

Sonderdruck aus dem Jahrbuch 1968
der Technischen Hochschule Darmstadt

Kurzzeit-Plasma-Forschung

Prof. Dr.-Ing. Heinz Fischer

Lehrstuhl für Angewandte Physik

Prof. Dr.-Ing. Heinz Fischer

Kurzzeit-Plasma-Forschung

Der Lehrstuhl wurde im Herbst 1963 gegründet und in kleinen Schritten während der nächsten 4 Jahre aufgebaut. Durch die verständnisvolle Förderung des Hessischen Kultusministeriums, die freundlichen Beihilfen der Vereinigung der Freunde der Technischen Hochschule, vor allem jedoch durch die umfangreiche Unterstützung der Cambridge-Forschungslaboratorien der US Airforce in Bedford Mass. konnte eine Reihe von modernen Forschungslaboratorien eingerichtet werden.

Derzeitiges Ziel der Forschung sind Hochdruck-Kurzzeit-Plasmen extrem hoher Energiedichte und maximaler Temperatur. Am Lehrstuhl werden zur Zeit 5 experimentelle Doktorarbeiten und 8 Diplomarbeiten ausgeführt. Ziel eines Forschungskontraktes mit der US Airforce sind Versuche zur Erzeugung von lichtstarken Subnanosekunden-Lichtpulsen (1 Nanosekunde = 10^{-9} Sekunden). Der Lehrbetrieb umfaßt Vorlesungen über Plasma- und Laserphysik.

Voraussetzung moderner experimenteller Forschung aus der angewandten Physik ist heute eine auf dem letzten technologischen Stand befindliche apparative Ausrüstung, vor allem jedoch die Fähigkeit, ein Team von Spezialisten innerhalb der anfallenden Teilaufgaben aufzustellen. Bei dem scharfen Wettbewerb ist es dabei aussichtslos, mit einem kleinen Team ohne entsprechende finanzielle Hilfsmittel Probleme anzugreifen, welche bereits zu Be-

ginn des Vorhabens allgemein als interessant angesehen werden. Solche Probleme werden von den stärkeren Teams mit Zeitvorsprung gelöst. Aussicht auf eigenen Erfolg verlangt somit heute mehr denn je eine frühzeitige Analyse der eigenen Qualifikationen und der verfügbaren Hilfsmittel.

Die Arbeitsrichtung des Lehrstuhls war durch meine frühere Tätigkeit bei der US Airforce-Forschung gegeben. Ich hatte dort Kurzzeitplasmen extrem hoher Energiedichte betrieben. Nach meinem Weggang hat die Airforce meine Laboratoriumsausrüstung nach Darmstadt zur Verfügung gestellt. Wegen unzureichender finanzieller Mittel, wegen Mangel an Raum und wegen meinen jungen, noch in der Ausbildung befindlichen Mitarbeitern, konnten zunächst nur bescheidene Forschungsprobleme in Angriff genommen werden. Inzwischen sind die Vorhaben ehrgeiziger geworden. Ich darf darüber kurz berichten und einige Ergebnisse herausgreifen.

Problematik

Als interessantes Problem der Plasmaphysik erscheint die Frage nach der oberen Grenze der möglichen Energiedichten und der damit gekoppelten maximalen Temperaturen in Kurzzeit-Funkenkanälen hoher Gasdichte. Die Energiedichten sind andererseits durch den Anstieg des Strompulses bestimmt.

Bei ausreichend niedrigem Funkenwiderstand ist der Strom-Anstieg gegeben durch das Verhältnis U/L , d. h. durch die Durchbruchspannung U , geteilt durch die Induktivität L . Ich selbst hatte in den USA Vorarbeit in der Entwicklung von Kondensatorkreisen minimaler Induktivität geleistet und Gesamt-Induktivitäten von etwa

1 Nanohenry = 10^{-9} Henry einschließlich der Funkenstrecke erreicht.

Bei einer Durchbruchspannung von 5 kV ist somit der mögliche Stromanstieg wesentlich über 10^{12} Amp/sec; d. h. nach einer Nanosekunde können in einem Funkenkanal bereits Ströme von mehreren 1000 Amp fließen. Bei 100 Nanosekunden würde der Strom 10^5 Amp betragen, vorausgesetzt, daß der Kondensator genügend elektrische Ladung speichert. Andererseits läßt sich die Gesamt-Entladungsdauer durch die Verkleinerung der Kondensatorkapazität bis auf 1 Nanosekunde oder kürzer reduzieren.

Nanolite

Eine solche Kurzzeit-Entladung mit maximalem Stromanstieg ist beispielsweise die Nanolite (Journ. Opt. Soc. Am. 57, 543 [1961]), welche vorwiegend Anwendung als lichtstarke Nanosekunden-Lichtquelle findet. Zur Reduktion der Induktivität ist der Kondensator auf ein zylindrisches Rohr aufplatiert und der Strom coaxial in eine

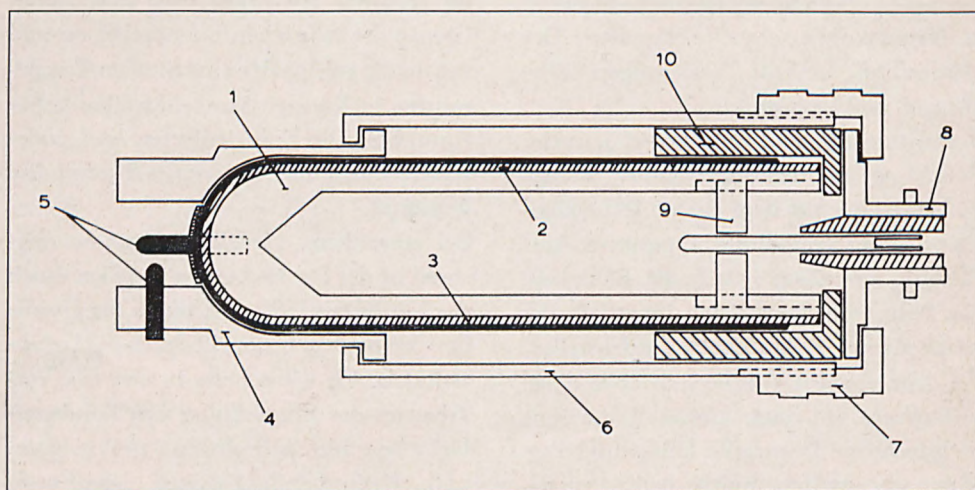
Druckfunkenstrecke eingespeist. Die Entladungsdauern liegen zwischen 2 und 20 Nanosekunden.

Die elektrischen Puls-Energien sind klein und liegen unter 10^{-1} Joule pro Puls, doch sind die elektrischen Leistungen in der Größenordnung von 10 Megawatt = $10 \cdot 10^6$ Watt und die maximale Lichtleistung knapp unter einem Megawatt. Wegen der geringen Pulsenergie und der kurzen Dauer sind Pulsfolgen von über 10 000 pro Sekunde möglich. Ausreichend zum Betrieb mit solchen Pulsfolgen ist ein einfaches Gleichstrom-Hochspannungsgerät (Journ. Appl. Phys. 3, 1235 [1964]).

Der gesamte Stromkreis einschließlich Kondensator wiegt dabei weniger als 100 Gramm und könnte auf 50 Gramm reduziert werden. Die erzielten Leuchtdichten, entsprechend den Entladungsbedingungen (Druck und Spannung), liegen im Bereich von 20 bis 50 Millionen Stilb und übertreffen somit die Leuchtdichte der Sonne um über 2 Zehnerpotenzen. Die Nanolite wird benötigt zur Photographie

Bild 1: Schematische Darstellung der Nanolite

1) Metallrohr, 2) Isolation, 3) Silberbelag, 4) Metallklappe, 5) Elektroden, 6) Gehäuse, 7) Gehäuse, 8) Gehäuse, 9) Gehäuse, 10) Gehäuse



von ultraschnellen mikroskopischen Teilchen und hat Bedeutung in Windkanälen, welche die Vorgänge beim Wiedereintritt von Satelliten in die Atmosphäre studieren.

Wir haben mit der Nanolite in Darmstadt weiter experimentiert, weil sie verfügbar war, weil diese Untersuchungen nicht viel kosten und weil wir auf diesem Gebiet der stromstarken Nanosekundenentladung zunächst ohne Konkurrenz waren.

Bild 1 zeigt die schematische Skizze einer Nanolite. Sie wird zum Studium des Emissionsverhaltens von verschiedenen Gasen mit einer Druckkappe versehen. Die spektrale Emission wird beobachtet, zeitlich aufgelöst mit Hilfe von schnellen Photodioden bzw. schnellen Photomultipliern. Gestalt und optische Erscheinung des Funkenkanals werden photographiert unter Verwendung von elektrooptischen Kurzzeitverschlüssen, beispielsweise Kerrzelle oder Bildwandler.

Die unverzerrte photoelektrische Beobachtung im Nanosekundenbereich bringt noch immer Probleme. Die exakte Zeituordnung der elektrooptischen Verschlüsse mit der elektrischen Entladung macht Schwierigkeiten. Das Problem wurde in unserem Falle durch Pulsen der Nanolite gelöst und Zeituordnungen von der Genauigkeit von etwa 10^{-10} Sekunden erzielt.

Kurzzeit-Photographie

Bild 2 zeigt die Photographie einer Strahlzerstäubung bei der Injektion einer Flüssigkeit aus einer 2 mm Düse, oben im Bild (Chemie — Ingenieur — Technik 34, 118 [1962]). Die Injektionsgeschwindigkeit ist hier 5,5 m/sec. Die Belichtungszeit, gegeben durch die Blitzdauer der Nanolite, war etwa 20 nsec. Bei einem Durchmesser der kleinsten beobachteten Teilchen von etwa

10 Mikron = 10^{-3} cm und einer angenommenen Geschwindigkeit von 100 m/sec kann man leicht ausrechnen, daß eine Belichtung von länger als 25 nsec bereits eine Bewegungsunschärfe zeigen müßte. Man nimmt bei dieser Berechnung einfach an, daß ein Teilchen sich während der Belichtungszeit nicht mehr als 10 % seines Durchmessers bewegen darf.

Bild 2: Strahlenzerstäubung bei Injektion von Flüssigkeit



Nanosekunden-Funkenkanäle und Erosion Bild 3 demonstriert die Entwicklung eines Nanolite-Funkenkanals in Luft, fotografiert in aufeinanderfolgenden Einzelaufnahmen durch einen Kerrzellen-Verschluß mit konstanter 8 nsec-Öffnung. Die Aufnahmen oben beginnen bei der Zeit des ersten Durchbruchs — in der Folge genannt Zeit 0 — und reichen bis in das späte Nachleuchten. Der elektrische Entladungsstrom hat sein Maximum nach 8 nsec, schwingt leicht durch und geht gegen Null nach 25 nsec. Interessant an dieser Aufnahmenreihe ist die zeitliche Entwicklung der optischen *Anoden-Erscheinung*. Die Anode ist in allen Bildern unten. Der Elektrodenabstand beträgt 0,85 mm.

Wie ersichtlich, entwickelt sich nach etwa 8 nsec ein Anodenfleck konstanter Größe, während sich der Kanal zu diesem Zeitpunkt mit etwa $5 \cdot 10^5$ m/sec weiter ausdehnt. Nach etwa 50 nsec verändert sich jedoch der Anodenfleck in eine baumartige Explosionswolke. Das heißt, offenbar findet aus dem Anodenfleck eine *gerichtete Explosion* des Elektroden-Materials etwa 30 bis 40 nsec *nach dem Strommaximum* statt. Die Explosionswolke steht praktisch unverändert bis zur Zeit von über 250 nsec nach dem Beginn der Entladung; — siehe auch Applied Optics 6, 2117 (1967).

Ein solcher gerichteter Explosions-Prozeß an der Anode war bereits theoretisch vorhergesagt, konnte jedoch bisher noch nicht beobachtet werden, weil die verfügbaren Entladungen zeitlich zu lang waren und möglicherweise auch zu geringe Stromdichten hatten. Es liegen Theorien vor, welche nahelegen, daß durch den Eintritt der Elektronen eine dünne Oberflächenschicht der Anode schmilzt. Der hierdurch entstehende *Leitfähigkeits-Sprung* zum ungeschmolzenen Teil der Anode soll die

Explosion verursachen, welche nach der Theorie einen charakteristischen Zeitverzug gegenüber dem Stromfluß haben muß.

Eine Doktorarbeit am Lehrstuhl untersucht systematisch den Einfluß von Elektroden-Material, Gas, Stromstärke und Stromdauer auf das beobachtete Erosions-Phänomen unter Hinzunahme von zeitaufgelöster Spektroskopie und Schlierentechnik. Es wird erwartet, daß durch diese Untersuchungen der primäre Mechanismus der Elektroden-Erosion stromstärker elektrischer Entladungen verstanden wird. Die Erosion ist andererseits für alle technischen Anwendungen von elektrischen Entladungen eine bestimmende Größe.

Die genannte Aufnahmetechnik erlaubt fernerhin, die in der Literatur oft beschriebenen, jedoch im Einzelfall kaum völlig verstandenen Plasma-Instabilitäten in ihrer Entwicklung von Beginn an im Detail zu studieren.

An dieser Stelle darf noch kurz bemerkt werden, daß wegen des kurzzeitigen Stromimpulses die Erosion der Nanolite um Größenordnungen geringer ist als bei Entladungen mit längerer Dauer. Die Nanolite kann daher ohne Wartung mit vielen Millionen Entladungen betrieben werden.

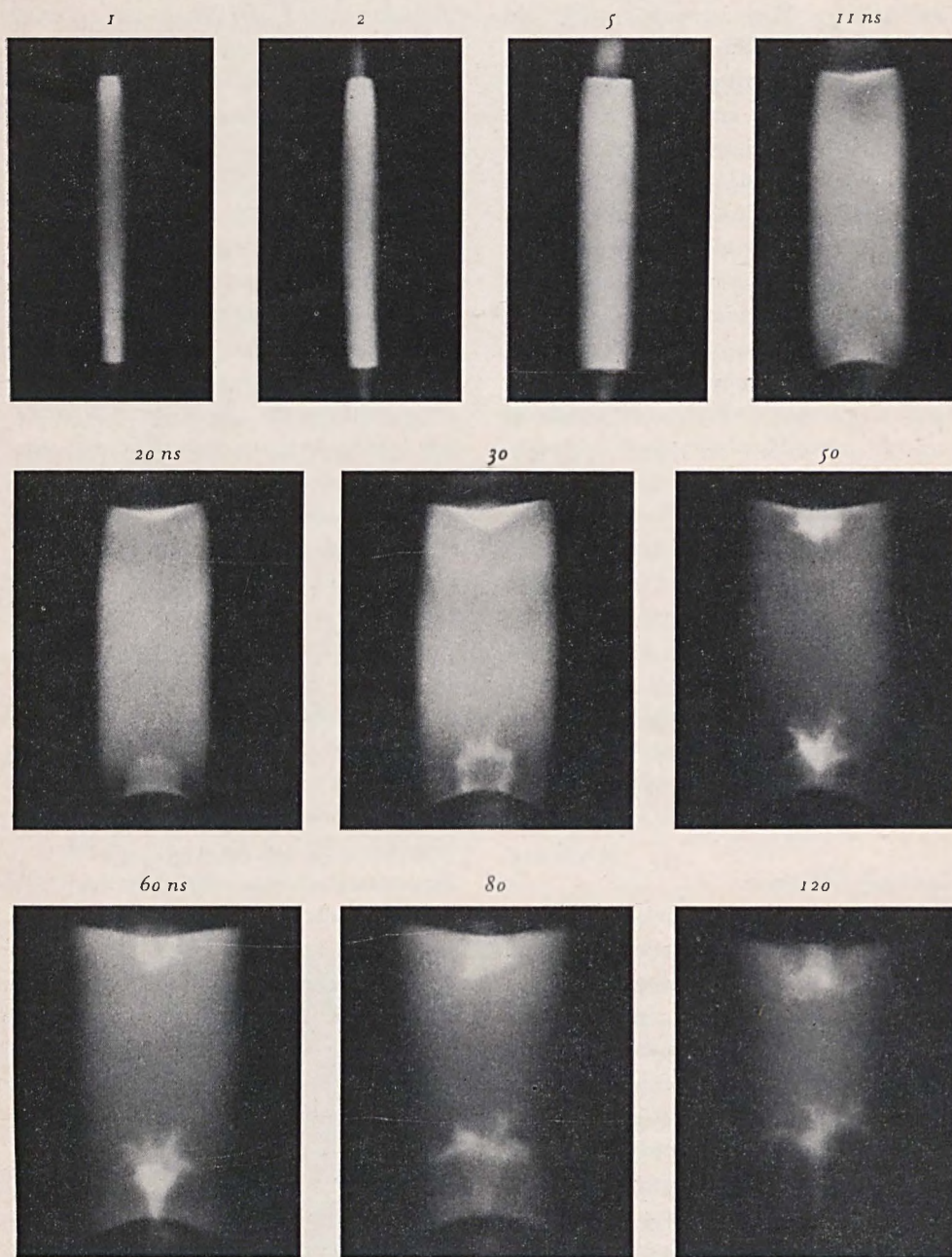
Vorgänge im Nanosekunden-Plasma

Zum Verständnis der Physik des Nanosekunden-Funkenkanals und seiner Expansion ist es zunächst wichtig, zu ermitteln, ob das Funkenplasma unter den vorgegebenen Versuchs-Parametern trotz der sehr kurzen Zeit sich schon im *quasithermischen Gleichgewicht* befindet. In der Sprache der Physiker heißt das, ob die im Funkenplasma stattfindenden Prozesse in ihrer Häufigkeit durch eine gemeinsame thermisch-statistische Boltzmann-Verteilung

bestimmt werden, so daß man von einer gemeinsamen *Plasmatemperatur* sprechen kann. Ein Teil dieser Annahme wäre, daß

beispielsweise die Elektronen, Ionen und restlichen Gasatome eine gemeinsame kinetische Temperatur besitzen. Die Strah-

Bild 3: Zeitliche Entwicklung von Nanosekunden-Funkenkanälen und explosive Anoden-Erosion



lung andererseits braucht *nicht* mit der kinetischen Energie im thermischen Gleichgewicht zu sein. Infolge der hohen Gasdichten (Stoßzahlen) und der großen, von den Mikrofeldern der Elektronen und Ionen herrührenden Wirkungsquerschnitte sind Relaxationszeiten (Einstellzeiten) des thermischen Gleichgewichts von kürzer als einer Nanosekunde zu erwarten. Vorläufige spektrale Untersuchungen scheinen diese Annahme zu bestätigen. Aus der beobachteten Leuchtdichte in der Nanolite werden von uns, entsprechend den Versuchsparametern, Temperaturen zwischen 30 000 und 60 000 Grad Kelvin geschätzt.

Bei den angenommenen Gasdichten und Temperaturen stammen die emittierten spektralen Linien des Füllgases weitgehend von ionisierten Zuständen und sind während des Stromdurchgangs durch ein kontinuierliches kombiniertes Brems- und Rekombinations-Spektrum weitgehend überdeckt. Dadurch ist die Analyse der Temperatur außerordentlich erschwert. Das Bremsstrahlungs-Spektrum andererseits kommt durch die Bewegung der Elektronen und Ionen im gegenseitigen Wechselfeld zustande und ist somit ein direktes Maß für den Bewegungszustand der Ladungsträger.

Spektrale Sättigung

Interessant erscheint das am Lehrstuhl studierte Phänomen der spektralen Sättigung, als dessen Folge mit zunehmendem Gasdruck und zunehmender Spannung der Funkenkanal zunächst im infraroten, dann im sichtbaren Spektralbereich optisch undurchlässig wird. Diese Sättigung erfährt den genannten Spektralbereich, d. h. die Linien ebenso wie das Kontinuum; — siehe auch Applied Optics 6, 935 (1967). Die optische Ausstrahlung nähert sich damit

der eines schwarzen Strahlers. Opazitätsmessungen aus den Intensitätsprofilen lassen erkennen, daß die Strahlung nur von einer dünnen Oberflächenschicht des Gases ausgeht. Die meisten Sterne sind Oberflächenstrahler. Unser Plasma nimmt somit gewisse optische Eigenschaften von Sternatmosphären an. »Fraunhofersche« Linien in Selbstumkehr können beobachtet werden.

Zeitliche Trägheit der Ausstrahlung

Im Bereich der Sättigung wird ein nennenswerter Teil der Strahlung innerhalb des zylindrischen Funkenkanals *gespeichert* und erst nach Abschalten des Stromimpulses mit einer meßbaren zeitlichen Verzögerung emittiert. Die Strahlung und die damit gekoppelte gespeicherte Energie, ebenso wie die Ionisation und die kinetische Energie der Ladungsträger, ist der Grund, warum es grundsätzlich schwierig ist, Nanosekunden-Lichtpulse mit extrem großer Intensität, jedoch mit verschwindendem Abkling-Lichtschwanz zu erzeugen.

In anderen Worten, je höher die Pulsenergie, desto größer die Speicherung, desto länger der Abklingschwanz. Man spricht von Stoßprozessen des *internen* Pumpens. Solche sekundären Prozesse verursachen nicht nur die erwähnten Schwänze, sondern bedeuten möglicherweise ernste Schwierigkeiten in der Anwendung der bekannten spektroskopischen Methoden zur Temperaturbestimmung. Verschiedene Arbeiten am Lehrstuhl beschäftigen sich mit der Analyse solcher kurzzeitiger interner Pumpvorgänge und deren Einfluß auf die spektrale Temperaturbestimmung.

Schockwelle

Eine Methode zur Temperaturbestimmung beobachtet die Kanal-Expansion. In Bild 3

sehen wir die sehr rasche Expansion des Mechanismus schon viel spekuliert wurde. Die initialen Funkenkanals, über dessen Mechanismen Theorien von Braginskii und der Drabkina stellen die Expansion des Funkenkanals als rein thermischen Vorgang dar, der eine sich vom Kanal ablösende Schockwelle verursacht.

Eine detaillierte Beobachtung der Schockwelle würde die Prüfung der Braginskischen Theorie ermöglichen und dabei Aussagen über die Kanaltemperatur erlauben. Unsere unmittelbare Frage ist, wieweit gelten die Annahmen der Theorie für sehr stromstarke Nanosekunden-Kanäle?

Bild 4 zeigt die von Schönbach am Lehrstuhl vor einigen Tagen mittels Toeplerscher Schlierentechnik beobachtete Schockwelle in einem Nanolite-Kanal. Die Ergebnisse wurden bisher nicht analysiert. Bemerkenswert an der Aufnahme erscheint uns die erzielte Zeitzuordnung der verschiedenen Vorgänge.

Bei der Aufnahme in Bild 4 wurde zunächst die die Schockwelle produzierende Nanolite getriggert; genau 430 nsec später wurde die zweite Nanolite getriggert, welche über die Schlieren-Optik die Schock-

welle beleuchtete. Nach weiteren 5 nsec wurde der 8 nsec-Kerrzellen-Verschluß geöffnet, welcher die Zeit der Beobachtung der Schockwelle festlegte.

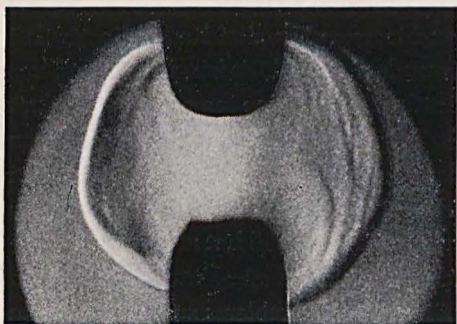
Meines Wissens ist dies die erste Schlierenaufnahme solcher Art. Mein früherer Mitarbeiter C. C. Gallagher in Bedford hatte die Trigger-Elektronik entwickelt.

Optisches Nahentfernungs-Radar

Zum Schluß möchte ich noch kurz berichten über die Anwendung des Lichtpulses von sehr kurzzeitigen Funken in einem optischen Nahentfernungs-Radar. Das System ist im Prinzip recht *einfach*. Das von der Nanolite ausgestrahlte und vom Ziel reflektierte Licht wird mit einem schnellen Photomultiplier oder Diode empfangen und die Laufzeit des Lichtes vom Sender über das Ziel zurück zum Empfänger gemessen. Je geringer die Entfernung, desto einfacher wird im Prinzip das System, denn desto höher ist die Echo-Amplitude. Ein gewisses Problem bereitet andererseits das innerhalb des Lichtwegs zurückgestreute Licht, welches den Störpegel des Empfangs erhöht. Ein wesentliches weiteres Problem der Messung war bisher der Mangel eines relativ einfachen, leichtgewichtigen Zeitmeßgerätes im Nanosekunden-Bereich.

Bild 5 demonstriert die *Genauigkeit und Stabilität* mehrerer Entfernungsmessungen unter Verwendung der Nanolite. Beobachtet wird das Echo von einem vorgegebenen Ziel zuerst in 20 m und dann in 20,3 m Entfernung. Ziel war ein hellgrauer Karton von 55×75 cm Größe. Aufgenommen wurde der reflektierte Lichtpuls über eine koaxiale Photodiode FW 115 von ITT mittels eines Oszillographen Tektronix 585. Die Zeitablenkung im Bild ist 10 nsec/cm; 40 Echos sind für jede Spur überlagert.

Bild 4: Schockwelle eines Nanosekunden-Funkenkanals 435 Nanosekunden nach Beginn des Durchbruchs



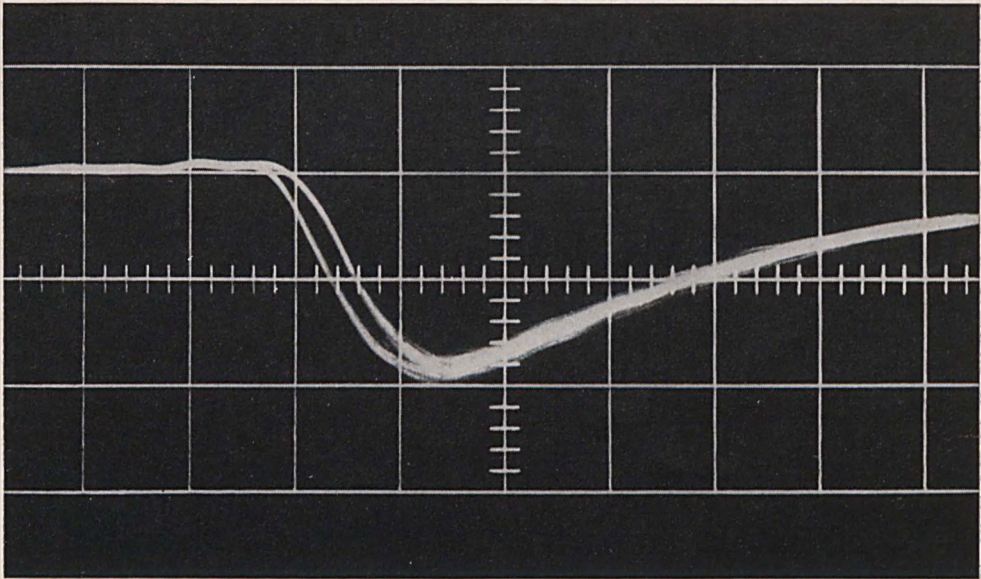


Bild 5: Reflektionen von einem Ziel 55×75 cm in 20 und 20,3 m Entfernung

Benutzt zur Entfernungsmessung wird die steile Anstiegsflanke des Lichtimpulses (Proc. IEEE 55, 100 [1967]).

Bei der vorgegebenen Entfernungs-Differenz von 30 cm beträgt der Zeitunterschied 2 nsec. Dieser Wert muß mit der bekannten Laufzeit des Lichtes übereinstimmen. Die Lichtgeschwindigkeit ist $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec. Dies stimmt genau mit Bild 5. Aus der geringen Strichbreite der 40 überlagerten Echos kann man eine *Meßgenauigkeit von einigen cm* abschätzen. Bei der verwendeten primitiven Anordnung ohne abbildende Linse war bei Nacht das Echosignal mit Photomultiplier etwa um einen Faktor 1 Million höher als der Rauschpegel; das heißt, es bestehen keine Schwierigkeiten, auch bei Tageslicht nach entsprechender spektraler Filterung, Kurzentfernungsmessungen durchzuführen.

Ein am Lehrstuhl in Entwicklung befindliches optisches Kurzentfernung-Radar soll wegen seiner Einfachheit im Aufbau

und Betrieb eine in der Radar-Technik bestehende Lücke schließen.

Das übliche Mikrowellen-Radar hat wegen der größeren Wellenlänge zwar den ungeheuren Vorteil, Wolken und Nebel weitgehend zu durchdringen. Jedoch wegen der größeren Wellenlänge treten bei Nahentfernungen Beugungserscheinungen in den Reflexen auf, welche das Nahorten unmöglich machen. Beim Mikrowellen-Radar galten noch vor einem Jahr etwa 10 m als Minimal-Entfernung. Zwischen etwa 10 m und etwa 1 m würde demnach der wichtigste Anwendungsbereich des vorgeschlagenen Nanolite-Radars liegen. Trübung der Atmosphäre kann bei so geringen Entfernungen eine nur untergeordnete Rolle spielen. Man kann daher das besondere Interesse an einem einfachen optischen Nahentfernung-Radar sofort einsehen. Naturgemäß hat man versucht, verschiedenartige Laser-Entwicklungen zur Lösung dieses Problems zu verwenden, zu-

nächst mit nicht viel Erfolg. Letztes Jahr schien die nichtkohärente Nanolite in Einfachheit des Betriebes und Pulsfolge noch dem Laser überlegen. Dieses Jahr berichtet man, daß es inzwischen gelungen ist, die Gallium-Arsenid-Halbleiterdioden zu einer technologisch brauchbaren Einheit zu entwickeln. Die Laserdiode ist mikroskopisch klein, wird einfach elektrisch gepulst (gepumpt) und moduliert und sollte der Nanolite im Prinzip überlegen sein.

Zeitmessung

Beim Nahentfernungs-Radar war bisher die Zeitmessung ein Problem. Gesucht war ein einfaches, leichtes Gerät mit *Subnanosekunden-Auflösung*. Bisherige Lösungen benutzten relativ teure *Zählersysteme*. Dabei startete der ausgehende Impuls das Zählwerk, während das Echo es stoppte. Für Subnanosekunden-Auflösung werden somit Zähler im *Gigahertz-Bereich* ($1 \text{ Gigahertz} = 10^9 \text{ Hertz}$) benötigt. Durch Verwendung von eng benachbarten Frequenzen kann man zwar über einen Noniuseffekt und der damit verbundenen Zeitdehnung schon mit Frequenzen im Megahertz-Bereich Nanosekunden-Auflösung erreichen, doch stellt diese Anordnung große Forderungen an die *Frequenz-Stabilität*. Die amerikanische elektronische Industrie sucht seit einiger Zeit nach einer einfacheren Lösung.

Ich darf hier auf eine aussichtsreiche Entwicklung am Lehrstuhl hinweisen, welche besonders erfreulich ist, weil sie aus einer Diplomarbeit entsprang.

G. Franke am Lehrstuhl hatte die Idee, eine relativ einfache Flip-Flop-Schaltung zur Messung von Nanosekunden-Zeitdifferenzen zu verwenden. Der Ausgangsimpuls setzt das Flip-Flop. Das Echo setzt das Flip-Flop zurück. Am Ausgang des Flip-

Flops ergibt sich dadurch ein Rechteck-Impuls, dessen Länge die Zeitdifferenz zwischen ausgehendem Signal und reflektiertem Echo darstellt. Dieser Rechteck-Impuls wird wiederum in einem sogenannten Dekodierungs-Netzwerk differenziert und in zwei zeitlich getrennte Nadel-Impulse verwandelt. Ihr Abstand entspricht der Eingang-Zeitdifferenz am Flip-Flop.

In dem von Franke entwickelten Verfahren (Proc. IEEE 56, 221 [1968]) werden die beiden Nadel-Impulse über *getrennte* Verzögerungs-Leitungen in die Flip-Flop-Eingänge gefüttert und durchlaufen so den Stromkreis in sukzessiven Folgen. Wir sprechen von einem Vorgang der *dynamischen Speicherung*. Der Eingang des Flip-Flops muß naturgemäß während der Zeit der Speicherung für neu ankommende Signale gesperrt sein.

Man kann einen Nonius- und Zeitdehnungs-Effekt erzielen, indem man die beiden, um die zu messende Zeitdifferenz getrennten, Nadel-Impulse über Verzögerungs-Leitungen etwas verschiedener Länge wieder in den Eingang füttert. Dadurch sind die *Laufzeiten verschieden* und der zeitliche Abstand beider Nadel-Impulse wird bei jedem Umlauf kleiner. Ein elektronisches Tor stellt den Zyklus ab, wenn sich die Nadel-Impulse auf eine vorgegebene Mindest-Entfernung genähert haben.

Die Zahl der Umläufe ist somit ein Maß für die zu messende Zeitdifferenz. Die Gesamtlaufzeit im Stromkreis ist durch die verwendeten Komponenten und die abstimmbaren Verzögerungs-Leitungen bestimmt. Wir haben bisher Zyklen von über 300 Umläufen beobachtet und damit *Zeitdehnungen* um einen Faktor von über 300 erreicht. Aus einer Nanosekunde am Eingang wurde damit nach dynamischer Spei-

cherung eine leicht meßbare Zeitdifferenz von 300 ns am Ausgang.

Mit dieser Methode wurden unter Verwendung von handelsüblichen Komponenten Zeitdifferenzen am Eingang von weniger als 0,5 nsec gemessen und dabei eine Stabilität des Stromkreises von etwa $50 \text{ psec} = 50 \cdot 10^{-12} \text{ sec}$ beobachtet. Mit neuen schnellen, integrierten elektronischen Bauelementen scheint eine weitere Erhöhung der Zeitauflösung möglich.

Schlußbetrachtung

Digitale elektronische Verfahren zur Messung kürzester Zeitdifferenzen sind ein faszinierendes neues Gebiet. Unsere erste Kurzveröffentlichung hat bereits in Amerika Interesse gefunden. Andererseits ist uns klar, daß dies ein Außenseiter-Erfolg ist. Wir werden kaum im Rennen bleiben können, wenn die ungeheuer bewegliche amerikanische Elektronik-Industrie wirkliches Interesse an dem vorgeschlagenen Verfahren finden sollte.

Damit bin ich wieder zu den Gedanken am Anfang meines Referates gekommen. Ein kleines Institut mit beschränkten Hilfsmitteln kann heute lediglich bescheidene Forschungsprobleme mit einigermaßen gesicherter Aussicht auf Erfolg in Angriff nehmen — gelegentlich besteht eine Außenseiter-Chance.

Bei der explosiven Entwicklung der physikalisch-technologischen Erkenntnisse ist es andererseits heute vielleicht nicht mehr so entscheidend, in der Ausführung wirklich der Erste gewesen zu sein, als vielmehr die bestehende Problematik rechtzeitig klar und selbständig zu erkennen.