

Beiträge aus der Elektrotechnik

Michael Faulwaßer

**Vollduplex-Transceiver für die optische drahtlose
Hochgeschwindigkeitskommunikation**

 VOGT

Dresden 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the
Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2018

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Voll duplex-Transceiver für die optische drahtlose
Hochgeschwindigkeitskommunikation“ von Michael Faulwaßer überein.

© Jörg Vogt Verlag 2019
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-033-9

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

Vollduplex-Transceiver für die optische drahtlose Hochgeschwindigkeitskommunikation

Michael Faulwaßer

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Kambiz Jamshidi
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Wolf-Joachim Fischer
Prof. Dr.-Ing. Matthias Henker
Tag der Einreichung: 04.05.2018
Tag der Verteidigung: 15.08.2018

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Realisierung eines optisch-drahtlosen Transceivers für mehrere Gigabit pro Sekunde, mit einem kleinen Formfaktor zur Integration in tragbare Geräte. Ziel ist es einen bidirektionalen, positionierungstoleranten Transceiver zu ermöglichen, der in Anwendungen wie zum Beispiel in Docking-Stationen oder als Steckerersatz dienen kann, in denen bestehende Funklösungen nicht zuverlässig sind oder genügend hohe Datenraten bereitstellen können. Ausgangspunkt dieser Arbeit sind IrDA-Transceiver mit Datenraten von wenigen Kilobit bis Megabit pro Sekunde, die mit der Zeit von schnelleren und komfortableren Funksystemen verdrängt wurden. Die Motivation ist, diese Art der optisch-drahtlosen Transceiver im Gigabit-Bereich zu ermöglichen. Die Arbeit untersucht im ersten Teil die elektrischen und optischen Übertragungseigenschaften des Transceivers für kurze Distanzen im Zentimeterbereich. Die Arbeit verfolgt dabei den Weg der breitbandigen Intensitätsmodulation auf Basis von Laserdioden und zeigt die steigenden Herausforderungen eines weiten Abstrahlverhaltens bei zunehmenden Datenraten. Die Untersuchungen beginnen mit der Konzeption verfügbarer und integrationsfähiger Technologien. Optische und elektrische Zusammenhänge werden analysiert und eine geeignete Architektur daraus abgeleitet. Dies mündet in ein Link-Budget, welches den Parameterraum des Kommunikationsbereiches der Gigabit-Transceiver darstellt. In den weiteren Schritten wird der untersuchte Transceiver mit seinen optischen Eigenschaften simuliert und optimiert. Messergebnisse der realisierten Transceiver stellen die Kommunikationsqualität umfassend dar. Die Arbeit legt in den Untersuchungen zusätzlich Wert auf die herausfordernde Vollduplex-Kommunikation. Im Vergleich zur Halbduplex-Kommunikation besitzt diese die Problematik des Übersprechens, jedoch sogleich einen vereinfachten und latenzärmeren Kommunikationsablauf. Die Ergebnisse zeigen eine erfolgreiche bidirektionale Übertragung für verschiedene Gigabit-Datenraten in Bezug zur Signalleistung, der Reichweite und dem Abstrahlbereich. Im zweiten Teil geht die vorliegende Arbeit auf den Systemkontext der digitalen Datenverarbeitung und der bidirektionalen optischen Kommunikation ein. Die Arbeit beschreibt die Einbettung des optisch-drahtlosen Transceivers in ein Kommunikationssystem. Mit dem Ziel der Miniaturisierung des Formfaktors wird untersucht, inwiefern sich weitere Protokollschichten und eine standardisierte Datenschnittstelle in den Transceiver integrieren lassen. Anhand der Erstellung einer Framing-Logik als Chip wird der Flächenbedarf ermittelt.

Abstract

The present work covers the realization of an optical wireless transceiver for multiple gigabit per second in a small form factor for the integration in portable devices. The work aims to provide a bidirectional positioning-tolerant transceiver which can be used for docking stations or as connector replacement where radio frequency solution are not reliable or deliver not sufficient high data rates. The starting point of this work are IrDA-transceivers with data rates of few kilobit or megabit per second, which have been later replaced by faster and more comfortable radio frequency systems. Based on that, the motivation is to provide an optical wireless transceiver in the gigabit range. In the first part, the work investigates the electrical and optical transmission characteristics of the transceiver for short distances in the centimeter range. The work pursues the way of broadband intensity modulation based on laser diodes and shows the increasing challenges of a wide radiation angle with increasing data rates. The investigations start with the conception of available and integratable technologies. Optical and electrical relationships are analyzed and a suitable architecture is derived. This results in a link budget, which represents the scope of the communication range of the gigabit transceiver. In further steps, the transceiver is simulated and optimized regarding its optical properties. Based on the results of measurements of the realized transceivers, the communication quality is comprehensively displayed. In addition, the work emphasizes the challenging full-duplex communication in the investigations. Compared to half-duplex communication, on the first hand full-duplex communication challenges with crosstalk, but, on the other hand, it provides a simpler low-latency communication. In the second part, the present work deals with the system context of digital data processing and bidirectional optical communication. The work describes the embedding of the optical-wireless transceiver in a communication system. With the goal of miniaturizing the form factor, it will be investigated to what extent further protocol layers and standardized data interface can be integrated into the transceiver. Based on the creation of a framing logic as a chip, the area requirement is determined.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS). Ich möchte mich jedoch an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die durch ihre Unterstützung erst die Rahmenbedingungen für diese Arbeit ermöglichten. Zuerst möchte ich meinen vollsten Dank an Professor Wolf-Joachim Fischer richten, nicht nur allein für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, sondern auch für die stete Motivation während der Bearbeitung verschiedenster Problemstellungen.

Des Weiteren möchte ich den Mitarbeitern des Fraunhofer IPMS danken. Dies gilt besonders der Organisation durch Dr. Frank Deicke und Dr. Alexander Noack, die mir insbesondere viele Freiräume gegen Ende der Arbeit gaben, damit ich meine Konzentration rein auf diese Arbeit legen konnte. So gilt mein Dank auch dem Institutsleiter Prof. Dr. Hubert Lakner für die Rahmenbedingungen im IPMS, sei es die Bereitstellung modernster Messgeräte oder die Unterstützung bei Reisen zu Konferenzen. Ein weiterer Dank gilt Prof. Matthias Henker für die Annahme der Arbeit als Zweitgutachter.

Bedanken möchte ich mich auch den Kollegen Tobias Schneider und René Kirrbach für die Unterstützung in der Aufnahme von Messergebnissen und der Bedienung der Software für die Optiks simulation. Vielen Dank auch an Steffen Damnik für die Bereitstellung des ASIC-Designflows und den Erläuterungen zu den unzähligen Schritten, beginnend von der Hardwarebeschreibung bis schlussendlich zu den Fertigungsdaten für das Tapeout.

Zuletzt gilt mein Dank meiner Familie, die all die Jahre für mich da war. Einen besonderen Dank dabei widme ich meiner Isabell, die während allen Höhen und Tiefen an meiner Seite stand.

Dresden, April 2018

Michael Faulwaßer

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungen	XIX
Symbolverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Allgemeine Betrachtung	3
2.2 Aktueller Stand der Forschung	7
2.3 Abgrenzung für diese Arbeit	11
3 Grundlagen der optischen drahtlosen Kommunikation	13
3.1 Optische Freiraumübertragung	13
3.2 Optische Modulationsarten	15
3.3 Laser/LED – Emmitter	17
3.3.1 Allgemein	17
3.3.2 Laserschutz	19
3.3.3 Rauscheffekte von Laserdioden	19
3.4 Emittertreiber	21
3.5 Photodiode – Detektor	23
3.6 Empfangsverstärker	28
3.7 Optik	30
3.7.1 Alignment	30
3.7.2 Sendeoptik	30
3.7.3 Empfangsoptik	32
3.8 Kodierung	35
3.8.1 Leitungskodierung	35
3.8.2 Kanalkodierung	37
3.9 Ausgewählte Messverfahren für OWC	38
4 Konzept eines optisch-drahtlosen Multi-Gigabit-Transceivers	41
4.1 Zielstellung	41
4.2 Docking-Transceiver	43
4.2.1 Systemkonzept	43
4.2.2 Architektur des Senders	44
4.2.3 Architektur des Empfängers	45
4.2.4 Transceiveroptik	52
4.2.5 Abschätzung des Link-Budgets	59
4.3 Giga-IR-Controller	64
4.3.1 Systemkonzept	64
4.3.2 Architektur des Giga-IR-Controllers	67
5 Ergebnisse und Diskussion	69
5.1 Simulation – Transceiver	69
5.2 Experimentelle Ergebnisse – Gigadock	75
5.2.1 Messung Signalintegrität	75
5.2.2 Messung Leistungsverteilung	78
5.2.3 Messung Bitfehlerrate	82
5.2.4 Verwendung im USB 3.0 Demonstrator	86
5.3 Giga-IR-Controller als FPGA-Implementierung	87

5.4	Giga-IR-Controller als ASIC	92
5.5	Ableitung der Ergebnisse für ein vollintegriertes System	94
5.6	Einordnung der Arbeit	96
6	Zusammenfassung	99
	Literaturverzeichnis.....	101
A	Anhang.....	107
A.1	Herleitung der Empfangsleistung bei Verschiebung	107
A.2	Messgeräte	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Funk und OWC im elektro-magnetischen Spektrum	3
Abbildung 2-2: Klassifizierung von optisch-drahtlosen Verbindungen [1]	4
Abbildung 2-3: Überblick von ausgewählten drahtlosen und drahtgebundenen Kommunikationsklassen	5
Abbildung 2-4: Bluetooth-Transceiver mit Mäander-Antenne [5].....	5
Abbildung 2-5: 802.11n-Wi-Fi-Modul im USB-Format von LogiLink [6].....	5
Abbildung 2-6: IrDA SIR Transceiver [7].....	6
Abbildung 3-1: Allgemeiner optischer Kommunikationslink	13
Abbildung 3-2: Transmissionsgrad durch die Erdatmosphäre über der Wellenlänge überlagert mit den optischen Fenstern der Glasfasertechnik (mod. [25])	14
Abbildung 3-3: Theoretische Leistungs- und Bandbreiteneffizienz verschiedener Modulationsarten [24].....	16
Abbildung 3-4: Maximale Strahlungsleistung für Laserklasse 1/1M nach [40].....	19
Abbildung 3-5: Lasertreiber für Common-Anode VCSEL	22
Abbildung 3-6: Lasertreiber für Common-Cathode VCSEL	22
Abbildung 3-7: Common-Cathode VCSEL mit Anoden-Pad [50].....	22
Abbildung 3-8: VCSEL-Array mit Bondpads für Kathode und Anode [51]	22
Abbildung 3-9: Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Photodioden [53]	24
Abbildung 3-10: U-I Kennlinie einer Photodiode.....	25
Abbildung 3-11: Aufweitung des Gaußstrahls über die Emitterapertur mit 1/e- Bezugsgrößen	30
Abbildung 4-1: Blockschaltbild des vollintegrierten optisch-drahtlosen Transceivers...41	
Abbildung 4-2: Transceiver mit Komponenten a) monolithisch in einem Chip b) diskret aus mehreren Chips	41
Abbildung 4-3: Docking Transceiver im OSI-Modell	43
Abbildung 4-4: Datenkanal zwischen zwei Transceivern.....	43
Abbildung 4-5: Lasertreiber mit Peripherie.....	45
Abbildung 4-6: Effektiver Detektordurchmesser über Grenzfrequenz	46
Abbildung 4-7: Kapazität von Photodioden und deren Grenzfrequenz.....	46
Abbildung 4-8: Empfängerschaltkreis mit Photodiode.....	47
Abbildung 4-9: Parasitäre kapazitive Elemente im PD-TIA-Aufbau	48
Abbildung 4-10: Seitenansicht verschiedener Gehäuse-Varianten: a) vollständig gefüllt, b) Kapselung mit Linsenöffnung, c) diskrete Linsenhalterung.....	53
Abbildung 4-11: Abmessungen des Empfängers (Draufsicht)	53
Abbildung 4-12: NOHD über TX-Apertur für ausgedehnte Strahlquellen	55

Abbildung 4-13: Minimalapertur über Strahlungsleistung für $\theta_{63} \geq 100$ mrad, $NOHD = 0$	55
Abbildung 4-14: Fokussierung der Empfangsoptik.....	56
Abbildung 4-15: Optische Verstärkungen und Verlustfaktoren über der PD-Platzierung bei einer Brennweite $f = 5$ mm.....	57
Abbildung 4-16: Dämpfung bei Verschiebung des Empfängers ($\theta_{TX} = 10^\circ$, $d_{TX} = 3$ mm).....	61
Abbildung 4-17: Dämpfung in Abhängigkeit zur Entfernung für verschiedene Näherungen ($\theta_{TX} = 10^\circ$, $d_{TX} = 3$ mm).....	61
Abbildung 4-18: Empfangsleistung über Divergenzwinkel bei $G_{RX,max}$ für verschiedene Aperturen bei Link-Distanz von 50 mm bei $d_{PD} = 70$ μ m	63
Abbildung 4-19: Empfangsleistung über Link-Distanz bei $G_{RX,max}$ für verschiedene Aperturen bei Divergenz von 5° bei $d_{PD} = 70$ μ m.....	63
Abbildung 4-20: Blockschaltbild eines vollintegrierten Transceivers	64
Abbildung 4-21: Nutzung eines vollintegrierten Transceivers als optisch-drahtlose Brücke.....	65
Abbildung 4-22: Master-Slave-Abhängigkeiten im Kommunikationssystem.....	65
Abbildung 4-23: Nutzung eines optischen Frontends als Medienkonverter im OSI-Modell	66
Abbildung 4-24: Blockschaltbild des Giga-IR-Controllers mit Xilinx GTX-Transceiver für den FPGA-Entwurf	68
Abbildung 4-25: Blockschaltbild des Giga-IR-Controllers mit SerDes und CDR mit Darstellung der Taktung für den ASIC-Entwurf	68
Abbildung 5-1: Simulationsanordnung der optischen Elemente	69
Abbildung 5-2: Strahlsimulation in Zemax.....	69
Abbildung 5-3: Standard-Gaußprofil (SM) und gemessenes LD-Profil (MM)	70
Abbildung 5-4: „Beam-Profiler“-Aufnahme der verwendeten Laserdiode.....	70
Abbildung 5-5: Empfangsleistung über x-Alignment ($L_{B2B} = 50$ mm) für ausgewählte Linsenpositionen.....	71
Abbildung 5-6: Simulierter Spot nach Empfangslinse ($L_{B2B} = 50$ mm, $\Delta x = 0$).....	72
Abbildung 5-7: Simulierter Spot nach Empfangslinse ($L_{B2B} = 50$ mm, $\Delta x = 2$ mm).....	72
Abbildung 5-8: Empfangsleistung über x-Alignment ($L_{B2B} = 50$ mm) für SM- und MM-Profil	72
Abbildung 5-9: Empfangsleistung über x-Alignment ($L_{B2B} = 25$ mm) für SM- und MM-Profil	73
Abbildung 5-10: Empfangsleistung über Reichweite ($\Delta x = 0$) für SM- und MM-Profil....	74
Abbildung 5-11: Transceiver mit Keramiksubstrat.....	75
Abbildung 5-12: Transceiver mit FR4-Substrat	75
Abbildung 5-13: Darstellung des Messkonzepts für die Messung des Augendiagramms	76

Abbildung 5-14: Aufgenommenes Augendiagramm am Ausgang eines Transceivers mit einer $70\ \mu\text{m}$ PD bei $L_{B2B} = 51,4\ \text{mm}$ und PRBS7 bei 10 Gbit/s	76
Abbildung 5-15: Augenweite über Reichweite für 5 Gbit/s und 10 Gbit/s mit einer $70\ \mu\text{m}$ PD und Augendiagramme zur Verdeutlichung verschiedener Messpunkte	77
Abbildung 5-16: Ermittelte optische Empfangsleistung $P_{\text{opt,p-p}}$ über x-Alignment bei $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$	79
Abbildung 5-17: Ermittelte optische Empfangsleistung $P_{\text{opt,p-p}}$ über x-Alignment bei $d_{\text{PD}} = 100\ \mu\text{m}$	79
Abbildung 5-18: Optische Empfangsleistung $P_{\text{opt,p-p}}$ über Board-Distanz	80
Abbildung 5-19: Gemessene Empfangsleistung des Signals bei Verschiebung in x-y-Ebene ($L_{B2B} = 25\ \text{mm}$, $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$)	80
Abbildung 5-20: Gemessene Empfangsleistung des Übersprechens bei Verschiebung in x-y-Ebene ($L_{B2B} = 25\ \text{mm}$, $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$)	80
Abbildung 5-21: Gemessene Empfangsleistung des Signals bei Verschiebung in x-y-Ebene ($L_{B2B} = 50\ \text{mm}$, $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$)	81
Abbildung 5-22: Gemessene Empfangsleistung des Übersprechens bei Verschiebung in x-y-Ebene ($L_{B2B} = 50\ \text{mm}$, $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$)	81
Abbildung 5-23: Darstellung des Messkonzepts für die Messung der BER für beide Kommunikationskanäle	82
Abbildung 5-24: BER über Board-Distanz für verschiedene, ausgerichtete Transceiver-Setups	82
Abbildung 5-25: BER über x-Alignment bei Board-Distanz = 25 mm (Ch.1)	84
Abbildung 5-26: BER über x-Alignment bei Board-Distanz = 50 mm (Ch.1)	84
Abbildung 5-27: Alignmentbereich für BER = $1\text{E-}9$ über die Board-Distanz für zwei Transceiver bei 5 Gbit/s mit $d_{\text{PD}} = 100\ \mu\text{m}$ und 10 Gbit/s mit $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$	84
Abbildung 5-28: Sensitivität des Transceiverslinks mit $d_{\text{PD}} = 70\ \mu\text{m}$, aufgenommen entlang der z-Achse	85
Abbildung 5-29: USB 3.0 Demonstrator mit OWC-Schnittstelle	86
Abbildung 5-30: FPGA-Testsystem für die Evaluierung des Controller-Entwurfs	87
Abbildung 5-31: Übertragungsverlauf für eine Windowgröße $N_{\text{W}} = 3$ mit Acknowledge	88
Abbildung 5-32: Effektive Datenrate über der Framelänge für verschiedene Windowgrößen	90
Abbildung 5-33: Effektive Datenrate über der Speichergöße für verschiedene Windowgrößen	90
Abbildung 5-34: Floorplan-Konzept des Giga-IR-Controllers als ASIC	93
Abbildung 5-35: Layout des Giga-IR-Controllers in Cadence Virtuoso	93
Abbildung 5-36: Mikroskopaufnahme des hergestellten ASICs	93
Abbildung 5-37: Relative Anteile der Verlustleistung von Pads und Logik (Core) als Flächendiagramm	94
Abbildung 5-38: Vollintegrierter Transceiver mit Aussparung der Linsenhalter	96

Abbildung 5-39: Vollintegrierter Transceiver mit Chip-on-Chip-Technik.....	96
Abbildung A-1: Dämpfung bei Verschiebung des Empfängers für unterschiedliche Distanzen L ($\theta_{TX} = 5^\circ$, $d_{TX} = 3$ mm).....	109
Abbildung A-2: Dämpfung bei Verschiebung des Empfängers für unterschiedliche Distanzen L ($\theta_{TX} = 10^\circ$, $d_{TX} = 3$ mm).....	109
Abbildung A-3: Dämpfung bei Verschiebung des Empfängers für unterschiedliche Distanzen L ($\theta_{TX} = 20^\circ$, $d_{TX} = 3$ mm).....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Ausgewählte wissenschaftliche Arbeiten zum Stand der Forschung.....	8
Tabelle 3-1:	Typische Werte für verschiedene Laser	18
Tabelle 5-1:	Empfangsleistung für ausgewählte Alignmentpunkte zur Bewertung der Positionierung der Empfangslinse ($L_{B2B} = 50 \text{ mm}$, $d_{PD} = 70 \text{ }\mu\text{m}$)	71
Tabelle 5-2:	Datenübertragungsrate für USB 3.0 mit Kabel und mit OWC	86
Tabelle 5-3:	Flächenanteile des Giga-IR-Controllers im ASIC.....	94
Tabelle 5-4:	Abschätzung der Flächenanteile für einen vollintegrierten Transceiver	95
Tabelle 5-5:	Vorgestellte Arbeit im Vergleich zu ausgewählten wissenschaftlichen Arbeiten.....	96
Tabelle A-1:	Messgeräte für die Signalintegrität	111
Tabelle A-2:	Messgeräte für die Leistungsverteilung	111
Tabelle A-3:	Messgeräte für die Bitfehlerrate	111

Abkürzungen

AGC	Automatic Gain Control
APD	Avalanche-Photodiode
ARQ	Automatic Repeat-Request
ASIC	Application Specific Integrated Circuit, Anwendungsspezifischer integrierter Schaltkreis
ASK	Amplitude-Shift-Keying, Amplitudenumtastung
B2B	Board-zu-Board
BER	Bit Error Ratio, Bitfehlerhäufigkeit
CCD	Charge-Coupled Device
CDR	Clock-Data-Recovery, Takt-Daten-Rückgewinnung
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CPC	Compound Parabolic Concentrator
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
CW	continuous-wave
DD	direct detection
DM	direkte Modulation
DM	Direct-Memory-Access
DUT	Device Under Test
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier, Erbium-dotierter Faserverstärker
EM	externe Modulation
EML	Electro-absorption modulated laser
FEC	Forward-Error-Correction, Vorwärtsfehlerkorrektur
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSO	Free-Space-Optics
FOV	Field-of-View, Sichtfeld
FTTH	Fiber-to-the-Home
GZB	Grenzwert zugänglicher Strahlung
IC	Integrated Circuit
IM/DD	intensity modulation / direct detection
IP	Intellectual Property, geistiges Eigentum
IR	infrarot
ISI	Inter-Symbol-Interferenz
IrDA	Infrared Data Association
Laser	light amplification by stimulated emission of radiation
LA	Limiting Amplifier, Limitierungsverstärker
LD	Laserdiode
LDD	laser diode driver, Laserdiodentreiber

LED	Light-Emitting Diode
LDO	Low-Dropout (Spannungsregler)
LOS	Line-of-Sight, Sichtverbindung
LUT	Lookup-Tabelle
M2M	Machine-to-Machine
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System, mikroelektromechanischen System
MM	Multi-Mode
MZB	maximale zulässige Bestrahlungsstärke
MZM	Mach-Zehnder-Modulator
NIR	Near-Infrared, naher Infrarotbereich
NLOS	Non-Line-of-Sight, Nicht-Sichtverbindung
NOHD	Nominal Ocular Hazard Distance, Laserschutzabstand
NRZ	Non-Return-to-Zero
O2O	Optik-zu-Optik
OFDM	Orthogonal-Frequency-Division-Multiplexing
OOK	On-Off-Keying
OSI	Open Systems Interconnection
OWC	Optical Wireless Communication, Optische drahtlose Kommunikation
PAM	Pulse-Amplitude Modulation, siehe auch ASK
PD	Photodiode
PHY	physical layer, Bitübertragungsschicht, auch im Kontext als Modul
PIN	dotierter Halbleiter mit Akzeptor-, Intrinsic- und Donatorschicht
PLL	Phase-Locked-Loop
PMT	Photomultiplier Tubes
PPM	Pulse-Pause Modulation
PRBS	Pseudo-Random-Binary-Sequences
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
RAM	Random-Access Memory
RF	Radio-Frequency, Hochfrequenz
RLZ	Raumladungszone
RX	Empfänger
SerDes	Serializer/Deserializer
Si	Silizium
SiPM	Silicon-Photomultiplier
SIR	Serial Infrared (siehe IrDA)
SLM	Spatial Light Modulator
SM	Single-Mode
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPAD	Single-Photon-Avalanche-Diode

SRAM	Static RAM
TIA	Transimpedanzverstärker
TEM	Transverse Electromagnetic Mode, transversalelektromagnetische Welle
TX	Sender
USB	Universal Serial Bus
UV	ultraviolett
VCSEL	Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Laser
VLC	Visible-Light-Communication
WDM	Wavelength-Division-Multiplexing

Symbolverzeichnis

Elektrisch

BW	Hz	Bandbreite
BER		Bit Error Ratio, Bitfehlerhäufigkeit
c	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Lichtgeschwindigkeit im Medium
C	F	elektrische Kapazität
C'	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$	Kapazitätsbelag
C_j	F	Sperrschichtkapazität
E_H	V	Augenhöhe (Augendiagramm)
E_W	s	Augenweite (Augendiagramm)
f	Hz	Frequenz
GBP	Hz	Verstärkungsbandbreite-Produkt
$i_{n,\text{shot}}$	A	Strom des Schrotrauschens
I	A	Strom
I_{amb}	A	Strom durch Umgebungslicht
I_{BIAS}	A	Biasstrom
I_D	A	Dunkelstrom
L	H	Induktivität
N_{Ph}		Anzahl der Photonen
OMA	W	Optical Modulation Amplitude, optische Modulationsamplitude
P	W	Leistung
q	A s	Ladungsmenge
Q		Gütefaktor
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_F	Ω	Feedback-Widerstand
R'_S	$\frac{\Omega}{\text{m}}$	Widerstandsbelag
SNR		Signal-Rausch-Verhältnis
U	V	Spannung
U_{BR}	V	Durchbruchsspannung
t	s	Zeit
$t_{r,f}$	s	Anstiegs- bzw. Abfallzeit
Z	$\frac{\text{V}}{\text{A}}$	Impedanz
Z_{sub}	$\frac{\text{V}}{\text{A}}$	Impedanz des Substrats
δ	m	Eindringtiefe
ε	$\frac{\text{A s}}{\text{V m}}$	Permittivität

ϵ_r		relative Permittivität, Dielektrizitätszahl
μ	$\frac{Vs}{Am}$	magnetische Permeabilität
τ	s	Ausbreitungsdauer, Laufzeit
σ	W	Standardabweichung der Leistung

Optisch

A	m^2	Fläche
d	m	Durchmesser
D_{Lens}	m	Linsendurchmesser, Linsenapertur
G		Leistungsverstärkung
G_0		maximale optische Verstärkung über Flächenverhältnis
E	$\frac{W}{m^2}$	Bestrahlungsstärke
E_r		Extinktionsverhältnis
E_{opt}	W s	Energie der optischen Strahlung
E_{MZB}	$\frac{W}{m^2}$	maximale zulässige Bestrahlungsstärke
f	m	Brennpunkt
F		Freiraumdämpfung
I	$\frac{W}{m^2}$	Strahlungsintensität
L	m	Distanz, Abstand
L_{B2B}	m	Board-zu-Board-Abstand
L_{O2O}	m	Optik-zu-Optik-Abstand
n		Brechzahl
$NOHD$	m	Nominal Ocular Hazard Distance
P	W	Leistung
P_0	W	emittierte Ausgangsleistung
P_H	W	Leistung für High-Pegel
P_L	W	Leistung für Low-Pegel
r	m	Radius der Apertur
R_{LD}	$\frac{W}{A}$	Spektrale Empfindlichkeit der Laserdiode
S_{PD}	$\frac{A}{W}$	Spektrale Empfindlichkeit der Photodiode
w	m	Strahltaile
W	m	Breite
z	m	Position oder Abstand optischer Elemente auf der z-Achse
α		Dämpfungsfaktor

α_{lat}		Dämpfungsfaktor für laterale Verschiebung
α_{R}		Reflexionsfaktor
β_{ATM}		atmosphärische Dämpfung
η		Quantenwirkungsgrad
θ	°	Divergenzwinkel (Vollwinkel)
θ_{HW}	°	Divergenzwinkel (Halbwinkel)
λ	nm	Wellenlänge
μ_{mat}	$\frac{1}{\text{m}}$	Materialkonstante für Dämpfung

Informationstechnik

N	bit	Anzahl an Bits
N_{F}	bit	Framelänge
N_{W}	bit	Windowlänge, Burstlänge
T	s	Zeitdauer
T_{ACK}	s	Zeitdauer für Acknowledge
T_{b}	s	Bitdauer
T_{Data}	s	Zeitdauer eines Datentransfers
T_{F}	s	Zeitdauer eines Frames im Übertragungskanal
T_{LTT}	s	Link-Turnaround-Time
T_{P}	s	Verarbeitungsdauer
p_{start}	$\frac{1}{\text{s}}$	Detektionsrate einer Startsequenz
R	$\frac{\text{bit}}{\text{s}}$	Datenrate
R_{eff}	$\frac{\text{bit}}{\text{s}}$	effektive Datenrate

tiefgestellt

avg	Mittelwert
A	Anode
Au	Gold
ACK	Acknowledge
BB	Bond-zu-Bond
BG	Bond-zu-Ground
Buf	Puffer
eff	effektiver Wert
elek	elektrisch

FILT	Filter
geom	geometrisch
in	Eingang
K	Kathode
Line	auf den Übertragungskanal bezogen
LD	Laserdiode
mat	materialspezifisch
mon	Monitor
MOD	Modulation
n	Rauschgröße
opt	optisch
out	Ausgang
p-p	Spitze-Spitze-Wert
p	parasitär
PD	Photodiode
PHY	Bitübertragungsschicht
RX	Empfänger
sat	Sättigung
Si	Silizium
Spot	Spot, Bestrahlungsfläche
TIA	Transimpedanzverstärker
TX	Sender
63	1/e-Bezugsgröße, bezogen auf Abfall der Intensität um 63,2 %
86	1/e ² -Bezugsgröße, bezogen auf Abfall der Intensität um 86,5 %

Konstanten

c_0	$299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
e	2,718 ...	Eulersche Zahl
e_0	$1,602 \dots \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementarladung
h	$6,626 \dots \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	Plancksche Wirkungsquantum
ε_0	$8,854 \dots \cdot 10^{-12} \frac{\text{A s}}{\text{V m}}$	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V s}}{\text{A m}}$	Magnetische Feldkonstante

1 Einleitung

Die Anforderung an höhere Übertragungsraten steigt stetig durch die fortschreitende technologische Entwicklung digitaler Systeme. So steigern Videos ihre Qualität in der Auflösung und zeitgleich steigern Speichermedien ihre Kapazität. Des Weiteren interagieren Systeme zunehmend mit der Umgebung und fordern schnellere und genauere Abtastungen per Analog-zu-Digital-Konverter. Insbesondere die Kommunikation zwischen Maschinen (M2M, engl. Machine-to-Machine) erzeugt durch die Vernetzung eine steigende Anzahl an Teilnehmern und damit ein zunehmendes Kommunikationsaufkommen. Zusätzlich fordert verstärkt die M2M-Kommunikation eine verlässliche Verbindung für eine Echtzeitkommunikation. Verschiedenste drahtgebundene Lösungen sind vorhanden. Ungleich schwieriger ist es, wenn die Anforderung an ein mobiles System besteht. Hierfür ist eine drahtlose Kommunikation notwendig.

Drahtlose Lösungen per Funk stoßen zunehmend an ihre Grenzen, denn der Frequenzbereich ist begrenzt und staatlich reguliert. Der größte Vorteil von Funk ist seine Abdeckung, welcher aber auch zugleich sein größter Nachteil ist. Hierbei stört sich die steigende Anzahl an Teilnehmern auf einem Frequenzband zunehmend gegenseitig, wodurch die effektive Datenrate sinkt und durch Paketverluste die Zuverlässigkeit der Übertragung abnimmt. Eine Lösung ist die Trägerfrequenz der Übertragung zu erhöhen. Ab einen gewissen Punkt ist die Kommunikation mit Licht die daraus resultierende Schlussfolgerung.

In der Geschichte ist das Prinzip der optisch-drahtlosen Kommunikation (OWC, engl. Optical Wireless Communication) schon weit vor der Elektrifizierung des 19. Jahrhunderts bekannt. So dienten Leuchttürme für die Übermittlung von Nachrichten oder Sonnenspiegel wurden für die optische Telegrafie benutzt. Im Jahr 1880 zeigte Alexander Graham Bells Erfindung des Photophones die Übertragung von Sprache mit moduliertem Licht. Dies ist insbesondere erwähnenswert, da ein Halbleiter (Selen-Zelle) als photoelektrischer Empfänger verwendet wurde. In der Moderne ist seit den 50er-Jahren die Fernbedienung ein typischer Vertreter für ein digitales optisch-drahtloses Kommunikationssystem. Mit der Gründung der Infrared Data Association (IrDA) 1993 verbreiteten sich für mobile Geräte zeitweise verstärkt bidirektionale Kommunikationsmodule auf Basis von lichtemittierenden Dioden (LED, engl. light-emitting diode) für kurze Distanzen im Meter- oder Zentimeterbereich. Diese Module besaßen Bauformen, die sich in Mobiltelefone dieser Zeit integrieren ließen. Im Vergleich zu Funk ist hierbei eine permanente Sichtverbindung (LOS, engl. Line-of-Sight,) notwendig. Durch die Einführung des Funkstandards Bluetooth 1999 wurde diese Technologie zunehmend abgelöst. Diese bot eine ähnliche Datenrate und im Vergleich zu IrDA eine komfortablere Anwendung für mobile Systeme, da eine Sichtverbindung nicht mehr erforderlich war.

Im Vergleich mit der optischen drahtgebundenen Technologie, der Glasfasertechnik, gab es diese Ablöseerscheinung nicht. Diese durchlief eine stete Weiterentwicklung und zunehmende Vernetzung, die aktuell bis zu den Hausanschlüssen (FTTH, engl. Fiber-to-the-Home) reicht. Die Motivation besteht nun hierin, auf Basis der Erkenntnisse in der optischen Kommunikation und den zunehmenden Beschränkungen der Funktechnik, die Weiterentwicklung für leistungsfähigere optisch-drahtlose Transceiver voranzutreiben. Diese sollen sich, wie auch ihre IrDA-Vorgänger, in mobile Geräte integrieren lassen und eine schnelle und zuverlässige Übertragung ermöglichen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit wissenschaftlichen Untersuchungen für die Realisierung eines optisch-drahtlosen Transceivers für hohe Datenraten im Gigabit-Bereich. Hierbei liegt gleichzeitig der Fokus auf der Integrationsfähigkeit in mobile Systeme, die

auch die Anbindung an die Datenschnittstelle mit beinhaltet. Dafür sind Technologien aus dem aktuellen Stand der Technik auch unter dem Gesichtspunkt der Fähigkeit zur Miniaturisierung zu bewerten. Eine große Rolle spielt dabei die Laserdiode (LD). Die Arbeit betrachtet in detaillierten Untersuchungen die Datenschnittstelle und die optisch-drahtlose Schnittstelle möglichst getrennt, weshalb sich die Gliederung in Transceiver und Controller aufteilt.

Beginnend mit einer Konzeption des Transceivers werden übergreifend optische, elektrische sowie Sachverhalte der Aufbau- und Verbindungstechnik untersucht. Dieser Abschnitt dient der Aufstellung von Randbedingungen, um sich auf eine Architektur festzulegen und die Leistungsfähigkeit des Transceivers in seinen Variationen möglichst in guter Näherung abschätzen zu können. Dies mündet in der Aufstellung eines Link-Budgets, welches eine Leistungsbilanz der optischen Strahlung für die antizipierte Übertragungsstrecke widerspiegelt. Zwar orientiert sich diese Bilanz an spezifisch ausgewählten Technologien, jedoch ist weiterhin stets die gewählte Umsetzung daraus ein Kompromiss aus der räumlichen Auslegung des Kommunikationskanals und der Datenrate, die der Kodierung und den optoelektronischen Bauelementen zu Grunde liegt. Parallel wird stets die Baugröße des Transceivers in die Betrachtung mit einbezogen.

Als Ergebnis wird eine konkrete Auslegung eines Transceivers per Simulation des Strahlengangs diskutiert. Anschließend wird die Charakterisierung des daraus realisierten Transceivers hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit bewertet. Dafür erfolgen Messungen der Signalintegrität, von Leistungsprofilen und der Kanalqualität anhand der Bitfehlerrate.

Die Betrachtung des Controllers soll den Transceiver in den Systemkontext der Datenverarbeitung und -anbindung bringen. Der Fokus liegt auf der Aufstellung einer Systemarchitektur, um daran die Auswirkung auf die effektive Datenrate und die zur erwartenden Baugröße zu analysieren. Die Prüfung der Funktionalität und die Untersuchung der Datenrate werden zunächst mit einem Field-Programmable-Gate-Array (FPGA) realisiert. Für eine genauere Untersuchung des Flächenbedarfs des Controllers in einem vollintegrierten Transceiver wird ein anwendungsspezifischer integrierter Schaltkreis (ASIC) erstellt.

Die Arbeit schließt ab mit der Zusammenführung und Diskussion der Ergebnisse für einen vollintegrierten Transceiver. Diese wird abgerundet durch die Diskussion eines Demonstrators, der einen optisch-drahtlosen Steckerersatz für eine Schnittstelle realisiert.

2 Stand der Technik

Drahtlose Datenübertragung ist vor allem bei Funksystemen ein Begriff. Diese Systeme werden an den unterschiedlichsten Orten verwendet wie beispielsweise, bei tragbarer Elektronik für den Mobilfunk, in der Fernstechnik oder bei verschiedenster Industrie-elektronik. Generell basiert die drahtlose optische Übertragung, wie auch Funk, auf elektromagnetischen Wellen, nur in wesentlich höheren Frequenzen. Im Folgenden werden deshalb auch optisch-drahtlose Technologien mit Funk verglichen, um deutlicher Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufzuzeigen.

2.1 Allgemeine Betrachtung

Funkfrequenzen ab Ultra-High-Frequency (UHF) befinden sich größtenteils im Bereich von 300 MHz bis 10 GHz. Höhere Frequenzen ab 10 GHz werden beispielsweise in der RADAR-Technik verwendet und in dieser Arbeit nicht weiterführend betrachtet. Als Ausnahme ist jedoch der drahtlose Kommunikationsstandard Wireless Gigabit (IEEE 802.11ad) zu nennen, welcher in den Bereichen um 60 GHz arbeitet.

Funksysteme erreichen eine hohe Abdeckung durch die weitestgehend radiale Abstrahlung des Dipols. Zusätzlich erlaubt die aus der Frequenz entsprechende Wellenlänge die Transmission durch nichtleitende Materialien. Reflexion und Beugung sind weitere Eigenschaften, die Abschattungseffekte in Funksystemen verringern. Der Begriff Funk steht damit verallgemeinert betrachtet für eine radial ausgebreitete, über Räume hinweg, drahtlose Verbindung.

Optisch-drahtlose Technologien umfassen den in Abbildung 2-1 dargestellten Bereich beginnend vom Nahem Infrarot (NIR, engl. Near Infrared) über den sichtbaren Bereich bis zum Ultraviolett-(UV-)Bereich. Die daraus entsprechenden Frequenzen von 300 THz bis 800 THz besitzen ein wesentlich unterschiedliches Materialverhalten als Funk. Nichtleitende Materialien, wie Wände, blockieren die optische Übertragung. Die Übertragung ist damit auf den Raum begrenzt oder setzt zumindest eine direkte Sichtverbindung für die Übertragungstrecke voraus. Im Vergleich zu Funk ist die Beugung durch wesentlich kleinere Wellenlängen auf ebenfalls kleine Objekte ausgeprägt, womit diesem Effekt eine untergeordnete Bedeutung in der optisch-drahtlosen Übertragung zukommt. Weitestgehend werden auch nicht primär zur Kommunikation genutzt. Abhängig vom Protokoll können diese einen störenden Einfluss auf die Übertragung nehmen. Damit ist die Abdeckung der drahtlosen Übertragung durch Abschattungen

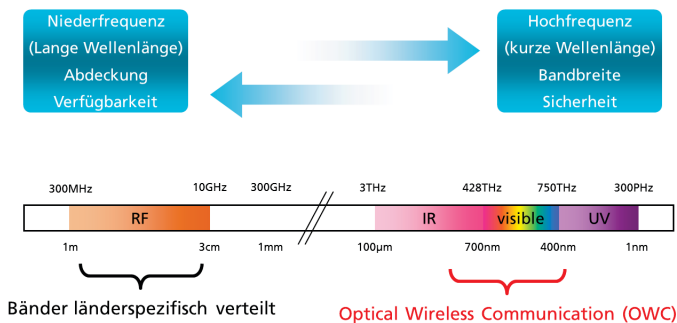


Abbildung 2-1: Funk und OWC im elektro-magnetischen Spektrum

eingeschränkt. Die optische drahtlose Übertragung ist damit vordergründig eine direkte LOS-Verbindung, in der Abstrahlkegel zueinander ausgerichtet werden. Je nach Auslegung des Öffnungswinkels kann dies wie in Abbildung 2-2 auch in eine unge-richtete LOS-Kommunikation übergehen. Die Klassen der Non-Line-of-Sight-(NLOS-)Verbindungen verfügen über die größte Raumabdeckung und berücksichtigen die Mehrwegeausbreitung im Kommunikationskonzept. Aufgrund der geringeren Effizienz der Abstrahlung und dem höheren Anteil der Mehrwegeausbreitung besitzen diese Systeme einen ungleich komplexeren Systemaufbau.

Theoretisch stehen durch die hohen Frequenzen des optischen Signals im Terahertz-Bereich auch enorme Bandbreiten im Terabit-Bereich zur Verfügung. Praktisch ist die Bandbreite jedoch eingeschränkt durch die verwendeten Emittier- und Empfänger-elemente und deren elektrischen Ansteuerung. Für eine erste Einordnung bieten sich Verweise auf veröffentlichte Standards an. Giga-IR von IrDA [2] spezifiziert 1 Gbit/s für die Anwendung in mobilen Geräten und Docking-Stationen bei unverbindlichen Nutzungsdistanzen von 1 cm bis 5 cm. Die Planung für einen IrDA-Standard für 5 Gbit/s und 10 Gbit/s ist ebenfalls angekündigt, befindet sich aber noch in einer Arbeitsgruppe [3]. Im Visible-Light-(VLC-)Communication-Standard [4] werden bis zu 96 Mbit/s definiert, jedoch ohne explizite Reichweitenangabe. Die Ausrichtung liegt jedoch hierbei unter anderem in der Kommunikation innerhalb eines Raumes und umfasst damit Gerätekonzepte mit Reichweiten im Meterbereich. Zur Vollständigkeit zu nennen, sind Free-Space-Optics (FSO). Diese optisch-drahtlosen Systeme besitzen die größten Reichweiten, von mehreren 100 Metern bis zu mehreren Kilometern. Diese Systeme nutzen einen Strahl mit einer hohen Bündelung und damit einem niedrigen Divergenzwinkel. FSOs erreichen somit weit höhere Datenraten als Funkssysteme über weite Strecken.

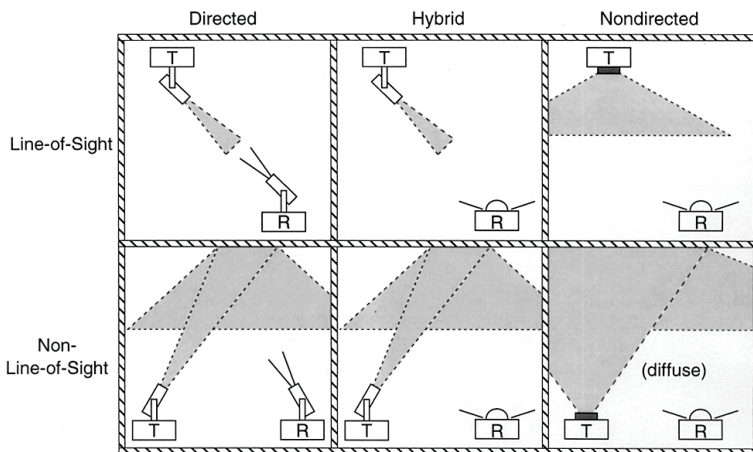


Abbildung 2-2: Klassifizierung von optisch-drahtlosen Verbindungen [1]

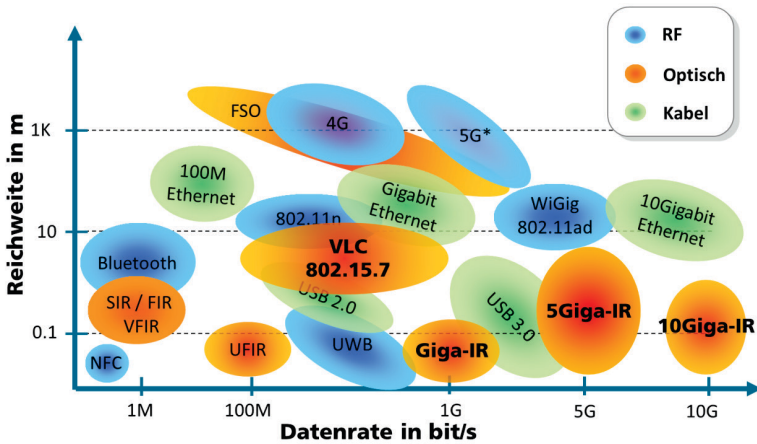


Abbildung 2-3: Überblick von ausgewählten drahtlosen und drahtgebundenen Kommunikationsklassen

Für einen ersten Überblick zeigt Abbildung 2-3 verschiedene Standards und Klassen von Funksystemen, optisch-drahtlosen und drahtgebundenen Systemen in Bezug zur Reichweite und Datenrate. Mit Ausnahme von FSO-Systemen zeigt die Darstellung, dass Standards für optisch-drahtlose Systeme für Reichweiten für wenige Meter ausgelegt werden. Für Datenraten die höher als 1 Gbit/s liegen, geht dies sogar in den Zentimeterbereich über. Ein pauschaler Vergleich der Systeme ist mit dieser Darstellung nicht möglich, da unter anderem die Richtwirkung nicht betrachtet wird, die auch dem 60-GHz-Funkstandard IEEE 802.11ad zu einer höheren Reichweite verhilft. Weitere von der Applikation abhängende Parameter sind Latenz, Fehlerrate und Verfügbarkeit der Verbindung.

Unter dem Aspekt der Integrationsfähigkeit sind die Abmessungen des Systems entscheidend. Neben dem Platz der Elektronik für die Datenverarbeitung bestimmen zusätzlich in Funksystemen die Antennen die Baugröße. Bei festgelegter Funkfrequenz erlauben Techniken, wie der Einsatz von $\lambda/4$ -Antennen oder das Mäandrieren, eine wesentlich kompaktere Bauform bei einem geringeren Antennengewinn. Die Beispiele in Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 zeigen Miniaturisierungen von 2,4-GHz-Transceivern auf bis zu 4,7 mm x 4,7 mm. Letzterer besitzt außerdem eine integrierte Universal-Serial-Bus-(USB-)Schnittstelle.

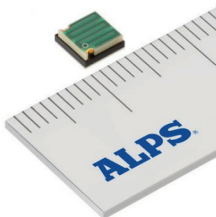


Abbildung 2-4: Bluetooth-Transceiver mit Mäander-Antenne [5]



Abbildung 2-5: 802.11n-Wi-Fi-Modul im USB-Format von LogiLink [6]



Abbildung 2-6: IrDA SIR Transceiver [7]

Äquivalent dazu sind die Abmessungen maßgeblich durch die Optiken in optisch-drahtlosen Systemen definiert. Eine Miniaturisierung ist praktisch nicht durch die Frequenz limitiert, jedoch verringert sich umso mehr die maximal mögliche empfangene Leistung und damit auch die maximal erreichbare Reichweite. Abbildung 2-6 zeigt einen Transceiver von Vishay für den Serial-Infrared-Standard mit 115,2 kbit/s. Das Modul erreicht hierfür eine Abmessung von 4 mm × 9,7 mm × 4,7 mm.

Die Leistungsfähigkeit eines Transceivers kennzeichnet sich zusammengefasst durch

- die Datenrate bei einer definierten Bitfehlerrate,
- die Baugröße,
- die damit maximale Reichweite und
- die Größe des Field-of-Views (FOV).

Eine Erhöhung eines Faktors zieht in der Regel die Verringerung eines anderen Faktors nach sich. Standards wie Giga-IR geben Parameter wie Datenrate und Sichtfeld vor, lassen jedoch Spielraum für Lösungsmöglichkeiten in der Reichweite.