Konf. (1903), Beilage B 4, Straßburg
- [33] TEUPSER, Ch., ULLMANN, W.; Ein neuer Vertikalseismograph mit galvanometrischer  
Registrierung.  
Z. Geophysik 29 (1963) 3, 115-122
- [34] TEUPSER, Ch.; Persönliche Mitteilung, 1966
- [35] TEUPSER, Ch., UNTERREITMEIER, E.; Der elektronische Dreikomponentenseismograph  
EDS 1, Theorie, Aufbau und Wirkungsweise.  
Veröff. ZIPE Nr. 51 (1977), Potsdam, 114 S.
- [36] THALER, G.I., BROWN, R.G.; Analysis and design of feedback control systems.  
New York 1960
- [37] TOBYAŠ, V.; Astatism of a pendulum seismometer with a vertical plane of oscillation.  
Studia geoph. et geod. 21 (1977), 306-315
- [38] TUCKER, M.I.; An electronic feedback seismograph.  
J. Sci. Instrum. 35 (1958), 167-171
- [39] ULLMANN, W.; Analytische Seismometrie.  
Berlin 1971
- [40] UNTERREITMEIER, E.; Störungen bei langperiodischen Vertikalseismographen. Zur  
Kompensation der Nullage.  
In: Vorträge der KAPG-Tagung "Durchführung und Interpretation seismischer Be-  
obachtungen", Jena, 1968, 77-94, Berlin 1969
- [41] UNTERREITMEIER, E.; Zur Entwicklung der Seismometrie - Tendenzen der Verwirklichung  
des methodischen Fortschritts am Beispiel elektronischer Seismographensysteme.  
FSU Jena, Sektion M.-L., Manuskript, 1972
- [42] UNTERREITMEIER, E.; Zur Erhöhung der Störfreiheit langperiodischer Seismographen-  
systeme.  
Veröff. ZIPE Nr. 25, Potsdam 1973
- [43] UNTERREITMEIER, E.; The transmission of dynamic disturbances in seismograph  
systems.  
Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig 82 (1973) 3, 223-230
- [44] UNTERREITMEIER, E., TEUPSER, Ch., BUDER, H.; Der elektronische Seismograph EDS 1.  
Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig 82 (1978) 6, 441-454

- [45] UNTERREITMEIER, E.; 100 Jahre Forschungsgegenstand Seismograph - Gedanken zur Standortbestimmung in der Seismometrie.  
Vortrag: Kolloquium zur Vollendung des 80. Geburtstages von Prof. em. Dr. habil. Hans Martin, Jena, ZIPE, 7. 6. 1979, Manuskript
- [46] UNTERREITMEIER, E.; Zur Weiterführung der Entwicklungsarbeiten an elektronischen Seismographen 1981 - 1985.  
Studie, ZIPE - Jena/Potsdam 1980
- [47] UNTERREITMEIER, E.; Geregelter astasierter mechanischer Schwinger, insbesondere Seismometer.  
DD - Patentanmeldung - WP G01V 259355, 30. 12. 1983
- [48] USHER, M.J.; Developments in seismometry.  
J. of Phys. E, Sc. Instr. 6 (1973), 501-507
- [49] WESTPHAL, W.H. (Hrsg.); Physikalisches Wörterbuch.  
Springer Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1952
- [50] WIECHERT, E.; Ein astatiches Pendel hoher Empfindlichkeit zur mechanischen Registrierung von Erdbeben.  
Beitr. z. Geophys. 6 (1904), 435-450
- [51] WILIP, I.; Zur Theorie und Konstruktion von Vertikalseismographen.  
Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig 19 (1928), 387-401