

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 70 (1979)

**Heft:** 3

**Artikel:** Ausbreitung schneller Impulse auf PVC-isolierten Netzkabeln

**Autor:** Hafner, C.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-905350>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.03.2026

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

# Ausbreitung schneller Impulse auf PVC-isolierten Netzkabeln

Von Ch. Hafner

621.315.211.2::678.743.22:537.871;

Es werden Resultate von Berechnungen der Ausbreitung schneller Impulse auf Netzleitungen vorgestellt, ohne dass auf die verwendeten Methoden näher eingegangen wird. Damit sollen dem Ingenieur Anhaltspunkte über das Verhalten von Impulsen auf handelsüblichen Netzkabeln gegeben werden, so dass er in der Lage ist, in konkreten Fällen Abschätzungen ohne komplizierte Rechnungen zu machen.

L'article présente les résultats de calculs de la transmission d'impulsions rapides le long de câbles de réseaux, sans entrer dans les détails des méthodes employées. Le but est d'aider l'ingénieur à procéder à des estimations sur le comportement d'impulsions le long de câbles de réseaux ordinaires, dans des cas concrets, sans calculs compliqués.

## 1. Einleitung

Zwei- und Mehrdrahtleitungen werden für die Übertragung von schnellen Impulsen aus verschiedenen Gründen nicht verwendet. Deshalb ist auch wenig darüber bekannt. Mit dem Aufkommen der modernen Elektronik ist auch die Frage nach der Ausbreitung von schnellen Störimpulsen auf den Netzleitungen aktuell geworden.

Die meisten handelsüblichen Netzkabel besitzen eine PVC-Isolation mit schlechten Hochfrequenzeigenschaften. Insbesondere erhöhen Weichmacher, die eine gute mechanische Flexibilität bewirken, den elektrischen Verlustwinkel  $\delta$  sehr stark. Dies führt zu einer grossen Dämpfung für höhere Frequenzen und zu einer vorteilhaften «Entschärfung» der unangenehmen Eigenschaften der Netzstörungen (Abnahme der Flankensteilheit, Leistung usw.). Dies ist aus den angefügten Resultaten gut ersichtlich.

Bei Dreidrahtleitungen sind bekanntlich zwei Leitungswellen ausbreitungsfähig: der Gleich- und der Gegentakmodus. Beim Gleichtaktmodus ist ein Leiter stromfrei, und die beiden andern Leiter bilden im Prinzip eine Zweidrahtleitung. Der stromfreie Leiter bewirkt eine gewisse Änderung in der Fortpflanzungskonstanten gegenüber der reinen Zweidrahtleitung. Sein Einfluss ist jedoch bei den üblichen Abmessungen dreidrahtiger Kabel klein. Da für die Wellenausbreitung zudem die Eigenschaften des Kabelmantels von dominierender Bedeutung sind, wie die aufgeführten Resultate zeigen, erhält man für Impulse, die sich im Gleichtaktmodus auf symmetrischen dreidrahtigen Kabeln ausbreiten, nahezu dasselbe Verhalten wie für die Impulsausbreitung auf symmetrischen zweidrahtigen Kabeln mit gleicher Konstruktion (gleiche Materialien, gleiche Drahtradien, gleiche Drahtabstände).

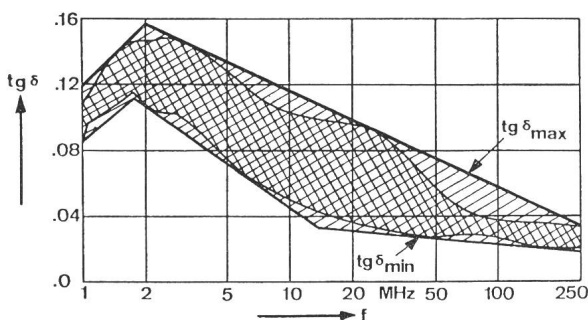


Fig. 1 Frequenzabhängigkeit des dielektrischen Verlustwinkels  $\delta$  von Weich-PVC bei verschiedenen Kabeln

$$\operatorname{tg} \delta = \sigma_{\text{PVC}} / \omega \epsilon_{\text{PVC}}$$

$\sigma_{\text{PVC}}$  Leitfähigkeit des PVC-Kabelmantels

$\epsilon_{\text{PVC}}$  Dielektrizitätskonstante des PVC-Kabelmantels

Der doppelt schraffierte Bereich enthält sämtliche Frequenzgänge der untersuchten Kabel. Die Kurven  $\operatorname{tg} \delta_{\max}$  und  $\operatorname{tg} \delta_{\min}$  bilden eine obere und eine untere Schranke für diesen Bereich

Beim Gegentakmodus bildet ein Leiter den Hinleiter und die beiden andern den Rückleiter. Im Falle symmetrischer Kabel führen die Rückleiter denselben Strom, der Hinleiter den doppelten Betrag davon. Wegen der Linearität der Maxwell-Gleichungen und Materialgleichungen lässt sich dieser Modus als Superposition zweier Gleichtaktmodi denken, hat also dieselbe Fortpflanzungskonstante wie der Gleichtaktmodus und damit auch dasselbe Impulsverhalten. Die Annahmen der Symmetrie und der Linearität der Materialgleichungen sind für übliche Netzkabel meist genügend gut erfüllt, so dass die Resultate für die Zweidrahtleitung auch für die beiden Leitungswellen dreidrahtiger Kabel übernommen werden können.

## 2. Berechnung der Impulsausbreitung auf zweidrahtigen Kabeln

Die Berechnung basiert auf einer feldtheoretischen Näherungslösung von A. Sommerfeld [1], die für Zweidrahtleitungen mit dicker Ummantelung erweitert wurde. Die elektrischen Eigenschaften der Ummantelung (Dielektrizitätskonstante, Verlustwinkel) wurden aus Messungen, kombiniert mit einem Optimierungsprogramm, bestimmt: Die feldtheoretische Näherungslösung erlaubt die Berechnung des Amplituden- und Phasenganges von Leitungen mit nicht zu dünner Ummantelung, bekannter Geometrie und Materialien. Da die elektrischen Eigenschaften der Ummantelung, in den hier interessierenden Fällen, viel zu wenig genau bekannt waren, konnten keine direkten Berechnungen durchgeführt werden. Mit relativ einfachen Messungen des Amplituden- und Phasenganges konnten die elektrischen Eigenschaften einiger Kabel durch nichtlineare Optimierung so festgelegt werden, dass die Messresultate mit den Berechnungen «optimal» übereinstimmten [2].

Da vor allem die Verluste im PVC von Weichmachern, Farbstoffen usw. stark abhängig sind, können sich recht unterschiedliche Resultate ergeben. Es wurden aus diesem Grunde Kabel verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Ausführungen untersucht (Adern einzeln isoliert, gemeinsam isoliert, runde, flache Kabel, Trennaht, diverse Farben usw.). Im hier interessierenden Frequenzbereich ergab sich eine relativ starke Frequenzabhängigkeit des Verlustwinkels  $\delta$ , die von Kabel zu Kabel variiert. Figur 1 gibt eine Übersicht dazu: Im doppelt schraffierten Bereich liegen alle beobachteten Werte. Zur Berechnung der Impulsausbreitung wurde linearisiert. Damit ergab sich der einfach schraffierte Bereich, der ebenfalls alle beobachteten Werte enthält. Im folgenden wurden alle Berechnungen für die obere und untere Schranke ( $\operatorname{tg} \delta_{\max}$  bzw.  $\operatorname{tg} \delta_{\min}$ ) getrennt durchgeführt. Es ist selbstverständlich nicht auszuschliessen, dass es PVC-isolierte Kabel gibt, deren  $\operatorname{tg} \delta$  ausserhalb dieses Bereiches liegt. Für handelsübliche Kabel dürfte dies jedoch eher selten sein.

Im Gegensatz zum Verlustwinkel ist die Dielektrizitätskonstante bei den meisten Kabeln nur schwach frequenzabhängig. Da sie sich vor allem auf den Phasengang auswirkt, bedeutet dies, dass die Dispersion gering ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde für alle Berechnungen eine frequenzunabhängige Dielektrizitätskonstante angenommen, obwohl man damit nicht allen Kabeln ganz gerecht wird. Der Betrag dieser Konstanten hat auf die Form der Pulse am Ausgang praktisch keinen Einfluss. Die relative Dielektrizitätskonstante

$\epsilon_r$  lag bei den untersuchten Kabeln zwischen 2 und 4, was bedeutet, dass sich die Impulse mit 0,5- bis 0,7facher Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Für die untersuchten schnellen Impulse kann der Wellenwiderstand mit guter Näherung als konstant angenommen werden. Dies bedeutet, dass es genügt, Strom oder Spannung (oder elektrische bzw. magnetische Feldstärke in einem beliebigen Aufpunkt ausserhalb der Drähte) anzugeben. Wegen der Linearität der Maxwell'schen Gleichungen und der Linearität

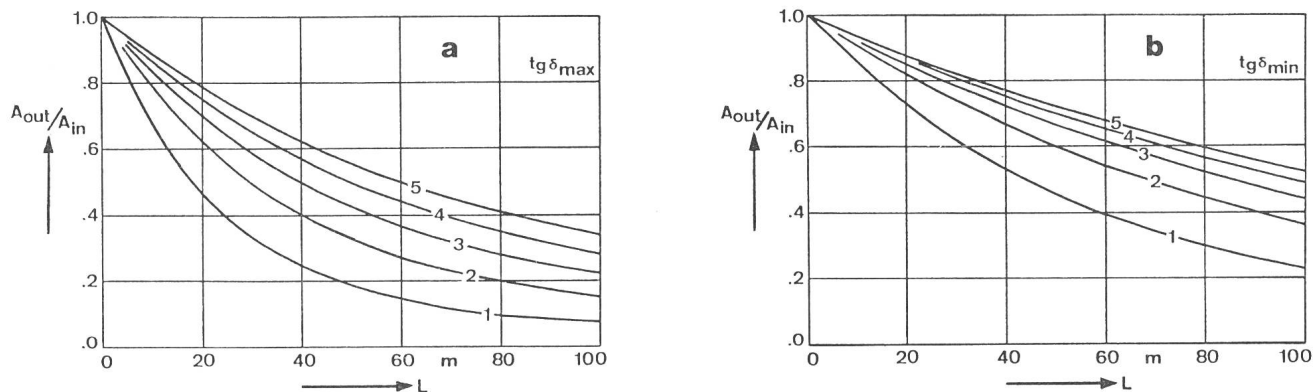


Fig. 2 Pulsamplitude am Ausgang eines typischen Netzkabels in Funktion der Kabellänge  $L$

Drahtradius  $r = 0,49$  mm, Abstand der Drahtachsen  $d = 3$  mm

Der Puls am Eingang ist trapezförmig mit 1 ns Anstiegs- und Fallzeit und hat folgende Pulsdauer:

Kurve 1: 10 ns, Kurve 2: 20 ns, ...Kurve 5: 50 ns

a für  $\text{tg } \delta_{\max}$  b für  $\text{tg } \delta_{\min}$

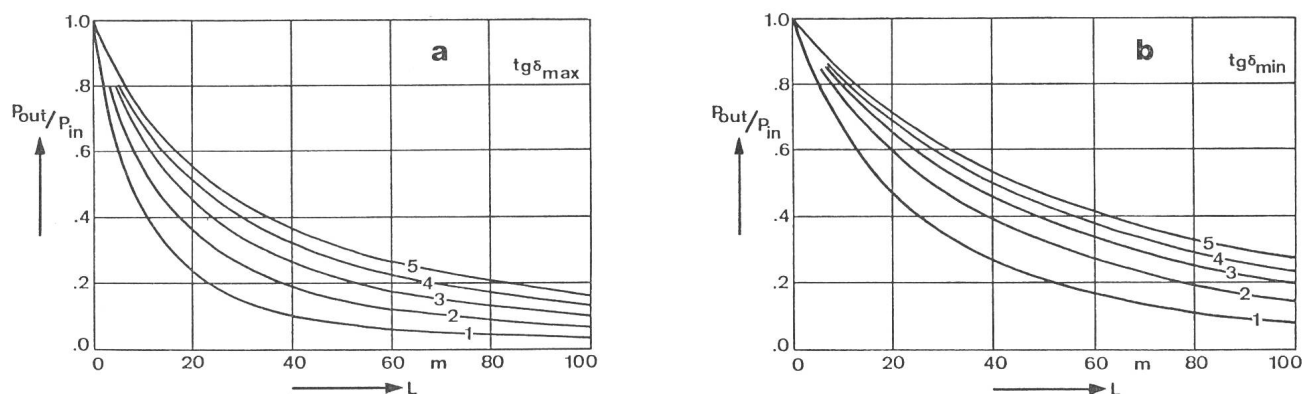


Fig. 3 Pulsleistung am Ausgang eines typischen Netzkabels

Daten wie in Fig. 2

a für  $\text{tg } \delta_{\max}$  b für  $\text{tg } \delta_{\min}$

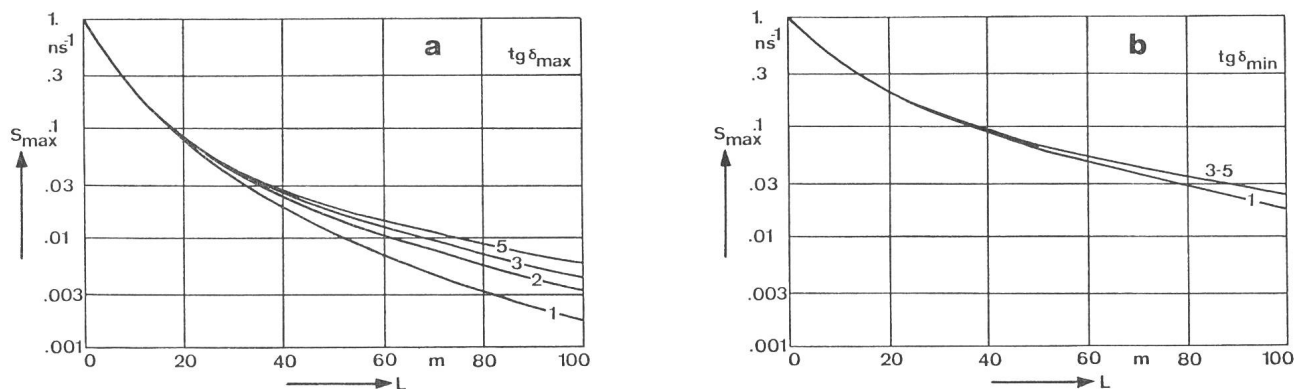
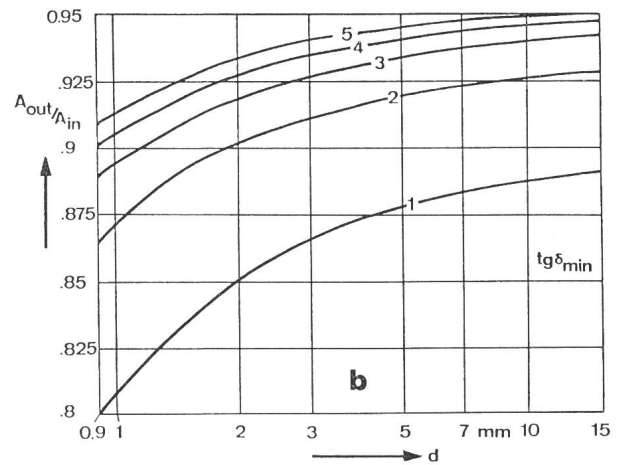
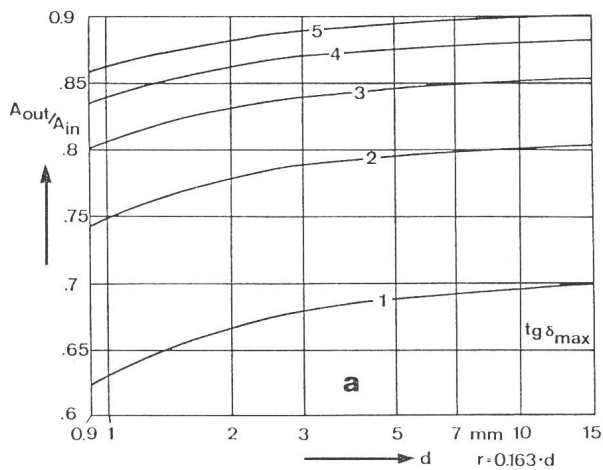


Fig. 4 Maximale Flankensteilheit, bezogen auf die Pulsamplitude am Eingang

Daten wie in Fig. 2

a für  $\text{tg } \delta_{\max}$  b für  $\text{tg } \delta_{\min}$

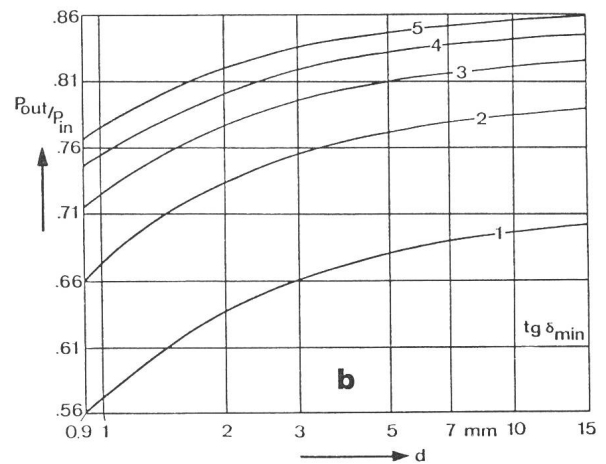
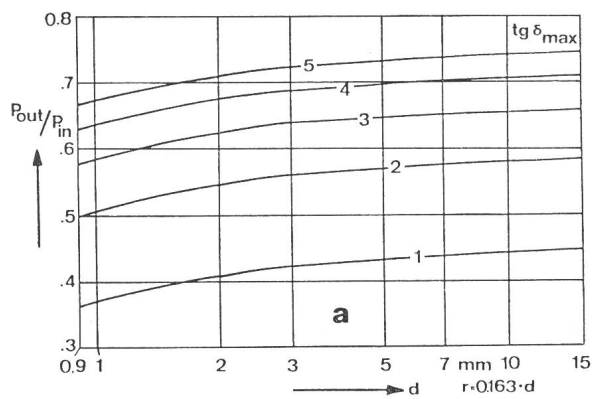


**Fig. 5** Pulsamplitude am Ausgang eines 10 m langen Netzkabels in Funktion des Drahtabstandes bei konstantem Verhältnis von Drahtabstand zu Drahtradius

Für den Eingangspuls gelten die Daten von Fig. 2

Kurve 1: 10 ns, Kurve 2: 20 ns, ...Kurve 5: 50 ns Pulsdauer

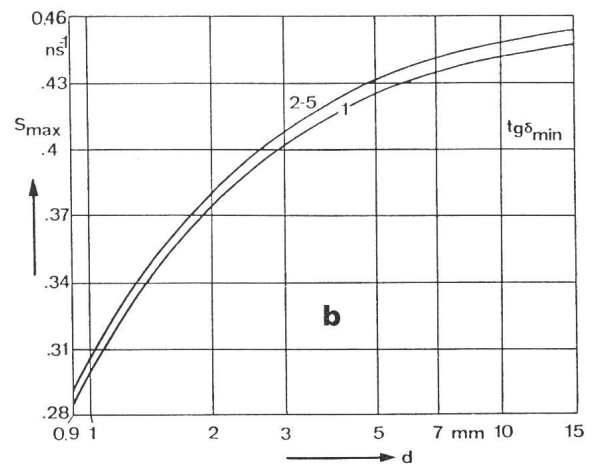
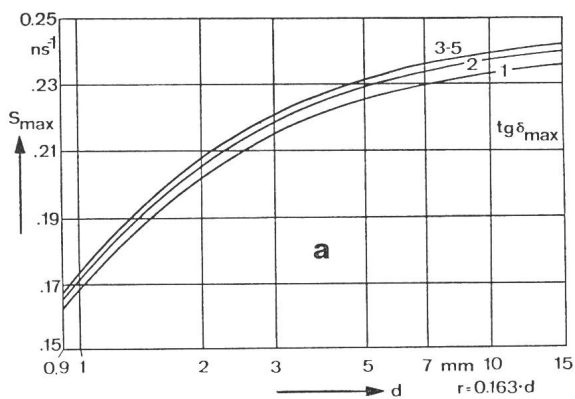
a für  $\text{tg } \delta_{\text{max}}$  b für  $\text{tg } \delta_{\text{min}}$



**Fig. 6** Pulsleistung am Ausgang eines 10 m langen Netzkabels

Daten wie in Fig. 5

a für  $\text{tg } \delta_{\text{max}}$  b für  $\text{tg } \delta_{\text{min}}$



**Fig. 7** Maximale Flankensteilheit, bezogen auf die Pulsamplitude am Eingang

Daten wie in Fig. 5

a für  $\text{tg } \delta_{\text{max}}$  b für  $\text{tg } \delta_{\text{min}}$

der Materialgleichungen können die interessierenden Grössen, wie Pulsamplitude, Pulsleistung und maximale Pulssteilheit, relativiert bzw. normiert werden. Tatsächlich sind die Materialgleichungen nicht vollkommen linear. Zum Beispiel ist der Verlustwinkel von PVC auch von der Feldstärke abhängig. Sinnvollerweise bezieht man die Pulsamplitude  $A_{out}$  am Ausgang der Leitung auf die Pulsamplitude am Eingang  $A_{in}$  und ebenso die Leistung  $P_{out}$  auf  $P_{in}$ . Etwas komplizierter ist die Behandlung der Pulssteilheit. In dieser Arbeit wurde die Pulssteilheit ebenfalls auf die Amplitude des Eingangsimpulses bezogen. Man erhält damit die Grösse  $S_{max} = \text{maximale Steilheit}/A_{in}$  mit der Dimension  $s^{-1}$ . Damit ist die Anstiegszeit  $\Delta t$  eines trapezförmigen Impulses mit der Amplitude  $A_{out}$ :  $\Delta t = A_{out}/S_{max}$ . Für nicht trapezförmige Impulse ist dies eine untere Schranke für die Anstiegszeit.

### 3. Resultate

Die drei charakteristischen Daten  $A_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $S_{max}$  eines Pulses wurden in Funktion der Leitungslänge  $L$  jeweils für die beiden Fälle  $\text{tg } \delta_{max}$  und  $\text{tg } \delta_{min}$  berechnet und in den Figuren 2...4 dargestellt, und zwar für trapezförmige Eingangspulse mit 1 ns Anstiegs- und Fallzeit und 10, 20, 30, 40 resp. 50 ns Pulsdauer.

Die Pulsdauer selbst in Funktion der Leitungslänge wird nicht gezeigt. Sie bleibt nahezu konstant, bis die Anstiegszeit

grösser als die Hälfte der Pulsdauer wird. Bei welcher Leitungslänge dies der Fall ist, kann aus den Kurven für  $S_{max}$  abgeschätzt werden.

Die Figuren 2...4 gelten für Netzkabel mit 0,49 mm Drahtradius und Drahtabstand (Abstand der Drahtachsen)  $d = 3$  mm, sind also für die meisten 6-A-Kabel verwendbar. Anhaltspunkte für das Verhalten von Kabeln mit anderer Querschnittsgeometrie lassen sich aus den Figuren 5 bis 10 gewinnen. Diese Figuren zeigen  $A_{out}$ ,  $P_{out}$  und  $S_{max}$  am Ausgang einer 10 m langen Leitung, in Funktion der Leitergeometrie. Die Figuren 5 bis 7 geben Auskunft über die Veränderung der Impulse bei Änderung des Drahtabstandes  $d$  mit gleichzeitiger Änderung des Drahtradius  $r$ , so dass das Verhältnis Drahtabstand:Drahtradius konstant bleibt. Man sieht in allen Figuren eine recht schwache Abhängigkeit. Eine wesentlich stärkere Abhängigkeit von  $A_{out}$ ,  $P_{out}$  und  $S_{max}$  vom Drahtabstand bei konstantem Drahtradius zeigen die Figuren 8 bis 10. Insbesondere für kleine Drahtabstände  $d < 4 \cdot r$  macht sich der Proximity-Effekt deutlich bemerkbar. Handelsübliche Kabel liegen aber nicht in diesem Bereich.

### 4. Schlussfolgerungen

Schnelle Impulse werden auf Netzleitungen, die mit Weich-PVC isoliert sind, stark gedämpft, was im Falle von Störimpulsen sicher erfreulich ist. Verantwortlich für diese Dämpf-

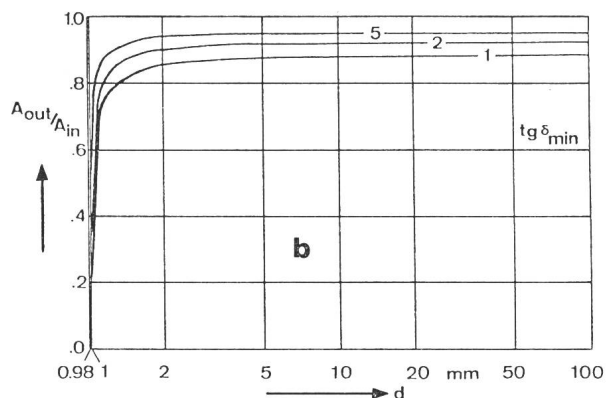
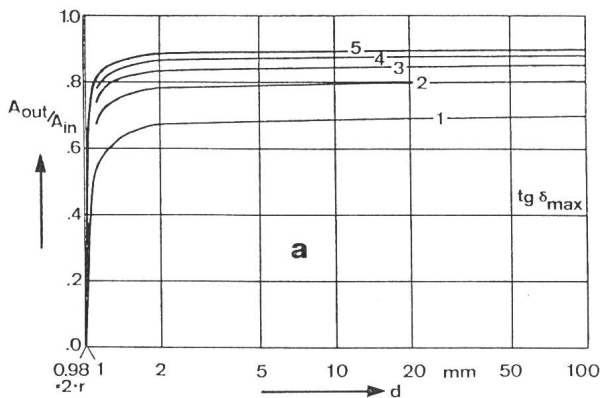


Fig. 8 Pulsamplitude am Ausgang eines 10 m langen Netzkabels in Funktion des Drahtabstandes bei konstantem Drahtradius  $r = 0,49$  mm

Übrige Daten wie in Fig. 5

a für  $\text{tg } \delta_{max}$  b für  $\text{tg } \delta_{min}$

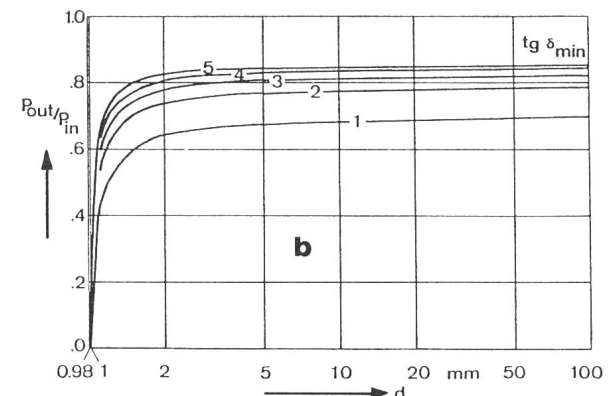
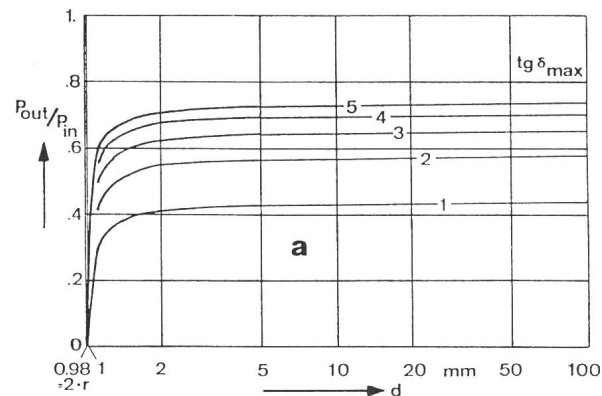


Fig. 9 Pulsleistung

Daten wie in Fig. 8

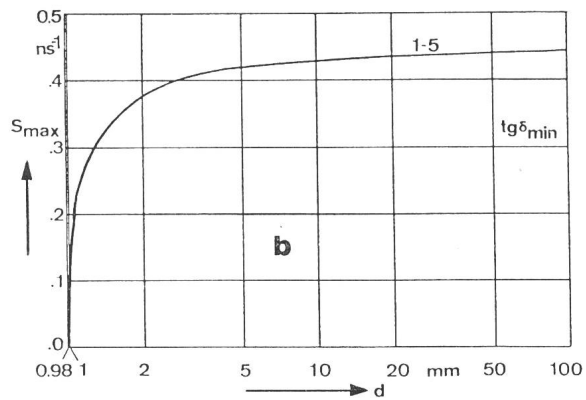
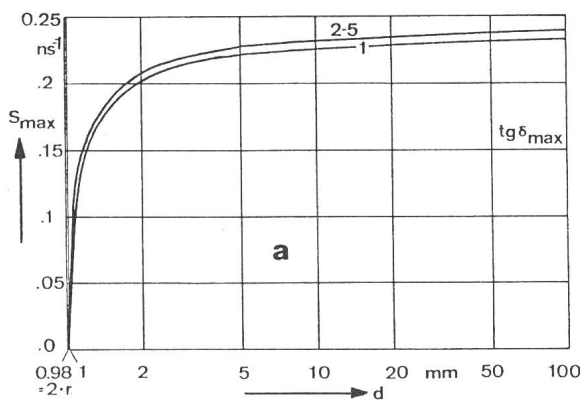


Fig. 10 Maximale Flankensteilheit bezogen auf die Pulsamplitude am Eingang  
Daten wie in Fig. 8

fung ist hauptsächlich der grosse Verlustwinkel von Weich-PVC. Die Abhängigkeit des Verlustwinkels von produktionsbedingten Faktoren wie Farbstoffen, Weichmachern usw. im PVC verunmöglicht allgemein gültige präzise Angaben für das Verhalten von Netzkabeln. Die gezeigten Figuren geben aber jeweils eine obere und eine untere Schranke und ermöglichen damit Abschätzungen für Kabel mit unbekannten dielektrischen Daten.

#### Literatur

- [1] A. Sommerfeld: Vorlesungen über theoretische Physik, Band 3: Elektrodynamik. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, 1949.
- [2] C. Hafner: Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften der Ummantelung eines Kabels mit Hilfe eines Optimierungsprogrammes. Bulletin SEV/VSE 69(1978)24, S. 1315...1320.

#### Adresse des Autors

Christian Hafner, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektronik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

## Jacob (I) Bernoulli 1654–1705

Mit Jacob (I) Bernoulli nahm die etwa 100 Jahre dauernde Führerrolle der Bernoullis in der Mathematik ihren Anfang. Am 27. Dezember 1654 zu Basel geboren, wurde er 1671 Magister der Philosophie und bestand 5 Jahre später sein Theologieexamen. Als Pfarrer, aber vorwiegend als Privatlehrer sich betätigend, begab er sich noch im gleichen Jahr nach Genf und von dort quer durch Frankreich nach Bordeaux. Über Paris kehrte er 1680 nach Basel zurück.

Ein Komet, für die abergläubische Bevölkerung ein böses Omen, bedeutete für Bernoulli ein interessantes Naturphänomen. Von blossen Auge stellte er Beobachtungen an und zeichnete die Bahnkurve auf. Er stellte eine Theorie auf, wonach der Komet der Trabant eines sehr fernen Planeten sei und wiederkommen werde. 1681 veröffentlichte er seine erste Schrift, betitelt «Neu erfundene Anleitung, wie man den Lauf der Schwanzsterne in ... Gesetze einrichten und ihre Erscheinung voraussagen kann...».

Bernoulli fühlte sich dank dieser kleinen Studie bereits als Gelehrter. Um mit andern Gelehrten Bekanntschaft zu machen, unternahm er eine neue Reise; sie führte ihn zunächst nach Holland. Tief beeindruckt von den Arbeiten Descartes, zog er dann über Belgien nach England, wo er einer Sitzung der Royal Society beiwohnen konnte. Im Herbst 1682 kehrte er nach Basel zurück, dem Predigerberuf ganz entfremdet.

Nach seiner Heirat mit Judith Stupan, die ihm eine Tochter und einen Sohn schenkte – der zum Leidwesen des Vaters Maler wurde –, widmete er sich ganz der Wissenschaft. Er hielt oft Vorträge über Mathematik und Physik und zeigte grosses Talent zum Lehren. Nebenbei führte er auch seinen 13 Jahre jüngeren Bruder (Johannes I) in die Mathematik ein.

1684 machten sich die beiden Brüder an eine von Leibnitz veröffentlichte, schwer verständliche Arbeit. Eine drei Jahre später an Leibnitz gerichtete Anfrage blieb unbeantwortet, da sich dieser auf einer Reise befand. 1690 publizierten die Bernoullis dann in den Leipziger-Acten einen «Abriss der Differential- und Integralrechnung». Leibnitz war davon so beeindruckt, dass er erklärte, «der neue Calcul gehöre ebensogut den beiden Bernoullis wie ihm selber».

1687 wählte der Basler Senat Jacob Bernoulli als Professor der Mathematik an die Universität. Bernoulli löste in dieser Zeit unzählige schwierige mathematische Probleme. Er schrieb selber Preisaufgaben aus und beteiligte sich auch an der Lösung internationaler Preisfragen. Neben der Differential- und Integralrechnung begründete er die Kombinationslehre, die Wahrscheinlichkeitsrechnung (Satz von Bernoulli) sowie die Lehre von den Reihen. Ihm gelang auch die Berechnung der Kettenlinie.

Das strenge, bis in die Nacht währende Studieren, mangelnde Bewegung und der Ärger über den Streit mit dem Bruder Johannes zehrten an seiner Gesundheit. Erst 51-jährig, erlag er am 16. August 1705 einem Fieber.

H. Wüger



Bibliothek der ETHZ