

Nachrichtenübertragung mit Licht

Auf der Suche nach neuen
Herausforderungen

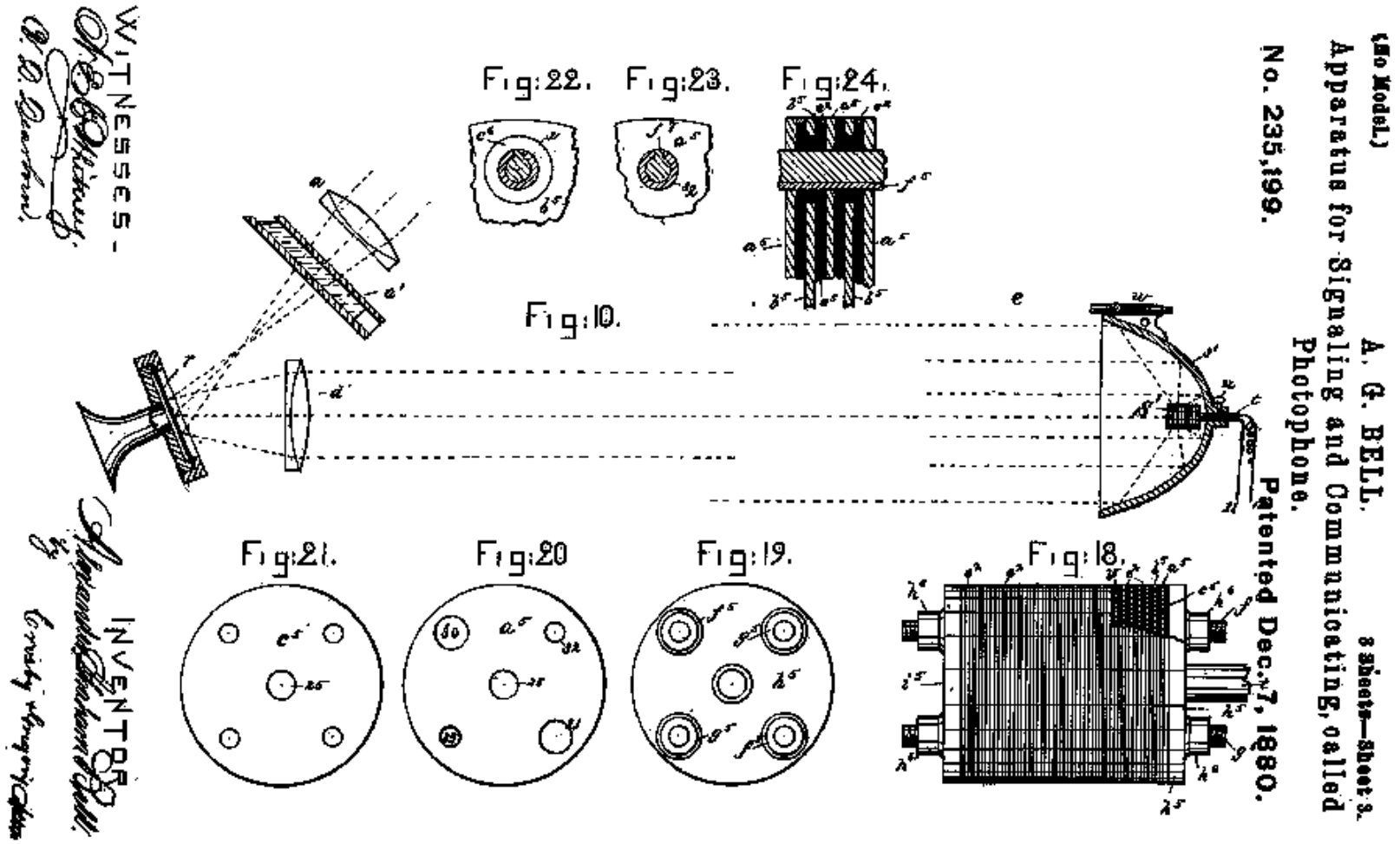
Jo Becker DJ8IL, Klaus DL8SER

Inhalt

- Geschichte
- Geräte und Konstruktion
- LED, Laserdiode und Collimator
- Strahlungsleistung und Reichweite
- Modulation des Lichtsenders
- Fotodioden
- Empfänger-Optik
- Empfänger-Eingangsstufen
- Transimpedanzverstärker
- Rauschquellen, Dynamik
- Blockschaltbild
- Stromlaufplan
- Erfahrungen
- Fragen und Antworten

Geschichte

1880 patentiert Alexander Graham Bell das Photophone Quelle: USPTO



WITNESSES -
W. B. Whittier
W. D. Brewster

INVENTOR
Alexander Graham Bell
 by *Ernst Ingersoll*

Versuche

Was tut sich aktuell?

- Vor 6 Jahren gewann das Experimentierfeld Lichtfunk im deutschsprachigen Raum neue Interessenten durch eine Bauanleitung von Hans-Helmuth Cuno, DL 2 CH, im cqDL Heft 10 und 11/2001. Sein Vorschlag enthält bereits alle Features der heutigen Lichtfunkgeräte. Viel beachtet wurden auch die Mitteilungen von John Yurek, K3PGP im Internet, der einen empfindlichen RX baute.
- Eine Rekord-Entfernung von 167 km überbrückten vor 2 Jahren Chris Long und Mike Groth, VK 7 MJ, zwischen zwei Bergen in der klaren Luft Tasmaniens, mit großen Fresnel-Linsen und 500 mW Luxeon-LEDs.
- Das ATV-Relais DB0TVH in Hannover besitzt eine optische Eingabe. Dorthin wurden im April von Wilfried, DJ1WF und Tom, DL9OBD fast rauschfreie Bilder aus 83 km Entfernung mit 40 mW rotem Laserlicht übertragen.

Versuche

Was tut sich aktuell?

- Wir vier bei P26, das sind Jo, DJ 8 IL, Andreas, DL 4 SDC, Klaus, DL 5 SDG und Klaus, DL 8 SER, beschäftigen uns seit 2004 mit dem Thema.
- Größte mit 5 mW überbrückte Entfernung war bisher 83 km, von Pfänder über den Bodensee nach Singen.



Gerätetypen und Konstruktion

Funktionsblöcke

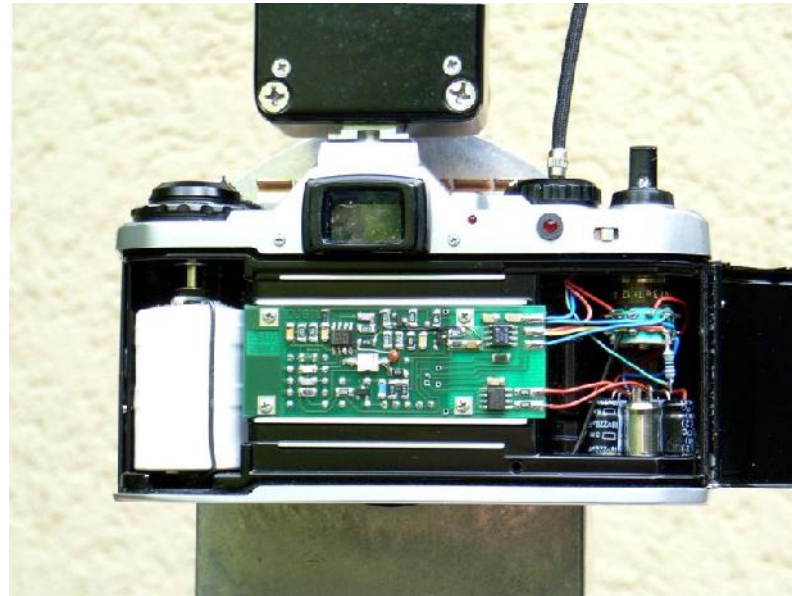
- Sender: klein, wenn Laser auf Lichtzeiger-Basis
- Empfänger: großes Objektiv als „Lichtsammler“ bestimmt die Ausmaße des Gerätes
- Visiereinrichtung: Zielfernrohr oder Reflexsucher
- Stativ: mit Winkelfeineinstellung

Konstruktionen

- Spiegelreflexkamera: RX-Platine statt Film, TX-Aufsatz statt Blitzer
- Schmalfilmkamera
- Feldstecher (seltener)
- Abflussrohr oder Kiste als Tubus

Die Spiegelreflexkamera

- feststehender halbdurchlässiger Spiegel: ideal aber selten
- Klappspiegel + feststellbarer Drahtauslöser tut's auch
- Verschluss und Filmtransport ausbauen: Teile geordnet aufbewahren (Zustandsfotos mit Digitalkamera!)
- Platinen-Layouts z.B. Download von www.funkamateur.de



Die 8mm Kamera

- gute Optik
- günstig auf Flohmärkten zu haben
- Gehäuse mit eingebautem Reflex-Sucher



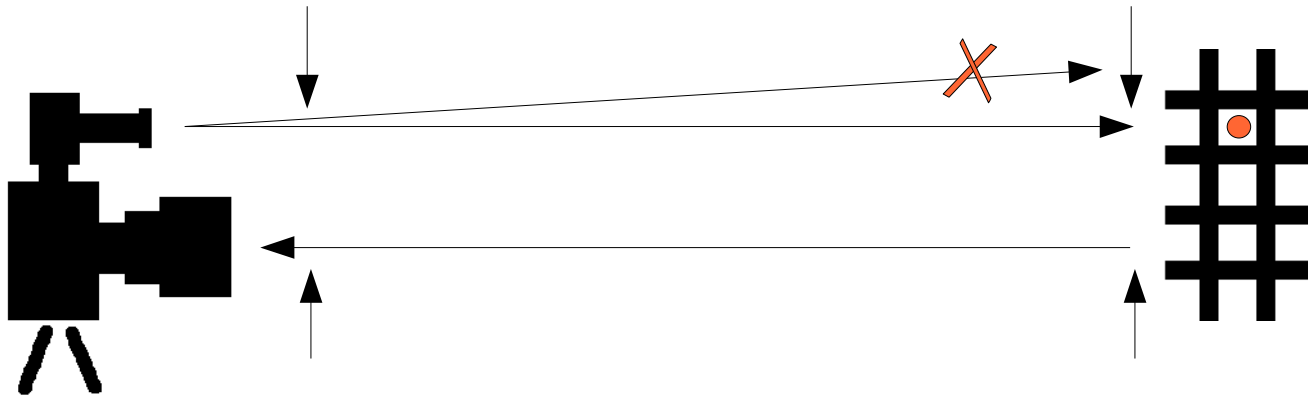
Abflussrohr!

- Billig
- Linsen und Deckel passend für den Tubus
- Optik: Lupen mit 110 mm Durchmesser und 30 bis 50 cm Brennweite



Justiertafel

RX und TX parallel ausrichten

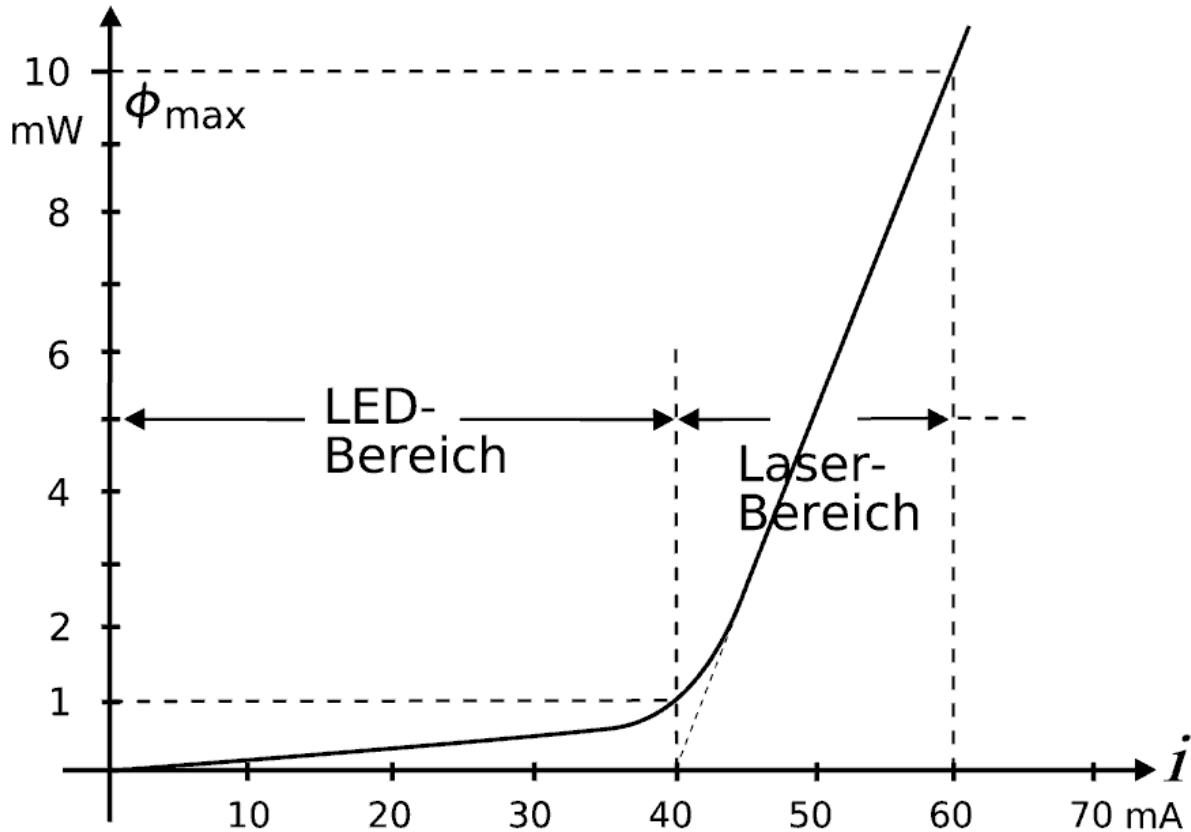


Abstand der optischen Achsen von RX und TX auf eine Justiertafel mit zwei Zielmarken übertragen.

Dann die Justiertafel in größerer Entfernung aufstellen und mit dem RX das Ziel anvisieren. Danach den TX auf die entsprechende Zielmarke ausrichten.

Am Zielort ist dann, bei ausreichend stabilem Aufbau, kein Nachjustieren mehr erforderlich.

Laserdiode und Collimatorlinse

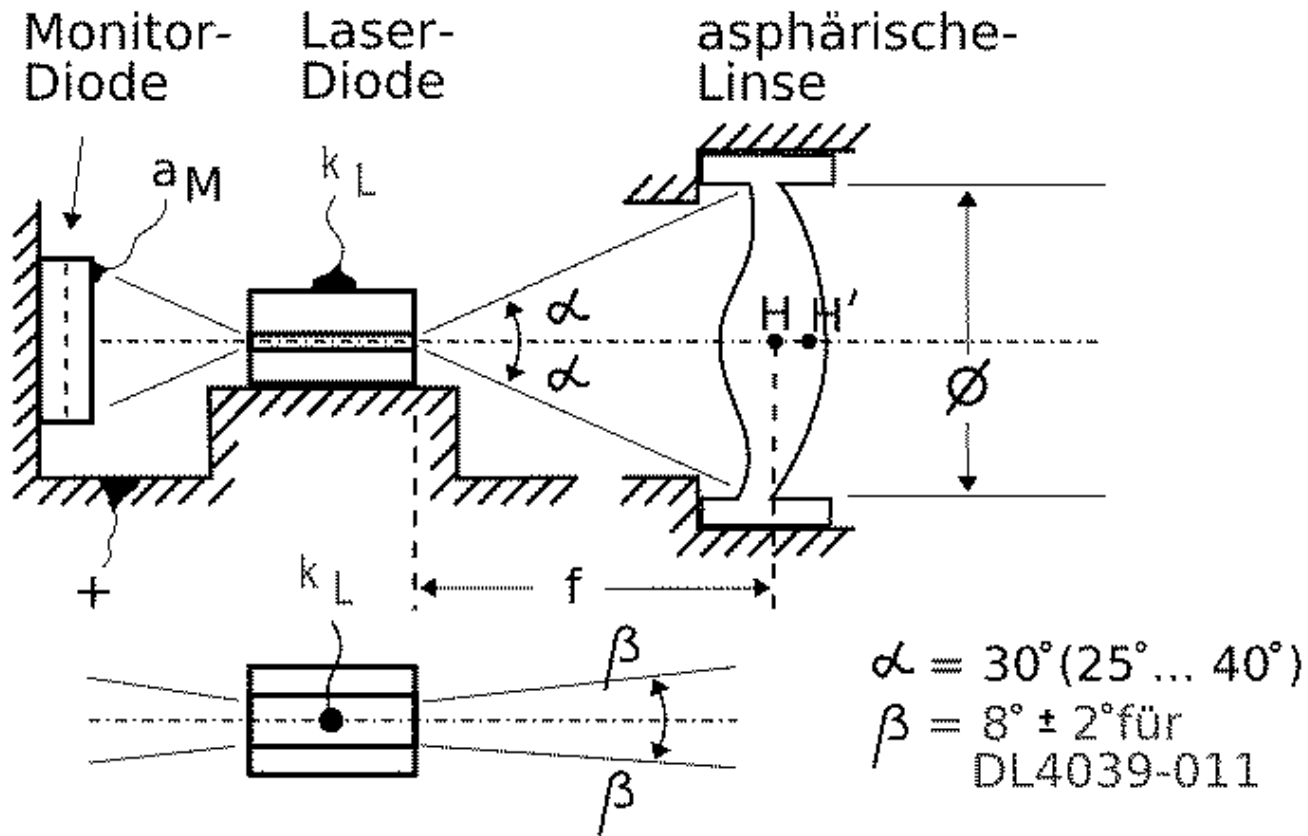


Beispiel:
DL4039-011 i_{th} i_{op}
40 (≤ 70)mA 60 (≤ 90)mA

Kennlinie einer Laserdiode

Laserdiode und Collimatorlinse

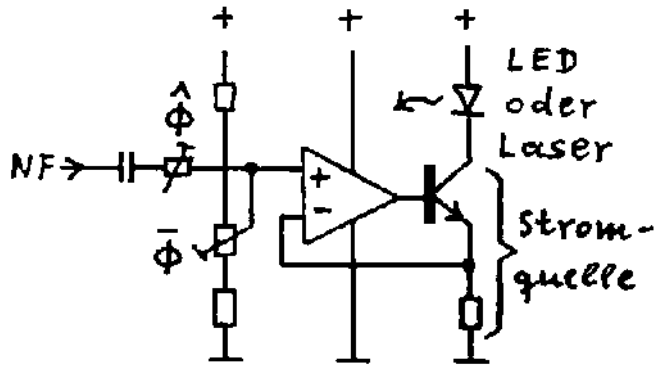
Laser, Monitordiode und Collimator



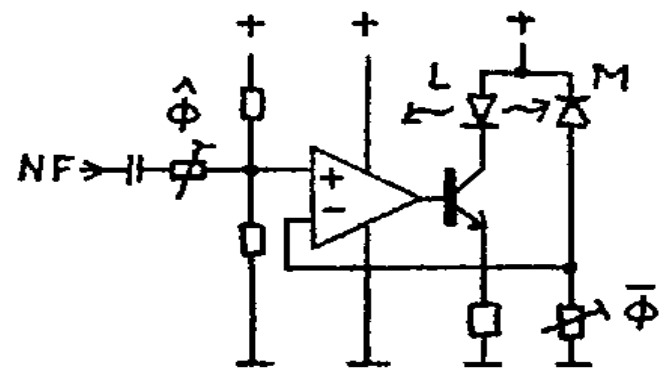
Treiber-Schaltungen für Laser und LEDs

Linearität besteht zwischen Lichtleistung Φ und Strom $i - I_{threshold}$ bis max. ca $1,5 \cdot I_{threshold}$ beim Laser bzw. $0,1 \dots 1 \cdot i_{max}$ (i_{max} Dauerbetrieb!) bei der LED. Das erfordert Ansteuerung mit einer Stromquelle.

- direkte Stromamplitudenmodulation



- geregelt über Monitor-Fotodiode des Lasers



Wegen der extrem scharfen Bündelung reichen ein paar mW Licht zur Überbrückung vieler km aus.

Äquivalente isotrope Strahlungsleistung

Eines Lasersenders:

$$\frac{EIRP}{P_{TX}} = \frac{\text{Kugelfläche in der Entfernung } e}{\text{Lichtfleckgröße in dieser Entfernung}} = \frac{4\pi \cdot e^2}{\pi \cdot d^2 / 4} = \frac{16 \cdot e^2}{(e \cdot \sigma)^2} = \frac{16}{\sigma^2}$$

Mit Divergenz $\sigma = d/e = 1\text{mrad} = 0,001$ und $P_{TX} = 3\text{mW}$ erhält man:

$$EIRP = P_{TX} \cdot 16 / 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-3} \text{W} \cdot 16 \cdot 10^6 = 48 \text{kW} !!!$$

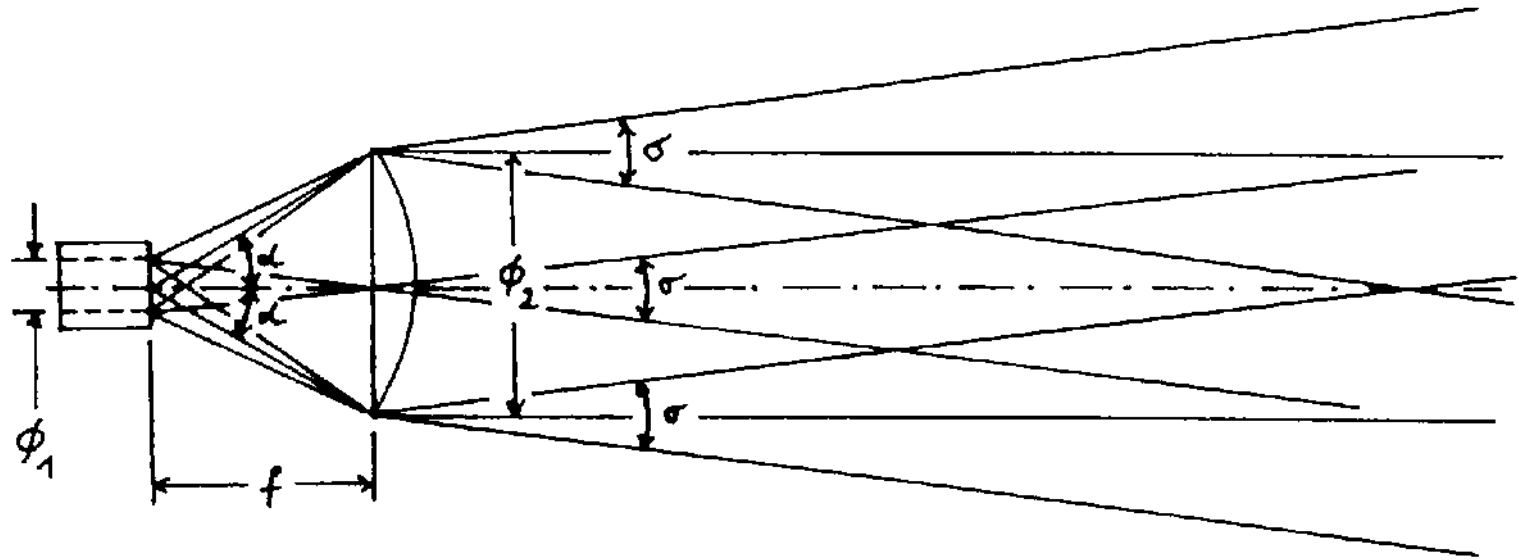
Äquivalente isotrope Strahlungsleistung

Für einen gleichstarken **LED-Sender** mit $\sigma = 15 \text{ mrad}$
[oder $\sigma = 50 \text{ mrad}$]

ist die $EIRP = 3 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 16 / 0,015^2 = 213 \text{ W}$ [bzw. $19,2 \text{ W}$]

- Mit LEDs muß man also eine sehr viel größere Lichtleistung erzeugen, und zwar möglichst punktförmig, um in großer Entfernung die gleiche Leuchtfleckhelligkeit zu erzielen.
- Mehr Licht durch mehrere LED-Chips nebeneinander ergibt zwar eine hellere Lampe, aber mit entsprechend größerer Strahldivergenz: Das Summenlicht fällt nicht auf die Fotodiode im Empfänger und geht somit für die Nachrichtenübertragung verloren.
- Große **Reichweite** erfordert konsequente **Bündelung** der Strahlenergie mit passenden **Collimatorlinsen** vor LED oder Laserdiode. Kenngrößen dafür sind **Apertur** und **Divergenz** eines Strahlenbündels.

Laser-Senderoptik



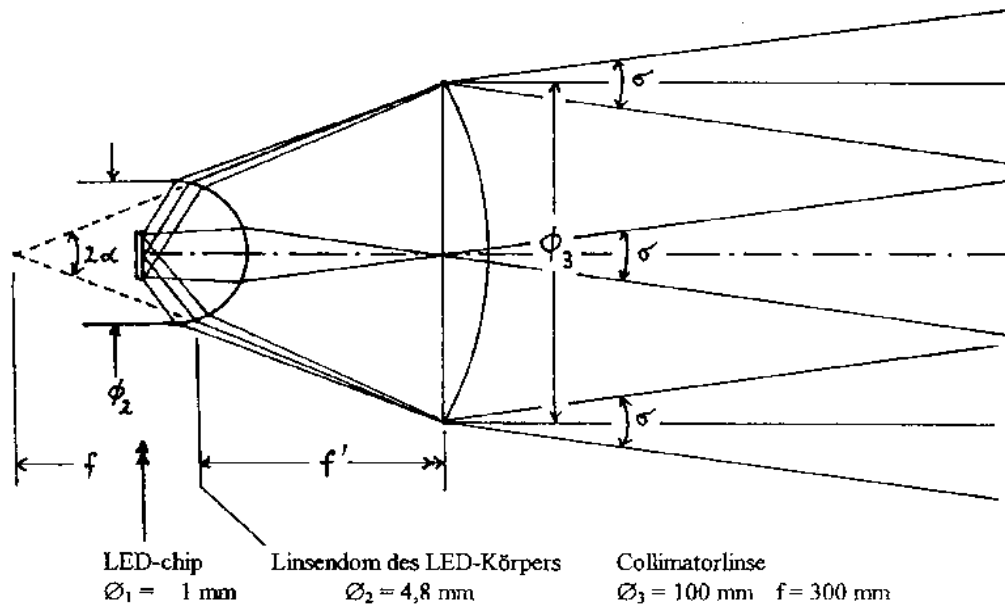
Apertur

$A = 2 \tan(\alpha)$ erfordert wegen $\alpha \approx \pm 30^\circ$ des Laserstrahls für die vollständige Erfassung des Laserlichts eine kleine asphärische Linse mit $\bar{O} \approx 1:0,9$ (!).

Divergenz

$D = 2 \tan(\sigma/2) = \phi_1 / f = 5 \mu\text{m} / 5 \text{mm} = 0,001 = 1 \text{ mrad} = 1 \text{m}$ Strahldurchmesser in 1km Entfernung. Dieser schlanke Strahl ermöglicht die Lichtzeiger-Anwendung und eine große Reichweite mit sehr geringer Lichtleistung.

LED-Sender



Apertur

$A = 2 \tan(\alpha) = \phi_3 / f$ Öffnungsverhältnis $\ddot{O} = 1/\text{Blende}$ soll möglichst groß sein, um möglichst viel Licht von der LED zu erfassen. Ein guter experimentell ermittelter Kompromiss ist $\ddot{O} \approx 1:3$.

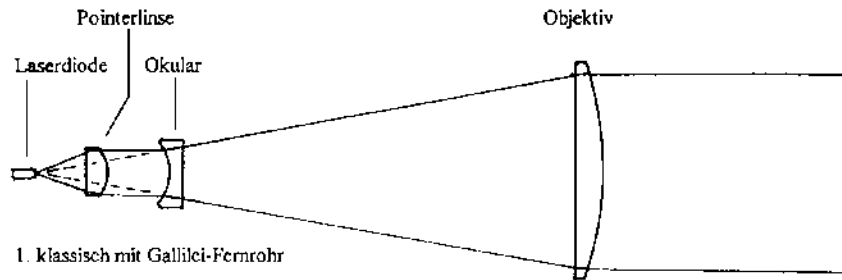
Divergenz

$D = 2 \tan(\sigma/2) = \phi_2 / f' = 4,8 \text{ mm} / 300 \text{ mm} = 0,016 = 16 \text{ mrad} = 16 \text{ m}$ Strahldurchmesser in 1km Entfernung zwischen TX und RX. [Scharfstellung auf den Linsendom brachte mehr Licht zum RX als Fokussieren auf den Chip]

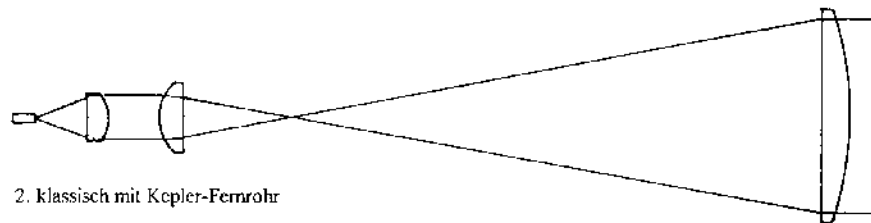
Zusammenfassung

- Die **Apertur** sagt aus, welchen Anteil der Strahlungsleistung des Sendeelements man auf die Reise zum Empfänger schickt.
- Die **Divergenz** bestimmt, wie groß der Lichtfleck am Ort des Empfängers ist.
- Der Strahl aus dem **Lichtzeiger** hat nur 5 mm Durchmesser, im Gegensatz zu 100 mm beim obigen **LED-TX**.
- Das führt zu einer größeren Anfälligkeit gegen **Richtungsänderungen** und **Winkelabweichungen** des Strahls auf dem Weg durch die Luft.
- Die Helligkeit am Ort des RX schwankt stärker, was sich als das für Laserstrecken typische Flatterfading äußert. (**Scintillation**)

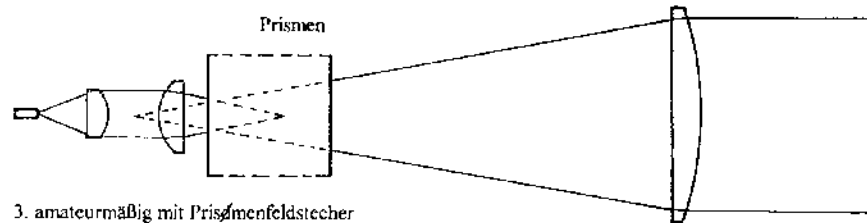
Strahlaufweitung für Lasersender



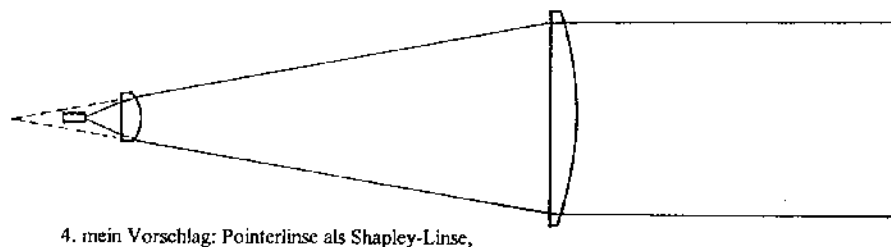
Klassisch mit Galilei-Fernrohr. Der erfasste Öffnungswinkel des Laserstrahls ist wesentlich größer als mit dem Objektiv allein.



Klassisch mit Kepler-Fernrohr. Nachteil: lange Bauform.

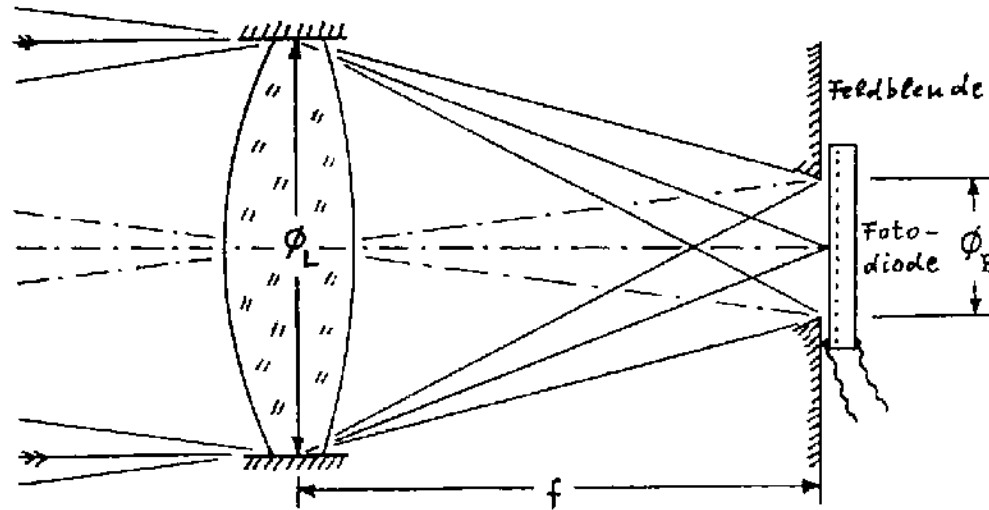


Amateurmäßig mit Prismenfeldstecher (andere Feldstecherhälfte als Zielfernrohr).



Mein Vorschlag: Lichtzeigerlinse als Shapley-Linse, d.h. Abstand vom Laser ist kleiner als die Brennweite, so dass das Objektiv gerade voll ausgeleuchtet wird. Vorteile: kürzeste Bauform, geringster optischer Aufwand, höchste Lichtdurchlässigkeit.

Empfänger-Optik



Einfluß von:

- Bildfeldblende
- Eintrittspupille
- Brennweite f
- Öffnungsverhältnis
 $\ddot{O} = \varnothing/f = 1/\text{Blende}$

Das **Abbild** der Gegenstation ist immer punktförmig:

Selbst ein Sendestrahl mit 5 cm Durchmesser erscheint in 10 km Entfernung unter einem Sehwinkel von nur $5 \cdot 10^{-2} \text{ m} / 10^4 \text{ m} \approx 5 \cdot 10^{-6} \approx 1''$ (eine Winkelsekunde). Um viel **Nutzlicht** zu sammeln, muß \varnothing_L möglichst groß sein.

Störendes **Umgebungslicht**, das aus allen Richtungen einfällt, bewirkt eine Aufhellung der Detektorfläche proportional zu \ddot{O} , dem Öffnungsverhältnis. Um dies klein zu halten, sollte die Brennweite möglichst groß sein. Das erfordert wiederum exakteres Anpeilen der Gegenstation und ein stabileres Stativ.

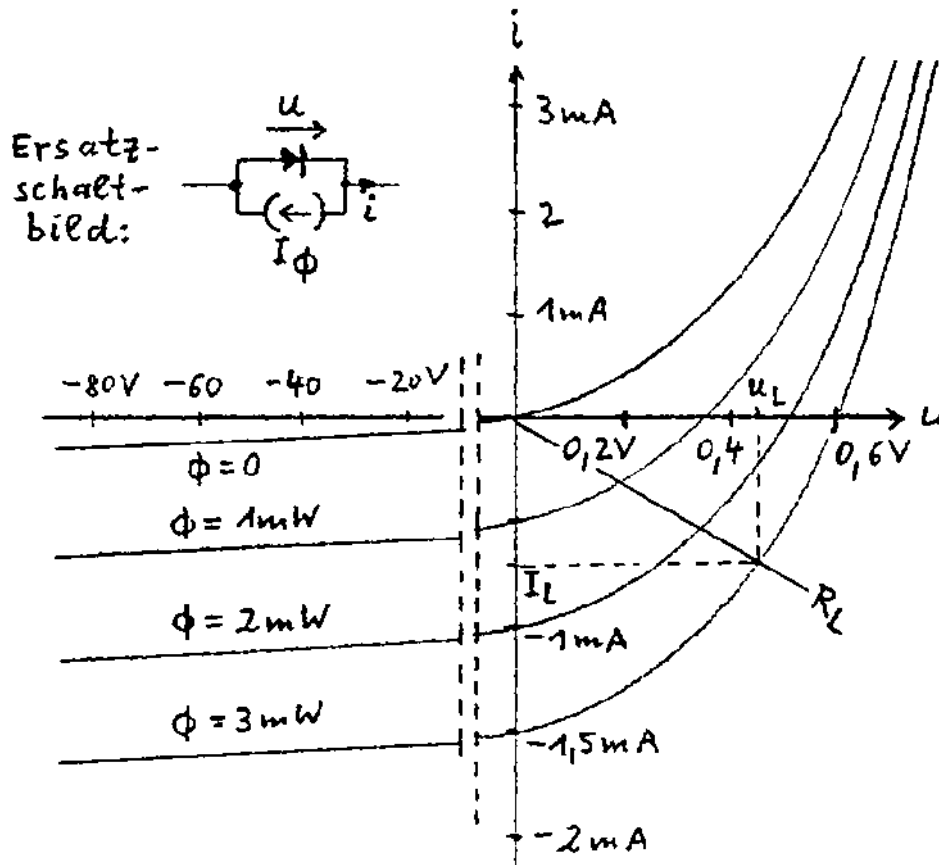
Bei hellem **Tageslicht** wurden folgende Übersteuerungsgrenzen experimentell ermittelt:

$$\varnothing_B = 1 \text{ mm} \rightarrow \ddot{O}_{max} = 1:4$$

$$\varnothing_B = 1,5 \text{ mm} \rightarrow \ddot{O}_{max} = 1:5,6$$

$$\varnothing_B = 2 \text{ mm} \rightarrow \ddot{O}_{max} = 1:8$$

Fotodiode



Kennlinienfeld eines bestrahlten pn-Übergangs:

Dieses Kennlinienfeld beschreibt die folgende Kennlinien-Gleichung:

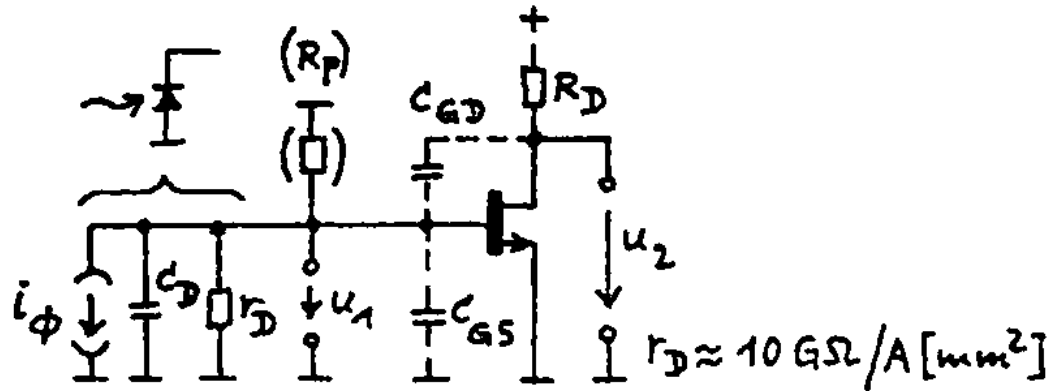
$$i = I_s \left(e^{\frac{uq}{kT}} - 1 \right) - i_\phi \quad \text{wörin}$$

$$\frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV} \text{ bei Zimmertemperatur}$$

und I_s = Sperrsättigungsstrom (hängt ab von Material, Dotierung und Temperatur).

Lichtempfänger- Eingangsschaltungen

Fotoströme von nA bis μA
erfordern FET-Verstärkereingang.



“Hochohm”-Schaltung (ohne
Gegenkopplung über Alles)



Fotodioden-Kennlinienfeld
entspricht der Kennlinien-
Gleichung;

$$i = I_s \left(e^{\frac{uq}{kT}} - 1 \right) - i_\phi$$



in der Praxis, wo $i_\phi \gg I_s$

$$u_1 = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{i_\phi}{I_s} \approx 60 \text{ mV} \cdot \log \frac{i_\phi}{I_s}$$

d.h. u_1 hängt logarithmisch vom Fotostrom i_ϕ ab; deshalb findet man häufig zusätzlich
einen $R_p = n \cdot 10 \text{ M}\Omega$ zur Linearisierung.

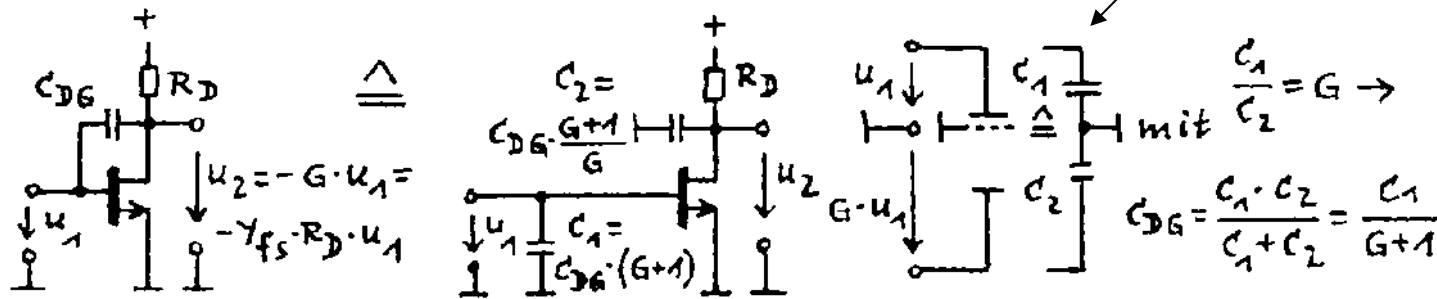
Miller-
Effekt

Problem: niedrige Grenzfrequenz durch $\left[C_D \parallel C_{GS} \parallel C_{DG} \cdot (G+1) \right] \cdot (r_D \parallel R_p)$.

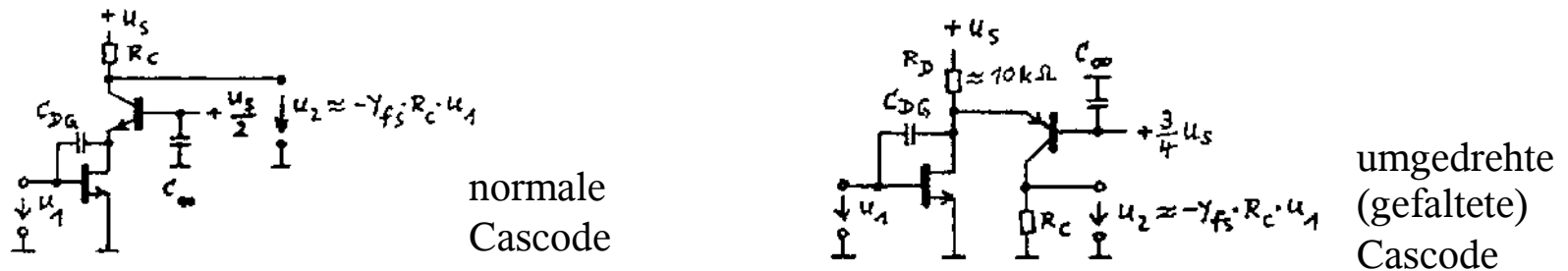
Lichtempfänger- Eingangsschaltungen

Abhilfe:

- Transimpedanzverstärker $\rightarrow R_{in} = R_r / (G + 1) \ll R_r$ oder
- Miller-Effekt vermeiden durch Cascode-Schaltung



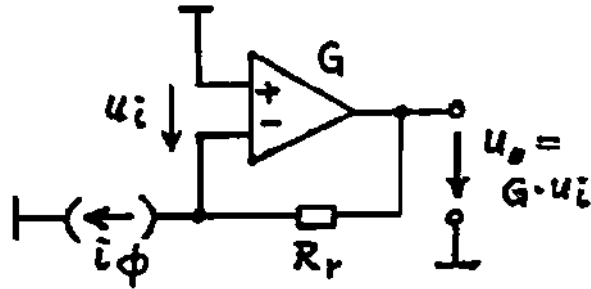
Die Rückwirkungskapazität C_{DG} einer spannungsverstärkenden Stufe erscheint am Eingang als $C_1 = (G + 1) \cdot C_{DG}$ um ein Vielfaches vergrößert.



normale
Cascode

umgedrehte
(gefaltete)
Cascode

Transimpedanz-Verstärker



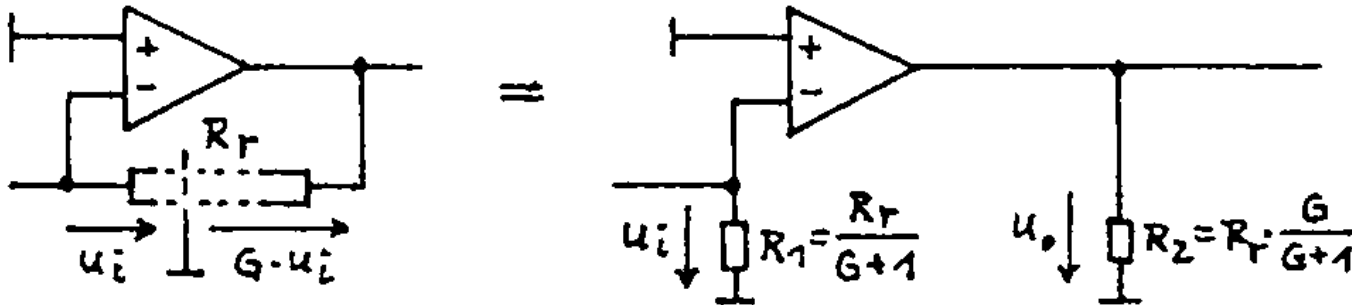
Prinzipschaltung

$$R_f \cdot i_\phi = u_o + u_i = u_i \cdot (G + 1)$$

$$\rightarrow u_i = R_f \cdot i_\phi / (G + 1) \text{ ist sehr klein, praktisch ein}$$

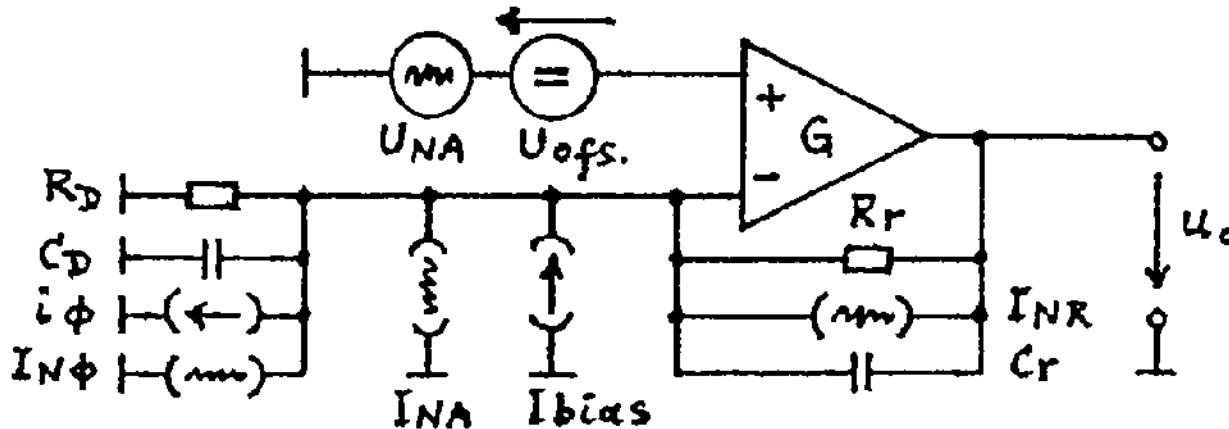
- Kurzschluß der Fotodiode → sehr gute Linearität
- Arbeitswiderstand R_f hochohmig → Rauschen gering
- niedrige Eingangsimpedanz → hohe Grenzfrequenz

Erklärung analog zum Miller-Effekt:



Transimpedanz-Verstärker

Kleinsignal-Ersatzschaltbild



$R_d \approx 10 \text{ G} \Omega / A_D$ in mm^2 kann gegenüber $R_r / (G + 1)$ vernachlässigt werden.
Eingangs-Zeitkonstante $\tau_i \approx C_d \cdot R_r / (G + 1) + C_r \cdot R_r$

Bei Vorspannung der Fotodiode kommt noch deren Sperrstrom selbst und dessen Rauschen hinzu.

Rauschbilanz

eines Lichtempfängers, z.B. in der SLR-Kamera:

Formeln:

- thermisches Rauschen

$$U_{NR} = 4\text{nV} \cdot \sqrt{\Delta f / \text{Hz}} \cdot \sqrt{R / \text{k}\Omega} \quad I_{NR} = 4\text{pA} \cdot \sqrt{\Delta f / \text{Hz}} \cdot \sqrt{R / \text{k}\Omega}$$

- Quantenrauschen des Fotostroms: $I_{N\Phi} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I \cdot \Delta f}$ mit $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
- Verstärkerrauschen wird beschrieben durch eine äquivalente Eingangsräuschspannung U_{NA} und einen davon unabhängigen äquivalenten Eingangsräuschstrom I_{NA} . Funkelrauschen liegt größtenteils unterhalb unseres Signalfrequenzbereichs.
- Betriebsspannungen sind ausreichend gesiebt: sie bringen keine merklichen Rauschanteile.
- NF-Bandbreite = 0,2...2,6 kHz bei höchster Verstärkung ergibt mit den gegebenen Tiefpässen eine äquivalente Rauschbandbreite $f_N \approx 3,6 \text{ kHz}$.

Rauschbilanz

Damit erhält man folgende Rauschbeiträge. (Effektivwerte):

- Transimpedanz-Widerstand $R_r = 10 \text{ M}\Omega$ $\rightarrow I_{NR} = 4 \text{ pA} \cdot \frac{\sqrt{3600}}{\sqrt{10000}} = 2,4 \text{ pA}$
- Quantenrauschen des Umgebungslichts am hellen Tag: Übersteuerungs-LEDs sprechen an bei $3,8 \text{ V} : 10 \text{ M}\Omega = 0,38 \mu\text{A}$ Fotostrom
 $\rightarrow I_{N\phi} = \sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 3600 \text{ Hz}} = 20,9 \text{ pA}$
- Operationsverstärker TLC2272A $I_{NA} = 0,6 \text{ fA} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{3600 \text{ Hz}} = 0,036 \text{ pA}$
Für U_{NA} gilt eine größere Rauschbandbreite f_{NUA} , denn sie erscheint am Ausgang der Transimpedanzstufe nur bis zur Eckfrequenz $f_{c1} = 1 : [2\pi R_r \cdot (C_D + C_{Ain})] \approx 200 \text{ Hz}$ unverstärkt, dann ansteigend wie durch einen Hochpass mit der Eckfrequenz $f_{c2} = 1 : (2\pi R_r C_r) \approx 3,4 \text{ kHz}$, darüber konstant verstärkt um den Faktor $1 + (C_D + C_{Ain}) : C_r \approx 1 + 80 \text{ pF} : 4,7 \text{ pF} = 18$ fach !
Begrenzt wird das Rauschband für U_{NA} nur durch die beiden nachfolgenden Tiefpässe bei $f_c \approx 7,5 \text{ kHz} \rightarrow f_{NUA} \approx 9,2 \text{ kHz} \rightarrow U_N(U_{NA}) = 9 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot 18 \cdot \sqrt{9200 \text{ Hz}} = 16 \mu\text{V}$ am Transimpedanzausgang.
Dem entspricht ein äquivalenter Eingangs-Rauschstrom $I_N(U_{NA}) = 1,6 \text{ pA}$

Rauschbilanz

Gesamtrauschspannung bezogen auf den Ausgang der Transimpedanzstufe:

- $U_N(\text{Nacht}) = 29 \mu\text{V}$ errechnet bzw. $31 \mu\text{V}$ gemessen (inklusive Folgestufen),
- $U_N(\text{heller Tag}) = 210 \mu\text{V}$ errechnet und $210 \mu\text{V}$ gemessen.
- Bei Dunkelheit ist demnach der Rauschabstand um den Faktor $210:31 \approx 6,8 \approx 17 \text{ dB}$ größer als bei kritisch hellem Tageslicht (Sonne abends 20° neben Empfangsrichtung).

Die **Dynamik** meines Lichtempfängers wird nach oben begrenzt durch Vollaussteuerung der AGC-Stufe, entsprechend $0,54 V_{\text{eff}}$ am Ausgang der Transimpedanzstufe;

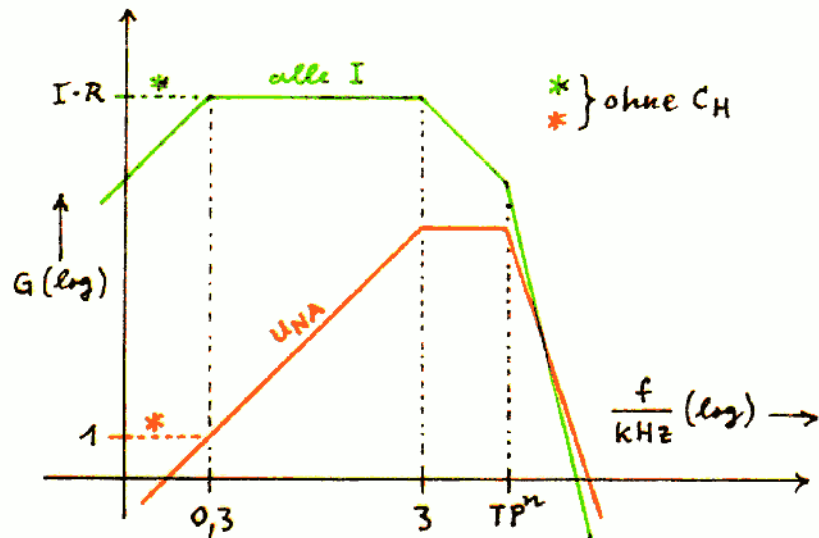
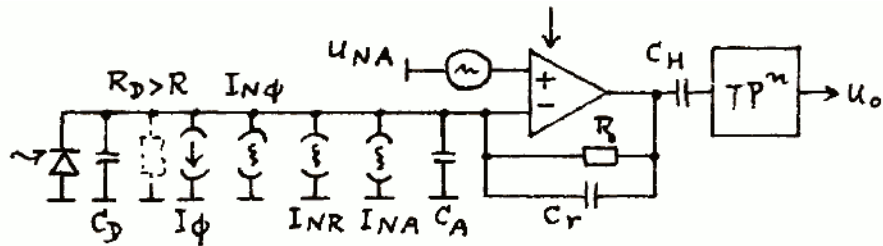
Sie beträgt damit bei hellem Tageslicht: $0,54\text{V}:210\mu\text{V} = 68 \text{ dB}$,
bei Dunkelheit: $0,54\text{V}:31\mu\text{V} = 85 \text{ dB}$.

Durch Umschalten der Transimpedanz auf $220 \text{ k}\Omega$ gewinnt man für den Nahbereich noch 33 dB hinzu.

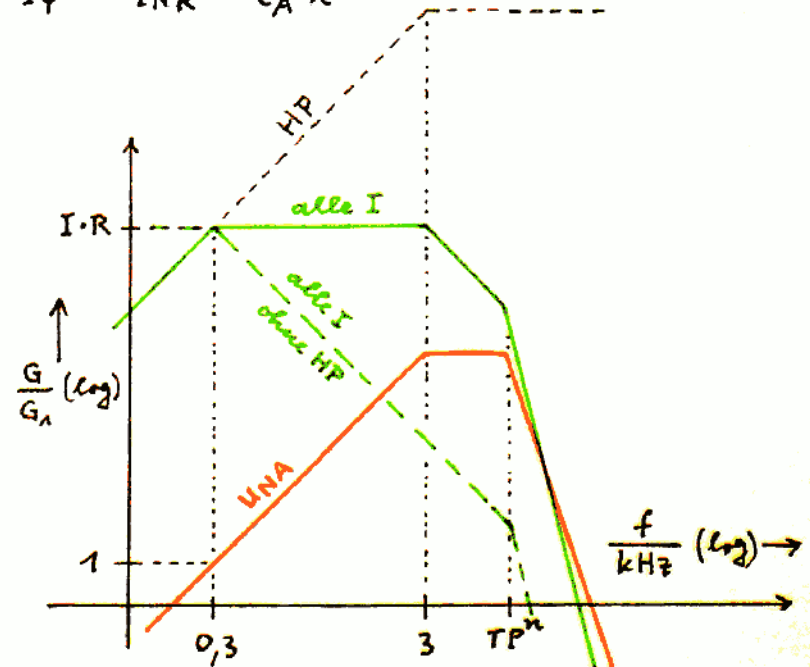
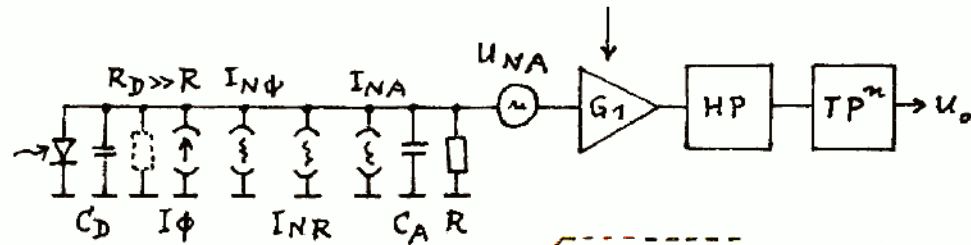
Rauschbilanz

Transimpedanz- oder Hochohm-Verstärker?

FET-Operationsverstärker

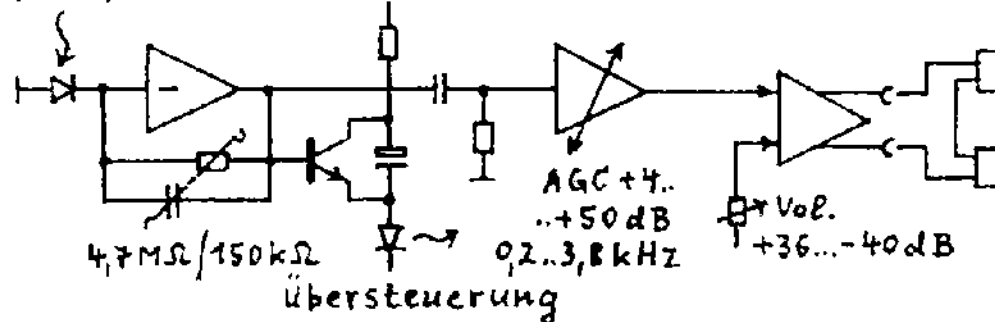
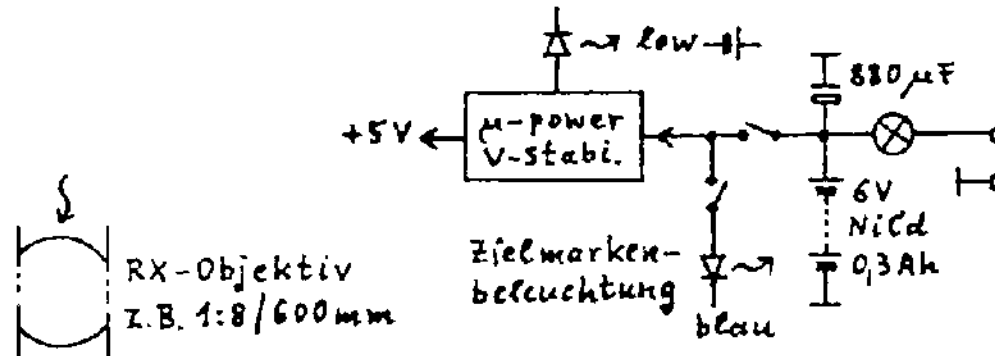
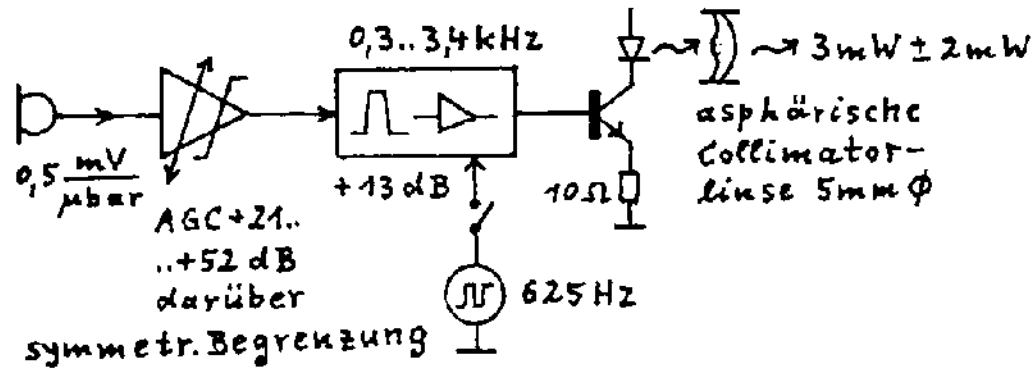


FET-Cascode-Verstärker

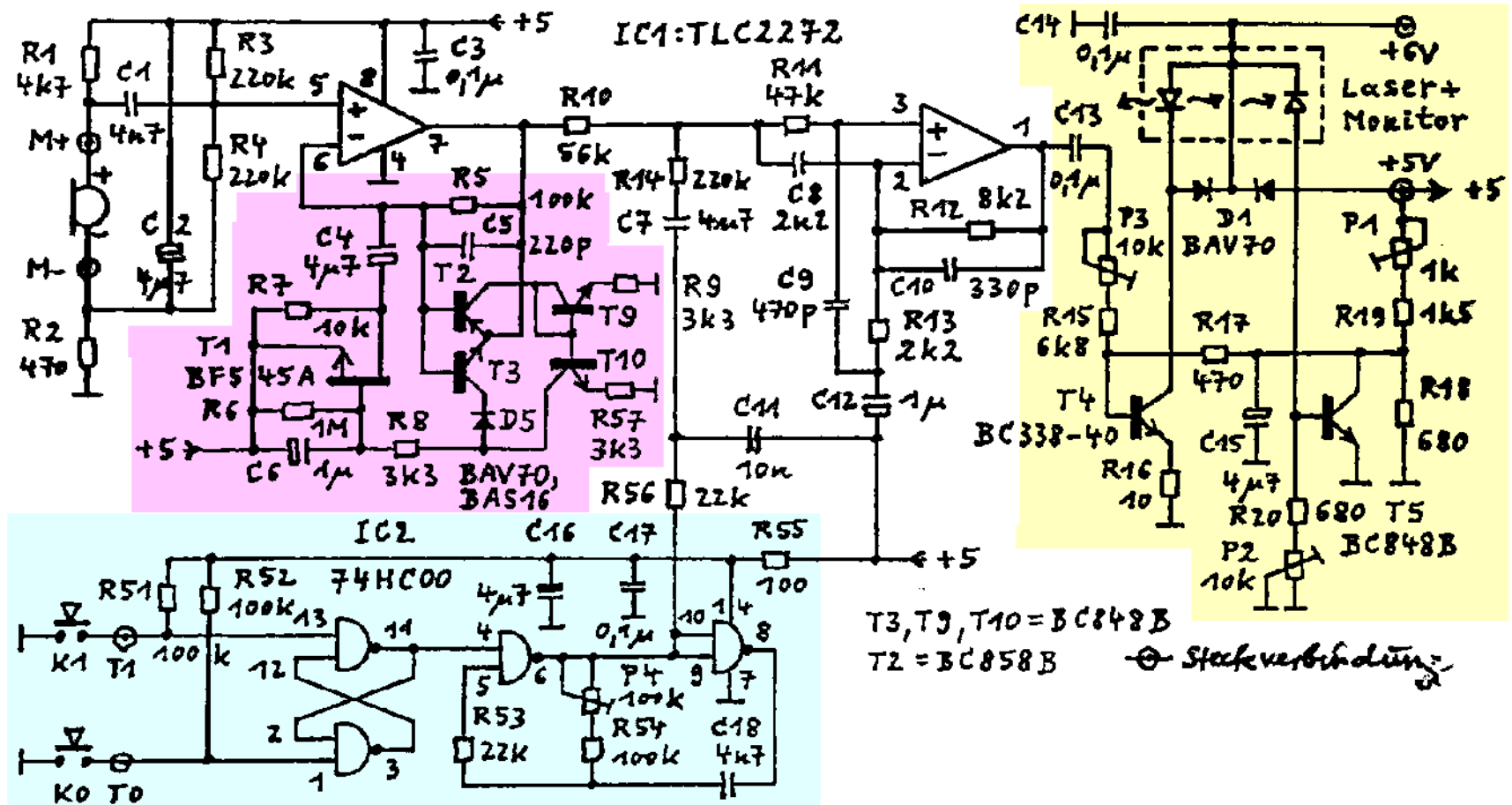


Ergebnis: Beide Schaltungen sind elektrisch gleichwertig (bei gleichen Eckfrequenzen)

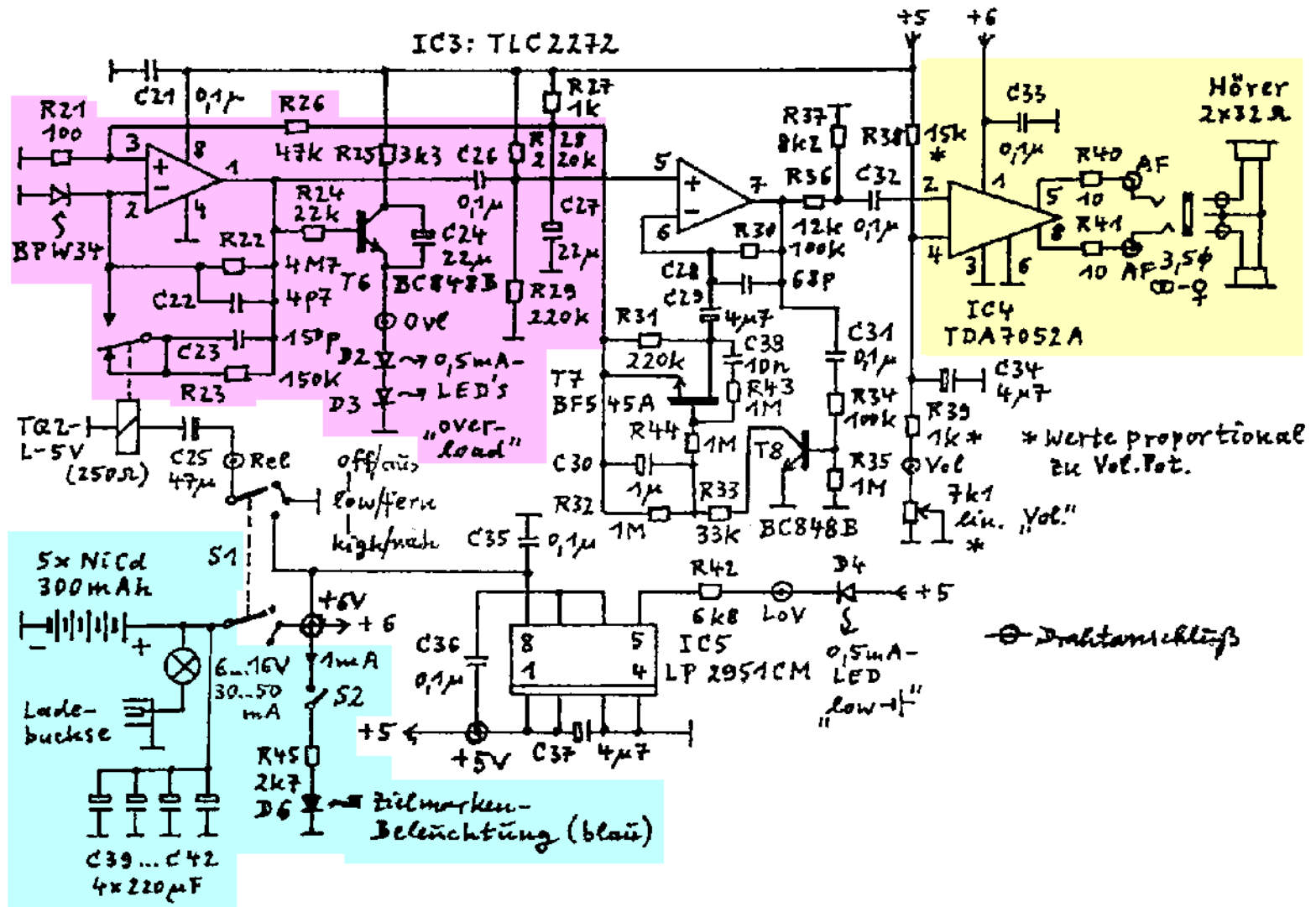
Blockschaltbild



Detailschaltbild Sender



Detailschaltbild Empfänger



Suchen und finden

Probleme

- Standortsuche (freie Sichtverbindung?)
- Sender und Empfänger sind nicht exakt parallel justiert
- Ausrichtung auf die Gegenstation kann sehr lange dauern
- mangelnde Gebiets-Kenntnisse: In welche Richtung muss ich schauen? (Feldstecher!)

Kontaktaufnahme

- starke Fotoblitzgeräte oder blinken mit Auto-Fernlicht
- RX-Sucher bzw. Zielfernrohr auf Blitzquelle ausrichten
- danach Justieren des TRX bis Laserstrahl der Gegenstation zu sehen und Signale zu hören sind
- zunächst Rückmeldungen über Funk (2m oder 70cm)
- zum Schluss Feinjustierung auf maximale Helligkeit des Laserstrahls
- ein Licht-QSO kann dann ohne Nachjustierung über mehrere Stunden geführt werden

Versuchsergebnisse

Ausbreitungsbedingungen

Temperatenausgleich

- sorgt für Luftbewegungen, dies führt zu Scintillation (Funkeln der Sterne).
- Das hat starke Amplitudenmodulation zur Folge.
- Signale können vollkommen unverständlich werden.

“Gutes Wetter” bedeutet

- niedriger Luftdruck
- niedrige Temperatur
- großer Unterschied von Temperatur zu Taupunkt bedeutet geringe Luftfeuchtigkeit und gute Sichtverhältnisse

Fazit

Lichtfunk ist unkomplizierter als man denkt

- Eigentlich handelt es sich um Amplitudenmodulation des Lichts.
- RX: eine Diode als “Detektor”, der ein NF-Verstärker folgt.
- TX: eine Lichtquelle, deren Helligkeit variiert wird.

Wichtig ist:

- eine möglichst große Apertur bei RX und TX (große Linse)
- kleine Detektorfläche bei langer Brennweite
- ein stabiles Stativ erleichtert das Ausrichten
- eine Feineinstellung von Azimut und Elevation