

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 44 (1953)
Heft: 14

Artikel: Radiostöreffekte von Leuchtstoffröhren im Mittelwellengebiet
Autor: Brunhart, W. / Rohner, E. / Soós, L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058091>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 25.12.2024

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

Radiostöreffekte von Leuchtstoffröhren im Mittelwellengebiet

Von W. Brunhart, E. Rohner, L. Soós, Zürich

621.396.828 : 621.327.43

Das von einer Leuchtstoffröhre im Mittelwellengebiet abgestrahlte Störfeld wurde untersucht und ausgemessen. Die Messwerte werden graphisch dargestellt. Weiter wurden vergleichende Messungen zwischen Lampen verschiedener Herkunft ausgeführt. Zur Untersuchung der auftretenden Störspannungen diente ein Kathodenstrahloszillograph und ein Pegelschreiber. Es folgen eine Diskussion der Messresultate und Hinweise auf deren praktische Auswirkungen.

Examen et mesure du champ perturbateur d'une lampe tubulaire à fluorescence, dans le domaine des longueurs d'ondes moyennes. Les valeurs mesurées sont représentées graphiquement. Des mesures comparatives ont également eu lieu avec des lampes de différentes provenances. Les tensions perturbatrices ont été observées au moyen d'un oscillographe cathodique et d'un hypsographe. Discussion des résultats des mesures et indications sur leurs répercussions en pratique.

Allgemeines

Durch die in hohem Masse zunehmende Verwendung der Leuchtstoffröhre in Beleuchtungsanlagen tritt das Problem der Bekämpfung der von ihr hervorgerufenen Radiostöreffekte immer mehr in den Vordergrund. Die Untersuchungen dieser Störungen bieten in den meisten Fällen erhebliche Schwierigkeiten. Das Problem erstreckt sich auf ein solch umfangreiches Gebiet, dass es kaum Gegenstand einer einzigen Arbeit bilden kann. Aus diesem Grunde beschränkten sich die bis heute allgemein bekannten Forschungen auf ganz spezielle Teilgebiete.

Die von einer Leuchtstoffröhre hervorgerufenen hochfrequenten Störungen machen sich auf drei verschiedene Arten bemerkbar:

1. Störungen, die über das Netz in den Empfänger gelangen.
2. Störungen, die durch die Netzzuleitungen der Leuchtstoffröhre abgestrahlt werden und über die Antenne in den Empfänger gelangen.
3. Störungen, die von der Leuchtstoffröhre direkt abgestrahlt werden und so zur Empfangsantenne gelangen.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen erstrecken sich auf die dritte Art der erwähnten Fortpflanzungsmöglichkeiten der Störungen.

Messmethode und Messapparat

Damit Messungen solcher Art auf einer international bekannten Grundlage durchgeführt werden können, ist eine genau definierte Messanordnung erforderlich. Was die Messapparatur anbetrifft, werden diese Forderungen durch den CISPR-Messplatz¹⁾ erfüllt. Da dieser CISPR-Messplatz zur Hauptsache zur Messung von Störungen, die in das Netz abgegeben werden, dient, ist er relativ unempfindlich und zur Ausmessung des von der Lampe weit entfernten Feldes ohne zusätzliche Vorkehrungen nicht mehr verwendbar. Um aber trotzdem noch kleinere Feldstärken messen zu können, wurde ein Vorverstärker verwendet, der über den Frequenzbereich, über den sich die Untersuchungen erstrecken, eine zehnfache Verstärkung besass. Mit dieser Anordnung konnten noch Spannungen von der Gröszenordnung von 20...30 μV gemessen werden. Die Notwendigkeit der Messung von so kleinen Störspannungen ergibt sich daraus, dass laut den in der Schweiz bestehenden Vorschriften eine Nutzfeldstärke von 1 mV/m geschützt ist und die Störspannung um mindestens 30 db kleiner sein soll als die Nutzszennung.

¹⁾ CISPR = Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

Als Messantenne wurde eine Stabantenne von 0,4 m Länge mit einer Grundplatte von 0,2 m Radius als sog. Gegengewicht verwendet, wobei die Antenne senkrecht im Mittelpunkt dieser Scheibe stand. Die Antenne war durch ein kapazitätsarmes Koaxialkabel mit der Messapparatur verbunden. Damit ausschliesslich die Störspannungen der Leuchtstofflampen gemessen wurden und nicht fremde Störfelder

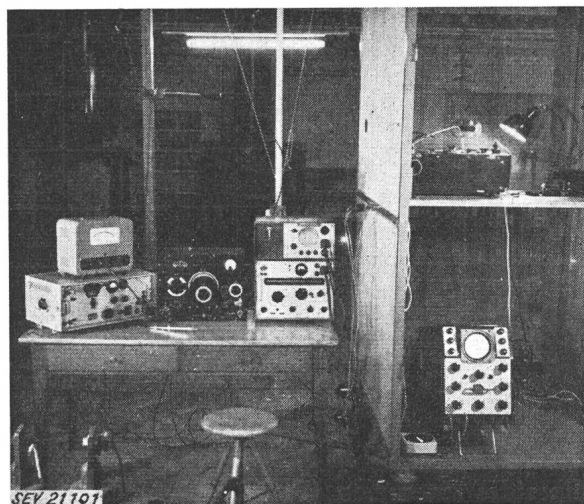


Fig. 1
Ansicht des Messplatzes

die Messungen beeinflussen konnten, musste die ganze Messanlage in einem abgeschirmten Raum aufgebaut werden; zusätzlich wurde die Messapparatur in einem Faradayschen Käfig aufgestellt. Sämtliche Messungen wurden in der Nacht durchgeführt, so dass auch die Fremdstörungen über das Netz vernachlässigbar klein waren. Um allein die Störfeldverteilung einer Leuchtstofflampe zu bestimmen, wurden ihre Netzzuleitungen abgeschirmt, das abgeschirmte Vorschaltgerät ausserhalb des Messraumes gebracht und die Lampe an einer metallfreien Aufhängevorrichtung befestigt.

Im Rahmen der Messungen wurden die vertikale und die horizontalen Komponenten der Feldstärke ermittelt. Von geringfügigen Abweichungen abgesehen, stimmen die Werte der drei Komponenten überein. Im folgenden beziehen sich alle Messergebnisse auf die vertikale Feldstärke.

Messresultate

Es wurden im ganzen 33 Leuchtstofflampen verschiedener Sorte und Herkunft untersucht, und zwar in folgenden Hinsichten:

- a) Feldverteilung;
- b) Betrag der Störspannungen bei verschiedenen Empfangsfrequenzen;
- c) Unterschiede in der Störfähigkeit von Lampen verschiedener Herkunft und Einfluss der Brenndauer;
- d) Untersuchung der Störspannungen mit einem Kathodenstrahloszillographen;
- e) Einfluss verschiedener Metall-Leuchten auf die Feldverteilung und den Betrag der Störspannungen.

a) *Feldverteilung*

Durch punktweises Ausmessen der Umgebung der Leuchtstoffröhre wurde die Störfeldverteilung ermittelt. Die Niveaulflächen, d. h. die Flächen gleicher Feldstärke sind in erster Annäherung Rotationsellipsoide, mit der Lampenachse als Rotationsachse. Dabei fällt der Mittelpunkt der Röhre nicht notwendigerweise mit dem Symmetriezentrum des

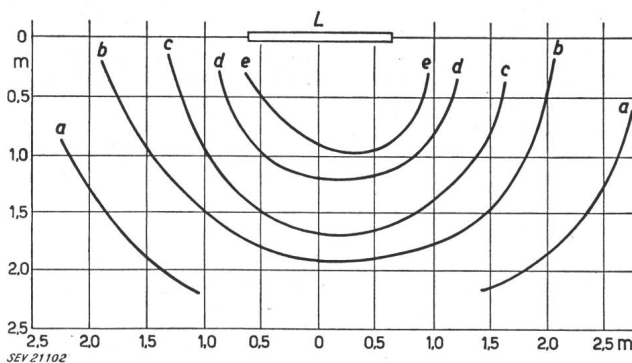


Fig. 2

Feldverteilung in der Vertikalebene durch die Lampenachse mit den Kurven äquivalenter, vertikaler Feldstärke
 a 1,5 mV/m; b 2,3 mV/m; c 4,43 mV/m; d 5,6 mV/m;
 e 18,0 mV/m
 Alle Werte bei 550 kHz
 L Lampe

Ellipsoides zusammen (Fig. 2 und 3). Es hat sich gezeigt, dass die Störfeldstärken im Gebiet der einen Elektrode nicht gleich gross sind wie die in der Umgebung der anderen Elektrode. Dieser Effekt ist in keiner Weise von der elektrischen Lage der Lampe in der Schaltung abhängig. Die Unsymme-

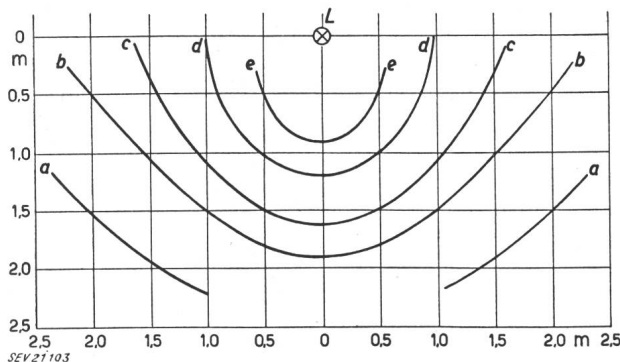


Fig. 3

Feldverteilung in der Vertikalebene durch die Mittelsenkrechte der Röhre mit den Kurven äquivalenter, vertikaler Feldstärke
 Bezeichnungen siehe Fig. 2

trie hat auch keinen für alle Störfrequenzen gültigen Charakter, so kann z. B. bei 550 kHz die eine, bei 1000 kHz die andere Seite der Lampe mehr stören. Die Ursache dieser Erscheinung dürften kleine Inhomogenitäten in der Elektrodenbeschaffenheit

und die dadurch bedingten unterschiedlichen Abnutzungen sein. Benachbarte Metallteile beeinflussen die Feldverteilung, und zwar so, dass vor ihnen in Richtung zur Lampe hin eine Erhöhung der Feld-

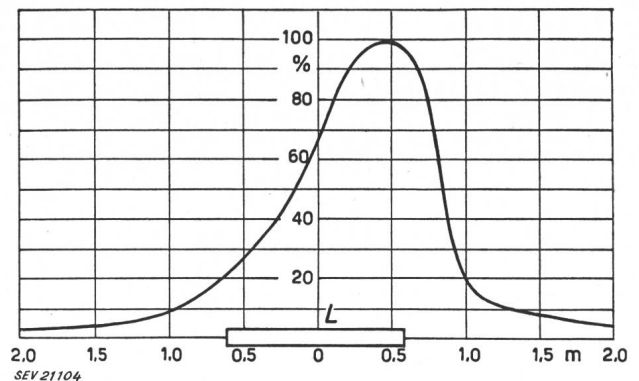


Fig. 4

Feldstärkeverteilung in der Längsrichtung der Leuchtstofflampe
 (Maximaler Wert = 100 %)
 L Lampe

stärke eintritt. Der Betrag der Störfeldstärke nimmt mit wachsendem Abstände von der Lampe stark ab (Fig. 4 und 5). Fig. 5 zeigt, dass der Abfall der Feldstärke in der Richtung senkrecht zur Lampenachse in bezug auf beide Seiten vollkommen symmetrisch ist. Der Verlauf hat grosse Ähnlichkeit mit

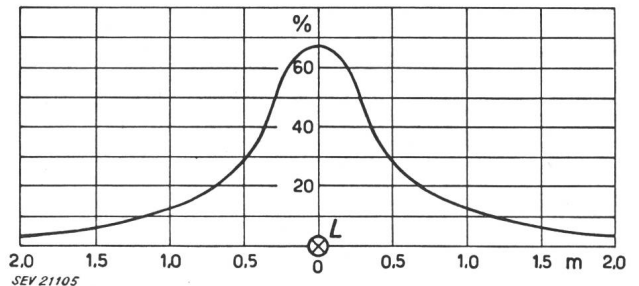


Fig. 5

Feldstärkeverteilung in der Richtung senkrecht zur Leuchtstofflampe
 L Lampe

einer Resonanzkurve und kann in erster Annäherung durch eine solche mathematisch erfasst werden. Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$E = \frac{1}{\sqrt{A^2 + \frac{r^2 B^2 (r\sqrt{BC} + 2)^2}{(r\sqrt{BC} + 1)^2}}}$$

r bedeutet dabei den Abstand von der Leuchtstofflampe in der Richtung senkrecht zur Lampenachse. Die Konstanten A, B, C können mit Hilfe der experimentell ermittelten Kurve bestimmt werden.

b) *Betrag der Störspannungen bei verschiedenen Empfangsfrequenzen*

Die Grösse der Störspannung ist bei verschiedenen Frequenzen sehr verschieden. Allgemein kann man feststellen, dass bei den meisten Lampen die Störfähigkeit gegen den Langwellenbereich hin zunimmt (Tabelle I). Die Art des in einem Radioemp-

fänger erzeugten Störgeräusches ändert bei verschiedenen Empfangsfrequenzen, d. h. auch die Modulation verändert sich. So kann es z. B. vorkommen, dass bei einer bestimmten Eingangsfrequenz die Störung periodisch stossweise auftritt (Fig. 6).

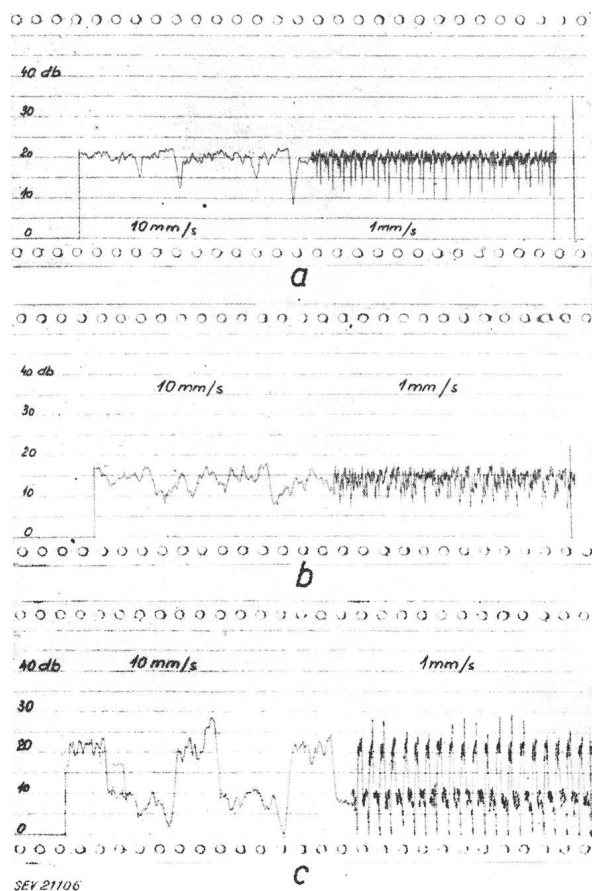


Fig. 6

Störspannung am Ausgang eines Radioempfängers, hervorgerufen durch eine Leuchtstoffröhre

a Abstimmfrequenz des Empfängers 550 kHz; b Abstimmfrequenz des Empfängers 1 MHz; c Abstimmfrequenz des Empfängers 1,4 MHz

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur die Störungen im Mittelwellenbereich quantitativ untersucht. Die Leuchtstofflampe ist aber auch im Kurzwellen- und Ultrakurzwellenbereich noch störfähig. Fig. 7 zeigt den qualitativen Verlauf der Störspannung am

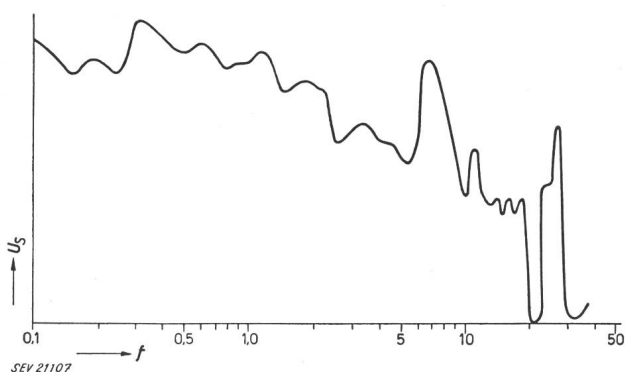


Fig. 7

Qualitativer Verlauf der Störspannung am Ausgang eines Radioempfängers, hervorgerufen durch eine Leuchtstofflampe, in Funktion der Eingangsspannung

Us niederfrequente Störspannung; f Abstimmfrequenz des Empfängers (MHz)

Ausgang eines Radioempfängers, hervorgerufen durch eine Leuchtstofflampe, in Funktion der Eingangsfrequenz, über den Bereich von 0,1...30 MHz. Für diese Untersuchung wurde der Empfänger geeicht, um den Einfluss der Frequenzabhängigkeit seiner Empfindlichkeit zu eliminieren. Natürlich ändert dieser Verlauf von Lampe zu Lampe in bestimmten Grenzen, nur der grundsätzliche Verlauf hat bei allen Leuchtstoffröhren denselben Charakter.

c) Unterschiede in der Störfähigkeit von Lampen verschiedener Herkunft und Einfluss der Brenndauer

Vergleicht man Lampen gleichen Typs mit gleicher Brennstundenzahl, aber verschiedener Herkunft, so können zum Teil sehr grosse Unterschiede in der Störfähigkeit festgestellt werden. Obwohl die Streuung bei Lampen gleichen Fabrikats schon sehr gross ist, lässt sich doch feststellen, dass das durchschnittliche Mass der Störfähigkeit bei verschiedenen Fabrikaten in beträchtlichen Grenzen schwankt. Tabelle I gibt Aufschluss über die Messresultate²⁾. Mit Ausnahme des Fabrikates F waren alle untersuchten Lampen 40-W-Leuchtstoffröhren. Bei Fabrikat F handelt es sich um Kaltkathodenröhren, wie sie für Reklamebeleuchtungen verwendet werden. Die Lagen der Messpunkte I und II in Ta-

Grösse der Störspannung bei verschiedenen Frequenzen

Tabelle I

Fabrikat	Röhre	Messpunkt I						Messpunkt II		
		mV/m								
		bei 0,55 MHz	bei 1 MHz	bei 1,4 MHz	bei 0,55 MHz	bei 1 MHz	bei 1,4 MHz			
A	a	0,95	0,43	0,20	1,50	0,80	0,34			
	b	2,12	1,55	1,20	2,30	1,87	1,10			
	c	1,50	0,88	0,20	0,95	0,55				
	d	1,50	0,40		3,00	0,55				
	e	2,30	0,62	0,48	1,23	0,75	0,34			
B	a	3,70	1,87	0,54	7,50	2,45	1,23			
	b	6,80	1,87	0,48	8,70	0,30	1,45			
	c	1,23	1,12		0,75	0,55				
	d	5,55	2,45	1,95	18,00	9,00	4,70			
	e	0,75	1,25	1,70	0,75	1,55	0,98			
C	a	3,70	1,87	0,54	7,50	2,45	1,32			
	b	9,30	4,80	4,08	8,50	6,00	4,70			
	c	3,00	6,00	1,52	0,95	1,25	1,20			
	d	8,50	0,20	1,45	3,00	0,55	0,98			
D	a	0,22	0,12		0,15	0,12				
	b	0,27	0,55		0,75	1,12	0,20			
	c	3,70	2,18	0,98	4,43	1,25	0,60			
	d	0,27	0,21	0,20	1,20	0,35	0,20			
	e	0,46	0,28		1,20	0,35				
	f				0,15	0,12				
E	a	1,75	0,43		4,43	0,82				
	b	1,50			4,43					
	c	3,40	1,55		1,75	0,88				
	d	1,05	0,62		1,75	0,65				
	e	4,43	1,55		1,63	0,43				
	f	7,30	1,68	0,26	2,82	0,82	0,20			
	g	18,00	2,45	6,50	67,50	4,67	10,00			
	h	6,80	0,70		2,30	0,96				
F	a	37,50	18,00	6,50	45,00	18,00	3,80			
	b	33,70	9,00	6,50	33,70	7,20	6,50			

²⁾ Es wurden Röhren folgender Firmen untersucht: General Electric Co., Osram A.-G., Philips A.-G., Rovo A.-G., Sylvania Electric, Westinghouse Electric Corp.

belle I waren so gewählt, dass sich die Basis der vertikal gestellten Antenne einmal 0,5 m unter dem einen, das andere Mal 0,5 m unter dem anderen Ende der Lampe befand.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Aufbau und die Beschaffenheit der Elektroden einen grossen Einfluss auf die Störfähigkeit einer Lampe haben. Von sehr grosser Bedeutung in bezug auf das Mass der Störungen ist die Anzahl der Brennstunden einer Leuchtstofflampe. Bei fortschreitender Abnutzung der Elektroden steigt die Störfähigkeit der Lampe stark, und die Störspannungen können unzulässig hohe Werte annehmen, auch wenn die Lampe vom lichttechnischen Standpunkt aus noch vollkommen genügt.

d) Untersuchung der Störspannungen mit einem Kathodenstrahl-oszillographen

Wird das von der Antenne aufgenommene Störsignal verstärkt und auf einen Kathodenstrahl-oszillographen gegeben, so lässt das entstehende Bild auf die Störfähigkeit einer Leuchtstoffröhre schliessen. Vergleicht man verschiedene Lampen gleichen Typs und Fabrikates, so kann man in bezug auf ihre Oszillogramme beträchtliche Unterschiede feststellen, d. h. auch ihre Störfähigkeit ist verschieden. Dennoch aber weisen ihre Störspannungsozillogramme ähnliche Strukturen auf, und

wird. Je mehr die Lampe von Metall umgeben ist, um so grösser wird die abschirmende Wirkung. Und zwar sinkt der Störpegel nicht nur hinter den Metallteilen, sondern auch in den Richtungen, die durch jene nicht beschattet werden. Der Grund liegt darin, dass nun ein grosser Teil der Feldlinien

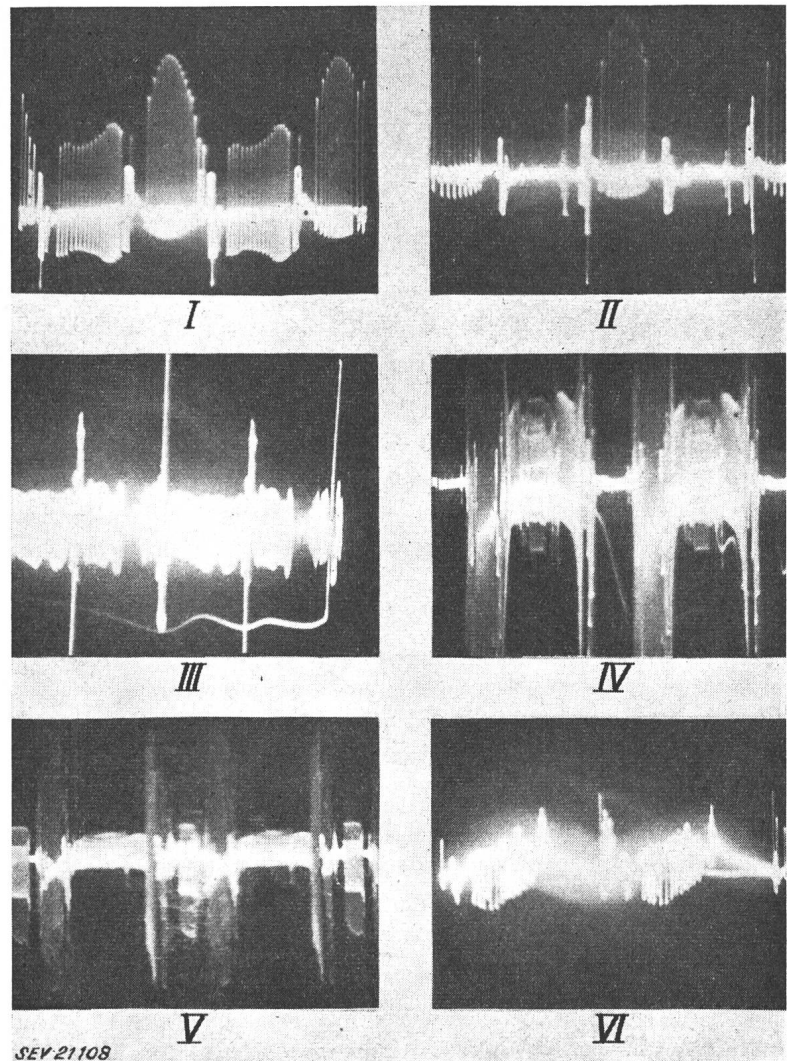


Fig. 8

Störspannungsozillogramme
verschiedener Leuchtstofflampen

I Fabrikat A, Lampe e; II Fabrikat D, Lampe f; III Fabrikat F, Lampe b; IV Fabrikat E, Lampe g; V Fabrikat E, Lampe h; VI Fabrikat E, Lampen f und h zusammen in einer Leuchte mit Metallraster

man kann somit mit einiger Übung ein bestimmtes Fabrikat an Hand seines Oszillogrammes erkennen. Fig. 8 zeigt solche Oszillogramme verschiedener Fabrikate.

e) Einfluss verschiedener Metall-Leuchten auf die Feldverteilung und den Betrag der Störspannungen

Wird eine Leuchtstofflampe nicht mehr allein, sondern zusammen mit einer Leuchte untersucht, so treten in der Feldverteilung und in der Grösse der Störungen starke Veränderungen ein. Für die Praxis ist es von grosser Bedeutung, zu wissen, dass sämtliche sich in der Umgebung der Lampe befindenden Metallteile das Störfeld der Lampe sehr stark beeinflussen. Aus diesem Grunde wurde der Einfluss verschiedener handelsüblicher Leuchten untersucht. Jeder Metallteil, dessen Grösse mit den Abmessungen der Lampe vergleichbar ist, vermindert den Störpegel stark, wenn er zwischen die Lampe und den betreffenden Messpunkt gebracht

nicht mehr durch die Luft, sondern durch das Metall verläuft. Es ist somit klar, dass Leuchten mit geschlossenen Reflektoren und mit Metallraster eine sehr gut abschirmende Wirkung haben. Bei geerdeten Leuchten wird das Feld noch stärker abgeschwächt. Das hat zur Folge, dass die Störungen, die über das Netz in den Empfänger gelangen, beträchtlich zunehmen³⁾. Eine weitere Möglichkeit der Abschirmung ist der Metallstrumpf, der über die Leuchtstoffröhre gestülpt werden kann. Seine dämpfende Wirkung ist sehr gross, doch lassen andere Nachteile diese Anwendung fraglich erscheinen. In Tabelle II sind quantitative Angaben über das Mass der abschirmenden Wirkung von Leuchten und Strumpf festgehalten. Es bedeuten dabei:

Leuchte I: Geschlossene Leuchte mit Metallraster
Leuchte II: Metallrahmen mit Glasscheiben und Plexiglasraster

³⁾ Über diese Zunahme findet man quantitative Angaben in den «Technischen Mitteilungen PTT» Bd. 30(1952), Nr. 8, S. 239: Radioentstörung der Fluoreszenzbeleuchtungsröhren im Bereiche von 150 bis 1500 kHz.

Abschirmende Wirkung von Leuchten und Metallstrumpf
Tabelle II

Lampe	Leuchte I		Leuchte II		Strumpf
	Feldstärke in %				Feldstärke in %
	unter der Lampe	über der Lampe	unter der Lampe	über der Lampe	
ohne Leuchte bzw. ohne Strumpf	100	100	100	100	100
mit Leuchte bzw. mit Strumpf	4	2	37	37	10
Leuchte bzw. Strumpf geerdet	2	1	20	20	2

Die Art des Vorschaltgerätes hat auf das abgestrahlte Störfeld der Lampe keinen Einfluss. Seine eigene Abstrahlung hat keine Bedeutung, da es in den meisten Fällen durch Metall abgeschirmt ist. Hingegen dürfte die Art des Vorschaltgerätes massgebend die Störungen beeinflussen, die über das Netz in den Empfängern gelangen. Als Vergleich mit den obigen Untersuchungen wurde eine Anzahl der untersuchten Lampen mit Gleichspannung betrieben. In sämtlichen Fällen konnten keine Störeffekte festgestellt werden. Daraus geht hervor, dass die Radiostörfähigkeit einer Leuchtstofflampe die Folge der Wiederzündungen in jeder Halbperiode der Wechsellspannung und des damit verbundenen Raumladungsumbaus ist.

Schlussfolgerungen

An Hand der Messresultate lassen sich einige in bezug auf die Verminderung der Störungen nützliche Hinweise bei der Installation von Beleuchtungsanlagen mit Leuchtstofflampen geben.

a) Bestehende Installationen

Störende Leuchtstoffröhren mit einer langen Betriebsdauer sollen ersetzt werden, auch wenn sie als Lichtquellen noch einigermaßen genügen. Mit geeigneten Metall-Leuchten, insbesondere mit solchen, die mit Metallraster versehen sind, können die Störungen stark vermindert werden. Die Netzzuleitungen der Lampen sollten abgeschirmt werden. Sind in einem mit Leuchtstofflampen beleuchteten Raum Radioempfänger mit Zimmerantenne vorhanden, so ist bei der Installation dieser Antenne folgendes zu beachten: Die Antenne soll entsprechend der Feldverteilung der Lampe nicht parallel zu ihr geführt werden, und man lege den grösstmöglichen Abstand zwischen Antenne und Lampe. Auch die Parallelführung von Antenne und Netzzuleitungen der Lampe ist möglichst zu vermeiden. Die Verwendung von Metallteilen im Zimmer als Antenne, z. B. Zentralheizung, soll unterlassen werden.

b) Installationen bei Neubauten

Sind bei einem Wohnneubau Beleuchtungsanlagen mit Leuchtstofflampen vorgesehen, so sollte schon bei der Planung eine gute Entstörung dieser Anlagen ins Auge gefasst werden. Abgeschirmte Netzzuleitungen und abschirmende Leuchten sind auch hier zu empfehlen. Eine weitere wichtige Massnahme bei Neubauten ist die galvanische Verbindung aller im Mauerwerk befindlichen Metallteile (Eisenträger, Armierungseisen, usw.) und deren Erdung an einer gemeinsamen, wirksamen Erde. Das Antennenproblem wird am besten mit einer Hochantennenanlage gelöst, wobei richtig angepasste und abgeschirmte Zuleitungen zu den verschiedenen Empfängern geführt werden müssen. Eine weitere Verminderung der Störungen könnte erreicht werden, wenn auch der Empfänger abgeschirmt würde, soweit dies noch nicht der Fall ist.

Alle hier erwähnten Massnahmen helfen wohl das Mass der Störungen herabsetzen, können aber keineswegs als Lösung des Störproblems angesehen werden. Es sollte vielmehr versucht werden, bei der Herstellung der Lampen die Störquellen zu eliminieren. Dass dies nicht unmöglich ist, beweist der Umstand, dass es heute bereits Fabrikate gibt, die im Vergleich zu andern eine viel kleinere Störfähigkeit besitzen. Dass die Herstellerfirmen Verbesserungen in dieser Hinsicht anstreben, geht daraus hervor, dass die neueren Lampentypen weniger stören als die älteren.

Die Messungen sind am Institut für höhere Elektrotechnik an der ETH (Leitung: Prof. Dr. M. J. O. Strutt) durchgeführt worden.

Adressen der Autoren:

W. Brunhart, dipl. Ing., Institut für allgemeine Elektrotechnik der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 6;
E. Rohner, dipl. Ing., Institut für höhere Elektrotechnik der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 6;
L. Soós, dipl. Ing., Clausiusstrasse 50, Zürich 6.

Rectification

de l'article «Nouveaux matériaux isolants pour la technique des câbles», par R. Goldschmidt, paru dans le Bulletin de l'ASE, t. 44(1953), n° 12, p. 543...551.

L'auteur nous prie de rectifier son article de la manière suivante:

p. 544, colonne gauche, la formule doit être:

$$\ln \frac{\rho_1}{\rho_2} \approx \Theta_1 - \Theta_2$$

p. 546, fig. 4, au milieu:

$$C_{s, phase} \approx \dots \approx \varepsilon \frac{24,2}{\left[\lg \frac{2a}{d} \right] - 0,866 \left(\frac{a}{D} \right)^2}$$