

# Lichttransceiver - Aufbau, Tests und Übertragungsversuche

Reinhard Noll, DF1RN

Die Übertragung von Signalen mit sichtbarem Licht über eine Freiraumstrecke fasziniert Kinder und Jugendliche und weckt ihr Interesse an der Technik. Sie können den Informationsträger unmittelbar sehen und dessen Strahl auf einfachste Weise beeinflussen. Die Experimentierfreude wird geweckt. Und wenn auch noch das eigene Smartphone an den Lichtsender angeschlossen werden kann und die aktuellen Hits der Charts übertragen werden, ist die Begeisterung groß.

Ausgangspunkt des hier vorgestellten Projekts ist der Bausatz des Lichttransceivers AS 801 von AATIS e.V. [1]. Zur Beschreibung der elektronischen Schaltungen wird auf den Artikel im entsprechenden Praxisheft verwiesen [1]. Ziel soll es nicht sein, einen neuen Rekord in der Übertragungreichweite aufzustellen, sondern einen praktischen Aufbau vorzustellen und dessen Eigenschaften zu charakterisieren. Betrachtet werden dazu u.a. die Eigenschaften der Sende-LED, die Amplitudenmodulation des Diodenstroms, das Übertragungsverhalten des Transceivers in einem Testaufbau, die Abschätzung der maximalen Übertragungreichweite und schließlich Versuche über eine Freiraumstrecke von ca. 75 m sowie Reichweitentests mit einer Kopfspiegellampe.

## 1. Aufbau des Lichttransceivers

Bild 1 zeigt das Blockschaltbild des Lichttransceivers mit den verschiedenen Baugruppen. Am Lichtsender *light TX* befindet sich eine line-in Buchse und ein Mikrofonanschluss. Der abgesetzte Sendekopf, hier als *TX head* bezeichnet, ist über eine steckbare Verbindungsleitung angeschlossen. Die Sendeoptik kollimiert das Licht der Sende-LED in Richtung der Empfangslinse. Diese konzentriert das empfangene Licht auf den Fototransistor des Empfangskopfs *RX head*. Dieser ist ebenfalls über eine steckbare Verbindungsleitung mit dem Empfänger *light RX* verbunden. An der Buchse nf können Kopfhörer oder ein NF-Verstärker und Lautsprecher angeschlossen werden.

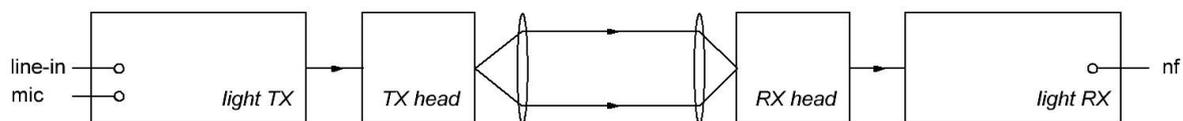


Bild 1: Blockschaltbild des Lichttransceivers

Als Gehäuse für den Lichtsender (*light TX*) habe ich das Modell Teko 011 gewählt [2]. Die Bilder 2 und 3 zeigen die Front- und Rückseite des fertig aufgebauten *light TX*. Zum Anschluß externer Signalquellen, wie Mikrofon und NF-Quelle (MP3 Player, smart phone o.ä.), dienen 3,5 mm Klinkenbuchsen. Neben dem Ein-/Aus-Schalter ganz links (I/O), folgt der Schalter "tone" mit dem ein Pilotton von ca. 625 Hz aktiviert wird. Die Leuchtdiode "clipping" zeigt eine eventuelle Übersteuerung an. Rechts davon befindet sich der Regler für die Einstellung der Empfindlichkeit des Mikrofoneingangs. Bild 2 zeigt die Rückseite des *light TX* mit dem Anschluß für den *TX head* mit der Sende-LED, der ebenfalls wieder als 3,5 mm Buchse ausgeführt ist.



Bild 2: Der Lichtsender *light TX*. Auf der Frontseite befinden sich von links nach rechts folgende Elemente: Ein-/Ausschalter, Pilotton, Übersteuerungsanzeige, Empfindlichkeitseinstellung für den Mikrofoneingang, 3,5 mm Buchse für den Mikrofonanschluss, 3,5 mm Buchse für den Anschluß einer NF-Quelle



Bild 3: Ansicht der Rückseite des Lichtsenders. Links befindet sich die 3,5 mm Buchse für die Verbindungsleitung zur Sendediode

Bild 4 zeigt einen Blick ins Innere des Lichtsenders. Die Abmessungen der Platine betragen 80 x 100 mm<sup>2</sup>. Die Platine ist mit vier M3 Schrauben am Gehäuseboden befestigt. Dazu werden die Schrauben mit jeweils zwei Muttern an der Platine montiert und dann die Schraubenköpfe mit Zweikomponentenkleber auf den Gehäuseboden geklebt. Die Versorgung erfolgt mit einer 9 V Blockbatterie, die zwischen Platine und im Gehäuse eingeklebten Holzplättchen einfach eingeklemmt wird. Die Verbindungsleitungen für die Schalter, LED und die drei 3,5 mm Buchsen sind alle auf der Platinenseite steckbar ausgeführt. Der Messabgriff dient zur Messung des Stroms durch die Sendediode, siehe Abschnitt 2.

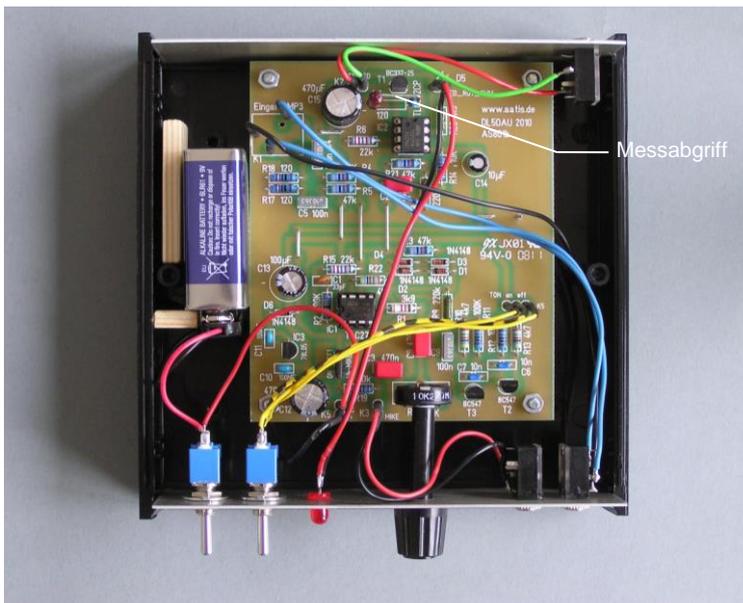


Bild 4: Blick ins Innere des Lichtsenders

Den Lichtempfänger *light RX* zeigen die Bilder 5 - 8 in verschiedenen Ansichten. Als Gehäuse habe ich ein Produkt von Kemo Electronic gewählt mit einem transparenten Deckel, der uns einen Einblick auf das Innenleben gewährt [3]. Die Abmessungen des Gehäuses betragen 120 x 70 x 30 mm<sup>3</sup>. Auf einer Längsseite befinden sich drei Schalter: Ein/Aus, Verstärkung "amp x142/x9", Filter "hp 300 Hz/flat". Die Verstärkungsumschaltung entspricht einer Signalanhebung um ca. +24 dB. Der Hochpass (hp) mit einer Grenzfrequenz von 300 Hz erlaubt die Unterdrückung von Brummgeräuschen, wie sie z.B. durch mit 50 Hz Netzspannung versorgte Lichtquellen entstehen können. In der Stellung "flat" erfolgt keine Filterung des Empfangssignals.



Bild 5: Die Schalter des Lichtempfängers, von links nach rechts: Ein/Aus, Verstärkung x142 oder x9, Hochpaß (hp) oder ohne Filterung (flat).

Bild 6 zeigt eine Schmalseite mit der 3,5 mm Anschlussbuchse für den Empfangskopf *RX head* sowie dem Einstellpotentiometer für die Empfindlichkeit (*sensitivity*). Dem vollen Drehwinkel von 265° des Potentiometers ist eine Skala von 0 bis 100 Skalenteilen zugeordnet, die ich mit dem Programm *Front Designer* erstellt habe [4]. Bild 7 zeigt schließlich die andere Längsseite mit der Buchse für den Anschluss von Kopfhörern oder eines NF-Verstärkers (*headphones / nf amp*).



Bild 6: Anschlußbuchse für den Empfangskopf und Einstellknopf für die Empfindlichkeit.



Bild 7: Auf der anderen Längsseite des Gehäuses befindet sich die 3,5 mm Buchse für den Anschluß des Kopfhörers oder eines NF-Verstärkers

Den Blick von oben auf die Empfängerplatine zeigt Bild 8. Sie misst 40 x 100 mm<sup>2</sup>. Die 9 V Blockbatterie ist wieder zwischen Platine und einem eingeklebtem Holzplättchen eingeklemmt.

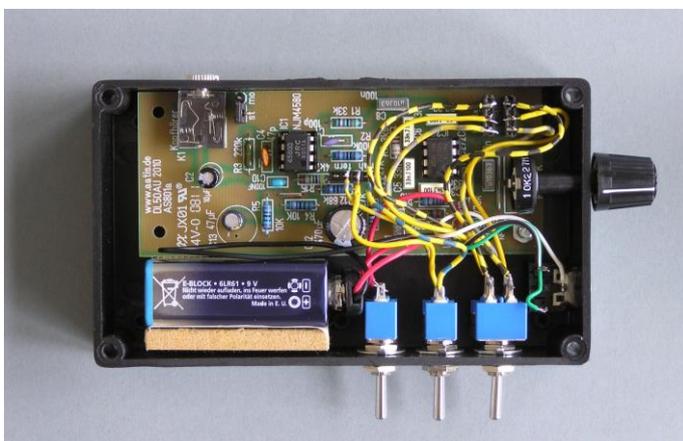


Bild 8: Lichtempfänger *light RX*

Für das Mikrofon habe ich eine kleine Elektret-Mikrofonkapsel aus meinem Bestand genommen und diese auf das Ende eines eloxierten Aluminiumrohrs (Länge 155 mm)

platziert. Das angelötete Anschlusskabel habe ich unter Zugspannung gesetzt und auf der Austrittsseite mit Zweikomponentenkleber mit der Rohrrinnenwand verklebt. Der Durchmesser der Mikrofonkapsel beträgt 6 mm, ihre Höhe ca. 2,5 mm. Die Typbezeichnung des Elektretmikrofons ist mir nicht bekannt, von den Abmessungen her könnte es das Modell MCE-4500 von Monacor sein [5]. Das Aluminiumrohr hat einen Außendurchmesser von ebenfalls 6 mm, so dass sich ein ansprechender bündiger Abschluss ergibt, siehe Bild 9.

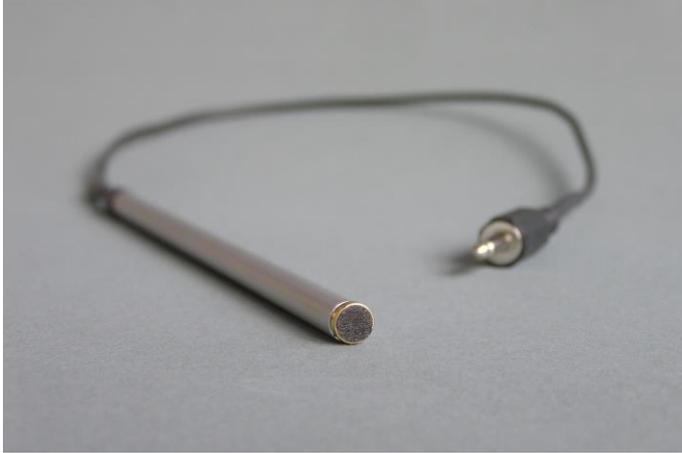


Bild 9: Elektretmikrofon mit Anschlußkabel und 3,5 mm Stecker

Nach der Fertigstellung der Elektronik und der Gehäuse ist der Gesamtaufbau mit der Optik an der Reihe. Bild 10 zeigt ein Foto der Lichtsenders im Betrieb. Auf einem Fotostativ ist eine Holzkonstruktion zur Aufnahme der Komponenten montiert: *light TX* (links hinten), *TX head* mit Sende-LED (in der Mitte, leuchtet) und der Sammellinse, um das Licht zu kollimieren oder zu fokussieren. Den Fotostativadapter und die Kunststofflinse habe ich von AstroMedia bezogen [6]. Auf den Längsseiten der Grundplatte (Spanplatte) sind Seitenwände angeleimt. Die Halterung der Linse ist ebenfalls fest mit der Grundplatte verleimt. Die Halterung der Sende-LED ist nun zwischen diesen Seitenwänden verschiebbar angeordnet, so dass sich eine stabile selbstklemmende Führung ergibt. Auf diese Weise kann der Abstand der Sende-LED zur Optik so eingestellt werden, dass sich - je nach Übertragungsabstand - eine möglichst gute Strahlkollimation ergibt. Die Daten der Kunststofflinse sind: Brennweite 106 mm, Durchmesser 34,5 mm.

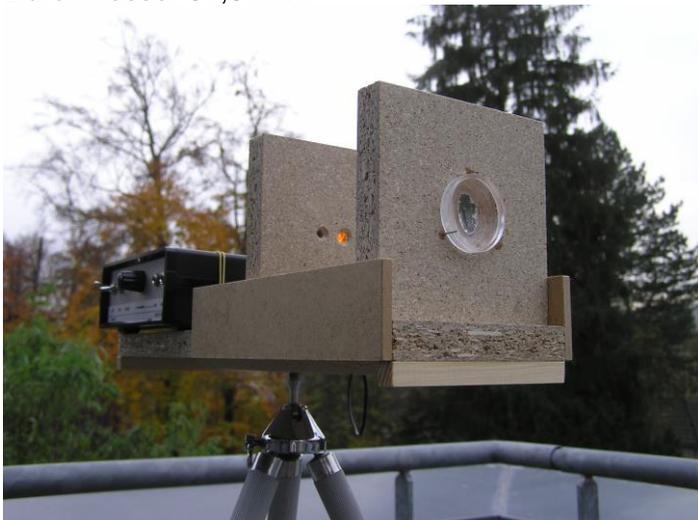


Bild 10: Der eingeschaltete Lichtsender mit Optik montiert auf einem Fotostativ. In der Bildmitte ist die leuchtende Sende-LED (bernsteinfarben, engl. amber) zu sehen

Bild 11 zeigt eine andere Ansicht des Lichtsenders. Das Teko-Gehäuse ist mit Gummibändern und kleinen auf der Holzgrundplatte eingeschraubten Ösen fixiert. Der *TX head* mit der Sende-LED wird über ein 3,5 mm Klinkensteckerkabel mit dem Lichtsender verbunden.

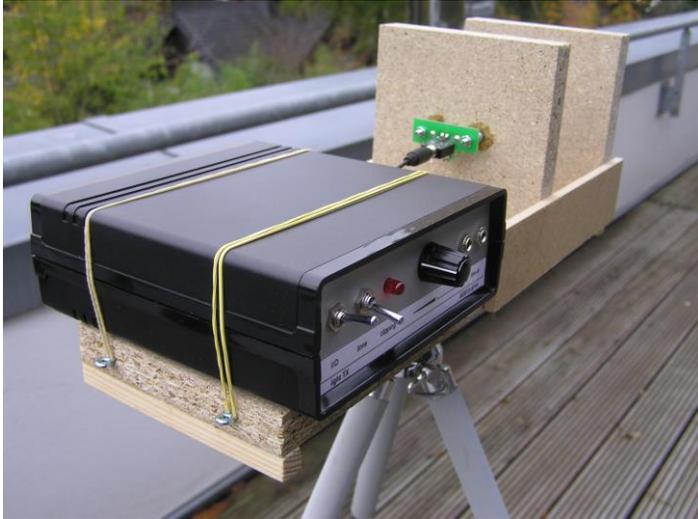


Bild 11: Der Lichtsender aus einer anderen Perspektive

Bild 12 zeigt den Lichtempfänger auf einer vergleichbaren Holzkonstruktion. Zum Schutz vor Fremdlicht ist ein PVC-Rohr an der Halterung der Empfangslinse aufsteckbar montiert (Typ EN 1451 B HTEM DN 75 x 1,9 mm, PP-H DIN 4102-B1). Zum Aufstecken wird ein Blindflansch für dieses PVC-Rohr verwendet, der zentral mit einer hinreichend großen Bohrung zu versehen ist und mit Zweikomponentenkleber auf der quadratischen Holzplatte mit der Empfangsoptik befestigt wird. Die PVC-Teile sind Standardprodukte für Entwässerungen, die im Baumarkt erhältlich sind. Die grau gefärbten Teile habe ich mit einem Sprühlack schwarz gefärbt (Kunstharzbasis, seidenmatt, tiefschwarz, RAL 9005). Der Fototransistor mit der Schaltung des Empfangskopfs ist wieder an einer verschiebbaren quadratischen Holzplatte montiert. Der *light RX* wird mit Gummibändern auf der Grundplatte gehalten. Im "Huckepack" ist in Bild 12 ein kleiner NF-Stereoverstärker in einer Zigarrenkiste zu sehen. Dieser wurde in einer Jugend-Selbstbauaktion des DARC Ortsverbands Aachen (G01) gebaut. Er ist über ein Kabel mit 3,5 mm Klinkenstecker an der Ausgangsbuchse des *light RX* im Monobetrieb angeschlossen, siehe Bild 13.



Bild 12: Der Lichtempfänger mit Empfangsoptik auf einem Stativ. Statt Kopfhörern ist ein Stereoverstärker in einer Zigarrenkiste angeschlossen

Bild 13 zeigt den Lichtempfänger aus einer anderen Perspektive. Die Zigarrenkiste unseres NF-Verstärkers ist auf zwei kleinen Holzträgern mit Gummis und Ösen auf der feststehenden Halterung der Empfangslinse befestigt. Eine der Platinen des Empfangskopfs, in der Mitte von Bild 13 zu sehen, habe ich mit einer 3,5 mm Klinkenbuchse versehen, so dass auch dieser per Standard 3,5 mm Stereo-Klinkenbuchsenkabel mit dem *light RX* verbunden werden kann.



Bild 13: Der Lichtempfänger aus einer anderen Perspektive. In der Bildmitte ist die verschiebbare Halterung für den RX head mit dem Fototransistor und zwei Platinen zu sehen. Dieser wird über ein 3,5 mm Klinkenkabel an den *light RX* angeschlossen

Bild 14 zeigt eine Nahaufnahme des Empfangskopfs. Zwei quadratische Platinen mit jeweils  $35 \times 35 \text{ mm}^2$  werden mit zwei M3 Schrauben zueinander fixiert. Mit zwei weiteren Schrauben ist der Empfangskopf an der Holzplatte montiert. Zur Verbindung mit dem *light RX* habe ich eine 3,5 mm Klinkenbuchse auf einer Ecke der zweiten Platine angeschraubt.

## 2. Sende-LED

Als Sendeleuchtdiode habe ich abweichend von der dem Bausatz beigefügten, das Modell HLMP EL08 XYK00 aus meinem Fundus verwendet. Die technischen Daten dieser Sende-LED sind in Tab. 1 zusammengestellt [7]. Die im Datenblatt angegebenen fotometrischen Größen, wie Lichtstrom (Einheit: Lumen, lm), Lichtstärke (Einheit Candela, cd), sind für Aufgabenstellungen zur Beleuchtung angemessen, hier wollen wir bezüglich der Abstrahlung insbesondere die physikalische Größe *Strahlungsleistung* näher betrachten.

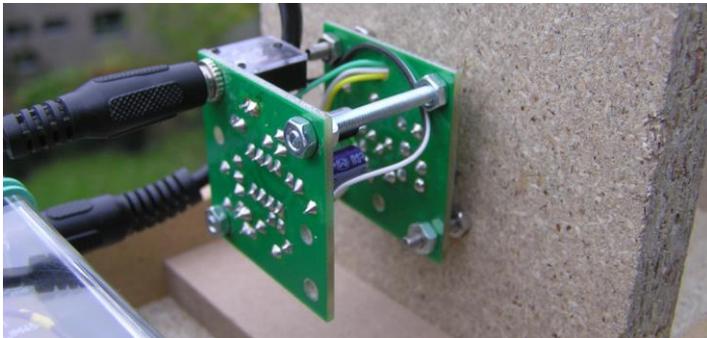


Bild 14: Nahaufnahme des Empfangskopfs

Tab. 1 Technische Daten der Sende-LED des Typs HLMP EL08 XYK00 von Agilent [7]

Kenngröße	Daten
Wellenlänge [nm]	592 bei $I_f = 20 \text{ mA}$
Halbwertsbreite [nm]	17
Öffnungswinkel $2\theta_{1/2}$ [°]	6
Vorwärtsspannung $U_f$ [V]	2,02 bei $I_f = 20 \text{ mA}$
Lichtausbeute $\eta_v$ - luminous efficacy [lm/W]	480
Lichtstärke $I_v$ - luminous intensity [mcd = mlm/sr]	6200 - 13 800
Außendurchmesser des Gehäuses [mm]	$5,00 \pm 0,2$

Um die Strahlungsleistung zu berechnen, ermitteln wir im ersten Schritt aus den Daten der Tab. 1 die Strahlungsstärke  $J_e$  der LED (engl. radiant intensity) mit der Einheit W/sr (Leistung/Raumwinkel):

$$J_e = \frac{I_v}{\eta_v} \quad (1)$$

wobei  $I_v$  die Lichtstärke ist und  $\eta_v$  die Lichtausbeute. Für die Lichtstärke ist im Datenblatt ein weiter Streubereich angegeben. Für die weitere Berechnung nehmen wir der Einfachheit halber den Mittelwert. Mit (1) folgt dann für die Strahlungsstärke:

$$J_e = \frac{10000 \text{ mcd}}{480 \frac{\text{lm}}{\text{W}}} = 20,8 \text{ mW/sr} . \quad (2)$$

Für die Strahlungsleistung - auch Strahlungsfluß genannt - der LED in den Raumwinkel  $d\Omega$  des Emissionskegels gilt:

$$\Phi_e = J_e d\Omega . \quad (3)$$

Die Abstrahlcharakteristik der Leuchtdiode ist der Fig. 5 in [7] zu entnehmen, siehe Bild 15.

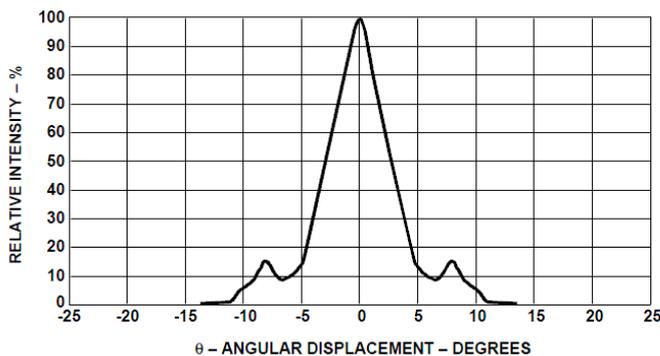


Bild 15: Abstrahlcharakteristik der Sende-LED; relative Intensität der LED als Funktion des Winkels gegen die Längsachse [7]

Um die Abstrahlcharakteristik experimentell zu ermitteln, habe ich das Licht der Sende-LED auf einem Schirm mit Millimeterpapier - ohne eine Optik - in einem Abstand von 31 cm von der LED mit einer Kamera fotografiert, siehe Bild 16. Die Abstrahlung ist näherungsweise rotationsförmig. Sie zeigt einen zentralen Leuchtfleck umgeben von einem Ring. Qualitativ deckt sich dies mit dem Verlauf der Kurve in Bild 15. Der eingezeichnete Kreis 1, der den inneren Leuchtfleck begrenzt, hat einen Durchmesser von ca. 6 cm. Der Kreis 2 umschreibt näherungsweise die gesamte Abstrahlung und hat einen Durchmesser von 11,3 cm.

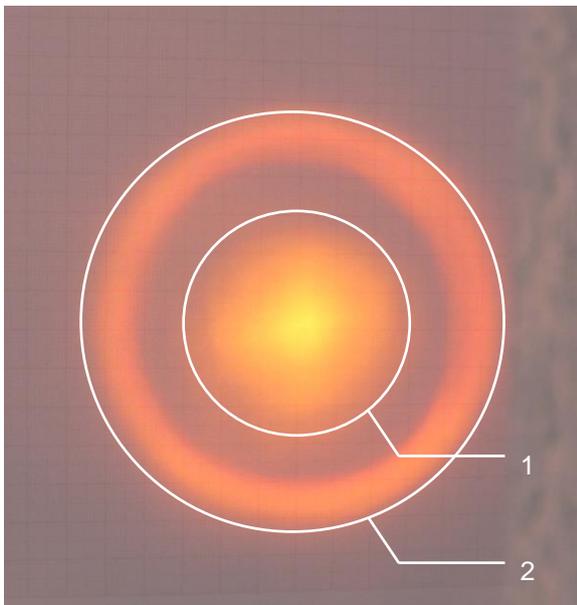


Bild 16: Abstrahlcharakteristik der Sende-LED ohne Optik auf einem Schirm mit Millimeterpapier in einem Abstand von 31 cm. Der eingezeichnete Kreis 1 umschreibt den inneren Teil der Abstrahlung der LED, Kreis 2 umschließt die gesamte Abstrahlung

Der halbe Kegelwinkel des Strahlungskegels errechnet sich mit:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{D_i/2}{s}\right) \quad (4)$$

wobei  $D_i$  der Durchmesser des jeweiligen Kreises  $i = 1, 2$  in Bild 16 ist und  $s$  der Abstand

zwischen der Sende-LED und dem Beobachtungsschirm. Den Raumwinkel berechnen wir aus dem halben Kegelwinkel der Emissionskeule der LED  $\theta_i$  mit folgender Beziehung:

$$d\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta_i)). \quad (5)$$

Die Plausibilität der Beziehung (5) wird klar, wenn wir für  $\theta_i$  z.B. 0 einsetzen, dann wird erwartungsgemäß  $d\Omega = 0$  und für  $\theta_i = \pi$  - entsprechend einer isotropen Abstrahlung in alle Raumrichtungen - folgt  $d\Omega = 4\pi$  sr. Das ist der volle Raumwinkel einer Einheitskugel. Für die Raumwinkel der gewählten Sende-LED gilt damit (die Indizes 1 und 2 beziehen sich auf die in Bild 16 eingezeichneten Kreise):

$$d\Omega_1 = 0,029 \text{ sr}, \quad d\Omega_2 = 0,102 \text{ sr}. \quad (6)$$

Für die gesamte Strahlungsleistung im Emissionskegel ergibt sich mit (3):

$$\Phi_{e1} = J_e d\Omega_1 = 0,61 \text{ mW}, \quad \Phi_{e2} = J_e d\Omega_2 = 2,1 \text{ mW}. \quad (7)$$

Nach dieser Abschätzung sollte die Strahlungsleistung der Sende-LED also zwischen 0,61 mW und 2,1 mW liegen.

Die Strahlungsleistung der LED habe ich experimentell mit einer empfindlichen Silizium-Photodiode der Fa. Coherent, Typ LM-2VIS, sowie dem Auslesegerät Coherent Power Meter LabMax TO gemessen [8]. Die Daten dieses Detektors sind: Messbereich 10 nW bis 30 mW, Auflösung 1 nW, Apertur von  $\varnothing = 7,9$  mm, Wellenlängenbereich 0,4 bis 1,064  $\mu\text{m}$ , Kalibrierfehler  $\pm 5$  %. Die Sende-LED wird für die Messung der Strahlungsleistung direkt - ohne jede weitere Optik - vor dem Detektor LM-2VIS positioniert und die Kalibrierung des Coherent-Messgeräts wird für eine Wellenlänge von 590 nm gewählt. Auf dem Auslesegerät wird im Betrieb der Sende-LED ohne Modulation folgende Strahlungsleistung gemessen:  $0,95 \text{ mW} \pm 0,05 \text{ mW}$ . Dieser Wert liegt zwischen den beiden abgeschätzten Strahlungsleistungen nach (7).

Vom hohen Wirkungsgrad von LEDs ist oft die Rede. Wir wollen den Wirkungsgrad als Verhältnis der gemessenen Strahlungsleistung zur elektrischen Eingangsleistung berechnen. An den Diodenanschlüssen Kathode und Anode habe ich mit einem Multimeter (PeakTech 3315) eine Flußspannung von  $U_f = 1,97$  V gemessen. Aus dem Spannungsabfall an Serienwiderständen in der Zuleitung zur Sende-LED wird ein Strom durch die Sende-LED von  $I_f = 25,7$  mA ermittelt (ohne Modulationssignal).

Bezogen auf die elektrische Eingangsleistung an der Sende-LED resultieren damit folgende Wirkungsgrade (die Indizes 1 und 2 beziehen sich wieder auf die jeweiligen Kreise in Bild 16):

$$\eta_{ges1} = \frac{\Phi_{e1}}{U_f I_f} = 1,2 \%, \quad \eta_{ges2} = 4,2 \%. \quad (8)$$

Der Wirkungsgrad der LED definiert als Strahlungsleistung pro elektrische Eingangsleistung (also W/W in Prozent) liegt also in der gleichen Größenordnung wie der einer Glühlampe, der mit 5 % in Bezug auf die sichtbare Strahlung angegeben wird [9]. Im Sinne der Strahlungsleistung ist der Wirkungsgrad einer modernen LED also eher geringer als der einer Glühlampe. Die Lichtausbeute - also die fotometrische Größe - ist jedoch deutlich höher. Sie beträgt nach Tab. 1 für die LED 480 lm/W wohingegen eine 60 W Glühlampe typischerweise nur 12 lm/W erreicht [9].

Der Licht-Transceiver AS 801 basiert auf einer Amplitudenmodulation des Stroms durch die Sende-LED [1]. Das Übertragungsverhalten eines oszillierenden Eingangssignals an der line-in Buchse des Lichtsenders zum Strom durch die Sende-LED habe ich mit dem Aufbau nach Bild 17 untersucht.

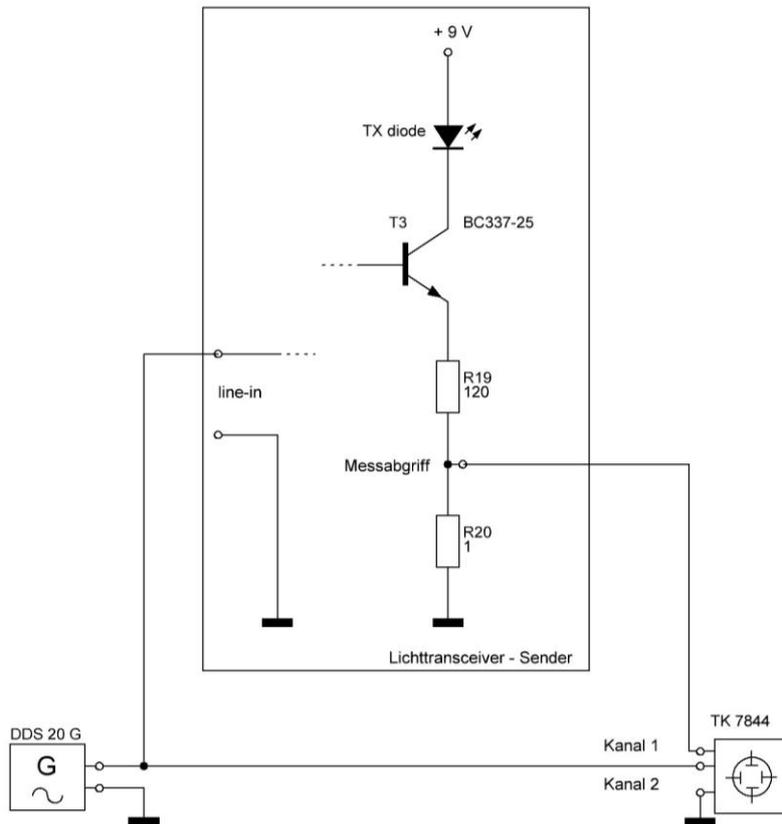


Bild 17: Messschaltung zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens zwischen Eingangssignal am *light TX* und dem Strom durch die Sende-LED (TX diode)

Bild 18 zeigt das Ergebnis für ein Eingangssignal bei einer Frequenz von 100 kHz und eine Amplitude - untere Oszilloskopspur - von  $1 V_{SS}$ . Das am Messwiderstand von  $1 \Omega$ , vgl. Bild 17, abgegriffene Signal zeigt die obere Spur. Es folgt in Gegenphase dem Eingangssignal. Die Spitze-Spitze Amplitude der Spannung beträgt 8 mV. Der Strom durch die Sende-LED hat entsprechend den Spitze-Spitze Wert von 8 mA. Bezogen auf den Strom ohne Modulation von 25,7 mA durch die Diode beträgt der Modulationsgrad im gezeigten Fall also  $m = 4 \text{ mA} / 25,7 \text{ mA} = 0,16$ .

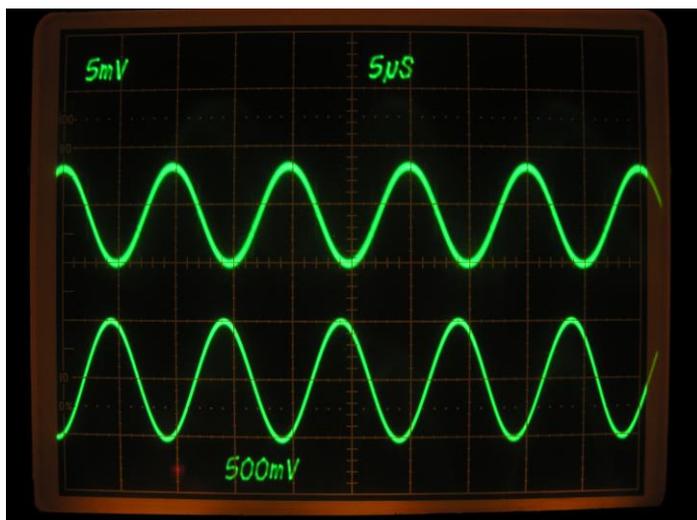


Bild 18: Oszilloskopaufnahme des Eingangssignals (unten) und des Spannungsverlaufs am Messabgriff (oben), siehe Bild 17

Untersucht habe ich die Reaktion des Diodenstroms für Eingangsfrequenzen gleicher Spitze-Spitze Amplituden zwischen 1 kHz und 200 kHz. In diesem Bereich bleibt die Strommodulation durch die Sende-LED praktisch konstant. Unser Sender kann also Frequenzen bis zu 200 kHz verarbeiten.

### 3. Erster Übertragungstest

Für einen ersten Test ohne die Optiken habe ich den in Bild 19 dargestellten Aufbau verwendet. Das Ausgangssignal des Generators DDS 20 G wird auf den line-in Eingang des *light TX* geführt. Der Sendekopf schickt sein Licht - ohne eine Optik - auf eine kleine Holzplatte in einigen Zentimetern Entfernung, die lediglich als Streukörper dient. Das gestreute Licht gelangt zum Empfangskopf - ebenfalls für diesen Test ohne Empfangsoptik. An der Buchse "nf amp" des *light RX* wird unser Stereoverstärker angeschlossen. An einem der Lautsprecher wird schließlich das Signal abgegriffen und zum Eingang eines Spektrumanalysators (HP 70000) geführt.

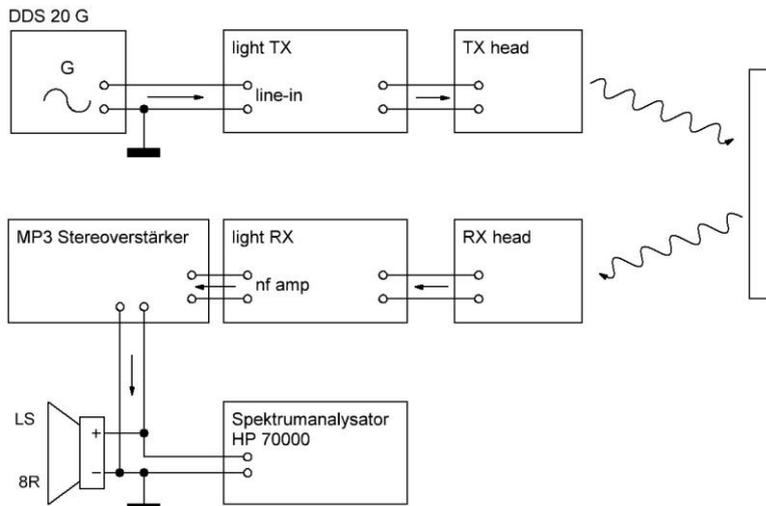


Bild 19: Messschaltung zur Untersuchung des Übertragungsverhaltens vom *light TX* zum *light RX* mit einem Spektrumanalysator. Am line-in Eingang des *light TX* ist ein Frequenzgenerator angeschlossen

Zunächst wird eine Nullmessung durchgeführt, d.h. der *light RX* und der Stereoverstärker sind ausgeschaltet, siehe Bild 20. Am Spektrumanalysator ist eine Auflösungsbandbreite von 10 Hz eingestellt (RB = resolution bandwidth). Der dargestellte Frequenzbereich (engl. span) reicht von 0 bis 1 kHz (horizontal 100 Hz/div, vertikal 10 dB/div). Der Rauschpegel für Frequenzen > 100 Hz liegt bei: - 85 dBm (Ablesewert) + 10 dB (Berücksichtigung des Eingangsabschwächers des Spektrumanalysators) - 8.8 dB (Korrektur, durch Referenzmessung mit einem Frequenzgenerator und einem Oszilloskop bestimmt) = -83.8 dBm, dies entspricht einer Leistung von 4.2 pW. Spezifiziert ist im Frequenzband von 100 Hz bis 1 kHz ein mittlerer Rauschpegel des Spektrumanalysators von < -69 dBm bei 10 Hz Auflösungsbandbreite [10]. Der tatsächliche Rauschpegel liegt also ca. 15 dB tiefer.

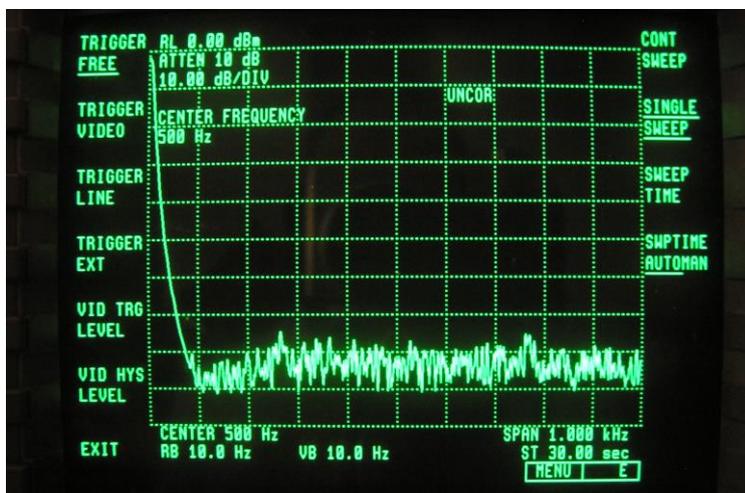


Bild 20: Messung des Rauschpegels des Spektrumanalysators im Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 kHz bei ausgeschaltetem *light RX* und ausgeschaltetem MP3 Stereoverstärker mit der Schaltung nach Bild 19, Auflösungsbandbreite 10 Hz

Jetzt werden der *light RX* und der Stereoverstärker eingeschaltet und ein Sinussignal mit 100 Hz auf den line-in Eingang gegeben. Bild 21 zeigt das Ergebnis (Einstellung am *light RX*: x9, flat). Der Rauschpegel steigt um ca. 4 dB an, entsprechend einer Rauschleistung von -79.8 dBm in 10 Hz Bandbreite.

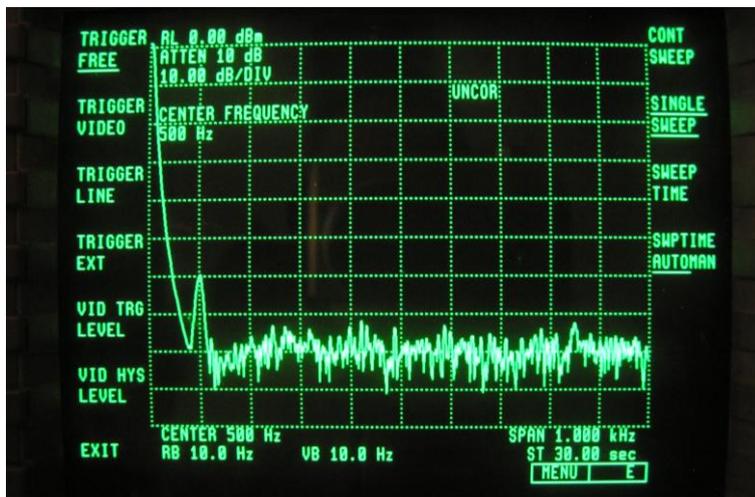


Bild 21: Signalspektrum mit eingeschaltetem *light RX* und Stereoverstärker, am Eingang des *light TX* wurde ein Sinussignal mit 100 Hz eingespeist. Gleiche Einstellungen des Spektrumanalysators wie in Bild 20

Wird die Empfindlichkeit des *light RX* (sensitivity Regler) auf Maximum gedreht, zeigt sich das Spektrum nach Bild 22, deutlich sind Oberwellen zu erkennen bis zur 7. Harmonischen. Bei der Grundwellenlänge ist die Signalthöhe gegenüber Bild 21 um ca. 26 dB angestiegen.

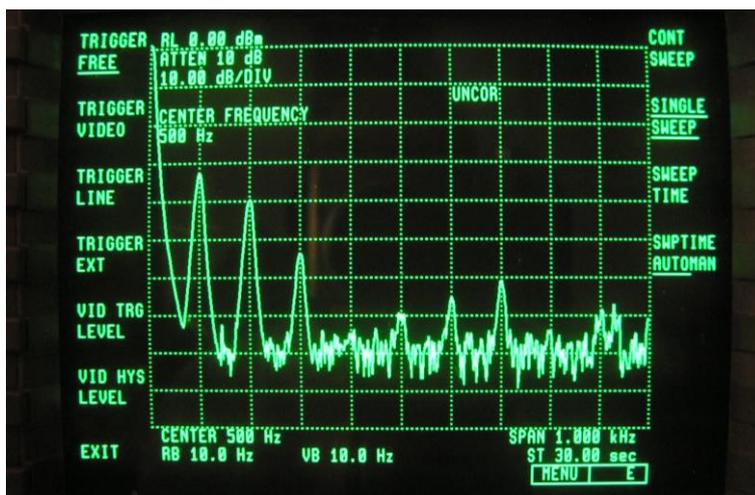


Bild 22: wie Bild 21, jedoch bei maximaler Empfindlichkeitseinstellung des *light RX*

Wird nun am Empfänger der Hochpassfilter eingeschaltet, siehe Schalterstellung "hp 300 Hz" in Bild 5, sind erwartungsgemäß nur noch Frequenzen  $\geq 300$  Hz zu beobachten, siehe Bild 23.

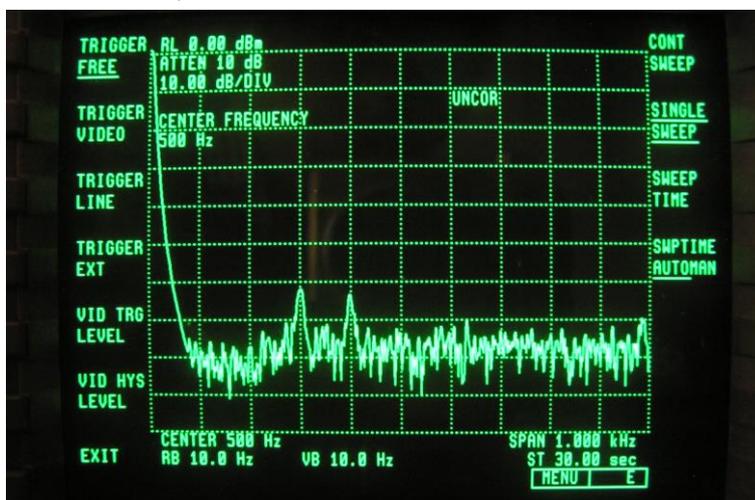


Bild 23: wie Bild 22, bei eingeschaltetem Hochpassfilter

Den Pilotton an der Rauschschwelle (x9, sensitivity gering) zeigt Bild 24 in einem Frequenzband von 0 bis 3000 Hz. Der Pilotton hat eine Frequenz von ca. 625 Hz.

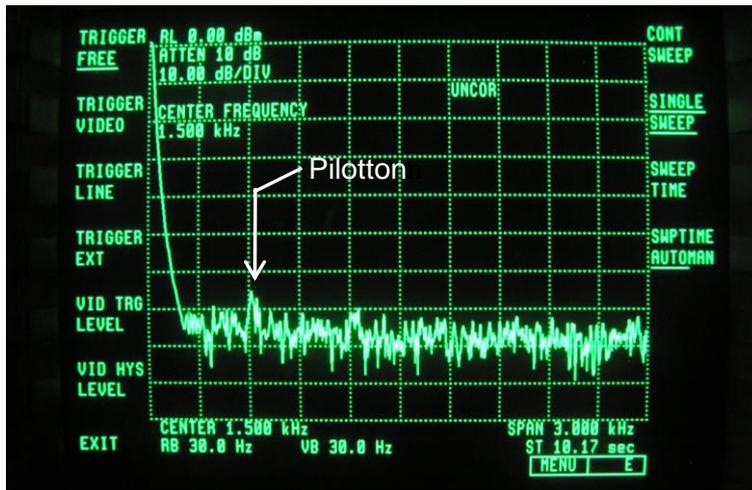


Bild 24: Spektrum mit Pilotton bei 625 Hz in einem Frequenzband von 0 bis 3000 Hz

Wird nun die Verstärkung von x9 auf x142 geschaltet, siehe Bild 5, so zeigt sich das Spektrum von Bild 25. Bei der Grundfrequenz nimmt der Signalpegel um ca. 15 dB zu. Drei Oberwellen sind zu erkennen, die eine Folge davon sind, dass der Pilotton im *light TX* mit einem Multivibrator erzeugt wird.

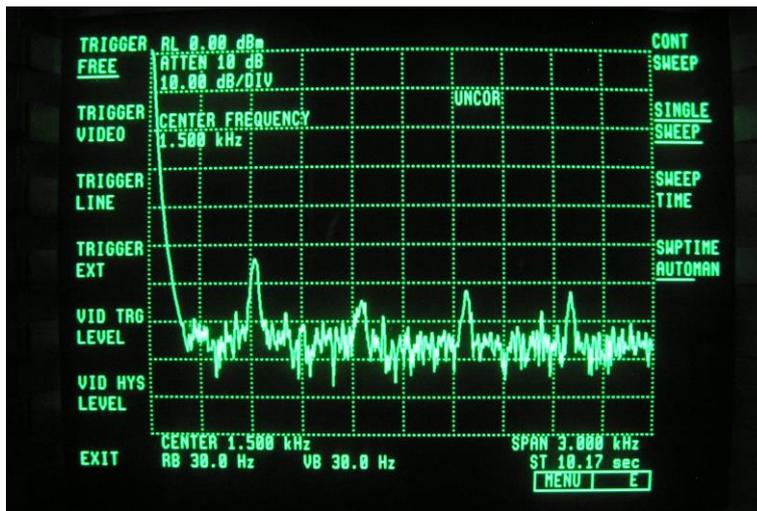


Bild 25: Spektrum mit Pilotton bei Erhöhung der Verstärkung von x9 auf x142 und sonst gleichen Einstellungen wie in Bild 24

#### 4. Abschätzung der Reichweite

Wir wollen zunächst atmosphärische Wirkungen auf die Übertragung des Lichtsignals außer Acht lassen und betrachten nur den Einfluß der Beleuchtungsstärke auf das wahrnehmbare Signal des Pilottons. In einem Abstand  $s$  vom *light TX* liegt näherungsweise folgende Beleuchtungsstärke vor:

$$E_v(s) = \frac{\eta_v \Phi_e}{\pi \left( \frac{D(s)}{2} \right)^2} \quad (9)$$

mit der Lichtausbeute  $\eta_v$ , vgl. Tabelle 1, der Strahlungsleistung der Sende-LED  $\Phi_e$  und dem Durchmesser des Lichtkreises  $D(s)$  im Abstand  $s$ . Die Beleuchtungsstärke hat die Einheit lux, es gilt: 1 lux = 1 lumen/m<sup>2</sup>. Für die Strahlungsleistung der Sende-LED nehmen wir im folgenden den Wert  $\Phi_e = 1$  mW an, vgl. Abschnitt 2.

Die Beleuchtungsstärke (engl. illuminance) habe ich gewählt, weil für diese in einem Datenblatt des im *RX head* verwendeten Fototransistors ein Diagramm zum Fotostrom in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke angegeben ist [11]. Bild 26 zeigt den Kurzschlußstrom in Mikroampère als Funktion der Beleuchtungsstärke in Lux in einer doppellogarithmischen Darstellung [11]. Genauere Angaben, wie dieser Strom gemessen wurde, finden sich leider nicht im angegebenen Datenblatt.

Daher habe ich den Fotostrom durch eine Spannungsmessung am Emitterwiderstand des Fototransistors als Funktion der Beleuchtungsstärke gemessen. Bild 27 zeigt den Emitterwiderstand  $R_5$  an dem der Spannungsabfall mit dem PeakTech Multimeter 3315 gemessen wird. Den *light RX* habe ich für diese Messung ohne eine Empfangsoptik verwendet. Die Beleuchtungsstärke wird durch verschiedene Abstände des Fototransistors vom *light TX* variiert. Die Optik des *light TX* bildet die emittierende Fläche der Sende-LED in unterschiedlichen Abständen ab, sodass ein gut erkennbarer Lichtkreis entsteht, dessen Durchmesser  $D$  mit einem Zollstock auf einem weißen Schirm gemessen wird. Diese Versuche habe ich im Keller unseres Hauses durchgeführt bei geringer Umgebungs-helligkeit. Die zu einem Lichtkreis gehörige Beleuchtungsstärke kann mit der Beziehung (9) berechnet werden. Der Fototransistor wird in seiner Halterung, siehe Bild 14, in die Mitte des Lichtkreises gestellt. Bild 27 zeigt die Ergebnisse.

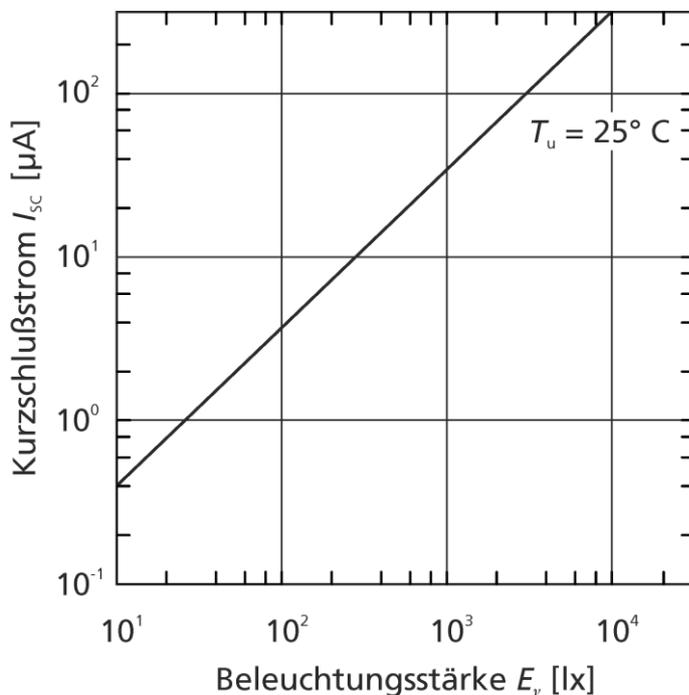


Bild 26: Kurzschlußstrom als Funktion der Beleuchtungsstärke für den Fototransistor ST-1KLB [11]

Die Beleuchtungsstärke konnte zwischen 6 und 1400 lux variiert werden (dies entspricht Lichtkreisdurchmessern von 2 cm bis 30 cm). Der Gesamtstrom  $I_{e\text{ ges}}$ , dargestellt als Kreise, nähert sich für kleine Beleuchtungsstärken einem konstantem Wert. Diesen Strom, der auch bei Dunkelheit fließt, habe ich gemessen, indem der Fototransistor mit einer dunklen Pappe abgedeckt wurde, so dass kein Licht auf ihn fällt. Die quadratischen Datenpunkte zeigen den Emitterstrom, wenn der so jeweils ermittelte Dunkelstrom abgezogen wird:  $I_{e\text{ ges}} - I_{e\text{ d}}$ . Die Datenpunkte liegen näherungsweise auf einer Geraden. Zum Vergleich sind die Angaben des Datenblatts für den Kurzschlußstrom  $I_{sc}$  des Fototransistors als strichlierte Linie ebenfalls im Diagramm des Bilds 28 eingezeichnet. Der Kurzschlußstrom ist stets größer als die gemessenen Werte. Die Kurven verlaufen näherungsweise parallel zueinander.

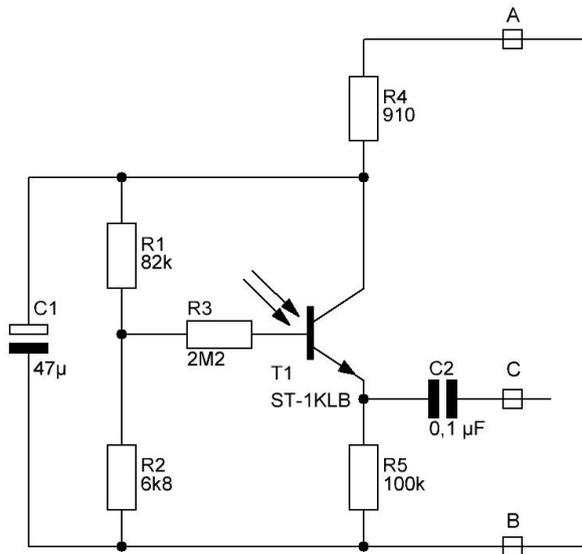


Bild 27: Schaltungsteil des Empfangskopfs mit dem Fototransistor ST-1KLB. Am Widerstand R5 von 100 kΩ wird mit einem Multimeter die Spannung gegen Masse gemessen

Zunächst habe ich einmal getestet, ob vielleicht die schon verringerte Batteriespannung der 9 V Blockbatterien dafür verantwortlich ist, dass die gemessenen Ströme geringer sind als der angegebene Kurzschlußstrom. Daher wurden beide Batterien gegen neue mit einer Leerlaufspannung von 9,5 V ausgetauscht. Den entsprechenden Datenpunkt zeigt das ausgefüllte Quadrat in Bild 28. Auch dieser Punkt rückt nicht wesentlich näher an die Kurzschlußkurve heran. Hätte die Sende-LED doch eine Lichtstärke von 13 800 mcd, siehe Tab. 1, statt des angenommenen Mittelwerts von 10 000 mcd und berücksichtigen wir weiterhin die Reflektionsverluste an der Sende-Optik (ca. 0,92 Transmission), ergäbe sich als Emitterstrom der als offenes Dreieck eingetragene Datenpunkt. Dieser rückt schon etwas näher in Richtung der Kurzschlußkurve. Der beobachtete Unterschied hat offenbar andere Gründe und liegt vermutlich in der Messschaltung für den Strom  $I_{sc}$  begründet, die von der Schaltung nach Bild 27 abweicht.

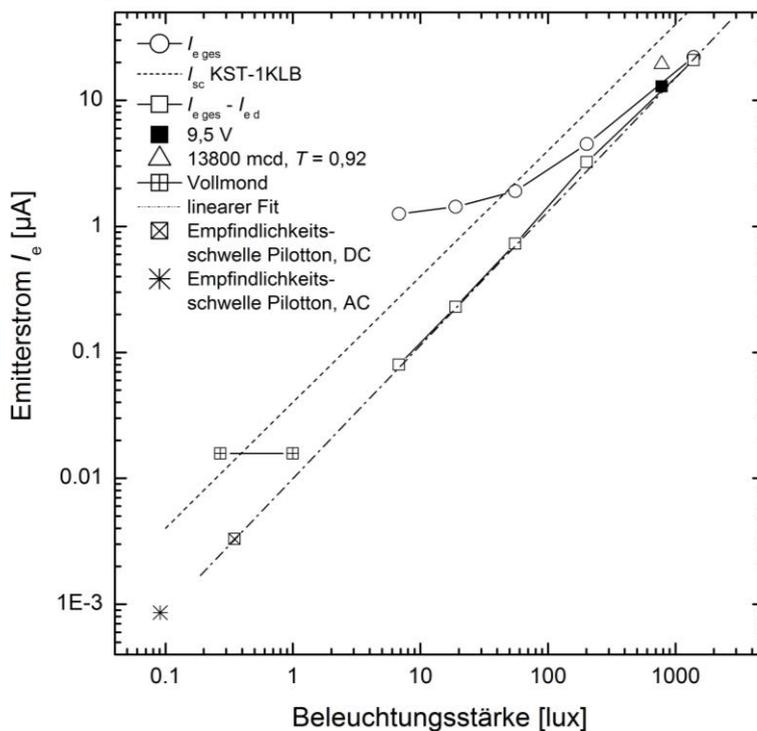


Bild 28: Emitterstrom des Fototransistors als Funktion der Beleuchtungsstärke. Die als Kreise dargestellten Datenpunkte zeigen den gesamten Emitterstrom  $I_{e\text{ ges}}$ . Die offenen Quadrate zeigen den Emitterstrom nach Abzug des Stroms, der auch bei Dunkelheit durch den Emitterwiderstand fließt. Die Kurve aus dem Datenblatt, vgl. Bild 25, ist als strichlierte Linie  $I_{sc}$  dargestellt.

Die gemessene Abhängigkeit des Emitterstroms korrigiert um den Dunkelstrom kann näherungsweise durch folgende zugeschnittene Größengleichung beschrieben werden:

$$I_{e\text{ ges}} - I_{e\text{ d}} = 0.01 \mu\text{A} \left( \frac{E_v}{\text{lux}} \right)^{1.038} \quad (10)$$

Der korrigierte Emitterstrom ist also näherungsweise linear abhängig von der Beleuchtungsstärke. Die durch die Beziehung (10) beschriebene Anpasskurve ist als strich-punktierte Linie in Bild 28 eingezeichnet.

Um einen Test mit einer Lichtquelle näherungsweise bekannter Beleuchtungsstärke durchzuführen, habe ich in den Wintermonaten gegen Mitternacht den *light RX* mit dem Fototransistor ohne eine Empfangsoptik auf den Vollmond bei klarem Nachthimmel gerichtet. Die Beleuchtungsstärke des Vollmonds liegt zwischen 0,27 und 1 lux. Den Emitterstrom abzüglich Dunkelstrom habe ich wieder gemessen. Für die beiden Grenzwerte der Vollmondbeleuchtungsstärke ist jeweils ein Datenpunkt als Quadrat mit einem Kreuz in Bild 28 eingezeichnet. Dieses Ergebnis ist plausibel, es liegt zwischen der im Datenblatt angegebenen Kurzschlußkurve und der durch die Versuche ermittelten Kurve nach der Beziehung (10). Dies zeigt, dass der Fototransistor auch bei ca. 10-fach geringerer Beleuchtungsstärke noch anspricht.

In einem weiteren Übertragungsversuch habe ich die Emission der Sende-LED mit zwei Polarisationsbrillen für 3D-Kinofilme weiter abgeschwächt, indem ich diese einander gegenübergestellt (linkes Brillenglas - eigentlich eine Kunststoffolie - der ersten Brille vor rechtes Brillenglas der zweiten Brille, dabei zeigen die Bügel der beiden Brillen in entgegengesetzte Richtungen) und in den Strahlengang zwischen Sende-LED und Sendeoptik eingefügt habe. Der Empfänger steht in etwa 13 m Entfernung ohne eine Empfangsoptik im so abgeschwächten Lichtkreis. Der Empfänger wird auf die Verstärkungsstufe x9 geschaltet, das Filter auf "flat" und der Empfindlichkeitsregler (sensitivity, siehe Bild 5) wird gerade so weit aufgedreht, dass der Pilotton des *light TX* aus dem Lautsprecher des angeschlossenen NF-Verstärkers gerade wahrgenommen werden kann (sensitivity auf 8 Skalenteile von 100, siehe Skala in Bild 6). Der Emitterstrom des Fototransistors wird wieder mit dem Multimeter gemessen und der Dunkelstrom bei abgedecktem Fototransistor davon abgezogen. Der Mittelwert des korrigierten Emitterstroms aus sieben Wiederholmessungen beträgt:  $I_{cHS} = I_{e\text{ ges}} - I_{ed}|_{HS} = 3,3 \text{ nA}$  (der Index HS steht für die Hörschwelle des Pilottons). Mit der Beziehung (10) kann die Beleuchtungsstärke für diesen Strom abgeschätzt werden:  $E_{vHS} = 0,35 \text{ lux}$ . Dieser Datenpunkt ist als Quadrat mit diagonalem Kreuz in Bild 28 eingetragen. Der so bestimmte Dynamikbereich des Fototransistors reicht also von mindestens 0,35 lux bis 1400 lux. Bei linearer Abhängigkeit des Emitterstroms von der Beleuchtungsstärke entspricht dies einem Dynamikumfang des Stroms von:  $20 \times \log(1400 / 0,35) = 72 \text{ dB}$ .

Der Strom  $I_c = I_{e\text{ ges}} - I_{ed}$  beschreibt nur den Gleichstromanteil des Emitterstroms. Von der Schaltung des Empfangskopfs, siehe Bild 27, wird über den Kondensator C2 jedoch nur der Wechselanteil weitergeleitet und verstärkt. Diesen schätzen wir über den Modulationsgrad des Stroms durch die Sende-LED ab, den ich am Widerstand R20 von Bild 17 bei eingeschaltetem Pilotton mit dem Oszilloskop gemessen habe:

$m = 13 \text{ mV} / (2 \cdot 25 \text{ mV}) = 0,26$ . Die Amplitude des Wechselstromanteils beträgt also 26 % des Gleichstroms durch die Sende-Diode. Da die Lichtstärke der Sende-LED (engl. luminous intensity) linear mit dem Strom skaliert, siehe [7], Fig. 3, und weiterhin der Emitterstrom des Fototransistors näherungsweise linear von der Beleuchtungsstärke abhängt, setzen wir an:

$$m = \frac{\hat{i}_e}{I_c}|_{HS} \quad (11)$$

mit  $\hat{i}_e$  Amplitude des Wechselstromanteils des Emitterstroms des Fototransistors,  $I_c$  Gleichstromanteil, beides an der Hörschwelle. Daraus folgt für die Wechselstromamplitude des Fotostroms an der Hörschwelle:  $\hat{i}_e = 0,86 \text{ nA} = 860 \text{ pA}$ . Die Beleuchtungsstärke variiert an der Hörschwelle mit der Amplitude:

$$\hat{E}_v = mE_{v\text{HS}} \quad (12)$$

wobei  $m$  der Modulationsgrad für den Pilotton ist und  $E_{v\text{HS}}$  der Gleichanteil der Beleuchtungsstärke an der Hörschwelle. Daraus folgt:  $\hat{E}_v = 0,26 \times 0,35 \text{ lux} = 91 \text{ mlux}$ . Die kleinsten detektierbaren Beleuchtungsstärkeänderungen betragen also weniger als 0,1 lux. Das Wertepaar  $(\hat{i}_e, \hat{E}_v)$  ist in Bild 28 als sternförmiger Datenpunkt unten links eingetragen.

Der Lichtkreisdurchmesser als Funktion des Abstands  $s$  von der Sende-Optik kann für große Abstände mit Hilfe der Linsengleichung für dünne Linse näherungsweise berechnet werden:

$$D \approx d_{\text{LED}} \frac{s}{f_{\text{TX}}}, \quad (13)$$

dabei ist  $d_{\text{LED}}$  der Durchmesser der emittierenden Fläche der Sende-LED und  $f_{\text{TX}}$  die Brennweite der Sende-Optik. Wird für  $d_{\text{LED}} \approx 4,8 \text{ mm}$  angesetzt (etwas geringer als der äußere Gehäusedurchmesser, vgl. Tab. 1, um die Gehäusewand näherungsweise zu berücksichtigen), und für  $f_{\text{TX}} = 106 \text{ mm}$  (Angabe von [6] für die eingesetzte Linse), so folgt für  $d_{\text{LED}} / f_{\text{TX}} = 0,045$ . In einem Abstand von 13 m hatte ich einen Lichtkreisdurchmesser von 550 mm bestimmt. Damit folgt aus dem Experiment mit Hilfe von (13) für das Verhältnis  $d_{\text{LED}} / f_{\text{TX}}|_{\text{ex}} = 0,042$ . Dieser Wert weicht weniger als 10 % vom berechneten Wert ab. Mit (9) und (13) folgt für die Beleuchtungsstärke im Abstand  $s$  von der Sende-Optik:

$$E_v(s) = \frac{4\eta_v \Phi_e f_{\text{TX}}^2}{\pi d_{\text{LED}}^2 s^2}. \quad (14)$$

Die Beleuchtungsstärke an der Hörschwelle des Pilottons bezeichnen wir mit  $E_{v\text{HS}}(s)$ . Bei diesem Versuch hatte ich die Sendeleistung LED mit den Polarisationsbrillen abgeschwächt. Der Grad der Abschwächung ist nicht bekannt. Wir berechnen daher denjenigen Abstand  $\tilde{s}$  von der Sende-Optik, der bei unveränderter Sendeleistung gerade die Beleuchtungsstärke  $E_{v\text{HS}}$  ergeben würde:

$$E_{v\text{HS}}(\tilde{s}) = \frac{4\eta_v \Phi_e f_{\text{TX}}^2}{\pi d_{\text{LED}}^2 \tilde{s}^2}. \quad (15)$$

Mit den nun bekannten Größen  $E_{v\text{HS}} = 0,35 \text{ lux}$ ,  $\eta_v = 480 \text{ lm/W}$ ,  $\Phi_e = 1 \text{ mW}$ ,  $d_{\text{LED}} / f_{\text{TX}}|_{\text{ex}} = 0,042$  folgt aus (15):  $\tilde{s} = 31,5 \text{ m}$ . Diesen Abstand hätte ich wählen müssen, um ohne Abschwächung der Sende-LED eine Beleuchtungsstärke am Ort des Empfängers zu erzielen, die gerade der Hörschwelle entspricht.

Wir wollen jetzt berechnen, welche theoretische Reichweite unser Licht-Transceiver erlaubt. Die vom Fototransistor empfangene Beleuchtungsstärke kann durch eine Empfangsoptik vergrößert werden, so dass der Fototransistor folgende Beleuchtungsstärke sieht:

$$E_{v\text{FT}}(s) = V_{\text{RX opt}} E_v(s). \quad (16)$$

Die Größe  $V_{\text{RX opt}}$  beschreibt den "Antennengewinn" durch die Empfangsoptik. Diesen Verstärkungsfaktor berechnen wir wie folgt:

$$V_{\text{RX opt}} = \left( \frac{d_{\text{RX opt}}}{d_{\text{FT}}} \right)^2, \quad (17)$$

dabei ist  $d_{\text{RX opt}}$  der wirksame Durchmesser der Empfangsoptik, im vorliegenden Fall durch den Durchmesser  $\varnothing = 45 \text{ mm}$  der Bohrung in der Holzplatte gegeben, auf die die etwas größere Empfangsoptik montiert ist, und  $d_{\text{FT}}$  ist der Durchmesser der empfindlichen Fläche des Fototransistors von 4,65 mm [11]. Durch Verschiebung der Halterung des Empfängerkopfs, vgl. Bild 14, relativ zur feststehenden Empfangsoptik kann der Lichtkreis gerade auf

den Durchmesser  $d_{FT}$  oder kleiner abgebildet werden. Mit den angegebenen Daten und (17) ergibt sich ein Gewinn von  $V_{RX\ opt} = 93,7$ .

Die Hörschwelle hatten wir mit einer gegebenen Verstärkung (x9) und einer bestimmten Einstellung des sensitivity Reglers (12 Skt) bestimmt. Für eine höhere Verstärkung und maximale sensitivity können sicher kleinere Ströme registriert werden. Die Beziehung (10) kann wie folgt verallgemeinert werden, um den äquivalenten Emitterstrom zu berechnen, wenn mit höherer Verstärkung gearbeitet wird. Wir nehmen dazu an, dass die Verstärkerschaltung linear arbeitet:

$$I_e(s) = V_a V_s 0,01 \mu A \left( \frac{V_{RX\ opt} E_v(s)}{\text{lUX}} \right)^{1.038} \quad (18)$$

Dabei beschreibt  $V_a$  die maximale Verstärkung des *light RX* im Verhältnis zu derjenigen, die bei der Hörschwellenmessung verwendet wurde, also  $V_a = x142/x9 = 15,8$ , vgl. Bild 5. Die Größe  $V_s$  gibt dies entsprechend für die Einstellung des sensitivity Reglers an:  $V_s = 100 \text{ Skt} / 8 \text{ Skt} = 12,5$ . Setzen wir nun diesen Strom nach (18) dem Strom bei der Hörschwelle gleich:  $I_e(s) = I_{e\ HS} = 3,3 \text{ nA}$  und lösen diese Gleichung nach  $s$  auf, so erhalten wir:

$$s = \sqrt{\frac{4\eta_v \Phi_e f_{TX}^2 V_{RX\ opt}}{\pi d_{LED}^2 \text{lUX}} \cdot \left( \frac{V_a V_s 0,01 \mu A}{I_{e\ HS}} \right)^{1/1.038}} \quad (19)$$

Auf der rechten Seite von (19) sind alle Größen bekannt, einsetzen führt schließlich auf  $s \approx 3890 \text{ m}$ . Unter Ausnutzung der maximalen Verstärkung sollte also unter idealen atmosphärischen Bedingungen mit dem Lichttransceiver eine Reichweite von ca. 3,9 km überbrückt werden können.

Bild 29 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und dem Abstand nach der Beziehung (14) und (16). Die rechte Ordinate zeigt die zugehörige Bestrahlungsstärke in der Einheit  $\text{W/m}^2$ . Als horizontale Linie ist die Beleuchtungsstärke an der Hörschwelle eingezeichnet. Je nach "Antennengewinn"  $V_{RX\ opt}$  schneiden diese Kurven die Beleuchtungsstärke  $E_{v\ FT\ HS}$  in unterschiedlichen Entfernungen. Die rote Kurve entspräche einer Empfangsoptik mit einem Durchmesser von 450 mm.

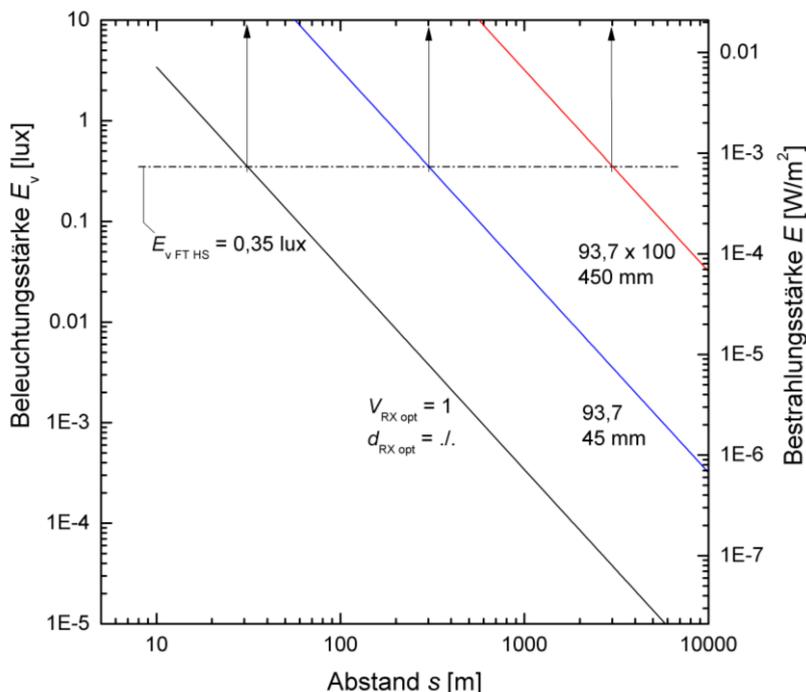


Bild 29: Beleuchtungsstärke auf dem Fototransistor als Funktion des Abstands zwischen *light TX* und *light RX* für verschiedene Werte des Antennengewinns  $V_{RX\ opt}$ , vgl. (17). Die schwarze Kurve für  $V_{RX\ opt} = 1$  bedeutet, dass keine Empfangsoptik vorhanden ist. Die Größe  $d_{RX\ opt}$  gibt den wirksamen Durchmesser der Empfangsoptik an, im aufgebauten *light RX* beträgt dieser 45 mm (blaue Kurve). Würde dieser z.B. mit einer Fresnel-Linse auf 450 mm vergrößert werden, so resultiert die rote Kurve. Die Pfeile zeigen die jeweiligen Reichweiten für den Fall  $V_a = V_s = 1$ , vgl. (19): 31,5 m; 305 m und 3050 m

## 5. Erster Praxistest

Das komplette System haben wir in der Nähe der Clubstation des OV Aachen, auf dem Dach des Schulgebäudes getestet. Mit von der Partie waren u.a. die OMs Thomas, DG1KTS und Thomas, DG6TH. Bild 30 zeigt eine Satellitenaufnahme des Dachs der Schule mit den markierten Standorten des *light TX* und *light RX*. Der gegenseitige Abstand betrug ca. 70 m. Getestet haben wir Sprechfunk - oder doch besser "Sprechlicht" - und die Übertragung von Musik eines an den *light TX* angeschlossenen Mobiltelefons. Ich konnte es mir natürlich nicht nehmen lassen, für diesen ersten Versuch ein besonderes Musikstück auszuwählen: Johann Sebastian Bachs Goldberg Variationen gespielt von Glenn Gould, ... nunmehr erklingen über Licht! Die OM-Kollegen bestätigten einen einwandfreien Empfang.

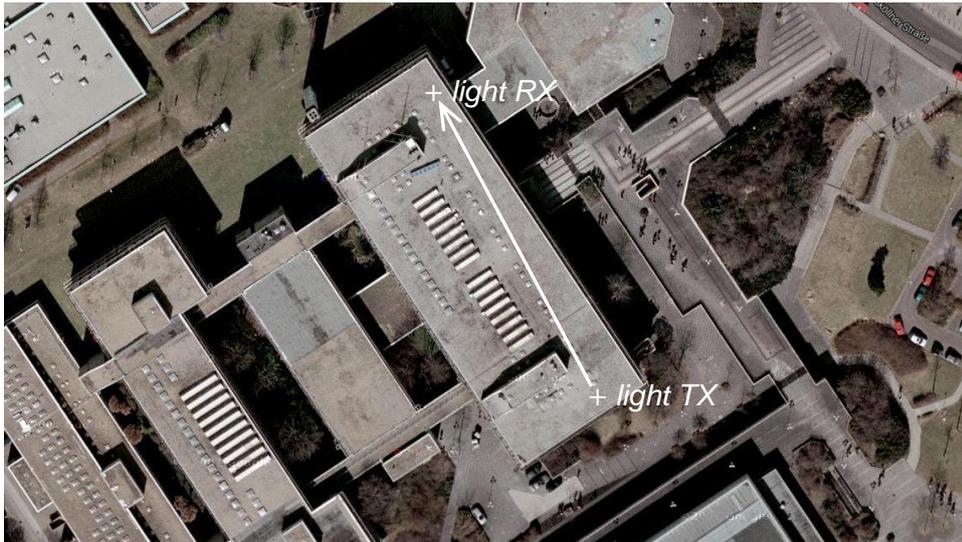


Bild 30: Erste Teststrecke auf dem Dach des Schulgebäudes in der Nähe der Clubstation des OV Aachen, G01

## 6. Reichweitentest mit einer Kopfspiegellampe

Für diesen Test habe ich eine ausgediente defekte Kopfspiegellampe verwendet, Typ Osram Decor A Silv 100 W, E27. Bild 31 zeigt ein Foto dieser Lampe. Die Kolbenkuppe ist näherungsweise eine Kugelhalbschale, die versilbert ist. Der gemessene Durchmesser der Halbkugel beträgt  $d_{\text{HK}} = 67,4$  mm. Mit dieser spiegelnden Kugel kann ich nun auch im heimischen Keller einen Reichweitentest durchführen, siehe Bild 31. Der Lichtkegel wird aus einem Abstand  $s$  auf die spiegelnde Halbkugel der Kopfspiegellampe gerichtet, der *light RX* blickt unter einem Winkel  $\alpha$  in einem Abstand  $s_{\text{HK}}$  auf die Halbkugel. Hinter der Kugel habe ich eine schwarze Pappe angebracht, damit das an der Kugel vorbeilaufende Licht nicht zum Empfangssignal beiträgt.



Bild 31: Kopfspiegellampe

Interessant ist die Frage, inwieweit die Bestrahlungsstärke durch die Reflexion an der konvexen Oberfläche der Halbkugel im Abstand  $s_{\text{HK}}$  abnimmt und wie dies vom Winkel zwischen der Beobachtungsrichtung und der Einfallrichtung  $\alpha$  abhängt. Hans-Hellmuth Cuno hat dazu bereits Überlegungen angestellt [12]. Mit einem Arbeitskollegen haben wir

diese Fragestellung mit einer numerischen Simulation näher betrachtet. Das Ergebnis ist, dass die Bestrahlungsstärke im Abstand  $s_{\text{HK}}$  mit  $s_{\text{HK}} \gg d_{\text{HK}}/2$  vom Winkel  $\alpha$  nahezu unabhängig ist, solange noch nicht der Schattenbereich der beleuchteten Halbkugel erreicht wird.

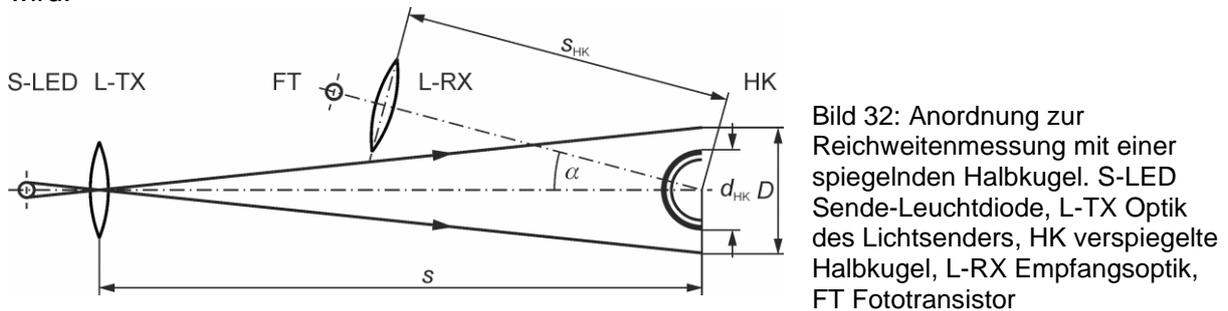


Bild 32: Anordnung zur Reichweitenmessung mit einer spiegelnden Halbkugel. S-LED Sende-Leuchtdiode, L-TX Optik des Lichtsenders, HK verspiegelte Halbkugel, L-RX Empfangsoptik, FT Fototransistor

Für die Bestrahlungsstärke am Ort der Empfangsoptik L-RX gilt für  $\alpha < 170^\circ$ :

$$E_{\text{L-RX}}(s_{\text{HK}}) = E(s) \frac{\left(\frac{d_{\text{HK}}}{2}\right)^2}{4s_{\text{HK}}^2}. \quad (20)$$

Die Bestrahlungsstärke  $E(s)$  im Abstand  $s$  von der Sendeoptik berechnen wir mit:

$$E(s) = \frac{\Phi_e}{\pi \left(\frac{D(s)}{2}\right)^2}. \quad (21)$$

Mit  $\Phi_e = 1 \text{ mW}$ ,  $D(s) = 550 \text{ mm}$  bei  $s = 13 \text{ m}$  folgt aus (21):  $E(s = 13 \text{ m}) = 4,21 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ .

Im Experiment habe ich nun den Abstand  $s_{\text{HK}}$  des Empfängers soweit von der Kugel entfernt, bis der Pilotton gerade noch zu hören war. Dabei habe ich die jeweils maximalen Einstellungen für  $V_a$  und  $V_s$  verwendet. Das Messergebnis ist  $s_{\text{HK}} \approx 3,5 \text{ m}$ . Damit sind alle Größen auf der rechten Seite von (20) bekannt, um die Bestrahlungsstärke vor der Empfangsoptik des *light RX* zu berechnen:  $E_{\text{L-RX}}(s_{\text{HK}}) = 9,8 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ . Eine solche Bestrahlungsstärke entspräche einer Reichweite  $s_{\text{RW}}$  von:

$$E(s_{\text{RW}}) = \frac{\Phi_e}{\pi \left(\frac{D(s_{\text{RW}})}{2}\right)^2} = E_{\text{L-RX}}(s_{\text{HK}}). \quad (22)$$

Auflösen nach  $s_{\text{RW}}$  führt schließlich mit dem experimentell bestimmten Faktor von

$d_{\text{LED}} / f_{\text{TX}}|_{\text{ex}} = 0,042$  auf:

$$s_{\text{RW}} = \frac{2}{0,042} \sqrt{\frac{\Phi_e}{\pi E_{\text{L-RX}}(s_{\text{HK}})}} = \frac{2s \cdot s_{\text{HK}}}{\left(\frac{d_{\text{HK}}}{2}\right)}. \quad (23)$$

Einsetzen der Größen führt auf die experimentelle - unter Kellerbedingungen mit der spiegelnden Halbkugel bestimmten - Reichweite von  $s_{\text{RW}} \approx 2700 \text{ m}$ . Dies ist weniger als mit der Beziehung (19) abgeschätzt, sie liegt jedoch in der gleichen Größenordnung.

## 7. Fazit

Der aufgebaute Lichttransceiver ermuntert zum Experimentieren mit der Lichtübertragung von Signalen. Die hier vorgestellte Realisierung, die Messungen am Lichttransceiver sowie die Berechnungen und Abschätzungen sollen als Anregung verstanden werden, sicher näher mit diesem Thema zu befassen.

## Anhang 1

### Technische Daten des Lichttransceivers

<b>light TX</b>	<b>Daten</b>	<b>Bemerkungen</b>
Sendeleistung	1 mW	
Wellenlänge	592 nm	
Sende-Optik		
- Durchmesser	34,5 mm	Kunststoff, bikonvex
- Brennweite	106 mm	
Lichtkreisdurchmesser als Funktion des Abstands $s$	0,042 x $s$	Abstand $s$ von der Sende-Optik
Eingänge	mic line-in	3,5 mm Klinkebuchse 3,5 mm Klinkebuchse
Ausgänge	TX diode	3,5 mm Klinkebuchse
Anzeige	clipping	
Bedienelemente	Ein/Aus, Pilotton, Empfindlichkeit Mikrofonverstärker	Bild 2
Pilotton	625 Hz	
Modulationsgrad	26 %	
Modulationsgrenzfrequenz	bis 200 kHz	
Spannungsversorgung	9 V	Blockbatterie
Gehäuse des Lichtsenders	134 x 129 x 47 mm <sup>3</sup>	Bilder 2 - 4
Abmessungen der Grundplatte des Gesamtaufbaus	100 x 325 x 16 mm <sup>3</sup>	Pressspanplatte
Stativmontage	1/4"-20 UNC Gewinde	Bilder 10, 11
Gesamtgewicht	900 g	

<b>light RX</b>	<b>Daten</b>	<b>Bemerkungen</b>
Fotostrom, DC; Variationsbereich	3,3 nA - 20 $\mu$ A; 75 dB	nach Abzug des Dunkelstroms, vgl. Bild 28
Fotostrom $I_{eHS}$ , DC, Hörschwelle für Pilotton	3,3 nA	Wahrnehmungschwelle für Pilotton
Fotostrom $\hat{i}_e$ , AC, Hörschwelle für Pilotton	860 pA	(11)
Beleuchtungsstärke; Bestrahlungsstärke, DC, Hörschwelle für Pilotton	0,35 lux; $7,3 \times 10^{-4}$ W/m <sup>2</sup>	ohne Empfangsoptik
Beleuchtungsstärke; Bestrahlungsstärke, AC, Hörschwelle für Pilotton	91 mlx; $1,9 \times 10^{-4}$ W/m <sup>2</sup>	(12)
Rauschpegel in 10 Hz Bandbreite	-79,8 dBm	Frequenzbereich 0 - 1 kHz, Bild 21: -83,8 dBm + 4 dB = -79,8 dBm
Empfangsoptik		
- Durchmesser	45 mm	Glas, bikonvex
- Brennweite	120 mm	
Eingang	RX head	3,5 mm Klinkebuchse
Ausgang	Kopfhörer, NF Verstärker	3,5 mm Klinkebuchse
Bedienelemente	Ein/Aus, Verstärkung x142 / x9, Filter Hochpass 300 Hz, Empfindlichkeitsregler für Eingangssignal 0 - 100 Skt	Bilder 5, 6
Spannungsversorgung	9 V	Blockbatterie
Gehäuse des Lichtempfängers	120 x 70 x 30 mm <sup>3</sup>	Bilder 5 - 8
Abmessungen der Grundplatte des Gesamtaufbaus	100 x 325 x 16 mm <sup>3</sup>	Pressspanplatte
Stativmontage	1/4"-20 UNC Gewinde	Bilder 12, 13
Gesamtgewicht	1400 g	

## Literatur

- [1] U. Pöggel, Licht-Transceiver AS 801, Praxisheft Nr. 21, AATIS e.V., 2011, S. 7 - 11
- [2] TEKO 011, ABS-Kunststoffgehäuse 134 x 129 x 47 mm<sup>3</sup>, reichelt elektronik
- [3] <http://www.kemo-electronic.de/datasheets/g089.pdf>
- [4] Front Designer 3.0, Abacom Ingenieurgesellschaft
- [5] <http://www.monacor.de/produkte/energie-messen-und-selbstbau/selbstbau/mikrofonkapseln/mce-4500/>
- [6] AstroMedia, Zuckerdamm 15, 23730 Neustadt in Holstein, [www.astromedia.de](http://www.astromedia.de);  
Fotostativ-Adapter Art.Nr.: 259.FSA, 1/4" UNC Gewinde
- [7] T-13/4 (5 mm) Precision Optical Performance AlInGaP LED Lamps, Data Sheet, Agilent Technologies, 2002, 12 p.
- [8] <http://www.coherent.com/products/?704/High-Sensitivity-Optical-Sensors-RoHS>
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChlampe#Lichtausbeute>
- [10] System Support Manual, HP 71000 Modular Spectrum Analyzers, 1985; System Verification, HP 71100 A, p. 55
- [11] Specification KST-1KLB, Kodenshi Korea Corp., Mar. 19.2004, 7 p.
- [12] [www.hhcuno.de/afu/whitran/simudist2.pdf](http://www.hhcuno.de/afu/whitran/simudist2.pdf), 10.2.2014