

**Heft 2**

**Im Sog früher kerntechnologischer  
Entwicklungen und Versprechen**

**Der „Schwingkondensator“ als elektro-mechanischer  
Verstärker zwischen Elektronenröhre und  
Feldeffekttransistor und dessen Nutzbarmachung im  
Wirtschaftsraum Dresden-Jena**

**Günter Dörfel**

AK 20 „Geschichte der Elektrotechnik“, März 2020

**Im Sog früher kerntechnologischer Entwicklungen und Versprechen:**

**Der „Schwingkondensator“ als elektro-mechanischer Verstärker zwischen  
Elektronenröhre und Feldeffekttransistor und dessen Nutzbarmachung im  
Wirtschaftsraum Dresden-Jena**

**Günter Dörfel**

Dresdner Hefte zur Geschichte der Elektrotechnik  
Band 2 (2020)

Schriftenreihe des VDE Dresden e.V.  
Arbeitskreis AK 20 „Geschichte der Elektrotechnik“

Die Autoren veröffentlichen ohne Honorar. Alle Rechte vorbehalten.  
Nachdruck, Vervielfältigung und Übersetzung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher  
Genehmigung gestattet.

**Impressum:**

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.  
VDE Dresden e.V.  
Geschäftsführer: Dr.-Ing. Dietmar Siegmund

Arbeitskreis „Geschichte der Elektrotechnik“  
Vorsitzender: Hochschuldozent i.R. Dr.-Ing. Hartmut Bauer  
Redaktionsschluss: 05.03.2020

Geschäftsstelle:  
c/o TU Dresden Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
01062 Dresden

Besuchsadresse:  
01069 Dresden, Mommsenstraße 12, Toeplerbau, Zimmer 109/110

Telefon: +49 351 463-34574  
Telefax: +49 351 463-34533  
E-Mail: [vde-dresden@vde-online.de](mailto:vde-dresden@vde-online.de)

Redaktionelle Bearbeitung, Layout und Satz: Hartmut Bauer  
Layout Umschlag: AK 20 (nach einem Entwurf von Burkhard Hollwitz (IGHFt e.V.))

Druck: A-Z Druck Dresden e. K., 01187 Dresden

ISSN: 2629-7167

Erscheinungsort: Dresden, Deutschland

## Geleitwort

Im Jahre 2018 hat der Arbeitskreis AK 20 „Geschichte der Elektrotechnik“ im VDE Dresden beschlossen, neben den zu besonderen Anlässen wie 110 Jahre bis 125 Jahre VDE Dresden bisher herausgegebenen fünf „Blauen Büchern“ (S.58) als weiteres Format in der Größe A5 die

*„Dresdner Hefte zur Geschichte der Elektrotechnik“*

in unregelmäßigen Abständen zu veröffentlichen. Das Thema wird nach entsprechenden Vorlagen durch den Arbeitskreis festgelegt.

Die Themenvorschläge von den Mitgliedern des Arbeitskreises und weiteren interessierten Autoren können z. B. interessante technische Entwicklungen im Bereich Dresden, das Wirken von Elektrotechnikern und Informationstechnikern in der ehrenamtlichen Verbandsarbeit, die Würdigung hervorragender Persönlichkeiten zu Jubiläen oder die Beschreibung ausgewählter Exponate in den Museen zum Inhalt haben.

Die Autoren verstehen ihre Recherchen und Publikationen als ehrenamtliche Arbeit, um Wissenswertes aufzuschreiben und somit zu erhalten und auch zur Ermutigung für kreatives Arbeiten folgender Generationen beizutragen.

Nachdem wir im Heft 1 über

**„Das Wirken der Elektrotechniker in der Kammer der Technik –  
Zwischen Ende und Wiedergründung des VDE im Bezirk Dresden“**  
ISSN: 2629-7167, Dresden 2019

berichtet haben, legt Prof. Günter Dörfel mit diesem Heft\* eine interessante Beschreibung der technischen Entwicklung einschließlich deren Umfeld zum „Schwingkondensator“ und dessen Nutzbarmachung im Wirtschaftsraum Dresden-Jena vor. Er erklärt nicht nur den Schwingkondensator und dessen konkurrierende Anwendungen, sondern es gelingt ihm durch gründliche Recherchen auch Querverbindungen zur kerntechnischen Entwicklung in der DDR sowie das Interesse und den Einfluss von Einstein zu diesem Thema aufzuzeigen, was dieses Heft besonders lesenswert macht.

Hartmut Bauer

Vorsitzender

des AK „Geschichte der Elektrotechnik“ beim VDE Dresden

Dresden, im März 2020

---

\* Inhaltlich gering veränderter Neudruck der gleichnamigen Arbeit aus *Jenaer Jahrbuch zur Technik- und Industriegeschichte* 21 (2018) S. 317-367. Herausgeber und Autor danken dem *Verein Technikgeschichte Jena e. V.*, vertreten durch Herrn Dr. Peter Hahn, herzlich für die erteilte Erlaubnis.

## Vorwort

Die Fortschritte der elektronischen Messtechnik im zurückliegenden Jahrhundert sind durch die Entwicklungen der sie tragenden vakuumtechnischen und festkörperphysikalischen Technologien und den darauf fußenden Theorien und Schaltungstechniken festgeschrieben. Im Rückblick darauf bleibt oft eine hinsichtlich des abgedeckten Frequenzbandes schmale aber in wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Hinsicht durchaus bedeutungsvolle Technik unberücksichtigt, die **Schwingkondensatortechnik**: Ein elektromechanisches Bauelement tritt im Bereich tiefster Frequenzen, man spricht dort (aus informationstheoretischer Sicht nicht ganz unproblematisch!) von Gleichspannungs- und Gleichstromverstärkern, wirkungsvoll in Konkurrenz zu und in Kooperation mit der längst als Hochtechnologie etablierten Elektronenröhren- und frühen Transistor-Technik – jedenfalls für einen begrenzten aber nicht zu vernachlässigenden Zeitraum.

Beim Betrachten der wirtschaftlichen und historischen Aspekte zeigt sich, dass diese Entwicklung eng korreliert ist mit den kerntechnologischen Entwicklungen in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts. Dem Schock von Hiroshima und Nagasaki war eine hohe – wie man heute weiß zu hohe – Erwartung an die Leistungsfähigkeit friedlicher Kerntechnologien gefolgt. Auch als sich dieser Hype auf ein spätes, normales Maß eingeepegelt hatte, blieb die Schwingkondensatortechnik technisch und wirtschaftlich noch lange relevant.

In diesem Sinne wird hier versucht, technische Erklärungen, Rückblicke, wissenschaftshistorisch und zeitgeschichtlich angelegte Betrachtungen und wirtschaftliche Überlegungen zusammenzufügen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Schwingkondensatortechnik stehen in einem verblüffend engen Zusammenhang mit den Leistungen der ganz Großen in Physik und Elektrotechnik – Jahrzehnte bevor der Begriff „Schwingkondensator“ in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht Bedeutung erlangte. Ein systemtheoretisch begründeter Brückenschlag zwischen den Intentionen der Vorläufer und unseren heutigen Sichtweisen ist in einem kurzen **Anhang 1** untergebracht.

Vor dem Hintergrund von Breite und Dynamik der Entwicklung der Elektrotechnik seit der Mitte des 19. Jahrhunderts erscheint die Schwingkondensatortechnik als eine Episode – wie viele bemerkenswerte Entwicklungen mittlerweile namenloser Pioniere auch. In einer Kulturgeschichte der Elektrotechnik ist ihr aber ein fester Platz zuzuweisen. Diese Standortbestimmung wird hier versucht.

Um den personenbezogenen und insofern durchaus auch subjektiven Einflüssen auf die hier geschilderte Entwicklung einigen Raum zu geben, werden die **Kurzbiographien** direkt oder indirekt beteiligter Wissenschaftler in einem **Anhang 2** mitgeteilt. Deren Namen sind im laufenden Text *kursiv* gesetzt – im Gegensatz anderen nicht im Anhang 2 benannten Akteuren.

Die Vielfalt der Bezüge des Themas wirft bei dessen Ausarbeitung einige Probleme auf. In dem Bestreben, den durchgängigen Text flüssig lesbar zu gestalten, sind viele Hinweise und Informationen als **Anmerkungen** in Endnoten ergänzt. Diese sind nach den Anhängen und vor dem **Quellenverzeichnis** untergebracht und können notfalls auch übergangen werden.

Die Literaturzitate sind naturgemäß nicht allumfassend; es wird aber der Anspruch verfolgt, die wesentlichen Eckpunkte der hier besprochenen Entwicklung zu benennen. Die **Literaturhinweise** sind aus technikhistorischen Gründen, abweichend von den Zitiergepflogenheiten bei rein natur- oder technikwissenschaftlich angelegten Arbeiten, mit Namen und Ursprungsjahr in den Text eingefügt. Ihre Auflistung im **Quellenverzeichnis** gehorcht der historischen Abfolge – also abweichend von einer alphabetischen Reihung und unabhängig von der Reihenfolge der Zitate im Text. Ebenfalls aus technikhistorischen Gründen werden Autor(en), Titel und Erscheinungsweise dem historischen Quelltext folgend unverkürzt zitiert – ungeachtet eventueller Redundanzen.

Günter Dörfel

Dresden, 5. März 2020

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Geleitwort	3
Vorwort	5
1 Ausgangslage und Zielstellung	9
2 Wirkprinzip, Probleme, Grenzen und Fehldeutungen	11
3 Die Frühgeschichte des Schwingkondensators	14
4 Andere elektromechanische Verstärker mit extremem Eingangswiderstand	19
4.1 Einsteins „Maschinchen“	19
4.2 Zur Wirkungsweise	21
4.3 Eine namenlose, verschollene Schwester	23
5 Der kerntechnologisch getriebene Aufbruch im Nachkriegsdeutschland	24
6 Der Schwingkondensator-Verstärker als Detektor für Ionisationskammerströme in Dickenmessgeräten – was muss er können?	25
7 Frühe Dicken- und Schwingkondensatormesstechnik in der DDR	27
8 Wettlauf im Gleichschritt – wer wird Sieger?	29
9 Schwingkondensatoren und Elektrometer aus Dresden	32
10 Sonderformen	33
10.1 Ein elektrostatisch angeregter Schwingkondensator	33
10.2 Der „elektronische Schwingkondensator“	35
11 Versuch einer technischen Bilanz	36
12 Ausklang	38
13 Dank	39
Anhang 1    betreffend Kapitel 4 (Einsteins „Maschinchen“)	39
Anhang 2    Kurzbiographien	41
Anmerkungen	47
Zitierte Quellen, chronologisch geordnet	51
Autor	56



# 1 Ausgangslage und Zielstellung

Betrachten wir die Ausgangslage:

Schon sehr zeitig, wenn auch immer im Schatten nachrichtentechnischer Entwicklungen, standen Elektronenröhren im Focus einer physikalisch ausgerichteten Messtechnik.<sup>1</sup> Letztlich bestimmten zwei Effekte deren Grenzen im Bereich tiefster Frequenzen und mit Blick auf eine minimale elektrische Belastung der Signalquelle. Da waren einmal die bei nachrichtentechnischen Anwendungen vernachlässigbaren Störströme der Steuerelektrode einer Elektronenröhre („Gitterstrom“, er betrug bei Empfängerröhren um  $10^{-7}$  Ampere) sowie die gegen niedrige Frequenzen ansteigenden stochastischen Anteile am Anodenstrom („Funkel-Effekt“). Zum anderen führten die Drifteigenschaften der (statischen) Röhrenparameter zu schaltungstechnischen Problemen, die insbesondere bei direktgekoppelten mehrstufigen Systemen zu schwer beherrschbaren Situationen führen konnten. Den erstgenannten Effekt schränkten die *Röhrentechniker* mit der Entwicklung sog. Elektrometerröhren deutlich ein.<sup>2</sup> Den Drifteigenschaften begegneten die *Schaltungstechniker* mit der Umwandlung der anliegenden Gleichspannungs- (Gleichstrom-) Signale in Wechselstromsignale, deren (i. d. R. selektive, in jedem Falle aber von driftenden Parametern abgekoppelte) Verstärkung und anschließende phasenempfindliche, d. h. vorzeichenrichtige Gleichrichtung. Aber die gängigen Modulatoren – „Zerhacker“, zunächst mechanisch<sup>3</sup> später elektronisch<sup>4</sup> realisiert – entzogen durch periodisches Anlegen von Wirkwiderständen und Umladen der beteiligten kapazitiven Speicherelemente funktionsbedingt dem Messobjekt Leistung und begrenzten so, abgesehen vom Verschleiß der mechanischen Kontakte, die realisierbare elektrische Empfindlichkeit der Messsysteme. Den (nahezu) perfekten Ausweg versprach ein als „Schwingkondensator“ bezeichneter elektromechanischer Modulator. Auch das noch junge stabilisierende Prinzip der *Gegenkopplung* fand Eingang in diese Technik.<sup>5</sup>

Dieser Wandler mit beachtlichen Verstärkereigenschaften ist nicht sehr viel jünger als die später allgegenwärtige Elektronenröhre. Ohne eingangsseitigen Gleichstrompfad und insofern ohne eine die Signalquelle (im quasi statischen Fall) belastende Leistungsentnahme ist ihm angesichts einer auskoppelbaren elektrischen Wirkleistung eine quasi unendliche Leistungsverstärkung zuzuordnen. Der Verstärkungsmechanismus ist gekennzeichnet durch die periodische Variation seiner sehr hochohmig angekoppelten und insofern während einer Variationsperiode nicht umladbaren Eingangskapazität.

Der Schwingkondensator führte zunächst ein Nischendasein. In der Mitte des vergangenen Jahrhunderts erfuhren dieses Bauelement und dessen Schaltungstechnik einen bemerkenswerten Aufschwung. Deren Verknüpfung mit den Entwicklungen der kernphysikalisch begründeten Technologien jener Zeit resultiert letztlich aus den Eigenschaften eines noch heute (!) unverzichtbaren Detektors für radioaktive Strahlung, der

„Ionisationskammer“ – signalschwach, aber technologisch relativ einfach zu handhaben und messtechnisch äußerst stabil.

Wie so oft greifen auch politische Konstellationen signifikant in wissenschaftliche und technische Entwicklungen ein. Im hier vorgestellten Fall werden die sich gewissermaßen zwangsläufig ergebende Situation im geteilten Deutschland der Nachkriegszeit und dort die sich unter sehr speziellen Bedingungen vollziehenden Entwicklungen in der DDR besonders heraus- und der internationalen Entwicklung gegenübergestellt.

Aus internationaler Sicht und insbesondere mit Blick auf die Situation in Deutschland deutet sich mit dem Ausklingen der kernphysikalisch begründeten Technologieschübe eine Verzweigung an: Im Wirtschaftsraum DDR kompensierte die Schwingkondensatortechnik partiell und da durchaus erfolgreich einen deutlichen Rückstand in der Halbleitertechnik, jedenfalls soweit es um die Entwicklung und Verbreitung sehr spezieller Bauelemente und Baugruppen ging.

Überraschender Weise ist die junge Schwingkondensatortechnik in der DDR in der späten Mitte des vergangenen Jahrhunderts verknüpft mit einer sozialökonomisch scheinbar undenkbareren Konkurrenz- und Konfliktsituation auf dem Gebiet der Prozessmesstechnik. Gemeint sind konkurrierende und nur sehr partiell kooperierende Entwicklungen zur berührungslosen Dickenmessung (Flächenmassemessung)<sup>6</sup> mit Hilfe der Strahlung radioaktiver Isotope im Beziehungsdreieck VEB Vakutronik Dresden, Forschungsinstitut Manfred von Ardenne, Dresden, und VEB Carl Zeiss Jena. In diesem auf einen vergleichsweise kleinen Wirtschaftsraum bezogenen Spannungsfeld spiegeln sich die international ausgetragenen Wettbewerbe um die technisch und wirtschaftlich optimale Ausgestaltung einer mit hohen Erwartungen befrachteten Kerntechnologie gewissermaßen in mikroskopischen Maßstäben und unter Laborbedingungen deutlich wieder.

Wenn wir nach den wissenschaftlichen Wurzeln der hier vorgestellten Technik fragen, dürfen wir eine Idee *Albert Einsteins (1879-1955)* nicht unerwähnt lassen. Mit einer Art Influenzmaschine, die er liebevoll „*sein Maschinchen*“ nannte, hatte er schon sehr früh, etwa zeitgleich mit der Erfindung der Elektronenröhre, ein ernst zu nehmendes elektromechanisches Verstärkerkonzept mit minimaler Belastung der Signalquelle vorgeschlagen. Ausgangspunkt und Motiv seiner Überlegungen war ein von ihm vorausgesagter aber nicht weiter verfolgter Effekt, der einige Jahrzehnte später als „thermisches Widerstandsrauschen“ (oder „*Nyquist-Johnson-Rauschen*“ o. ä.) zum festen Wissensbestand der Elektrotechnik wurde. Der Versuch, *Einsteins* Vorschlag in die technikgeschichtlichen Entwicklungen des frühen 20. Jahrhunderts einzuordnen, führt uns zu bisher übersehenen vergleichbaren Überlegungen und Realisierungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in der Mitte der 1920er Jahre. Als verbindende Idee aller hier in Beziehung gebrachten frühen Ansätze erweist sich ein 1906 vom jungen *Heinrich Barkhausen (1881-1956)* formulierter Lehrsatz. Auch darauf soll hingewiesen werden.

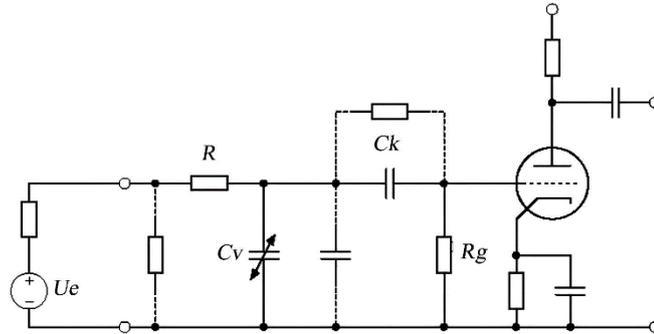
## 2 Wirkprinzip, Probleme, Grenzen und Fehldeutungen

Ein Plattenkondensator  $C_v$  (Bild 1) sei über einen Widerstand  $R$  auf die Spannung  $U_e$  aufgeladen.

Bild 1:

Schaltung des Schwingkondensators.

Bezeichnet sind nur die für das Verständnis der Wirkungsweise wesentlichen und im Text auch angesprochenen Bauelemente. Die gestrichelt angeschlossenen Bauelemente stehen für die wesentlichsten der unerwünschten, parasitären Einwirkungen.



Wird dessen Kapazität z. B. durch die sinusförmige Veränderung des Plattenabstandes  $d$  mit einer Modulationsfrequenz  $\omega$ , auch als Trägerfrequenz bezeichnet, periodisch variiert, so ist, wegen  $U = Q/C$  und wenn die Ladung des Kondensators während der Schwingungsperiode wegen einer hinreichend großen Zeitkonstanten

$$RC_v \gg \frac{1}{\omega_m} \quad (1)$$

als konstant gelten kann, über den Kondensator  $C_k$  eine Wechselspannung

$$u_a = U_e \frac{\hat{d}}{d_0} \sin \omega_m t \quad (2)$$

auskoppelbar. Definiert man einen Konversionswirkungsgrad

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\hat{d}}{d_0}, \quad (3)$$

so gilt

$$U_{a_{eff}} = \eta U_e . \quad (4)$$

Gegenüber dem Ruhewert  $d_0$  ist  $\hat{d}$  die größte Auslenkung. Soll die Wechselspannung nach den Gln. (2 und 4) über dem das System abschließenden Widerstand  $R_g$  – dessen Bezeichnung weist auf den Gitterableitwiderstand eines in den frühen Ausgestaltungen nachfolgenden Röhrenverstärkers hin – tatsächlich nachgewiesen werden, so muss auch für diesen Widerstand eine der Ungleichung (1) entsprechende Bedingung

$$R_g C_v \gg \frac{1}{\omega_m} \quad (5)$$

eingehalten werden. Vom Modulator wird dann eine Leistung

$$P_a = \frac{(\eta U_e)^2}{R_g} \quad (6)$$

an den nachfolgenden Wechselspannungsverstärker abgegeben. Der Eingangsgleichspannungsquelle mit  $U_e$  kann sie nicht entzogen worden sein; es existiert kein geschlossener Gleichstrompfad. Die Ausgangsleistung entstammt dem Antriebssystem des Schwingkondensators. Eingangswiderstand und Leistungsverstärkung sind mithin (vereinfacht, d. h. ohne Berücksichtigung der isolationstechnischen Probleme und auf die Signalfrequenz Null bezogen) unendlich. Der Elektrodenabstand des Schwingkondensators muss gegen die mechanischen Kräfte des elektrischen Feldes verändert werden.

Das ist eine Ausprägung des von *Heinrich Barkhausen* (**Bild 2**) in seiner Doktor-Arbeit (1906) formulierten

„Satz(es) I: Die notwendige Bedingung für das Bestehen dauernder Schwingungen (=Wechselstrom) ist ein im [Gleich-]Stromsystem befindlicher Widerstand ( $W, L, C$ ). Dieser ist wie ein Wechselstromgenerator aufzufassen und zu behandeln. Bei veränderlichen Ohm'schen Widerständen entstammt die Energie dem Gleichstrom, bei veränderlicher Induktion oder Kapazität mechanischer Arbeitsleistung“ [Barkhausen 1907].<sup>7</sup>

In diesem Sinne kann der Schwingkondensator auch als Spezialfall des parametrischen Verstärkers, wie er aus der Höchsfrequenztechnik bekannt ist, interpretiert werden: Der Verstärkereffekt resultiert aus dem „Pumpen“ eines Blindelementes, hier eines Kondensators. Die Pumpfrequenz (= Modulatorfrequenz  $\omega_m$ ) liegt hier über der Signalfrequenz, die mit quasi Null anzusetzen ist. Die spektrale Leistungsdichte des thermischen Rauschens der beteiligten Widerstände liegt wegen der mit den Gln. (1) und (5) festgelegten Eckfrequenzen weit außerhalb des sehr schmalen Übertragungsfrequenzbandes um  $\omega_m$  und fällt kaum ins Gewicht. Auch damit ähnelt das Verhalten des Schwingkondensators dem der parametrischen Verstärker der Höchsfrequenztechnik.

Bei den niedergeschrieben Abschätzungen wird unterstellt, dass der Blindwiderstand des Koppelkondensators  $C_k$  vernachlässigbar klein sei. Allerdings darf diese Forderung nicht zu großzügig ausgelegt werden. Schließlich wird auch der Koppelkondensator von der Eingangsspannungsquelle aufgeladen und geht insofern in die Ladungsempfindlichkeit des Modulators ein.

Die Verhältnisse erscheinen ideal: Kein Eingangs-(Gleich-)Strom, also ein unendlicher Eingangswiderstand, und insofern eine unendliche Leistungsverstärkung. Aber auch hier setzen technische Gegebenheiten Grenzen. Isolationswiderstände realisieren einen messbaren Eingangswiderstand. Streukapazitäten, im Schwingsystem und ausgangsseitig, reduzieren den Konversionswirkungsgrad. Deshalb, und weil bei der mechanischen Ansteuerung des Kondensators Kurzschlüsse unbedingt vermieden werden müssen, ist dieser auf Werte von 0,1 ...0,3 begrenzt – deutlich unterhalb des aus Gl. (3) folgenden Grenzwertes von  $1/\sqrt{2}$ . Es ist angezeigt, das Antriebssystem des Schwingkondensators elektrisch und magnetisch bestmöglich von dessen Messsystem zu trennen. Isolationsmaterialien können,

form- und kraftschlüssig in die konstruktive Gestalt des kompakten Bauelementes „Schwingkondensator“ eingebunden, durch piezoelektrische und Nachwirkungseffekte Fehlloadungen erzeugen.

Wegen partieller Inhomogenität des Materials der Schwingkondensatorelektroden und unkontrollierbaren Anlagerungen an deren Oberflächen zeigen beide Elektroden unterschiedliche (in Volt gemessene) Austrittsarbeiten – denen der Kathodenmaterialien von Elektronenröhren durchaus vergleichbar. Deren Differenz heißt Kontaktpotential und wirkt, da auch hier der Kontaktpotential-Quelle keine Leistung entzogen wird, wie eine Eingangsspannung. Natürlich kann das Kontaktpotential elektrisch kompensiert werden; Probleme bereiten aber dessen zeitliche und temperaturabhängige Driften. Über den Isolationswiderstand des Koppelkondensators  $C_k$  – er ist häufig konstruktiver Bestandteil des Schwingkondensators – können Gitterstrom und Gitterspannung der Eingangsröhre auf das Messsystem einwirken. Insofern wird gelegentlich mit einem zweiten Hochpass-Koppelglied ein stark reduzierender Teiler für diese Störgrößen realisiert. All das erforderte wohlüberlegte schaltungstechnische, konstruktive, technologische und materialtechnische Vorkehrungen.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass das Wirkprinzip des Schwingkondensators auch durchaus ernstzunehmende Missdeutungen erfuhr. Wenn man z. B. die über den involvierten Widerständen umgesetzte Wirkleistung – vereinfachend betrachten wir hier nur  $R_g$  nach **Bild 1** und Gl. (4) – fälschlicherweise als der Eingangsquelle entzogene Leistung deutet, dann errechnet man leicht einen scheinbaren wirksamen Eingangswiderstand

$$R_s^* = \frac{R_g}{\eta^2} . \quad (*)$$

Das würde den Schwingkondensator als eine Art Gleichstromtransformator ausweisen. Da der nach (\*) errechenbare fälschliche Eingangswiderstand bei wenig anspruchsvollen Konstruktionen der Größenordnung realer parasitärer Nebenschlüsse nahekommt, ist ein solcher Fehlschluss aus experimenteller Sicht nicht von vornherein offensichtlich.

Wir zeichnen nachfolgend die Geschichte des Schwingkondensators (bzw. des Schwingkondensatorelektrometers) nach, beschreiben die schaltungstechnischen Probleme, die diese Technik aufwarf, nennen die technischen Parameter, die im Sinne einer breit angegangenen Schwingkondensatorentwicklung erreicht wurden und als typisch angesehen werden können; und wir verweisen auf originelle technische Ausgestaltungen an den Rändern dieser Technik.

### 3 Die Frühgeschichte des Schwingkondensators

Die wahrscheinlich früheste Beschreibung des Schwingkondensator-Prinzips finden wir in einer 1925 von *Erwin Madelung* (**Bild 2**) publizierten Kurzmitteilung [Madelung 1925] (**Bild 3**).<sup>8</sup>



Bild 2: Erwin Madelung (1881-1972) (links) und Heinrich Barkhausen (1881-1956) während ihrer Göttinger Zeit.

*Madelung promovierte 1905 mit einer Arbeit über Magnetisierung durch schnellverlaufende Ströme [Madelung 1905], Barkhausen 1906 mit einer Arbeit zur Schwingungserzeugung [Barkhausen 1907]. Madelung publizierte seine Arbeit über den Schwingkondensator [Madelung 1925] als Professor für theoretische Physik in Frankfurt a. M.*

*Quellen: Links Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen, Abteilung Seltene Schriften und Drucke; rechts TU Dresden, Universitätsarchiv.*

Im Schaltbild wirkt der Schwingkondensator mit nachfolgendem Röhrenverstärker und Kopfhörer als Indikator in einem Kompensations-Messsystem (**Bild 3**). Die phasenempfindliche Gleichrichtung ist noch nicht bekannt. *Madelung* beschreibt das Wirkprinzip bereits vollständig und benennt auch alle dem Messprinzip eigenen Vorteile gegenüber anderen Messverfahren. Er spricht von Vorversuchen, bei denen 2 mV sicher nachgewiesen wurden. Seine Angaben über die Ausgestaltung des variablen Kondensators sind vage. Das angekündigte Vorhaben, an anderer Stelle ausführlich über weitere Erfahrungen berichten zu wollen, wurde offenbar nicht realisiert. *Madelungs* Kurzmitteilung ist wohl nicht als Bericht über die Lösung eines aktuellen und sehr anspruchsvollen Messproblems zu sehen, sondern als die kreative und zunächst zweckfreie Etablierung eines grundsätzlichen und später sehr erfolgreichen Messverfahrens.

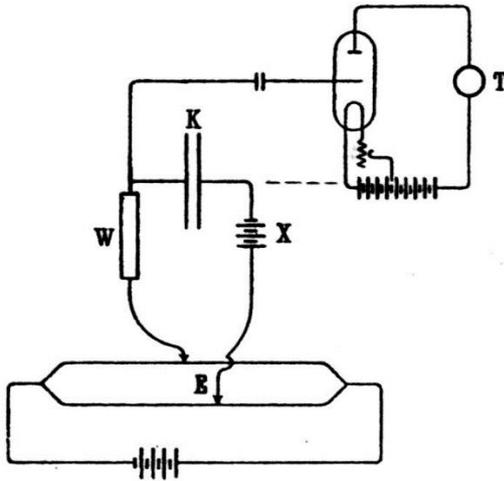


Bild 3: Schwingkondensatorelektrometer-Schaltung nach [Madelung 1925].

$X$  bezeichnet das Messobjekt. Der Kondensator  $K$ , „dessen nur einige Zentimeter\* betragende Kapazität durch eine Hilfsvorrichtung (Motor oder Vibrator) periodisch mit einer Frequenz von einigen hundert Perioden pro Sekunde geändert wird“, ist über „einen hohen Widerstand [ $W$ ] kleiner Kapazität (Silitstab oder dergleichen)“ mit dem Messobjekt  $X$  verbunden. Das Fehlen der hier gestrichelt nachgetragenen Verbindung ist wahrscheinlich einem drucktechnischen Fehler zuzurechnen. Der Text Madelungs geht jedenfalls von dieser Verbindung aus.\* Veraltete Einheit:

0,9 Zentimeter (cm) = 1 Picofarad (pF).

Madelungs Erfindung und Barkhausens Satz I (siehe oben) sind nicht von ungefähr miteinander verknüpft. Ähnliche Studienzeiten beider an der Universität Göttingen und gleiche akademische Lehrer – beide promovierten am Institut für angewandte Elektrizität bei Hermann Theodor Simon (1870-1918) – verweisen auf eine prägende Göttinger Schule (Bild 2).<sup>9</sup>

Eine frühe Ausgestaltung dieses Prinzips mit ausdrücklichem Bezug auf E. Madelung präsentierte Philips mit einem  $p_H$ -Messgerät [Dorsmann 1942]. Der Schwingkondensator (Bild 4) ist Eingangsstufe eines Nullverstärkers, der die Kompensation des  $p_H$ -Potentials durch eine variable Gegenspannung begleitet und Abweichungen zwischen beiden vermittels eines „Magischen Auges“<sup>10</sup> EM 4 sichtbar macht.

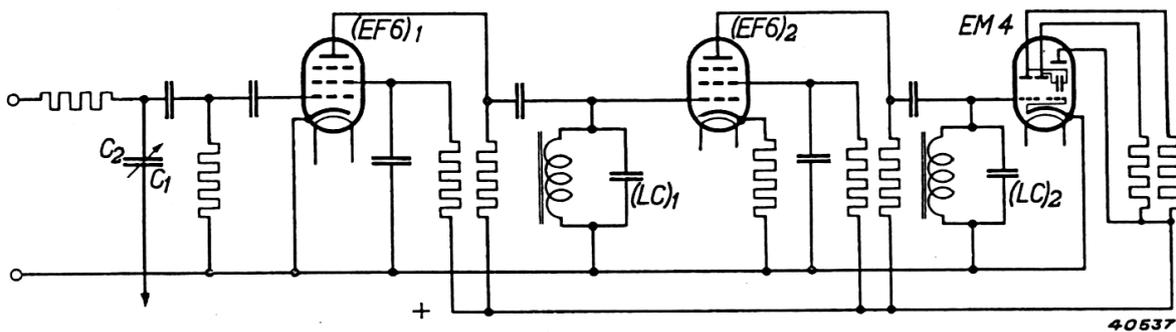
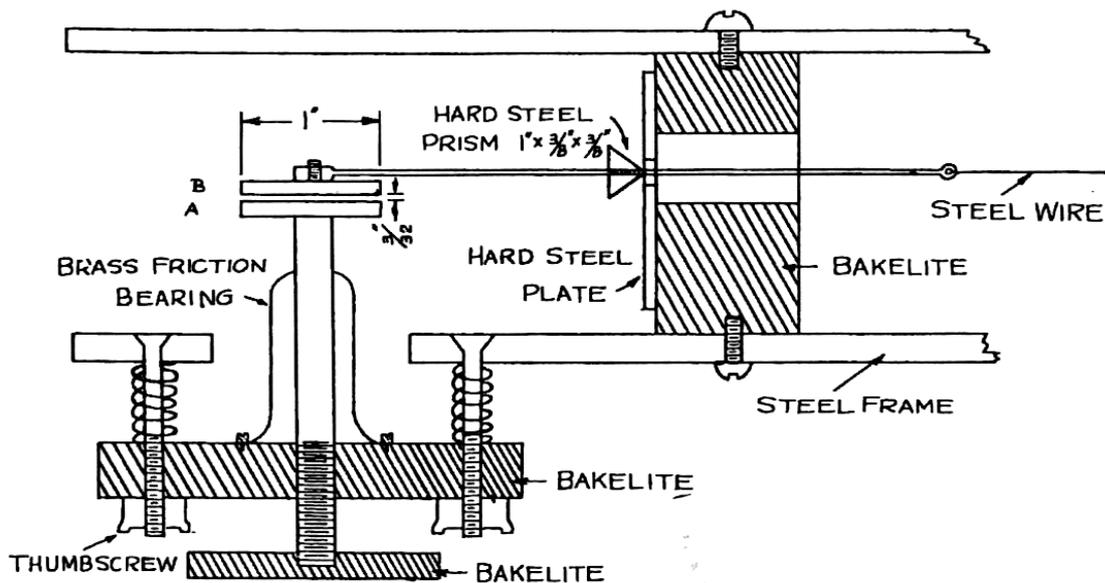


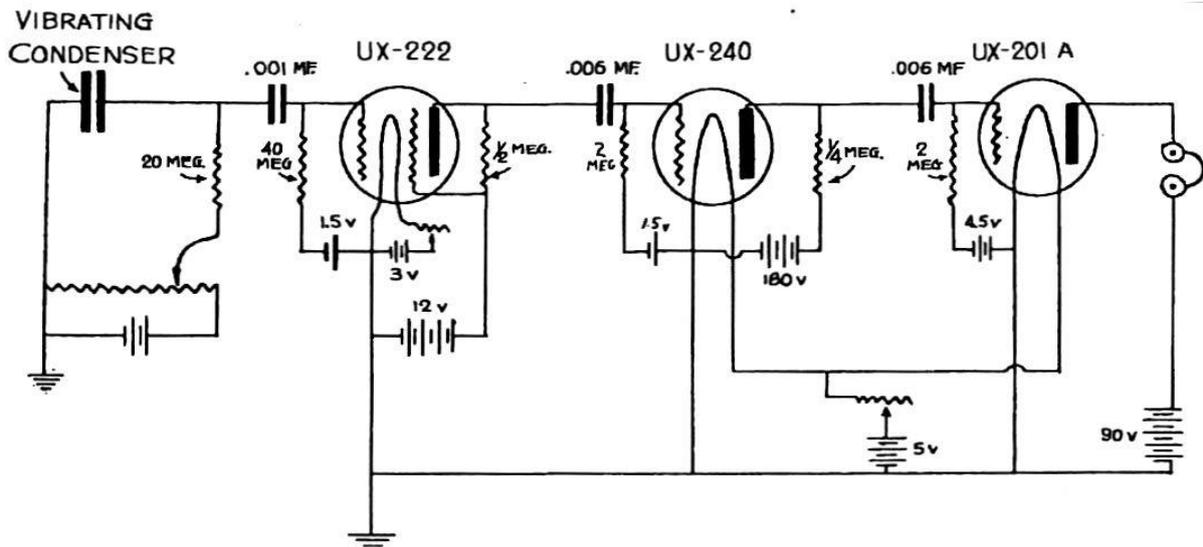
Abb. 8. Das Schaltbild des Elektrometers. Die zu messende Gleichspannung wird der schwingenden Kondensatorplatte  $C_1$  zugeführt; diese Gleichspannung wird kompensiert, indem der anderen Elektrode  $C_2$  eine Kompensatorspannung zugeführt wird. Wenn die Kompensation nicht vollständig ist, wird eine Wechselspannung erzeugt, welche dem Gitter der ersten Pentode  $(EF 6)_1$  zugeführt wird. Die Spannung wird mit dem Resonanzkreis  $(LC)_1$  selektiv verstärkt. Mit  $(EF 6)_2$  und  $(LC)_2$  wird das wiederholt; danach macht der Kathodenstrahlindikator  $(EM 4)$  die Wechselspannung sichtbar.

Bild 4: Schwingkondensator-Elektrometer zur  $p_H$ -Messung von Philips Eindhoven nach [Dorsmann 1942]

Frühe US-amerikanische Schwingkondensator-Aktivitäten finden wir ausgangs der 1920er Jahre am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Der Ansatz ist nach Verfahrens- und Schaltungstechnik dicht bei der Idee von *Madelung* (ohne dass dieser zitiert wird). Ein Plattenpaar wird mechanisch – durch Ankopplung einer schwingenden Saite – angeregt. Das auskoppelte und verstärkte Wechselfspannungssignal wird durch Kopfhörer akustisch wahrnehmbar gemacht. Ziel ist die Bestimmung des Kontaktpotentials unterschiedlicher Kondensatorplattenmaterialien nach einem Kompensationsverfahren [Zisman 1932] (Bild 5 a, b).<sup>11</sup>



a) Der Kondensator (A, B) wird nach der schon von *Madelung* angedeuteten Möglichkeit von einer schwingenden Saite angeregt – offenbar diskontinuierlich.



b) Zismans Verstärkerelektronik erlaubt einen Blick auf die Röhrentechnik der späten 1920er Jahre. Seine Eingangsröhre UX-222 ist eine der ganz frühen (noch direkt geheizten) Schirmgitterröhren (nach Walter Schottky, Siemens & Halske), angeboten von RCA (Radio Company of America), entwickelt von General Electric; etwa vergleichbar der Telefunken-Röhre RES 034.

Bild 5: Schwingkondensator nach [Zisman 1932].

Durchaus militärtechnisch orientiert – der Autor war für das *Naval Research Laboratory, Washington DC*, tätig – aber ohne Quellenbezug wird in [Gunn 1932] ein portables Elektrometer vorgestellt. Der variable Kondensator ist ein von einem Motor getriebenes rotatorisches Elektrodensystem. Dessen Kapazitätswerte liegen in dem schon von *Madelung* genannten Bereich. Auf der Antriebsachse sitzt auch ein als Gleichrichter wirkender Kommutator. Damit wird – wie es scheint in der Schwingkondensatortechnik<sup>12</sup> und möglicherweise in der trägerfrequenzbasierten Messtechnik überhaupt – erstmalig das Prinzip der phasenrichtigen Gleichrichtung realisiert (**Bild 6**).

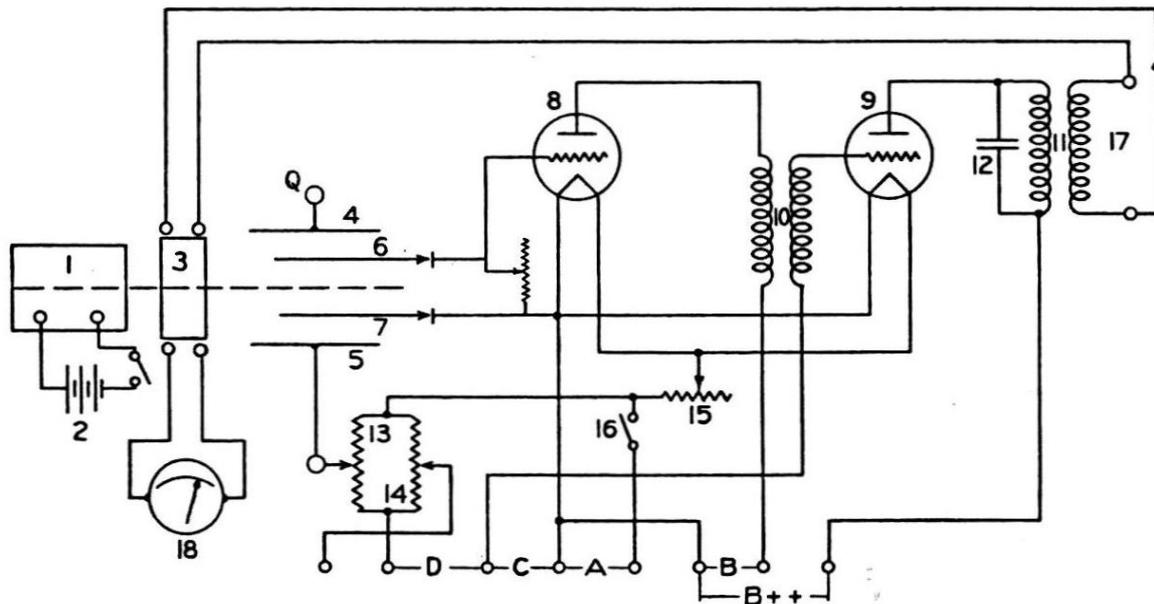


Bild 6: Portables Elektrometer mit rotatorisch variiertem Kondensator und ebenso angetriebenem phasenrichtig gleichrichtendem Kommutator nach [Gunn 1932].

Die Modulationsfrequenz, wahrscheinlich eine vergleichsweise sehr niedrige, wird nicht genannt. Die Empfindlichkeit ist, angepasst an den robusten Einsatz in (damaligen!) Flugzeugen, mit 0,1 mV angegeben, womit das Potential der Methode keinesfalls ausgeschöpft sei.

Als Meilenstein der Schwingkondensatortechnik ist eine Arbeit von H. Palevski, R. K. Swank u. R. Grenchik anzusehen [Palevski et. al. 1947]. Die Autoren analysieren Möglichkeiten und Grenzen des Systems und beschreiben Konstruktion und Technologie des Wandlers (**Bild 7**, S. 18). Viele Elemente späterer Ausgestaltungen sind versammelt: Elektromagnetische Anregung (1000 Hz) einer Kondensatorelektrode – hier einer Membran –, funktionelle und konstruktive Einbeziehung der kritischen An- und Auskoppellelemente in die Konstruktion des Wandlers, Hinweise zur Minimierung von Kontaktpotentialen und deren Driften.

Nicht weniger informativ sind die Umstände, unter denen diese Arbeit entstand. Sie wurde finanziert vom *Metallurgical Laboratory of the University of Chicago*, einer wesentlichen Größe in der US-amerikanischen Atom- und Atombombenforschung (Manhattan-Projekt). Die korrespondierende Patentanmeldung [Palevsky / Swank 1946] tätigte die *United States Atomic Energy Commission*.

Auch eine sehr pragmatische Weiterentwicklung bezieht sich auf strahlungsmesstechnische Probleme: „There is considerable need for a sensitive, stable instrument for many radiation detection problems.“ [Reese 1950] (**Bild 8**, S.19).

Angetrieben wird der Schwingkondensator aus dem 60 Hz-Netz, ungeachtet der durch die Gefahr von Netzeinstreuungen aufgeworfenen Probleme. Phasenempfindlicher Gleichrichter ist ein 2-Phasen-Motor gleicher Frequenz, der ein Potentiometer zur Bereitstellung der der Eingangsspannung gegenübergestellten Kompensationsspannung vorzeichenabhängig verstellt.

Diese Arbeiten leiteten den sehr deutlich erkennbaren Schub ein, den die Schwingkondensatortechnik durch den Aufschwung der (friedlichen) Atom- und Kerntechnologien in den Jahren nach dem zweiten Weltkrieg erfuhr. Physikalischer Ausgangspunkt war der Umstand, dass mit der Ionisationskammer ein zwar signalschwacher aber physikalisch einfacher und technisch außergewöhnlich stabiler Detektor für Kernstrahlung zur Verfügung stand. Deren Nutzbarmachung für den robusten industriellen Einsatz führte zur breiten Einführung präziser Dicken- und Dichtemessung nach dem Durchstrahlungsprinzip<sup>13</sup> – überwiegend realisiert mit einer schwingkondensatorbasierten Strommesstechnik.

Bevor wir uns der Ausprägung der Schwingkondensatortechnik – zunächst gekettet an die Etablierung der o. g. genannten Kerntechnologien – zuwenden, sei auf frühe, entwicklungs-geschichtlich und physikalisch sehr wichtige, technikgeschichtlich kaum wahrgenommene und folgerichtig weitgehend vergessene Wurzeln verwiesen.

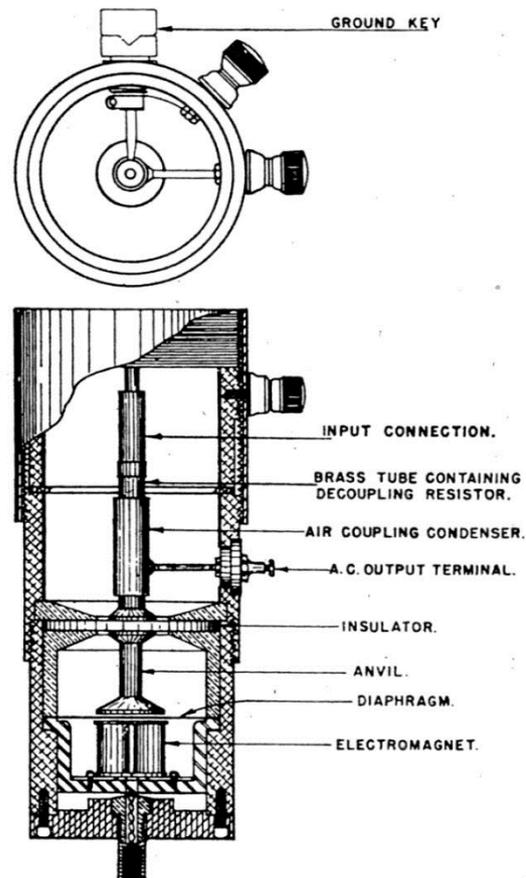


Bild 7: Der Schwingkondensator nach [Palevsky / Grenchik 1947].

*Er kann als Ausgangspunkt der leistungsfähigen Entwicklungen in der Mitte des 20. Jahrhunderts angesehen werden.*

\* A standard Brown Instrument Company amplifier converts d-c to a-c by means of a chopper and then has a step-up transformer followed by 4 stages of gain. Here the chopper is omitted and it is used as an a-c amplifier.

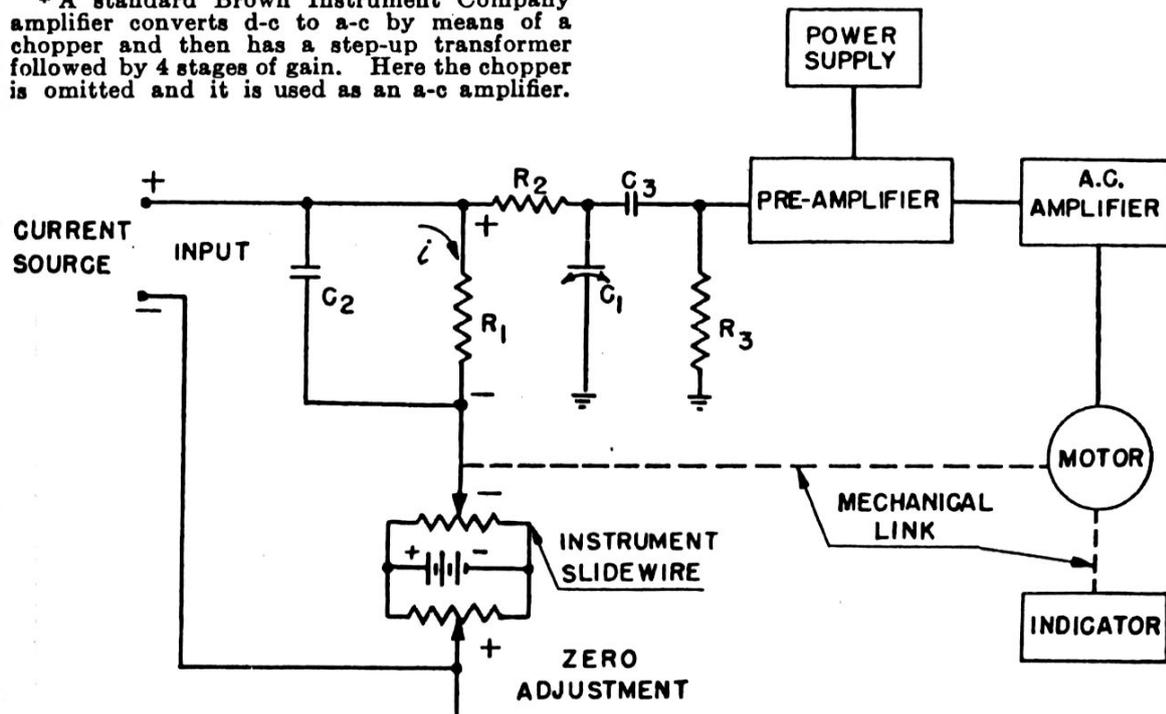


FIG. 2. Block diagram of electrometer

Bild 8: Schwingkondensator-Elektrometer nach [Reese 1950]

Es wirkte beispielgebend, ähnlich wie der Schwingkondensator nach [Palevsky / Grenchik 1947]. Das allerdings weniger mit Blick auf den Schwingkondensator selbst, sondern hinsichtlich der Struktur des Schwingkondensator-Elektrometers als Folgeregler / Motorkompensator. Damit ist eine (hier integral wirkende) Gegenkopplung, die den Verstärker als stromempfindlich ausweist (siehe Anm. 5), in die Schaltungstechnik des Schwingkondensator-Verstärkers eingeführt.

## 4 Andere elektromechanische Verstärker mit extremem Eingangswiderstand

### 4.1 Einsteins „Maschinchen“

Der wohl früheste realisierte elektromechanische Verstärker, der eine *definierte* „Potentialmultiplikation“ bewirkt, ohne der Messquelle Leistung zu entziehen, geht auf eine Idee *Albert Einsteins* [Einstein 1908] zurück – für die meisten Elektrotechniker und auch für viele Physiker ein überraschendes Faktum. Bevor wir *Einsteins* Idee und deren Umsetzung nachgehen, sei auf deren Vorgeschichte verwiesen. Auch diese ist auf weitgehend vergessene Weise eng mit dem Grundwissen der Elektrotechnik und der Informationstechnik verknüpft.

In seinem berühmten Jahr 1905, dem *annus mirabilis*, veröffentlichte *Albert Einstein* – neben der Begründung der speziellen Relativitätstheorie und neben der Vorstellung seiner Lichtquantenhypothese – eine Arbeit, die oft, bibliographisch etwas oberflächlich aber inhaltlich zutreffend, als die Theorie der Brownschen Bewegung bezeichnet wird. *Einstein* hatte eine „von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ vorausgesagt und quantitativ beschrieben

[Einstein 1905]. Zwei Gesichtspunkte bestimmten sein Herangehen: Wenn die vorausgesagte und nach seinen Rechnungen direkt beobachtbare Bewegung nachgewiesen würde, dann sei das ein starkes Argument für die Stichhaltigkeit einer (damals noch nicht allgemein anerkannten) atomistischen Physik – mit allen im Umkehrschluss folgenden dramatischen Konsequenzen. Zum anderen eröffneten seine Berechnungen die Möglichkeit, aus der Beobachtung der vorausgesagten makroskopischen (mittleren quadratischen) Verschiebung der bewegten Teilchen auf atomare Kenngrößen, nach damaligem Sprachgebrauch „Elementarquanta“, hier z. B. die Avogadro-Konstante, zu schließen. Möglicherweise habe er die Brownsche Bewegung beschrieben, merkte *Einstein* an. Aber dazu seien seine Kenntnisse zu ungenau, so dass er sich „hierüber kein Urteil bilden konnte“.

Den entscheidenden Impetus erfuhr *Einstein* von dem Jenaer Optik-Pionier und Ernst-Abbe-Mitarbeiter *Henry Siedentopf* (1872-1940). *Einstein* habe sehr wohl die Brownsche Bewegung beschrieben, und auch die von ihm (*Siedentopf*, aber auch anderen Physikern) beobachtete Größenordnung der von den Teilchen zurückgelegten Wege entsprächen durchaus den Resultaten der von *Einstein* vorgelegten Theorie. Das veranlasste *Einstein* zu einer breiter angelegten und nunmehr ausdrücklich der Theorie der Brownschen Bewegung zugeordneten Arbeit [Einstein 1906]. In dieser verwies *Einstein* auch auf die thermisch angeregte Fluktuation der Ladungsträger im Querschnitt elektrischer Leiter und auf den Weg, diesen Effekt quantitativ zu beschreiben! Das ist die wohl erstmalige Erwähnung des für die sich später herausbildenden Informations-Technologien und -Theorien so fundamental bedeutsamen thermischen Widerstandsrauschens. *Einsteins* Schlussfolgerung aber war fatal: „Da ich jedoch keine durch das Experiment kontrollierbare Konsequenz mehr habe auffinden können, scheint mir die Behandlung weiterer Spezialfälle unnütz.“<sup>14</sup>

Das war kein Zeichen von Erleichterung, weil die objektiv gegebene Ladungsträger-schwankung als messtechnische Störung (irrtümlicherweise!) wohl nicht infrage käme. Es war vielmehr Ausdruck des Bedauerns darüber, dass von diesem Effekt verwertbare Messwerte zur Bestimmung von „Elementarquanta“ nicht zu erwarten seien. So z. B. zur Bestimmung der (erst später so eingeführten) Boltzmann-Konstanten  $k$ , wie das *H. Nyquist* und *J. B. Johnson* zwei Jahrzehnte später hergeleitet und demonstriert hatten [Nyquist 1928], [Johnson 1928].

Aber *Einstein* ließ nicht los. Er diskutierte die über einem kurzgeschlossenen Kondensator stattfindende thermisch angeregte Ladungsträgerfluktuation, die beim Öffnen des Kurzschlusses gewissermaßen eingefrorene Spannung und – hier kommt erstmals die aus mechanischer Arbeit gespeiste definierte Verstärkung einer elektrischen Spannung ins Spiel – deren Anhebung durch nachfolgende Vergrößerung des Plattenabstandes des Messkondensators [Einstein 1907].<sup>15</sup> Letztlich schien ihm dieser Verstärkungseffekt unzureichend.

Schließlich schlug *Einstein* einen zur definierten Vermehrung von Ladungen geeigneten „Potentialmultiplikator“, eine Influenzmaschine, vor [Einstein 1908] und beschrieb deren Ausgestaltung (**Bild 9**).

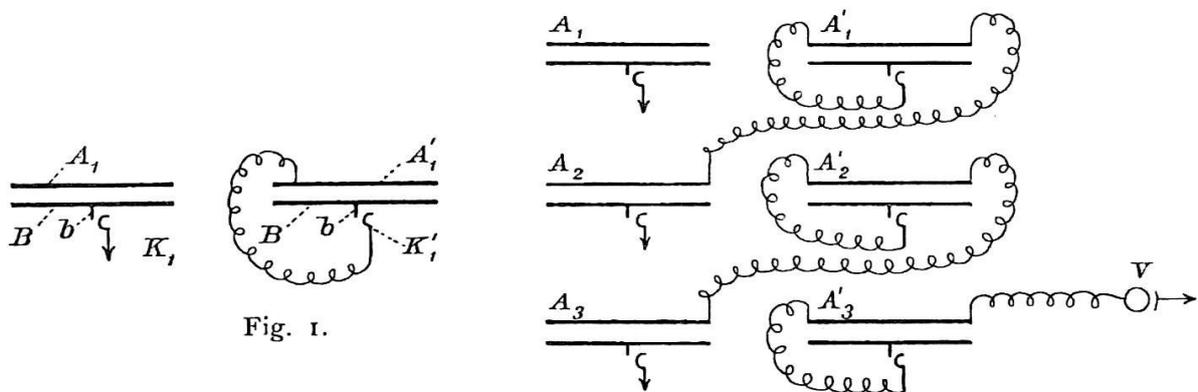


Bild 9: *Einsteins* Vorschlag eines Potentialmultiplikators nach [Einstein 1908]

#### 4.2 Zur Wirkungsweise

Die Elektrode  $A_1$  ist auf Eingangspotential aufgeladen; sie influenziert bei Kontaktierung des „Blättchens“  $B$  mit der Bezugs Elektrode („Erde“) auf diesem eine Ladung. Auf dem Wege nach  $A_1'$  realisiert  $B$  eine Kapazität gegen die Bezugs Elektrode, die, wenn wir *Einsteins* Skizze folgen, etwa der von  $A_1$  und  $A_1'$  entspricht. Beim Kontaktieren mit  $A_1'$  übergibt  $B$  Teile seiner Ladung. Beim beständigen Wiederholen dieses Vorganges wird  $A_1'$  asymptotisch auf die Spannung aufgeladen, auf die  $B$  während des Weges nach  $A_1'$  geladen war. Voraussetzung für einen (Spannungs-) Verstärkereffekt<sup>16</sup> ist, dass die Kapazität, die  $B$  während des Influenzierungsvorganges mit  $A_1$  bildet, groß ist gegenüber der Kapazität, die  $B$  auf dem Weg nach  $A'$  gegen das Bezugspotential ausbildet.

Das ist der Hintergrund von *Einsteins* Konstruktionsanweisung, den Elektroden  $A, A'$  die Form von „Bügeln“ zu geben, die  $B$  während der Kontaktierung dicht umgeben. Wir erkennen in dieser Kapazitätsveränderung des „Blättchens“ das für den Verstärkungseffekt maßgebliche „Pumpen“ des Parameters Kapazität. Auf der Empfängerseite  $A_1'$  bewirkt diese Abschirmung gegen das Bezugspotential, dass  $B$  seine Ladung beim Kontaktieren fast vollständig übergibt. Man beachte die Polaritätsumkehr auf jeder Verstärkerebene.

*Einstein* nannte die erdachte Anordnung im privaten Schriftverkehr liebevoll „sein Maschinchen“. Deren Realisierung übernahmen seine Freunde Conrad und Paul Habicht [Habicht 1910], (**Bild 10**, S. 22).<sup>17</sup>

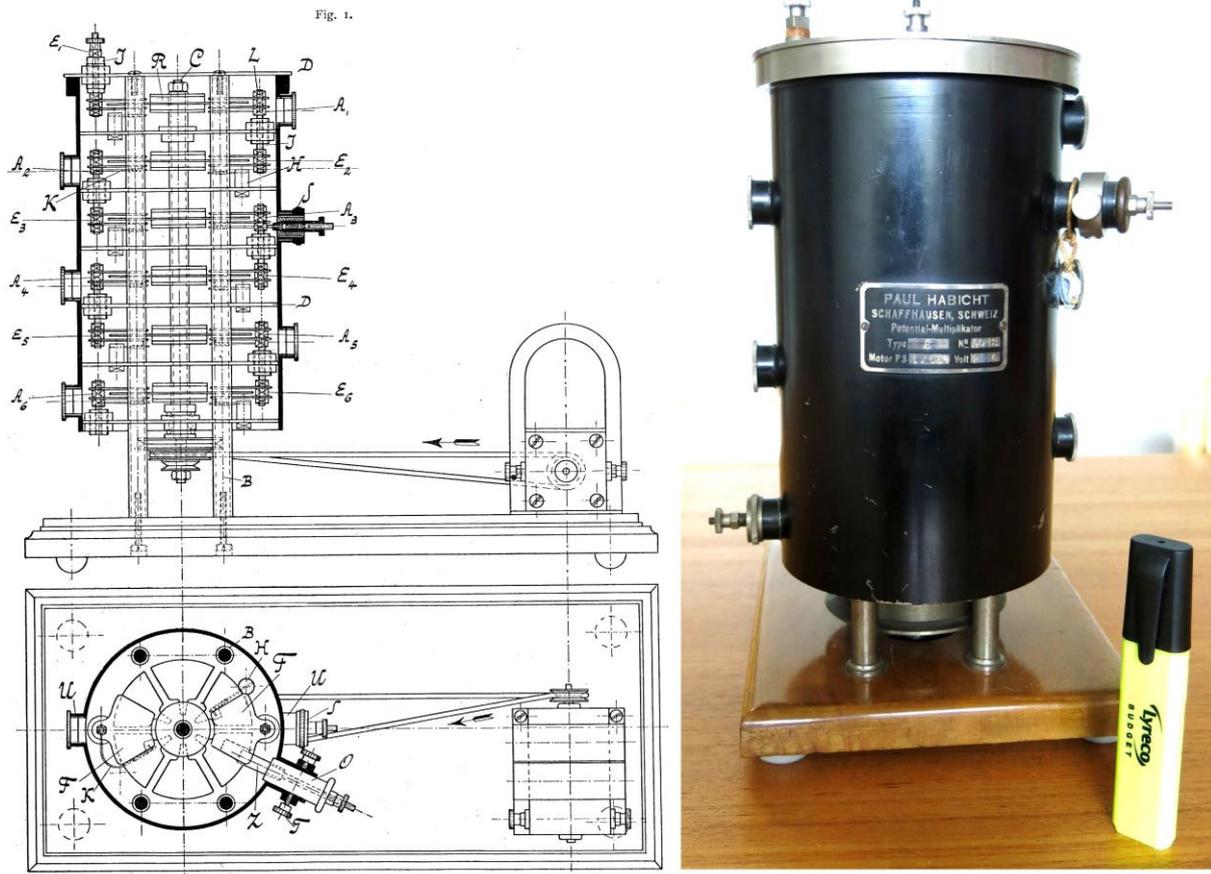


Bild 10: Entwurf und realisiertes Gerät von Einsteins „Maschinchen“

Links: Habichts Entwurf zur Realisierung des Potentialmultiplikators [Habicht 1910]

Rechts: Ein von Habicht realisiertes und im Physikalischen Institut der Universität Tübingen aufbewahrtes Gerät.

(Foto vom Verfasser mit freundlicher Unterstützung durch Herrn Dr. Günter Lang, Phys. Inst. der Universität.)

Sie erreichten mit einer Verstärkungsebene eine Spannungsverstärkung von etwa 8,5 und bei 6 hintereinander-geschalteten Ebenen eine Gesamtverstärkung von etwa 360 000 ( $\approx 8,5^6$ ). Damit war ein Wettlauf mit der etwa zeitgleich etablierten Elektronenröhrentechnik eröffnet; er erstreckte sich bis in die 1930er Jahre.<sup>18</sup> Aber letztlich waren die durch parasitäre Effekte – Ladungsverlust durch Isolationsprobleme, parasitäre Ladungen, Umwelteinflüsse u. a. – bedingten Rückschläge nicht zu kompensieren.<sup>19</sup> Auch dem der Elektronenröhrentwicklung inhärenten Trend zur Miniaturisierung konnte das Konzept des mechanisch getriebenen Verstärkers nicht folgen. Eines von nur drei (?) noch erhaltenen Exemplaren des „Potentialmultiplikators“ wird – mittlerweile funktionsuntüchtig – in der Sammlung des Physikalischen Institutes der Universität Tübingen aufbewahrt (**Bild 10**). Als weitere Standorte sind das Technikum Winterthur, Schweiz, und das Museum Boerhave Leiden, Niederlande, bekannt.

### 4.3 Eine namenlose verschollene Schwester

Eine komplexere, weil neben variablen Kapazitäten auch einen induktiven Blindwiderstand einbeziehende Maschine erdachten *W. Meißner* u. *U. Adelsberger* (**Bild 11**). Die physikalischen Motive beschreiben die Autoren so: „Bei den Vorarbeiten für die Messung der Suszeptibilität von Gasen zeigte sich, daß es wünschenswert ist, sehr kleine Gleichspannungen zu messen, was auch für die Arbeiten über Supraleitfähigkeit dringend nötig ist.“<sup>20</sup> Der zitierte Bericht bezieht sich auf eine 1925 erdachte, 1926 aufgebaute und dann weiterentwickelte Maschine, die die oszillierende Bewegung des Modells nach **Bild 11** durch eine rotatorische ersetzt habe, „ohne irgendwelche Kontakte an rotierenden Teilen zu benutzen“. „Die Maschine ist mit zahnradähnlich gefrästen Statoren und Rotoren ausgestattet, welche je 280 Zähne besitzen.“ Mit dieser sei eine Spannungsverstärkung von 10 erzielt worden. Veröffentlichungen, Archivmaterial oder gar Gerätschaften zu dieser Verstärkermaschine konnten nicht aufgefunden werden.<sup>21</sup>

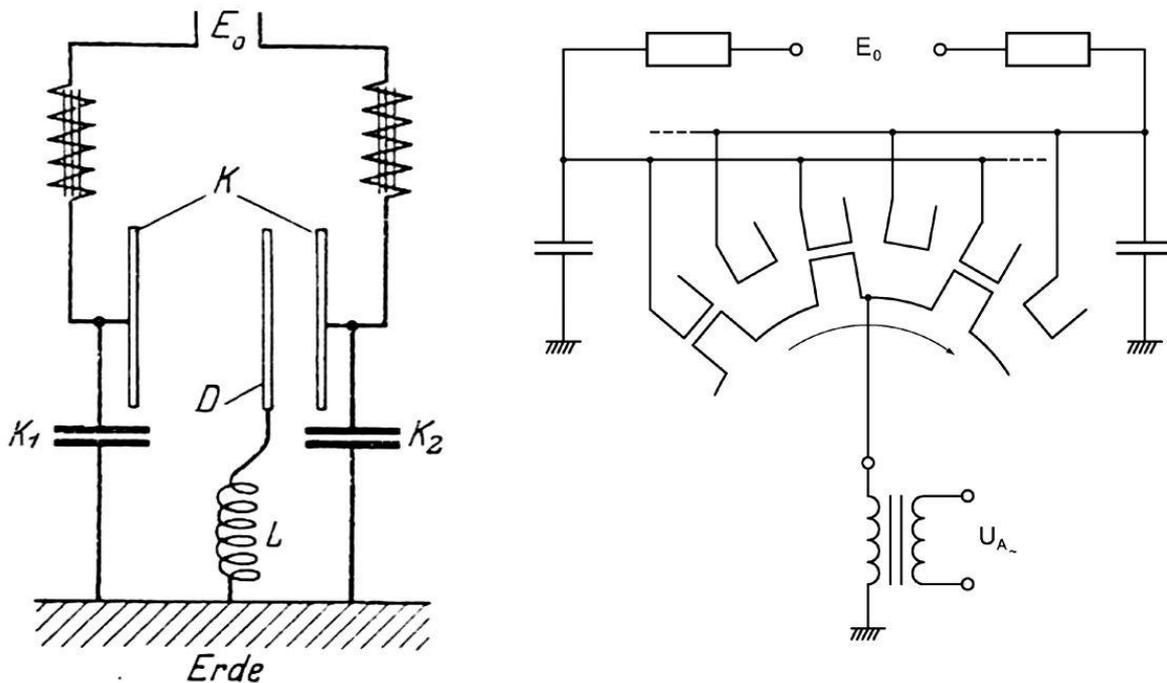


Bild 11: Zum Wirkprinzip und zur Umsetzung einer Verstärkungsmaschine

Links: Das in [Meißner / Adelsberger 1929] beschriebene Wirkungsprinzip.

Rechts: Ein denkbare Schema für die von den Autoren erwähnte aber bisher nicht aufgefundene rotatorische Umsetzung.

Die Autoren beschreiben das Funktionsprinzip:

„ Die Kondensatormaschine arbeitet nach folgendem Prinzip: Man bringt in das elektrische Feld des Plattenkondensators K, an den über Drosseln oder Hochohmwiderstände die Meßspannung  $E_0$  gelegt ist und dessen Platten durch große Kapazitäten  $K_1$  und  $K_2$  mit Erde verbunden sind, eine über eine Selbstinduktionsspule L geerdete Platte D und bewegt sie in Richtung der Kraftlinien sinusförmig hin und her. Der aus K, D,  $K_1$ ,  $K_2$  und L gebildete

Schwingkreis ist auf die Bewegung von D abgestimmt. Falls die Meßspannung von Null verschieden ist, tritt im Schwingkreis eine elektrische Schwingung auf, die sich aufschaukelt, bis die durch sie erzeugte Joulesche Wärme der vom Antriebsmotor gelieferten, zur Bewegung der Ladung im elektrischen Feld erforderlichen Arbeit gleich ist.“

## 5 Der kerntechnologisch getriebene Aufbruch der Schwingkondensatortechnik im Nachkriegsdeutschland

Mitte der 1950er Jahre stellten die Firmen Friesecke & Höpfner, Erlangen-Bruck, (künftig F&H genannt) und Laboratorium Prof. Berthold, Wildbad im Schwarzwald, ihre industrie-tauglichen Dickenmessgeräte „FH 46“ und „Betatest“ vor – beides Geräte mit Ionisationskammern als Strahlungsdetektoren.<sup>22</sup> Damit war auf dem noch jungen (west-) deutschen Markt nicht nur ein wirtschaftlicher Konkurrenzkampf, sondern auch der Wettbewerb zweier physikalisch /technisch unterschiedlicher Systeme eröffnet.

Die technische Anwendung der Dickenmessgeräte und die geforderte Auflösung der Messgröße verlangten nach einem Kompensationsverfahren. F&H realisierte die Bereitstellung eines Vergleichswertes, des „Sollwertes“, durch eine elektrische Spannung; Laboratorium Prof. Berthold gab einem physikalischen Kompensationsverfahren den Vorzug und stellte der Messstrecke eine Vergleichsstrecke gegenüber (**Bild 12 a, b**). (Wir kommen später auf eine Gegenüberstellung dieser unterschiedlichen Kompensationsprinzipien zurück und versuchen dort eine Wertung.)

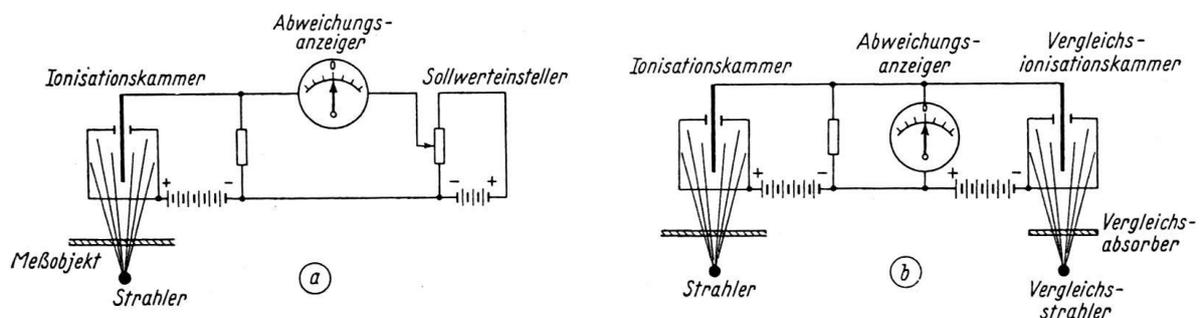


Bild 12: Vereinfachte Gegenüberstellung der konkurrierenden Kompensationsverfahren nach [Bosch 1955]

*Der „Abweichungsanzeiger“ ist, gemessen am damaligen Stand der Technik, ein hoch anspruchsvolles elektronisches System.*

Das Laboratorium Prof. Berthold hielt bei der Verstärkung des Differenzsignals an der klassischen Elektrometerröhrentechnik fest, was letztlich den späteren Ausstieg aus der Dickenmesstechnik zur Konsequenz hatte. (In anderen Zweigen der kerntechnologisch basierten Anwendungen, z. B. der industriellen Füllstandsmesstechnik, ist die Firma – heute

als Berthold Technologies – immer noch präsent.) Mit der Anlage FH 46 wurde die Schwingkondensatortechnik in Deutschland fest etabliert – jedenfalls was deren breite und auch robuste Anwendung in der industriellen Messtechnik betrifft. F&H weitete die Anwendung dieser Technik aus und stellte eine „Große Strahlungsüberwachungsanlage FH 53“ vor und – etwas später, 1957, losgelöst von den Kerntechnologien – das „Elektronische Universalelektrometer FH 56“ (**Bild 13**) [Böhm 1957].

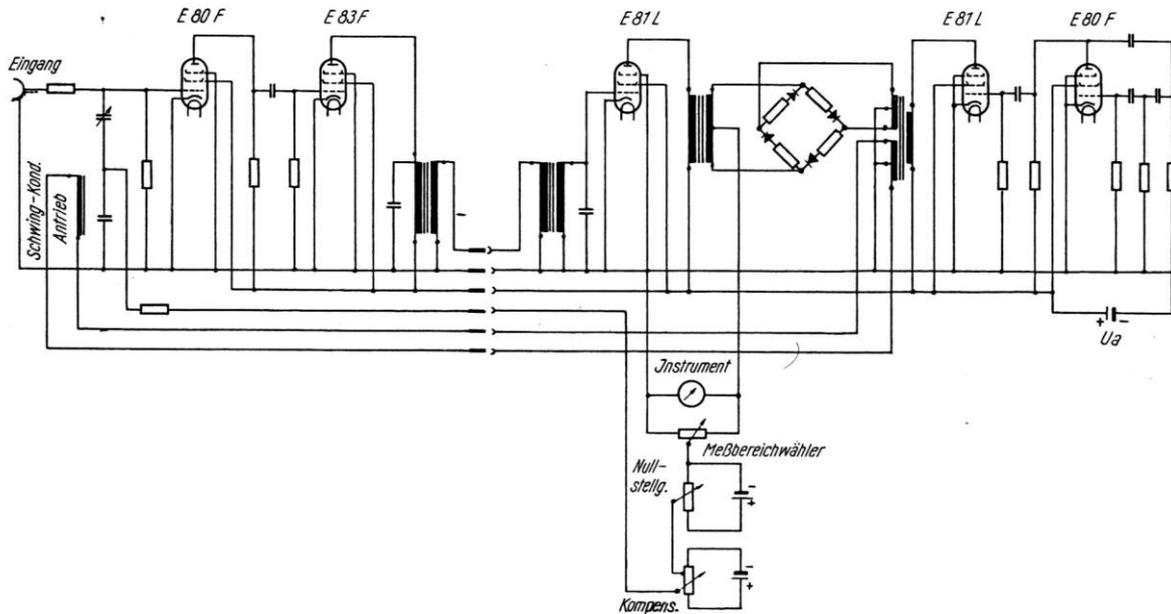


Bild 13: Schaltungstechnik des von F&H aus der Dickenmesstechnik hergeleiteten Schwingkondensatorelektrometers FH 56 [Böhm 1957].

*Phasempfindlicher Gleichrichter ist ein Ring(de)modulator. Das Gerät ist erkennbar als Spannungsverstärker gegengekoppelt.*

## 6 Der Schwingkondensator-Verstärker als Detektor für Ionisationskammerströme in Dickenmessgeräten – was muss er können?

Eine geeignete Empfindlichkeitskenngröße der Dicken- (Flächenmasse-) Messsysteme (z. B. nach **Bild 12**) ist durch die Beziehung

$$E = \frac{\frac{\Delta i}{i_0}}{\frac{\Delta s}{s}} = \mu s e^{-\mu s} \quad (6)$$

gegeben.  $\mu$  charakterisiert die Härte der Strahlung,  $s$  steht für die auf die Fläche bezogene Masse des Messgutes im Strahlengang,  $i$  für den Ionisationskammerstrom; (**Bild 14**). Gl. (6) folgt unmittelbar aus der (näherungsweise geltenden) Schwächungscharakteristik

$$i = i_0 e^{-\mu s} . \quad (7)$$

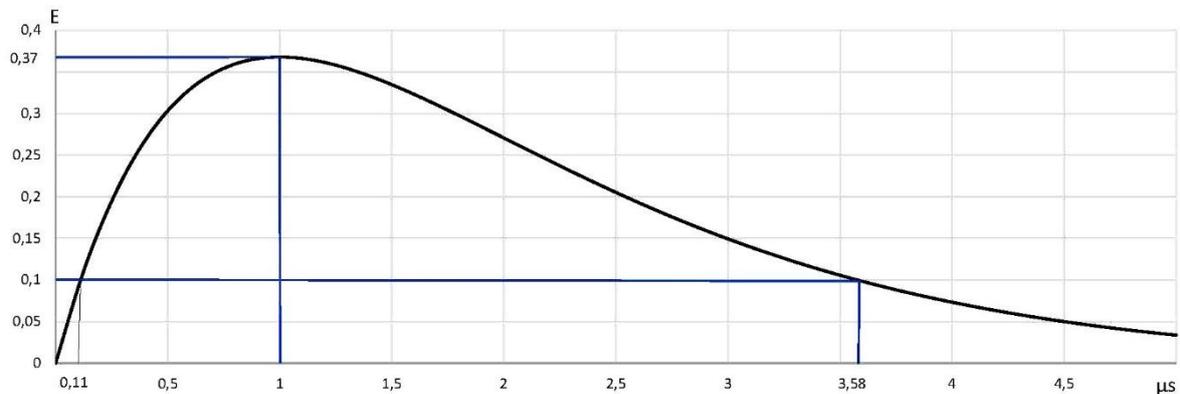


Bild 14: Empfindlichkeitscharakteristik  $E = f(\mu s)$  der Dickenmesstechnik nach Gl. (6).

Im günstigsten Fall, wenn also die Härte der Strahlung optimal an die Flächenmasse im Strahlengang angepasst wäre ( $\mu s = 1$ ), bewirkt eine (kleine) relative Änderung der Flächenmasse eine mit  $e^{-1} \approx 0.37$  untersetzte (auf  $i_0$  bezogene) relative Stromänderung. Da ein technisch sinnvoll ausgestaltetes Dickenmessgerät einen möglichst großen Messbereich beidseits vom Empfindlichkeitsmaximum realisieren muss, sind weitere physikalisch bedingte Empfindlichkeitseinbußen bis etwa  $E(\mu s) \approx 0,1$  hinzunehmen und elektrisch auszugleichen. Das begründet die Faustregel:

*Um eine relative Dickenänderung von 1 Prozent nachzuweisen, muss eine relative Stromänderung von 1 Promille (bezogen auf  $i_0$ ) sicher beherrscht werden.*

Der Kompromiss, der hinsichtlich Aktivität der Strahlenquelle (Strahlungsbelastung!), des erforderlichen Abstandes zwischen Strahlenquelle und Detektor und angesichts der Nachweisempfindlichkeit der Ionisationskammer zu schließen war, führte in der Praxis auf Ströme um

$$i_0 = 10^{-9} \text{ Ampere.}^{23}$$

Der nach der o. g. Faustregel verlangte sichere und langzeitstabile Nachweis von

$$\Delta i = 10^{-12} \text{ Ampere}$$

(oder weniger!) begründete letztlich die Unverzichtbarkeit des Schwingkondensators in der kernstrahlungstechnisch basierten Dickenmesstechnik in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts und auch später noch.<sup>24</sup>

## 7 Frühe Dicken- und Schwingkondensatormesstechnik in der DDR<sup>25</sup>

Wenig zeitversetzt zur Entwicklung in der BRD beteiligte sich die DDR mit großen Erwartungen und unter dem Einfluss der Mitte der 1950er Jahre aus der Sowjetunion zurückgekehrten „Spezialisten“<sup>26</sup> an der Ausgestaltung der erfolgversprechenden Kerntechnologien. Viele der Wissenschaftler und Techniker, die die UdSSR – teils aus eigenem Antrieb, teils freiwillig, teils gezwungenermaßen – bei der Beschleunigung ihres Atomprogramms unterstützt hatten, sahen bei ihrer Rückkehr nach Deutschland in den von der DDR gebotenen Möglichkeiten eine erfolgversprechende Perspektive. *Werner Hartmann (1912-1988)*, Schüler des nach seiner Rückkehr aus der Sowjetunion in Leipzig lehrenden Nobelpreisträgers Gustav Hertz (1887-1975), später bekannt geworden als der Vater der Mikroelektronik in der DDR, gründete im November 1955, unterstützt von *Manfred von Ardenne (1907-1997)*, in Dresden einen Industriebetrieb zur Entwicklung und Fertigung kernphysikalischer Geräte, den VEB Vakutronik.<sup>27</sup> Offensichtlich standen bei diesem Konzept *Hartmanns* seine in den Siemens-Laboratorien gesammelten Erfahrungen zur gedeihlichen Verknüpfung von akademischer Forschung und Lehre mit industrieller Entwicklung und Produktion Pate. *Manfred von Ardenne* war an einem industriellen Partner zur Verwertung seiner Forschungen und Entwicklungen interessiert.<sup>28</sup>

Im Herbst 1957 sollte der VEB Vakutronik ein im Forschungsinstitut Manfred von Ardenne entwickeltes Konzept eines Dickenmessgerätes – Stand „Brettschaltung“<sup>29</sup> – übernehmen, um es zur Produktionsreife weiterzuentwickeln. Was das Potential zu einem Eklat gehabt hätte, verlief erstaunlicherweise völlig geräuschlos. Die beauftragten Ingenieure des VEB Vakutronik verweigerten sich und wurden dabei von ihren Vorgesetzten, auch von ihrem Werkleiter *Hartmann*, gedeckt. Sie wollten nicht mittragen, dass ein Zerhacker, realisiert mit einem modifizierten polarisierten Fernmelderelais, die Funktion des Modulators solch kleiner Signale in einem vergleichsweise robusten industriellen Umfeld übernehmen sollte. Die „Brettschaltung“, übrigens tatsächlich auf einem Brett montiert vorgestellt, wurde nicht übernommen.

Die Folgen bestimmten die Situation des nächsten Jahrzehnts. *Von Ardenne*s Ingenieure kamen ihrer Berichtspflicht nach, publizierten das zurückgewiesene Konzept als „Ein Radioisotopen-Dickenmeßgerät mit vereinfachtem elektrischem Aufbau“ [Klar / Ihle 1959] und legten es zu den Akten. Beide Institutionen, der VEB Vakutronik und das Forschungsinstitut von Ardenne begannen, eigene Dickenmessgeräte, beide auf der Basis jeweils eigener Schwingkondensatoren zu entwickeln [von Ardenne / Klar 1959], [Monser 1960]. Zur Umsetzung seines nunmehrigen Konzeptes versicherte sich das Forschungsinstitut von Ardenne der Mitwirkung des VEB Carl Zeiss Jena (künftig CZ Jena genannt). Ausgangspunkt dafür war eine ausdrücklich als „Gerät für Studienzwecke als Vorbereitung für eine verkaufsfähige Konstruktion“ erarbeitete gemeinsame Studie [Klar et. al. 1959] (**Bild 15**). Der VEB Vakutronik arbeitete auf eigene Rechnung.

Die Geschichte wiederholte sich: Die sächsisch-thüringische Koalition lehnte sich an das vom Laboratorium Berthold praktizierte Konzept der physikalischen Kompensation (**Bild 12 b**) an, allerdings mit einem Schwingkondensatorverstärker. Der arbeitete mit Netzfrequenz – mit allen technischen Vereinfachungen<sup>30</sup> und allen durch die unbedingte Notwendigkeit der Vermeidung von unkontrollierten Netzeinstreuungen aufgeworfenen Problemen – und treibt einen Motorkompensator als phasenempfindlichen Gleichrichter.<sup>31</sup> Schaltungstechnisch ist der gemeinsame Entwurf damit dicht bei dem Konzept von [Reese 1950] (**Bild 8**).

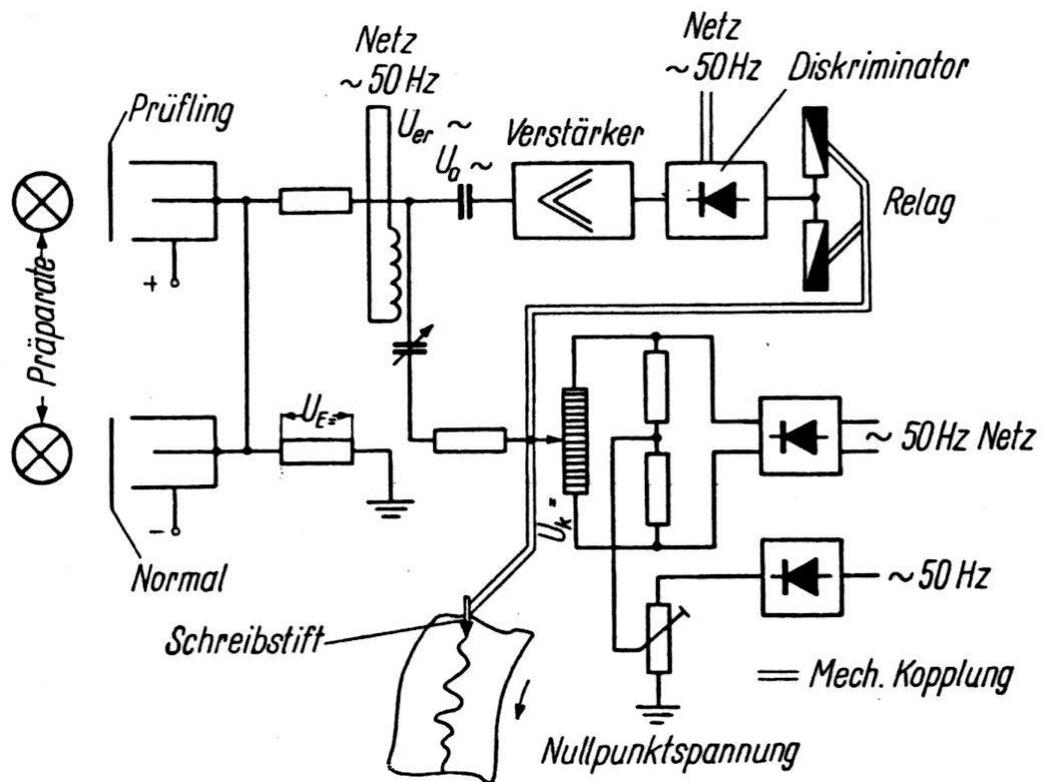


Bild 15: Das gemeinsame Konzept von Institut von Ardenne / CZ Jena nach [Klar et. al. 1959] zur Realisierung eines Dickenmessgerätes

*Es verfolgt das Physikalische Kompensationsprinzip nach **Bild 12 b**. Die Struktur der elektrischen Ausstattung folgt dem Schwingkondensator-Elektrometer nach [Reese 1950] (**Bild 8**).*

Der VEB Vakutronik folgte dem Konzept von F&H; der Sollwert wird als elektrische Spannung vorgegeben. Der Schwingkondensator wird, abweichend von F&H, mit einem nicht polarisierten Antrieb ausgestattet; mit 50 Hz angeregt, schwingt er mit 100 Hz. Mit dieser Trägerfrequenz blieb man bei allen (damaligen) Vorteilen einer netzbasierten Anregung, wick aber der Gefahr von Netzeinstreuungen zumindest in guten Teilen aus. Phasenempfindlicher Gleichrichter war ein Röhrenschalter, dessen Bezugsfrequenz durch Frequenzverdoppelung vom Netz abgeleitet wurde (**Bild 16**).

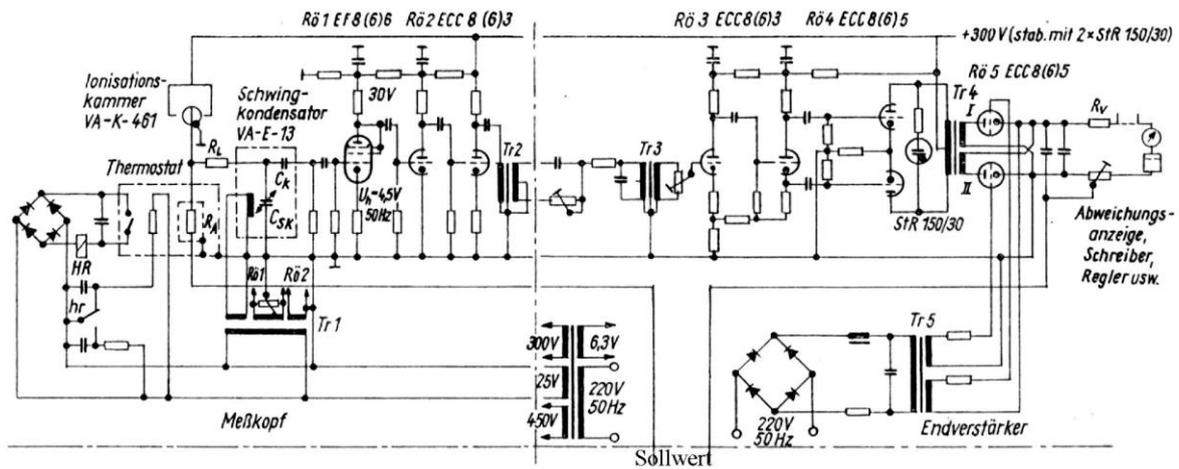


Bild 16: Vereinfachtes Schaltbild des Dickenmessgerätes VA-T-70 A nach [Dörfel 1962 (1)] und [Hartmann 1969]

Das gewählte Messverfahren erzwingt die Thermostatisierung des Messwiderstandes  $R_A$ . Der Schwingkondensator  $C_{SK}$  ist über ein doppeltes Hochpass-Glied an den Röhrenverstärker angekoppelt; damit werden Rückwirkungen des Gitterstromes über die Isolationswiderstände der Kondensatoren auf den Messstrom praktisch ausgeschlossen. Der gesamte Verstärker ist erkennbar als Stromverstärker gegengekoppelt. Damit werden die parasitären Elemente des Schwingkondensators und der Eingangsschaltung nur sehr geringen Spannungsbelastungen ausgesetzt; die Störströme sind entsprechend niedrig.

## 8 Wettlauf im Gleichschritt – wer wird Sieger?

Schon 1958 setzte der VEB Vakutronik „versuchsweise ein mit radioaktiven Isotopen arbeitendes Banddickenmeßgerät im VEB Wachstum- und Kunstlederwerk Coswig“ ein. Das Gerät, Vakutronik-intern trug es die Bezeichnung VA-T-70, werde „gegenwärtig produktionsreif gemacht“.<sup>32</sup> Vom Flächenmassenmessgerät FMG 1 des CZ Jena liegen frühe Erfahrungsberichte aus der Papierindustrie vor. Beide Betriebe präsentierten schon 1960 zur Leipziger Frühjahrsmesse durchkonstruierte Geräte. Auch fachpublizistisch machten die Betriebe in Dresden und Jena bald auf sich aufmerksam ([Schnabl / Söldner 1960], [Dörfel 1962 (1)], [Günther / Horn 1962]).<sup>33</sup> Für beide Betriebe war charakteristisch, dass der Einsatz ihrer Geräte und deren beständige Weiterentwicklung parallel verliefen, und zwar weitgehend zeitgleich.

Um die notwendigen Entwicklungsschritte zu verdeutlichen, seien Vorzüge und Nachteile der unterschiedlichen Messprinzipien grob gegenübergestellt: Beim *physikalischen* Kompensationsverfahren entfallen, sofern in Mess- und Vergleichsstrecke wirklich gleiche Bedingungen gewährleistet sind, die zwischen den Kalibrierzyklen durch Änderung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte herbeigeführten Messfehler – das ist bei einem Messgut von geringer Flächenmasse von Bedeutung. An den sehr hochohmigen Messwiderstand werden keine besonderen Stabilitätsforderungen gestellt. Andererseits ist eine

elektrische Sollwertvorgabe als Führungsgröße insbesondere in gesteuerten / geregelten Systemen von nicht zu unterschätzendem Vorteil – abgesehen von der reduzierten (halbierten) Aktivität der Strahlenquellen – , der durch sehr große Sorgfalt bei der Handhabung der Mess- und Sollwertgrößen erkaufte werden muss.

Beide Betriebe bemühten sich um die nicht unproblematische Entwicklung einer explosions-sicheren Variante ihrer Geräte – ein in der Kunststoffverarbeitung wichtiger Gesichtspunkt. CZ Jena ersetzte die Sollwertvorgabe mit einem Etalon im Vergleichskanal durch eine präzise verstellbare Blende und erweiterte diese durch eine Fernsteuerung. Damit kam man einer elektrischen Sollwertvorgabe nahe. Vakutronik verbesserte mehrfach die Thermostatisierung des Messwiderstandes und konnte seine Geräte im Bedarfsfall mit einer Schaltungserweiterung zur Kompensation von Temperatureinflüssen im Messspalt ausstatten. An einer solchen Zusatzeinrichtung arbeitete auch CZ Jena; offensichtlich griff das Prinzip der physikalischen Kompensation nicht unter allen Anwendungsbedingungen.

Beide Betriebe erlagen auch systemfremden Erwartungen. So ging es z. B. um die Durchmesserbestimmung von Strängen, von Glasrohren, durch Auswertung der Schattenwirkung des Messobjektes.<sup>34</sup> Das sind Paradebeispiele für die von Anwendern und Anbietern überschätzten Potentiale der Kerntechnologien. Die Beta-Strahler waren in ihrer technischen Ausgestaltung alles andere als in strahlenoptischer Sicht wünschenswerte punktförmige Strahler. Und die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung war zumindest an den Konturen der Messobjekte eher eine Fehlerquelle denn eine Hoffnung. Die technischen Aufwendungen zur Abschwächung dieser Nachteile konnten die Vorteile mit anderen (späteren, z. B. optischen) Techniken arbeitender Geräte auf Dauer nicht kompensieren. Und beide Betriebe ersetzten schon zeitig ihre ursprünglichen Schwingkondensatoren durch in mechanischer und elektrischer Hinsicht verbesserte Konstruktionen (**Bild 17**).



*Bild 17: Schwingkondensatoren aus DDR-Produktion.*

*Links: Schwingkondensator von CZ Jena, der eigene Vorarbeiten [nach BACZ 21751] und die nach [von Ardenne / Klar 1959] ablöste; natürliche Größe 65 mm lang.*

*Mitte: Schwingkondensator VA-E-13 [Monser 1960]*

*Rechts: Schwingkondensator VA-E-16 [Schubert 1964] der den VA-E-13 ablöste. Er hat einen Durchmesser von 45 mm und ist 35 mm lang; er wiegt 220g.*

*Quellen: CZ-Archiv, Privatbesitz, Technische Sammlungen Dresden.*

Die vom VEB Vakutronik begründete Flächenmassemesstechnik (VA-T-70) führte – bedingt durch beständige Weiterentwicklung und angepasst an unterschiedliche Anwendungsprofile – in den 1960er Jahren zu den Modellen VA-T-70A, -70B, -74, -75 und -77. Damit wurde auch der schrittweise Übergang zur volltransistorisierten Schwingkondensatorelektronik vollzogen.

Die Modelle VA-T-74 und -75 waren mit Servomechanismen zum selbsttätigen Abgleich in den Messpausen ausgestattet [Dörfel 1965]. Das Letztere arbeitete mit einer elektromagnetischen Strahlenquelle, mit Beta-Bremsstrahlung, und erschloss damit Messbereiche größerer Dicke (Flächenmasse). Sie entstanden eng verknüpft mit einer mit dem VEB SKET Magdeburg („Schwermaschinenkombinat Ernst Thälmann Magdeburg“) und dem VEB Elektroprojekt Berlin getroffenen Verabredung. Elektroprojekt Berlin stand für die elektrotechnische und leistungselektronische Ausstattung der von SKET entwickelten und produzierten Kaltbandwalzwerke; der Betrieb war inhaltlich und personell stark von der leistungselektronischen Schule des Dresdener Hochschullehrers Rudolf Lappe geprägt. Der Auftraggeber für eine beachtliche Serie von Quarto-Walzwerken – die Sowjetunion – hatte die Ausrüstung mit Flächenmassemessgeräten von F&H zur Bedingung gemacht. Elektroprojekt, SKET und Vakutronik vereinbarten den an ein hohes Maß an Risiko und Verantwortung gekoppelten Einsatz von „F&H-ähnlichen“ Dickenmessgeräten VA-T-74, -75 – letztlich erfolgreich.

Die Flächenmassemesstechnik des VEB Vakutronik wurde 1969 vom Großbetrieb VEB Messelektronik Otto Schön übernommen, in den der VEB Vakutronik (neben dem VEB Schwingungstechnik und Akustik Dresden und dem VEB Funkwerk Dresden) integriert wurde. Auch im Kombinat Robotron, zu dem der o. g. Messelektronikbetrieb später gehörte, wurde diese Messtechnik weitergeführt.

Die Entwicklungsaktivitäten von CZ Jena zum Schwingkondensator und zur Dickenmesstechnik sind von 1959 bis 1965 dokumentiert.<sup>35</sup> Angesichts der engen Verknüpfung von beständiger Weiterentwicklung und Einsatz heißt das, dass CZ Jena etwa ein knappes Jahrzehnt auf dem Gebiet der Dickenmesstechnik aktiv war. Übrigens verlief der mitteldeutsche Konkurrenzkampf auf dem Gebiet der Dickenmesstechnik fast <sup>36</sup> harmonisch. Binnenwirtschaftlich überstieg der Bedarf an dieser Technik – durchaus DDR-typisch – das diesbezügliche Produktionsvolumen der beiden jeweils sehr breit aufgestellten und in Anspruch genommenen Betriebe. Und außenwirtschaftlich vertraten beide Betriebe gemeinschaftlich und nicht ohne Erfolg DDR-Interessen im Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW) der Ostblockstaaten.

Den Ausstieg von CZ Jena aus der Dickenmesstechnik mit Sieg oder Niederlage eines bestimmten physikalisch-technischen Konzeptes oder mit betriebswirtschaftlichen Problemen in Verbindung zu bringen, greift zu kurz. Der Ausstieg war wohl strategisch begründet. CZ Jena war traditionell der Längenmesstechnik verbunden. Mit dem Aufkommen der kerntechnologischen Entwicklungen und deren zeitweiliger Überschätzung sah sich CZ

Jena verpflichtet, auch auf diesem Spezialgebiet der Längenmesstechnik (Dickenmesstechnik) Führungsstärke zu zeigen. Später rückten andere Techniken in den Focus.

Dieses Verhalten entspricht etwa dem Vorgehen von CZ Jena auf dem Gebiet der Rechen-technik: Die mit dem Erfolg der Zeiss-intern eingesetzten Optik-Rechenmaschine OPREMA nachgewiesene Kompetenz wurde mit der Entwicklung der ZRA-Rechner außenwirksam ausgestaltet. Angesichts neuer Herausforderungen wurde dieses Gebiet letztlich dem Kombinat Robotron überlassen.<sup>37</sup> So wie CZ Jena später, dann mit dem Status eines „Kombinates“<sup>38</sup> ausgestattet, mit seinen Kompetenzen auf dem Gebiet des Präzisions-gerätebaus die damit korrelierten Entwicklungen der Mikroelektronik in der DDR auf sich zog und bis zur Wendezeit auch dominierte.<sup>39</sup>

## 9 Schwingkondensatoren und Elektrometer aus Dresden<sup>40</sup>

Auch in Dresden emanzipierte sich die Schwingkondensatortechnik von dem von der Dickenmesstechnik vorgegebenem Rahmen – weitgehend übereinstimmend mit der von F&H, Erlangen, praktizierten Linie – und führte, bei zunächst partieller Übernahme der Schaltungstechnik der Dickenmessgeräte, zu eigenständigen Dosimetern und universellen Elektrometern.

Schon 1961 stellte Vakutronik das Schwingkondensatorelektrometer VA-J-50 vor. Mit der Entwicklung eines neuen, mechanisch kompakten und elektrisch stabilen Schwingkondensators, des VA-E-16 (**Bild 17** rechts), wurde ein Schub ausgelöst. Die an die Bedürfnisse der Dickenmesstechnik angepasste Variante mit nicht polarisiertem Antriebssystem trug die Bezeichnung VA-E-17. Dieser Schub führte (über die Zwischenstufe VA-J-51, 1964) um 1965 zur Etablierung des Universalelektrometers VA-J-52. Damit waren auch auf diesem Gebiet der Übergang zur volltransistorisierten Beschaltung des Schwingkondensators vollzogen und die physikalischen Möglichkeiten technologisch ausgereizt.

Der kompakte und stabile Schwingkondensator VA-E-16 (**Bild 17**, S. 30 und **Bild 18**, S. 33) ermöglichte auch die Konstruktion des tragbaren Ionisationskammer-Dosimeters VA-J-15 A. Es erfüllte die aus den kern- und röntgentechnischen Entwicklungen resultierenden Forderungen nach der sowohl empfindlichen als auch (weitgehend) energieunabhängigen Bestimmung von Dosis und Dosisleistung elektromagnetischer Strahlung. Damit hatte die zehn Jahre früher von F&H entwickelte Große Strahlungsüberwachungsanlage FH 53 eine inhaltliche und sehr handliche Weiterentwicklung erfahren.

Der Schwingkondensator VA-E-16 bezog seine Attraktivität aus zwei Merkmalen: Seine Gestalt, gekennzeichnet durch einen tiefen Einstich („Nut“ 12, siehe **Bild 18**) in das tragende Gehäuse, erlaubte durch eine von außen in Dreipunktauflage justierbare und fixierbare mechanische Verspannung („Spannschraube(n)“ 11) einen anhand der elektrischen Signale

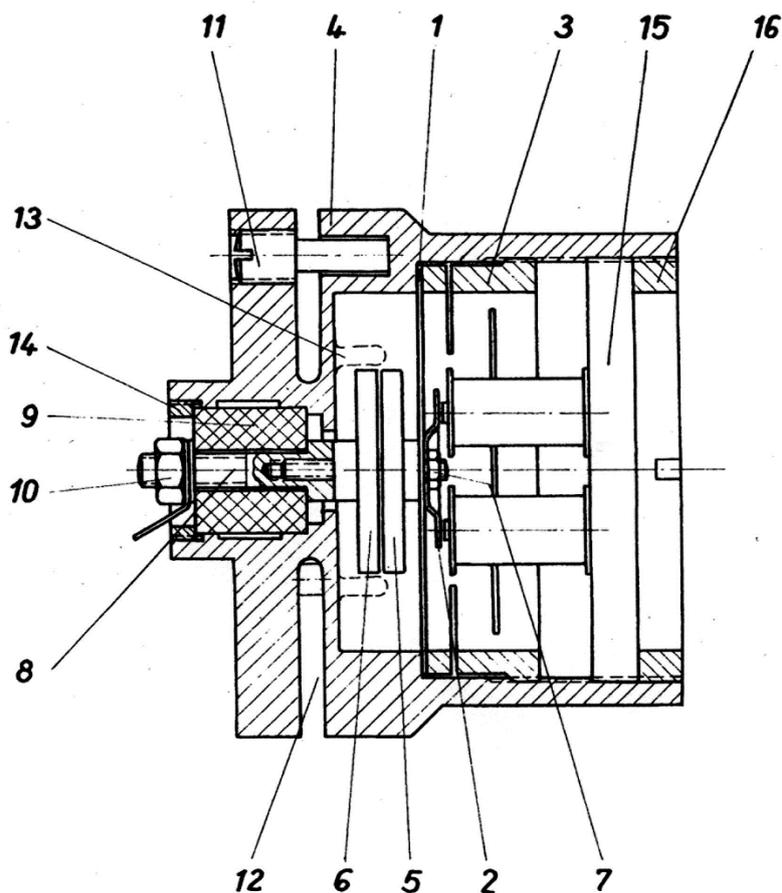


Bild 18: Schnittzeichnung des Schwingkondensators VA-E-16 nach dem Patent DE 1 189 202, angemeldet am 10.03.1961, erteilt am 18.11.1965.

1 – Membran, 2 – Anker, 4 – Gehäuse, 5 – bewegliche Elektrode, 6 – Gegenelektrode, 11 – Spannschraube (eine von drei), 12 – Nut (zur Bedeutung von 11 und 12 siehe Text), 15 – Erregersystem (Telefonhörersystem).

Zum Größenvergleich: Der Durchmesser beträgt 45 Millimeter.

sehr genau verfolgbaren mechanischen Abgleich des Schwingensystems auf Parallelität der Elektroden. Was deren Oberflächen und die damit verknüpften Probleme der Kontaktpotentiale und deren Driften betrifft, so hatte sich Vakutronik zunächst und weitgehend übereinstimmend mit der Vorgehensweise der Vorbilder und Konkurrenten um die Beschichtung mit Edelmetallen bemüht. Bewährt und durchgesetzt hatte sich aber letztlich, das gegenüberstehende zylindrische Elektroden-Paar aus jeweils unmittelbar benachbarten Zonen eines Edelstahlhalbbezugs zu fertigen und sorgfältig zu reinigen.

## 10 Sonderformen

### 10.1 Ein elektrostatisch angeregter Schwingkondensator

Schwingkondensatoren wurden international in vielfältigen Ausprägungen konstruiert und eingesetzt. Wir wollen hier auf zwei Sonderformen hinweisen, die, obwohl an den Rändern einer variantenreichen Palette stehend, nicht nur technisches Interesse hervorriefen, sondern auch wirtschaftliche Bedeutung erlangten.

Es scheint nahezuliegen, neben der elektromagnetischen Anregung des Schwingensystems auch die elektrostatische in Betracht zu ziehen. Als problematisch erweist sich aber, die notwendige vergleichsweise hohe Anregungsspannung von den sehr kleinen

Signalspannungen gleicher Frequenz hinreichend gut zu trennen. Eine elegante Lösung dieses Problems und dessen technische Umsetzung wurde in [van Nie / Zaalberg van Zelst 1963] vorgestellt (**Bild 19**) und von Philips Eindhoven in der „Hauptgruppe Röntgen und medizinische Apparate“ in offenbar größerer Stückzahl realisiert. Schwingendes Element ist eine beidseitig mit Tantal beschichtete dünne Glasmembran.

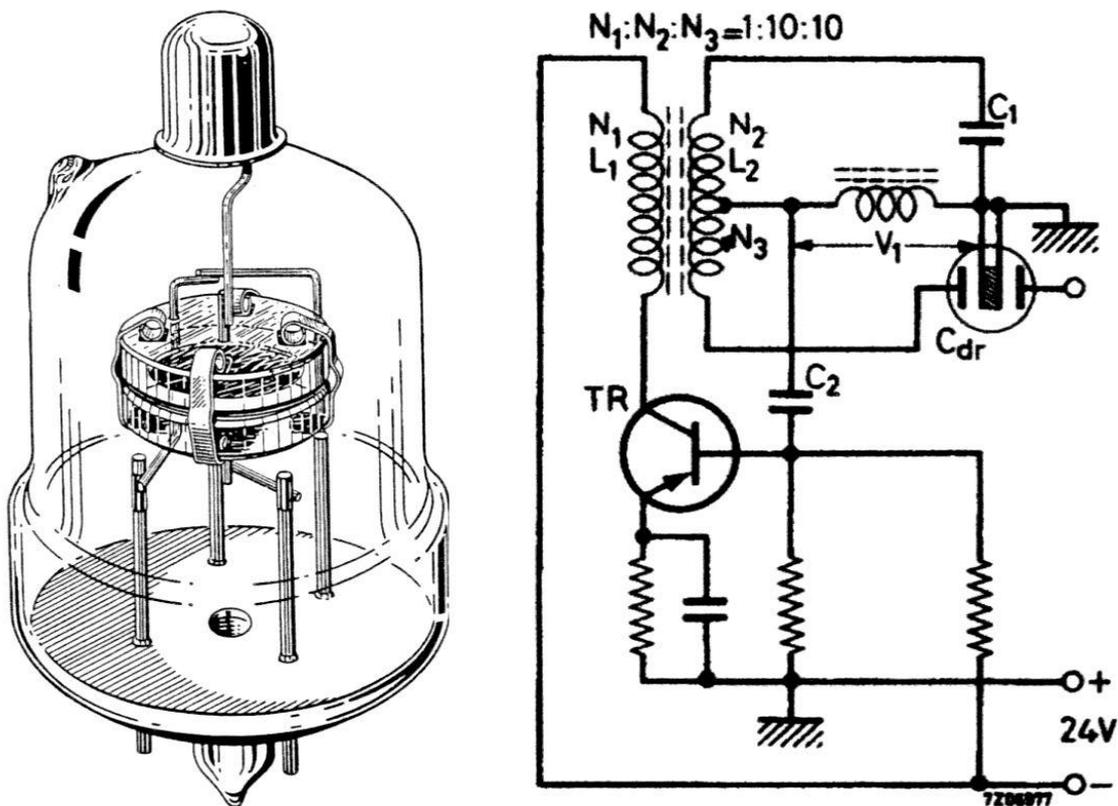


Bild 19: Konstruktionsskizze und Schaltung vom Schwingkondensator mit der Bezeichnung XL 7900

Links: Das Bauelement evakuiert in einem Röhrenkolben nach [van Nie / Zaalberg van Elst 1963]

Rechts: Die Erregerschaltung nach einem Prospektblatt [Philips 1968]

Sowohl die Konstruktionsskizze als auch die Schaltung machen deutlich, dass das im „Driving Condenser“  $C_{dr}$  wirkende Antriebsfeld durch ausschließlich konstruktive Maßnahmen nur schwer vom Signal zu trennen wäre; es bedarf der im Text genannten elektrischen Entkopplung.

Die Trennung von Antriebs- und Signalspannung gelang den Erfindern, indem sie die mechanische Resonanzfrequenz (etwa 6 kHz) von der Hüllkurve einer an- und abschwelenden hochfrequenten Schwingung (etwa 1 MHz) selbsttätig anregten. Deren spektralen Anteile – vereinfacht dargestellt 1MHz und  $(1 \pm 0,006)$ MHz – liegen hinreichend weit entfernt von der Signalfrequenz, der mechanischen Resonanzfrequenz, und können ausgefiltert werden.

## 10.2 Der „elektronische Schwingkondensator“

Die breite Etablierung des Schwingkondensators verlief zeitgleich mit Einführung und schrittweiser Durchsetzung der Halbleitertechnik in der technischen / physikalischen Messtechnik. Insofern verwundert es nicht, dass sehr bald Schaltungstechniker der Frage nachgingen, ob nicht die spannungsabhängige Sperrschichtkapazität von (Silizium-) Dioden die variable Kapazität des mechanischen Schwingkondensators nachbilden könnte. Die Entkopplung von Erreger- und Signalspannung müsste mit Hilfe einer Brückenschaltung gelingen (**Bild 20**). Die frühesten zugänglichen deutschsprachigen Quellen, die die Funktionsfähigkeit dieses Prinzips demonstrierten, sind [Wilke 1962], [Dörfel 1962 (2)] und [Micic / Gilly 1963].

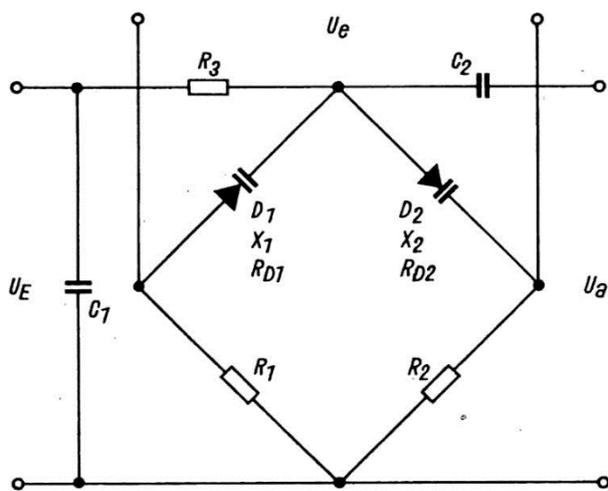


Bild 20: Prinzipschaltbild der Brückenschaltung  
Das Prinzipschaltbild ist [Micic / Gilly 1963] entnommen. Realisiert wurde die Brücke mit den Intermetall-Kapazitätsdioden BAY 34. Schon der Ideengeber [Wilke 1962] war Intermetall-Mitarbeiter. Auch bei dem unabhängig davon in [Dörfel 1962 (2)] vorgestellten Modell wurde auf Intermetall-Dioden (Z-Leistungs-Dioden ZL 12) zurückgegriffen.

Ein Vorzug des „elektronischen Schwingkondensators“ besteht in der Möglichkeit, die Modulatorfrequenz um mehrere Größenordnungen höher zu wählen als das bei mechanischen Systemen möglich ist; die zitierten Modellbeispiele arbeiten mit (100...500) kHz. Damit war, der Bedingung Gl. (5) folgend, die unproblematische Ankopplung sehr niederohmiger bipolarer Transistorverstärker möglich. Einschränkend wirkte der (damals) relativ niedrige Sperrwiderstand der Kapazitätsdioden (etwa  $10^7$  Ohm). Auch wenn dieser Wert durch Gegenkopplung deutlich angehoben werden konnte, nennen die zitierten frühen Quellen unabhängig voneinander aber übereinstimmend erzielte Eingangswiderstände von „ $> (10^9 \dots 10^{10})$  Ohm“ als Obergrenze. Letztlich führte das elektronisch realisierte Schwingkondensatorkonzept nicht an den

(damaligen prinzipiellen) Schwächen der Halbleitertechnik vorbei, welche auch der direkten Realisierung höchstohmiger und fehlstromärmster Festkörperverstärker noch im Wege standen. Immerhin wurde in den späten 1960er Jahren die nicht auf extrem hohe Eingangswiderstände ausgelegte Umsetzung des „elektronischen Schwingkondensators“ wirtschaftlich nachhaltig mit dem pH-Messgerät MV 84 der Firma Clamann & Granert, Dresden, realisiert.

## 11 Versuch einer technischen Bilanz

Mitte der 1960er Jahre war der Höhepunkt der Schwingkondensatortechnik erreicht. Ein Vergleich der hier angesprochenen Schwingkondensatoren bzw. der zeitgleich angebotenen Schwingkondensator-Elektrometer macht die Möglichkeiten und die prinzipiellen Grenzen dieser Technik deutlich. Gesellschaftspolitisch bedingt vollzogen sich die in der DDR laufenden technischen Entwicklungen und ihre wirtschaftlichen Ausgestaltungen zumindest in Teilen unabhängig bzw. weitgehend abgekoppelt vom internationalen Geschehen. Ungeachtet dessen finden wir mit Blick auf die Schwingkondensatortechnik weitgehende Ähnlichkeiten in den zeitlichen Abläufen und den erreichten technischen Eigenschaften.<sup>41</sup>

Wenn wir die im Laufe einer über mehrere Jahrzehnte erstreckten Geschichte der Schwingkondensatortechnik veröffentlichten Daten vergleichen, so finden wir sehr zeitig ein Einpendeln auf die in **Tabelle 1** genannten Werte. Die von den technischen Gegebenheiten aufgespannte Kompromissituation erzwang diese Einengung des Lösungskorridors. Der über die Jahre erarbeitete technische Fortschritt manifestierte sich in der Überführung der in den Entwicklungslaboren mühsam erreichten Eigenschaften in stabile, unter den Bedingungen einer Serienfertigung garantierte und repräsentative Kennwerte. Was gleichzeitig bedeutet, dass damit die technischen Grenzen dieser Technik – innerhalb der mit *Anmerkung 41* angedeuteten Interpretationsspielräume – praktisch ausgereizt waren. Nicht sehr viel anders stellt sich die Situation beim Vergleich der mit den Schwingkondensatoren jener Zeit ausgestatteten Elektrometern dar.

Tabelle 1: Vergleich zweier auf dem Höhepunkt der Schwingkondensatortechnik in Serie gefertigter Schwingkondensatoren.

	<b>VA-E-16</b> (1964)	<b>XL 7900</b> (1963, 1968)
Ruhekapazität	35 pF	35 pF
Konversionswirkungsgrad	0,1 ... 0,2	0,15; < 0,4
Kontaktpotential (Betrag)	< 30 mV	< 50 mV
zeitliche Driften	0,2 mV / 24 h	0,1 mV / 24 h
thermische Driften	0,05 mV / grd	0,02 mV / grd
Eigenfrequenz	ca. 600 Hz	ca. 6000 Hz
Betriebsfrequenz	480 Hz	ca. 6000 Hz.
Isolationswiderstand	>10 <sup>15</sup> Ohm	>10 <sup>15</sup> Ohm

Die nachfolgend genannten Daten des vom *VEB Vakutronik* gefertigten Schwingkondensatorelektrometers VA-J-52 folgen der technischen Gerätebeschreibung [T.S. 1965]; die Angaben zum Schwingkondensatorelektrometer Vibron 62 A der *Electronic Industries Ltd, Großbritannien*, folgen [N.N. ATM 1965]. Beide Geräte (**Tabelle 2** und **Bild 21**) bieten durch Zusatzeinrichtungen Möglichkeiten zur Strom-, Widerstands- und Ladungsmessung im Höchstohmbereich. Bei beiden Geräten sind, angepasst an eventuelle Messaufgaben unter

Strahlenbelastung, Messkopf und Hauptgerät voneinander abgesetzt. Beim Gerät Vibron 62 A wird eine maximal zulässige Entfernung von 90 m herausgestellt. Das Gerät VA-J-52 ist so konstruiert, dass der Messkopf mechanisch von hinten in das Hauptgerät integriert werden kann. So entsteht dann ein kompaktes Gerät mit Hochohmeneingang an der Frontplatte (**Bild 21**).

Tabelle 2: Gegenüberstellung zweier leistungsfähiger Schwingkondensatorelektrometer aus der Mitte der 1960er Jahre, dem Höhepunkt der Schwingkondensatortechnik.

	<b>VA-J-52</b>	<b>Vibron 62 A</b>
Messbereichsendwerte	10 mV ... 10 V	1 mV ... 10 V
Messunsicherheit	$\leq 2\%$ im gesamten Arbeitstemperaturbereich (-10 ... 45) °C	$\pm 1\%$ ( $\pm 0.5\%$ bei Verwendung eines externen Anzeigeinstruments)
Zeitliche Driften	1 mV/24 h	0,1 mV/24 h
Thermische Driften	0,3 mV/grad	
Eingangswiderstand	$> 10^{15}$ Ohm	$10^{16}$ Ohm
Störstrom	$< 5 \times 10^{-17}$ Ampere	$< 10^{-16}$ Ampere

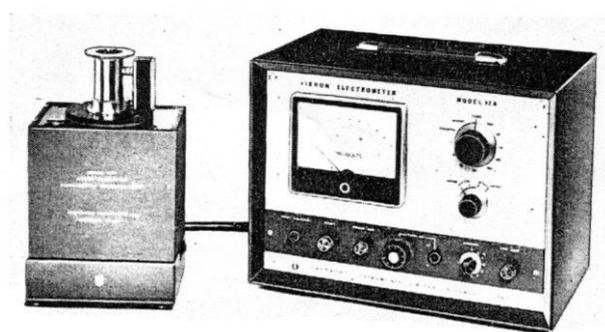


Bild 21: Das äußere Erscheinungsbild der Elektrometer von *Vakutronik* und *Electronic Industries Ltd.*  
 Das *Vakutronik*-Gerät VA-J-52 (links) konnte auch netzunabhängig betrieben werden; an der linken Flanke erkennt man die Verschlüsse der Batterie-Schächte.  
 Quellen: VA-J-52 [T.S. 1965] und Vibron 62 A [N.N. ATM 1965]

Abschließend sei angemerkt, dass mit der Schwingkondensatortechnik unter Laborbedingungen Stromänderungen von  $0,3 \times 10^{-17}$  Ampere (d. h. etwa 20 Elektronen / sec) nachgewiesen wurden. Das erwartungsgemäß abseits der propagierten und garantierten Eigenschaften der beworbenen in Serie gefertigten Geräte.

## 12 Ausklang

Mit der Weiterentwicklung der Halbleiterbauelemente und deren Schaltungstechnik verlor die Schwingkondensatortechnik allmählich ihre Bedeutung. Wenn wir die in der Bundesrepublik Deutschland erworbenen bzw. beantragten Patente berücksichtigen – eine herausgehobene Rolle spielten über die Jahre Philips, Siemens & Halske, Vakutronik und auch die Tschechische Akademie der Wissenschaften –, dann registrieren wir 1984 eine letzte Anmeldung durch die Kernforschungsanlage Jülich GmbH. Und hier schließt sich ein Kreis: Es geht nicht mehr um den ehemals sensationellen Wandler, sondern um eine analytische Aufgabe, nämlich die Bestimmung der Austrittsarbeiten der auf den Schwingkondensatorelektroden gegenübergestellten Materialien – in Anlehnung an die (nicht erwähnte!) Pionierarbeit von [Zisman 1932], siehe *Kapitel 3, Frühgeschichte ...* .

In der DDR vollzog sich der Abschwung, wie schon erwähnt, verzögert und langsamer. Die Schwingkondensator-Elektrometer des VEB Vakutronik – dieser mittlerweile Bestandteil des VEB Messelektronik Otto Schön, Dresden – wurden vom VEB Statron, Fürstenwalde, als SKE Typ 6350 übernommen und weitergeführt. Als darauf aufbauende Bestandteile eines ziemlich breit angelegten Gerätesystems wurden der Nullindikator Typ 6352, das Picoamperemeter Typ 6360, das Hochohmmeßgerät Typ 6362, das Ladungsmeßgerät Typ 6364, die Hochohmmeßbrücke Typ 6380 und das Digitalhochohmmeßgerät Typ 6390 beworben.<sup>42</sup> Die Fertigung der Schwingkondensatoren blieb beim VEB Meßelektronik Otto Schön.

Die Quellenlage zur quantitativen Seite der weiteren Entwicklung dieser Technik ist spärlich. Belegt ist die Herstellung des 10.000. Schwingkondensators VA-E-16 im Jahre 1975.<sup>43</sup> Das rechtfertigt die grobe Schätzung der Zahl der in Dresden insgesamt hergestellten Schwingkondensatoren auf 12. bis 15.000 Exemplare. Von der Dickenmesstechnik, die eine Entwicklung der Schwingkondensatortechnik letztlich ausgelöst hatte, wissen wir lediglich, dass in der DDR bis 1965 etwa einhundert Anlagen ausgeliefert wurden.<sup>44</sup> Grob geschätzt dürfte diese Rate – 100 Geräte in 5 Jahren – auch für die folgenden zwei Jahrzehnte fortzuschreiben sein. Weiterreichende quantitative Angaben konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.<sup>45</sup>

Dickenmessgeräte werden heute in Dresden von MESACON Messelektronik GmbH entwickelt, produziert und vertrieben. Firmenname und Programm verweisen auf die frühen Wurzeln, maßgebliche Mitarbeiter auch. Die Detektoren (Ionisationskammern) werden von VacuTec Meßelektronik GmbH Dresden bezogen. Dieses Unternehmen bezeichnet sich als „gegründet im Jahr 1956“<sup>46</sup> als Vakutronik“. Die Nachweiselektroniken für die Ionisationskammerströme werden heute mit MOS-FET-Schaltungstechniken realisiert – mit selbst-entwickelten (!). Vom Schwingkondensator sind nur Erinnerungen geblieben – verblässende.

## 13 Dank

Bei meinen Recherchen erfuhr ich wirkungsvolle Unterstützung durch Frau Katharina Müller, Archiv der Technischen Sammlungen Dresden, durch Frau Bärbel Mund, Universität Göttingen, Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek, Handschriften und Seltene Drucke, sowie durch die Herren Dr. Wolfgang Wimmer und Stefan Lux vom Carl Zeiss Archiv Jena. Herr Dr. Matthias Lienert vom Universitätsarchiv der TU Dresden hat die Übernahme historischer Materialien ermöglicht. Herr Dr. Günter Lang vom Physikalischen Institut der Eberhard-Karls-Universität Tübingen ermöglichte mir den direkten Zugriff auf *Einsteins* „Maschinchen“. Frühere Kollegen standen mir geduldig Rede und Antwort bei dem Versuch, weit zurückliegende Ereignisse verlässlich zu rekonstruieren. In diesem Sinne bin ich insbesondere den Herren Dr. Eberhart Schurz und Dr. Gerd Schubert verpflichtet. Andere Kollegen halfen mir in vielerlei Hinsicht; ausdrücklich erwähnen möchte ich Prof. Dr. Dieter Hoffmann, c./o. Max Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin, Dr. Gerhard Barkleit, c./o. Hannah-Arendt-Institut für Totalitarismusforschung e. V. an der TU Dresden, und Holger Günther, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden. Ihnen allen und auch den nicht genannten Helfern danke ich herzlich.

## Anhang 1 betreffend Kapitel 4 (*Einsteins* „Maschinchen“)

*Einstein* hat, hergeleitet mit Hilfe der Boltzmann-Statistik – in modernerer Interpretation und etwas vereinfacht ausgedrückt: in Übereinstimmung mit dem Äquipartitionsprinzip der statistischen Mechanik –, der von thermisch angeregten Ladungsträgerfluktuationen herrührenden und im Kondensator  $C$  gespeicherten elektrischen Energie die thermische Energie  $\frac{1}{2}kT$  zugeordnet und die daraus beim Öffnen des Kurzschlusses gewissermaßen eingefrorene Spannung hergeleitet [Einstein 1907]:

$$\frac{C}{2}\overline{u^2} = \frac{1}{2}kT \rightarrow \overline{u^2} = \frac{kT}{C} \quad (\text{A1})$$

Der Begriff *Widerstand* kommt bei dieser Betrachtung explizit nicht vor. Die Theorie rauschender (passiver) elektrischer Netzwerke sieht dagegen in den *Wirkwiderständen* den Sitz thermisch angeregter Rauschquellen – und nur dort. Diese werden durch ihre spektralen Leistungsdichten charakterisiert. Für einen Widerstand  $R$  gilt

$$d\overline{u^2} = 4kTRdf = \frac{1}{\pi}2kTRd\omega . \quad (\text{A2})$$

Das ist die berühmte Nyquistsche Rauschformel in ihrer verkürzten Form – d. h. ohne den erst bei extrem hohen Frequenzen greifenden „Abschneidefaktor“; sie beschreibt ein im technisch relevanten Spektrum „weißes Rauschen“ [Nyquist 1928], [Johnson 1928]. Wir wollen hier zeigen, dass beide Zugänge kompatibel sind.

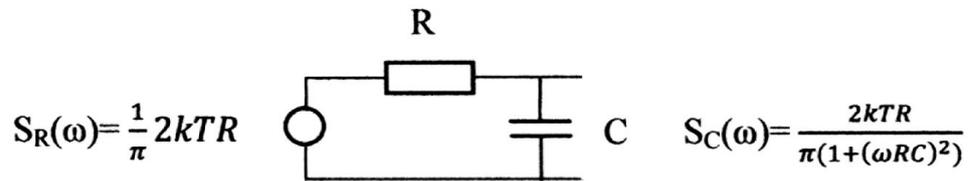


Bild A1: Der mit einem Kondensator abgeschlossene rauschende Widerstand mit den analytischen spektralen Rauschdichten im R-C-Kreis

Für die Parallelschaltung aus Widerstand und Kondensator ergibt sich mit dem aus dem Ersatzschaltbild (**Bild A1**) ablesbaren wirksamen Übertragungsfaktor

$$|F(j\omega)|^2 = \left| \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \right|^2 = \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} \quad (\text{A3})$$

und der „weißen“ Leistungsdichte nach Gl. (A2) eine auf endliche Frequenzen eingeschränkte resultierende Leistungsdichte  $S_C(\omega)$  (**Bild A1**). Für deren Integration gilt

$$\overline{u^2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} 2kTR \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} d\omega = \frac{2kTR}{2RC} = \frac{kT}{C} \quad (\text{A4})$$

in Übereinstimmung mit *Einsteins* Aussage (A1). Die Wirkung des Widerstandes  $R$  liegt also ausschließlich im Spektralen (**Bild A2**).

Ein sehr großer Widerstand  $R$  mit einer dementsprechend hohen spektralen Leistungsdichte der Rauschquelle – Gl. (A2) – beschränkt deren Wirkung auf ein sehr schmales Frequenzband mit  $\omega_{gr} = 1/RC$  und umgekehrt. Der Wert des Integrals über die wirksame spektrale Leistungsdichte wird davon nicht berührt.

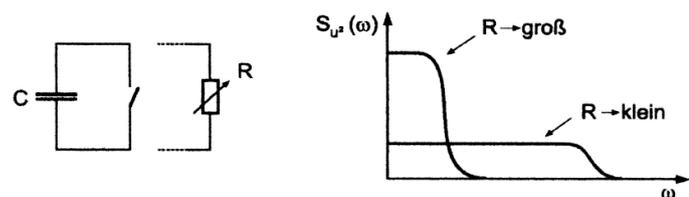


Bild A2: Spektrale Leistungsdichte des Rauschens über einem mit einem Widerstand  $R$  abgeschlossenen Kondensator  $C$  (oder umgekehrt).

Es ist immerhin bemerkenswert und spricht für deren Leistungsfähigkeit, dass die Betrachtungsweise der Theorie rauschender Netzwerke die von *Einstein* ausschließlich in Betracht gezogenen Grenzfälle  $R \rightarrow 0$  und  $R \rightarrow \infty$ , also kurzgeschlossener und leerlaufender Kondensator, einschließt und problemlos übersteht.

## Anhang 2 Kurzbiographien

**Udo Adelsberger**, geb. am 7. Juni 1904 in Königsberg, studierte an der dortigen Universität Mathematik, Physik und Chemie. Nach der Promotion 1927 trat er in die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) ein und arbeitete zunächst unter *Fritz Walther Meißner*. U. a. gebunden an tieftemperatur-physikalische Probleme entstand die hier vorgestellte Verstärkermaschine. Größeren Bekanntheitsgrad erlangte Adelsberger nach seinem Wechsel in das von Adolf Scheibe geleitete Hochfrequenzlabor der PTR (1931). Mit Scheibe entwickelte er dort mehrere hochgenaue Quarzuhren. Die mit den astronomischen Daten des Geodätischen Instituts Potsdam angestellten mehrjährigen Vergleiche führten zu der 1935 publizierten und sensationell wirkenden Aussage, dass festgestellte Gangungenauigkeiten nicht auf Ungenauigkeiten der Uhren, sondern auf Schwankungen der Erdrotation zurückzuführen seien. Dieser Sachverhalt wurde nach dem 2. Weltkrieg international verifiziert und war letztlich Ausgangspunkt dafür, die Definition der Sekunde nicht mehr an astronomische Beobachtungen, sondern an atomphysikalische Effekte zu binden.

Adelsberger wurde 1945 mit seiner gesamten Dienststelle, die während des 2. Weltkrieges nach Zeulenroda / Thüringen ausgelagert worden war, von der abziehenden US-Armee in die amerikanische Besatzungszone verbracht. Politisch unbelastet, erlangte er einflussreiche Positionen in der Physikalisch-Technischen Anstalt, dem Vorläufer der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), und war bis zum Eintritt in den Ruhestand 1953 auch international erfolgreich tätig (Mitwirkung an der Definition der Sekunde und am NASA-Programm). Adelsberger starb am 6. Januar 1992 in Neckargemünd.

**Manfred von Ardenne**, geb. am 20. Januar 1907, betrieb schon in jungen Jahren als akademischer Seiteneinsteiger ein privatwirtschaftlich organisiertes Forschungsinstitut für Elektronenphysik. Vorher, 1926-28, war er als freiberuflicher Mitarbeiter an der Entwicklung und Etablierung der Loewe-3fach-Rundfunkröhre beteiligt, in der man die Urform der Schaltungsintegration sehen kann. Größeren Bekanntheitsgrad erlangte von Ardenne durch die Demonstration einer vollelektronischen Fernsehübertragung (1931) und durch seine Arbeiten zur Elektronenmikroskopie (1937, 1940). Gefördert insbesondere vom Reichspostministerium wandte sich von Ardenne nach Bekanntwerden der Kernspaltung auch der Beschleuniger-Technik zu. Der so entstandene van de Graaff-Generator war Vorlage für die später vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden gefertigte und vertriebene Anlage. Vom Mai 1945 bis zum März 1955 leitete von Ardenne ein Institut in Sinop bei Suchumi. Schwerpunkt seiner Tätigkeit waren Arbeiten zur magnetischen Isotopentrennung. Eine dabei entstandene Ionenquelle („Duoplasmatron“) wurde später vom VEB Vakutronik, Dresden, gefertigt und international vertrieben. Das von Ardenne schon in der UdSSR konzipierte, privatwirtschaftlich ausgerichtete und (fast ausschließlich) auf staatliche Aufträge angewiesene Forschungsinstitut in Dresden wurde zu einer festen wissenschaftlichen und propagandistischen Größe im Forschungsbetrieb der DDR mit schließlich ca. 500 Mitarbeitern.

Besonders herausgestellt wurden ein Elektronenstrahl-Mehrkammerofen für die Metallurgie und die elektronenlithografischen Anlagen für die Herstellung elektronischer Bauelemente. Von Ardenne erfuhr viele Ehrungen und Auszeichnungen. Er war Staatspreisträger der UdSSR, Stalinpreisträger und Träger des Nationalpreises der DDR. Er wurde ehrenhalber in Greifswald promoviert und in Dresden zum Professor berufen. Aber nicht alle Vorstellungen von Ardennes ließen sich realisieren. Seine Mehrschritt-Krebstherapie blieb umstritten. Obwohl Mitglied der Sektion Physik der Deutschen Akademie der Wissenschaften (DAW, später AdW der DDR), blieb ihm die Wahl zum Vollmitglied versagt. Den Umbrüchen der Wendezeit begegnete von Ardenne mit der Gründung des Von Ardenne Institut für Angewandte Medizinische Forschung GmbH und der Von Ardenne Anlagentechnik GmbH. Letztere ist auf Elektronenstrahl- und Plasmatechnik ausgerichtet. Deren wissenschaftliche Grundlagen wurden in das Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden überführt. Dies allerdings ohne die persönliche Mitwirkung von Ardennes. Manfred von Ardenne starb am 26. Mai 1997 in Dresden.

*Georg Heinrich Barkhausen*, geboren am 2. Dezember 1881 in Bremen, studierte – nach dem 1901 in seiner Heimatstadt bestandenen Abitur – zunächst technische Physik an der TH München. Nach Studien an den Universitäten Berlin und München ging er 1903 nach Göttingen, wo er 1906 am Institut für angewandte Elektrizitätslehre bei *Hermann Theodor Simon* promovierte. Nach einer Ingenieur Tätigkeit bei Siemens & Halske, der er nach eigenen Angaben seine Sicht auf eine ingenieurtechnisch anwendbare Naturforschung dankte, und Habilitation an der TH Charlottenburg, wurde er 1911 an die TH Dresden berufen. Dort baute er das erste deutsche Institut für Schwachstromtechnik\* auf. Nach kriegsbedingter Unterbrechung – seine Tätigkeit am Marineforschungsinstitut in Kiel (1915-1918) brachte ihn auch in Berührung mit der ganz jungen Elektronenröhrentechnik – wandte er sich in Dresden der Elektronenröhren-Forschung zu und etablierte seine Röhrengleichung. Mit den „Barkhausen-Kurz-Schwingungen“ wurde die Tür zur Höchstfrequenztechnik aufgestoßen.

---

\* Der auch heute noch gebrauchte Terminus „Schwachstromtechnik“ erfuhr mehrere jüngere Übertragungen. Diese Wortfindungen (z. B. „Nachrichtentechnik“, „Elektronik“, „Informationstechnik“) sind stark vom jeweiligen Zeitgeist bestimmt. Sie werden dem ursprünglichen, sehr prinzipiellen und damals keineswegs selbstverständlichen Dresdener Konzept, dass der mittlerweile etablierten Elektrotechnik der Kräfte und Energien ein den informationstechnischen Aspekten entsprechender Zugang zu den physikalischen Grundlagen zur Seite gestellt werden sollte, nur bedingt gerecht. Der inhaltliche Zusammenhang dieser Zugänge war und ist unbestritten. Die Dresdener Hochschullehrer Hans Frühauf und Gerhard Wunsch (und weitere namhafte Persönlichkeiten) stellten ihn mit der 1971 begründeten *Zeitschrift für elektrische Informations- und Energietechnik* nachdrücklich heraus. (Die Zeitschrift fiel 1983 einem massiven Papiermangel zum Opfer.)

Erste Hinweise auf die Magnetisierungssprünge im Eisen – nach weiterer Untersuchung und Beschreibung 1919 und 1924 als „Barkhausen-Effekt“ oder „Barkhausen-Rauschen“ in die internationale Fachliteratur eingegangen – fand er ebenfalls während seiner Tätigkeit in Kiel. Der erste Band seines berühmten Lehrbuches *Elektronenröhren* erschien 1923; es erfuhr als vierbändiges Standardwerk 12 Auflagen. Sein 1925 vorgestellter „Lautstärkemesser“ und die in diesem Zusammenhang vorgeschlagene Einheit „phon“ wurden zum Ausgangspunkt internationaler Forschung und Standardisierung zur Bewertung des Schalls. Barkhausens Institut wurde zum Ursprung einer Schule mit internationaler Ausstrahlung. Nach der völligen Zerstörung seines Institutes im Februar 1945 ließ sich Barkhausen beurlauben. Er kehrte im Juni 1946 nach Dresden zurück und wirkte mit am Wiederaufbau der elektrotechnischen Ingenieurausbildung. Zahlreiche Mitgliedschaften und Ehrungen belegen seine weltweite Anerkennung. Barkhausen starb am 20. Februar 1956 in Dresden.

**Albert Einstein**, geb. am 14. März 1879 in Ulm als Sohn eines kleinen Elektrounternehmers, verbrachte seine Kindheit in München und studierte 1896 bis 1900 in Zürich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Physik und Mathematik. Nach zweijähriger Tätigkeit als Hilfs- und Privatlehrer fand er 1902 eine Anstellung am Patentamt in Bern. Diese Tätigkeit erwies sich in mehrfacher Hinsicht als sehr fruchtbar. Die Tätigkeit als „technischer Experte 3. Klasse“ (wir wissen nicht, ob sich diese oft zitierte Klassifizierung auf seine Einstellung am Patentamt oder auf die spätere nachweisliche deutliche Beförderung bezieht) ließ ihm genügend Zeit, über grundsätzliche physikalische Fragen nachzudenken. Gleichzeitig schärfte sie sein Verständnis für technische Fragestellungen und originelle Lösungen. In eben dieser Zeit reiften Einsteins hier zitierten und (verkürzt) ausgeführten Aussagen. 1906 wurde er an der Universität Zürich mit einer Arbeit promoviert, die „Eine neue Methode der Bestimmung der Moleküldimension“ vorstellte. Diese ebenfalls im „annus mirabilis“ 1905 gedruckte Schrift ist eng verwandt mit Einsteins hier in Anspruch genommener Theorie der Brownschen Bewegung und den daraus abgeleiteten Vorstellungen zur Bestimmung von „Elementarquanta“. Der aus diesen Überlegungen entsprungene Vorschlag Einsteins zur Realisierung einer elektrostatischen Verstärkermaschine ist wenig bekannt geworden bzw. weitgehend vergessen. Als bekannteren Höhenpunkt und wohl auch Abschluss der technischen Erfindertätigkeit Einsteins können wir seine gemeinsam mit Leo Szilard\*\* angestellten Überlegungen zu neuartigen Kühlsystemen betrachten; wir benennen hier die diesbezüglichen Patentschriften DRP 499 830 u. DRP 525 833, patentiert ab 1926.

---

\*\* Leo Szilard (1898-1964) wandte sich nach elektrotechnischen Studien in Budapest in Deutschland der Physik zu. Er ging 1933 in die USA und war am US-Atombombenprogramm beteiligt. Frustriert über den tatsächlichen Einsatz der Atombombe wandte er sich biophysikalischen Forschungen zu.

Der weitere Lebensweg ist oft beschrieben worden. Einsteins Berufung 1914 nach Berlin – nach Professuren in Zürich und Prag – war außerordentlich fruchtbar. Die dort hervorgebrachte Allgemeine Relativitätstheorie spaltete die Gemeinschaft der Physiker und der Gesellschaft. Der erhobene Vorwurf *spekulativer* Naturbetrachtung, unterlegt mit antisemitischen Positionen, ist angesichts Einsteins sehr *praktisch* orientierter Erfindertätigkeit auch aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht nicht nachvollziehbar. Einstein kehrte 1933 von einer Vortragsreise in den USA nicht nach Deutschland zurück. Er arbeitete am Institute for Advanced Studies in Princeton. Spektakulär und möglicherweise überbewertet ging Einsteins Brief an den US-Präsidenten Roosevelt zur möglichen Gefahr deutscher Atomforschung in die Geschichtsschreibung ein. Einstein starb am 18. April 1955 in Princeton.

**Werner Hartmann**, geb. am 30. Januar 1912 in Berlin, studierte ab 1930 an der TH Berlin-Charlottenburg Physik (begleitet von mehreren Industrie-Praktika), diplomierte 1935 bei Gustav Hertz mit einer Arbeit über künstliche Sperrschichten bei Metall-Halbleiter-Übergängen und verteidigte 1936 eine in den Siemens-Laboratorien angefertigte und von Walter Schottky betreute Doktorarbeit über die elektrischen Eigenschaften oxidischer Halbleiter. Von 1937 bis zum Ende des 2. Weltkrieges arbeitete er bei der Fernseh AG (später Fernseh-GmbH) über Fotozellen und Elektronenvervielfacher. Von Juni 1945 bis März 1955 wirkte er in der UdSSR unter Hertz als Leiter einer Arbeitsgruppe für physikalische Messtechnik in einem kernphysikalischen Forschungsinstitut in Agudseri bei Suchumi. Nach seiner Rückkehr nach Deutschland 1955 begründete und leitete er in Dresden einen wissenschaftlich ausgerichteten Industriebetrieb zur Entwicklung und Fertigung kernphysikalischer Geräte, den VEB Vakutronik. Daneben wirkte er als Professor für kernphysikalische Elektronik an der Fakultät für Kerntechnik der TH/TU Dresden. 1961 wurde Hartmann mit der Leitung der von ihm initiierten Arbeitsstelle für Molekularelektronik Dresden (AME, später AMD) beauftragt; seine Vorlesungen bot er nunmehr an der Fakultät für Elektrotechnik an. 1967 zeigte die AMD erste integrierte Schaltungen vor. Obwohl mit zwei Nationalpreisen und div. anderen Auszeichnungen und Mitgliedschaften geehrt, wurde Hartmann 1974 im Zuge einer politischen Intrige als Leiter der AMD abgesetzt, mit Hausverbot belegt und mit einer untergeordneten Stellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter im VEB Spurenmetalle Freiberg praktisch isoliert. Er starb am 8. März 1988, in einer Zeit, als sich erste Klarstellungen und Würdigungen schon nicht mehr unterdrücken ließen, gebrochen und ohne Hoffnung auf die verdiente Anerkennung als Wissenschaftler und Organisator, in Dresden.

**John Bertrand Johnson**, geb. 02.10. 1887 in Göteborg, Schweden, gest. 1970 in den USA. Johnson studierte Physik und promovierte, wie sein Landsmann *Nyquist*, 1917 an der Yale-University. Er arbeitete bis 1925 im Engineer-Department der Western Electric Co., danach bis 1952 bei den Bell Telephone Lab. Anschließend, bis 1969, wirkte Johnson in leitender Position in Nachfolgeeinrichtungen der Thomas A. Edison Laboratorien. Seine Arbeitsgebiete waren

nach wie vor Probleme der Elektronenröhrenphysik, darüber hinaus aber auch der physikalischen Messtechnik allgemein. Johnson wurde, wie *Nyquist*, von den Fachverbänden der Community vielfach ausgezeichnet.

**Erwin Madelung**, geb. am 21. Mai 1881 in Bonn, erwarb 1900 das Abitur in Straßburg, wo sein Vater als Direktor der chirurgischen Universitätsklinik wirkte. Um sich auf ein Ingenieurstudium vorzubereiten, absolvierte er im Winter 1900/01 ein Praktikum in einer Dresdener Maschinenfabrik. Schließlich wandte er sich der Physik zu und studierte in Kiel, Zürich, Straßburg und Göttingen, wo er 1905 bei *Hermann Theodor Simon* promovierte. Die mit Blick auf Elektrizitätslehre prominentesten seiner Hochschullehrer waren Philipp Lenard (in Kiel), Ferdinand Braun und Jonathan Zeneck (beide in Straßburg). Nach Assistententätigkeit und Kriegsdienst wurde E. Madelung 1918 in Göttingen zum Professor ernannt. 1921 folgte er dem Ruf auf den Lehrstuhl für theoretische Physik (in der Nachfolge von Max Born) in Frankfurt a. M., wo er bis 1949 (als Emeritus bis 1953) wirkte. Neben eigenständigen Beiträgen zur Festkörper-, Atom- und Quantenphysik wurde er durch sein von 1922 bis 1964 in sieben Auflagen erschienenes Buch *Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers* (Springer, Berlin) bekannt. E. Madelung starb am 1. August 1972 in Frankfurt a. M.

**Fritz Walther Meißner**, geb. am 16. Dezember 1882 in Berlin, studierte 1904 bis 1907 an der TH Charlottenburg Maschinenbau und anschließend an der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin (der heutigen Humboldt-Universität) Mathematik und Physik. Er promovierte 1907 bei Max Planck mit einer Arbeit über zur Theorie des Strahlungsdruckes. Er trat 1908 in die Dienste der PTR und beschäftigte sich zunächst mit Thermometrie. Wegen seiner ingenieurtechnischen Vorbildung galt er, ab 1913, als geeignet für die Lösung der an die Tieftemperaturphysik geknüpften apparate-technischen Probleme. In diesem Kontext entstanden in den 1920er Jahren seine mit *Adelsberger* entworfenen und realisierten Überlegungen zur aus mechanischer Energie gespeisten verlustlosen Messung kleiner Gleichspannungen. 1932 entdeckte er gemeinsam mit Robert Ochsenfeld den Meißner-Ochsenfeld-Effekt, wonach Supraleiter im Inneren frei von magnetischen Feldern sind.

Auch seine Hochschullehrertätigkeit ab 1934 in München war vom Generalthema Tieftemperaturphysik bestimmt. Politisch unbelastet, konnte er diese Karriere nach dem 2. Weltkrieg mit Führungspositionen in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Bayern und in der Bayrischen Akademie der Wissenschaften erfolgreich fortsetzen. Er starb am 15. November 1974 in München.

**Harry Nyquist**, geboren am 7. Februar 1889 in Nilsby, Schweden, gestorben am 4. April 1976 in Harlingen, Texas. Nyquist studierte Elektrotechnik und promovierte 1917 an der Yale-

University. Er arbeitete bis 1934 in der Forschungsabteilung der American Telephone and Telegraph Co; anschließend war er bis 1954 in den Bell Telephone Lab. tätig, in den letzten Jahren in leitender Position. Sein Name ist auch verbunden mit dem eines Stabilitätskriteriums für rückgekoppelte Systeme – basierend auf der Analyse des komplexen Frequenzganges des offenen Systems – und mit der „Nyquistflanke“ der Fernsehtechnik. Er blieb Zeit seines Lebens der Industrieforschung verbunden und erfuhr dafür viele Ehrungen.

**Henry Siedentopf**, geb. am 22. September 1872 in Bremen, studierte in Leipzig und Göttingen Physik und wurde dort 1896 mit einer Arbeit „Über die Capillaritätskonstanten geschmolzener Metalle“ zum Dr. phil. promoviert. Nach Assistententätigkeiten in Göttingen und Greifswald folgte er 1899 einem Ruf Ernst Abbes (1840-1905) und wurde wiss. Mitarbeiter der Zeiss-Werke. Von 1907 bis zum Eintritt in den Ruhestand 1938 leitete er die Abteilung Mikroskopie. Daneben lehrte er als a. o. Professor an der Universität Jena. Zu seinen herausragenden Leistungen zählt das 1903 gemeinsam mit dem späteren Nobelpreisträger (1925, Chemie) Richard Adolf Zsigmondy (1865-1929) erfundene und entwickelte Spalt-Ultramikroskop „zur Beobachtung ultramikroskopischer Teilchen in Flüssigkeiten“, welches in der Kolloid- und Polymerforschung große Bedeutung erlangte. Das begründete letztlich die Kompetenz Siedentopfs in Sachen Brownscher Bewegung und seine hier herausgestellte Rolle als Motivator *Einsteins*. 1930 kam Siedentopf noch einmal auf dieses Problem zurück [Siedentopf 1930]. Aus elektrotechnischer Sicht ist auch Siedentopfs Entwicklung einer Quecksilberbogenlampe (1902) hervorzuheben. Henry Siedentopf starb am 8. Mai 1940 in Jena.

**Theodor Simom**, geb. am 1. Januar 1870 in Kirn (Rheinland-Pfalz), studierte in Heidelberg und Berlin Physik, wurde 1894 dort promoviert und 1896 in Erlangen als Assistent von Eilhard Wiedemann habilitiert. Eduard Riecke holte ihn als Assistent nach Göttingen. Simon fand, dass ein Lichtbogen (wegen seines partiell negativen Widerstandes im Schwingkreis) ungedämpfte elektrische Schwingungen anregen konnte; und er bemerkte, dass dieser Lichtbogen sehr empfindlich auf Schwankungen der ihn umgebenden Luft reagierte und deshalb als Mikrofon geeignet war. Nach kurzer Tätigkeit beim Physikalischen Verein in Frankfurt a. M. (1900/1901) kehrte er als a. o. Professor und Direktor der Abteilung für angewandte Elektrizitätslehre nach Göttingen zurück – diese hatte der später in Leipzig lehrende und 1903 zum Mitglied der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, der späteren Sächsischen Akademie der Wissenschaften, berufene Theodor Des Coudres aufgebaut. In diese Zeit fielen die von ihm betreuten und hier herausgestellten Promotionen von *Erwin Madelung* und *Heinrich Barkhausen*. Als bleibendes Prinzip erwies sich Simons Beobachtung der Superposition von Gleich- und Wechselströmen. Simon starb am 22. Dezember 1918 in Göttingen.

## Anmerkungen

---

<sup>1</sup> Wir verweisen hier auf das frühe Standardwerk [Schintlmeister 1942]. Der österreichische Physiker Josef Schintlmeister (1908-1971) kam nach seiner Tätigkeit als „Spezialist“ in der Sowjetunion nach Dresden und wurde Leiter der Abteilung Kernphysik am ZfK Rossendorf und Professor für Kernphysik an der TH / TU Dresden. Obwohl er in seiner österreichischen Heimat verstarb, fand er seine letzte Ruhestätte auf dem Friedhof Dresden-Loschwitz.

<sup>2</sup> Zusammenfassende Darstellungen finden sich bei [Kleen / Graffunder 1937], [Frommhold 1958 (1)] und [Dolezalek 1961-1963]. Über die Vor-, Früh- und Anwendungsgeschichte einer in Dresden entwickelten speziellen Elektrometerröhre [Frommhold 1958 (2)], die dem Konzept des „umgekehrten Röhrenvoltmeters“ folgte, und die sowohl Höhepunkt als auch Ende der Elektrometerröhrentechnik gleichermaßen markierte, berichtet [Dörfel 2015].

<sup>3</sup> Wir benennen hier [Geyger 1936] für die Frühphase dieser Technik u. [Klar / Ihle 1959] mit Bezug auf die hier angesprochenen kerntechnologischen Anwendungen.

<sup>4</sup> Besondere Bekanntheit erlangten neben v. a. [Bright / Kruper 1955], [Fleming 1957] u. [Bartou 1965].

<sup>5</sup> Das Prinzip der Gegenkopplung, zunächst angewandt auf telefonische Verstärker aber mit weitgehender Verallgemeinerungsmöglichkeit beschrieben, geht auf [Black 1934] zurück. Eine zusammenfassende Darstellung dieses Prinzips für Gleichspannungs-/Gleichstrom-Verstärker, allerdings beschränkt auf die statischen Probleme, geben [Eberhardt et. al. 1941].

<sup>6</sup> Die Schwächung der Strahlung ist, wenn wir von atomphysikalisch begründeten Besonderheiten absehen, durch die auf die Flächeneinheit bezogene Masse des Messgutes („Flächenmasse“) bestimmt. Die „Dicke“ kommt über die Dichte des Messgutes ins Spiel. Der oft gleichwertig verwendete Begriff „Flächengewicht“ ist im Sinne der geltenden Maß-Konventionen nicht korrekt. Wir werden hier mit diesen Begriffen weitgehend unkritisch und angepasst an die Lesart der historischen Zitate umgehen.

<sup>7</sup> Die hier gewählte Ausformulierung von Satz I ist der „Zusammenfassung“ (S. 111) der zitierten Arbeit *Barkhausens* entlehnt; die strengere, erweiterte Fassung findet sich auf den S. 4 u. 5.

<sup>8</sup> Der Titel von *Madelungs* Mitteilung („Messung elektrostatischer Potentiale mit der Elektronenröhre“) ist irreführend. Sein primärer Messverstärker ist der Schwingkondensator; die Elektronenröhre ist als zweite Verstärkerstufe nachgeschaltet. Das mag *Madelungs* Bekanntheitsgrad als Erfinder des Wandlers und Verstärkers „Schwingkondensator“ etwas im Wege gestanden haben, zumal seine Leistungen als Festkörperphysiker und Theoretiker diese Episode in seiner wissenschaftlichen Laufbahn ohnehin überstrahlen.

<sup>9</sup> Zu *Barkhausen* und seinem Wirken in Dresden siehe [Lunze et. al. 1981] und [Woschni 1988]. Zu *Madelung* sei nachgetragen, dass er in dem seiner Doktor-Arbeit [Madelung 1905] beigefügten Lebenslauf auf eine Tätigkeit in Dresden verweist: „In der Absicht, mich der Technik zu widmen, arbeitete ich während des Winters 1900/01 in einer Maschinenfabrik zu Dresden.“ Offensichtlich ist diese Tätigkeit seinen experimentellen Fähigkeiten sehr zugute gekommen.

<sup>10</sup> „Magische Augen“ waren Rundfunkröhren, die durch von Elektronenstrahlen ausgelöste Leuchteffekte die Höhe der anliegenden Signalspannungen abbildeten und so bei anspruchsvollen Rundfunkgeräten die optimale (manuelle!) Abstimmung auf die Mittenfrequenz der Sender unterstützten.

<sup>11</sup> Der Autor gibt eine Kurzbeschreibung seiner 1928 am MIT abgeschlossenen Graduierungsarbeit (Master's thesis). Als Ideengeber nennt er Prof. Max Knoble.

<sup>12</sup> Wir verwenden hier u. a. a. Stelle den Begriff „Schwingkondensator“ auch für mechanisch abweichend oder grundsätzlich anders modulierte Wandler-Kondensatoren.

---

<sup>13</sup> Wir beschränken uns hier auf die Betrachtung der durch energiereiche Betastrahlung und weiche Beta-Bremsstrahlung erschlossenen und mit Ionisationskammertechniken realisierten Messbereiche von etwa (50-50 000) g / m<sup>2</sup>. Die Ausweitung auf andere Strahlungsarten und -Energien ist naheliegend.

<sup>14</sup> Der (heute verhältnismäßig kleine!) Schritt zur Herleitung der *Nyquist/Johnsonschen* Rauschformel [Nyquist 1928], [Johnson 1928] aus *Einsteins* Theorie der Brownschen Bewegung [Einstein 1906] wird in [Dörfel 2012] beschrieben.

<sup>15</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass in *Einsteins* Überlegungen der Begriff des elektrischen Widerstandes explizit nicht vorkommt. Im Anhang 1 zu dieser Arbeit wird die Brücke geschlagen zu dem systemtheoretisch begründeten Ansatz, der die Quellen thermisch angeregter Rauschphänomene in linearen passiven Netzwerken in den ohmschen Widerständen sieht und nur dort.

<sup>16</sup> Eine Leistungsverstärkung ist in jedem Falle gegeben. Der Elektrode A´ kann ein (geringer) Strom entnommen werden, da beständig Ladungen nachgeliefert werden, ohne dass damit dem Eingangspotential Strom und damit Leistung entzogen wird.

<sup>17</sup> Die Zusammenarbeit *Einsteins* mit den Brüdern Habicht beschreibt die Dissertation [Graff 2004, S. 27-48].

<sup>18</sup> Eine von den Autoren Habicht angekündigte Patentanmeldung konnte nicht nachgewiesen werden. Offensichtlich steht aber das von Paul Habicht erworbene schweizerische Schutzrecht CH 49 969 zur Lösung eines Problems bei periodisch beanspruchten elektrischen Kontakten, geltend ab 19. Nov. 1909, in direktem Zusammenhang mit der Realisierung des „Maschinchens“.

<sup>19</sup> Eine frühe zusammenfassende Darstellung vorausgegangener Erfindungen und Entwicklungen zur (unkontrollierten u. ggf. exponentiellen) Ladungsvermehrung und damit verbundener Probleme geben [Schmidt / Cermak 1918].

<sup>20</sup> Diese Notiz findet sich völlig unauffällig und nur durch Fußnote den Erfindern zuzuordnen in einem namentlich nicht gezeichneten Bericht über „Die Tätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt im Jahre 1928“ [Meißner / Adelsberger 1929]. *W. Meißner* ist der Mitentdecker des für das Verstehen der elektrischen Supraleitung wichtigen Meißner-Ochsenfeld-Effektes.

<sup>21</sup> Herangezogen wurde, neben Literaturrecherchen, der Meißner-Nachlass, der unter NL 45 im Deutschen Museum, München, verwahrt wird.

<sup>22</sup> Kurze Beschreibungen dieser und der international wichtigsten etwa zeitgleich verfügbaren konkurrierenden Geräte geben [Hart / Karstens 1958] und [Hart 1962]. Eine aus physikalisch/technischer Sicht systematische Einordnung finden wir bei [Hartmann 1969]. Eine verknappte aber durchaus aussagefähige Darstellung gibt [Heimann 1967].

<sup>23</sup> Dieser Wert entsprach einer Aktivität der eingesetzten Beta-Strahler von (5...10) Milli-Curie (mCi). (Die heute gültige Einheit heißt Becquerel (Bq); es gilt die Umrechnung  $1 Ci = 37 \times 10^9 Bq$ .)

<sup>24</sup> Die hier angesprochene Messempfindlichkeit und die damit verbundenen quantitativen Konsequenzen sind nur ein Element einer ziemlich komplexen, hier unterdrückten Messfehleranalyse. Hierzu sei, immer im technik-historischen Kontext, verwiesen auf [Dietsch 1960].

<sup>25</sup> Viele der hier und im folgenden Kapitel benannten Sachverhalte fußen, soweit nicht anders angemerkt, auf Zeitzeugenhinweisen, auf eigenem Erleben, auf Materialien des Carl-Zeiss-Archivs Jena, Stichwort FMG – hier im Wesentlichen mit den Signaturen BACZ 18931, 21751, 34032, 24268, 24395, 24411 – und des Archivs der Technischen Sammlungen Dresden, hier Nachlass Werner Hartmann und Hängeregistratur Dresden, Vakutronik, Gerätebeschreibungen.

---

<sup>26</sup> Von den vielen mehr oder weniger genauen Darstellungen dieser Situation seien hier [Albrecht et. al. 1992] und [Augustine 2007] hervorgehoben.

<sup>27</sup> Zum Schicksal *Werner Hartmanns* siehe z. B. [Dörfel 2003], [Augustine 2007] und [Becker 2012]; Lebensweg und Persönlichkeit von *Ardennes* beschreibt [Barkleit 2006].

<sup>28</sup> *Hartmann* und *von Ardenne* hatten noch in der Sowjetunion vereinbart, gemeinsam einen privat-wirtschaftlich arbeitenden Betrieb aufzubauen. Dieses Konzept ließ sich aus heute offensichtlichen Gründen nicht umsetzen. Hierzu siehe [Barkleit 2006, S. 168].

<sup>29</sup> Der dem Laborjargon entlehnte und lässig wirkende Begriff „Brettschaltung“ stand letztlich für die Gewährleistung voller Funktionsfähigkeit. Das entsprach nach der in der DDR über 11 Stufen definierten Nomenklatur der bis zur Serienreife zu leistenden Entwicklungs-, Konstruktions- und Fertigungsschritte („K-Stufen“) der Stufe K 2. (Im hier betrachteten Umfeld wurde angesichts hoher Entwicklungsaufwendungen und vergleichsweise geringer Stückzahlen verkürzt bis zum Abschluss K 5a gezählt.)

<sup>30</sup> Ein heute kaum noch verständlicher Gesichtspunkt war der problematische technische Aufwand zur Erzeugung einer stabilen netzfremden Trägerfrequenz. Jede einzelne zusätzliche Röhre galt als technischer und wirtschaftlicher Risikofaktor. Außerdem erleichterte eine netzbasierte Trägerfrequenz die Realisierung elektromechanischer Kompensationsverfahren mit Hilfe von richtungsempfindlichen Zwei-Phasen-Motoren.

<sup>31</sup> In Bild 15 wird der Motorkompensator mit Hilfe des „Relag“ (Relaislaufgetriebe) realisiert: Zwei Magnetkupplungen „Maku“ koppeln ein Getriebe wechselweise so an einen in nur einer Drehrichtung laufenden Motor an, dass das vom „Diskriminator“ gelieferte vorzeichenrichtige Steuersignal einen vorzeichenrichtigen Drehrichtungsabgang bewirkt. „Relag“ und „Maku“ waren von CZ Jena schon vor dem Einstieg in die Dickenmesstechnik entwickelte und längere Zeit in verschiedenen Ausprägungen gefertigte und vertriebene elektromechanische Bauelemente.

<sup>32</sup> „Neues Deutschland“, Zentralorgan der SED, v. 10.07.1958.

<sup>33</sup> Wir weisen darauf hin, dass die Erscheinungsdaten der zitierten Arbeiten nur ungefähre Hinweise auf den zeitlichen Stand der Arbeiten in den konkurrierenden Unternehmen vermitteln.

<sup>34</sup> Vakutronik belieferte eine schwedische Firma mit Geräten zur Bestimmung des Durchmessers von Glasröhren und erprobte diese Geräte an deren Rohrzug im Glaswerk Altenfeld / Thüringer Wald. CZ Jena arbeitete mit der Schwesterfirma Schott Jena zusammen.

<sup>35</sup> Siehe Anmerkung 25. Wir finden Hinweise [Riegler 1960], dass sich CZ Jena schon seit 1957 mit der Schwingkondensatorelektronik auseinandersetzte, und zwar gekoppelt an den Nachweis kleinster Fotozellenströme (BACZ 21751). Der Zugang war aber bezüglich der Wirkungsweise höchst problematisch – siehe die im Kapitel 2 *Der Schwingkondensator ...* gemachten Bemerkungen zu Fehldeutungen der Wirkungsweise.

<sup>36</sup> „Fast“: CZ Jena nutzte zumindest bei Spezialausführungen die Differential-Ionisationskammer VA-K-311 von Vakutronik. Vakutronik hätte gern auf die von Zeiss entwickelte und produzierte „Querbewegungseinrichtung“ zurückgegriffen. Diese gewährleistete die präzise (d. h. die vertikal und horizontal zueinander stabile) Bewegung von Mess- und Strahlkopf des Dickenmessgerätes über sehr breite Messobjekte. Diese immer wieder angemahnte und auch versprochene Zusammenarbeit kam aber nicht zustande. Erst mehr als zehn Jahre nach dem Einstieg von Vakutronik in die Dickenmesstechnik verfügte Vakutronik / Meßelektronik Dresden über eine eigene Querbewegungseinrichtung.

<sup>37</sup> Zu Einzelheiten siehe z. B. [Sobeslavsky / Lehmann 1996] und [Mühlhausen 1999].

---

<sup>38</sup> Kombinate waren, beginnend mit der Verstaatlichungswelle zu Beginn der 1970er Jahre, um einen leistungsstarken Leitbetrieb geschaffene konzernähnliche Zusammenschlüsse. Sie sollten die schon früh entstandene (1948) und vergleichsweise lockere Zusammenfassung ähnlich ausgerichteter Betriebe in den VVB (Vereinigung volkseigener Betriebe) im Sinne höherer Wirtschaftskraft weiterentwickeln bzw. ablösen.

<sup>39</sup> Hierzu siehe z. B. [Barkleit 2000]. Eine umfassende Darstellung gibt [Kirchner 2000].

<sup>40</sup> Als Quellen benennen wir [Schubert 1961], [Schubert / Reinhardt 1961, 1965], [Schubert 1964], [Schubert 1965] sowie TS Dresden wie Anmerkung 25.

<sup>41</sup> Wir merken an, dass die gegenübergestellten Angaben auf Prospekt-Aussagen beruhen und insofern keine sichere vergleichbare Basis mit Blick auf Durchschnittswerte, garantierte Grenzwerte bzw. Mindestwerte besitzen. Es sei auch darauf hingewiesen, dass zu der hier in Rede stehenden Zeit die betrieblichen Gütekontrollabteilungen der volkseigenen Betriebe der DDR fachlich dem staatlichen Messwesen („ASMW“ – Amt für staatliches Messwesen und Warenkontrolle –) unterstellt und insofern dem Einfluss der Produzenten und Anbieter weitgehend entzogen waren. Das konnte, durchaus DDR-spezifisch und oft auch subjektiv bestimmt, zur auferlegten Pflicht zu extrem ausgeweiteten Fehlerbetrachtungen und -Nachweisen führen, die sich im internationalen Vergleich üblichen Gepflogenheiten entzogen, und die sich sehr wohl nachteilig bei der Charakterisierung der DDR-Produkte auswirken konnten. Insofern sei eine gewisse Großzügigkeit beim Vergleich der propagierten Eigenschaften angemahnt.

<sup>42</sup> Nach [Eckert 1977].

<sup>43</sup> Die Schwingkondensatoren wurden mit einer laufenden Produktionsnummer versehen. Ein aus dem Jahre 1975 erhaltenes und dem Entwickler verehrtes Exemplar trägt die Nummer 10.000.

<sup>44</sup> Nach [Schurz 1966]. Diese Angaben wurden herstellerunabhängig vom Institut für Anwendung radioaktiver Isotope der TU Dresden (Prof. L. Herforth) erarbeitet.

<sup>45</sup> Das Sächsische Hauptstaatsarchiv Dresden verwahrt im größeren Umfang Dokumente aus dem VEB Vakutronik u. Nachfolgebetrieb. Die ausgewiesenen Bestände betreffen weitgehend interne Vorgänge (insbesondere Patentangelegenheiten). Für unser Thema relevante strategische Dokumente (z. B. zum Interessenkonflikt Vakutronik / CZ Jena sowie umfassende betriebswirtschaftliche Angaben) sind nicht archiviert bzw. noch nicht erschlossen.

<sup>46</sup> Hier liegt ein Irrtum vor. Der VEB Vakutronik wurde 1955 gegründet (siehe Kapitel 7).

---

## Zitierte Quellen, chronologisch geordnet

Madelung, E.: Über Magnetisierung durch schnellverlaufende Ströme und die Wirkungsweise des Rutherford-Marconischen Magnetdetektors. *Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1905*.

Einstein, A.: Über die von der molekular-kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik 17 (1905)*, S. 549-560.

Einstein, A.: Zur Theorie der Brownschen Bewegung. *Annalen der Physik 19 (1906)*, S.371-381.

Einstein, A.: Über die Gültigkeitsgrenze des Satzes vom thermodynamischen Gleichgewicht und über die Möglichkeit einer neuen Bestimmung der Elementarquanta. *Annalen der Physik 22 (1907)*, S. 569-572.

Barkhausen, H.: Das Problem der Schwingungserzeugung mit besonderer Berücksichtigung schneller elektrischer Schwingungen. *Verlag von S. Hirzel, Leipzig 1907*.

Einstein, A.: Eine neue elektrostatische Methode zur Messung kleiner Elektrizitätsmengen. *Physikalische Zeitschrift 9 (1908)*, No. 7, S. 216-217.

Habicht C. und P.: Elektrostatischer Potentialmultiplikator nach A. Einstein. *Physikalische Zeitschrift 11 (1910)*, S. 532-535.

Schmidt, Heinrich W.: Elektrisiermaschinen und Apparate. Und P. Cermak: Elektrostatische Meßapparate und Messung elektrostatischer Größen. Beide in Leo Graetz: *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Bd. 1*. Verlag von J. A. Barth, Leipzig **1918**, S. 21-93, S. 94-156.

Madelung, E.: Messung elektrostatischer Potentiale mit der Elektronenröhre. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 6 (1925) 1*, S. 14-15.

Johnson, J. B.: Thermal Agitation of Electricity in Conductors. *Physical Review 32 (1928)*, S. 95-109.

Nyquist, H.: Thermal Agitation of Electric Charges in Conductors. *Physical Review 32 (1928)*, S. 110-113.

Meißner, W. u. U. Adelsberger: Suszeptibilität von Gasen; Gleichspannungsverstärkung. In: N. N.: Die Tätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt im Jahre 1928. *Zeitschrift für Instrumentenkunde 49 (1929) 4*, S. 157-177, dort S. 166-167.

Siedentopf, H.: Molekularbewegung im Lichtbildultramikroskop. *Kolloid-Zeitschrift 52 (1930) 3*, 257-262.

Zisman, W. A.: A new method of measuring contact potential differences in metals. *Review of Scientific Instruments 3 (1932)*, p. 367-370.

Gunn, Ross: Principles of a new portable electrometer. *Physical Review 40 (1932)*, p. 307-312.

---

Black, H. S.: Stabilized Feedback Amplifiers. *The Bell System Technical Journal* XIII (1934) 1, p. 1-18, 161.

Geyger, Wilhelm: Ein einfacher Kompensations-Schnellschreiber für Gleichstrommessungen. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken* 15 (1936) 3, S. 109-115.

Kleen, Werner u. Walter Graffunder: Verstärkerröhren – Elektrometerröhren. *Archiv für Technisches Messen* ATM J 8334-2 (Juni 1937).

Eberhardt, R.; G. Nüßlein u. H. Rupp: Ein neuartiges Prinzip stabiler Gleichstromverstärkung. *Archiv für Elektrotechnik* XXXV (1941) 8, S. 477-489.

Schintlmeister, Josef: Die Elektronenröhre als physikalisches Meßgerät. *Springer-Verlag*, Wien 1942.

Dorsman, C.: Ein pH-Messgerät mit sehr grossem Eingangswiderstand. *Philips' Technische Rundschau* 7 (1942), S. 24-32.

Palevsky, Harry and Robert K. Swank.: US-Patent 2,483,981; Dynamic Condensor. Application Sept. 20, 1946, patented Oct. 4, 1949.

Palevsky, H., R. K. Swank and R. Grenchik: Design of Dynamic Condenser Electrometers. *Review of Scientific Instruments* 18 (1947) 5, p. 298-314.

Reese, Harry: Design of Vibrating Capacitor Electrometer. *Nucleonics* (March 1950), p. 40-45.

Trost, Adolf: Messung von Dicken unter etwa 1mm mit Betastrahlen. *Stahl und Eisen* 72 (1952) 16, S. 941-943.

Bosch, J.: Radioaktive Isotope in der industriellen Meßtechnik. *Archiv für Technisches Messen* ATM 235 (1955), S. 57-59.

Bright, R. L. and A. P. Kruper: Transistor Choppers for Stable DC-Amplifiers. *Electronics*, April 1955.

Fleming, L.: Silicon diode chopper stabilizes DC-Amplifier. *Electronics* 30 (1957) 1, p. 178-179.

Böhm, H.: Derzeitige technische Möglichkeiten zur Strahlungsüberwachung in Gasen mit Ionisationskammern. *Atompraxis* 3 (1957), S. 369-372.

Frommhold, E. A.: Der Gitterstrom in Elektrometerröhren. *Nachrichtentechnik* 8 (1958 (1)) 6, S. 265-268.

Frommhold, E. A.: Über die Entwicklung eines neuen Elektrometerröhrentyps. *Nachrichtentechnik* 8 (1958 (2)) 10, S. 461-466.

Hart, H. u. E. Karstens: Radioaktive Isotope in der Dickenmessung. *VEB Verlag Technik*, Berlin 1958.

Klar, E. u. K. H. Ihle: Ein Radioisotopen-Dickenmeßgerät mit vereinfachtem elektrischem Aufbau. *Nachrichtentechnik* 9 (1959) 12, S. 543-546.

---

Ardenne, M. von, E. Klar: Über einen Schwingkondensator guter Konstanz. *Nachrichtentechnik* 9 (1959) 1, S. 26-28.

Klar, E., H. Westmeyer (Forschungsinstitut M. v. Ardenne), H. Peupelmann, C. Schacke, W. Schabl (VEB Carl Zeiss Jena): Anwendung der Kompensationsmethode zur berührungslosen Dickenmessung. *Kernenergie* 2 (1959) 6, S. 520-524.

Monser, H.-J.: Schwingkondensator mit nichtpolarisiertem, elektromagnetischem Antriebssystem. *radio und fernsehen*, 9 (1960) 18, S. 574-576.

Schnabl, Willy u. Franz Söldner: Registrierendes Flächengewichtsmessgerät. *Jenaer Rundschau* 5 (1960), Messe-Sonderheft, S. 44-49.

Riegler, H.: Der schwingende Kondensator, Theorie und Anwendung. *Nachrichtentechnik* 10 (1960) 11, S. 501-505.

Dietzsch, W.: Meßempfindlichkeit und Meßgenauigkeit bei der industriellen Dickenmessung mit  $\beta$ -Strahlen. *Isotopentechnik* 1 (1960/61) 3, S. 66-69; 4, S. 98-106.

Schubert, G.: Schwingkondensatorelektrometer VA-J-50 zur Messung kleiner Gleichströme. *Kernenergie* 4 (1961) 10/11, S. 821-825.

Dolezalek, H.: Elektrometerröhren. Teil I, *Archiv für Technisches Messen* ATM J 8334-3 (Dezember 1961); Teil II, ATM J 8334-4 (Januar 1962); Elektrometerröhren – Schrifttum bis 1961, ATM J 8334-5 (März 1963).

Schubert, G. u. K. Reinhardt: Patent DE 1 189 202 „Schwingkondensator“. Angemeldet vom VEB Vakutronik am 10.03.1961, erteilt am 18.11.1965.

Dörfel, G.: Das Flächengewichtsmessgerät VA-T-70A ( $\beta$ -Dickenmesser). *Isotopentechnik* 2 (1962 (1)) 2, S. 57-61.

Günther, Helmut u. Peter Horn: Erfahrungen mit dem Flächengewichtsmessgerät bei der Papierherstellung. *Jenaer Rundschau* 7 (1962) 6, S. 221-223.

Hart, Hans: Radioaktive Isotope in der Betriebsmesstechnik. *VEB Verlag Technik*, Berlin 1962.

Wilke, K. H.: Einfache Gleichspannungsverstärker mit Halbleiter-Bauelementen. *Elektronik* (1962) 9, S. 267-271; 10, S. 303-304.

Dörfel, G.: Hochohmiger Gleichspannungsverstärker mit Halbleiterbauelementen. *Nachrichtentechnik* 12 (1962 (2)) 12, S. 465-466.

Micic, L. u. A. Gilly: Gleichspannungsverstärker mit Kapazitätsdioden für kleine Eingangsleistungen. *Elektronik* (1963) 9, 263-265.

van Nie, A. G. u. J. J. Zaalberg van Zelst: Ein Schwingkondensator mit Antrieb durch ein hochfrequentes elektrisches Feld. *Philipp's Technische Rundschau* 25 (1963/64) 2, S. 53-62.

---

Schubert, G.: Eigenschaften und Anwendungen des Schwingkondensators VA-E-16. *Nachrichtentechnik* 14 (1964) 4, S. 148-152.

Dörfel, G.: Dickenmeßgeräte für die Automatisierung von Kaltbandwalzwerken. *Isotopenpraxis* 1 (1965) 1, S. 16-21.

Bartou, K.: The Field-Effect Transistor Used as a Low-Level Chopper. *Electronic Engineering* 37 (Febr. 1965) Nr. 444, p. 80-83.

T.S.: Technische Sammlungen Dresden, Archiv, Hängeregistratur Dresden, „Vakutronik“, Gerätebeschreibung, Ausgabe 1965.

N.N.: Elektronisches Vielfach-Meßgerät. *Archiv für Technisches Messen* ATM V 8253-15 (1965) 5, R 55.

Schubert, Gerd: Das Röntgen-Gamma-Dosimeter VA-J-15 A. *medizintechnik* 5 (1965) 4, S. 135-139.

Schurz, E.: Isotopenmeßgeräte der DDR für die Betriebsmeßtechnik I. *Isotopenpraxis* 2 (1966) 4, S. 165-178.

Heimann, R.: *Radionuklide in der Automatisierungstechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin 1967. (Reihe Automatisierungstechnik Bd. 58).

N.N.: Schwingkondensator XL7900. Firmenprospekt Philips Eindhoven 1968.

Hartmann, W. (Hrsg.): Meßverfahren unter Anwendung ionisierender Strahlen. Akad. Verl. Ges., Leipzig 1969. Als Bd. 5 in: J. Stanek (Hrsg.): *Handbuch der Meßtechnik in der Betriebskontrolle*.

Eckert, K.: Messebericht. *radio und fernsehen* 26 (1977) 4, S. 111.

Lunze, K. (Hrsg.): Heinrich Barkhausen. Festschrift zur Barkhausen-Ehrung der Akademie der Wissenschaften der DDR und der Technischen Universität Dresden, Dezember 1981. *Wiss. Z. TU Dresden*. Separatdruck: Reihe 4, Elektrotechnik-Elektronik Nr. 6/7.

Woschni, E.-G.: Heinrich Barkhausen und die Entwicklung der Elektronik. *Sitzungsberichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig*, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Band 120, Heft 7. Akademie-Verlag, Berlin 1988.

Albrecht, U.; Andreas Heinemann-Grüder u. Arend Wellmann: *Die Spezialisten*. Dietz Verlag, Berlin 1992.

Sobeslavsky, Erich u. Nikolaus Joachim Lehmann: Zur Geschichte der Rechentechnik und Datenverarbeitung in der DDR 1946-1968. *Hannah-Arendt-Institut*, Berichte und Studien Nr. 8, Dresden 1996.

Mühlhausen, E.: OPREMA und ZRA 1 – Frühe Entwicklungen der digitalen Rechentechnik im Zeisswerk Jena. *Jenaer Jahrbuch zur Technik- und Industriegeschichte* 1 (1999) S. 109-127.

---

Barkleit, Gerhard: Mikroelektronik in der DDR. *Hannah-Arendt-Institut*, Berichte und Studien Nr. 29, Dresden **2000**.

Kirchner, O. B.: Wafer-Stepper und Megabit-Chip – Die Rolle des Kombinats Carl-Zeiss-Jena in der Mikroelektronik der DDR. *Dissertation*, Fakultät Geschichts-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften, Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik, Stuttgart **2000**.

Dörfel, Günter: Werner Hartmann – Industriephysiker, Hochschullehrer, Manager, Opfer. In: Dieter Hoffmann (Hrsg.): *Physik im Nachkriegsdeutschland*. Verlag Harry Deutsch, Frankfurt a. M. **2003**.

Graff, Karl Wolfgang: Albert Einstein als Erfinder in den Jahren 1907 bis 1933. *Dissertation*, Historisches Institut der Universität Stuttgart **2004**.

Barkleit, Gerhard: Manfred von Ardenne – Selbstverwirklichung im Jahrhundert der Diktaturen. *Duncker und Humblot*, Berlin **2006**.

Augustine, Dolores L.: Red Prometheus – Engineering and Dictatorship in East Germany 1945-1990. *The MIT Press*, Cambridge, Massachusetts a. London, England **2007**.

Dörfel, Günter: The early history of thermal noise – The long way to paradigm change. *Annalen der Physik* 524 (**2012**) 8, p. A117-A121.

Becker, Hans W.: 100. Geburtstag von Werner Hartmann (1912-1988), Begründer der Mikroelektronik im Osten Deutschlands. In: *120 Jahre VDE-Bezirksverein Dresden*; VDE Bezirksverein Dresden e. V. **2012**.

Dörfel, Günter: DC 760/762 – Anders als alle anderen; die denkwürdige Geschichte einer bemerkenswerten Röhre und das Ende des „Umgekehrten Röhrenvoltmeters“. *Funkgeschichte* 38 (**2015**) 221, S. 106-114.

---

## Autor



Günter **Dörfel** (\*1935), Dresden, arbeitete nach einer Elektrikerlehre im Rundfunkröhrenwerk Neuhaus am Rennweg und dem Studium an der Ingenieurschule Mittweida von 1957 bis 1970 als Entwicklungsingenieur für kernphysikalische Betriebsmessgeräte in Dresden. Daneben wurde er an der TU Dresden 1966 mit einer Arbeit zu regelungstechnischen Fragestellungen diplomiert und 1970 mit einer Arbeit zu einem prozessmesstechnischen Thema promoviert.

Danach war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter, später als Leiter einer Abteilung für technische Elektronik, am Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung der Akademie der Wissenschaften (AdW) der DDR, Dresden, tätig. Dort promovierte er 1986 mit einem Beitrag zur Signaltheorie zum Dr. sc. techn. (1991 als Habilitation anerkannt); 1987 wurde er zum Professor berufen.

Am Nachfolgeinstitut, dem heutigen Leibniz Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung e. V., wurde ihm 1992 die Leitung des Bereichs Forschungstechnik übertragen.

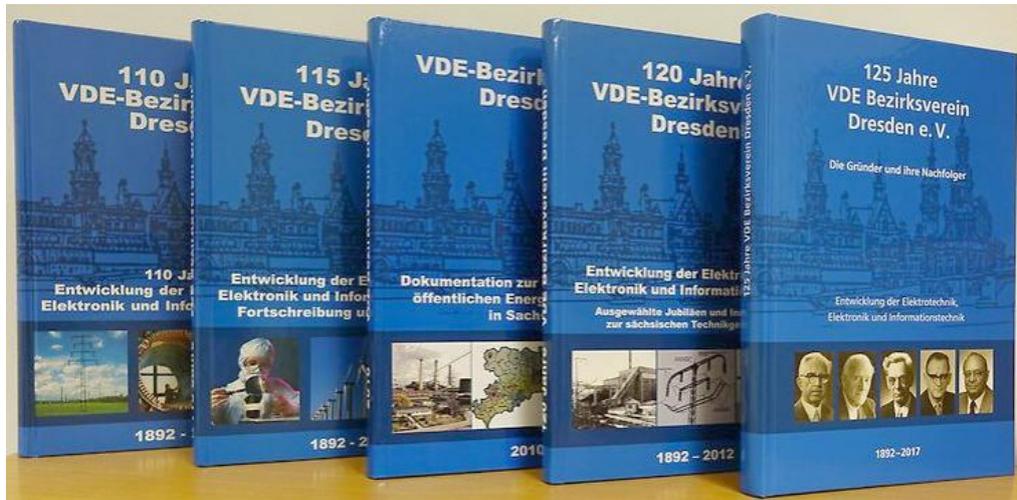
Nach dem altersbedingten Eintritt in den Ruhestand im Jahre 2000 war Günter Dörfel für zwei Wahlperioden Vorstandsmitglied im Fachverband Geschichte der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 2014 ehrte ihn der Museumsverband Thüringen für sein ehrenamtliches Engagement für das Museum Geißlerhaus in Neuhaus am Rennweg und das Historische Glasapparatmuseum Cursdorf mit der Bernhardt-von-Lindenau-Medaille.

Daneben arbeitet Günter Dörfel im VDE Bezirksverein Dresden e. V., Arbeitskreis Geschichte der Elektrotechnik. In den letzten beiden Jahrzehnten widmete er sich insbesondere wissenschafts-historischen Themen – oft mit Bezug auf seine thüringische Heimat.

---

## Bisher veröffentlichte „Blaue Bücher“

des AK 20 „Geschichte der Elektrotechnik“ beim VDE Dresden:



Autorenkollektiv: **110 Jahre VDE-Bezirksverein Dresden** – 110 Jahre Entwicklung der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik 1892 – 2002.

Herausgeber: VDE Bezirksverein Dresden e.V., Dresden 2002, ISBN: 3-933442-53-2

Autorenkollektiv: **115 Jahre VDE-Bezirksverein Dresden** – Entwicklung der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik – *Fortschreibung und Ergänzung* 1892 – 2007.

Herausgeber: VDE Bezirksverein Dresden e.V., Dresden 2007

Nerger, Dieter; Edelmann Helge; Herbrich, Günter: **VDE-Bezirksverein Dresden** – Dokumentation zur Geschichte der öffentlichen Energieversorgung in Sachsen.

Herausgeber: VDE Bezirksverein Dresden e.V., Dresden 2010

Eine weitere Betrachtung der sächsischen Technikgeschichte anschließend an die Jubiläumsbände 110 Jahre und 115 Jahre VDE Bezirksverein Dresden:

Autorenkollektiv: **120 Jahre VDE-Bezirksverein Dresden** – Entwicklung der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik – *Ausgewählte Jubiläen und Innovationen zur sächsischen Technikgeschichte* 1892 – 2012.

Herausgeber: VDE Bezirksverein Dresden e.V., Dresden 2012, ISBN: 978-3-00-039920-6

Bärwald, Werner; Bauer, Hartmut; Edelmann, Helge; Herbrich, Günter; Nerger, Dieter; Siegmund, Dietmar: **125 Jahre VDE-Bezirksverein Dresden – Die Gründer und ihre Nachfolger**. Entwicklung der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik 1892 - 2017

Herausgeber: VDE Bezirksverein Dresden e.V., Dresden 2017, ISBN: 978-3-00-056625-7