

der Anode erreicht, so geht die Entwicklung des kathodengerichteten Kanals vor sich und führt zu dem beide Elektroden verbindenden Plasmaschlauch. Der vorliegende Vergleich mit den Oszillogrammen liefert darüber hinaus die wichtige Information, daß der anodengerichtete Kanal im Bereich der Raum-

ladungsbremmung seine Entwicklung beginnt, und der kathodengerichtete Kanal im überexponentiell sich entwickelnden Teil des Ionisierungsvorganges abläuft.

Herrn Prof. Dr. H. RAETHER danke ich für die Themenstellung und Förderung der Arbeit.

## Die Erzeugung sehr kurzer und intensiver UV-Lichtimpulse

Von L. FROMMHOLD

Aus dem Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg  
(Z. Naturforsch. **18 a**, 590—593 [1963]; eingegangen am 30. März 1963)

A KERR cell controlled spark light source for the production of  $5 \cdot 10^{-9}$  sec light pulses is described. The quartz ultraviolet region down to 1900 Å wavelength may be transmitted using water as KERR cell liquid. Some properties of a water filled KERR cell are discussed. The KERR constant is found to be  $10 \cdot 10^{-7}$  esu at wavelengths between 2100 and 3000 Å.

Im Rahmen unserer Arbeiten über Gasentladungen werden zur Auslösung eines Stoßionisations-Vorganges eine größere Zahl von Primärelektronen benötigt, die innerhalb eines möglichst kurzen Zeitintervalls aus der Kathode der Entladungsstrecke ausgelöst werden müssen. Dies geschieht im allgemeinen durch sehr kurze Lichtblitze mit großer Intensität im Ultravioletten, um aus Kathoden mit einer Austrittsarbeit zwischen etwa 4 und 6 eV (entsprechend 2000 bis 3000 Å Grenzwellenlänge) mindestens  $10^3$  Photo-Elektronen auslösen zu können.

Gewöhnliche Kondensator- oder Kabel-Entladungen arbeiten jedoch als Lichtquellen nicht zufriedenstellend, weil im Nanosekundenbereich ein Funken wesentlich länger leuchtet, als der elektrische Vorgang dauert<sup>1,2</sup>; so kann man zwar durch eine geeignete Konstruktion die elektrische Entladung hinreichend kurz machen, nicht aber den Lichtblitz, dessen Dauer durch Molekül- und Plasma-Eigenschaften mitbestimmt wird. — Dieser „Leuchtschwanz“ ist offenbar gerade bei Gasen mit hoher Lichtausbeute sowie bei höheren Entlade-Energien ausgeprägt vorhanden<sup>3,4</sup> und muß für unsere Be-

dürfnisse mit einem Kurzzeitverschluß abgeschnitten werden.

KERR-Zellen als Lichtverschlüsse sind in der Literatur häufig beschrieben worden, siehe<sup>5,6</sup>. Da Öffnungszeiten bis herab zu 5 nsec bereits erreicht worden sind<sup>7,8</sup>, erscheint die Anwendung so einer Zelle zur Erzeugung kurzer Blitze ohne Leuchtschwanz aussichtsreich.

Die Auswahl einer geeigneten KERR-Flüssigkeit ist allerdings problematisch. Das meist verwendete Nitrobenzol, die Substanz mit der größten bekannten KERR-Konstante, absorbiert ultraviolettes Licht unter 4200 Å stark<sup>9</sup> und scheidet daher in unserem Falle aus. — Flüssigkeiten mit guter UV-Durchlässigkeit sind aus der UV-Spektroskopie bekannt<sup>10,11</sup>. Die meisten dieser Flüssigkeiten haben eine KERR-Konstante, die um einen Faktor  $10^{-4}$  kleiner ist als die von Nitrobenzol und sind daher praktisch nicht zu gebrauchen. Lediglich Wasser zeigt eine gute UV-Durchlässigkeit bis herab zu 1900 Å, entsprechend einer Quanten-Energie von 6,5 eV, und gleichzeitig eine noch annehmbare KERR-Konstante  $K = 4 \cdot 10^{-7}$  (EsE)<sup>12</sup>, mit „weißem“ Licht gemes-

<sup>1</sup> H. FISCHER, J. Opt. Soc. Amer. **51**, 543 [1961].

<sup>2</sup> G. PORTER u. E. R. WOODING, J. Photogr. Sci. **9**, 165 [1961].

<sup>3</sup> G. JÄGER u. W. OTTO, Z. Phys. **169**, 517 [1962].

<sup>4</sup> L. FROMMHOLD u. H. RAETHER, VI. Int. Kongr. über Kurzzeitphotographie, Den Haag 1962, im Druck bei H. D. Tjeenk Willink & Zn., Haarlem, Niederlande.

<sup>5</sup> F. G. DUNNINGTON, Phys. Rev. **38**, 1506 [1931].

<sup>6</sup> A. M. ZAREM, F. R. MARSHALL u. F. L. POOLE, Electr. Engng. **68**, 282 [1949].

<sup>7</sup> A. M. ZAREM, F. R. MARSHALL u. S. M. HAUSER, Rev. Sci. Instr. **29**, 1041 [1958].

<sup>8</sup> S. M. HAUSER u. H. QUAN, Electronics, August 18th, 1961, p. 56.

<sup>9</sup> LANDOLT-BÖRNSTEIN, Zahlenwerte und Funktionen der Physik, Springer-Verlag, Berlin 1951.

<sup>10</sup> M. PESTEMER, Angew. Chem. **63**, 118 [1951]; **67**, 740 [1955].

<sup>11</sup> A. WEISSGERBER u. M. PROSKAUER, Organic Solvents (Technique of Organic Chemistry, Vol. 7), Interscience Publ., New York 1955.

<sup>12</sup> M. PAUTHENIER, C. R. Acad. Sci., Paris **172**, 583 [1921].



sen; dies ist etwa ein hundertstel der KERR-Konstanten von Nitrobenzol. Wegen dieser Eigenschaften haben wir einen Verschuß mit Wasser aufgebaut.

Nach einem älteren Vorschlag<sup>13</sup> haben wir früher Chloroform als KERR-Flüssigkeit verwendet<sup>4</sup>, das spektroskopisch rein erhältlich und bis etwa 2500 Å, entsprechend 5 eV, brauchbar ist. Die Photonenabsorption blieb in diesem Fall jedoch zu gering, so daß besonders sensibilisierte Kathoden verwendet werden mußten. — Neuerdings sind Flüssigkeiten bekanntgeworden, die relativ große KERR-Konstanten zeigen und im nahen Ultraviolett, aber auch nur bis herab zu max. 2500 Å, durchlässig sind<sup>14</sup>.

### I. Wasser als Kerr-Flüssigkeit

Von einer Flüssigkeit, die in einem elektro-optischen Verschuß arbeiten soll, muß man verlangen, daß sie in der erforderlichen spektralen Reinheit erhältlich oder leicht herstellbar ist und daß die elektrische Leitfähigkeit hinreichend niedrig ist, damit der Hochspannungsimpuls an der Zelle überhaupt entstehen kann und damit eine störende Erwärmung in der Zelle vermieden wird. Auch soll die UV-Durchlässigkeit, sowie eine genügend kleine Leitfähigkeit, möglichst längere Zeit in der gefüllten Zelle bestehenbleiben. Der Leitwert der Zelle soll auch bei den kurzen Öffnungsimpulsen, das heißt bei hohen Frequenzen, ein bestimmtes Maß nicht überschreiten, und schließlich soll die Relaxationszeit der Dipole hinreichend klein sein, um den Verschuß in etwa  $10^{-9}$  sec voll öffnen zu können.

Diese Forderungen sind mit Wasser alle zu erfüllen. — Um die Durchlässigkeit des ganzen Quarz-UV zu erhalten, genügt nach unserer Erfahrung ein einfaches Destillieren von Leitungswasser<sup>15</sup>. — Besteht die Zelle nur aus Glas (G 20), Quarzglasfenstern und den Silberelektroden, so bleibt die UV-Durchlässigkeit der mit Wasser gefüllten Zelle wochenlang erhalten, und ebenso verschlechtert sich das elektrische Leitvermögen nicht wesentlich. Dieses bleibt unter  $10^{-5} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , entsprechend einem Widerstand von 40 k $\Omega$  für die unten beschriebene Zelle, und stört bei den kurzen Öffnungszeiten und niederohmigen Impulsgeneratoren (25  $\Omega$  Innenwiderstand) nicht. Auch der Verlustwinkel bei hohen

Frequenzen ist hinreichend klein ( $\tan \delta = 10^{-2}$  bei 100 MHz)<sup>16</sup>, entsprechend einem Parallelwiderstand von 4 k $\Omega$ . Die Relaxationszeit der Wasserdipole ist etwa  $10^{-11}$  sec, wie wir aus dem Frequenzverlauf der Dielektrizitätskonstanten<sup>16</sup> berechnen. — Lediglich die hohe Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon = 78$  bei 25 °C) kann stören, weil sich hohe Kapazitäten ergeben.

In dem uns interessierenden Spektralbereich des Quarz-UV ist die KERR-Konstante  $K$  von Wasser bisher nicht gemessen worden. Aus theoretischen Gründen<sup>17</sup> erwartet man annähernd eine Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  nach der Formel

$$K = h (n^2 - 1)^2 / n \lambda,$$

wobei  $h$  die sogenannte HAVELOCKSche Konstante und  $n$  den Brechungsindex bedeuten. Mit abnehmender Wellenlänge wird  $K$  also zunehmen und wir erwarten im Quarz-UV eine etwa doppelt- bis dreifach vergrößerte KERR-Konstante als bei „weißem“ Licht. Dies konnten wir tatsächlich bestätigen aus der Messung der „Hellspannung“  $U_{\text{Hell}}$ , das ist diejenige Spannung, für die die Zelle voll geöffnet ist:

$$U_{\text{Hell}} = 300 d / \sqrt{2 K l}$$

( $d$  = Plattenabstand,  $l$  = Länge des Lichtweges im elektrischen Feld, beides in cm). Für etwas größere oder kleinere Spannungen wird keine volle Durchlässigkeit der Zelle erreicht, so daß das Maximum einfach bestimmt werden kann. Diejenige Spannung, für die die meisten Photoelektronen ausgelöst werden, haben wir der Hellspannung gleichgesetzt und daraus mit der unten beschriebenen Zelle eine „mittlere“ KERR-Konstante  $K$  von etwa  $10 \cdot 10^{-7}$  (EsE) für Wasser im UV von etwa 2100 bis 3000 Å erhalten. — Das gleiche Verfahren haben wir zur Kontrolle auch auf mehrere Flüssigkeiten mit bekannter KERR-Konstante erfolgreich angewendet, sowohl im UV wie mit Photozellen im sichtbaren Spektralbereich.

### II. Zur Apparatur

Eine Übersicht über die verwendete Anordnung ist in Abb. 1 wiedergegeben. Die Einzelteile sollen hier kurz besprochen werden.

<sup>13</sup> J. W. BEAMS, Phys. Rev. **35**, 24 [1930].

<sup>14</sup> S. M. HAUSER u. F. R. MARSHALL, Contract AF 33 (616)-6669, Electro-optical Systems, Inc., Pasadena, Calif., USA.

<sup>15</sup> Bei andersartig verunreinigtem Wasser kann aber mehrfaches Destillieren nötig werden<sup>10</sup>. — Zum Auffangen und Aufbewahren des Destillates sind nur Flaschen aus Hartglas mit eingeschlifften Stopfen brauchbar; die meisten

Kunststoffflaschen, Korken, Gummistopfen und gefetteten Schliffe zerstören die UV-Durchlässigkeit sofort.

<sup>16</sup> „Dielectric Materials and Applications“, Herausg. A. von Hippel, New York 1958.

<sup>17</sup> G. SZIVESSY, Handb. d. Physik XX, Licht und Materie, Springer-Verlag, Berlin 1929, S. 724.

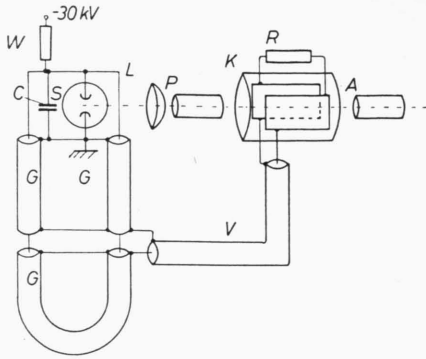


Abb. 1. Übersicht. Links im Bild ist der Hochspannungsimpulsgenerator mit den Impulsstrecken G, der Schalt- und Beleuchtungsfunkstrecke S und einem Kondensator C zur Aufhellung des Funkens dargestellt, rechts der optische Teil mit der Quarzlinse L, Polarisator P, KERR-Zelle K und Analysator A. V ist ein Verzögerungskabel und R dessen Abschlußwiderstand.

Die KERR-Zelle besteht aus Glas und versilbertem Messing, die Elektroden sind zur Entspiegelung mit Silbersulfid überzogen. Die Länge des Lichtweges im elektrischen Feld ist 3 cm, der Plattenabstand 3 mm und die Höhe 5 mm; für volle UV-Durchlässigkeit sind 40 kV Hellspannung erforderlich. Der Gleichstrom-Innenwiderstand der mit Wasser gefüllten Zelle ergab sich zu etwa 40 k $\Omega$  bei einer Kapazität von 40 pF.

Der verwendete Impulsgenerator ist von HULL<sup>18</sup>,<sup>19</sup> angegeben worden, Abb. 2 a. Diese etwas unübersichtliche Anordnung kann formal ersetzt werden durch ein gewöhnliches Kabel mit doppeltem Wellenwiderstand, doppelter Länge, dessen eine Hälfte mit der doppelten Spannung (!) aufgeladen ist, Abb. 2 b. — Wählt man

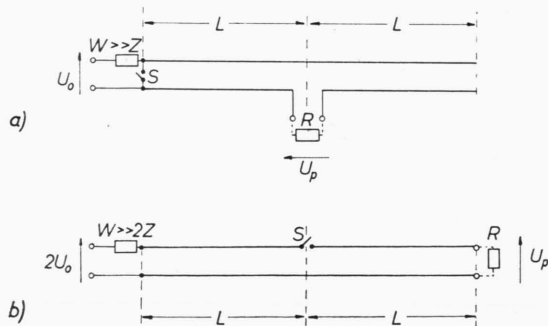


Abb. 2. Schema des Impulsgenerators (a) und seines Ersatzschaltbildes (b). Es bedeuten:  $L$  = Kabellänge,  $W$  = Hochohmwiderstand,  $Z$  = Wellenwiderstand des verwendeten Kabels,  $R$  = Arbeitswiderstand,  $S$  = Schaltfunktionstrecke,  $U_0$  = Speisespannung und  $U_p$  = Impulsspannung.

den Widerstand  $R$ , an dem sich die Spannung  $U_p$  aufbaut, gleich  $2Z$ , so entsteht ein einfacher Rechteck-Impuls der Länge  $2L$  und der Amplitude  $U_0$  an  $R$ . — Nach dem Vorschlag von HULL wählt man aber zweck-

mäßig  $R = 4Z$  und es entsteht ein Rechteck-Impuls größerer Amplitude,  $U_p = 4U_0/3$ , gefolgt von Reflexionen, deren Amplitude jeweils  $1/3$  der vorangegangenen beträgt. Diese reflektierten Impulse sind optisch fast unmerkbar, weil mit abnehmender Spannung die Transmittanz einer KERR-Zelle stark abnimmt. Die erste Reflexion wird noch mit 3% der Spitzen-Helligkeit durchgelassen, die folgenden sind optisch unsichtbar. Praktisch besteht der Generator aus vier parallel geschalteten Kabelstücken<sup>20</sup> RG 58 A/U mit einem resultierenden Wellenwiderstand  $Z$  von 13  $\Omega$  und einer Länge  $2L = 90$  cm, entsprechend einer Impulslänge von 4,5 nsec.

Verwendet man, wie wir es getan haben, den Schaltfunken  $S$  gleichzeitig als Lichtquelle (zum Zweck der vergrößerten Lichtausbeute wurde ein Kondensator von 500 pF der Strecke  $S$  parallel geschaltet), so muß sich die Zelle um mindestens 5 nsec später öffnen als der Impuls an  $R$  entsteht, weil die Helligkeit des Funkens während dieser Zeit noch ständig zunimmt. Statt des Widerstandes  $R$  nehmen wir ein Verzögerungskabel mit dem Wellenwiderstand  $2Z$  (bestehend aus zwei parallelen Stücken RG 58 A/U von je 1,33 m Länge), das mit einem Widerstand von  $4Z = 52 \Omega$  abgeschlossen wird. Die Amplituden der erwähnten Reflexionen bleiben dadurch unverändert, lediglich ihr zeitlicher Abstand wird vergrößert. — Die Speisespannung  $U_0$  beträgt 30 kV, die Impulsspannung 40 kV.

Die Schaltfunkenstrecke  $S$  besteht aus zwei halbkugelförmigen Elektroden aus rostfreiem Stahl von 2 cm Durchmesser; sie ist triggerbar und in einem Druckgehäuse untergebracht, das mit 12 Atmosphären Stickstoff mit Argon-Zusatz gefüllt wird. Der Leuchtverlauf ist etwa exponentiell abfallend mit einer Zeitkonstante von 60 nsec.

Als Abschlußwiderstände  $R$  haben sich am besten bestimmte Kohleschichtwiderstände bewährt. Widerstände mit schwacher Wendelung verdienen den Vorzug vor ungewendelten, weil diese meist eine dickere Schicht haben und die Impulsbelastung besser aushalten. Sie wurden vorher ausgeheizt und in eine Neopren-Masse eingebettet.  $R$  wurde durch 4 parallele Widerstände à 200  $\Omega$ , 2 Watt, realisiert. Der Hochohm-Vorwiderstand  $W$  wurde ähnlich präpariert.

Die Polarisationsprismen sind GLAN-THOMSON-Prismen aus Kalkspat mit einer optischen Öffnung von  $10 \times 10$  mm<sup>2</sup>. Diese absorbierten 50% des durchfallenden Lichtes einer Polarisationsrichtung bei einer Wellenlänge von 2150 Å. Diese Grenzwellenlänge ist etwas höher als die des Wassers in der KERR-Zelle. — Besser geeignet wären WOLLASTON-Prismen aus Quarz.

### III. Ergebnisse

Wir prüfen die Lichtquelle in zwei Schritten:  
1. mit einem Photomultiplier 56 AVP (der allerdings nur Licht mit über 3000 Å Wellenlänge regi-

<sup>18</sup> J. A. HULL, Thesis, University of New Mexiko 1956.

<sup>19</sup> G. A. THEOPHANIS, Rev. Sci. Instrum. **31**, 427 [1960].

<sup>20</sup> Jedes in Abb. 1 gezeichnete Kabelstück besteht tatsächlich aus zwei parallelen Stücken.

striert) und einem 1000 MHz-Oszillographen. Es ergeben sich hinter der mit Wasser gefüllten KERR-Zelle Lichtimpulse von 6 nsec Halbwertsbreite, Abb. 3, die aus dem viel länger leuchtenden Funkenlicht herausgeschnitten waren. Ein verbleibender Leuchtschwanz, der nur einige Prozent der gesamten Intensität enthält, ist hauptsächlich auf die Reflexio-

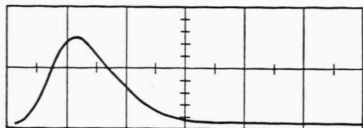


Abb. 3. Zeichnung eines Lichtimpulses nach einem Oszillogramm mit einer Halbwertsbreite von 6 nsec; die Zelle war mit Wasser gefüllt.

nen des Impulsgenerators zurückzuführen; die Durchlässigkeit der gesperrten Zelle beträgt nur einige  $10^{-4}$ . — 2. Der UV-Anteil des Lichtes wurde wie früher<sup>21</sup> mit Elektronenlawinen untersucht und ergab eine Bestätigung dieser Daten, wenn auch mit

geringerer Meßgenauigkeit. — Die Ausbeute im UV, gemessen durch die Zahl der pro Blitz ausgelösten Photoelektronen aus einer Messingkathode, war etwa  $10^3$ .

Die geringfügige Diskrepanz zwischen der berechneten (4,5 nsec) und der gemessenen (6 nsec) Halbwertsbreite des Lichtimpulses erklärt sich durch die endliche Impulsbreite des verwendeten Photomultipliers. Diese ist etwas größer als 3 nsec<sup>22</sup>. Nimmt man an, daß ein Multiplier-Impuls annähernd einer GAUSSschen Glockenkurve mit 3 nsec Halbwertsbreite entspricht, das Oszillogramm der Abb. 3 einer Glockenkurve mit 6 nsec, so berechnen wir eine tatsächliche Impulsbreite des Lichtes von etwa 5 nsec in Übereinstimmung mit der verwendeten Kabellänge.

Der Verfasser dankt Herrn Professor Dr. H. RAETHER für Anregungen und Förderung herzlich. Ferner ist er vielen Institutsmitgliedern, insbesondere Herrn Dr. W. LEGLER, für wertvolle Diskussionen und apparative Hilfe dankbar.

<sup>21</sup> L. FROMMHOLD, Z. Phys. **160**, 554 [1960].

<sup>22</sup> C. CERNIGOI, I. GABRIELLI u. G. HERNETTI, Nuclear Instr. Meth. **9**, 303 [1960].