

Einige Eigenschaften koaxialer
Energiespeicher

G. Müller

IPP 4/69

Januar 1970

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MUNCHEN

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Einige Eigenschaften koaxialer Energiespeicher

G. Müller

IPP 4/69

Januar 1970

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

January 1970

Abstract

Generators for producing steep pulse voltages with defined pulse length often use a coaxial line for energy storage.

The most important properties of such storage components (characteristic impedance, transit time, maximum field strength, and energy) are given as functions of the geometric dimensions and relative dielectric constant.

A diagram showing the dependence of these properties on the height of the pulse voltage allows the operating parameters to be determined.

1. Einleitung

Generatoren zur Erzeugung von Rechteckimpulsspannungen mit steilen Flanken und definierter Impulsdauer besitzen als Energiespeicherglied häufig ein Leitungsstück. [1] [2]

Aus einer Reihe von Gründen empfiehlt es sich, diese Generatoren aus koaxialen Anordnungen zusammenzusetzen (Speicher, Schalter, eventuell Leitung, Verbraucher). Abb. 1 zeigt eine koaxiale Anordnung, wie sie etwa als Speicherteil - in Form eines Kabelstücks oder speziell aufgebaut - Verwendung finden kann. Das Prinzipschaltbild eines Pulsgenerators in der einfachsten Form ist in Abb. 2 dargestellt.

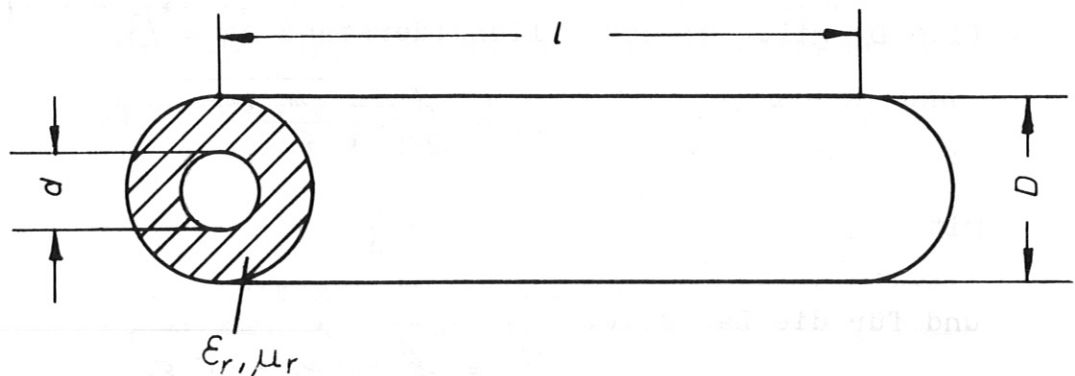


Abb. 1

Durch Schließen des Schalters S entsteht an der Belastungsimpedanz eine vom Verhältnis R/Z_0 abhängige Rechteckpuls-^{*)}spannung U_1 der Dauer $2\tau_0$, der für den Fall $R = Z_0$ weitere Spannungspulse, Dauer $2\tau_0$, folgen (Reflektionen). Bei verlustfreiem Generator, idealem Schalter und Vernachlässigung von Streu- und Anschlußimpedanzen gilt für die Höhe des ersten Pulses $U_1 = U_L \cdot R/(Z_0 + R)$.

$$(1.1)$$

^{*)} Die Laplace-Transformierte der Spannung ist z.B. in 3, Seite 116, gegeben.

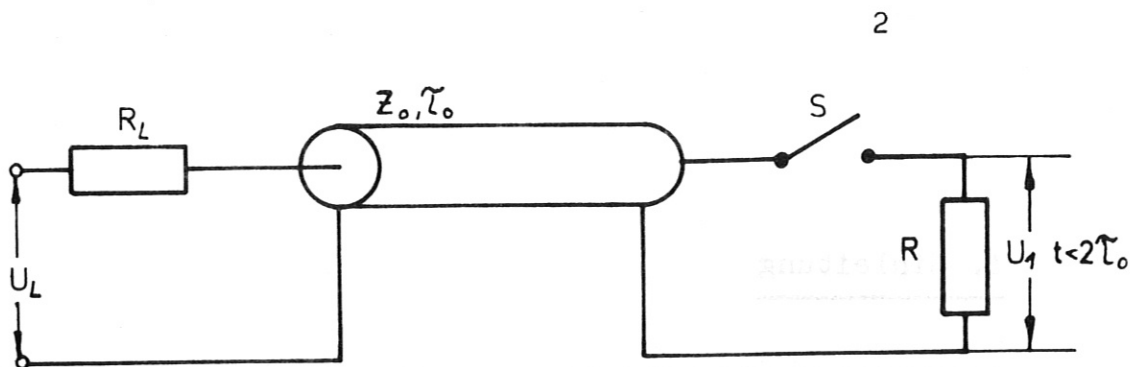


Abb. 2

U_L Ladespannung, R_L Ladewiderstand, Z_0 Wellenwiderstand, τ_0 einfache Laufzeit, S Schalter (Funkenstrecke etc.), R Lastwiderstand, U_1 Spannung an der Last, Pulsspannung.

2. Wellenwiderstand, Laufzeit, Feldstärke und Energie einer koaxialen Anordnung

Mit der Voraussetzung einer axial gestreckten Anordnung ($l \gg D$) gilt für den Wellenwiderstand nach [3]

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \cdot \ln \alpha \quad (2.1)$$

mit $\alpha = D/d$ (2.2)

und für die Laufzeit: $\tau_0 = l \sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}$ (2.3)

Zur Berechnung der in der Anordnung zu speichernden elektrischen Energie

$$W_L = \frac{1}{2} \int \epsilon_0 \epsilon_r E_{(r)}^2 dV = \pi \epsilon_0 \epsilon_r \cdot l \int_{d/2}^{D/2} E_{(r)}^2 r dr$$

muß die Feldstärke bekannt sein.

Nach [4] gilt $E_{(r)} = \frac{U_L}{r \ln \alpha}$, und ihre für die Auswahl des Dielektrikums maßgebliche Maximalgröße am inneren Umfang ist

$$E_{(r=d)} = E_{\text{max}} = \frac{2 U_L}{d \ln \alpha} = \frac{2 \alpha U_L}{D \ln \alpha} \quad (2.4)$$

und demnach
$$E(r) = E_m \frac{D}{2\alpha r} \quad (2.5)$$

Die Durchführung der Integration ergibt dann:

$$W_L = \epsilon_0 \epsilon_r E_m^2 \frac{\ln \alpha}{\alpha^2} \cdot \frac{\pi D^2 l}{4} \quad (2.6)$$

eine Energiedichte $w = \epsilon_0 \epsilon_r E_m^2 \frac{\ln \alpha}{\alpha^2}$ und das Bruttovolumen des Speichers.

Aus (2.4) läßt sich schließlich noch die Ladespannung angeben:

$$U_L = E_m \cdot \frac{D}{2} \frac{\ln \alpha}{\alpha} \quad (2.7)$$

Die Beziehungen (2.1), (2.3), (2.6) und (2.7) geben die für Planung und Betrieb erforderlichen Größen als Funktion der Materialkonstanten des Dielektrikums ϵ_r , μ_r und E_m und der geometrischen Größen l , D und α an.

3. Abhängigkeit der Leitungsgrößen vom D/d

Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit von $\alpha = D/d$. Auf der Ordinate sind entsprechend reduzierte Größen aufgetragen; also der Wellenwiderstand

$$Z_0 / 60 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \ln \alpha \quad \text{mit} \quad 60 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}},$$

die auf ihr Maximum bei $\alpha = \sqrt{2,7 \dots}$ normierte Bruttoenergiedichte

$$5,44 \frac{w}{\epsilon_0 \epsilon_r E_m^2} = \ln \alpha / \alpha^2$$

und die auf ihr Maximum bei $\alpha = 2,7$ normierte Spannung

$$5,44 \frac{U_L}{E_m \cdot D} = \ln \alpha / \alpha.$$

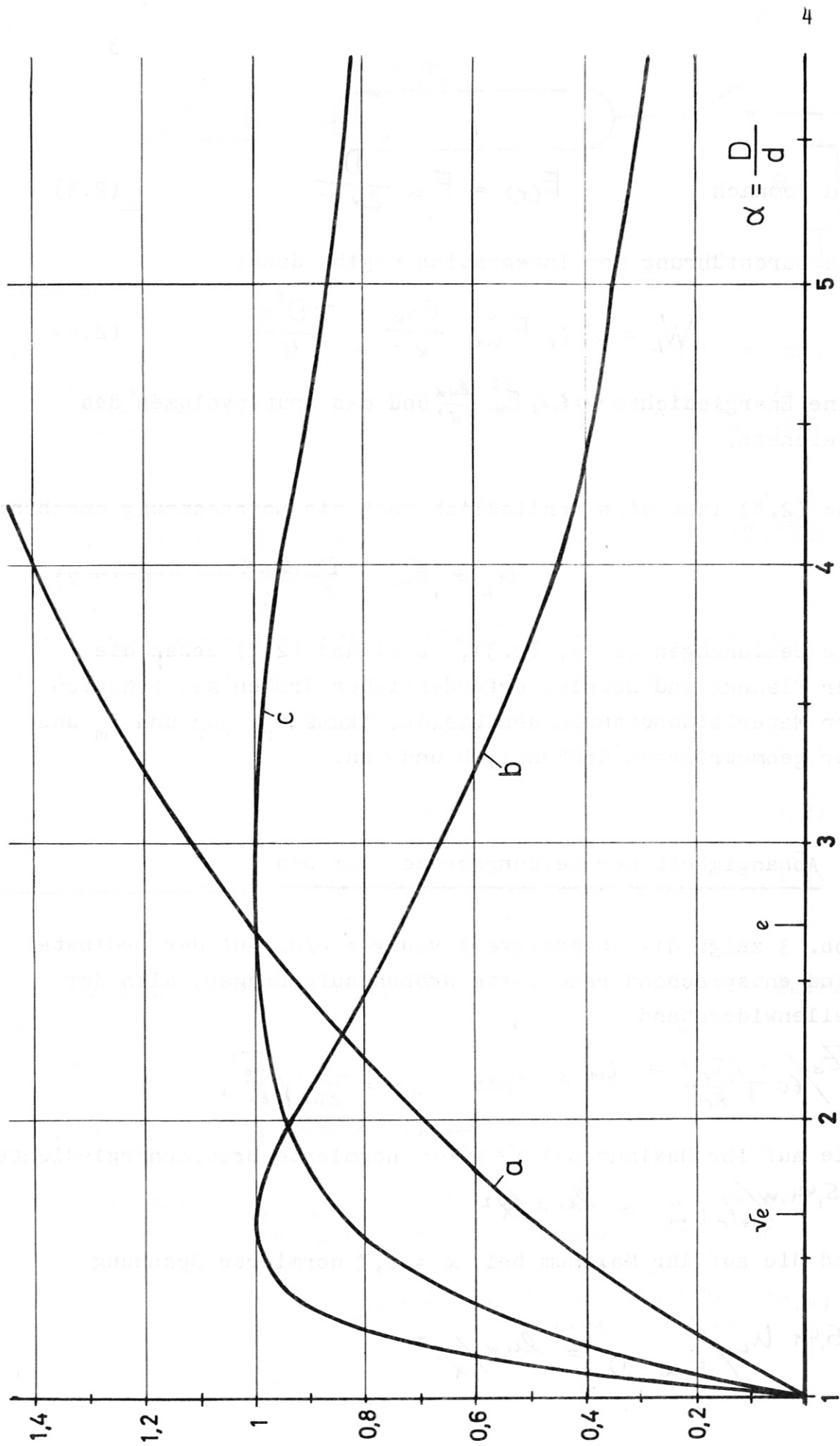


Abb. 3 Wellenwiderstand $Z_0/60 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r}}$ (a), Bruttoenergiedichte $5.44 W/\epsilon_r E_m^2$ (b) und Ladespannung $5.44 U_e/\epsilon_r E_m \cdot D/c$ (c) als Funktion des Durchmesserverhältnisses $\alpha = D/d$

Für $\alpha = \frac{D}{d} < 2,7 = e$ ist die Anordnung nicht glimmfähig [4]. Es ist deshalb vorteilhaft, die Abmessungen in diesem Bereich zu wählen. Abb. 3 zeigt, daß für den Bereich $1,8 \leq \alpha \leq 2,1$ 90 % und für $1,6 \leq \alpha \leq 2,45$ noch 80 % der Maximalwerte von Energie und Spannung erreicht werden.

4. Abhängigkeit der Leitungsgrößen von ϵ_r und E_m

Die Abhängigkeit Z_0 , $\tau_{0/e}$, $w = \frac{W_L}{\sqrt{D^2/4} \cdot e}$ und U_L/D von ϵ_r für $\mu_r = 1$, $\alpha = \sqrt{e}$ und $\alpha = e$ sowie $E_m = (30 \text{ bis } 1000) \cdot 10^3 \text{ V/cm}$ ist in Abb. 4 dargestellt. Mit Hilfe dieses Diagramms sind die Forderungen an den Speicher leicht zu übersehen.

Soll etwa an einer angepaßten Last von $R = 30 \Omega = Z_0$ ein Spannungspuls der Höhe 100 kV und der Dauer 20 ns erzeugt werden, muß eine Leitung von $D/d = 1,65 = \alpha$ bei $\epsilon_r = 1$ und 3 m Länge vorgesehen werden. Die Ladespannung muß $U_L = 2 \cdot 100 \text{ kV}$ betragen ($R = Z_0$). Beim Dielektrikum atmosphärische Luft ($E_m = 30 \text{ kV/cm}$) wird der Außendurchmesser aus $U_L/D = 4,6 \text{ kV/cm}$ bestimmt ($D = 200/4,54 = 44 \text{ cm}$). Bei Verwendung von Druckluft oder SF_6 ($E_m = 100 \text{ kV/cm}$) reduziert sich der Außendurchmesser auf $D = 200/15,5 = 13,0 \text{ cm}$ ($U_L/D = 15,2 \text{ kV/cm}$).

Mit Öl oder PE ($\epsilon_r = 2,5$) kann die gleiche Anordnung mit $Z_0 = 19 \Omega$ und $2 \cdot \tau_0 = 31 \text{ ns}$ betrieben werden. Mit einer angenommenen Festigkeit $E_m = 300 \text{ kV/cm}$ lassen sich dann Ladespannungen von $U_L/D = 45,4 \text{ kV/cm}$ beherrschen, das sind für die Beispiele von $D : 44 \text{ cm}$ und $13,2 \text{ cm}$ immerhin 2 MV und 0,6 MV. Durch geeignete Wahl von Dielektrikum und Durchmessern läßt sich so ein Speicher für verschiedene Anwendungen betreiben.

Eine Erhöhung der Leitungsimpedanz über 60Ω hinaus, $\alpha < 2,7$, ist bei gleicher, einfacher und koronafreier Anordnung nur mit Dielektrikum $\mu_r > 1$ möglich (Ferrite).

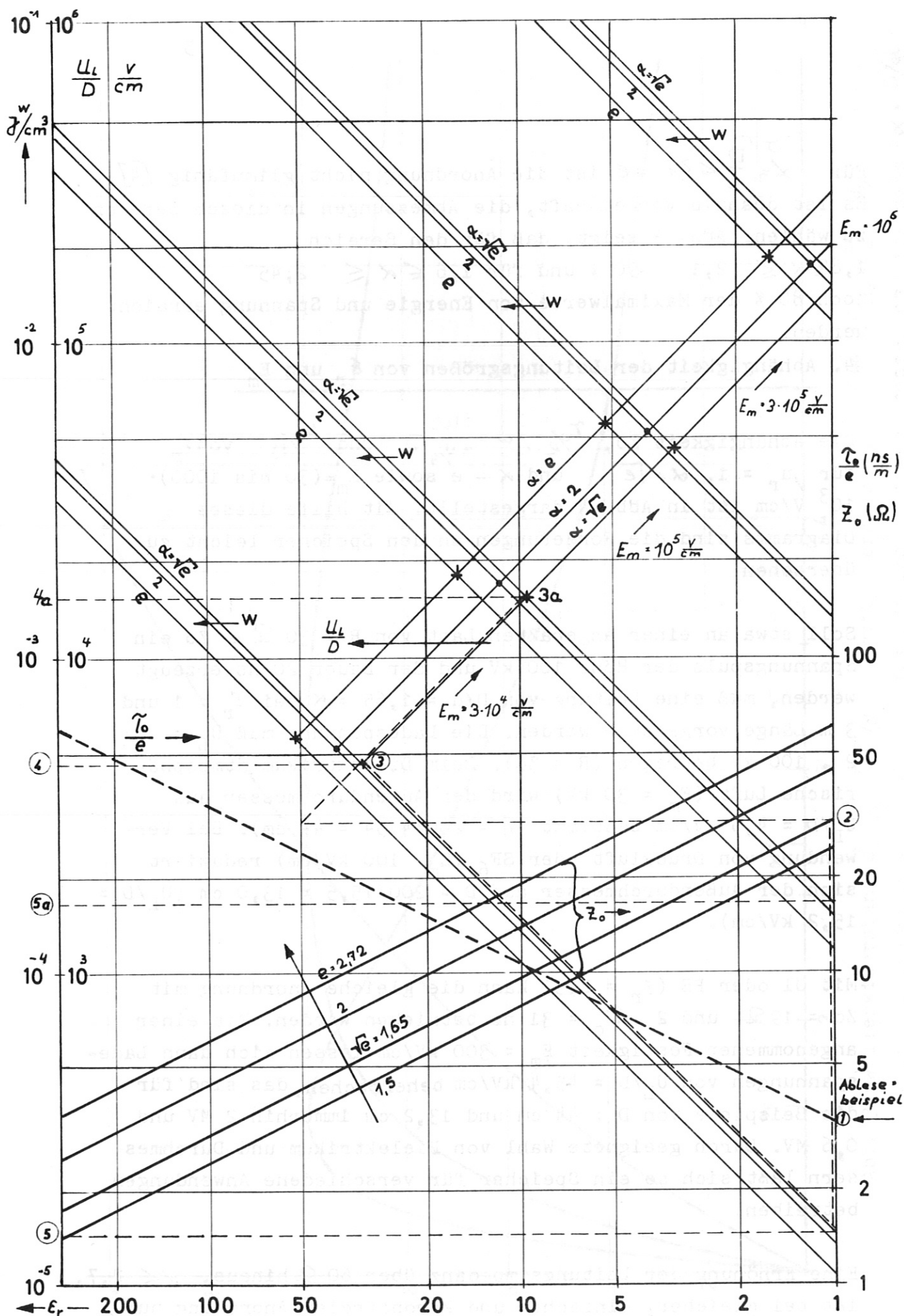


Abb. 4

siehe Anmerkung Blatt 7

Anmerkung zu Abb. 4:

Wellenwiderstand, Laufzeit und Bruttoenergiedichte als Funktion von ϵ_r ; $\mu_r = 1$, $\alpha = D/d = \sqrt{\epsilon}$, 2 und $e = 2,72 \dots$ = const. und U_L/D in Abhängigkeit der max. Feldstärke. Ablesebeispiel: gegeben $R = Z = 30 \Omega$, $2\tilde{\tau}_0 = 20 \text{ ns}$, $\epsilon_r = 1$ (Gas) und $U_1 = 100 \text{ kV}$. (1) $\tilde{\tau}_0/e = 3,3 \text{ ns/m} \rightsquigarrow 1 = 20/6,6 \sim 3 \text{ m}$. (2) $Z_0 = 30 \Omega$, $\alpha = D/d = \sqrt{\epsilon} = 1,65$ (3) Luft 1 ata ($E_m = 30 \text{ kV/cm}$) \rightsquigarrow (4) $(U_L/D = 4,60 \cdot 10^4 \text{ V/cm} \rightsquigarrow$
 $D = \frac{200 \cdot 10^3}{4,60 \cdot 10^3} \sim 44 \text{ cm}$, oder (3a) bei Druckluft bzw.

SF6 ($E_m \sim 100 \text{ kV/cm}$) \rightsquigarrow (4a) $U_L/D = 1,55 \cdot 10^4 \text{ V/cm} \rightsquigarrow D = 13 \text{ cm}$. (3) - (4) \rightsquigarrow Energiedichte $1,48 \cdot 10^{-5} \text{ J/cm}^3$ (5). (3a) - (4a) \rightsquigarrow Energiedichte $1,65 \cdot 10^{-4} \text{ J/cm}^3$ (5a). Die zu speichernde Energie beträgt 6,6 Joule.

5. Auswirkungen bei nicht angepaßter Last ($0 \leq t \leq 2\hat{t}_0$)

Die Last R sei $R = u \cdot Z_0$ (5.1)

Dann gilt nach (1.1) im Bereich $0 \leq t \leq 2\hat{t}_0$ für die Pulshöhe bei Schaltung nach Abb. 2

$$U_1 = U_L \frac{u}{u+1}$$

Die in dieser Zeit dem Widerstand R zugeführte Energie ist (mit (2.1), (2.3), (2.4) und (5.1))

$$W_R = \frac{U_1^2}{R} \cdot 2\hat{t}_0 = W_L \cdot \frac{4u}{(1+u)^2} \quad (5.2)$$

Die gespeicherte Energie W_L wird also nur im Fall der Anpassung $u = 1$ während $2\hat{t}_0$ voll an den Verbraucher ausgeliefert. Abb. 5 zeigt U_1/U_L und W_R/W_L in Abhängigkeit von $R/Z_0 = u$.

Wenn Reflektionen nach $t > 2\hat{t}_0$ nicht störend wirken und genügend Energie gespeichert werden kann, sollte Überanpassung dann vorgenommen werden, wenn hohe Spannungen verlangt werden.

Ausgehend von der Pulshöhe U_1 und der Dauer $2\hat{t}_0$ am Widerstand R, ergibt sich dann die notwendig zu speichernde Energie aus (5.2)

$$W_L = \frac{U_1^2}{R} \cdot 2\hat{t}_0 \cdot \frac{(1+u)^2}{4u} \quad (5.3)$$

und die erforderliche Festigkeit zu

$$E_m = \frac{2 \cdot U_1}{D} \cdot \frac{\alpha}{\text{lux}} \cdot \frac{u+1}{u} \quad (5.4)$$

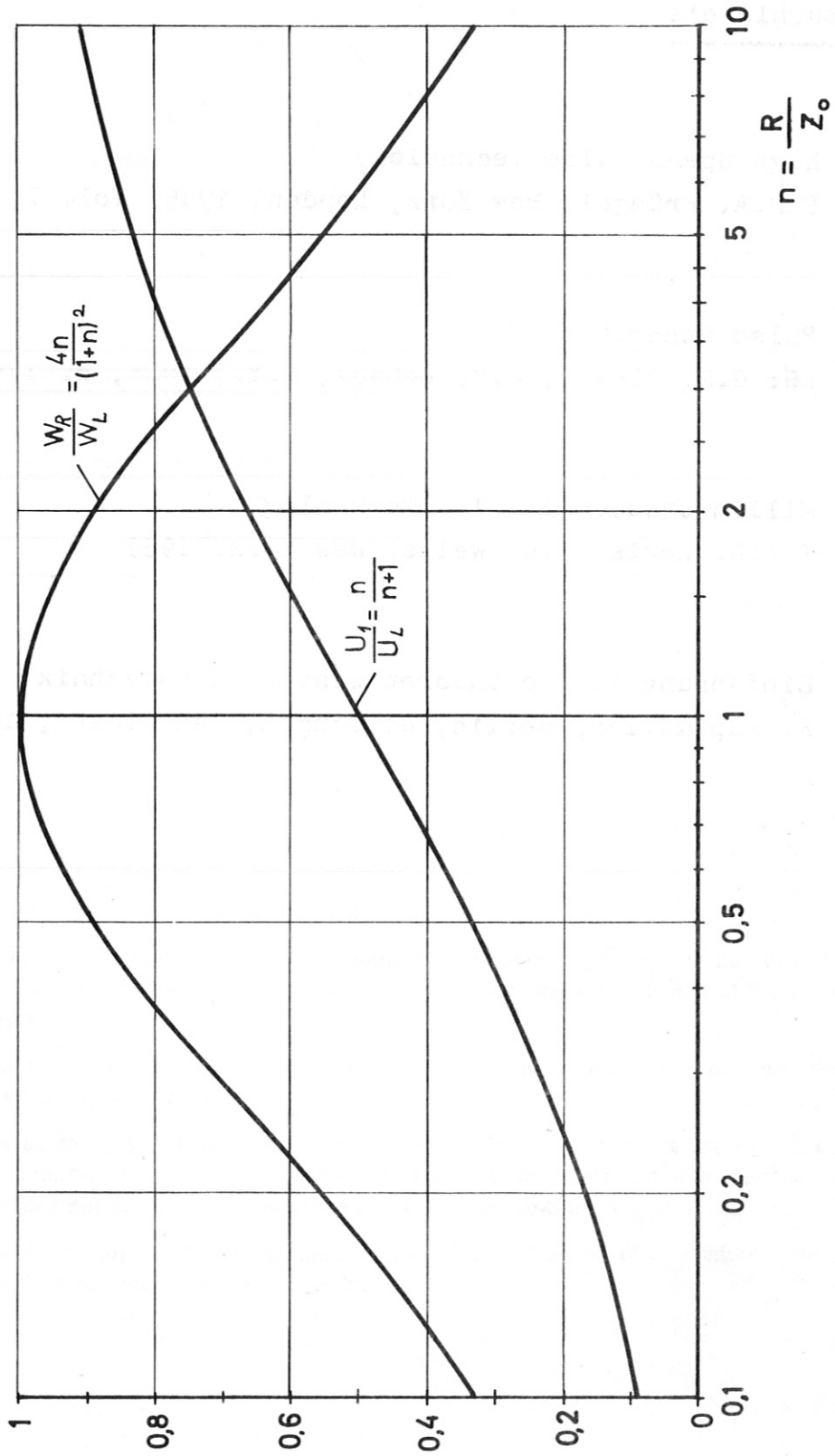


Abb. 5 Verhältnis von Pulsspannung zu Ladespannung und Pulsenergie zu Ladeenergie als Funktion der Anpassung (Pulswiderstand zu Wellenwiderstand).

Literaturhinweis

- 1 High Speed Pulse Technology
F.B.A. Früngel, New York, London, 1965, Vol. I, p. 175 ff.
- 2 Pulse Generators
ED: G.N. Glasoe, J.V. Lebaqz, N.Y., 1965, p. 175 ff.
- 3 Millimicrosecond Pulse Technology
I.A.D. Lewis, F.H. Wells, New York, 1959
- 4 Einführung in die theoretische Elektrotechnik
K. Küpfmüller, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1959, p. 81