

# Trockengleichrichter

Es gibt heute zwei, in der Wirkungsweise gleiche, im Aufbau jedoch grundsätzlich verschiedene Gleichrichterarten, die häufig angewendet werden, den Kupferoxydul-Gleichrichter und den Selen-Gleichrichter. Insbesondere der letztere hat nunmehr eine Vollkommenheit und Praxisreife erlangt, die allefrühere, zum Teil berechtigte Skepsis verschwinden ließ. Gerade auf Selen-Gleichrichter trifft man heute sowohl in der Starkstromtechnik als auch in der Fernmelde- und vor allem in der Funktechnik.



Bild 1. Verschiedene AEG-Selen-Gleichrichter

Die ersten Selen-Gleichrichter kamen etwa um 1930 auf den Markt. Trotzdem gelang es erst in den letzten Jahren, eine glaubwürdige Theorie des Gleichrichterereffekts aufzustellen und die Zusammenhänge bis zu einem gewissen Grade zu klären. Die Praxis eilte in diesem Falle der wissenschaftlichen Erkenntnis voraus. Man weiß aus exakten Messungen, daß reines Selen ein Isolator ist und daß die Gleichrichterwirkung auf einem Oberflächeneffekt beruht. Der große Chemiker Berzelius hat außer den Elementen Thor und Zer auch das Element Selen (Nr. 34 im periodischen System der chemischen Elemente) entdeckt; das war im Jahre 1818. Er hat es in chemischer Hinsicht gründlich untersucht, aber erst um 1885 wurde außer seiner Eigenschaft, den Widerstand bei Belichtung zu ändern (lichtelektrische Selenzelle), auch die zweite interessante und merkwürdige Eigenschaft entdeckt, die der unsymmetrischen Leitfähigkeit. In Kombination mit gewissen Metallen leitet das Selen in der einen Stromrichtung besser als in der anderen.

## Die Herstellung der Selen-Gleichrichter

Das Selen wird in einer dünnen Schicht auf gewöhnlich runde oder rechteckige Scheiben aufgebracht, wobei als Metall für die Scheiben entweder Leichtmetall, z. B. Aluminium mit Metallzwischen-schichten, oder Eisen verwendet wird. Der Vorgang des Aufbringens unterscheidet die Fabrikationsmethoden wesentlich und ist maßgeblich für die späteren Eigenschaften der Gleichrichter. Entweder wird das Selen auf die erhitzten Trägerplatten aufgestrichen oder aufgespritzt, aufgestäubt und aufgepreßt oder im Hochvakuum aufgedampft. Diese letztere, von der Firma AEG geübte Methode wird mit bestem Erfolg angewendet. Sie gewährleistet neben anderen Vorteilen ein dichtes Gefüge, gleichmäßiges Überziehen selbst großer Flächen und ein unmittelbares Abscheiden des Selens in der erwünschten Kristallisationsform. Die Methode ist allerdings erst möglich geworden, seit man es gelernt hat, Bewegungen im Hochvakuum durchzuführen (z. B. Röntgenröhren mit Drehanoden) oder Bewegungen ins Hochvakuum zu übertragen.

Wenn die Trägerplatten mit der aufgedampften Selen-schicht Temperungen und verschiedene Oberflächenbehandlungen erfahren haben, wird die metallische Gegenelektrode in Form einer weiteren Schicht aufgebracht, z. B. durch Aufspritzen. Der Schmelzpunkt dieser Schicht liegt unterhalb des Schmelzpunktes des Selens (215 °C), im allgemeinen jedoch höher als 100 °C. Meist dient hierzu eine Zinnlegierung. Was man an Gleichrichterscheiben äußerlich sieht, ist einerseits die Trägerplatte, andererseits die Spritzschicht. Die dazwischenliegende Selen-schicht ist fast vollständig verdeckt. Die häufig anzutreffende rote oder grüne Lackierung dient dem Schutz der zu Säulen zusammengesetzten Gleichrichterscheiben.

## Die Eigenschaften des Selen-Gleichrichters

Der Selen-Gleichrichter hat sich als Leistungs-Gleichrichter zur Gleichrichtung der Netzfrequenz bewährt und in weitem Maße durchgesetzt. Das kommt in erster Linie daher, daß die Sperrspannung im Dauerbetrieb und unter normalen Kühlverhältnissen rund 20 V betragen darf. Man versteht unter Sperrspannung den Effektivwert derjenigen Spannung, die in Sperrichtung an einer Gleichrichterscheibe liegt. Würde der Gleichrichter vollständig; sperren, d. h. in der Sperrichtung einen unendlich großen Widerstand haben, so würde kein Strom in Sperrichtung fließen. Weil jedoch der

Widerstand in Sperrichtung, der „Sperrwiderstand“, endliche Werte hat, verursacht die Sperrspannung den Rückstrom. Er kann fast immer vernachlässigt werden und ist der Scheibenfläche nicht proportional. Er nimmt mit steigender Fläche relativ ab und beträgt nur etwa 50 µA bei einer Sperrspannung von minus 5 V und bei einer Scheibe von etwa 1 cm<sup>2</sup> Fläche. Der Rückstrom erzeugt jedoch Wärme; das bedeutet, daß man einen Gleichrichter zerstören kann, wenn man die Sperrspannung (und damit den Rückstrom) so groß wählt, daß die zulässige Erwärmung von etwa 70°C überschritten wird. Kurzzeitige Sperrspannungsstöße schaden jedoch nicht, sie können bis zu 50 V und darüber betragen; erst dann treten bei den heute handelsüblichen Scheiben regelrechte Durchschläge der dünnen Selen-schicht auf, die den bekannten Durchschlägen in Kondensatoren vergleichbar sind.

Durch Hintereinanderschalten von Gleichrichterscheiben lassen sich Gleichrichter zusammensetzen, die auch hohen Sperrspannungen ohne weiteres gewachsen sind. So hat man Sendeanlagen gebaut, die bei 1 Ampere Anodenstrom rund 6000 V Anodenspannung abgaben. Den Strom in der Durchlaßrichtung bezeichnet man mit Flußstrom und den Widerstand, den der Gleichrichter dem Flußstrom entgegengesetzt, mit Flußwiderstand. Als Richtwert für den Flußstrom kann man etwa 20...30 mA pro cm<sup>2</sup> ansehen. Auch der Flußstrom erwärmt natürlich den Gleichrichter, so daß sich die Gesamt-erwärmung aus dem vom Rückstrom und dem Flußstrom hervorgerufenen Teil zusammensetzt. Man darf den Flußstrom um so größer wählen, je größer die Oberfläche der Gleichrichterscheibe ist. Während des Krieges hat man Gleichrichteranlagen gebaut, die bei 10 V einen Gleichstrom von etwa 8000 Amp. geliefert haben. Dabei waren natürlich zahlreiche Platten parallel geschaltet.

Die Erwärmung bestimmt die Lebensdauer eines Gleichrichters in erster Linie. Selen-Gleichrichter guten Fabrikats zeigen nach 10 000 Betriebsstunden noch keine nennenswerte Änderung ihrer Eigenschaften. Allerdings darf die Betriebstemperatur nicht über 50...60°C liegen. Ein nicht zu knapp bemessener Gleichrichter, der keine zusätzliche Erwärmung durch wärmeabstrahlende benachbarte Teile erfährt, erreicht eine erstaunlich hohe Lebensdauer. Im übrigen kann man solche Gleichrichter auch hinsichtlich des Flußstroms wesentlich überlasten, wenn man für entsprechende Kühlung sorgt. Ferner arbeiten Selen-Gleichrichter selbst bei sehr tiefen Temperaturen (z. B. bei minus 40 °C) noch einwandfrei. Bei Eintauchen in flüssige Luft (bei etwa minus 180 °C) geht der Gleichrichtereffekt nicht verloren.

Selen-Gleichrichter besitzen zwei Eigenarten. Die eine: Nach längerem Lagern oder bei Beanspruchung allein in der Durchlaßrichtung tritt ein erhöhter Rückstrom bei Anlegen einer Wechselspannung auf. Zumeist ist diese Eigenart jedoch ohne Bedeutung. Die elektrische Neuformierung tritt nämlich innerhalb sehr kurzer Zeit ein. Die zweite Eigenart ist die sog. „Alterung“. Fabrikfrische Gleichrichter ändern während der ersten Betriebszeit ihre charakteristischen Eigenschaften, den Sperr- und den Durchlaßwiderstand prozentual etwas. Während diese Erscheinung früher eine große Rolle spielte, ist sie bei einwandfreien Selen-Gleichrichtern der jetzigen Fertigung fast bedeutungslos geworden. Der Gleichrichter von 1949 ändert unter normalen Betriebsverhältnissen gegenüber dem Gleichrichter von 1939 seine Grundeigenschaften, Sperr- und Flußwiderstand kaum mehr. Man darf daher mit Sicherheit erwarten, daß auch der Selen-Gleichrichter in der Meßtechnik immer mehr angewendet wird.

## Vorteile gegenüber Röhren

Gleichrichterröhren benötigen eine Heizleistung, die bei den für Rundfunkzwecke üblichen Röhren etwa 4 Watt beträgt. Diese Heizleistung und die damit verbundene unerwünschte Erwärmung fallen weg, was kleineren Stromverbrauch und kleinere Bauweise bedeutet. Die bei Gleichrichterröhren oft eingebauten Schutz-widerstände, ferner auch Röhrenfassungen, können gleichfalls eingespart werden. Wenn man weiterhin

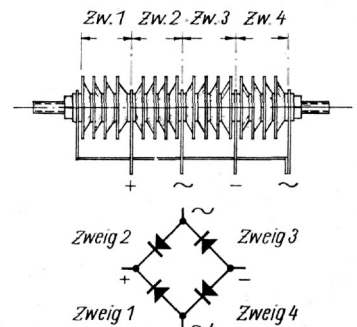


Bild 3. Eine Gleichrichtersäule für Graetz-Schaltung. Jeder Zweig besteht aus je fünf Gleichrichterscheiben

bedenkt, daß der Selen-Gleichrichter keine Anheizzeit benötigt, unzerbrechlich ist, wesentlich längere Lebensdauer und hohe Kurzschlußfestigkeit aufweist, so spricht vieles für dessen Anwendung im Radiogerätebau.

H. Monn



**Chefredakteur:** Werner W. Diefenbach.

**Redaktion:** (13b) Kempten-Schelldorf, Kottner Str. 12. Fernsprecher: 2025. Telegramme: FUNKSCHAU, Kempten (Allgäu). Für unverlangt eingesandte Beiträge wird keine Haftung übernommen. Nachdruck sämtlicher Aufsätze und Bilder nicht gestattet.

**Mitarbeiter dieses Heftes:** Heinz G. Ballauff, Ing. H. Jedlicka, Dipl.-Ing. H. Monn, Ing. H. Richter, Dipl.-Ing. O. Schmidhauer, Dr. Karl Weinrebe, Theodor Graf v. Westarp.

**Verlagsleitung:** FUNKSCHAU-Verlag Oscar Angerer, (14a) Stuttgart-S., Mörikestr. 15. Fernsprecher: 76329, Postcheck-Konto Stuttgart Nr. 5788. Geschäftsstelle München: (13b) München 22, Zweibrückenstraße 8, Fernsprecher: 3 20 56. Postcheck-Konto München Nr. 38 168. Geschäftsstelle Berlin: (1) Berlin-Südende, Langestraße 5. Postcheck-Konto Berlin Nr. 6277.

**Anzeigenentl:** Paul Walde, Geschäftsstelle München, München 22, Zweibrückenstraße 8. Fernsprecher: 3 20 56. Anzeigenpreis nach Preisliste 5.

**Erscheinungsweise:** Monatlich.

**Bezug:** Einzelpreis DM. 1.—, Vierteljahresbezugpreis bei Streifenbandversand DM. 3.20 (einschließlich 18 Pfg. Porto). Bei Postbezug vierteljährlich DM. 3.10 (einschließlich Postzeitungsgebühr) zuzüglich 9 Pfg. Zustellgebühr. Lieferbar durch den Buch- und Zeitschriftenhandel, Fachgeschäfte oder unmittelbar durch den Verlag.

**Auslandsvertretungen:** Schweiz: Verlag H. Thali & Cie., Hitzkirch (Luz.). — Österreich: Arlberg-Zeitungsverlag Robert Barth, Bregenz a. B., Postfach 47. — Saar: Ludwig Schubert, Buchhandlung, Neunkirchen (Saar), Stummstraße 15.

**Druck:** G. Franz'sche Buchdruckerei G. Emil Mayer, (13b) München 2, Luisenstr. 17. Fernsprecher: 36 01 33.

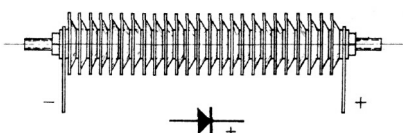


Bild 2. Eine Gleichrichtersäule für Einwegschaltung, bestehend aus 25 Scheiben

# UKW- Technik und Frequenzmodulation

## 1. Teil. Ausbreitung der Ultrakurzwellen (Schluß)

### 2. Teil. UKW-Schwingungskreise

#### Ausbreitungs-Einzelheiten

Den in Bild 1 und 2 dargestellten Ausbreitungskurven liegt bereits die Erdkrümmung zugrunde. Durch die Erdkrümmung wird bewirkt, daß die Feldstärken am Empfangsort nach Überschreiten der optischen Sicht schneller abfallen, als es der sonst gültigen Gesetzmäßigkeit entsprechen würde. Die „klassische“ Ausbreitungsformel, die nicht nur für UKW, sondern auch für alle anderen Frequenzgebiete Gültigkeit hat, lautet

$$E = 300 \cdot \frac{\sqrt{N}}{D} \quad (1)$$

darin ist  $D$  = Entfernung zwischen Sender und Empfänger in km,  $N$  = Sendeleistung in kW. Die Feldstärke ergibt sich in mV/m. Aus dieser Formel sind deutlich zwei wichtige Tatsachen abzulesen: Erstens ist die Feldstärke der Entfernung umgekehrt proportional, zweitens wächst sie mit der Wurzel aus der Sendeleistung. Die erste Aussage entspricht dem allgemein gültigen idealen Ausbreitungsgesetz. Wäre keine Erdkrümmung vorhanden und wäre die Oberfläche der Erde absolut homogen, so würde die Ausbreitung der elektromagnetischen Energie diesem Gesetz ohne weiteres folgen. Das ist jedoch wegen der Erdkrümmung nicht der Fall. Die rechnerische Berücksichtigung der Erdkrümmung führt zu außerordentlich komplizierten Formeln, die jedoch, wie schon erwähnt, in den Ausbreitungskurven mit enthalten sind.

Aus der Tatsache, daß die empfangsseitige Feldstärke nur mit der Wurzel aus der Sendeleistung steigt, ergibt sich ein verhältnismäßig unbedeutender Einfluß der Sendeleistung. Wir erwähnten schon früher, daß erst einer Vervielfachung der Sendeleistung eine Verdoppelung der Empfangsfeldstärke entspricht.

Die schon kurz angedeutete Brechung der Ultrakurzwellen in den oberen Schichten der Atmosphäre ist ein Effekt, der sich dem Einfluß der Erdkrümmung überlagert. In den Ausbreitungskurven kommt dieser Effekt nicht zum Ausdruck, weil er von Faktoren abhängt, die sich infolge der stets wechselnden meteorologischen Verhältnisse dauernd ändern. Diese Brechungserscheinungen können eine recht beachtliche Rolle spielen und zu erheblichen Feldstärkeschwankungen Anlaß geben. So ist es möglich, daß der Empfang an Tagen bestimmten Witterungscharakters verhältnismäßig stark, zu Zeiten anderen Wetters dagegen verhältnismäßig schwach ist. Schnell verlaufende atmosphärische Schwankungen führen unter Umständen zu ausgesprochenen Schwunderscheinungen, wie wir sie als Folge des Einflusses der Ionosphäre von den längeren Wellen her kennen. Diese Schwunderscheinungen können außerordentlich stark werden. Zur näheren Erforschung dieser Verhältnisse sind sehr viele Messungen angestellt worden und man hat auch Feldstärkeregistrierungen unternommen, aus denen sich der zeitliche Verlauf und die Intensität der Schwunderscheinungen ergeben. Von der Wiedergabe solcher Messungen wollen wir absehen, weil die dort zum Ausdruck kommenden Verhältnisse keine Allgemeingültigkeit besitzen und daher dem Praktiker nur wenig sagen können. Er muß jedoch wissen, daß die erwähnten Schwunderscheinungen in erster Linie auf das Verhalten der Atmosphäre bzw. Troposphäre zurückzuführen sind. Es muß weiterhin erwähnt werden, daß Feldstärkeschwankungen im Bereich der optischen Sicht auch durch die Überlagerung eines direkten und eines vom Erdboden reflektierten Strahls hervorgerufen werden können. Auch diese Erscheinungen waren Gegenstand umfangreicher Untersuchungen.

Wie sehr die Feldstärke beispielsweise im Inneren einer Stadt schwanken kann, ergibt sich aus der Darstellung nach Bild 3. Dort

ist der Verlauf der Feldstärke  $E$  in Abhängigkeit von der Länge einer Großstadtstraße aufgetragen. Wie man sieht, sind die Schwankungen sehr erheblich. Die Feldstärken können unter Umständen fast bis auf Null abfallen. Aus dem Verhalten der UKW im Inneren von Großstädten ergibt sich, daß es vieler praktischer Versuche bedarf, um an einem bestimmten Empfangsort die Empfangsantenne an Stellen möglichst großer Feldstärke anzuordnen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich die Einflüsse der Erdkrümmung (Beugung) und die Einflüsse der Brechung in den oberen Schichten der Atmosphäre dem idealen Ausbreitungsgesetz der reziproken Entfernung überlagern. Reflexionen aus der Ionosphäre spielen, wie schon früher erwähnt, nur ganz gelegentlich bei den längeren UKW eine Rolle. Das Zustandekommen solcher Reflexionen hängt von der Tageszeit, der Jahreszeit und dem jeweiligen Stand der Sonnenfleckenaktivität ab. Das Auftreten unverhältnismäßig großer Reichweiten ist gewöhnlich auf die Mitwirkung der Ionosphäre zurückzuführen. So ist es schon vorgekommen, daß die europäischen Fernsehsender in Amerika und die amerikanischen Fernsehsender in Europa aufgenommen werden konnten. Das zählt jedoch zu den Seltenheiten.

Noch kurz ein paar Worte zu der in der Literatur immer wieder auftauchenden sogenannten „Reichweiteformel“ für Ultrakurzwellen. Sie lautet

$$S = 3,55 (\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad (2)$$

darin ist  $H$  die Höhe der Empfangsantenne in m und  $h$  die Höhe der Sendeantenne in m. Unter  $S$  ist die rein optische Sichtweite in km zu verstehen. Die Begriffe Sichtweite und Reichweite werden sehr oft verwechselt. Die obenstehende Formel ist aus rein geometrischen Überlegungen entstanden und gibt lediglich an, in welcher Entfernung sich zwei auf bestimmten Höhen befindliche Punkte gegenseitig „sehen“ können. Mit der Reichweite einer Ultrakurzwellenverbindung hat also diese Formel an sich nichts zu tun, denn wir haben gesehen, daß die tatsächliche Reichweite nicht allein durch die optische Sicht — also durch die Sichtweite — beschränkt ist, sondern infolge der Beugung und Brechung erheblich größer sein kann. Mit den vorstehenden Ausführungen wollen wir unsere Betrachtungen über die Ausbreitung der Ultrakurzwellen abschließen.

## 2. UKW-Schwingungskreise

Das Verhalten eines jeden Ultrakurzwellengerätes, sei es ein Sender, ein Empfänger oder ein Verstärker, wird vorzugsweise durch die Eigenschaften der in diesen Geräten vorkommenden Schwingungskreise und Röhren bestimmt. Das Verhalten dieser Organe weicht von dem der entsprechenden Teile in Geräten für kleine Frequenzen ganz erheblich ab. Wir besprechen daher zunächst die Schwingungskreise, in einem späteren Abschnitt die Röhren im Ultrakurzwellengebiet. Aus diesen Darlegungen werden sich dann zwanglos die Anwendungen auf die Gerätetechnik ergeben.

Die Schwingungskreise schrumpfen im UKW-Gebiet zu winzigen Organen zusammen, weil sowohl die Kapazität als auch die Selbstinduktion — der Thomsonschen Formel entsprechend — mit wachsender Eigenfrequenz abnehmen. Man kann bis zu einer Welle von ungefähr 1 m noch mit normalen konzentrierten Induktivitäten und Kapazitäten arbeiten. Bei kürzeren Wellen muß man von grundsätzlich anderen Prinzipien Gebrauch machen.

#### UKW-Spulen

Zunächst einiges zu den normalen Schwingungskreisen. Die im Ultrakurzwellengebiet

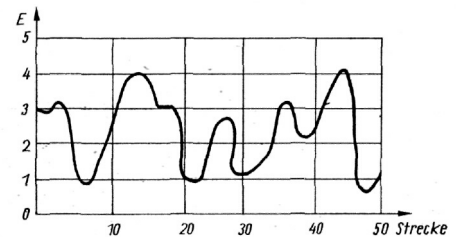


Bild 3. Feldstärkeschwankungen bei UKW in einer Großstadtstraße

üblichen Kreiskapazitäten liegen etwa zwischen 5 und 20 pF. Zu diesen Kapazitäten gehören Induktivitäten, deren Werte sich in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz aus Bild 4 für eine Kapazität von  $C = 10$  pF ergeben. Wie man sieht, handelt es sich um sehr kleine Werte, die bereits durch Spulen von einigen Windungen verkörpert werden. Die Induktivität der Spulen läßt sich in Abhängigkeit von der Windungszahl und dem mittleren Windingdurchmesser nach bekannten Formeln berechnen. So gilt z. B. für eine Zylinderspule die Formel

$$L = D \cdot w^2 \cdot K \quad (3)$$

worin  $D$  der mittlere Windingdurchmesser,  $w$  die Windungszahl und  $K$  einen Korrekturfaktor bedeuten, der von dem Verhältnis zwischen Spulenlänge und Spulendurchmesser abhängt. Um einen ungefähren Anhaltspunkt für die Spulen zu geben, sei gesagt, daß man für einen Schwingungskreis mit einer Abstimmkapazität von etwa 10 pF eine Spule braucht, die einen Durchmesser von rund 12 mm und eine Windungszahl von 4...6 besitzt. Dann ergibt sich eine Resonanzfrequenz von etwa 90 MHz. Im allgemeinen hat es wenig Zweck, die Windungszahl bei gegebener Induktivität und Kapazität genau vorzubestimmen, denn die wirkliche Kreiskapazität kann niemals auch nur annähernd genau angegeben werden. Sie hängt von den zugehörigen Schaltungskapazitäten und den Elektrodenkapazitäten der eventuell vorhandenen Röhren ab, wird durch diese Werte sogar oft ausschließlich bestimmt. Im praktischen Aufbau ist es daher besser, wenn man die benötigte Windungszahl rechnerisch nur roh abschätzt und zunächst eine etwas größere Spule vorsieht. Durch Entfernen einer oder zweier Windungen gleicht man dann den Schwingungskreis im allgemeinen mit Hilfe von Meßspeer und Röhrenvoltmeter genau ab. Mit diesem Verfahren kommt man schneller zum Ziel als mit genauen Rechnungen, deren Ergebnisse mit der Praxis aus den oben erwähnten Gründen im allgemeinen nicht übereinstimmen.

Nachdem die Spulen nur einige wenige Windungen haben, werden sie meistens freitragend hergestellt. Im Interesse einer ausreichenden mechanischen Stabilität verwendet man zweckmäßigerweise möglichst starken Draht (1,5...2 mm Durchmesser), den man über einen Dorn passenden Durchmesser wickelt. Die so entstandene Spule wird dann unmittelbar auf die Anschlußklemmen des zugehörigen Kondensators gelötet. Auf diese Weise ergibt sich ein stabiler Aufbau, der auch aus elektrischen Gründen unbedingt erforderlich ist. Gewöhnlich sind nämlich die Bandbreiten der auf den Schwingungskreis folgenden Organe so klein, daß schon geringfügige Änderungen der Spuleninduktivität, wie sie durch kleine Deformationen der Spule veranlaßt werden können, zu untragbaren Verstimmungen führen.

Die Anwendung von Hochfrequenz-Eisenkernen kommt bei Ultrakurzwellen nicht mehr in Frage, weil die Verluste zu groß werden würden. Man hat also nicht die Möglichkeit, durch einfaches Verdrehen von Eisenkernen die Induktivität der Spulen nachzustimmen. Lediglich durch Dehnen oder Zusammendrücken der gesamten Spule können relativ geringfügige Induktivitätsänderungen erzielt werden. Man ist daher auf kapazitive Korrekturen angewiesen, die sich durch die heute wieder im Handel befindlichen kleinen keramischen Trimmer leicht bewerkstelligen lassen. (Fortsetzung folgt) Ing. H. Richter