

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: 75 (1984)

Heft: 21

Artikel: Laserradar : Funktionsprinzip, Möglichkeiten, Grenzen

Autor: Hubmann, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904501>

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: 07.01.2025

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

Laserradar: Funktionsprinzip, Möglichkeiten, Grenzen

M. Hubmann

Laserstrahlung wird schon seit einiger Zeit, in ähnlicher Weise wie die Mikrowellen, zur Ortung von Objekten verwendet. Wegen der kurzen Wellenlänge der Strahlung ist eine grosse Auflösung des Richtungswinkels sowie der Geschwindigkeit (Dopplerverschiebung) möglich. Die Anwendung findet aber Grenzen an Laufzeitproblemen und am Energiebedarf. Die Prinzipien der Systemkomponenten sowie der Aufbau solcher Geräte werden besprochen. Einige Versuchssysteme werden beschrieben.

De façon analogue aux micro-ondes, les ondes lasers sont utilisées, depuis quelque temps déjà, pour localiser des objets (radar). Les ondes très courtes des émissions lasers permettent une haute résolution tant de l'angle de direction que de la vitesse (effet Doppler). Des limites d'application sont données par le temps de propagation et la puissance nécessaire. L'article décrit les principes des composants des systèmes, la construction des appareils et quelques systèmes en cours d'essais.

Vortrag aus der Reihe «Krieg im Äther» des Bundesamtes für Übermittlungstruppen, gehalten am 26. Oktober 1983 an der ETH Zürich.

Adresse des Autors

Max Hubmann, Dr. sc. nat. ETH, Eidg. Waffenfabrik, 3000 Bern 22.

1. Einleitung

Radaranlagen sind bekanntlich Systeme, bei denen ein Sender eine eng gebündelte, impulsförmige Welle elektromagnetischer Energie aussendet und ein Empfänger die vom Ziel zurückgestreute Welle auffängt. Aus der Impulslaufzeit lässt sich die Distanz des reflektierenden Objektes bestimmen. Dank der starken Bündelung kann auch die Richtung festgestellt werden, womit die Lage des Zieles vollständig bekannt wird. Vielfach beschränken sich Radaranlagen nicht nur auf die Bestimmung der Orte einzelner Objekte, sondern es wird durch eine Suchbewegung des Strahles ein mehr oder weniger grosser Raumwinkelbereich abgetastet und die darin befindlichen Objekte registriert. Es ist dieser Typ von Radar, oft bezeichnet mit Suchradar, auf den sich diese Ausführungen konzentrieren.

Da Laser ebenfalls eng gebündelte Wellenpakete abstrahlen, wurden damit bereits recht früh radarähnliche Geräte gebaut. In Analogie zu Radar (Radio Detection and Ranging) wurde das neue Wort Ladar (Laser Detection and Ranging) geprägt, das sich gegenüber dem an sich anschaulichen Zwitter «Laserradar» durchzusetzen beginnt.

Die Verwendung von Lasern für Radarzwecke bedeutet vorerst einmal wesentlich höhere Frequenzen und damit kürzere Wellenlängen von 0,5...10 μm anstelle einiger Millimeter bis 10 m. Für die Distanzmessung selbst ergibt sich daraus kein unmittelbarer Vorteil. Die kürzere Wellenlänge lässt aber bei verhältnismässig kleiner Ausdehnung der Sendeeinrichtung eine beträchtlich stärkere Bündelung der Strahlung erzielen. Die Auflösung des menschlichen Auges ist durchaus erreichbar.

Ebenfalls eine Folge der kurzen Wellenlänge ist die beträchtliche Dopplerverschiebung. Bei der oben er-

wähnten Wellenlänge 10 μm erzeugt eine Radialgeschwindigkeit des Zieles von 1 km/h bereits eine Frequenzverschiebung von 55 kHz. Diese ist zwar klein im Verhältnis zur Frequenz von 30 THz des Sendestrahles, sie lässt sich aber mit Heterodyntechniken verhältnismässig leicht messen.

Nachteilig wirkt sich bei den in Frage kommenden Wellenlängen die atmosphärische Dämpfung aus. Nebel, Wolken, Regen und Schnee sind praktisch undurchdringlich. Selbst bei guten Bedingungen ist die Reichweite von Ladars im Verhältnis zu Mikrowellenradars eher dürftig.

Die den Laserstrahlen eigene enge Bündelung liess die Idee aufkommen, mit deren Hilfe hochauflösende Radars zu bauen. Man verspricht sich davon, nicht nur Objekte zu entdecken und zu orten, sondern auch deren Form und Struktur zu erfassen. Für kriegstechnische Anwendungen bedeutet dies bessere Möglichkeiten der Identifikation, der automatischen Klassifikation und eventuell sogar der Freund-Feind-Erkennung. Der mit der grösseren Auflösung verbundene Informationsfluss bringt es mit sich, dass Laser-Radars keine Rundsucher sein können, sondern nur kleine Raumwinkelbereiche ausloten.

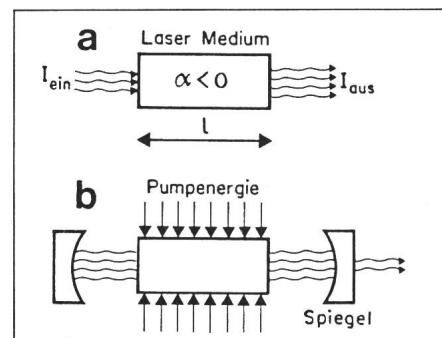


Fig. 1 Prinzip des Lasers

a Lichtverstärkung: $I_{\text{aus}} = I_{\text{ein}} e^{-\alpha l}$, $\alpha < 0$
b Laser

Aktives Medium	Wellenlänge (µm)	Ausgangsleistung
<i>Gasförmig:</i>		
Stickstoff	0,337	100 mW
Argon	0,488	5 W
HeNe	0,633	1...150 mW
CO ₂	10,6	1 kW
HF	2...3	5 kW
<i>Festkörper:</i>		
Rubin	0,694	200 mW
Neodym YAG	1,06	100 W...1 kW
GaAs (Diode)	0,9	einige 10 mW

Aktives Medium	Wellenlänge (µm)	Energie/Puls (Joule)	Pulsdauer
Stickstoff	0,337	$10 \cdot 10^{-3}$	5 ns
Rubin	0,694	10	30 ns
GaAs (Diode)	0,9	$5 \cdot 10^{-6}$	200 ns
Nd	YAG	1	30 ns
	Glas	50	50 ns
CO ₂	10,6	15	200 ns
HF	2...3	100...800	40 ns
H ₂ O	28		

2. Der Laser als Quelle elektromagnetischer Strahlung

2.1 Prinzip des Lasers

Laserstrahlung wird erzeugt, indem man Licht durch eine Substanz leitet, wobei der Lichtstrahl beim Durchgang verstärkt wird. Das Medium hat sozusagen einen negativen Absorptionskoeffizienten (Fig. 1a). Der Mechanismus, mit dem die Lichtwelle verstärkt wird, ist ein atomarer Prozess, bei dem, je nach Medium, energetisch angeregte Atome, Ionen oder Moleküle ihre Energie an die Welle abgeben. Die Energieabgabe wird durch die Welle selbst ausgelöst; man spricht daher von induzierter Emission. Von diesem Vorgang leitet sich auch die Bezeichnung Laser her (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Zur besseren Ausnützung der Verstärkung wird das aktive Medium zwischen Spiegel (Fig. 1b) gesetzt. Damit wird die Strahlung mehrmals verstärkt, bevor sie schliesslich den Laser verlässt.

Die angeregten Teilchen können ihre Energie auch ohne äusseren Anlass spontan abstrahlen. Man spricht in diesem Fall von spontaner Emission. Dieser Vorgang leistet aber keinen Beitrag zur Verstärkung, da die Phase dieser Strahlung in keiner Relation zur Phase des Strahlungsfeldes steht. Die spontane Emission bedeutet Verlust für die Verstärkung und sollte ein gewisses Mass nicht überschreiten. Sie stellt jedoch normalerweise die Startstrahlung zum Aufbau des Strahlungsfeldes zwischen den Spiegeln nach Einschalten des Lasers zur Verfügung.

Das Spiegelsystem stellt einen Resonator dar, analog zum Hohlleiterresonator der Mikrowellentechnik. Im Unterschied zu diesem sind jedoch die Di-

mensionen des Spiegelsystems viel grösser als die Wellenlänge der Strahlung. Das Wellenfeld im Innern des optischen Resonators konzentriert sich stark entlang der Achse. Daher ist der Laserresonator in radialer Richtung meistens offen. Mit dem axialen Abstand der Spiegel ist ein geringfügiger Einfluss auf die Frequenz des Lasers möglich. Dies kann zur Feinstabilisierung der Wellenlänge ausgenutzt werden (vergl. 3.2). Die im Resonator aufgebaute Wellenenergie kann durch einen der Spiegel, der teildurchlässig ist, nach aussen treten. Der so erzeugte Strahl ist sehr eng gebündelt. Die Energie, die in die Strahlung fliesst, stammt aus dem Lasermedium, und muss diesem durch den Pumpvorgang wieder zugeführt werden. Dies erfolgt je nach Medium durch Lichteinstrahlung aus einer Blitz- oder Gasentladungslampe oder aus einem weiteren Laser, durch eine Gasentladung im Medium oder auch durch eine chemische Reaktion.

2.2 Gebräuchliche Lasertypen

Laser werden je nach Verwendung für kontinuierlichen Betrieb oder Impulsbetrieb gebaut. Manche Medien eignen sich nur für eine der beiden Betriebsarten. Eine Zusammenstellung von gebräuchlichen Lasern ist in den Tabellen I und II aufgeführt. Die Auswahl erfolgte im Hinblick auf die Anwendung in Laser-Radarsystemen. Sie entsprechen Typen, die im Handel erhältlich und somit industriell herstellbar sind. Laser, die zu speziellen Zwecken im Labor aufgebaut wurden, umfassen eine weit grössere Varietät von Lasermedien und Betriebswellenlängen [1]. Spektakulär sind vor allem gewisse Hochleistungslaser, die phantastische Energien abzugeben vermögen und deren Volumen leicht ein Labor oder eine ganze Werkhalle ausfüllen können.

2.3 Momentane Leistung bei PulsLasern

Die momentane Leistung eines PulsLasers ist oft enorm hoch. Ein 10-J-Puls von 50 ns Dauer (Tab. I u. II) erzeugt z. B. eine Leistung von 200 MW. Damit lassen sich Materialien aufschmelzen oder verdampfen. Die Gesamtenergie eines Einzelimpulses ist aber doch gering, so dass die spektakuläre Wirkung nur sehr lokal ist. Um einen technisch nutzbaren Effekt hervorzurufen, ist daher eine grosse Zahl von Einzelimpulsen anzubringen.

ImpulsLaser mit Pulsenergien von 10 J zählen bereits zu den starken Lasern. Sie können nur mit relativ bescheidenen Repetitionsraten von 10...100 Impulsen pro Sekunde betrieben werden. Mit einer Repetitionsrate von 100 Impulsen pro Sekunde erreicht ein 10-J-Laser eine mittlere Leistung von 1000 W und reiht sich leistungsmässig an der gleichen Stelle wie die starken kontinuierlichen Laser ein. Laser mit Pulsenergien von einigen Bruchteilen eines Millijoules erlauben Repetitionsfrequenzen von einigen hundert Kilohertz.

2.4 Auswahlkriterien

Die Auswahl eines Lasers für ein Laserradar richtet sich vorerst einmal nach der Durchlässigkeit der Atmosphäre für den betreffenden Strahl. Die Transmissionskurve in Figur 2 zeigt, dass die Durchlässigkeit für die einzelnen Wellenlängen sehr unterschiedlich ist. Der ganze in Frage kommende Bereich ist durch Zonen starker Absorption in einzelne Gebiete aufgeteilt, die mit «Fenster» bezeichnet und numeriert sind. Neben diesen Durchlässigkeitsgebieten sind aber noch andere Einflüsse zu berücksichtigen, die, je nach Einsatz und Verwendung, stärker oder schwächer ins Gewicht fallen. Genannt seien Streuung und Absorp-

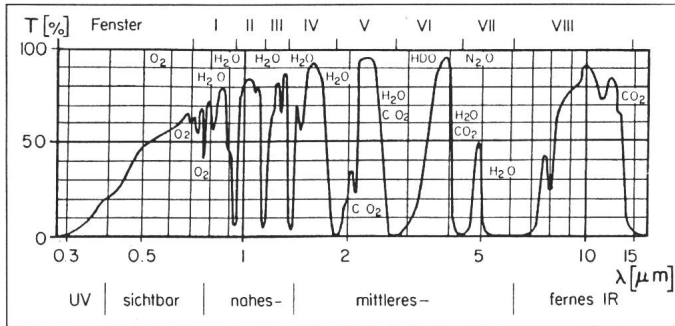


Fig. 2
Spektrale Transmission
der Atmosphäre, Defi-
nition der atmosphä-
rischen Fenster
T Transmission
λ Wellenlänge

(Fig. 4). Wegen der grossen Geschwindigkeit kommen als solche Modulatoren nur elektrooptische Elemente wie Pockels- oder Kerrzellen und akustooptische Modulatoren in Frage. In energetischer Hinsicht ist diese Methode, besonders bei Pulsmodulation, sehr ungünstig. Für Pulsradars bieten sich natürlich die gepulsten Laser an. Bei grossen Pulsenergien ist aber dort, wie bereits erwähnt, die Repetitionsrate klein und insbesondere für hochauflösende Radars zu klein.

Atmosphärische Fenster

Tabelle III

Fenster	Wellenlängenbereich (μm)
I	0,76... 0,92
II	0,96... 1,13
III	1,16... 1,31
IV	1,50... 1,77
V	1,99... 2,41
VI	3,37... 4,17
VII	4,56... 4,83
VIII	8,03...13,09

Wirkungsgrad einiger Lasertypen

Tabelle IV

Lasertyp	erreichbarer Wirkungsgrad (%)	
	praktisch	theoretisch
CO ₂	15,0	50
Nd { YAG Glas	3,0	
	5,0	
Rubin	2,0	
Argon	0,1	
GaAs (Dioden)	2,0	70...100

2.6 Zusammenfassung

Laser sind Lichtquellen, die sehr eng gebündeltes, monochromatisches Licht erzeugen. Die Wellenlänge ist durch das verwendete Lasermedium vorgegeben und kann nur geringfügig beeinflusst werden. Der Wirkungsgrad ist im allgemeinen gering. Lasertypen mit genügend grosser Ausgangsleistung und brauchbarem Wirkungsgrad stehen heute und in naher Zukunft nur wenige zur Verfügung.

3. Empfang des Lichtes

3.1 Direkte Detektion

Der Empfangsteil eines Laserradars besteht aus einer teleskopartigen Optik, welche einen möglichst grossen Anteil des vom Ziel zurückgestreuten Lichtes auf einen Detektor leitet. Dieser wandelt die Lichtinformation in ein elektrisches Signal um. Als Detektoren für Radarzwecke kommen nur Quantendetektoren zur Anwendung. Bei diesen erzeugt ein Lichtquant unmittelbar ein elektrisches Signal. Eine alternative Möglichkeit der Lichtdetektion stellen die thermischen Detektoren dar, bei denen das auffallende Licht das Detektormaterial aufwärmt und der Wärmezustand über eine temperaturabhängige elektrische Eigenschaft in ein Signal umgewandelt wird.

Für Wellenlängen kürzer als 1 μm (Photoenergie >1,2 eV) kommt der

tion durch Regen, Nebel, Staub, Kampfnebel, ferner die Tageslichtstreuung (bei λ < 1 μm) und die Eigenstrahlung des Zieles (bei λ ≈ 10 μm).

Neben den obigen Gesichtspunkten bestehen für die Auswahl der Wellenlänge noch starke Einschränkungen durch den Laser selbst. Wie bereits diskutiert, ist die Laseraktivität eine Eigenschaft des Mediums. Der Wellenlängenbereich, in dem ein Medium verstärkt, beschränkt sich im allgemeinen auf einzelne, schmale Linien. Für eine bestimmte Wellenlänge ist ein geeignetes Medium zu suchen. Heute ist eine grosse Zahl von Lasermedien und damit eine grosse Mannigfaltigkeit von Linien bekannt, so dass sich innerhalb gewisser Schranken für praktisch jede Wellenlänge ein Laser bauen lässt (Fig. 3 sowie [1] und [2]). Es zeigt

sich aber, dass der Aufwand, um eine gewisse Leistung zu erreichen, sehr gross sein kann. Insbesondere ist der Wirkungsgrad eines Lasers im allgemeinen sehr klein (Tab. IV).

Wie noch gezeigt wird, ist für Radaranwendungen der Energieverbrauch eine recht kritische Grösse. Aus diesem Grunde scheiden die meisten der realisierbaren Laser bis auf einige wenige aus, deren Ausgangsleistung gross genug ist und die bei Wellenlängen innerhalb der Fenster arbeiten. Von Bedeutung sind gegenwärtig nur der Nd-(1,06 μm) und der CO₂-Laser (10,6 μm) sowie der GaAs-Diodenlaser (0,9 μm). Letztere sind besonders leicht zu handhaben und einfach zu modulieren.

2.5 Modulation

Eine Distanzmessung kann nur mit einer modulierten Welle, also z.B. einer amplituden- oder frequenzmodulierten oder einer impulsförmigen Welle durchgeführt werden.

Apparativ kann eine solche Modulation durch direkten Eingriff in den Laserprozess, z.B. über den Pumpvorgang, erzeugt werden. Diese Methode ist jedoch wiederum durch das Medium limitiert, hauptsächlich bezüglich Modulationsgrad und Modulationsfrequenz. Etwas schneller als die beschriebene interne Modulation ist die externe, bei der ein kontinuierlicher Strahl mit einem nachgeschalteten Element moduliert oder zerhackt wird

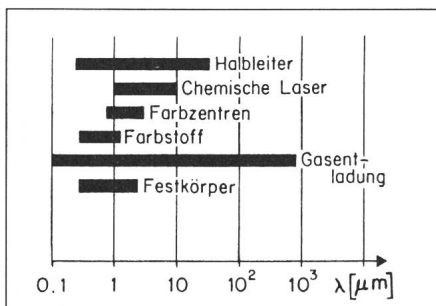


Fig. 3 Bereiche realisierbarer Wellenlängen für einzelne Lasertypen

Die Typisierung erfolgte hier nach betrieblich-konstruktiven Merkmalen wie Anregungsart und Stoffkategorie. Sie ist konventionell.

λ Wellenlänge

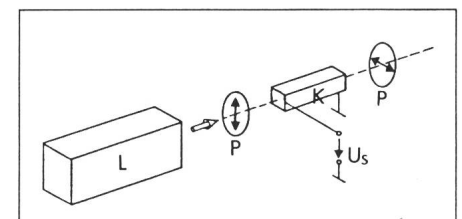


Fig. 4 Externe Modulation mit Pockelszelle

L Laser
P Polarisatoren, gekreuzt
K elektrooptischer Kristall
Us Steuerspannung

äussere Photoeffekt in Betracht. Ein auf die Oberfläche eines geeigneten Materials auftreffendes Lichtquant löst ein Elektron heraus. Das freie Elektron wird in der Regel mit einem Sekundärelektronenvervielfacher in ein direkt beobachtbares elektrisches Signal umgewandelt. Der ganze Vorgang findet in einer Hochvakuumröhre statt. Dieser Typ von Photodetektor wird aber mehr und mehr durch Halbleiterdetektoren (Dioden, Photoleiter) verdrängt, insbesondere in Fällen, in denen man nicht auf die äusserste Empfindlichkeit angewiesen ist. Halbleiterdetektoren sind leichter zu handhaben und besser zu vereinbaren mit der modernen Schaltungstechnik.

Für Wellenlängen grösser als 1 μm kommt nur der sogenannte innere Photoeffekt in Frage. Hier versetzt ein Lichtquant Ladungsträger (Elektronen, Löcher) innerhalb eines Festkörpers vom unbeweglichen in einen beweglichen Zustand. Der betreffende Festkörper wird dadurch für eine bestimmte Ladungsmenge leitend. Solche Detektoren sind, je nach Bauart, die Photodioden bzw. die Photoleiter.

Mit zunehmender Wellenlänge wird aber die Energie $E = hc/\lambda$ des zugehörigen Photons kleiner. Bei Detektoren, die für langwelliges Licht eingesetzt werden, muss daher die Energie, die nötig ist, um einen Ladungsträger vom unbeweglichen in den beweglichen Zustand zu bringen, sehr klein sein, weshalb bereits die thermische Eigenbewegung der Atome bei Raumtemperatur einen beträchtlichen Teil der Ladungsträger aktiviert, was neben andern Ursachen den sogenannten Dunkelstrom erzeugt. Dieser Dunkelstrom enthält statistische Schwankungen, das Rauschen, welche die Grenzempfindlichkeit, d.h. die minimal detektierbare Lichtenergie nach unten begrenzen. Detektoren für langwelliges Licht müssen aus diesem Grund gekühlt werden. Bei Detektoren für $\lambda = 10 \mu\text{m}$ (CO_2 -Laser) ist die Betriebstemperatur bei etwa -200°C (flüssiges N_2). Diese niedrigen Betriebstemperaturen, die durch technische Kunstgriffe kaum zu umgehen sind, sind ein bedeutendes Hindernis für den Einsatz von langwelligem Infrarot auf dem Gefechtsfeld.

3.2 Heterodyndetektion

Vor der Umwandlung der Lichtechos in elektrische Impulse besteht die Möglichkeit, das zurückgestreute

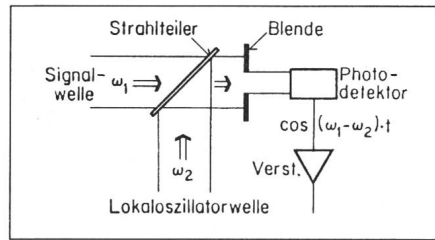


Fig. 5 Prinzip der heterodynen Detektion

Licht mit der Welle eines Lokaloszillators zur Interferenz zu bringen (Fig. 5). Wegen der Interferenz schwankt die Intensität an der Oberfläche des Detektors mit der Differenzfrequenz der beiden Wellen. Das Detektorsignal, welches proportional zur Intensität ist, enthält damit eine zwischenfrequente Komponente. Formal entspricht dieses Detektionsverfahren einer Mischstufe in der Hochfrequenztechnik. Der Unterschied zur HF-Mischstufe besteht darin, dass die Photo-Heterodyntechnik zwei Wellen, d.h. zeitlich-räumliche Vorgänge mischt. Dies führt zu gewissen Schwierigkeiten, wie weiter unten gezeigt wird. Der Mischvorgang selbst ist ein atomarer Prozess, der sich dem Einfluss des Ingenieurs weitgehend entzieht.

3.3 Detektorrauschen

Die minimale Signalenergie, bei der eine Detektion noch möglich ist, ergibt sich durch das Rauschen. Schwache Signale enthalten wegen der Quantennatur des Lichtes bereits einen gewissen statistischen Anteil, so dass sich daraus eine untere Limite ergibt. In der praktischen Anwendung treten noch weitere Rauschanteile hinzu, die von der Eigenstrahlung des Zieles (Hintergrundrauschen) und vom Detektor selbst stammen. Der letztere Anteil überwiegt im allgemeinen. Der Hauptvorteil des Heterodynverfahrens liegt darin, dass der Rauschanteil des Detektors auf vernachlässigbare Werte zurückgedrängt wird. Die Rauschleistung einer Photodiode ist proportional zum Diodenstrom i_d . Dieser setzt sich aus dem Photostrom i_{ph} und dem sogenannten Dunkelstrom i_0 zusammen. Der letztere Anteil ist auch vorhanden, wenn kein Licht auf die Diode fällt.

$$P_{\text{rausch}} \sim 2e i_d \Delta f = 2e(i_{ph} + i_0)\Delta f \quad (1)$$

Dabei ist e die Ladung des Elektrons und Δf die elektrische Bandbreite.

3.4 Vergleich der direkten Detektion mit der Heterodyndetektion

Bei der direkten Detektion überwiegt bei schwachen Signalen der Dunkelstrom. Im Fall von Heterodyndetektion aber enthält der Photostrom ebenfalls den Strom, der durch die Lokaloszillatorwelle hervorgerufen wird. i_{ph} kann deshalb so gross gemacht werden, dass i_0 vernachlässigbar wird. Der Nutzsignalstrom i_s andererseits ist proportional zur optischen Signalleistung P_s bei der direkten bzw. $\sqrt{P_s P_{LO}}$ bei der heterodynen Detektion, wobei P_{LO} die Leistung des Lokaloszillators ist. Das Signal-Rausch-Verhältnis schreibt sich deshalb für die direkte Detektion:

$$S/N = \frac{\overline{i_s^2}}{\overline{i_n^2}} \approx \left(\frac{e\eta}{h\nu}\right)^2 \frac{P_s^2}{2e \cdot i_0 \Delta f} \quad (2)$$

und über die Heterodyndetektion:

$$S/N = \frac{\overline{i_s^2}}{\overline{i_n^2}} \approx \left(\frac{e\eta}{h\nu}\right)^2 \frac{P_s \cdot P_{LO}}{2e \left[i_0 + \left(\frac{e\eta}{h\nu}\right) P_{LO} \right] \Delta f} \quad (3)$$

η , h , ν sind Quantenwirkungsgrad, Plancksche Konstante und Frequenz des Lichtes. Aus der letzten Formel ist ersichtlich, dass mit zunehmender Lokaloszillatorleistung nicht nur das Rauschen, sondern auch der Nutzsignalstrom ansteigt, womit schliesslich das Signal-Rausch-Verhältnis vom Dunkelstrom unabhängig wird. Definiert man die Grenzempfindlichkeit mit der Leistung P_{\min} , bei der $S/N = 1$ wird, so wird für direkte Detektion

$$P_{\min} = \frac{h\nu}{e\eta} \sqrt{2e i_0 \Delta f} \quad (4)$$

und für Heterodyndetektion

$$P_{\min} = \frac{h\nu}{\eta} \Delta f \quad (5)$$

Der letzte Wert entspricht der Grenzempfindlichkeit, wie sie durch die bereits erwähnte Quantennatur des Lichtes gegeben ist.

Bezüglich der Auswahl der Detektoren für die Heterodyntechnik gelten die gleichen Gesichtspunkte, wie für das direkte Verfahren. Bei heterodyner Detektion muss dafür gesorgt werden, dass Lokaloszillator und Sendeoszillator frequenzmässig genügend parallel laufen, damit eine vernünftige Zwischenfrequenz entsteht. Dies bedingt,

dass mindestens einer der Oszillatoren geregelt werden muss. Weiter ist darauf zu achten, dass die beiden auf den Detektor einfallenden Wellen in genügendem Mass koplanar sind. Falls nicht, ergeben sich nur zeitliche, sondern auch räumliche Interferenzeffekte (Fig. 6). Auf gewissen Gebieten des Detektors ergeben sich zu einem bestimmten Zeitpunkt konstruktive, in einem anderen Gebiet destruktive Interferenzen. Die Intensität auf dem Detektor ist räumlich nicht konstant. Die zeitliche Schwankung der totalen Leistung vermindert sich oder wird klein, da die einzelnen Gebiete gegenphasig schwanken. Als weitere Eigenschaften der heterodynen Detektion sei erwähnt, dass naturgemäss nur diejenige Polarisationskomponente des einfallenden Lichtes zur Interferenz gebracht werden kann, welche mit der Polarisierung der Lokaloszillatorwelle parallel ist.

Der mit der Heterodyntechnik gegenüber der direkten Demodulation realisierbare Gewinn an S/N und damit an Empfindlichkeit hängt vom Stand der Diodentechnik ab, welcher die Grösse von i_0 bestimmt, und von den Verlusten, die ein komplexeres System als Tribut verlangen. Experimentell wurde eine Verbesserung um einen Faktor 100...1000 bei Distanzen über mehrere Kilometer festgestellt [3; 4].

3.5 Zusammenfassung

Die Empfindlichkeit des Festkörperdetektors ist durch das Eigenrauschen des Dunkelstromes gegeben. Dieser ist eine technologische Grösse. Mit Heterodyntechnik erreicht man die durch Quantenstatistik gesetzte Grenze. Detektoren für das mittlere und ferne Infrarot müssen gekühlt werden.

4. Aufbau von Laserradarsystemen

4.1 Laserradar mit direkter Detektion

Systeme, die mit direkter Detektion arbeiten, sind gemäss Fig. 7 aufgebaut. Der Sender besteht aus einer externen oder intern modulierten, gepulsten Quelle. Die Impulsfolgefrequenz PRF wird von aussen gesteuert. Das Teleskop hat die Aufgabe, den Ausgangsstrahl des Lasers auf einen grösseren Durchmesser auszuweiten. Der Öffnungswinkel des Sendestrahlens ist bei sorgfältig dimensioniertem optischem Strahlengang hauptsächlich durch den Durchmesser des austretenden Sendestrahlens gegeben. Die Relation gemäss Fig. 8 verkörpert die allgemeine Beziehung zwischen Antennendimension und Richtwirkung.

Zum Abtasten eines gewissen Raumwinkelgebietes wird der Sendestrahl durch eine Ablenkeinheit in einem zweidimensionalen Raster ausgelenkt. Die Auslenkung muss sehr schnell erfolgen. Aus diesem Grunde dürfen diese Ablenkvorrichtungen keine grossen Abmessungen aufweisen und sind meist vor dem Teleskop, wo der Strahlenquerschnitt noch klein ist, angeordnet. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass das Teleskop den Auslenkwinkel verkleinert. Ablenkeinheiten werden mit Schwingspiegeln oder eventuell mit akustooptischen Ablenkern gebaut.

Als Empfangsoptik enthält das Gerät wiederum ein Teleskop, das gross genug sein muss, damit die durch Beugung begrenzte Auflösung den gestellten Anforderungen entspricht. Eine grosse Optik fängt zudem einen grösseren Anteil des zurückgestreuten Lichtes auf. Hinter dem Teleskop ist

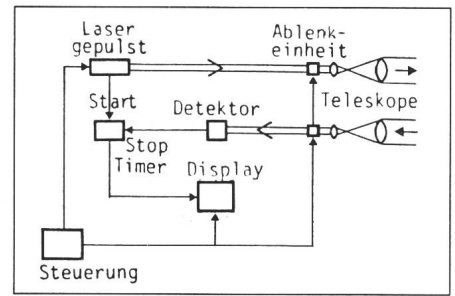


Fig. 7 Aufbau eines Ladars mit direkter Detektion

— optischer Strahlengang
 — elektrischer Signalweg

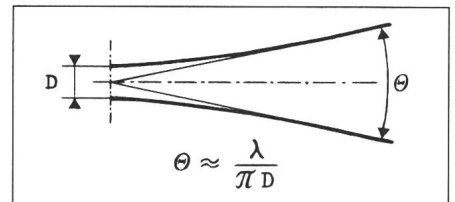


Fig. 8 Zusammenhang zwischen Strahldurchmesser und Divergenz

D Strahldurchmesser
 θ Divergenz

wiederum eine Ablenkeinheit angeordnet. Sie hat die Aufgabe, das enge Gesichtsfeld des Detektors dem abtastenden Strahl nachzuführen. Im Unterschied zum herkömmlichen Mikrowellenradar wird die Antenne nicht nachgeführt. Die Austrittslinse stellt eine Art «Phased Array» dar. Das abschliessende Element im optischen Strahlengang ist der Detektor.

Teleskope und Abtastvorrichtungen können für den Send- und Empfangspfad zusammengelegt werden. Die beiden Pfade werden hinter der Ablenkeinheit durch einen Strahlteiler getrennt. Dieser besteht im einfachsten Fall aus einem halbdurchlässigen Spiegel (z. B. wie in Fig. 9). Der Zeit-

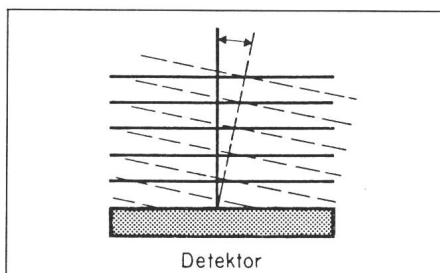
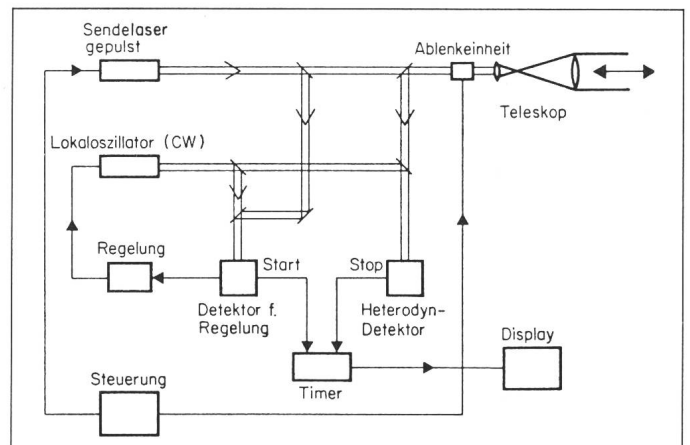


Fig. 6 Einfluss der Parallelität von Lokaloszillatorwelle und einfallender Welle bei Heterodyndetektion

Phasenflächen:

— Signalwelle
 - - - Lokaloszillator

Fig. 9 Aufbau eines Ladars mit heterodyner Detektion



verzug zwischen Senden und Empfangen der einzelnen Impulse wird in einem Timer gemessen und daraus die Distanz bestimmt. Die anfallende Information über Richtung und Entfernung wird einer Anzeigeeinheit übergeben, wo sie in geeigneter Form dargestellt wird. Das Zusammenwirken der einzelnen Organe wird in einer Steuereinheit koordiniert. In der Anzeigeeinheit können numerische Bildaufbereitungsverfahren eingesetzt werden. Es kommen im allgemeinen nur schnelle und daher relativ einfache Verfahren in Frage.

4.2 Laserradar mit heterodyner Detektion

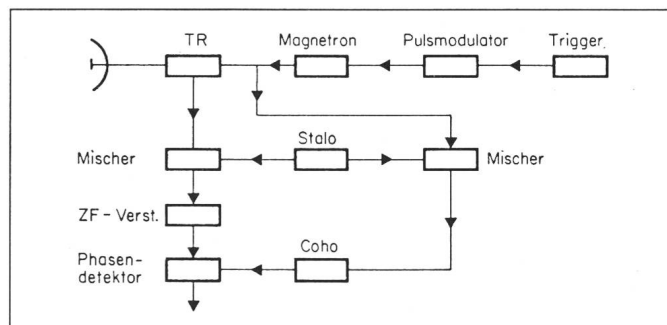
Bei Systemen, die mit heterodyner Detektion arbeiten, ist der Detektionsteil erweitert. Die Erweiterung umfasst vor allem einen Laser, der als Lokaloszillator fungiert (Fig. 9). Die Einkopplung der lokalen Referenzwelle geschieht über einen Strahlteiler (Spiegel, Prisma, usw.). Damit die Zwischenfrequenz stabil bleibt, sind die beiden Laser bezüglich der Wellenlänge über einen Regelkreis genau synchron zu führen. Die Abweichung der beiden Wellenlängen vom Sollabstand wird über einen zweiten Überlagerungsdetektor registriert und korrigiert, indem am Laser die Resonatorlänge geändert wird. Die Technik der Synchronisierung zweier optischer Quellen wird heute sehr gut beherrscht. Es ist sogar möglich, zwei Laser phasenstarr zueinander (Phase Locked Loop) zu betreiben. Für ein Dopplerradar ist die Geschwindigkeitsauflösung abhängig von der Präzision dieser Regelung. Falls keine Auswertung des Dopplereffektes erfolgt, sind die Anforderungen an die Synchronisation geringer. Es ist möglich, entweder den Lokaloszillator dem Sendelaser oder umgekehrt diesen dem Lokaloszillator nachzuführen. Beide Varianten wurden realisiert, erstere von Brandewie und Davis [5], letztere von Cruickshank [6].

4.3 Vergleich mit dem Mikrowellenradar

Die in Figur 9 vorgestellte Schaltung entspricht recht genau derjenigen der früheren Radartechnik. Figur 10 zeigt den Aufbau eines Mikrowellen-Radarsystems [7].

Der COHO (Coherent Oscillator) wird der momentanen Frequenz des Magnetrons nachgeregelt und hat dieselbe Funktion wie der «Lokallaser».

Fig. 10
Aufbau eines MTI-Mikrowellen-Radars
MTI Moving Target Indicator



Die Verwendung einer zusätzlichen Zwischenfrequenz und eines zusätzlichen STALO (Stable Local Oscillator) ist in der Lasertechnik nicht nötig.

4.4 Beispiel einer Anwendung

Eine recht interessante Lösung wurde von Hulme et al. [8] veröffentlicht. In diesem Gerät, das allerdings nur als Distanzmesser konstruiert ist, wird die kontinuierliche Welle eines wellenlängengestabilisierten Lasers mit einem akustooptischen Element in der Frequenz moduliert. Im akustooptischen Element wird die Lichtwelle an einer laufenden akustischen Welle gebeugt. Die Frequenz der gebeugten Welle ist gegenüber der Frequenz der einfallenden Welle um die Frequenz der optischen Welle nach oben oder nach unten verschoben und zwar periodisch und linear mit der Zeit (Up-Chirp, Down-Chirp). Die Detektion erfolgt heterodyn. Aus der zeitlichen Verschiebung des Up-Chirps und des Down-Chirps im empfangenen Signal ist die Laufzeit des Echos bestimmbar. Echos von bewegten Zielen enthalten noch eine zusätzliche Frequenzverschiebung, was im Detektor als zusätzliche Laufzeit registriert wird. Bezüglich Distanz und radialer Geschwindigkeit des Zieles entsteht so eine

Mehrdeutigkeit. Sie kann durch die Auswertung des Up- und Down-Chirps in eleganter Weise ausgeschaltet werden.

4.5 Zusammenfassung

Die Schaltungstechnik der Laserradars ist bereits gut entwickelt. Sie hat vieles gemeinsam mit derjenigen des Mikrowellenradars. Es dürfte wohl kaum übertrieben sein, wenn behauptet wird, dass praktisch alle Techniken für Signalgestaltung und Signalaufbereitung auch beim Laserradar durchführbar sind. Einige Laserradars sind bereits in Versuchssystemen realisiert worden.

5. Systemdaten und Limiten

5.1 Bilddarstellung

Dank der kurzen Wellenlänge, ist mit einem Laserradar eine enge Bündelung des Strahles möglich. Bei einer Wellenlänge von 10 μm und einer Sendempfangsoptik von 10 cm Durchmesser ist eine Winkelauflösung von 0,1 Millirad erzielbar, was etwa der Winkelauflösung des menschlichen Auges entspricht. Es liegt daher nahe, das vom hochauflösenden Ladar abgetastete Objekt als Bild, z.B. auf dem Bildschirm, darzustellen. Es zeigt sich aber, dass Bilder mit Fernsehnorm (625 Zeilen, 25 Bilder/s) wegen der Echolaufzeiten nicht machbar sind. Einschränkungen sind nötig, deren Problematik kurz gestreift werden soll.

Es scheint vorerst einmal möglich, das Bild auf einen Ausschnitt von 128 Zeilen à 128 Punkte zu beschränken. Ein solches Bild, das aus rund 16 000 Bildelementen besteht, muss aus Einzelmessungen aufgebaut werden. Bei Zieldistanzen zwischen 1,5 und 15 km beträgt die Impulslaufzeit zwischen 10 und 100 μs . Unter diesen Voraussetzungen sind zum Aufbau eines einzigen solchen Bildes 0,15 bis 1,5 s notwendig. Dies ist rund 25mal zu lang-

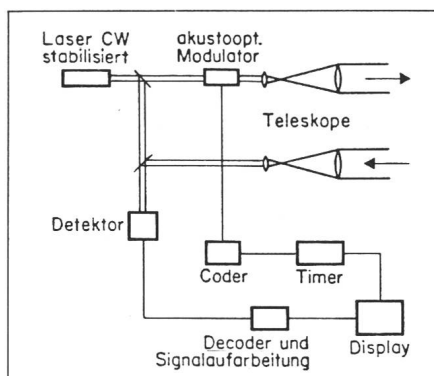


Fig. 11 Aufbau eines Laserdistanzmessers mit Chirp-Modulation und heterodyner Detektion zur simultanen Messung von Distanz und Radialgeschwindigkeit

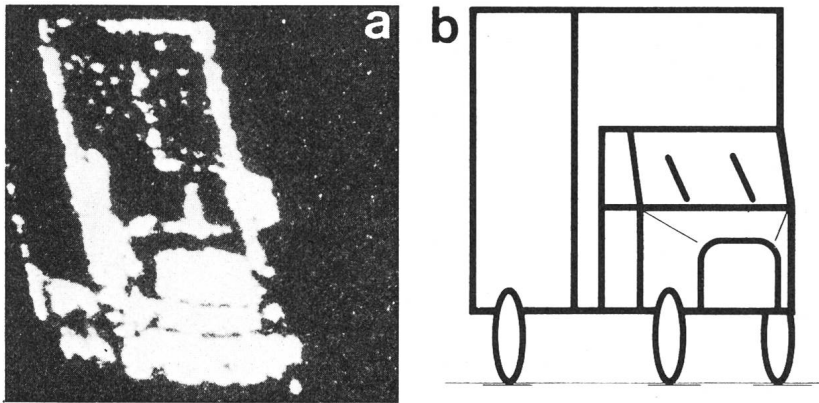


Fig. 12 Auswirkungen der langsamen Abtastung bei bewegten Objekten

a Ladarbild aus [9]

b Unverzerrte Skizze des Objektes von a

sam zur Beobachtung von beweglichen Bildern. Es stellt sich die Frage, ob eventuell mit einer kleineren Bildrate auszukommen wäre. Solange sich die Ziele nicht bewegen, ist dies sicher zu bejahen. Für militärische Zwecke sind aber gerade die beweglichen Ziele interessant. Bei diesen wirkt sich die zu langsame Bildabtastung in einer Bildscherung aus, da sich während des Aufbaus des Bildes das abzubildende Objekt verschiebt. Im Prinzip wäre eine numerische Korrektur denkbar. Da aber die einzelnen Objektpunkte mit der ihnen eigenen Geschwindigkeit korrigiert werden müssten, ist die Korrektur bei mehreren unabhängigen, beweglichen Zielen ausserordentlich schwierig. Die Auswirkungen der Bildscherung zeigt Figur 12 [9]. Die Abtastzeit für das ganze Bild betrug 1,5 s, die Distanz etwa 500 m. Man sieht deutlich, dass die Bildscherung das Hauptziel der hochauflösenden Abtastung, nämlich die Objekterkennung, sehr erschwert. Eine Methode, die diesen Mangel beheben könnte, wäre die gleichzeitige Abtastung mehrerer Objektpunkte. Auf jeden Fall ist klar, dass für hochauflösende Ladars der Frage der effizienten Objektabtastung eine entscheidende Bedeutung zukommt.

5.2 Leistungsbedarf

Eine andere Limite entsteht durch den Energiebedarf, der zum Erzeugen eines Bildes nötig ist. Das Verhältnis der Energie, die am Empfänger-Detektor eintrifft, zur Energie, die vom Sender abgestrahlt wird, ist durch folgende Formel gegeben:

$$P_D / P_S = \rho T_0 T_A A_D / \pi r^2 \quad (6)$$

wobei die Symbole in der Legende zu Fig. 13 erklärt sind.

Im Gegensatz zur Radarreichweitengleichung erscheint die Distanz im Nenner nur in der zweiten Potenz. Dies rührt daher, dass bei hochauflösenden Ladars angenommen werden kann, dass sämtliche Energie auf dem Ziel auftrifft, und dass die ganze beleuchtete Zone auf den Detektor abgebildet wird.

Die Distanz ist weiter noch im Transmissionsfaktor $T_A = \exp(-2\alpha r)$ enthalten. Bei vorgegebener Grenzempfindlichkeit des Detektors ist daher die notwendige Sendeleistung proportional zu $r^2 \exp(2\alpha r)$, d. h., ab einer gewissen Distanz ($\alpha r \gg 1$) wächst der Energiebedarf exponentiell. In Figur 13 ist das Verhältnis Sendeleistung zu Detektionsleistung mit repräsentativen Werten für ρ , T_0 und A_D aufgetragen (Skala rechts).

Das Diagramm lässt sich auch auf andere Weise lesen. Wird nämlich die minimal notwendige Energie zur Detektion mit 100 Quanten veranschlagt, so kann über das erwähnte Verhältnis die nötige minimale Energie für eine einzelne Distanzmessung berechnet werden. Die so erhaltene Impulsenergie wird mit der Anzahl Bildpunkte und der Bildfrequenz multipliziert. Man erhält so die mittlere optische Leistung, die für die vorgegebene Reichweite nötig ist. Die Grenze von 100 Quanten dürfte mit heterodyner Detektion ziemlich sicher, mit direkter Detektion nur in besonders günstigen Fällen erreichbar sein. Für CO₂-Laser bei der Wellenlänge von 10,6 μm beträgt die Energie eines Lichtquants $1,9 \cdot 10^{-20}$ J, und somit wäre die obige Detektionsgrenze bei $1,9 \cdot 10^{-18}$ J. Die mit diesen Daten berechnete optische Sendeleistung ist auf der linken Skala der Figur 13 angegeben. Die Darstellung des Leistungsbedarfs zeigt, dass ab Leistungen von etwa einem Kilo-

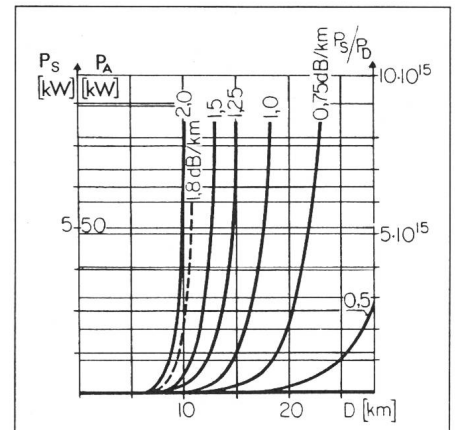


Fig. 13 Leistungsbedarf für ein CO₂-Laserradar

P_S	Optische Sendeleistung
P_D	Empfangsleistung am Detektor
P_{Dmin}	Minimale Empfangsleistung
P_A	Anschlussleistung
η	Wirkungsgrad P_S/P_A
ρ	Vom Objekt rückgestreuter Anteil des auffallenden Lichtes (Annahme: Lambert-Reflexion)
T_0	Transmissionsfaktor von Sende- und Empfangsoptik
T_A	Transmissionsfaktor der Atmosphäre (Hin- und Rückweg)
A_D	Fläche der Empfängereintrittsöffnung
D, r	Distanz
Repräsentative Werte:	
$A_D = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$	Bild: 128×128 Pixel
$T_0 = 0,1$	Bildrate: 25/s
$\rho = 0,5$	$P_{Dmin} = 0,77 \cdot 10^{-12} \text{W}$

watt die Reichweite praktisch vollständig durch die atmosphärischen Bedingungen bestimmt ist. Eine weitere Steigerung der Sendeleistung erbringt nur noch eine unbedeutende Verbesserung. Für Mitteleuropa wird eine Dämpfung von 1,8 dB/km oder weniger für 80% aller vorkommenden meteorologischen Bedingungen angegeben.

Die Leistungsskala kann unter Berücksichtigung eines optimistisch angesetzten Wirkungsgrades von etwa 10% auf den Anschlussleistungsbedarf umgerechnet werden. Es ergibt sich eine recht interessante Zahl. Moderne Kampfvehikel, d. h. Panzer oder auch Flugzeuge, verfügen über ein Bordnetz mit 20...30 kW Leistung, wovon rund 50% für fahrzeugeigene Zwecke beansprucht werden. Man erkennt, dass hochauflösende Ladars im Energiebudget eines Waffensystems beträchtlich zu Buche schlagen. Unter Umständen ergibt sich daraus eine zusätzliche Reichweitenbeschränkung.

5.3 Zusammenfassung

Aus diesem Abschnitt über die Limiten können zwei Folgerungen gezogen werden. Erstens zieht die hohe Auflösung einen grossen Informationsfluss

nach sich, der wegen der Impulslaufzeit zum Ziel und zurück zu Schwierigkeiten führt. Zweitens ist die Reichweite weitgehend durch die atmosphärischen Bedingungen limitiert; sie lässt sich mit der Erhöhung der Sendeleistung nur unbedeutend ausweiten. Reichweiten, die während eines wesentlichen Zeitanteils einhaltbar sind, dürften zwischen 10 und 20 km liegen.

6. Beispiele für hochauflösende Laserradars

6.1 Abbildendes Ladar

Das erste Beispiel betrifft ein System, das von einer Gruppe am MIT Lincoln Laboratory gebaut wurde [10; 11]. Das Gerät arbeitet mit einem gepulsten CO₂-Laser von etwa 40 µJ Impulsenergie. Die Reichweite betrug rund 3 km. Das Bildfeld war in 128×128 Bildelemente aufgeteilt, die einmal pro Sekunde abgetastet wurden. Die Detektion erfolgte heterodyn. Die Zwischenfrequenz betrug 13 MHz. Die Schaltung entsprach derjenigen von Figur 9. Als Detektor diente eine gekühlte HgCdTe-Photodiode. Von den Echos wurden zu jedem Bildelement die Laufzeit, d.h. die Distanz, und die Intensität registriert. Figur 14 zeigt einen Versuch, bei dem die gewonnene Information auf einem zweidimensionalen Falschfarbenbild ausgewertet wurde [11]. Die gemessene Distanz wurde mit fünf Farben, welche je einem Distanzintervall entsprechen, dargestellt. Die Helligkeit der Farbe selbst entspricht der Intensität der betreffenden Echos.

Die Figur zeigt recht deutlich einige Möglichkeiten und vor allem die Schwierigkeiten einer solchen Einrich-

tung. Zum ersten scheint das Signalrauschen noch grosse Probleme zu stellen. In diesem Ladarbild wurde bereits über einige Abtastzyklen gemittelt und eine einfache numerische Aufbereitungsmethode eingesetzt. Das Rauschen scheint einen guten Teil des Auflösungsvermögens zu zerstören. Wahrscheinlich dürften eine grössere Sendeleistung und vor allem die numerische Bildverarbeitung einiges an Verbesserungen bringen. Bis die Auflösung derjenigen eines Bildes, das mit direkten optischen Mitteln erzeugt wurde, entspricht, sind aber noch einige Hürden zu nehmen.

Im Ladarbild verdient die helle Linie, leicht unterhalb der Mitte, Beachtung. Sie rührt von einer Freileitung her. Im Photo hingegen verschwindet diese Leitung völlig im Hintergrund. Auch in anderen Ladarbildern der gleichen Veröffentlichung, hebt sich diese Linie wegen der starken Echos vom Hintergrund ab. Es ist offensichtlich, dass kleinere Objekte, die sich nur schwach von einem Hintergrund abheben, über die zusätzliche Distanzinformation herausgefiltert werden können (analog zum «gated viewing»).

6.2 Dopplerradar

Bekanntlich ist die von einem bewegten Objekt zurückgeworfene Strahlung um den Betrag

$$\Delta v = 2v/\lambda$$

frequenzverschoben (Dopplereffekt). In dieser Formel bedeuten Δv die Verschiebung der Lichtfrequenz, v die Geschwindigkeitskomponente parallel zum Laserstrahl (Radialgeschwindigkeit) und λ die Wellenlänge des beteiligten Lichtes. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind wegen der kur-

zen Wellenlänge die Frequenzverschiebungen gross, verglichen mit denjenigen des Mikrowellenradars, was eine grosse Auflösung verspricht. Die Frequenzverschiebung lässt sich mit der Heterodyntechnik zuverlässig erfassen.

Die bereits erwähnte Gruppe am MIT Laboratory baute auch ein Doppler-Ladar [9]. Dieses arbeitete allerdings mit einem CW-Laser und einer ZF von 40 MHz. Die Signalauswertung erfolgte mit einer Fouriertransformationsmethode. Sie soll hier nicht weiter erläutert werden. Das Gerät vermochte die Radialgeschwindigkeit im Bereich von ± 100 km/h mit einer Auflösung von 0,5 km/h zu bestimmen. Die Szene wurde wiederum zeilenweise abgetastet (1,5 s/Bild). Die Echos wurden gemäss Dopplerverschiebung sortiert und ebenfalls mit einer Falschfarbendarstellung zu einem Bild zusammengesetzt. Hierbei erscheinen Objekte mit unterschiedlicher Geschwindigkeit verschiedenfarbig, z. B. sich überholende Autos [9].

7. Andere Fernerkundungssysteme, welche Laser verwenden

In diesem Abschnitt werden einige Methoden kurz dargestellt, die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Laserradar haben. Sie sind keine Radars im Sinne der in der Einleitung gemachten Abgrenzung.

7.1 Aktiver Line-Scanner

Ein solches System wurde unter der Bezeichnung KA-98 von Perkin-Elmer entwickelt [12]. Das Kamerasystem eines passiven Line-Scanners, der die Szene zeilenförmig von einem fliegenden Flugzeug aus abtastet, wird durch einen GaAs-Laser ergänzt. Dieser beleuchtet parallel zum Aufnahmestrahlen den jeweils abgetasteten Objektblock (Fig. 15). Diese aktive Methode ist nicht auf Eigenstrahlung oder Restlicht angewiesen. Da sich die gebräuchlichen Tarnfarben im nahen Infrarot bezüglich der Rückstreuung (Gras, Laub) abheben, erhofft man eine enttarnende Abbildung. Dieses Line-Scan-Verfahren liefert keine Distanzinformation und unterscheidet sich hier wesentlich vom Radar. KA-98 ist auch für den Einsatz auf Drohnen gedacht.

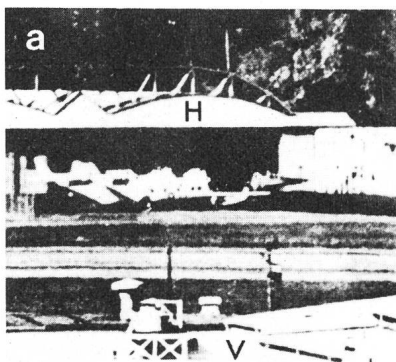
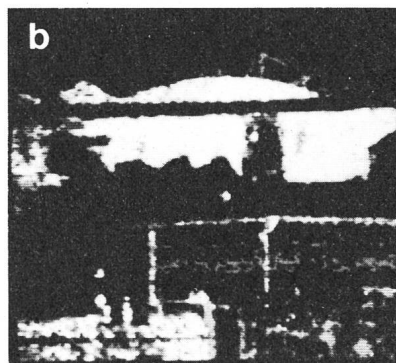


Fig. 14 Darstellung eines Ladar-Bildes

a Foto:
Distanz zu Hangar (H) 2,7 km
Distanz zu Gebäude (V) 1,6...1,8 km



b Radarbild [10, 11]
Auf der Originalfoto zeigen verschiedene Farben verschiedene Distanzbereiche an

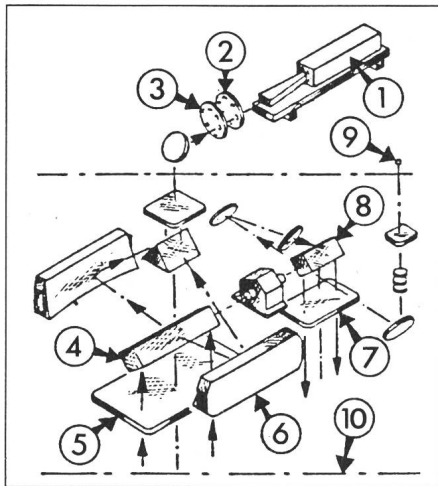


Fig. 15 Aufbau des aktiven Line-Scan-Systems KA-98 [12]

- | | |
|--------------------|-----------------|
| 1 Infrarotdetektor | 6 Primärspiegel |
| 2 Filterrad | 7 Sendefenster |
| 3 Blendenrad | 8 Sendescanner |
| 4 Empfangsscanner | 9 GaAs-Laser |
| 5 Empfangsfenster | 10 Vakuummutter |

7.2 Distanzmesser

Die einfachen Distanzmesser (Range Finders) führen keine Suchbewegung aus. Sie zählen daher nicht zu den Radars. Geräte, die mit moduliertem, kontinuierlichem Strahl eines Diodenlasers arbeiten, werden bei der Gelände Vermessung und auf den Bau-

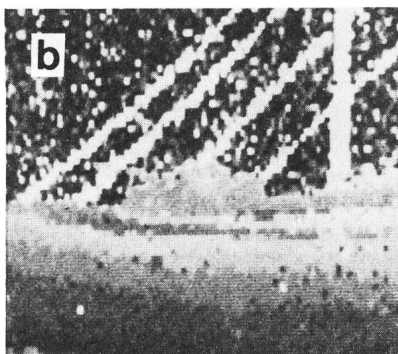
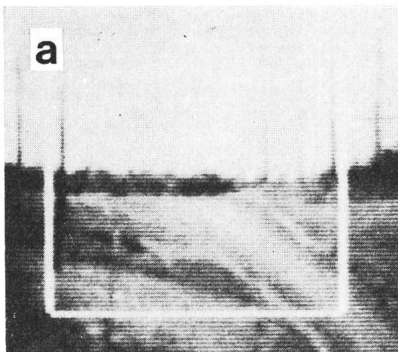


Fig. 16 Detektierbarkeit von Drahtseilen mit Lidar [9]

- a direktes Bild ab Videoband
b Lidarbild

stellen verwendet. Sie erreichen Genauigkeiten von ± 5 mm. Die Ziele werden meist mit Spiegeln markiert, damit Sendeenergie eingespart werden kann. Distanzmesser für das Gefechtsfeld arbeiten im Pulsbetrieb. Die Genauigkeit beträgt $\pm 5 \dots 10$ m bei Distanzen von 5...10 km. Als Quelle werden gepulste Nd-Laser und neuerdings in zunehmendem Mass CO_2 -Laser verwendet.

Distanzmesser, die Distanz und Radialgeschwindigkeit simultan vermessen, befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Sie dürften hauptsächlich in Feuerleitanlagen angewendet werden. Ein solches System, dasjenige des Royal Signals and Radar Establishments, wurde bereits in 4.4 beschrieben [8]. Bei der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) bei München wird ebenfalls an einem solchen System gearbeitet [4].

7.3 Kabelwarngerät

Kabelwarngeräte sind für tieffliegende Flugzeuge und Helikopter bedeutungsvoll. Figur 16 zeigt eine in dieser Hinsicht vielversprechende Eigenschaft des Ladars [9]. Dieses Bild wurde mit einem ähnlichen System erzeugt, wie es für Figur 14 verwendet wurde. Der Sender, ein CO_2 -Laser, hatte aber eine höhere Leistung. Die für Helikopter so gefährlichen Abspannseile treten sehr deutlich hervor. Dieser Effekt wird durch die starke Rückstreuung der Kabel bei der verwendeten Wellenlänge $10 \mu\text{m}$ erklärt. Für Kabelwarngeräte dürfte eine bildartige Anzeige nicht zweckmässig sein. Ein automatisches Warnsignal wäre eher geeignet. Aus diesem Grunde sind die Anforderungen an Reichweite, Auflösung und Abtastgeschwindigkeit nicht so gross wie bei einem hochauflösenden Radar.

7.4 Folgeradar

Folgeradars (Tracker) können als Radars betrachtet werden, die sich auf ein sehr kleines Bildfeld beschränken. Während der Einfangsphase (Akquisition) stellen sich ähnliche Schwierigkeiten wie beim Lidar. Abgesehen davon, dürften Tracker nicht so anspruchsvoll sein bezüglich Informationsfluss und Sendeenergie wie Ladars. Laser-Folgeradars werden schon betriebsmässig zum Verfolgen von

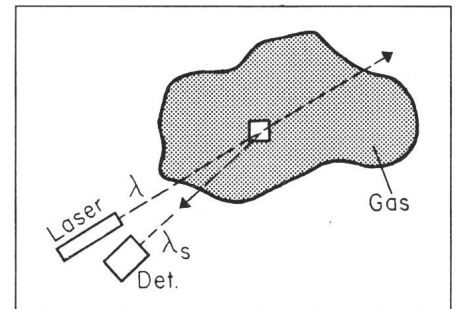


Fig. 17 Prinzip des Lidar

Flugzeugen und Raketen verwendet. Sie gehören zur Ausrüstung bei Welt-raumraketenstarts. Die Geräte für Laserradarmessungen zum Mond können ebenfalls unter die Folgeradars eingereiht werden [13].

7.5 Lidar

Hinter der Bezeichnung Lidar (Light Detection And Ranging) verbirgt sich ein Verfahren, das sich vom Ladar, trotz ähnlicher Bezeichnung, wesentlich unterscheidet. Der Lidar analysiert die rückgestreute Strahlung, die nicht vom Auftreffen auf ein festes Ziel stammt, sondern die unterwegs entlang des Ausbreitungsweges durch elastische Streuung, Ramanstreuung, Fluoreszenz und Resonanzabsorption entsteht. Man gelangt so zu Informationen über die chemische Zusammen-

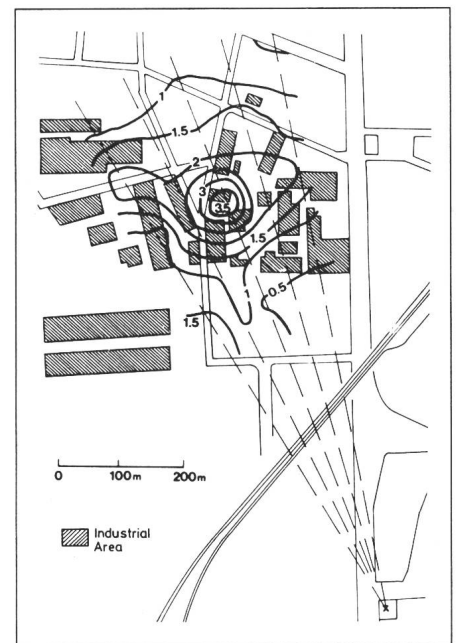


Fig. 18 Messung der Schadstoffverteilung mit Lidar

Verteilung von NO_2 in der Luft in der Umgebung einer chemischen Fabrik. Konzentration in ppm. Messung mit Differential-Absorptions-Lidar [14].

setzung der Gase innerhalb des abgetasteten Volumens. Um möglichst aufschlussreiche Informationen zu erhalten, muss die Wellenlänge verändert werden, was mit einem geeigneten Laser möglich ist. Der Detektor ist ein Spektrometer; er misst die spektrale Zusammensetzung des rückgestreuten Lichtes. Aus dem Zeitverlauf der Signale kann der räumliche Abschnitt, in dem die streuende Spezies auftritt, ermittelt werden. Aus der Intensität der Signale kann die Konzentration der streuenden Teile bestimmt werden. Wie Figur 18 zeigt, ist es mit einem Lidar möglich, die Verteilung von Schadstoffen in der Atmosphäre zu bestimmen [14]. Es ist natürlich naheliegend, solche Methoden zur Entdeckung und Registrierung von chemischen Kampfstoffen zu verwenden.

Abgewandelte und spezialisierte Versionen von Lidargeräten lassen sich zur Messung von Turbulenzen in der Luft verwenden. Sie benützen die Rückstreuungseigenschaften von einigen ausgewählten, immer vorhandenen Luftbeimengungen. Über den Dopplereffekt kann auf den Bewegungszustand der sie mitführenden Luft geschlossen werden. Derartige Geräte sollen bereits an Bord von Flugzeugen mitgeführt werden, wo sie im Distanzbereich von einigen Kilometern die Luft vor dem Bug auf Turbulenzen absuchen und eventuell Kurskorrekturen einleiten. Ob solche Geräte die Ver-

suchsphase hinter sich haben, ist nicht bekannt.

8. Schlussbemerkungen

Die Laserradarsysteme beruhen auf einer ausgereiften Technik, sowohl bezüglich der Quellen (Laser) wie auch bezüglich der Empfänger (Detektoren). Die Schaltungstechnik und die Methoden der Signalverarbeitung lehnen sich eng an die Mikrowellenradartechnik an. Laserradargeräte, die im Prinzip dem Aufbau von Mikrowellenradars entsprechen, erfüllen bis heute die Erwartungen nicht ganz, obwohl schon sehr hohe Winkelauflösungen machbar sind. Die anfallende Informationsmenge überfordert offensichtlich noch die heutigen Methoden.

Andererseits zeigen die Resultate bisher realisierter Systeme, dass das Laserradar Charakteristika aufweist, die das Mikrowellenradar nur geringfügig oder überhaupt nicht besitzt. Eines davon, die Spektroskopie auf Distanz, wird im Lidar bereits intensiv benutzt. Andere wiederum, etwa die Doppler-Ladartechnik oder die Bildkontrastverbesserung aufgrund zusätzlicher Distanzinformation, warten noch auf eine wirkungsvolle Ausnutzung. Dass solche gefunden werden, darf angenommen werden. Eine Zusammenstellung neuerer Arbeiten über Ladars finden sich in einigen SPIE-Proceedings [15...17].

Literatur

- [1] E. Mollwo und W. Kaule: Maser und Laser. - B.-I. Hochschultaschenbücher 79/79a - Mannheim, Bibliographisches Institut, 1966.
- [2] RCA-Electro-optics handbook. Second edition. Harrison/N. J., Radio Corporation of America, 1974.
- [3] D. K. Killinger, N. Menyuk und W. E. DeFeo: Experimental comparison of heterodyne and direct detection for pulsed differential absorption CO₂ lidar. Applied Optics 22(1983)5, p. 682...689.
- [4] F. Malota: A pulsed CO₂ laser heterodyne radar for simultaneous measurements of range and velocity. Technical digest of the second topical meeting on coherent laser radar. Technology and application. Aspen/Colorado, 1983, August, 1...4, WB2-1...4.
- [5] R. A. Brandewie und W. C. Davis: Parametric study of a 10,6- μ laser radar. Applied Optics 11(1972)7, p. 1526...1533.
- [6] J. M. Cruickshank: Transversely excited atmospheric CO₂ laser radar with heterodyne detection. Applied Optics 18(1979)3, p. 290...293.
- [7] M. I. Skolnik: Introduction to radar systems. New York a. o., McGraw-Hill, 1962.
- [8] K. F. Hulme a. o.: A CO₂ laser rangefinder using heterodyne detection and chirp pulse compression. Optical and Quantum Electronics 13(1981)1, p. 35...45.
- [9] R. J. Hull: A place for lasers in radar. Photonics Spectra 16(1982)4, p. 60...66.
- [10] R. J. Hull und S. Marcus: A tactical 10,6 μ m imaging radar. Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton/Ohio, 1978; p. 662...668.
- [11] D. R. Sullivan, R. C. Harney und J. S. Martin: Real-time quasi-three-dimensional display of infrared images. Proceedings SPIE vol. 180: Real-time signal processing II. Washington, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1979; p. 56...61.
- [12] M. D. Toles: KA-98 real time reconnaissance system. Proceedings SPIE vol. 101: Airborne reconnaissance tactical/real time. Washington, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1977; p. 6...9.
- [13] C. G. Lehr: Laser-tracking systems. In: Monte Ross: Laser Applications 2(1974), p. 1...52.
- [14] R. T. H. Collins und P. B. Russell: Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption. In: E. D. Hinkley: Laser monitoring in the atmosphere - Topics in applied physics. Vol. 14 - Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1976; p. 71...151.
- [15] CO₂-laser devices and applications. Proceedings SPIE vol. 227. Washington, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1980.
- [16] Physics and technology of coherent infrared radar. Proceedings SPIE vol. 300. Washington, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1981.
- [17] Coherent infrared radar, systems and applications. Proceedings SPIE vol. 415 Washington, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1983.