

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 29 (1951)

Heft: 5

Artikel: Ein neuartiger, momentan logarithmischer Breitband-Verstärker

Autor: Epprecht, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875338>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telefonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Ein neuartiger, momentan logarithmischer Breitband-Verstärker

Von G. Epprecht, Bern

621.396.645:621.317.7

Zusammenfassung. Das Bedürfnis nach logarithmisch zeigenden Mess- und Registrierinstrumenten führte zur Entwicklung eines logarithmischen Verstärkers. Es handelt sich dabei nicht um einen Verstärker mit regeltem Verstärkungsgrad, sondern der Verstärker enthält nichtlineare Netzwerkelemente, so dass am Ausgang direkt der Logarithmus der Eingangsspannung erscheint. Die log-Funktion wird aus in erster Näherung linearen Teilstücken zusammengesetzt. In Fällen, in denen ein grosser Spannungsbereich gewünscht wird, stellt sich dabei das Problem, diesen Bereich durch die Verstärkerstufen zu bewältigen, ohne einerseits die Verstärker zu übersteuern, wobei andererseits — wegen der Verwendung von Dioden als nichtlineare Elemente — die kleinsten Spannungen immer noch in der Grössenordnung von 1 V sein müssen. Diese Schwierigkeit wurde durch eine besondere Kaskadenschaltung gelöst. Die log-Charakteristik ist weitgehend unabhängig von der Kennlinie der einzelnen Dioden und deren Veränderungen. Die Genauigkeit der Approximation wird berechnet und der Einfluss der verschiedenen Konstruktionsparameter diskutiert. Die kurze Beschreibung eines praktisch ausgeführten Verstärkers illustriert das Prinzip.

Einleitung

Man geht seit etlichen Jahren, besonders in der Fernmeldetechnik und verwandten Gebieten, immer mehr dazu über, bestimmte Grössen mit logarithmischen statt linearen Maßstäben zu messen. Das hängt wohl zum Teil damit zusammen, dass der logarithmische Maßstab viel besser unseren Sinnesindrücken entspricht als der lineare. Auch ist oft, zum Beispiel bei der Angabe von grossen Verhältniszahlen, das logarithmische Mass übersichtlicher als das lineare. Immer mehr ist daher das Bedürfnis vorhanden nach Instrumenten, die direkt logarithmisch zeigen. Über kleinere Bereiche kann man unter Umständen Anzeigeeinstrumente verwenden, deren Skalen logarithmisch geeicht sind oder deren Auslenkung proportional dem Logarithmus der Eingangsgrösse gemacht wird, indem man besondere Konstruktionen anwendet.

Sobald man jedoch ein Grössenverhältnis von mehreren Dekaden bestreichen will, versagen diese Methoden. Gewöhnlich reichen dann auch die klein-

Résumé. Le manque d'appareil à indication logarithmique capable de mesurer et d'enregistrer correctement des tensions à variations rapides a conduit à la construction d'un amplificateur spécial. La caractéristique logarithmique du niveau de sortie en fonction du niveau d'entrée ne provient pas, comme d'habitude, d'une rétroaction de la sortie sur les étages d'amplification, mais directement d'éléments de circuit non linéaires. On obtient en première approximation la caractéristique logarithmique voulue par la juxtaposition d'éléments linéaires. Dans les cas où l'échelle des tensions à mesurer est très étendue, un double problème se pose: d'une part, il faut éviter de saturer les étages d'amplification et, d'autre part, il ne faut pas que les tensions agissant dans les circuits logarithmiques soient plus petites que 1 volt à cause des diodes qui les constituent. Cette difficulté a été résolue par un circuit en cascade spécial. La caractéristique logarithmique est largement indépendante de celle des diverses diodes et de leurs variations possibles. L'exactitude de l'approximation obtenue par l'amplificateur est calculée et l'on discute l'influence de divers paramètres. Une courte description d'un amplificateur réalisé en pratique illustre le principe exposé.

sten vorkommenden Leistungen nicht aus, um ein Instrument zu betätigen. In solchen Fällen sind Verstärker erwünscht, deren Ausgangsspannung dem Logarithmus der Eingangsspannung entspricht.

Arten von logarithmischen Verstärkern

Es gibt grundsätzlich zwei Arten von log-Verstärkern: Logarithmisch geregelte Verstärker und momentan logarithmische Verstärker. Die erste Art ist heute am besten bekannt und wird am meisten angewendet. Es handelt sich dabei um Verstärker mit variablem Verstärkungsgrad, wobei dieser von einem mittleren Wert der Ausgangsspannung (allenfalls Eingangsspannung) gesteuert wird. Fast alle modernen Empfänger verwenden diese Art Regelverstärker zum Ausgleich von Feldstärkeschwankungen. Allerdings ist bei diesen eine genau logarithmische Abhängigkeit unwesentlich. Das angenähert logarithmische Element ist dabei die Charakteristik der Regelröhren. Diese Art Verstärker wird auch in der Messtechnik heute am meisten verwendet, wenn logarithmische

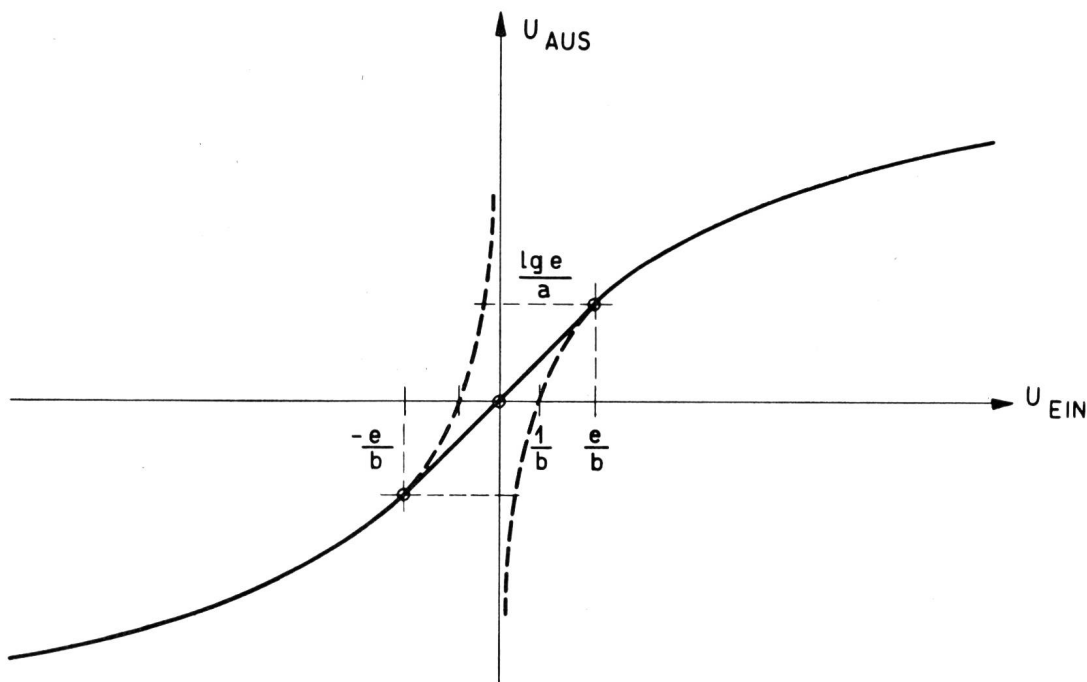


Fig. 1
Kennlinie für das Logarithmieren von Wechselspannungen nach Formel (1)

Anzeige erwünscht ist. Regelverstärker können überall da verwendet werden, wo sich Schwankungsspannung und Nutzspannung frequenzmässig trennen lassen, das heisst, wenn die Veränderungen des Spannungspegels relativ langsam sind im Vergleich zu den gewünschten Nutzfrequenzen.

Der Vorteil dieser Verstärkerart liegt darin, dass im stationären Zustand die Eingangsspannung unverzerrt am Ausgang erscheint. Auch ist die Konstruktion eines solchen Verstärkers verhältnismässig einfach, da er viel verwendet wird und die entsprechenden Bauelemente (Regelröhren) eigens zu diesem Zwecke industriell hergestellt werden. Wenn jedoch derartige Verstärker für messtechnische Zwecke benützt werden, so fallen ihre Nachteile oft mehr ins Gewicht: die Röhrencharakteristiken sind nicht sehr zuverlässig, verschieden von Röhre zu Röhre und ändern sich oft mit dem Altern der Röhre. Die Genauigkeit der Exponential-Charakteristik ist sehr gering und für viele Messzwecke ungenügend.

Eine beliebig grosse Genauigkeit erreicht man mit mechanischen Regelverstärkern (mit mechanisch gesteuertem Eingangspotentiometer). Diese gewöhnlich als Schreibverstärker gebauten Apparate werden daher in der Messtechnik viel verwendet; sie haben nur den Nachteil einer begrenzten Regelgeschwindigkeit und einer verhältnismässig teuren Konstruktion.

Die zweite Art von log-Verstärkern sind die momentan logarithmischen. Dabei wird verlangt, dass die Ausgangsspannung in jedem Augenblicke dem Logarithmus der Eingangsspannung entspricht. Ihre Anwendung ist zum Beispiel da am Platz, wo keine frequenzmässige Trennung zwischen einer Nutzspannung und einer Schwankungsspannung gemacht werden kann. Diese log-Verstärker sind auch dann vorteilhaft, wenn man mit sehr raschen, grossen Schwankungen zu tun hat (wie zum Beispiel die Aus-

messung von Störspannungsspitzen). Regelverstärker können derart rasche Schwankungen nicht richtig verarbeiten, da die Regelung naturgemäss erst mit einer gewissen Verzögerung einsetzt.

Die Erzeugung einer logarithmischen Funktion, worum es sich hier im Grunde handelt, ist auch in vielen andern Fällen erwünscht: Elektronische Rechenmaschinen, Messgeräte für Spezialzwecke, zum Beispiel Modulationsgradmeter, logarithmische Gleichstromverstärker, akustische Messinstrumente usw.

Man kann zur Erzeugung einer log-Funktion Exponentialröhren verwenden. Jedoch lassen sich solche Kennlinien höchstens über einen Bereich von etwa 40 dB verwenden, wenn der Fehler nicht grösser als etwa 2 dB sein soll. Einfache Gegentakt- und Kaskadenschaltungen von Exponentialröhren in dieser Verwendungsart gibt es nicht.

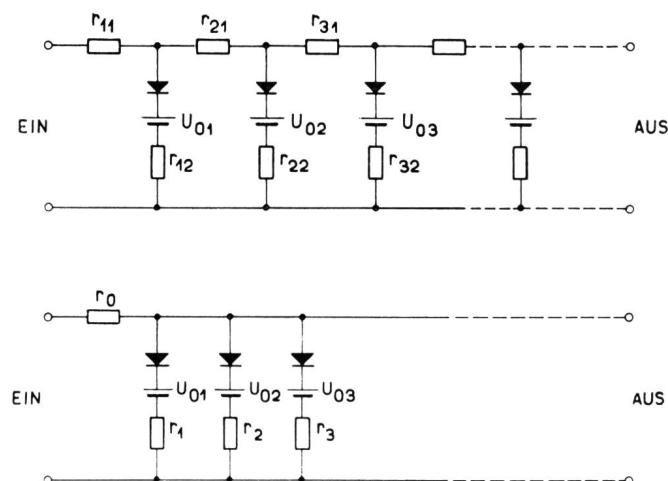


Fig. 2a + b. Schaltungsmöglichkeiten zur Erzeugung einer stückweise linearen Näherung für eine monotone Funktion

Es drängt sich auf, hier einen Punkt noch genauer zu untersuchen: Meistens wünschen wir log-Verstärker für Wechsellspannungen; sie sollen symmetrisch arbeiten für die positive und die negative Halbwelle. Die Funktion $y = \log x$ wird jedoch $-\infty$ für $x = 0$ und ist komplex für $x < 0$. Es kann sich für unseren Fall nicht darum handeln, die log-Funktion für sehr kleine und negative x -Werte in dieser Weise zu erzeugen. Wir wünschen vielmehr folgende Beziehung darzustellen:

$$\begin{aligned} a U_A &= \log b U_E & U_E > e/b \\ a U_A &= -\log b |U_E| & U_E < -e/b \\ \left[a U_A &= \frac{\log e}{e} b U_E & e/b > U_E > -e/b \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Diese Beziehung ist in Fig. 1 dargestellt. Positive und negative Halbwellen einer Wechsellspannung werden dabei symmetrisch behandelt.

Der Amplitudenwert der Wechsellspannung wird von einem bestimmten Minimalwert an logarithmisiert. Kleinere Spannungen gehen linear durch die Schaltung.

Erzeugung der log-Funktion aus linearen Teilstücken

Ein bekanntes Prinzip, beliebige (monotone) Funktionen zu erzeugen, besteht darin, die gewünschte Funktion durch lineare Teilstücke anzunähern. Die Feinheit der Unterteilung kann der verlangten Genauigkeit angepasst werden. Man benützt dazu ein stückweise lineares Netzwerk, bestehend aus ohmschen Widerständen und Ventilen (Dioden) mit bestimmten Vorspannungen. Ein wesentlicher Vorteil

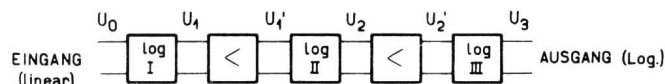


Fig. 3. Blockschema des log-Verstärkers

gegenüber Schaltungen, die direkt Röhrencharakteristiken verwenden, ist der geringe Einfluss einer Veränderung der Ventilkennlinie. Solche Veränderungen wirken sich für das gesamte Netzwerk erst in zweiter Ordnung aus, das heisst als Veränderung der Abweichung von der idealen Kurve. Fig. 2 zeigt die zwei Grundschaltungen (praktisch meist als Gegentaktschaltungen ausgebildet), die sich für diesen Zweck eignen. Die Schaltung 2a hat den Vorteil, dass die Widerstände r_{12} günstig gewählt werden können in bezug auf den Diodenwiderstand (abgesehen von der Beschränkung der Widerstandswerte durch die verwendeten Frequenzen). In der Schaltung 2b wird jedoch der gesamte Strom gleichmässiger auf die einzelnen Dioden verteilt, was unter Umständen wichtig werden kann. Es lassen sich natürlich viele Kombinationen und Modifikationen der Schaltungen denken, je nach den gewünschten besonderen Eigenschaften des Netzwerkes.

Um sich die Arbeitsweise des Netzwerkes zu vergegenwärtigen, fasst man am besten die einzelnen

Elemente als Spannungsteiler auf, bei denen die Zunahme der Ausgangsspannung nur ein gewisser Bruchteil der Zunahme der Eingangsspannung ist, sobald die Eingangsspannung den Betrag der Dioden-Vorspannung überschreitet.

Zunächst scheint es, als ob man zum Beispiel in Fig. 2 beliebig viele Glieder anhängen könnte. Praktisch ist dem jedoch bald eine Grenze gesetzt. Wenn man die Dioden als Ventile verwenden will, so ist eine gewisse minimale Betriebsspannung notwendig (ungefähr 1 V bei den heute bekannten, handelsüblichen Dioden). Für Spannungen wesentlich kleiner als 1 V

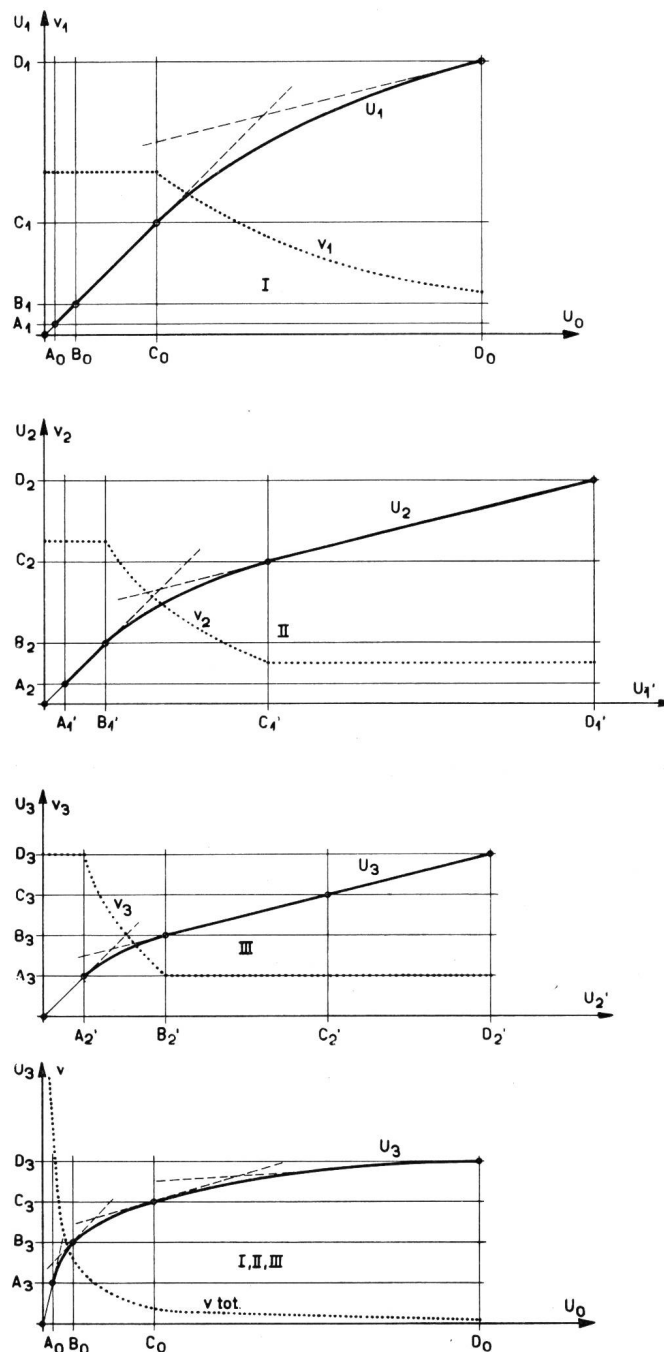


Fig. 4. Erzeugung der log-Funktion aus Teilstücken in einer Kaskadenschaltung nach Fig. 3. Spannungscharakteristik U und Verstärkungscharakteristik V der einzelnen Netzwerke

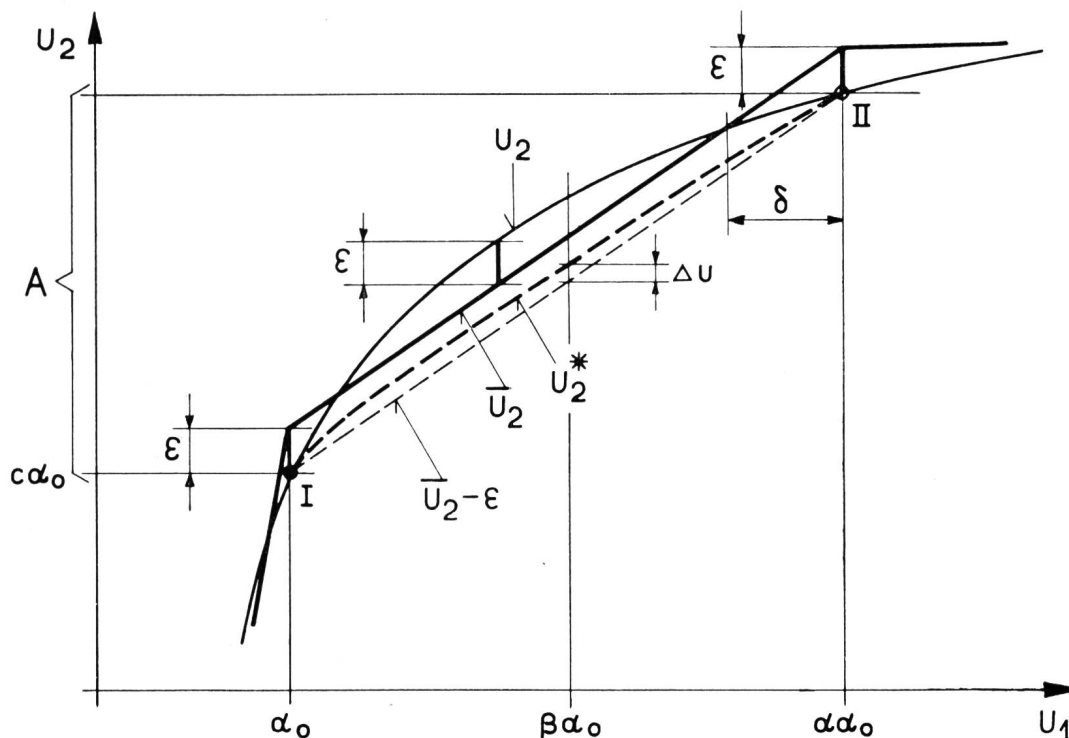


Fig. 5
Approximation der log-Funktion durch Polygonzug

ist daher unser Netzwerk nicht geeignet. Da wir aber in der Mehrzahl der Anwendungsfälle mit kleinen Spannungen arbeiten, müssen wir einen Vorverstärker verwenden. Bringen wir jedoch die kleinsten vorkommenden Spannungen auf ein Niveau von etwa 1 V, so ist der Spannungsbereich sowohl durch den Verstärker als auch durch die Dioden bald nach oben beschränkt. Diese Schwierigkeit kann durch eine besondere Kaskadenschaltung von Verstärkern und stückweise logarithmischen Netzwerken überwunden werden. Das Prinzip sei anhand eines Beispieles mit drei Stufen erläutert (s. Fig. 3 und 4): Im Netzwerk I wird nur der oberste Teil der log-Funktion erzeugt, das heisst, nur die grossen Spannungen werden logarithmisiert, während das Netzwerk für die mittleren und kleinen Spannungen, die noch unterhalb des günstigen Arbeitsbereichs der Dioden liegen, linear arbeitet.

Dem log-Glied I folgt ein Verstärker. Hinter diesem Verstärker wird nun im Netzwerk II der mittlere Teil der log-Funktion erzeugt. Die mittleren Spannungen sind nun durch den Verstärker auf das entsprechende Niveau gehoben worden. Für die grossen und die kleinen Spannungen ist II linear.

Im letzten log-Glied werden die nun zweimal verstärkten kleinsten Spannungen logarithmisiert. Dieses Prinzip lässt sich ohne weiteres auch auf eine grössere Anzahl Stufen anwenden.

Die beschriebene Anordnung hat nun zwei wesentliche Vorteile: Erstens arbeiten alle Dioden in annähernd gleichen, günstigen Spannungsgebieten. Man erreicht damit über den ganzen Spannungsbereich eine gleichmässige Genauigkeit der log-Funktion. Zweitens sind die Spannungsamplituden am Gitter aller Verstärkerstufen von gleicher Grössenordnung und liegen in einem praktisch günstigen Gebiet

(einige Volt). Das kommt daher, dass im vorhergehenden log-Glied immer die hohen Spannungen vom Ausgang der letzten Verstärkerstufe reduziert werden. Als weiterer Gewinn kommt unter Umständen dazu, dass die Schaltkapazitäten des Netzwerkes auf mehrere Verstärkerstufen verteilt werden. Es bietet keine besonderen Schwierigkeiten, mit diesem System einen Spannungsumfang von über 100 dB zu bewältigen.

Genauigkeit der Approximation

Da die log-Funktion durch lineare Teilstücke angenähert wird, stellt sich die Frage nach der Genauigkeit dieser Methode. Für die Berechnung der Abweichungen nehmen wir zunächst an, dass die Gleichrichter ideale Ventile sind mit unendlichem Sperrwiderstand und verschwindendem Durchlasswiderstand. Die Approximation der log-Funktion ist dann ein Polygonzug (in linearen Koordinaten dargestellt).

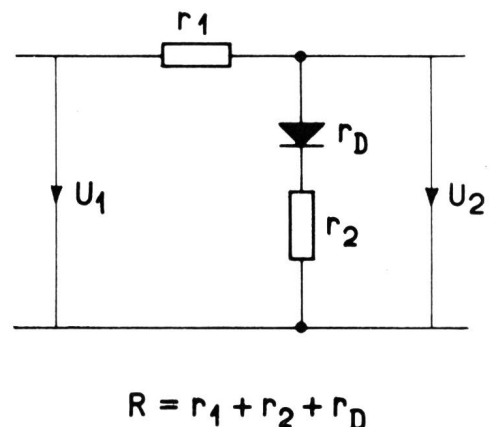


Fig. 6. Elementarglied des log-Netzwerkes

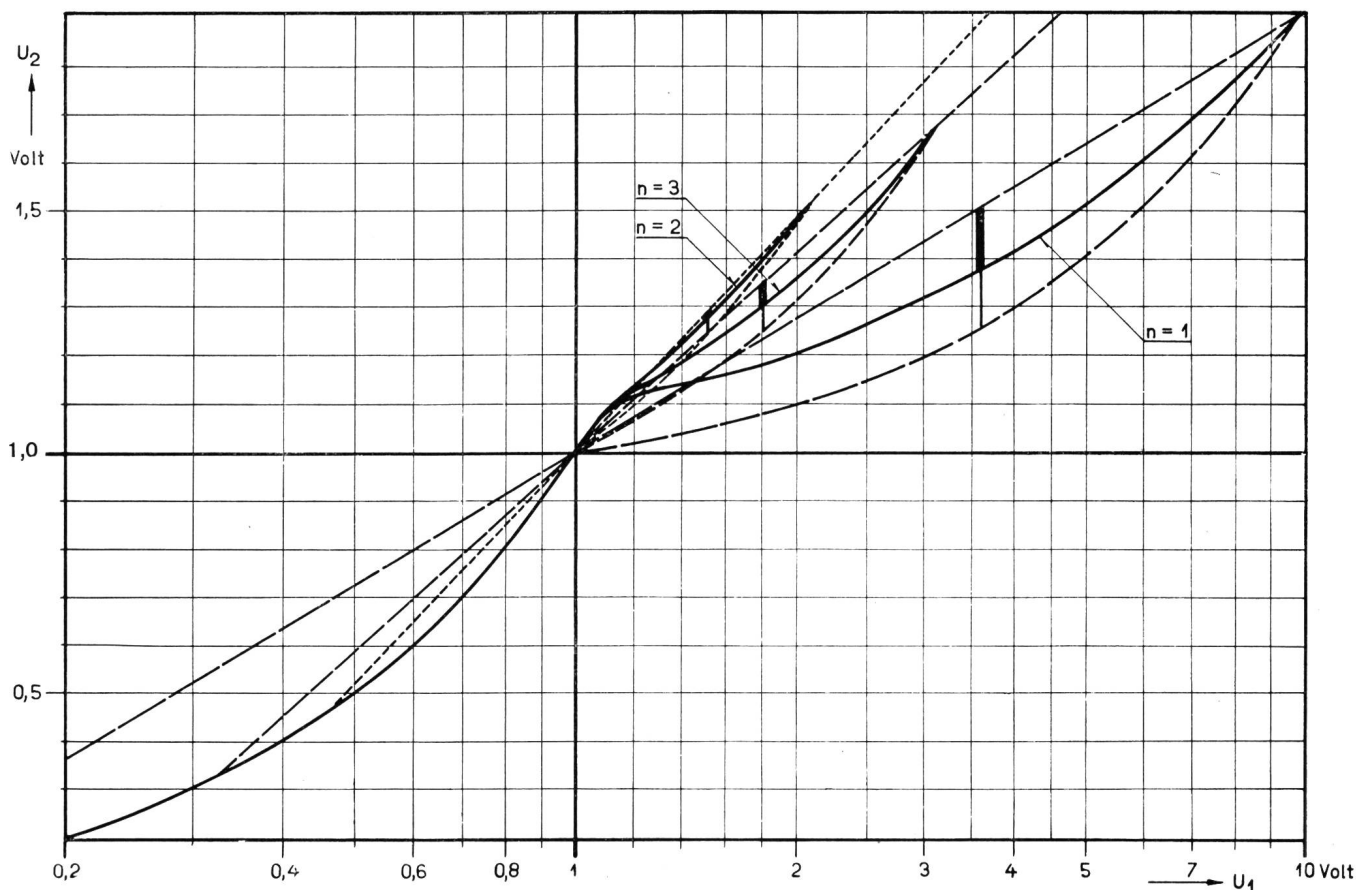


Fig. 7. Genauigkeit der Approximation bei verschiedener Feinheit der Unterteilung. n = Anzahl der linearen Teilstücke je Spannungsdekade; $R = 10 \text{ K } \Omega$

Bezeichnen wir mit:

$$U_2 = d \ln U_1$$

$$\bar{U}_2 = k + c U_1$$

die log-Funktion bzw. die lineare Näherung im Gebiete $x = \alpha_0$ bis $x = \alpha_0 \alpha$, so ergeben sich folgende Beziehungen (siehe Fig. 5):

$$c = dm/\alpha_0 \alpha \quad \text{wobei } m = \frac{\alpha \ln \alpha}{\alpha - 1}$$

$$\varepsilon = \frac{d}{2} (m - 1 - \ln m) \quad (2)$$

$$\delta = e^{\varepsilon/d} - 1 \quad (3)$$

$$\delta_{\text{dB}} = 20 \lg (1 + \delta) = 4,343 (m - 1 - \ln m) \quad (3a)$$

Wählen wir für jede Spannungsdekade (20 dB) am Eingang n lineare Teilstücke für die Näherung, so ergeben sich folgende Approximationsfehler:

n	1	2	3	4
$\delta_{\%}$	37	8,5	3,8	2,1
δ_{dB}	2,7	0,70	0,33	0,19

Einfluss der nichtlinearen Diodencharakteristik

Wir haben im vorangehenden mit einer idealisierten Kennlinie der Diode gerechnet. Im praktischen Falle müssen wir jedoch die variablen Durchlasswiderstände der Dioden berücksichtigen. Die Ab-

weichung der Näherung vom Polygonzug wird um so stärker, je mehr wir uns mit den verwendeten Netzwerk-Widerständen dem Durchlasswiderstand der Dioden nähern. Es ist ein glücklicher Zufall, dass in den meisten Fällen die praktische Approximation besser ist als die theoretische, da die Ecken des Polygonzuges gerundet werden (U^* in Fig. 5). Man kann die Abweichung der wirklichen Kurve vom geraden Teilstück berechnen in Funktion von Diodenvorspannung, Widerstandswerten des Netzwerkes und Diodencharakteristik. Das Resultat sei im folgenden ohne Ableitung angegeben:

$$\frac{\Delta U}{A} \approx \frac{(\beta - 1)}{(\alpha - 1)} \frac{a}{\alpha_0} \frac{r_1 (\beta^{-b} - \alpha^{-b})}{(R_{II} - r_1) R_{II}^{1-b}} \quad (4)$$

Dabei wurde für r_D folgendes Gesetz angenommen, das sich für Kristalldioden als gute Näherung ergibt:

$$r_D = a i^{-b} \quad (5)$$

$$(R = r_1 + r_2 + r_D)$$

r_2 muss so gewählt werden, dass Punkt II richtig liegt, ist also um den Diodenwiderstand r_{DII} kleiner als der theoretische Wert bei idealer Diodencharakteristik.

Formel (4) ist nicht sehr übersichtlich; der Einfluss der verschiedenen Faktoren wurde daher in den Figuren 7 bis 9 graphisch dargestellt. Dabei wurde die mittlere Charakteristik einer 1N34-Diode zugrunde gelegt. (Die Kurven sind in einfach logarithmischem

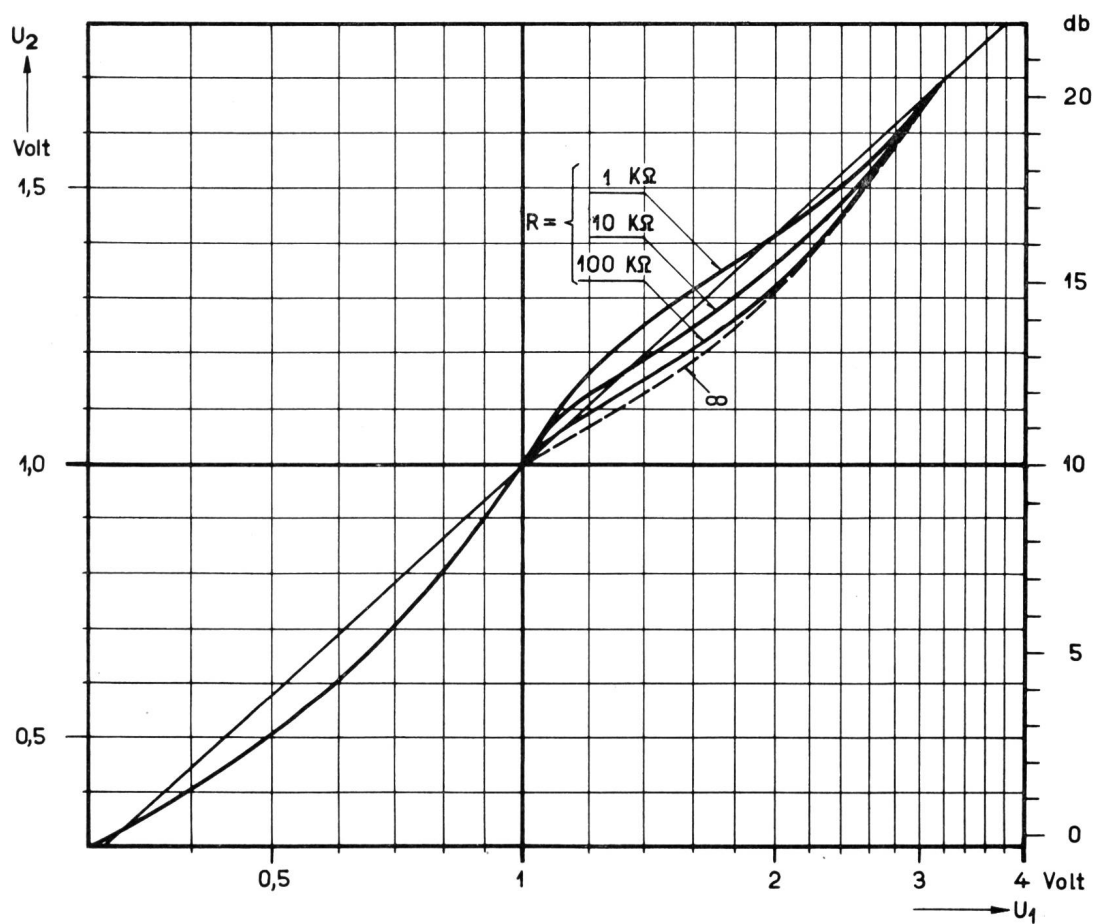


Fig. 8
Einfluss des Widerstands-niveaus auf den Verlauf der Approximation ($n = 2$)

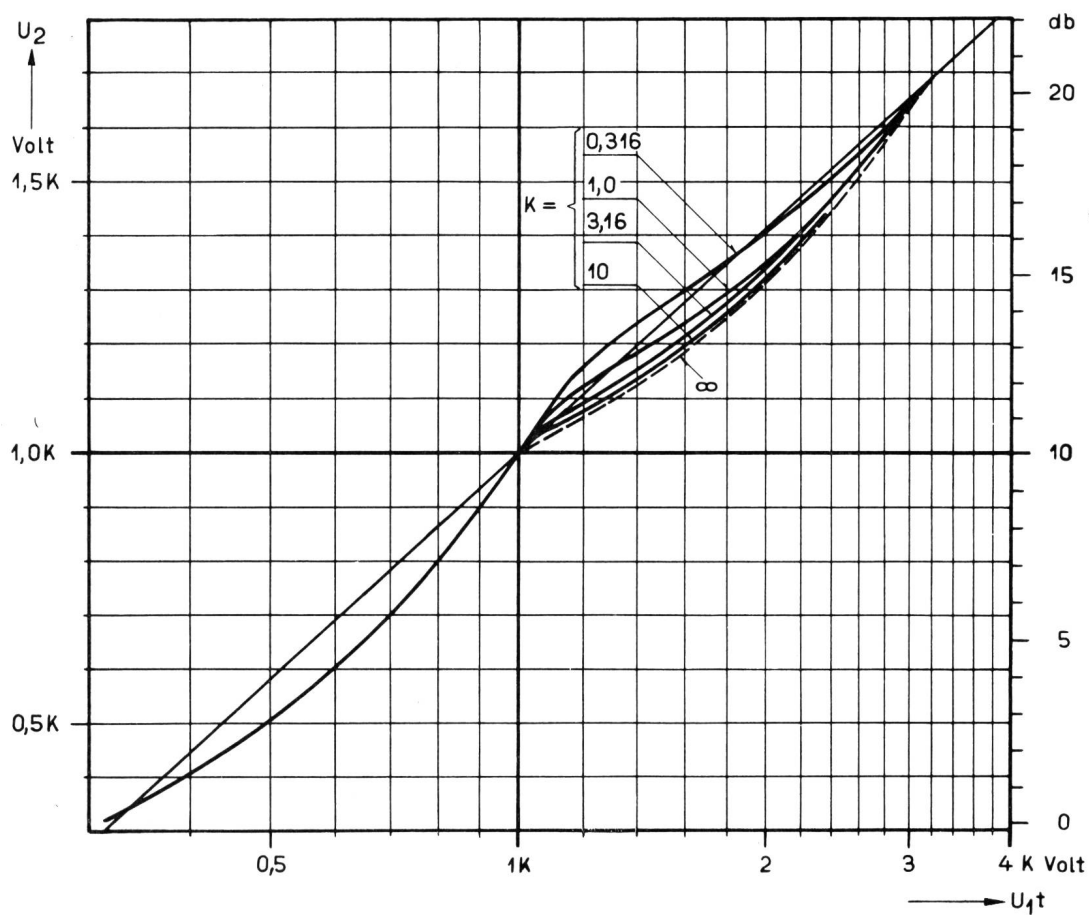


Fig. 9
Einfluss der Diodenvorspannung auf den Verlauf der Approximation (Vorspannung = K Volt, $n = 2$, $R = 10 \text{ K}\Omega$)

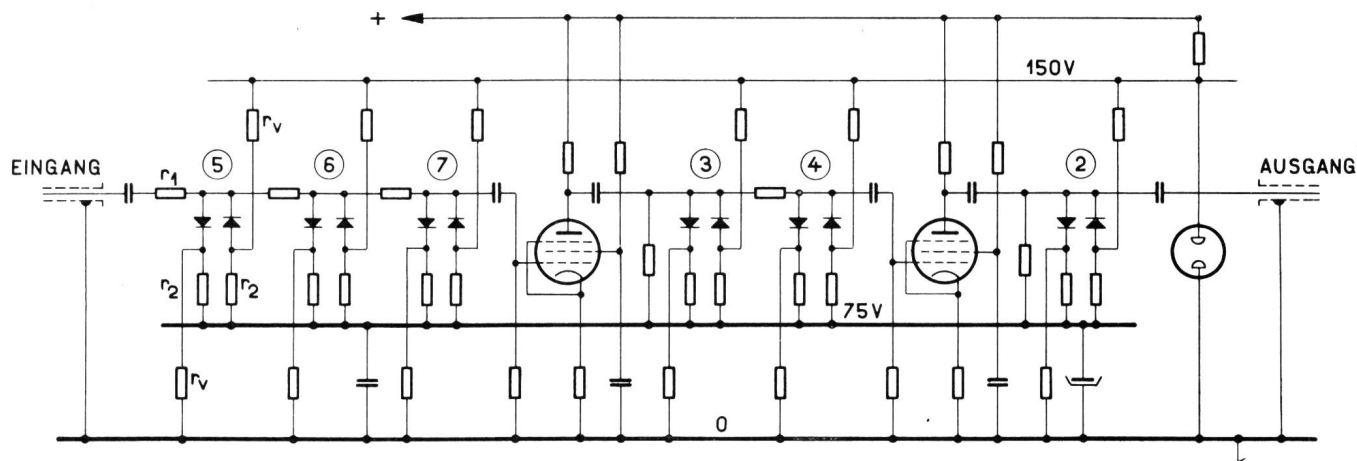


Fig. 10. Schema des logarithmischen Breitband-Verstärkers
(eingekreiste Zahlen über den Dioden = fortlaufende Numerierung der zugehörigen linearen Teilstücke der log-Funktion)

Netz dargestellt, die log-Funktion ist in dieser Darstellung eine Gerade.)

Aus den Figuren geht hervor, dass sich kleine Vorspannungen und niedriges Impedanzniveau in ähnlicher Weise bemerkbar machen. Man sieht auch, dass durch geschickte Wahl dieser Werte der Kurvenverlauf günstig beeinflusst werden kann. Im übrigen bedürfen die Figuren keiner weiteren Erläuterung.

Praktische Ausführung eines log-Verstärkers

Nach den vorstehend dargelegten Prinzipien wurde ein Verstärker gebaut zur Messung von Störspan-

mal 2 dB. In unserem Falle wurde dem log-Verstärker ein Gleichrichter nachgeschaltet, um Spitzenwerte zu messen. Die Abflachung der Spitzen durch das Logarithmieren ergibt günstige Gleichrichterbedingungen. Durch die Verwendung von Kristalldioden lässt sich die Apparatur auf sehr kleinem Raum unterbringen. Für eine Gegentaktausführung mit n linearen Teilstücken benötigt man $2(n-1)$ Dioden.

Die notwendigen Vorspannungen werden in dieser Ausführung durch einen Spannungsabfall an den Querwiderständen r_2 der Diodenstufen erzeugt, entstehend durch den Strom i_v , der der stabilisierten Quelle (150 V) über r_v entnommen wird. Gleichstrommässig hat das Diodennetzwerk ein Nullpotential von 75 V; dies ermöglicht eine einfache Erzeugung der stabilisierten Spannung. Die gemessene Charakteristik des gebauten log-Verstärkers ist in Figur 11 dargestellt. Der Verstärker ist als Breitband-Verstärker ausgeführt und hat einen Frequenzumfang von 0,5...2500 kHz.

Das Netzwerk kann auch so disponiert werden, dass alle Diodenvorspannungen gleich sind. Dies ergibt unter Umständen eine einfache Lösung für die Erzeugung der Vorspannung. Andererseits hat man dadurch weniger Freiheit in der Wahl der Netzwerk-widerstände.

Die beschriebene praktische Ausführung des Verstärkers stellt einen Prototyp dar. Auf Grund der damit gemachten Erfahrungen wird gegenwärtig ein neuer Typ entwickelt. Die Abänderungen beziehen sich weniger auf die log-Netzwerke als auf die verwendeten Breitband-Verstärkerstufen. Über diese Entwicklung soll zu gegebener Zeit berichtet werden.

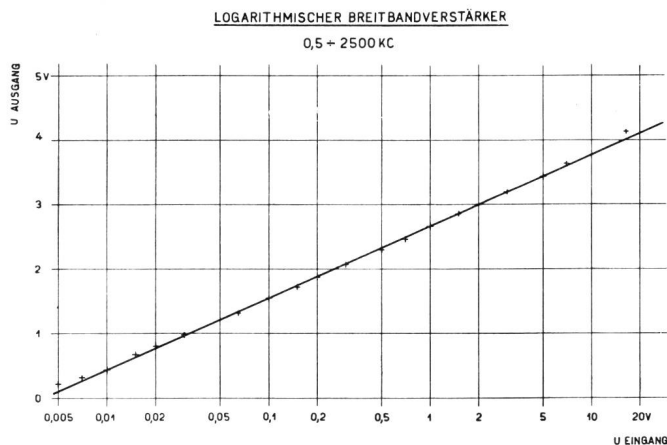


Fig. 11. Gemessene Charakteristik des von uns gebauten log-Verstärkers nach Fig. 10

nungen. Die Schaltung des Verstärkers geht aus Fig. 10 hervor. In einem Bereich von 60 dB wird die log-Funktion auf $\pm 0,5$ dB angenähert, und 5 dB ausserhalb dieses Gebietes ist die Abweichung maxi-