

**Verwendungszweck.** Das Spektrometer ist ein Frequenzanalysator zum Untersuchen von elektrischen und akustischen Frequenzgemischen; es gestattet, die Gemische mit so hoher Geschwindigkeit aufzulösen, daß auch das Spektrum von zeitlich schnell veränderlichen Vorgängen unmittelbar sichtbar gemacht und mit einer Schmalfilm-Kamera fortlaufend (etwa 8 Bilder je Sekunde) aufgenommen werden kann. Das Gerät wird z. B. verwendet zum Analysieren von Luftschall und Körperschall (Erschütterungen) bei der Lärmbekämpfung und Beseitigung von mechanischen Störungen an Maschinen oder in der Akustik zum Untersuchen von Sprache, Musikinstrumenten usw. (s. auch S. 229).

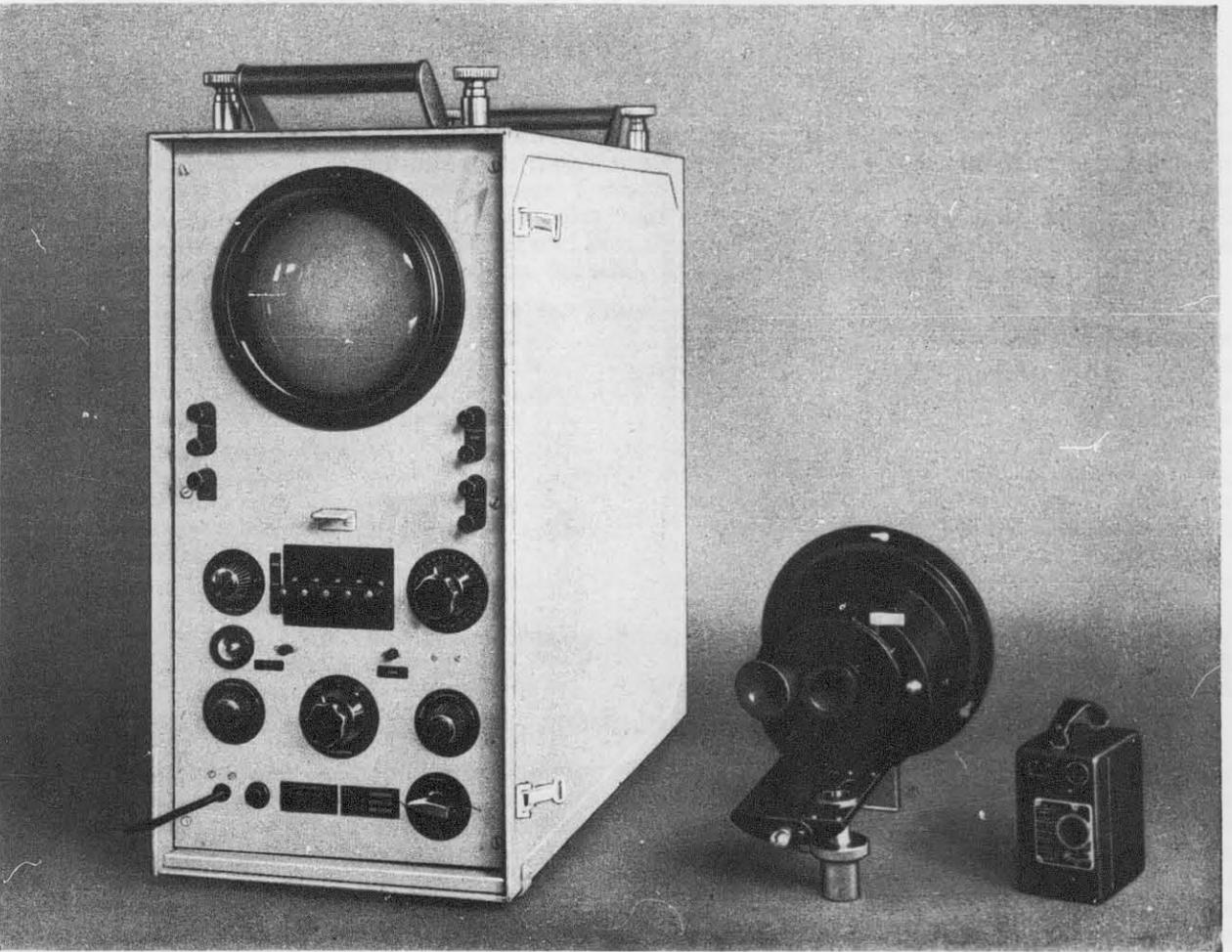
**Frequenzbereich (Eckfrequenzen der Filter)**

Ausführ. 1 (Rel mse 2030 a)	36 bis 18 000 Hz
Ausführ. 2 (Rel mse 2030 b)	225 bis 112 000 Hz
Ausführ. 3 (Rel mse 2030 c)	5 bis 750 Hz
durch Filter aufgeteilt in	27 Kanäle
Zeit für eine Analyse	$\frac{1}{10}$ s
Meßunsicherheit	etwa $\pm 10\%$
Erforderliche Eingangsspannung	etwa 0,4 V (0,7 bzw. 0,3 V) *) je Filter
Eingangsscheinwiderstand	etwa 50 k $\Omega$ (5 k $\Omega$ bzw. 1 M $\Omega$ )
<b>Netzanschluß:</b>	
Netzfrequenz	49 bis 51 Hz
Netzspannung	220 V $\pm 5\%$
mit Vorsatztransformator Rel na 44e	110, 125, 150, 220, 240 V
Leistungsaufnahme	etwa 150 VA
Sicherung	1500 mA

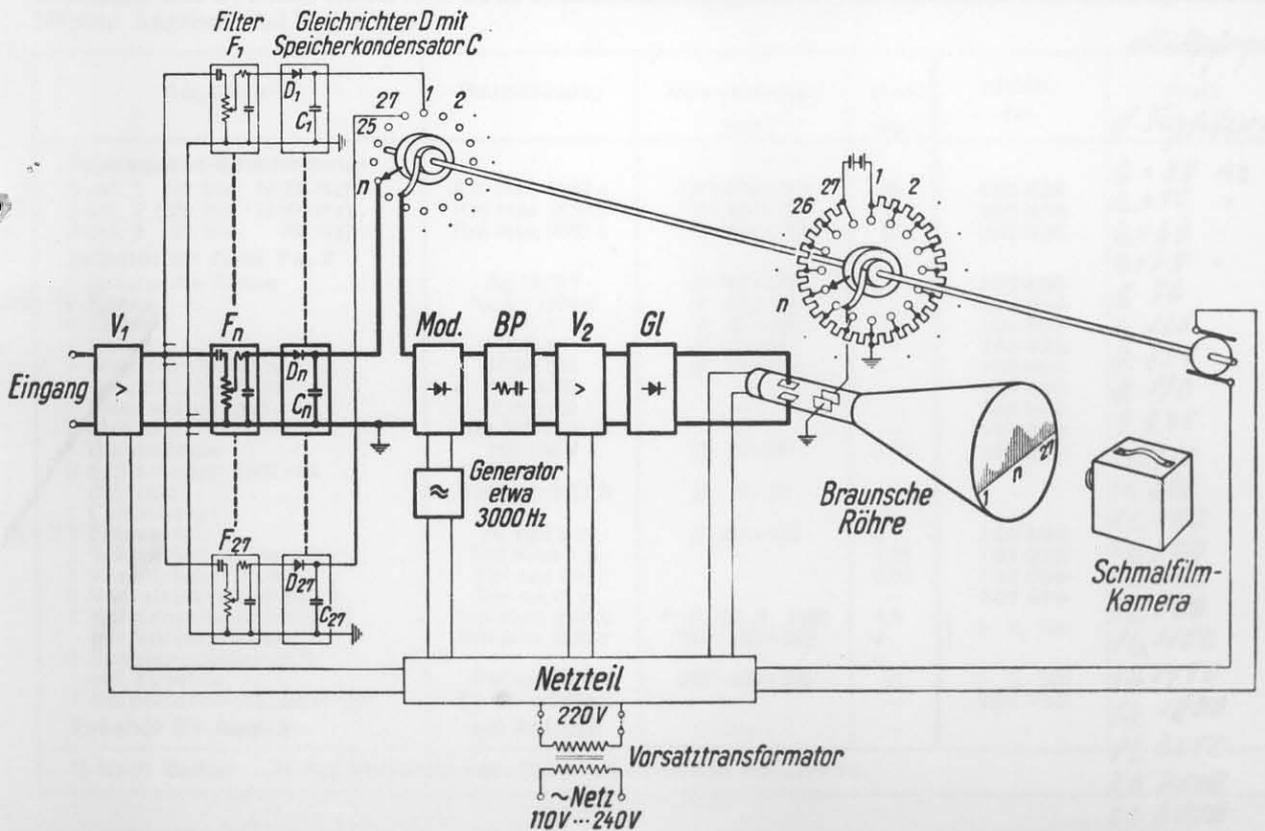
\*) Klammerwerte gelten für die Ausführung Rel mse 2030b bzw. 2030c.

**Arbeitsweise.** Das aufzulösende elektrische oder akustische Frequenzgemisch wird unmittelbar bzw. über ein Mikrofon oder einen Körperschall-Abtaster und einen Vorverstärker V<sub>1</sub> gleichzeitig den 27 parallelgeschalteten Filtern F<sub>1</sub> ... F<sub>27</sub> zugeführt. Die Ausgangsspitzenspannungen der einzelnen Filter gelangen über Gleichrichter D und Speicherkondensatoren C zu den Kontakten eines schnellumlaufenden Schalters. Die abgetasteten Spannungen modulieren eine Trägerfrequenz, die nach Verstärkung und Gleichrichtung auf das in der Senkrechten ablenkende Plattenpaar einer Braunschen Röhre gegeben wird. Durch synchrone Zeitablenkung in der Waagerechten wird erreicht, daß die Ausgangsspannungen der einzelnen Filter als senkrechte Linien nebeneinander erscheinen. Die Abtastung erfolgt etwa 20 mal je Sekunde, so daß für das Auge auf dem Schirm der Braunschen Röhre ein ständiges Bild des Spektrums erscheint. Die 27 Filter lassen sich auch einzeln einschalten, z. B. zur Aufnahme von Oszillogrammen. Nähere Angaben Rel beschr 745.

Gegenstand	Bezeichnung	Abmessungen mm	etwa kg	Listen- Nr.	Preis <i>d. Tagiller</i>
<b>Tonfrequenz-Spektrometer</b>					
Ausf. 1 (36 bis 18000 Hz)	Rel mse 2030 a	705 x 695 x 315	85	106 832	2.380 HZ
Ausf. 2 (225 bis 112000 Hz)	Rel mse 2030 b	705 x 695 x 315	85	106 833	2.500 "
Ausf. 3 (5 bis 750 Hz)	Rel mse 2030 c	705 x 695 x 315	85	107 554	3.063 "
<b>Zubehör für Ausf. 1 u. 2</b>					
1 Braunsche Röhre	Ag 18/S 1	∅ 180 x 500	—	106 936	4.270 "
1 Röhre	RENS 1374 d	∅ 63 x 135	—	106 913	2.96 "
2 Röhren	AC 2	∅ 37 x 100	—	106 927	6.125 "
1 Röhre	AB 2	∅ 29 x 81	—	106 928	7.154 "
2 Gleichrichterröhren	RGN 564	∅ 52 x 110	—	106 904	8.190 "
1 Gleichrichterröhre	NG 3020	—	—	106 937	9.245 "
1 Eisenwiderstand	EW 1102	—	—	105 942	10.310 "
1 Stromtor	Ste 350/0,2/0,3	—	—	106 938	11.390 "
1 Glimmlampe	110/130 V	∅ 15 x 50	0,02	106 941	12.480 "
3 Sicherungen 1500 mA (2 Ersatz)	Rel sich 8 Tz 5	∅ 5 x 20	—	—	13.580 "
1 Cellonlinal	—	—	—	—	14.680 "
1 Fotovorsatz <sup>1)</sup>	ZL opt 3 b	∅ 200 x 150	3	106 834	15.780 "
1 Schmalfilm-Kamera B <sup>1)</sup>	Fot Kika 1 b	—	1,45	T 97 012	16.880 "
1 Vorsatzlinse 18 cm <sup>1)</sup>	Fot opt 3 k	—	0,02	T 97 060	17.980 "
1 Vorsatztransformator <sup>1)</sup>	Rel na 44e	—	—	107 340	19.080 "
1 Kondensator-Mikrofon <sup>1)</sup>	Rel mph 2001 b	Fuß 220 ∅, 1630	4,8	s. S. 192	20.180 "
mit Vorverstärker	Rel msv 2036 a	350 x 120 x 255	9	—	21.280 "
1 Schalldruckmesser <sup>1)</sup>	Rel msv 5 d	500 x 400 x 230	21	s. S. 190	22.380 "
mit Zubehör	ZL entw 4713 a	—	—	107 719	23.480 "
1 Körperschall-Abtaster <sup>1) 2)</sup>	auf Anfrage	—	—	—	24.580 "
<b>Zubehör für Ausf. 3</b>					
1) Nach Bedarf. 2) Als Vorverstärker: Schalldruckmesser Rel msv 5d.					



Listen-Nr. 106 832 mit Listen-Nr. 106 834 und T 97 012



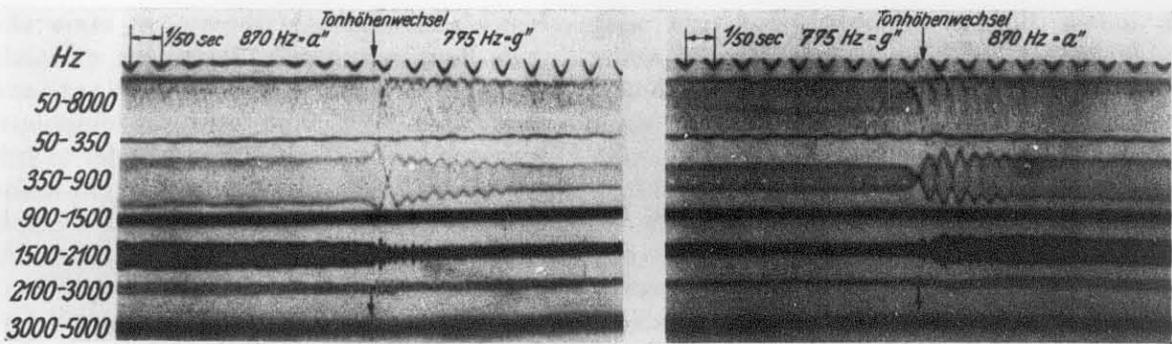


Abb. 12. Tonhöhenübergang bei einer Flöte

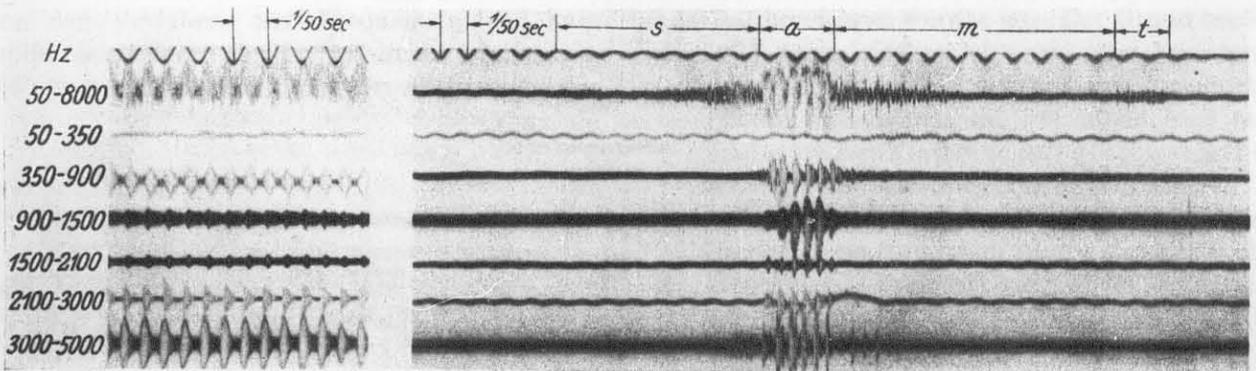


Abb. 13. Vokal „a“ und das Wort „Samt“

anderen Tonhöhe angeblasen, und mit Hilfe einer Schleifklappe auf die gewünschte, schlecht ansprechende Tonhöhe übergeführt. Den Komponisten ist diese Tatsache wohl bekannt, und sie bringen solche Töne in ihren Sätzen stets mit Vorschlag.

Es sollen noch zwei Aufnahmen gezeigt werden, die die Verwendungsfähigkeit der Meßapparatur für die Untersuchung von Sprache demonstrieren sollen. In Abb. 13 ist der Vokal „a“ dargestellt, um das „a“ in dem Wort „Samt“ derselben Abbildung leicht identifizieren zu können. Da die hohen Frequenzen des „s“ über dem Bereich von 5000 Hz liegen, sind sie auch in dem obersten Siebbereich nur verhältnismäßig schwach vertreten. Das „a“ kommt klar zum Ausdruck und ist auch noch stimmhaft im „m“ zu verfolgen. Eine ziemlich große Pause ist dann bis zum „t“.

#### Zusammenfassung

Die individuelle Eigenart der Musikklänge ist durch den zeitlichen Verlauf der Amplitude und des Teiltonspektrums bestimmt. Geringe Abweichungen von diesen Eigenschaften eines Instruments verändern bereits sehr stark den Klangcharakter und unter Umständen auch die musikalische Brauchbarkeit. Mit Siebketten gleichzeitig gemachte Aufnahmen von Klängen geben Aufschluß über den An- und Abklingvorgang und über den zeitlichen Verlauf des Teiltonspektrums.

Herrn Werner Lippert danke ich für die Hilfe bei der Durchführung der umfangreichen Messungen.

Ferner danke ich der Firma Telefunken, die mir durch die liebenswürdige Vermittlung des Herrn Prof. Dr. Schröter die für die Meßapparatur notwendigen zahlreichen Röhren zur Verfügung gestellt hat. Besonders danke ich der Gesellschaft zur Förderung des Funkwesens für die finanzielle Unterstützung.

(Eingegangen am 26. Oktober 1935)

### Das „Tonfrequenz-Spektrometer“, ein Frequenzanalysator mit äußerst hoher Analysiergeschwindigkeit und unmittelbar sichtbarem Spektrum

Von E. Freystedt, Berlin-Siemensstadt

(Mitteilung aus dem Zentrallaboratorium  
des Wernerwerks der Siemens & Halske A.G.)

Inhalt: 1. Einleitung. 2. Aufbau und Wirkungsweise.  
3. Meßbeispiele. 4. Zusammenfassung.

#### 1. Einleitung

Für die Untersuchung von elektrischen und akustischen Frequenzgemischen gewinnt die Frequenzanalyse immer mehr an Bedeutung. Bei der Fernübertragung von Nachrichten und Meßwerten, bei der Fernsteuerung von Maschinen und dergleichen zwingt die ständig zunehmende Verwendung von elektrischen und akustischen Trägerfrequenzkanälen zu einer Weiterentwicklung der Störungsmeßtechnik. Es ist nicht nur erforderlich,

die Größe einer Störung in den einzelnen Übertragungskanälen zu messen, sondern es muß auch ihr Charakter festgestellt werden, der sich in ihrer Frequenzabhängigkeit ausspricht; denn hierdurch wird es möglich, wertvolle Rückschlüsse auf die Ursachen der Störungen zu ziehen, so daß sie sich wesentlich leichter verringern oder beseitigen lassen. Aus diesem Grunde spielt die Messung von Körper- und Raumschall mit Frequenzanalysatoren z. B. in der Akustik zur Lärmbekämpfung, im Maschinenbau zur Erfassung von Störungen an Maschinen und in der Phonetik bei der Untersuchung von Sprache und Musik eine hervorragende Rolle.

Von den Verfahren zur Frequenzanalyse hat gegenüber den älteren oszillographischen Methoden neuerdings besonders das Suchtonverfahren große

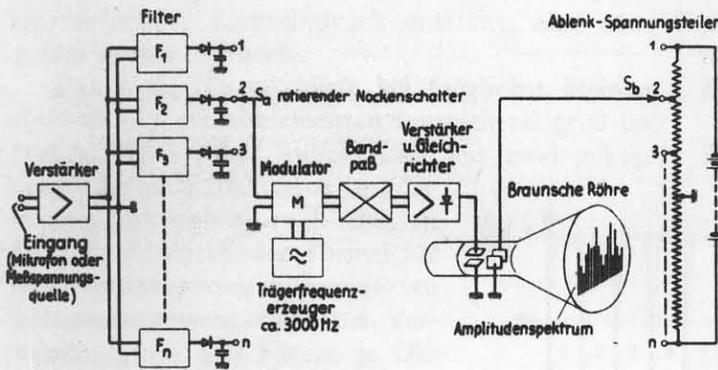


Abb. 1. „Tonfrequenz-Spektrometer“

Bedeutung erlangt. Es hat den Vorteil, bei verhältnismäßig großem Auflösungsvermögen die einzelnen Teilkomponenten eines Frequenzgemisches nacheinander unmittelbar anzuzeigen oder sogar automatisch aufzuschreiben. Ein empfindlicher Nachteil ist jedoch in vielen praktischen Fällen noch die verhältnismäßig große Zeit, die für eine Analyse erforderlich ist. Sie liegt für den normalen Tonfrequenzbereich und für mittlere Analysierschärfe etwa zwischen 1 und 10 Min. Diesen Zeitaufwand wesentlich herabzudrücken ist mit dieser Methode nicht möglich, da eine physikalische Grenze vorhanden ist, die von der Einschwingzeit des verwendeten Filters und von dem Verhältnis der Lochbreite des Filters zu der Breite des aufzulösenden Bandes abhängt. Die Analysierzeit kann erheblich nur dann vermindert werden, wenn man zur Analyse nicht nur einen Frequenzkanal, sondern eine größere Anzahl gleichzeitig arbeitender Kanäle benutzt. Hierdurch gelangt man zu der untersten Grenze in der Analysierzeit, die überhaupt physikalisch möglich ist, nämlich der Einschwingzeit des schmalsten Kanals.

Auf der vorjährigen Physiker- und Mathematiker-tagung haben Erwin Meyer und E. Thienhaus<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> E. Meyer u. E. Thienhaus, Schallspektroskopie, ein neues Verfahren der Klanganalyse. Zeitschr. f. techn. Phys. 15 (1934), 630.

über ein Analysierverfahren mit einem akustischen Beugungsgitter vorgetragen, das im Prinzip eine Mehrkanalanordnung darstellt. So aussichtsreich dieses Verfahren auch zunächst erscheinen mag, so stehen seiner praktischen Anwendung doch sehr große Schwierigkeiten gegenüber, die im wesentlichen durch die hohen Anforderungen und den schwierigen Aufbau des akustischen Beugungsgitters bedingt sind.

Es ist eigentlich verwunderlich, daß die so einfache Methode, eine größere Anzahl von Filtern über den zu analysierenden Frequenzbereich zu verteilen, so oft verworfen und als praktisch unbrauchbar bezeichnet worden ist. Der Grund hierfür liegt wohl darin, daß es schwierig und kostspielig erschien, eine genügende Anzahl von geeigneten Filtern aufzubauen und vor allem, daß man kein einfaches Verfahren zur gleichzeitigen Anzeige für alle Filter gefunden hatte. Es läßt sich jedoch mit verhältnismäßig geringem Aufwand eine praktisch in den meisten Fällen hinreichende Trennschärfe erzielen, wenn man die Filter logarithmisch über den zu analysierenden Frequenzbereich verteilt und z. B. 3 Filter je Oktave verwendet. Man braucht dann für den wichtigsten Frequenzbereich von etwa 40—5000 Hz ungefähr 22 Filter. Die Aufgabe, die Ausgangsspannungen der einzelnen Filter so gut wie gleichzeitig zur Anzeige zu bringen, kann dadurch gelöst

werden, daß man sie zeitlich nacheinander mit Hilfe eines sehr rasch umlaufenden Schalters abtastet und auf dem Schirm einer Braunschen Röhre abbildet. Die Zeit für eine Analyse sinkt dann auf die Einschwingzeit des schmalsten Filters, d. h. auf etwa  $\frac{1}{10}$  Sek.

## 2. Aufbau und Wirkungsweise

Ein nach diesen Gesichtspunkten aufgebauter Analysator soll im folgenden näher beschrieben werden. Den prinzipiellen Aufbau des sogenannten „Tonfrequenzspektrometers“ zeigt Abb. 1. Das aufzulösende elektrische oder akustische Frequenzgemisch wird entweder direkt oder über ein Mikrofon und einen Vorverstärker gleichzeitig auf die parallel geschalteten Filter  $F_1$  bis  $F_n$  gegeben (im vorliegenden Falle 22). Die Ausgangsspitzenspannungen der einzelnen Filter werden über Gleichrichter Speicherkondensatoren zugeführt und von hier mit Hilfe des umlaufenden Schalters  $S_a$  nacheinander in schneller Folge abgetastet. Die Abtastspannungen modulieren im Modulator  $M$  eine Trägerfrequenz von etwa 3000 Hz, die nach Verstärkung und Gleichrichtung unmittelbar auf das in der Senkrechten ablenkende Plattenpaar des Braunschen Rohres gegeben wird. Die synchrone Zeitablenkung in horizontaler Richtung wird durch einen gleichlaufenden Schalter ( $S_b$ ) geliefert, der

einem Spannungsteiler eine sich fortlaufend ändernde Gleichspannung entnimmt und auf das in der Waagerechten ablenkende Plattenpaar gibt, so daß die Ausgangsspannungen der einzelnen Filter  $F_1$

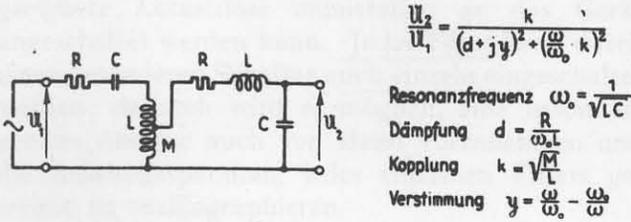


Abb. 2. Schaltbild eines Filters bestehend aus zwei gekoppelten Resonanzkreisen

bis  $F_n$  als senkrechte Linien nebeneinander auf einer Grundlinie erscheinen. Die Abtastung sämtlicher Filter muß sich so schnell wiederholen, daß ein bleibender Lichteindruck entsteht, also etwa 20mal in der Sekunde.

Damit die Trennschärfe bei möglichst kleinem Aufwand an Schaltelementen hinreichend groß ist, besteht jedes Filter zweckmäßig aus zwei gekoppelten Resonanzkreisen in günstigster Ankopplung (vgl. Abb. 2). In der nebenstehenden Formel für das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung wird bei Verwendung von drei Filtern je Oktave zweckmäßigerweise die Dämpfung  $d \approx 12$  v.H. und die Kopplung  $k \approx 18$  v.H. gewählt. Dadurch wird erreicht, daß sich die Durchlaßkurven zweier benachbarter Filter, wie aus Abb. 3, Kurve a ersichtlich, in etwa 0,7 ihrer Maximalhöhe schneiden, so daß für einen Ton bestimmter Amplitude die Effektivwertsumme der angezeigten Linien möglichst unabhängig von der Lage des Tones bleibt. Der Vorteil der größeren Flankensteilheit des Koppelkreisfilters gegenüber einem einfachen Resonanzkreis ist gleichfalls aus Abb. 3 zu ersehen (Kurve a und c). Kurve b stellt die Durchlaßkurve eines neuerdings für Grobanalysen vielfach verwendeten Oktavfilters dar<sup>2)</sup>. Abb. 3 zeigt weiterhin die Verteilung der 22 Filter über den gesamten Frequenzbereich von 36 bis 5500 Hz.

Die Gleichrichtung und Speicherung der Filterausgangsspannungen hat den Zweck, trotz der äußerst kurzen Abtastzeit von nur etwa 1 msec noch eine eindeutige Anzeige zu ermöglichen. Durch

Verwendung von kleinsten Kupferoxydulgleichrichtern in sogenannter „Pillenform“ und genügend kleinen Speicherkondensatoren läßt sich der Aufwand aufs äußerste herabsetzen. Ein besonderer Vorteil der Gleichrichtung besteht noch darin, daß die Speicherkondensatoren durch eine einfache Umschaltung so vergrößert werden können, daß sie sich wesentlich langsamer entladen; ein nur kurze Zeit vorhandenes Spektrum wird dann längere Zeit für die Beobachtung festgehalten, außerdem kann dann bei schnell veränderlichen Spektren ein zeitlicher Mittelwert gebildet werden. Sämtliche Speicherkondensatoren werden etwa 20mal je Sekunde abgetastet, damit ein für das Auge ruhendes Bild des Spektrums auf dem Schirm der Braunschen Röhre entsteht. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an den Abtastschalter. Bildet man diesen jedoch in geeigneter Weise als umlaufenden Nockenschalter mit prellungsfreien Kontakten aus, so läßt sich eine hohe Betriebssicherheit und Lebensdauer gewährleisten.

Damit auch schnell veränderliche Vorgänge im Spektrum genauer verfolgt und festgehalten werden

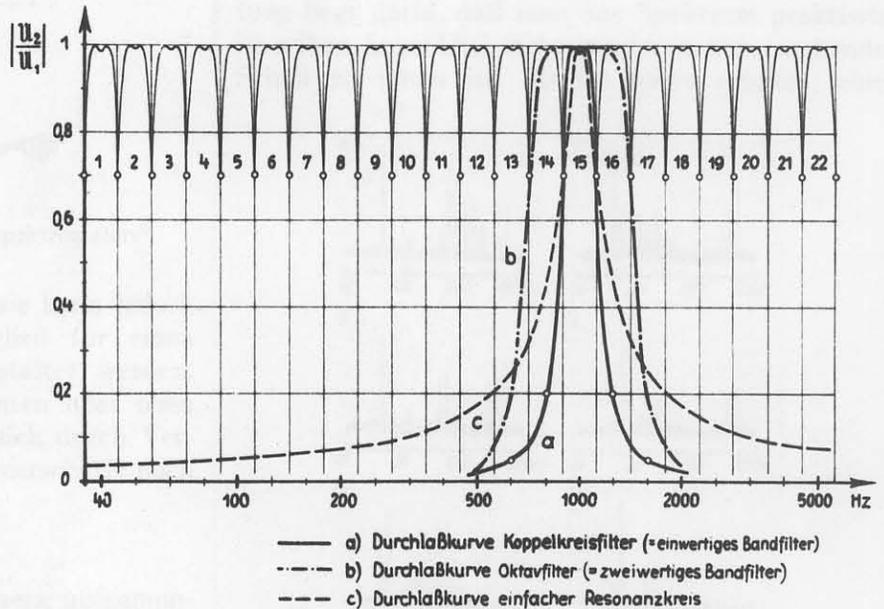


Abb. 3. Anordnung der Filter im Frequenzbereich 36 . . . 5500 Hz

können, ist eine photographische Registrierung erforderlich. Da die Einschwingzeit für das gesamte Spektrum nur etwa  $\frac{1}{10}$  Sek. beträgt, können zur vollen Ausnutzung der Leistungsfähigkeit des Analysators in der Sekunde etwa 10 Aufnahmen gemacht werden (z. B. mit Schmalfilmkamera). Eine zweckmäßige Vereinigung der geschilderten Meßanordnung zu einem für die Praxis besonders geeigneten handlichen Gerät zeigt Abb. 4. Unter dem Schirm der Braunschen Röhre befinden sich die zur Einstellung erforderlichen Bedienungsknöpfe, wie z. B. Anodenspannung, Bildbreite, Strahlschärfe, Empfindlichkeit, Einstellung der Abklingzeitkonstante und Übersteuerungsschutz. Das gesamte Gerät kann unmittelbar vom Netz aus betrieben werden.

<sup>2)</sup> H. G. Thilo u. U. Steudel, Analyse von Geräuschen und ihr Zusammenhang mit der Lautstärke. Wiss. Veröff. Siemenskonz. (1) 14 (1935), 78; H. G. Thilo u. E. Freystedt, Meßgeräte für Schalluntersuchungen. Siemens-Zeitschr. (5) 15 (1935), 153.

Die für den Maximalwert einer angezeigten Linie erforderliche Eingangsspannung beträgt etwa 0,3 Volt, so daß z. B. bei Körperschalluntersuchungen eine geeignete, Abtastdose unmittelbar an das Gerät angeschlossen werden kann. Jedes Filter kann durch einen besonderen Schalter auch einzeln eingeschaltet werden; dadurch wird es möglich, eine besonders genaue Analyse auch von Hand vorzunehmen und die Ausgangsspannung jedes einzelnen Filters getrennt zu oszillographieren.

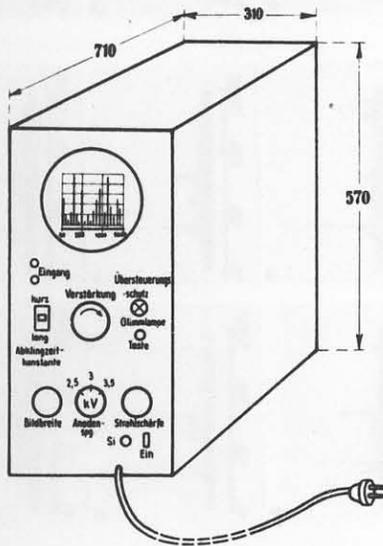


Abb. 4. Ansicht des „Tonfrequenz-Spektrometers“

Die Amplitudenskala ist linear, sie kann jedoch durch ein nichtlineares Zwischenglied für einen gewissen Bereich logarithmisch gestaltet werden. Der Frequenzbereich kann nach unten oder oben leicht erweitert werden, auch läßt sich durch Vergrößerung des Aufwandes die Analysierschärfe noch steigern.

### 3. Meßbeispiele

Einige mit einer Schmalfilmkamera aufgenommene Frequenzanalysen von zeitlich konstanten und zeitlich veränderlichen Vorgängen zeigen am besten die Leistungsfähigkeit und die vielseitige Verwendbarkeit dieses Gerätes. In Abb. 5 ist z. B. das Geräuschkennlinien eines Motors aufgenommen. Das Bild ist eine Vergrößerung von einer Schmalfilmmomentaufnahme. Abb. 6 zeigt Beispiele von Klanganalysen verschiedener Vokale. Beim „a“ tritt der Grundton bei 100 Hz deutlich in Erscheinung, der zweite und dritte Oberton bei 200 bzw. 300 Hz sind noch schwach zu erkennen. Besonders ausgeprägt sind die drei Formantgebiete um 750, 1200 und 3000 Hz. Beim „ä“ verlagern sich die Formantgebiete wesentlich, die beiden Hauptformanten liegen um 600 und 2500 Hz. Die übrigen Aufnahmen von Vokalen zeigen deutlich die charakteristische Lage der einzelnen Formantgebiete. Ein Vergleich dieser Aufnahmen mit ent-

sprechenden Ergebnissen anderer Meßverfahren<sup>3)</sup> zeigt im wesentlichen Übereinstimmung, jedoch sind gewisse Unterschiede vorhanden, die sich aus den Eigentümlichkeiten der einzelnen Sprecher er-

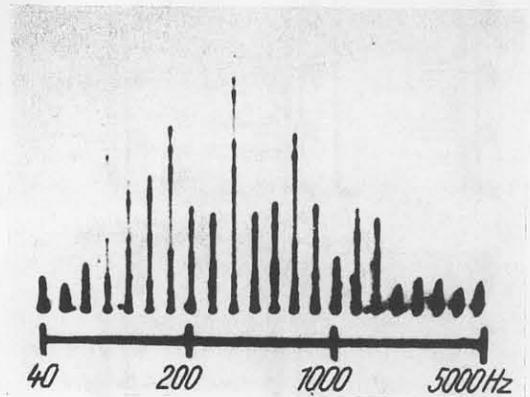


Abb. 5. Beispiel einer Klanganalyse:  
Geräusch eines Motors

klären lassen. Der große Vorteil dieser Meßeinrichtung liegt darin, daß man das Spektrum praktisch im selben Augenblick sieht, wo der zu untersuchende Schall zu hören ist. Es ist somit möglich, eine

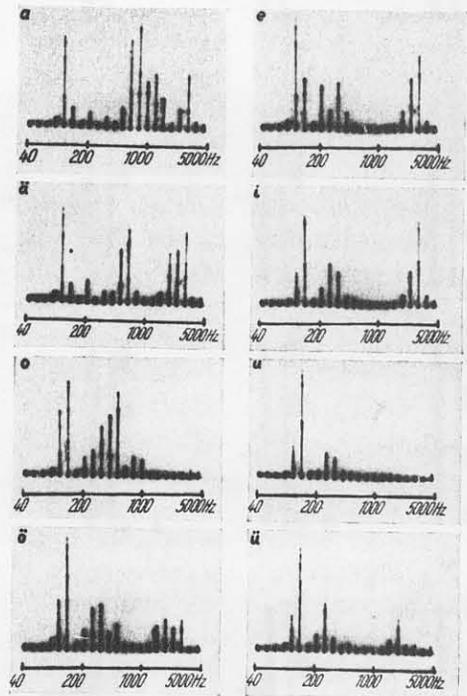


Abb. 6. Klanganalysen verschiedener Vokale

große Anzahl von Stimmen innerhalb kürzester Zeit zu analysieren, sie auf ihren unterschiedlichen Klangcharakter zu untersuchen und daraus wertvolle Schlüsse zu ziehen. Auch Untersuchungen über den Einfluß der Lautstärke auf den Klangcharakter sind sehr schnell und anschaulich durchführbar.

<sup>3)</sup> E. Thienhaus, Neuere Versuche zur Klangfarbe und Lautstärke von Vokalen. Zeitschr. f. techn. Phys., 15 (1934), 637.

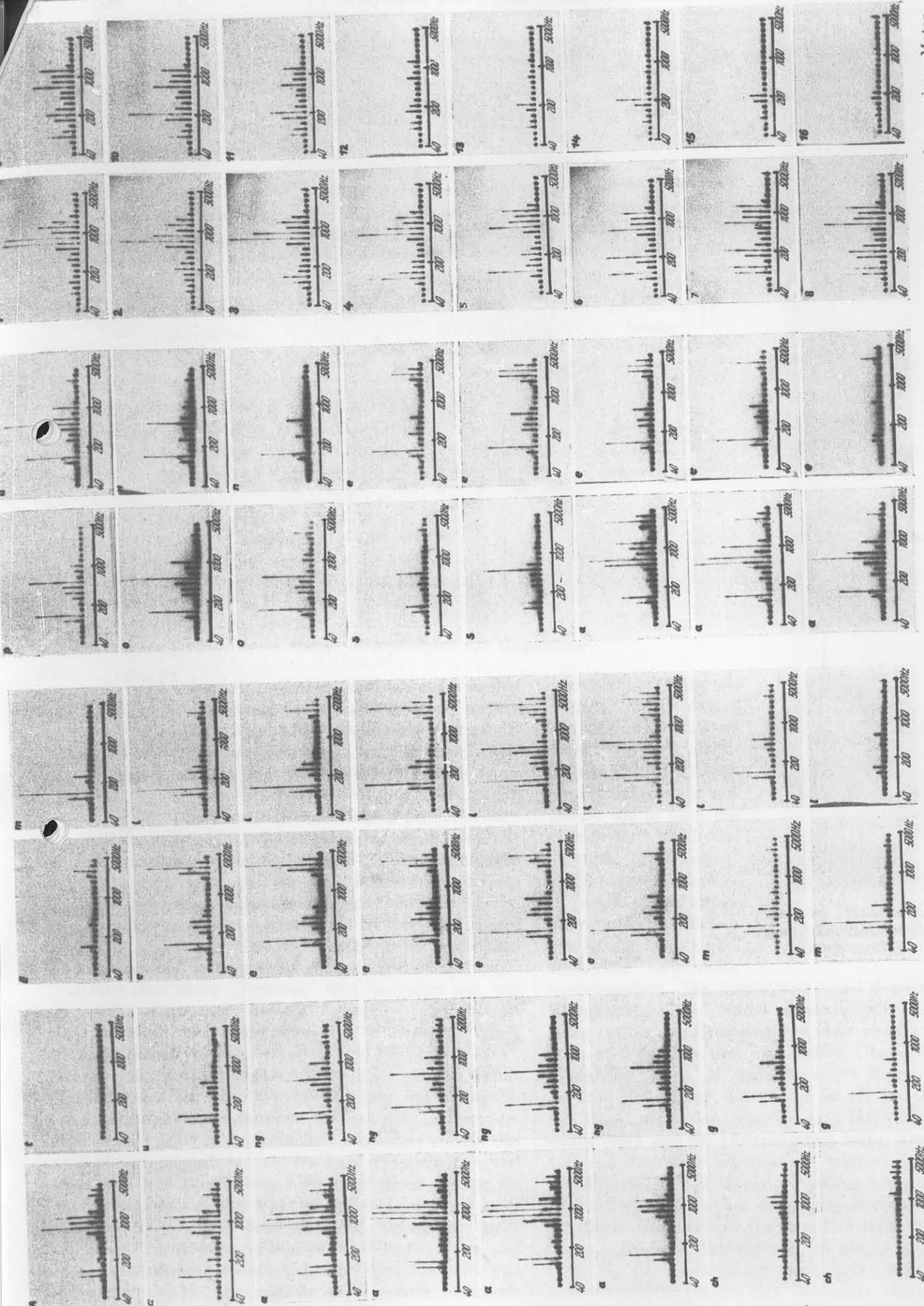


Abb. 8. Geräuschspektren eines Motor-  
generators mit Zahnradgetriebe, langsam  
auslaufend

c) „Posaune“

b) „Emil“

a) „Achtung“

Abb. 7. Klanganalysen langsam gesprochener Wörter

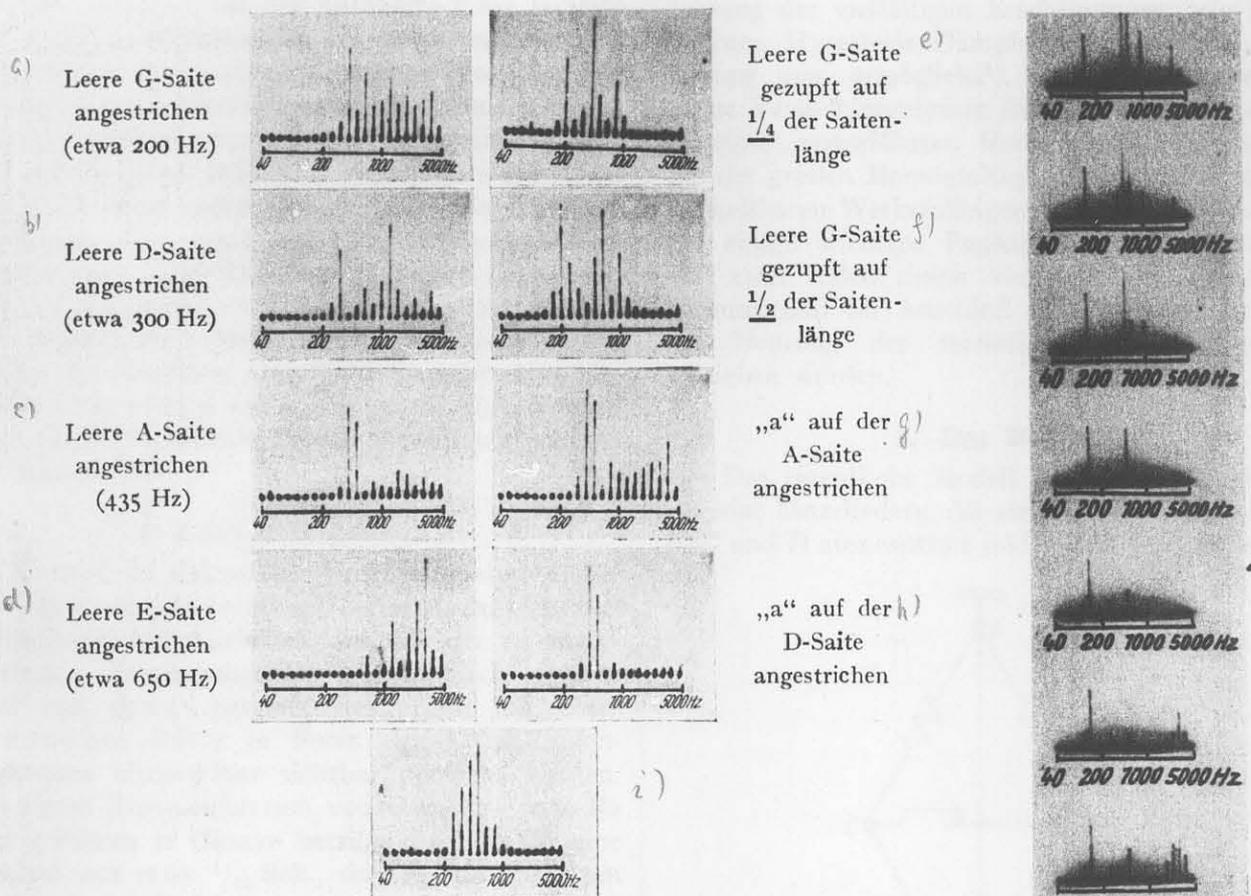


Abb. 9. Klanganalysen von Geigentönen

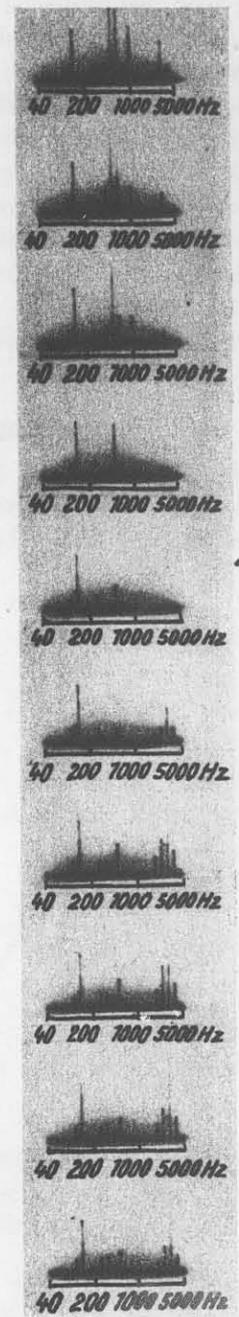
Infolge der äußerst hohen Analysiergeschwindigkeit ist es mit diesem Gerät sogar möglich, zeitlich sehr schnell veränderliche Vorgänge, wie etwa die Sprache, in jedem Zeitpunkt im Spektrum festzuhalten. Abb. 7 zeigt einige Analysierbeispiele von langsam gesprochenen Wörtern, wie „Achtung“, „Emil“, „Posaune“ (8 Aufnahmen pro Sekunde). Beim ersten Wort ist z. B. zu erkennen, daß die Grundtöne der Vokale „a“ und „u“ vor dem nachfolgenden Konsonanten stark in der Tonhöhe ansteigen, was einer stärkeren Anspannung der Stimmbänder entspricht. Das „ch“ ist bei Frequenzen um 3000—5000 Hz noch deutlich zu erkennen. Besonders interessant ist auch das stimmhafte „ng“. Bei dem Wort „Posaune“ fällt besonders auf, wie beim Übergang vom „o“ zum „a“ der Hauptformant des stimmhaften „s“ kurzzeitig stark hervortritt.

Ein Beispiel aus der Technik ist in Abb. 8 dargestellt. Es zeigt die Veränderung des Geräuschspektrums eines langsam auslaufenden Motorgenerators mit Zahnradgetriebe. Aufnahme 1 zeigt das Hauptgeräusch bei vollem Lauf zwischen 640 und 1600 Hz. Die höchste Linie liegt zuerst bei 800 Hz (Aufnahme 1) und sinkt bei Aufnahme 2 auf etwa 640 Hz ab. Bei den folgenden Aufnahmen sieht man das langsame Abfallen der höheren Töne und das Auftreten zweier tiefer Teiltöne bei etwa 100 bzw. 200 Hz, die zeitlich nacheinander mehrmals

verschiedene Höhe erreichen. Es ist daraus zu erkennen, daß an diesen Stellen ausgesprochene Werkstoffeigenschaften auftreten, die je nach der Umdrehungszahl des Motors verschieden stark angeregt werden.

In Abb. 9 sind einige interessante Aufnahmen von Klanganalysen verschiedener Geigentöne wiedergegeben. Die Aufnahmen a und d zeigen die Klangspektren der leeren angestrichenen Saiten. Beim „g“ ist der Grundton von etwa 200 Hz kaum noch zu erkennen und ein starker Obertongehalt vorhanden. Beim „d“ tritt die vierte Harmonische ( $\approx 1200$  Hz) hervor, die stärker ist als der Grundton, beim „a“ ist der Grundton (435 Hz) verhältnismäßig stark und der Obertongehalt klein. Das „e“, auf einer Stahlsaiten angestrichen, zeigt wieder einen verhältnismäßig schwachen Grundton und starken Oberwellengehalt, wobei die zweite und besonders die fünfte Harmonische ( $\approx 3000$  Hz) stark hervortreten. Bei der Aufnahme e ist die G-Saite auf etwa  $\frac{1}{4}$  der Saitenlänge angezupft, wobei die 2. Harmonische ( $\approx 400$  Hz) besonders stark her-

Abb. 10. Probestreifen einer Schmalfilmaufnahme (Originalgröße)



vortritt, während bei der Aufnahme *f* die G-Saite auf etwa  $\frac{1}{2}$  der Saitenlänge angezupft ist, wodurch die 3. und 5. Harmonische (etwa 600 bzw. 1000 Hz) besonders stark hervortreten. Aufnahme *g* und *h* zeigen den verschiedenen Oberwellengehalt beim „a“ auf der A- bzw. D-Saite. Aufnahme *i* zeigt das Spektrum beim Anklopfen des Geigenbodens, ein Spektrum, das sonst nur sehr schwer erhalten werden kann. Die Resonanzfrequenzen liegen vorwiegend im Gebiet von etwa 250 bis etwa 800 Hz. Dies erklärt auch die großen Unterschiede in der Größe der einzelnen Grundtöne bei den verschiedenen Geigentönen (Aufnahme *a* bis *d*). Abb. 10 zeigt einen Probestreifen von Schmalfilmaufnahmen in Originalgröße.

#### 4. Zusammenfassung

Es wird ein elektrischer Frequenzanalysator beschrieben, der mit einer größeren Anzahl parallel geschalteter Filter arbeitet, die über den zu analysierenden Frequenzbereich logarithmisch verteilt sind und deren Ausgangsspannungen mit einer Braunschen Röhre in Form eines Amplitudenspektrums unmittelbar sichtbar gemacht werden. Bei einem Frequenzbereich von etwa 40—5000 Hz und 3 Filtern je Oktave beträgt die Zeit für eine Analyse nur etwa  $\frac{1}{10}$  Sek., so daß das Spektrum praktisch gleichzeitig mit dem zu untersuchenden elektrischen oder akustischen Vorgang wahrgenommen werden kann. Um schnell veränderliche Spektren festzuhalten, können mit einer Schmalfilmkamera etwa 10 Aufnahmen je Sekunde gemacht werden. Es werden Beispiele von Analysen elektrischer und akustischer Frequenzgemische gezeigt, die nach diesem Verfahren aufgenommen worden sind.

Zum Schluß möchte ich meinen Dank aussprechen: Herrn Dr. F. Bath für seine wertvolle Mitarbeit an der Entwicklung dieses Meßgerätes und Herrn Dr. F. Beck für die ausgezeichnete Durchführung des optischen Teils der Arbeiten, deren Lösung anfänglich besonders große Schwierigkeiten bereitet hat.

(Eingegangen am 28. Oktober 1935)

### Praktische Versuche an einem Werkstoffmodell

Von W. Späth, Wuppertal

Inhalt: Einleitung. — 1. Beschreibung eines ausgeführten Werkstoffmodells. 2. Versuche zur Nachwirkung. 3. Versuche zur Zerreißprüfung. 4. Wiederholte Belastungen. — Zusammenfassung.

#### Einleitung

Vor einiger Zeit wurde in mehreren Arbeiten ein Modell zur Veranschaulichung der Vorgänge in belasteten Werkstoffen beschrieben, das eine Nach-

ahmung der vielfältigen Erscheinungen, wie Nachwirkung, Hysteresis, Dämpfung, Verfestigung, Trainierung usw. ermöglicht<sup>1)</sup>. Im folgenden werden einige Versuchsergebnisse dargestellt, die an einem praktisch ausgeführten Modell gewonnen wurden. Bei der großen Mannigfaltigkeit der an dem Modell darstellbaren Werkstoffeigenschaften kann hier nur auf einige wichtige Punkte hingewiesen werden, und zwar sollen einige Versuche über die Nachwirkung und im Anschluß daran einige Versuche zur Deutung der statischen Zerreißkurve beschrieben werden.

#### 1. Das Modell

Das eigentliche Modell besteht gemäß Abb. 1 aus vier Einzelfedern, die zwischen den Punkten *A*, *B*, *C* und *D* ausgespannt sind. Zwischen den beiden

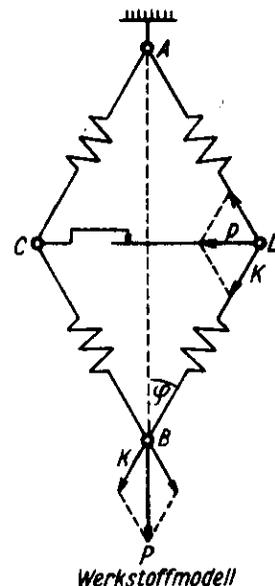


Abb. 1. Werkstoffmodell zur Nachahmung von Werkstoffeigenschaften

Knickstellen *C* und *D* ist ferner ein Widerstand angeordnet, der bei einer Veränderung des Querabstandes *CD* zu überwinden ist. Dieser Widerstand wird durch einen mit Öl gefüllten Kolben verwirklicht, in dem sich ein Stempel bewegt. Das Modell ist in einer einfachen Belastungseinrichtung (Abb. 2) aufgehängt. Ein in *A* befestigter Draht ist über zwei Rollenlager geführt, um an einer Meßfeder zu endigen, deren Dehnung zur Ermittlung der aufgebrachten Last dient. Die Längenänderungen der Meßfeder werden in vergrößertem Maßstab auf einen Schreibhebel mit Gegenlenker übertragen. Am unteren Ende des Modells ist ein weiterer Draht befestigt, der nach

<sup>1)</sup> W. Späth, Die Vorgänge in belasteten Werkstoffen. Arch. f. Eisenhüttenwes. 8 (1934/35), 405; W. Späth, Elastizitätsgrenze und Konstrukteur. Zeitschr. f. Metallkde. 27 (1935), 132; W. Späth, Bemerkungen zur Durchführung von Dauerversuchen. Metallwirtschaft (1935), erscheint demnächst.