

Aus dem Entwicklungslaboratorium der Fa. Hellige u. Morat, G.m.b.H., Stuttgart,
jetzt: Fritz Hellige & Co., G.m.b.H.

Einfache Prüfmethoden für die Schreibeigenschaften von Elektrencephalographen.

Von

JOHANN ALBRECHT SCHÄDER.

Mit 5 Textabbildungen.

(Eingegangen am 10. April 1949.)

I. Übersicht.

Das Handwerkszeug für elektrencephalographische Untersuchungen wurde in den ersten Jahren dieser Forschungsrichtung in enger Zusammenarbeit von Medizinern und Physikern entwickelt. Da der Mediziner die Entstehung dieser Instrumente, die ihm heute eine Spezialindustrie liefert, jetzt meist nicht mehr „handelnd und leidend“ erlebt, wird es desto wichtiger, daß er ihre wesentlichen physikalischen Eigenschaften kritisch prüfen und würdigen kann.

Im folgenden soll gezeigt werden, daß es auch ohne apparativen und mathematischen Aufwand möglich ist, diese Charakteristika der Registriergeräte zu ermitteln und die gewonnenen Messungen auszuwerten.

Es würde über den hier gegebenen Rahmen hinausgehen, die Begründungen der angegebenen zahlenmäßigen Zusammenhänge in extenso vorzutragen; der daran Interessierte findet Einzelheiten in den Arbeiten des Literaturverzeichnisses^{1, 2, 3}. Eine zusammenfassende Darstellung mit vollständigem mathematischem Apparat soll an anderer Stelle veröffentlicht werden.

II. Begriffsbestimmungen.

Im *Idealfall* würde das Registriergerät den untersuchten physiologischen Vorgang — im vorliegenden Fall die „Hirnströme“ — lediglich um einen bestimmten Faktor verstärkt, im übrigen aber ohne jede Formänderung wiedergeben.

Diese Forderung schließt die von A. FREY — Zitat nach A. WEBER⁴, S. 30 — aufgestellten Bedingungen für Elektrokardiographen ein. FREY verlangt:

1. Frequenztreue,
2. Amplitudentreue,
3. symmetrisches Arbeiten,
4. Phasentreue.

(Weiter fordert FREY noch, daß durch die Ableitung der Spannungsverlauf an der Ableitungsstelle nicht verändert werden darf. Das ist bei Verstärkern mit hochohmigem Eingang — Größenordnung 1 MΩ — stets garantiert.)

Von den genannten Forderungen ist 3. bereits in 2. enthalten; ein unsymmetrisches Arbeiten bedeutet lediglich eine bestimmte Form der Unproportionaliität zwischen angelegter Spannung und Ausschlag (s. Absatz IIIa). Demnach ist es nicht nötig, die Bedingung 3. gesondert aufzuführen.

Die Gegenüberstellung der Bezeichnungen „Frequenztreue“ und „Phasentreue“ ist nicht glücklich: während die „Phasentreue“, d. h. die korrekte Wiedergabe der zeitlichen Zuordnungen innerhalb der angelegten Spannung, tatsächlich

verletzt sein kann, ist das bei der „Frequenztreue“ unmöglich, denn kein Registriersystem ändert die *Frequenz* der angelegten Spannung. Das ist natürlich mit dem Wort „Frequenztreue“ auch nicht gemeint, sondern es soll ausgedrückt werden, daß angelegte Spannungen unabhängig von ihrer Frequenz gleichmäßig verstärkt werden.

a) Proportionalitätsfehler (nichtlineare Verzerrungen).

Ist die Verstärkung nicht unabhängig von der Größe der Spannung am Verstärkereingang, d. h. ändert sich der Verstärkungsfaktor mit der Größe der Eingangsspannung, dann besteht also nicht mehr die zu fordernde Proportionalität zwischen *Eingangswert und Registrierausschlag*. Man spricht in diesem Falle von Proportionalitätsfehlern oder „nichtlinearen Verzerrungen“. Sie verursachen wesentliche Veränderungen in Kurven aller Frequenzen, so daß ihr Auftreten in merkbarem Ausmaß als ernsthafter Mangel des betreffenden Gerätes anzusehen ist. Ihre Feststellung ist besonders einfach.

b) Frequenzabhängige Fehler (lineare Verzerrungen).

Abweichungen von den Eigenschaften der idealen Registrierung können ferner dadurch auftreten, daß die *Verstärkung* und die zeitliche Verzögerung der Aufzeichnung, die sog. „*Laufzeit*“ abhängig von der *Frequenz* der Eingangsspannung ist. Die durch diese zwei Einflüsse verursachten frequenzabhängigen Fehler werden zusammenfassend als „*lineare Verzerrungen*“ bezeichnet.

1. *Frequenzgang der Verstärkung*. Wird die Verstärkung des Gerätes als Kurve in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen, dann muß im Idealfall, d. h. bei gleichmäßiger Verstärkung aller Frequenzen, eine *waagerechte* Gerade entstehen. Man spricht in diesem Falle meist — wenn auch nicht ganz präzise — von einem „*geraden Frequenzgang der Verstärkung*“ (oder der *Amplitude*), vielfach auch kürzer und noch ungenauer von dem „*geraden Frequenzgang*“.

2. *Frequenzgang der Laufzeit*. Ein ideales Gerät würde Eingangsspannungen beliebiger Frequenz ferner ohne jeden Zeitverlust wiedergeben, oder falls eine zeitliche Verzögerung beim Durchlaufen des Gerätes nicht zu vermeiden ist, so müßte sie jedenfalls für alle Frequenzen gleich groß sein. Das heißt: auch die Laufzeit — wie vorher die Verstärkung — würde, als Kurve in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen, im Idealfall eine *waagerechte* Gerade ergeben: „*gerader Frequenzgang der Laufzeit*“ oder kürzer: „*gerader Laufzeitgang*“. Im folgenden wird sich zeigen, daß die Forderung nach frequenzunabhängiger Laufzeit noch größere Bedeutung hat, aber leider auch noch schwerer ausreichend erfüllbar ist als die nach frequenzunabhängiger Verstärkung.

In der Physik wird bisher im allgemeinen an Stelle der obenerwähnten Laufzeit die sog. „*Phasendrehung*“ verwendet. Beide Begriffe sind sehr eng verwandt:

die Laufzeit für eine bestimmte Frequenz ist einfach gleich der entsprechenden Phasendrehung, geteilt durch die Frequenz selbst. Bewirkt ein Registriergerät beispielsweise für die Frequenz 50 Hz die Phasendrehung -30° , dann heißt das, daß die 50-Hz-Eingangsspannung um $30^\circ/360^\circ = 1/12$ der Zeit für eine volle Schwingung, d. h. um $1/12 \cdot 1/5$, Sek. $= 1/600$ Sek. gegen eine andere Frequenz verzögert aufgezeichnet wird, deren Phasendrehung Null ist.

III. Prüfmethoden.

a) Für Proportionalitätsfehler.

Lenkt man das Registriersystem durch eine relativ große, langsam verlaufende Spannungsänderung über die volle Breite des Registrierpapiers aus und überlagert dieser langsamen Spannungsänderung eine kleine Wechselspannung, dann muß diese beim Fehlen von nicht-linearen Verzerrungen bei der Wanderung über den Registrierstreifen als durchweg gleichbreites Band aufgezeichnet werden. Nimmt die Breite des Bandes dagegen von der Streifenmitte nach einem Rand hin zu, nach dem anderen ab, bzw. nach beiden Rändern hin zu oder ab, dann ist die Verstärkung des Gerätes eben nicht über den gesamten Registrierbereich konstant, d. h. es liegen Proportionalitätsfehler vor. Bei stärkerer Abnahme der Empfindlichkeit nach den Rändern der Registrierbreite tritt eine merkbare Abrundung der oberen und unteren Gipfel größerer Ablenkungen auf, die im Vergleich zu einer unverzerrten Aufzeichnung zu irrtümlichen Deutungen führen kann.

Die geschilderte Prüfung wird am einfachsten folgendermaßen vorgenommen: Man stellt das Registrierorgan auf die Mittellage ein und regelt die Verstärkerempfindlichkeit so ein, daß der Prüfausschlag (beim Drücken der Prüftaste) etwas über die ausnutzbare Breite des Registrierstreifens hinausreicht. Nun wird an den Verstärkereingang eine kleine Wechselspannung gelegt. Dafür ist es meist ausreichend, ein kurzes Stück Draht in eine der Verstärker-Eingangsbuchsen zu stecken; sein freies Ende wirkt dann als „Antenne“ für Wechselspannungen aus dem Lichtnetz. Die passende Größe der Wechselspannung, die eine Registrierbreite von etwa 10—20% der gesamten Papierbreite ergibt, ist leicht durch Annäherung des freien Drahtendes an eine Netzleitung auszuprobieren. Nach diesen Vorbereitungen wird der Papierablauf eingeschaltet, die Prüftaste gedrückt *und festgehalten*, bis das Registrierorgan wieder zur Papiermitte zurückgelaufen ist; erst dann wird sie losgelassen, worauf der Prüfausschlag der Registrierung in Gegenrichtung erfolgt, der dann ebenfalls langsam zur Papiermitte zurückführt.

Bei manchen Geräten gibt die Empfindlichkeits-Prüfeinrichtung auch beim Festhalten der Prüftaste nur einen kurzen Impuls ab; das langsame Herüberlaufen des 50-Hz-Bandes über den Registrierstreifen ist damit also nicht zu erzielen. In diesem Fall kann man sich einer einfach zu improvisierenden Prüfvorrichtung bedienen, die z. B. aus der Hintereinanderschaltung einer 1,5-V-

Stabzelle und zweier Rundfunkwiderstände besteht, deren Werte etwa im Verhältnis 1:1500 stehen (z. B. 10Ω und $15\text{k}\Omega$ usw.). Die Enden des *kleineren* Widerstandes werden mit dem Verstärkereingang verbunden; außerdem wird an seine Enden ein Klingelknopf, eine Morsetaste oder dgl. als „Prüftaste“ gelegt, mit der er kurzgeschlossen werden kann. Für die Handhabung gilt dann sinngemäß das oben Gesagte.

Die Deutsche Gesellschaft für Kreislaufforschung hat gemeinsam mit der Wirtschaftsgruppe Elektroindustrie Richtlinien für die Eigenschaften von Elektrokardiographen ausgearbeitet, die im Normblatt DIN 13 401 (September 1941) festgelegt sind und zweckmäßig auch auf Elektrencephalographen angewendet werden sollten⁵. Darin wird unter anderem gefordert: „Bei einer Anzeige von 10 mm/l mV dürfen die $+1\text{ mV}$ und -1 mV entsprechenden Ausschläge nicht um mehr als $\pm 5\%$ vom arithmetischen Mittelwert abweichen.“ Die Erfüllung dieser Forderung kann nur als notwendig, jedoch nicht als hinreichend angesprochen werden: sie erfaßt zwar den Fall, in dem die Empfindlichkeit von einem Papierrand über die Mitte hinweg zum anderen Rande ständig wächst oder — anders ausgedrückt — von der Mitte nach beiden Rändern sich in *entgegengesetztem Sinne* ändert (sog. „Triodenverzerrung“). Wenn aber die Registrierempfindlichkeit sich von der Papiermitte nach beiden Rändern zu *im gleichen Sinne* ändert, also beide Male abnimmt bzw. zunimmt (sog. „Pentodenverzerrung“), dann kann trotz krasser Unproportionalität der Ausschläge über die Papierbreite der Ausschlag für $+1\text{ mV}$ und -1 mV doch gleich sein. Der Benutzer von Registriergeräten wird sich daher durch eine Prüfung in der Art der beschriebenen Methode zweckmäßig von der einwandfreien Arbeitsweise seiner Apparatur selbst überzeugen. Dabei kann die Verzerrung als ausreichend klein angesehen werden, wenn die Breite des bei der oben beschriebenen Prüfung gewonnenen 50-Hz-„Bandes“ an keiner Stelle des Registrierpapieres um mehr als $\pm 5\%$ von der Breite in der Mitte abweicht. Diese Festsetzung würde für den Fall der Triodenverzerrung der Forderung des DIN-Blattes 13401 entsprechen. Für die EEG-Aufzeichnung bei etwas weniger strengen Anforderungen kann man auch $\pm 10\%$ als Maximalfehler zulassen.

Als Sonderfall der Proportionalitätsfehler sind noch die bei „direktschreibenden“ Geräten (Tinten-, Wachs-, Kohle-Schreiber usw.) eventuell auftretenden *reibungsbedingten Verzerrungen* zu nennen. Die nach der Konstruktion der Schreibsysteme für die Einstellung des schreibenden mechanischen Elementes verfügbaren elektromagnetischen Kräfte sollten mehrfach stärker sein als die Kräfte der Reibung zwischen dem Registrierpapier und dem Schreibelement. Nur dann ist eine richtige Einstellung auf die Ausschläge gesichert, die den Eingangsspannungen des Verstärkers entsprechen. Ob derartige Fehler vorliegen, wird am einfachsten durch Aufzeichnung eines möglichst langsam und vollkommen stetig verlaufenden Vorganges kontrolliert. Dazu kann wieder die Registrierung der Prüfspannung mit — falls wählbar — größtmöglicher Verstärker-Zeitkonstante T_u (s. Absatz III b 1), diesmal natürlich ohne Überlagerung einer 50-Hz-Wechselspannung, dienen. Werden einige Aufnahmen von Prüfspannungssprüngen mit jedesmaliger Änderung der Null-Lage des Registrierorgans gemacht, dann wird auf diese Weise die gesamte Breite des Registrierpapieres abgetastet. Die jeweiligen Rückläufe des Prüfausschlages müssen dabei

ohne jede merkbare „*Hysterese*“ nach dem Drücken und Loslassen der Prüftaste stets genau auf die gleiche Höhe auf dem Registrierstreifen zurückgehen; sie müssen ferner vollkommen glatt, d. h. ohne Knicke und Sprünge, aufgezeichnet werden, die ja in der exponentiell abklingenden Prüfspannung auch nicht enthalten sind. Zu beachten ist bei dieser Prüfung natürlich, daß wegen der in Abb. 1 gezeigten, lange anhaltenden Nachschwingung jedes CW-Verstärkers der Rhythmus der Prüftastenbetätigung entsprechend langsam sein muß.

b) Für frequenzabhängige Fehler.

Um ein Registriergerät auf die Frequenzgänge von Verstärkung und Laufzeit zu untersuchen, können zahlreiche Verfahren angewandt werden. Sie haben jedoch meist den Nachteil, erheblichen apparativen Aufwand zu erfordern. Stehen diese Geräte nicht ohnehin für andere Untersuchungen zur Verfügung, so ist ihre Anschaffung lediglich für die hier vorliegenden Prüfzwecke meist nicht lohnend.

Für die Aufnahme des *Verstärkungs-Frequenzganges allein* — also ohne den Laufzeit-Frequenzgang — kann mit Vorteil ein sehr einfaches und leicht mit Institutsmitteln zusammenzustellendes Hilfsgerät benutzt werden: Die bekannten *Dynamo-Handlampen* (z. B. Modell „Dual“) liefern eine recht gut sinusförmige Wechselspannung, deren Amplitude sich genau proportional der jeweiligen Drehzahl, also der Frequenz in dem betreffenden Augenblick, ändert, sofern die Dynamo praktisch „leerläuft“, also elektrisch nicht merklich belastet ist. Um nun eine *frequenzunabhängige konstante Amplitude* zu erzielen, wurde ein einfacher Kunstgriff angewandt: Die beiden Pole der Dynamo wurden mit der Hintereinanderschaltung eines hochohmigen Widerstandes (z. B. $1\text{ M}\Omega$) und eines guten Papierkondensators (z. B. $1\text{ }\mu\text{F}$) verbunden. Beim Betätigen der Dynamo entsteht dann an dem Kondensator, der ja einen mit zunehmender Frequenz abnehmenden Widerstand darstellt, eine *trotz veränderlicher Frequenz konstante Spannung*, weil eben die Widerstandsabnahme des Kondensators bei steigender Frequenz das gleichzeitige Anwachsen der Dynamospannung gerade kompensiert.

Bei den genannten Werten von Widerstand und Kondensator ($1\text{ M}\Omega$ bzw. $1\text{ }\mu\text{F}$) sinkt die Spannung am Kondensator bei 10 Hz erst um $0,01\%$, bei 1 Hz um 1% gegenüber dem für höhere Frequenzen praktisch konstanten Wert von knapp 4 mV_{eff} , d. h. etwa 10 mV vom unteren zum oberen Umkehrpunkt der zeitlichen Spannungskurve. Frequenzen unter 10 Hz sind zwar bei Handantrieb der Dynamo im Originalzustand keinesfalls mehr gleichmäßig erzielbar, sondern würden den Antrieb mittels eines konstant laufenden Motors mit entsprechender Untersetzung der Geschwindigkeit bzw. die Anbringung einer großen, gut ausgewichteten Schwungscheibe erfordern. Für die Prüfung der Registriereigenschaften in diesem tiefen Bereich, also an der „*unteren Frequenzgrenze*“ üblicher Verstärker, ist aber ohnehin die noch zu beschreibende *Methode des Einheitssprunges* am einfachsten und günstigsten; begnügt man sich daher mit ausreichender Konstanz der

Prüfspannung (d. h. Abnahme um 1%) bis herunter zu etwa 10 Hz, dann kann der Widerstand auf $0,1 \text{ M}\Omega$ verkleinert werden. Die dabei erzielte Prüfspannung ist dann entsprechend 10fach größer als vorher angegeben: sie beträgt knapp $40 \text{ mV}_{\text{eff}}$, d. h. etwa 100 mV von Umkehrpunkt bis Umkehrpunkt, ist also für die Untersuchung von EEG- und EKG-Verstärkern mehr als ausreichend. (Über die physikalischen Eigenschaften der angegebenen Schaltung wird getrennt eingehender berichtet werden.)

Zur Prüfung des betreffenden Gerätes werden die Belegungen des Kondensators an den Verstärkereingang geschaltet, wobei darauf zu achten ist, daß der Kondensator *einerseits direkt mit dem Gehäuse* der Dynamo und über den Widerstand mit ihrem Innenpol verbunden ist. Der mit dem Dynamogehäuse verbundene Kondensatoranschluß ist an die geerdete Verstärker-Eingangsbuchse zu legen, damit die beim Berühren der Dynamo eingestreuten 50-Hz-Ströme abgeleitet werden, ohne die Registrierung zu stören. Wird nun nach entsprechender Einstellung der Verstärkerempfindlichkeit die Dynamo durch einen kräftigen Druck auf größte Drehzahl gebracht, so zeichnet das Registrierorgan während des freien Auslaufens der Dynamo den Verstärkungsverlauf von der höchsten erzielbaren Frequenz (300—400 Hz bei „Dual“-Dynamos) bis herunter zu 10 Hz oder tiefer auf. Verfügt das Registriergerät über eine präzise Zeitschreibung oder auch nur über eine genau bekannte und eingehaltene Papiergeschwindigkeit, dann kann die so entstandene Aufnahme auf die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung hin exakt ausgewertet werden. Auf diese Weise sind die in Abb. 2—5 gezeigten Verstärkungs-Frequenzgänge aufgenommen worden.

Dabei sei aber nachdrücklich darauf hingewiesen, daß die *Bestimmung des Amplituden-Frequenzganges alleine* ohne den Laufzeit-Frequenzgang im allgemeinen *nicht ausreicht*, um die Registriereigenschaften des untersuchten Gerätes hinsichtlich der *Formtreue*, mit der beliebige Spannungsabläufe aufgezeichnet werden, zu kennzeichnen.

Daß bei dem großen Nachdruck, mit dem seit langem auf die Wichtigkeit der Angabe des Verstärkungs-Frequenzganges für physiologische Registriergeräte hingewiesen wurde (z. B.⁶), die mindestens ebenso große Bedeutung des Laufzeit-Frequenzganges praktisch vollständig vergessen wurde, dürfte daran liegen, daß bei Verstärkern für gehörrichtige Wiedergabe tatsächlich der Laufzeit-Frequenzgang eine verhältnismäßig geringe Bedeutung hat, da bekanntlich das Ohr gegenüber selbst erheblichen Laufzeitunterschieden erstaunlich unempfindlich ist⁷. Ganz anders liegen aber die Verhältnisse, sobald es auf *richtige Form der registrierten Kurven* ankommt, also insbesondere auch bei Verstärkern für physiologische und Fernsehzwecke.

Die für die EEG-Aufzeichnung benutzten Verstärker sind aus praktischen Gründen fast immer mit Kondensator-Widerstands-Kopplung zwischen den einzelnen Verstärkerstufen ausgeführt (*CW*- oder *RC*-Verstärker). Apparate, deren höchste Zeitkonstante etwa $T = 1 \text{ Sek.}$ beträgt, dürften fast immer für EEG-Aufnahmen ausreichend sein. Für Versuche, bei denen größere Schwankungen der Grundlinie auftreten, wird durch Einschaltung kleinerer Kopplungskondensatoren

häufig mit wesentlich herabgesetzter Zeitkonstante gearbeitet. Die dabei in Amplitude verminderte und in bezug auf Laufzeit vorverschobene Wiedergabe der niedrigeren Frequenzen verdient Beachtung.

In der Richtung nach hohen Frequenzen ist der Übertragungsbereich jedes Verstärkers naturnotwendig beschränkt; das gleiche gilt auch für alle Registrierorgane. Eine *obere Frequenzgrenze* der Aufzeichnung ist also in jedem Falle gegeben; allerdings sind hier die Unterschiede zwischen mechanisch arbeitenden Registrierorganen mit gewichtsbehafteten „Zeigern“ (sog. Direktschreiber) über mechanisch bewegte Systeme mit Lichtzeigern (Oszillographenschleifen usw.) bis zur „trägheitslosen“ Kathodenstrahlröhre quantitativ sehr groß.

Die normale *rechteckige Prüfspannung*, die durch plötzliche Dauer einschaltung einer Gleichspannung entsteht, hat nun alle Eigenschaften eines *idealen Testobjektes*: Aus der Art und Größe der Verzerrungen, mit denen sie wiedergegeben wird, können die wesentlichen Kennzeichen des Gerätes, d. h. neben der Verstärkung auch Amplituden- und Laufzeit-Frequenzgang, vollständig ermittelt werden^{9, 10} sowie schließlich eventuell auch die Proportionalitätsfehler (s. Abs. III a, letzter Teil). Für eine derart umfassende Analyse ist zwar keinerlei zusätzlicher gerätemäßiger Aufwand erforderlich; dafür ist sie aber relativ zeitraubend und soll deswegen hier nur in vereinfachter, aber hinreichend genauer Form besprochen werden.

Daß gerade die Rechteckspannung diese besondere Eignung als Testobjekt besitzt, liegt daran, daß sie, wie die Fourieranalyse zeigt, ein wohldefiniertes „Spektrum“ von unendlich vielen Teilschwingungen aller Frequenzen aufweist, deren gegenseitige zeitliche Zuordnung ebenfalls genau festliegt. Der *Anstieg ihres Bildes* von der Null-Linie aus wird nun im wesentlichen bestimmt durch die *obere Frequenzgrenze* des Registriergerätes, die allmähliche *Rückkehr zur Null-Linie* trotz Andauern der Prüfspannung durch die *untere Frequenzgrenze* (bei „Gleichspannungsverstärkern“, d. h. Verstärkern, die außer höheren Frequenzen auch langsamste Spannungsschwankungen bis zur Frequenz Null übertragen, kehrt der Ausschlag natürlich überhaupt nicht zur Null-Linie zurück, so lange die Prüftaste gedrückt bleibt.) .

1. Bestimmung der unteren Grenzfrequenz. Die Geschwindigkeit, mit der der Ausschlag sich wieder der Null-Linie nähert, hängt ab von den elektrischen Werten der zwischen den einzelnen Verstärkerstufen wirksamen CW-Koppelglieder. Ist nur ein CW-Glied vorhanden, dann erfolgt der Ausschlagsrückgang bekanntlich nach einem einfachen Exponentialgesetz, wobei die Null-Linie erst nach „unendlich“ langer Zeit erreicht und auf jeden Fall niemals geschnitten wird. Als Maß für den zeitlichen Ablauf des Vorganges kommt also die „Zeit bis zur Erreichung der Null-Linie“ nicht in Betracht. Man kennzeichnet daher die Rückgangsgeschwindigkeit durch Angabe der sog. „*Zeitkonstante*“;

das ist die Zeit, in der der Ausschlag des Einheitssprunges auf den e -ten Teil ($e = 2,718\dots$), d. h. auf rund 37% seines Anfangswertes zurückgeht^{4, 11}. Die Wahl dieses scheinbar willkürlichen Wertes hat einerseits mathematische Gründe; auf der anderen Seite läßt sich die „Zeitkonstante“ besonders leicht aus den elektrischen Daten des betreffenden CW-Koppelgliedes berechnen: sie ist einfach das Produkt der Koppelkapazität — ausgedrückt in μF — und des Gesamtwiderstandswertes — ausgedrückt in $\text{M}\Omega$ —, über den der Koppelkondensator sich jeweils auf- und umladen muß, und ergibt sich bei dieser Wahl der Maßeinheiten in Sekunden.

Dieser Gesamtwiderstand besteht nicht nur, wie meist in der Literatur fälschlich angegeben wird, aus dem Gitterwiderstand der auf den Koppelkondensator folgenden Verstärkerstufe, sondern dazu noch aus der Parallelschaltung des Innenwiderstandes und des Anodenwiderstandes der vorhergehenden Stufe. Dieser zusätzliche Widerstandsbeitrag kann nur bei Trioden vernachlässigt werden; bei Pentoden mit ihren sehr hohen Innen- und meist auch beträchtlichen Anodenwiderständen fällt er durchaus ins Gewicht.

Ein CW-Koppelglied, bestehend aus einem Kondensator von $2\ \mu\text{F}$ und einem Gesamtwiderstand von $1,5\ \text{M}\Omega$, hat also die Zeitkonstante $T_u = 2\ \mu\text{F} \cdot 1,5\ \text{M}\Omega = 3\ \text{Sek.}$; d. h. der Ausschlag des Registrierorgans geht nach 3 Sek. auf 37% seines Anfangswertes zurück.

EEG-Verstärker müssen zur Erreichung ausreichender Empfindlichkeit stets mehrstufig aufgebaut werden; dementsprechend besitzen sie im allgemeinen mindestens 2, häufig auch 3 CW-Koppelglieder, die meist mit untereinander gleichen Zeitkonstanten T_u ausgestattet werden. In der Literatur hat sich nun die Angabe eingebürgert, daß die „Gesamtzeitkonstante“ des Verstärkers sich ergibt als Quotient aus der — für alle Koppelglieder als gleich vorausgesetzten — Einzelzeitkonstante und der Anzahl der Koppelglieder. Danach müßte z. B. der Prüfausschlag eines dreistufigen Verstärkers mit 2 Koppelgliedern der Einzelzeitkonstante $T_u = 3\ \text{Sek.}$ nach $3\ \text{sec}/2$, d. h. nach 1,5 Sek. auf 37% zurückgefallen sein. Dies ist aber *nur eine sehr grobe Näherung*: tatsächlich ist die Gesamtzeitkonstante kleiner und der Ausschlag wäre nach 1,5 Sek. bereits auf 31% zurückgegangen.

Der Abfall des Prüfausschlages verläuft nämlich bei Verstärkern mit mehr als einem CW-Koppelglied nicht mehr nach einem einfachen Exponentialgesetz. Das ist mathematisch leicht zu belegen und auch anschaulich sofort ersichtlich aus dem Bild des Prüfsprunges bei einem Verstärker mit zwei oder mehr Koppelgliedern. Wie Abb. 1 zeigt, geht der Ausschlag nicht mehr asymptotisch auf die Ausgangslage zurück, wie bei nur einem CW-Glied, sondern er *schneidet die Null-Linie* und läuft erst dann von der Gegenseite allmählich an sie heran. Besitzt der Verstärker 3 Koppelglieder, dann wird die Null-Linie nochmals geschnitten und anschließend „kriecht“ das Registrierorgan von der Seite des ersten Ausschlages an sie heran. Allgemein ist die Zahl der

Nulldurchgänge um 1 kleiner als die Zahl der Koppelglieder. Dementsprechend ist eine Auswertung schwacher Nachschwankungen („after potentials“) mit CW-Verstärkern kaum möglich.

Es läßt sich zeigen, daß die Zeit vom Beginn des Ausschlagsrückganges bis zum Nulldurchgang bei einem Verstärker mit zwei übereinstimmenden Einzelzeitkonstanten gerade dieser Einzelzeitkonstante gleicht.

Die Zeitkonstante T_u eines CW-Gliedes hängt nun aber in einfacherster Weise mit der „unteren Grenzfrequenz“ f_u der betreffenden

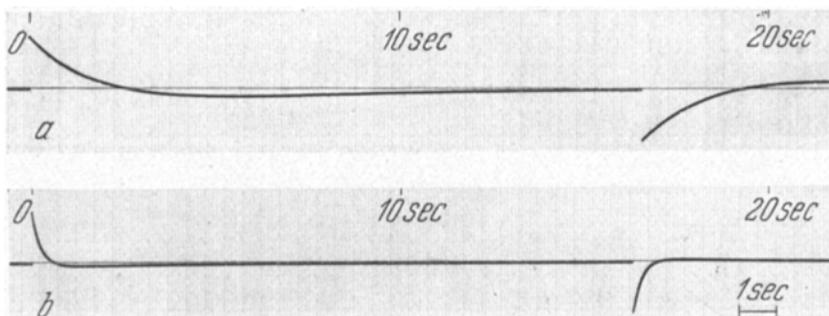


Abb. 1a u. b. Biphasischer Prüfausschlag bei rechteckiger, monophasischer Prüfspannung:
a Verstärker mit 2 CW-Gliedern gleicher Zeitkonstante: $T_u = 2,6$ Sek. b Verstärker mit 2 CW-Gliedern, deren Zeitkonstanten im Verhältnis 1:10 stehen: $T_u = 0,26$ bzw. 2,6 Sek. Papiergeschwindigkeit im Original 8 mm/sec;
Registrierung mit Kathodenstrahlrohr.

Verstärkerstufe zusammen, d. h. mit der Frequenz, die nur noch mit dem $1/\sqrt{2}$ fachen, also mit etwa 71% der Verstärkung für höhere Frequenzen übertragen wird, und zwar mit einer Laufzeit, die um $1/8$ ihrer Periodendauer kleiner ist als die Laufzeit für 100%ig übertragene höhere Frequenzen.

Und zwar ist die untere Grenzfrequenz:

$$f_u = \frac{1}{2\pi T_u} \approx \frac{1}{6,3 T_u} \quad (1)$$

(z. B. ist für $T_u = 1$ Sek. $f_u = 0,16$ Hz)

Entsprechend sinkt in einem Gerät mit 2 Koppelgliedern, die einzeln die Zeitkonstante T_u besitzen, die Gesamtverstärkung der unteren Grenzfrequenz f_u auf das $1/\sqrt{2} \times 1/\sqrt{2}$ fache, d. h. auf 50%, und die Laufzeit dafür ist um $1/8 + 1/8 = 1/4$ ihrer Periodendauer kleiner als die Laufzeit für 100%ig übertragene Frequenzen.

Kommt es nun auf *formgetreue Wiedergabe* langsamer Potentialänderungen an, dann muß die tiefste zu registrierende Frequenz f_{\min} wesentlich über der unteren Grenzfrequenz f_u liegen. Zum Beispiel wird die zehnfache untere Grenzfrequenz (z. B. 1,6 Hz) zwar nur noch um 0,5% weniger verstärkt als sehr viel höhere Frequenzen, was an sich

bedeutungslos wäre, aber die Laufzeitdifferenz gegenüber den hohen Frequenzen beträgt immer noch $1/63$ ihrer Periodendauer; das Maximum und Minimum wäre bei einer Frequenz von 1,6 Hz (0,6 Sek. Periodendauer) also um etwa 10 msec zu früh aufgezeichnet. Die Vermeidung von Laufzeitverzerrungen ist also tatsächlich schwieriger als die gleiche Verstärkung aller in Betracht kommenden Frequenzen.

Man kann als ungefähren Anhalt die Forderung aufstellen: Für die Zeitkonstante T_u jeder Verstärkerstufe — oder, falls die Einzelzeitkonstanten der Stufen untereinander ungleich sind: für die kleinste Einzelzeitkonstante T_{\minim} — sollte die Bedingung erfüllt sein:

$$T_u \text{ (bzw. } T_{\minim}) \geq \frac{2}{f_{\minim}}. \quad (2)$$

Diese Forderung deckt sich übrigens etwa mit der aus der Elektrokardiographie bekannten Angabe⁴, daß die „Gesamtzeitkonstante“, oder richtiger: die halbe Einzelzeitkonstante der üblichen EKG-Verstärker mit 2 CW-Koppelgliedern mindestens 1,5 Sek. betragen sollte. Rechnet man nämlich bei einer Bradykardie mit einer Pulszahl von 40/min, also in der genannten Bedingung mit einer tiefsten Frequenz $f_{\minim} = 2,3$ Hz, dann ergibt sich T_u (bzw. T_{\minim}) = $2 : 2,3$ Hz = 3 Sek., also $T_u/2 = 1,5$ Sek. in Übereinstimmung mit der genannten Forderung.

2. Bestimmung der oberen Grenzfrequenz. Wie schon gesagt, hängt die Geschwindigkeit, mit der das Registrierorgan sich beim Anlegen der Prüfspannung an den Verstärkereingang auf den entsprechenden Prüfausschlag einstellt, von der *oberen Grenzfrequenz* f_0 ab. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Begrenzung des Frequenzbereiches nach oben hin durch den Verstärker selbst oder durch das Registrierorgan gegeben ist. Der erste Fall liegt vor, wenn eine Kathodenstrahlröhre benutzt wird, der zweite im allgemeinen bei Verwendung aller mechanisch bewegten Registriersysteme, auch wenn sie mit optischer Aufzeichnung arbeiten, insbesondere aber bei „Direktschreibern“, falls nicht durch künstliche Frequenzbeschneidung im Verstärker dessen obere Grenzfrequenz weit unter die Resonanzfrequenz des Registrierorgans verschoben wird. Der wesentliche Unterschied zwischen der BRAUNSchen Röhre und allen übrigen Registriervorrichtungen liegt nämlich mehr noch als in der oft zitierten „Trägheitslosigkeit“ des Elektronenstrahles in seiner *völligen Aperiodizität*. Demgegenüber sind *alle mechanisch bewegten Systeme schwingungsfähig* und müssen künstlich durch ausreichende Dämpfung genügend aperiodisch gemacht werden.

2,1 Bestimmt also der Verstärker selbst die obere Grenzfrequenz f_0 , dann erfolgt die *Einstellung auf den Prüfausschlag* — ebenso wie der vorher diskutierte anschließende Rückgang — bei einem einstufigen Verstärker nach einer *einfachen Exponentialfunktion* (s. Abb. 2 a₁). Dementsprechend ist auch hier die Angabe der Zeit bis zur Vollendung des Endausschlages nicht möglich, da dieser nur asymptotisch erreicht wird (besonders klar wird das im Falle des Gleichspannungsverstärkers, bei dem nicht — wie

beim CW-Verstärker — das „unendlich“ lange Weiterkriechen des Prüfausschlages durch die Rückkehr zur Null-Linie verdeckt wird). Auch die übliche Definition der „Einstellzeit“ als der Zeit, nach deren Verlauf der Endausschlag „praktisch“ erreicht ist, muß durch die Angabe verschärft werden, *bis auf welchen Restbetrag* der Ausschlag sich nach Ablauf der Einstellzeit seinem Endwert genähert haben soll. Es

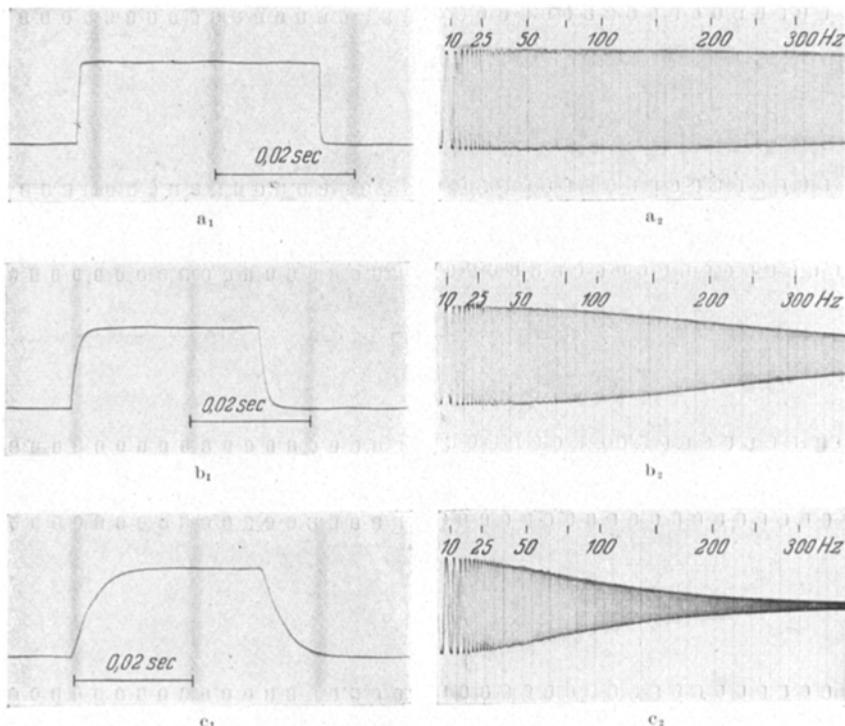


Abb. 2. Bild der rechteckigen Prüfspannung (links) und entsprechender Verstärkungs-Frequenzgang (rechts); obere Grenzfrequenz bestimmt durch aperiodische, „natürliche“ Verstärkereigenschaften bzw. CW-Glieder zur Höhenbeschränkung. a Mit EEG-Verstärker ohne zusätzliche Höhenbeschränkung. b Mit Höhenbeschränkung durch 1 CW-Glied. c Mit Höhenbeschränkung durch 2 CW-Glieder. Papiergeschwindigkeit der linken Teilbilder aus Zeitmarkierung (0,02 Sek.) ersichtlich. Frequenzbereich der rechten Teilbilder 10...300 Hz (Papiergeschwindigkeit im Original 20 mm/sec). Registrierung mit Kathodenstrahlrohr.

ist naheliegend, als *Einstellzeit* T_0 die *Zeitspanne* zu definieren, *nach deren Verlauf* — gerechnet vom Verlassen der Null-Linie — *der Endausschlag bei rechteckiger Prüfspannung bis auf seinen e-ten Teil, d. h. bis auf einen Rest von etwa 37% erreicht wird* oder — anders ausgedrückt — *als die Zeit, in der $(100 - 37)\% = 63\%$ des Endausschlages zurückgelegt werden*. Die Einstellzeit kann entsprechend dieser Definition aus der Registrierung des Prüfausschlages mit gleichzeitig aufgenommener Zeitmarkierung bestimmt werden.

Zur ausreichend genauen Messung der Einstellzeit ist im allgemeinen eine sehr große Papiergeschwindigkeit erforderlich, um genügende zeitliche Dehnung des Prüfausschlages zu erzielen. Vielfach kann man sich dadurch helfen, daß man das Registrierpapier statt durch den Antriebsmotor von Hand mit 1000–3000 mm/sec transportiert, während eine Hilfsperson die Prüftaste in möglichst schnellem Rhythmus betätigt. Auf diese Weise wurden die Prüfausschläge der Abb. 2–5 gewonnen, wobei allerdings ein automatischer Kontaktgeber als Prüfeinrichtung benutzt wurde.

Für die „obere Grenzfrequenz“ f_0 (Amplitudenabfall auf 71%) gilt dann:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi T_0} \approx \frac{1}{6,3 T_0}, \quad (3)$$

oder wenn man die Zeit bis zur Erreichung von 80% des Endausschlages ($t_{0,8}$) verwendet, in Annäherung:

$$f_0 = 1/4 t_{0,8} \quad (3a)$$

Die Laufzeit für die obere Grenzfrequenz f_0 ist um $1/8$ ihrer Periodendauer größer als für die 100%ig verstärkten mittleren Frequenzen, d. h. f_0 benötigt zum Durchlaufen des Verstärkers $1/8 f_0$ Sek. länger als die mittleren Frequenzen.

Die Beziehungen (3) bzw. (3a) gelten aber, wie alles bisher über die obere Grenzfrequenz f_0 Gesagte, allgemein nur für einstufige Verstärker und nur dann auch für mehrstufige, wenn in ihnen eine Stufe eine weit niedrigere obere Grenzfrequenz besitzt als alle übrigen, so daß sie allein bestimmt ist. Dieser Fall ist vielfach dann gegeben, wenn durch Einschalten einer „Frequenzblende“ die höheren Frequenzen beschnitten werden, denn meistens werden solche Frequenzblenden nur in einer Stufe angebracht. Nur in diesen Fällen ist der Prüfausschlag durch eine einfache Exponentialfunktion zu beschreiben, was sich darin ausdrückt, daß er sich in einem *scharfen Knick* von der Null-Linie entfernt (s. Abb. 2b₁).

Wird aber die obere Grenzfrequenz f_0 durch mehrere gleichartige Verstärkerstufen bestimmt, und zwar entweder durch die in allen Stufen etwa gleichgroßen „natürlichen Schaltkapazitäten“ oder durch gleichartig dimensionierte Filterglieder, dann steigt schon bei zweistufigen Verstärkern der Prüfausschlag *nicht mehr in einem Knick* von der Null-Linie auf, sondern er beginnt in einem *geschwungenen Anstieg mit waagerechter Anfangstangente* (s. Abb. 2c₁). Dieser Punkt wird in der physiologischen Literatur häufig nicht korrekt dargestellt: die *in zweien und mehrstufigen Verstärkern auftretende S-Form* des Prüfausschlages ist *keineswegs nur eine Folge der Trägheit* mechanischer Registriersysteme, sondern sie liegt bereits im Verstärker selbst begründet, wie sich mathematisch leicht zeigen läßt, und kann deshalb auch von einem Kathodenstrahlzillographen nicht anders aufgezeichnet werden¹².

Zeigt der Prüfausschlag in merkbarem Ausmaß die erwähnte Anfangskrümmung, so ergeben die obigen Beziehungen (3) oder (3a) falsche Werte für die obere Grenzfrequenz f_0 . Es empfiehlt sich, dann das Zeitintervall $t_{0,1/0,9}$ einzuführen, das zwischen der Erreichung des 0,1- und des 0,9fachen

Endausschlag vergeht. Als Formel für die obere Grenzfrequenz (71%) errechnet sich dann:

$$f_0 = \frac{1}{3 t_{0,1/0,9}}. \quad (4)$$

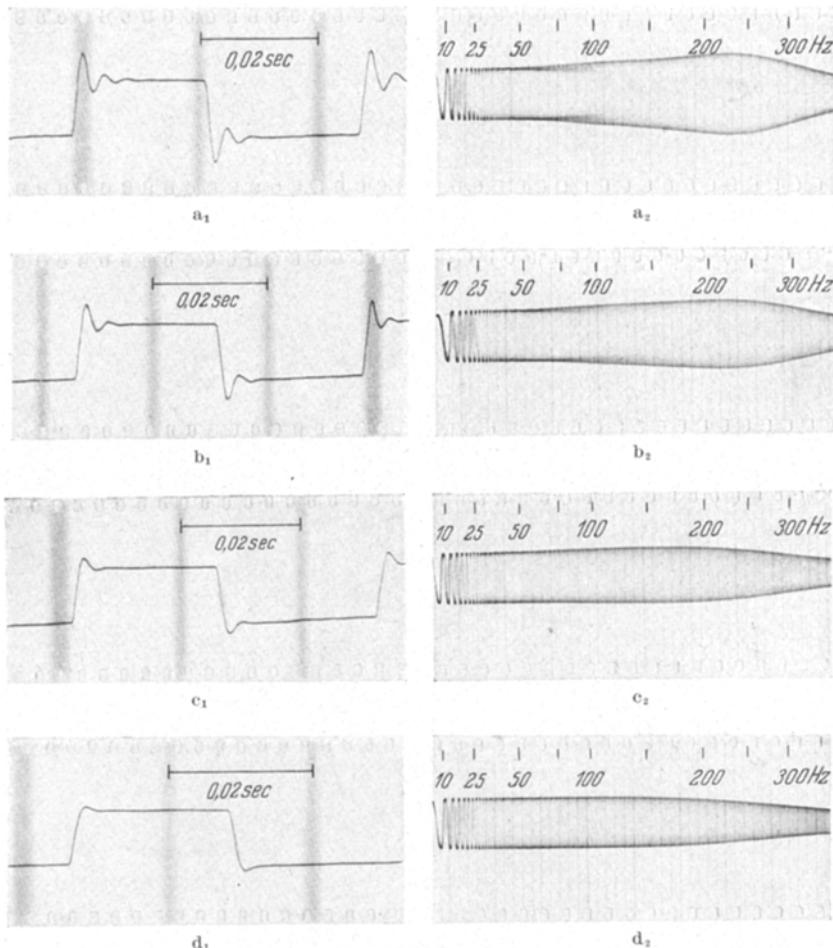


Abb. 3. Bild der rechteckigen Prüfspannung (links) und entsprechender Verstärkungs-Frequenzgang (rechts); obere Grenzfrequenz bestimmt durch schwingungsfähiges Ge-bilde mit von a nach d wachsender Dämpfung als elektrische Nachbildung mechanischer Registrierorgane. (Durch ein technisches Versehen entsprechen die Verstärkungs-Frequenzgänge rechts nicht genau den zugeordneten Prüfspannungsbildern links!)

Liegt zwischen dem 0,1fachen und dem 0,9fachen Endausschlag z. B. ein Intervall von 0,01 Sek., dann ist

$$f_0 = \frac{1}{3 \cdot 0,01 \text{ sec}} = 33,3 \text{ Hz.}$$

2,2 Bestimmt das Registriersystem die obere Grenzfrequenz, was bei allen mechanisch bewegten Organen die Regel ist, soweit nicht der Verstärker

durch „Frequenzblenden“ (auch „Störblenden“ genannt) künstlich in seinem Übertragungsbereich beschnitten ist, dann zeigt der Prüfausschlag das charakteristische Bild eines mehr oder weniger gedämpften (eventuell sogar aperiodischen) „Einschwingvorganges“ (s. Abb. 3). *Der Anstieg beginnt in diesem Falle stetig, d. h. mit waagerechter Anfangstangente, also ohne Knick, um dann — mit oder ohne Überschwingung (in der physiologischen Terminologie meist als „Schleudern“ bezeichnet) — dem Endausschlag zuzustreben*¹³. Im Interesse möglichst schneller Erreichung des Endausschlages bei rechteckiger Eingangsspannung wird im allgemeinen eine 5—10%ige Überschwingung zugelassen¹⁴; ihr entspricht im Bilde des Verstärkungs-Frequenzgangs eine 1—5%ige Überhöhung der *Resonanzfrequenz* f_{\max} (s. Abb. 3). Bei einer 4,3%igen Überschwingung zeigt der Verstärkungs-Frequenzgang gerade keine Überhöhung mehr.

Zur Auswertung des Prüfausschlages müssen zunächst folgende Größen bestimmt werden:

$t_{0/ü}$: die Zeitspanne vom Verlassen der Null-Linie bis zur Erreichung der größten Überschwingung;

\ddot{U} : das Verhältnis von Überschwingung zu Endausschlag.

Aus ihnen ergibt sich die maximal verstärkte Frequenz f_{\max} nach der Gleichung:

$$f_{\max} = \frac{D}{t_{0/ü}}, \quad (5)$$

wobei D nach Ausmessung von \ddot{U} aus obenstehender Tabelle entnommen wird. Die Tabelle gestattet ferner die Bestimmung der Resonanzüberhöhung V_{\max} , d. h. des Faktors, um den f_{\max} gegenüber wesentlich tieferen Frequenzen vergrößert aufgezeichnet wird, in Abhängigkeit von \ddot{U} .

IV. Schlußbemerkung.

Es muß besonders darauf hingewiesen werden, daß sich die oben gemachten Angaben für die Übertragungseigenschaften von Verstärkern ausschließlich auf Konstruktionen beziehen, die den „natürlichen“ Amplituden- und Laufzeitfrequenzgang unverändert lassen, bei denen also die Verstärkung der einzelnen Stufe von tiefen Frequenzen an zunächst frequenzproportional ansteigt, dann — oberhalb der unteren Grenzfrequenz f_u — in den waagerechten Teil des Amplituden-Frequenzgangs übergeht und schließlich wieder absinkt, und zwar oberhalb der oberen Grenzfrequenz f_0 immer genauer umgekehrt proportional der Frequenz. Nicht berücksichtigt wurden Verstärker mit „Kunstschaltungen“, die z. B. eine erhöhte Zeitkonstante vortäuschen sollen (sog. „Zeitkonstanten-Betrug“), wobei der Prüfausschlag für

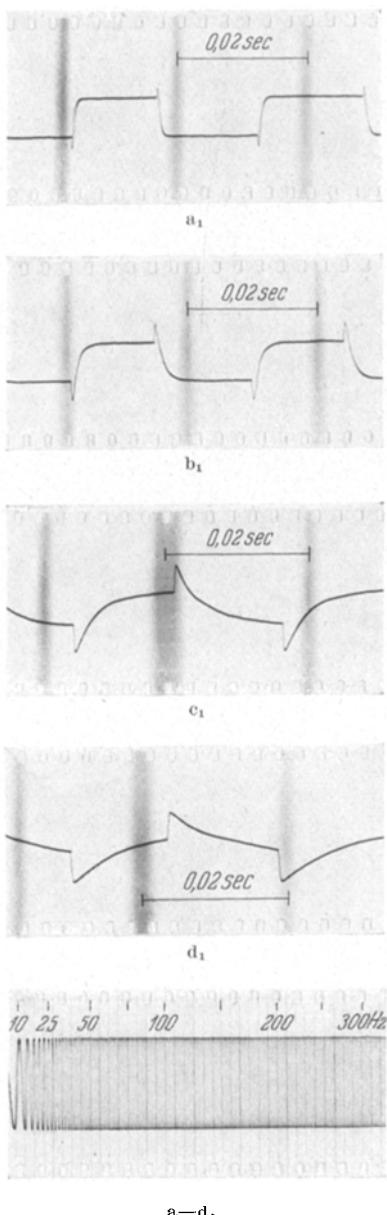


Abb. 4. Bild der rechteckigen Prüfspannung bei von a₁ nach d₁ zunehmender Verformung durch „Laufzeitglied“; der in allen Fällen unveränderte Verstärkungs-Frequenzgang a—d₁ ist trotzdem „gerade“, also zur Kennzeichnung allein nicht ausreichend.

kurze Zeit auf konstanter Höhe gehalten wird, um dann nur um so steiler abzufallen und meistens besonders kräftige negative Nachschwingungen zu erzeugen.

Was durch die bei solchen „Verbesserungen“ der natürlichen Verstärkereigenschaften fast immer auftretenden zusätzlichen Laufzeitdifferenzen entsteht, zeigt Abb. 4 a₁—d₁: sie stellt das durch ein Laufzeitglied (sog. Phasendreher) schrittweise veränderte Bild der Prüfspannung dar; der — für die 4 Einstellungen des Laufzeitgliedes identische — Verstärkungs-Frequenzgang in Abb. 4a bis d₂ gibt für diese schweren Entstellungen des Prüfausschlages keinerlei Anhalt, denn er ist praktisch vollständig „gerade“, d. h. waagerecht.

Ähnlich zweifelhaft in ihrem Wert sind selektive Filter zur Unterdrückung bestimmter Frequenzen *innerhalb* des an sich übertragenen Frequenzbereiches. Abb. 5 zeigt z. B. die Wirkung eines 50-Hz-Filters auf den Verstärkungs-Frequenzgang und auf das Bild des Prüfausschlages. Es ist klar, daß die mit einem derartigen Verstärker registrierten Kurven mit dem objektiven Verlauf der Eingangsspannung kaum mehr etwas zu tun haben. Auch hier sind es besonders wieder die Laufzeitdifferenzen, die — mehr noch als die Verstärkungsdifferenzen — zu einer vollständigen Entstellung der Kurvenzüge führen.

Abschließend kann allgemein gesagt werden: Eine möglichst korrekte, unkomplizierte Wiedergabe der langdauernden, rechteckigen Prüfspannung gibt die beste Gewähr für richtige Aufzeichnung aller Vorgänge, deren gesamte Teilstufen genügend weit über der unteren

und unter der oberen Grenzfrequenz des Gerätes liegen. Dabei ist bei trügheitsfreier Registrierung die von der oberen Grenzfrequenz abhängige Verrundung des Anstieges und die von der unteren Grenzfrequenz abhängige selbständige Rückkehr des Ausschlages zur Nulllinie unvermeidbar, aber nicht störend, wenn die genannten Frequenzbedingungen eingehalten sind. Bei mechanischen Registrierorganen kann unter der gleichen Voraussetzung auch eine leichte Überschwingung des Prüfausschlages in Kauf genommen werden. Soll aber der über-

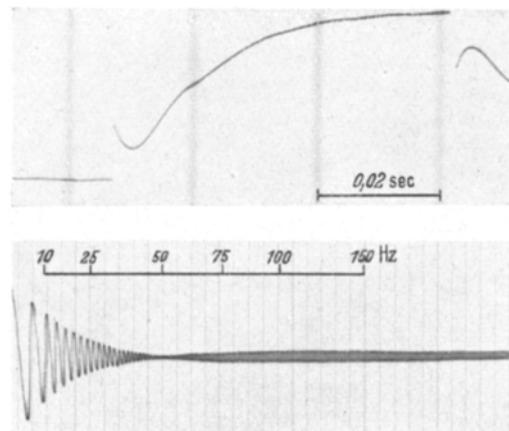


Abb. 5.
Bild der rechteckigen Prüfspannung (oben) und Verstärkungs-Frequenzgang (unten) bei Verwendung eines 50-Hz-Filters: vollständige Entstellung der Prüfspannung.

tragene Frequenzbereich eingeschränkt werden, dann zweckmäßig nur durch einfache CW-Glieder mit „natürlichem“ Amplituden- und Laufzeitgang.

Zusammenfassung.

1. Die Prüfung der wesentlichen Eigenschaften von Elektrencephalographen ohne Verwendung besonderer Hilfsgeräte wird beschrieben. Nach Aufzählung der Forderungen, die von einem idealen Registriergerät erfüllt werden müßten, werden die Kennwerte definiert, die die Abweichungen vom — technisch nicht realisierbaren — Idealfall charakterisieren. Es wird unterschieden zwischen *Proportionalitätsfehlern* („nicht-linearen Verzerrungen“) und *frequenzabhängigen Fehlern* („linearen Verzerrungen“).

2. Die Feststellung von *Proportionalitätsfehlern* durch Registrierung eines rechteckigen Eichstoßes (Gleichspannungssprung) und einer kleineren überlagerten Wechselspannung wird dargestellt. Die Größe der zulässigen Fehler wird diskutiert. Direktschreibende Registrierorgane werden auf *Reibungsfehler*, die ebenfalls den Proportionalitäts-

fehlern zuzurechnen sind, durch Registrierung eines Gleichspannungssprunges allein untersucht.

3. Zur alleinigen Prüfung des *Amplituden-Frequenzganges* wird eine einfache Methode unter Benutzung einer *Handlampendynamo* mitgeteilt.

4. Für die Prüfung beider *frequenzabhängiger Fehler* wird ebenfalls die *Methode des Gleichspannungssprunges* benutzt. Dabei dient die *Zeitkonstante* T_u , mit der der Registierausschlag zur Null-Linie zurückkehrt, zur Bestimmung der *unteren Grenzfrequenz* f_u nach Formel (1). Den erforderlichen Mindestwert für T_u in Abhängigkeit von der tiefsten interessierenden Grundfrequenz f_{\min} ergibt Formel (2).

5. Als Maß für die *obere Grenzfrequenz* f_0 wird die Einstellzeit verwendet, in der ein bestimmter Bruchteil des Endausschlages erreicht wird. Dabei ist entscheidend, ob die obere Frequenzgrenze von dem Verstärker oder von dem Registrierorgan bestimmt wird:

a) Ist der Verstärker maßgebend — und zwar in ihm ein CW-Glied —, dann wird f_0 nach Formel (3) bzw. (3a) gewonnen. Sind *mehrere etwa gleichartige CW-Glieder* vorhanden, dann erhält man f_0 nach Formel (4).

b) Wenn das Registrierorgan die Einstellgeschwindigkeit bestimmt, so ergeben sich die Frequenzeigenschaften aus Formel (5) und (6), wobei als Bestimmungsstücke Einstellzeit und prozentuale Überschwingung verwendet werden.

6. Auf die Gefahren von „Kunstschaltungen“ wird hingewiesen, durch die die „natürlichen“ Eigenschaften des CW-Verstärkers mehr leiden als verbessert werden. Für den Fall, daß Frequenzbeschneidungen erforderlich sind, werden einfache CW-Glieder empfohlen, da bei ihnen die unerwünschten Formverzerrungen — besonders die durch Laufzeitdifferenzen verursachten — am geringsten sind.

Literatur.

- ¹ HAAANTJES, J.: Philips' Techn. Rdsch. **6**, 193 (1941). — ² STRECKER, F.: Elektr. Nachr.-Techn. **17**, 93 (1940). — ³ WAGNER, K. W.: Einführung in die Lehre von den Schwingungen und Wellen. Wiesbaden: Dieterich 1947. — ⁴ WEBER, A.: Die Elektrokardiographie, 4. Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1948. — ⁵ DIN-Blatt 13 401. Berlin u. Krefeld-Uerdingen: Beuth-Vertrieb 1941. — ⁶ HOLZER, W.: Kathodenstrahl-Oscillographie in Biologie und Medizin. Wien: Wilhelm Maudrich 1936. — ⁷ HELMHOLTZ, H. v.: Die Lehre von den Tonempfindungen, 5. Aufl. Braunschweig 1906. — ⁸ TÖNNIES, J. F.: Diss. Berlin-Charlottenburg 1936. — ⁹ BÉKÉSY, G. v.: Akust. Z. **2**, 217 (1937). — ¹⁰ GRÜTZMACHER, M.: Z. VDI **88**, 169 (1944). Auszug aus: Akust. Z. **8**, 49 (1943). — ¹¹ RITZMANN, J.: SRW-Nachr. **1936**, 17. — ¹² LEPECHKIN, E. U.: Das Elektrokardiogramm, Bd. 7 der Kreislaufbücherei. Dresden u. Leipzig: Theodor Steinkopff 1942. — ¹³ TSCHER-MAK-SEYSENEGG, A.: Pflügers Arch. **241**, 342 (1938). — ¹⁴ HOFMANN, W.: Die richtige Dämpfung der Oscillographenschleifen. Wiss. Veröff. Siemens-Werk **12**, 142 (1933).