

Beiträge aus der Informationstechnik

René Kirrbach

**Untersuchungen zu linearen optisch-drahtlosen
Frontends und applikationsspezifischen
Freiformlinsen für die optisch-drahtlose
Kommunikation**

 VOGT

Dresden 2021

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., 2021

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Untersuchungen zu linearen optisch-drahtlosen Frontends und
applikationsspezifischen Freiformlinsen für die optisch-drahtlose
Kommunikation“ von René Kirrbach überein.

© Jörg Vogt Verlag 2021
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-051-3

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

**Untersuchungen zu linearen optisch-drahtlosen
Frontends und applikationsspezifischen
Freiformlinsen für die optisch-drahtlose
Kommunikation**

Dipl.-Ing.

René Kirrbach

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zum Erlangen des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Plettmeier Tag der Einreichung: 23.02.2021
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Wolf-Joachim Fischer Tag der Verteidigung: 14.09.2021
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht

Kurzfassung

Diese Arbeit widmet sich der detaillierten Untersuchung von analogen optisch-drahtlosen Frontends (AFE) und applikationsspezifischen Freiformlinsen für die optisch-drahtlose Kommunikation (OWC). Neben theoretischen Überlegungen werden Entwurfsbeispiele beschrieben, auf Leiterplattenebene mit Hilfe kommerzieller Komponenten realisiert und messtechnisch untersucht.

Ein Entwurfsbeispiel dieser Arbeit umfasst einen linearen Treiber, welcher mittels Transistorpräzisionsstromquelle mehrere Leuchtdioden ansteuert. Am Receiver wird ein nicht ausbalancierter, differentieller Transimpedanzverstärker (TIA) und ein TIA mit Nachverstärker untersucht. Die Charakterisierung der Schaltungen erfolgt hinsichtlich ihrer Leistungsaufnahme, ihrer Übertragungsfunktion sowie ihrer Linearität. An den Receiverschaltungen werden zudem Rauschmessungen durchgeführt. Zur Untersuchung der Datenübertragungseigenschaften werden Signale übertragen, die nach dem orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) moduliert sind. Die maximale OFDM-Datenrate beträgt dabei 1554 Mbit/s. Die Übertragung wird in Abhängigkeit vom Empfangspegel, der Signalaussteuerung, dem LED-Arbeitspunkt, der Bandbreite und der Temperatur untersucht. So kann quantitativ gezeigt werden, wie zukünftige Transceiver von einer adaptiven Arbeitspunkteinstellung, einer adaptiven Bandbreite oder einer adaptiven Transmitteraussteuerung profitieren können.

Die Entwurfsbeispiele werden mit Hilfe eines kommerziell erhältlichen digitalen Signalprozessors in ein konventionelles Ethernet-Netzwerk integriert. Messungen der Datenrate in Punkt-zu-Punkt-, Punkt-zu-Multipunkt- und Multipunkt-zu-Multipunkt-Konfigurationen zeigen ihr vielseitige Anwendbarkeit. Darüber hinaus wird ein netzwerkbasierter Ortungsalgorithmus verwendet, um mobilen Teilnehmern im Netzwerk ortsspezifische Inhalte zu übermitteln.

Das wesentliche Herausstellungsmerkmal dieser Arbeit ist die detaillierte Untersuchung von Freiformoptiken im Kontext der OWC. Es wird ein Framework zur Berechnung von Freiformlinsen vorgestellt, welches in Bezug auf Li-Fi bisher einzigartig ist. Das Potential für die OWC wird mit Hilfe zahlreicher exemplarischer Transmitter- und Receiverlinsen untersucht. Das Framework nutzt *ray-mapping*-Algorithmen zur Konstruktion von Transmitterlinsen. Für den Entwurf von Receiverlinsen werden auf dem Randstrahlenprinzip aufbauende Methoden verwendet. Mittels Entwurfsbeispiel wird gezeigt, dass sich die optische Effizienz und die Homogenität innerhalb des Sichtfeldes (FOV) durch den Einsatz von totalreflektierenden Linsen verbessern lassen. Ein weiteres Entwurfsbeispiel stellt eine Mehrwegelinse am Transmitter vor, die ein elliptisches Emissionsprofil in ein FOV mit rechteckigen Querschnitt überführt. Gleichzeitig erlaubt sie es, die zulässige Transmitterleistung unter dem Gesichtspunkt der Augensicherheit um 13 dB gegenüber einem Transmitter ohne Linse zu erhöhen. Dies entspricht einer Reichweitenverbesserung um den Faktor 4,5. Ein anderes Entwurfsbeispiel demonstriert, wie Transmitter- und Receiverlinse zu einer Hybridlinse kombiniert werden können, um einen kontaktlosen Drehübertrager zu realisieren. Simulativen Untersuchungen zeigen, dass eine Kombination von Freiform-Fresnellinsen mit dem betrachteten AFE, je nach Konfiguration, eine Datenübertragung über Reichweiten von mehreren zehn Metern bis knapp 100 m erlaubt.

Zusammenfassend demonstriert diese Arbeit, dass die vorgestellten Entwurfsbeispiele verschiedene Anwendungen sehr gut adressieren können und damit eine sinnvolle Alternative zu kommerziellen Funktechnologien darstellen. Die Freiformlinsen sind dabei der Schlüssel zu einer effizienten Lösung mit hoher Performanz.

Abstract

This thesis investigates the analog optical wireless frontend (AFE) and application-specific freeform lenses for optical wireless communications (OWC). Besides theoretical considerations, design examples are described, implemented at printed circuit board (PCB) level, and investigated metrologically.

The design examples include a linear driver that interfaces multiple light-emitting diodes using a transistor precision current source. The receiver design examples compromise an unbalanced differential transimpedance amplifier (TIA) and a single-ended TIA with post-amplifier. The circuits are characterized with respect to their power consumption, transfer function, and linearity. Additionally, the receiver circuit noise is investigated and measured.

Signals modulated by orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) are retransmitted to evaluate the data transmission characteristics of the AFE. This work reports OFDM data rates of up to 1554 Mbit/s. The transmission is studied as a function of received signal strength, transmitter signal level, emitter operating point, bandwidth, and temperature. Thereby, the work quantifies how future transceivers can benefit from features, such as adaptive operating point adjustment, adaptive bandwidth adjustment, and a special type of adaptive power loading.

The design examples are integrated into an Ethernet network using a commercial digital signal processor. Data rate measurements in point-to-point, point-to-multipoint, and multipoint-to-multipoint configurations underline the versatility of the transceiver. In addition, a network-based localization algorithm is applied to deliver location-specific content to mobile users within the network.

The key feature of this work is the detailed investigation of freeform optics in the context of OWC. The work presents a design framework for freeform lenses, which is so far unique in terms of Li-Fi. By investigating several design examples, this work explores the potential of freeform optics for OWC. The framework uses *ray-mapping* algorithms to design transmitter lenses. Methods based on the edge ray principle are used to calculate receiver lenses. Using total internal reflection lenses, the optical efficiency and homogeneity within the field of view can be improved. Another design example is a multi-path lens that transforms an elliptical emission profile into a FOV with a rectangular cross section. With respect to eye safety, the lens allows an increase of the optical transmitter power by 13 dB compared to a transmitter without a lens. This result corresponds to a range improvement by a factor of 4.5. Another design example demonstrates how transmitter and receiver lens are combined into a new single hybrid lens to realize contactless data transmission in rotary applications. Finally, a simulative feasibility study investigates the combination of freeform Fresnel lenses with the considered AFE. The lenses extend the communication range to several tens of meters depending on the AFE configuration.

In summary, this work demonstrates that discussed design examples can address various applications very well and thus represent a reasonable alternative to commercial radio frequency technologies. Freeform lenses are the key for an efficient solution with high performance.

Danksagung

Diese Arbeit verfasste ich zu meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS). Ich möchte mich daher bei all jenen Bedanken, die die Rahmenbedingungen für dieser Arbeit gelegt haben.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Wolf-Joachim Fischer, der diese Arbeit durch regelmäßige Treffen betreute, die notwendigen Rahmenbedingung schaffte und mich insbesondere bei der Organisation unterstützte. Ein weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht, der sich für diese umfangreiche Arbeit als Zweitgutachter bereitgestellt hat.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Kollegen am Fraunhofer IPMS bedanken. Zum einen bei Dr.-Ing. Alexander Noack, der mir stets mit Rat zur Seite stand und die Finanzierung von Veröffentlichungen und Entwürfen sicherstellte. Ein weiterer Dank gilt Dr.-Ing. Michael Faulwaßer, der sich als ausgezeichnete Co-Autor in diversen Veröffentlichungen bewiesen hat. Bei M. Sc. Tobias Schneider möchte ich mich für die innovationsreichen Diskussionen im Themenfeld der Optik bedanken. Darüber hinaus geht mein Dank an Dipl.-Ing. Benjamin Jakob für die zahlreichen Diskussionen über die optisch-drahtlose Kommunikation.

Schlussendlich gilt ein großer Dank meiner Marie, welche mich während der gesamten Zeit unterstützte.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Symbolverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Kategorisierung	5
2.2 Anwendungen	6
2.3 Standardisierung	7
2.4 Forschung	8
2.4.1 OWC und Li-Fi	8
2.4.2 Linsen für die OWC	9
3 Physikalische und technische Grundlagen	11
3.1 Optisch-drahtlose Kommunikation	11
3.1.1 Kanalmodell	11
3.1.2 Leistungsübertragungsbilanz	13
3.1.3 Emittter	14
3.1.4 Photodetektoren	21
3.2 Modulationsverfahren	25
3.2.1 On-Off-Keying	26
3.2.2 Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren	27
3.3 Rauschen	29
3.3.1 Allgemeines	29
3.3.2 Rauschkenngrößen	30
3.3.3 Fehlerraten	31
3.3.4 Rauschquellen	31
3.4 Nichtlinearität	35
3.4.1 Verstärkungskompression	36
3.4.2 Harmonische Verzerrungen	36
3.4.3 Intermodulation	37

3.5	Optische Systeme	37
3.5.1	Physikalische Grundlagen	38
3.5.2	Lichtgeschwindigkeit und Brechungsindex	39
3.5.3	Fresnelreflexionen	39
3.5.4	Geometrische Oberflächen und Freiformoptiken	40
3.5.5	Transmitteroptik	41
3.5.6	Receiveroptik	42
3.5.7	Fertigung von Freiformoptiken	44
4	Analoges optisch-drahtloses Frontend	47
4.1	OFDM-Signal	47
4.2	Vorüberlegungen zur Leistungsübertragungsbilanz	48
4.2.1	Reichweite-Sichtfeld-Kompromiss	48
4.2.2	CNR über Reichweite	49
4.2.3	Bandbreite-Reichweite-Kompromiss	51
4.2.4	Schlussfolgerung und Einschränkung der Zielparameter	52
4.3	Transmitter	53
4.3.1	Anforderungen	53
4.3.2	Wahl des Emitters	54
4.3.3	Entwurf des Treibers	55
4.3.4	Ergebnisse	71
4.3.5	Diskussion	76
4.4	Receiver	80
4.4.1	Anforderungen	80
4.4.2	Wahl der Photodiode	80
4.4.3	Entwurf des Empfängerschaltkreises	82
4.4.4	Ergebnisse	98
4.4.5	Diskussion	105
4.5	Messungen an DCO-OFDM-Signalen	113
4.5.1	DCO-OFDM-Eingangssignal	113
4.5.2	Datenrate und CNR über der Empfangsleistung	114
4.5.3	Datenrate über der Transmitteraussteuerung	117
4.5.4	Datenrate über dem LED-Arbeitspunktstrom	119
4.5.5	Datenrate über der Bandbreite	120
4.5.6	Temperaturverhalten	121
4.6	Diskussion	122
4.6.1	Diskussion der OFDM-Datenübertragung	122
4.6.2	Vergleich mit anderen Systemen aus der Literatur	129
5	Freiformoptiken für die optisch-drahtlose Kommunikation	131
5.1	Entwurfsmethoden	131
5.1.1	Übersicht	131
5.1.2	Ray Mapping	132
5.1.3	Randstrahlenprinzip und Optimierung	135
5.2	Framework zum Design von Freiformoptiken	136
5.2.1	Initialisierung	137
5.2.2	Ein- und Ausgangsvektoren	137

5.2.3	Geometrisches Strahlziehen	137
5.2.4	Interpolation	137
5.2.5	Export	138
5.2.6	Simulation	138
5.2.7	Optimierung	139
5.2.8	Fertigung	139
5.2.9	Verknüpfung mit Transceiverperformanz	139
5.3	Entwurfsbeispiele Transmitterlinsen	141
5.3.1	Totalreflektierende Transmitterlinse	141
5.3.2	Transmitter-Freiform-Fresnellinse	144
5.3.3	Mehrwegelinse für hohe Leistungen	147
5.4	Entwurfsbeispiele Receiverlinsen	154
5.4.1	Dielectric Totally Internally Reflecting Concentrator	154
5.4.2	Rotationssymmetrische TIR-Receiverlinsen	155
5.4.3	Receiver-TIR-R-Freiform-Fresnellinse	160
5.5	Entwurfsbeispiel Hybridlinse	164
5.5.1	Motivation	164
5.5.2	Transmitterteil	164
5.5.3	Receiverteil	166
5.5.4	Ergebnisse	166
5.5.5	Diskussion	168
6	Anwendungsbeispiele	169
6.1	Transceiver für die Kommunikation und Ortung in Innenräumen	169
6.1.1	Motivation	169
6.1.2	Systemkonzept	169
6.1.3	Ergebnisse	171
6.1.4	Diskussion	177
6.2	OFDM-basierter Transceiver für hohe Reichweiten	178
6.2.1	Anforderungen	178
6.2.2	Systemkonzept	179
6.2.3	Simulationen	179
6.2.4	Diskussion	179
7	Zusammenfassung und Ausblick	183
	Literaturverzeichnis	185
A	Messgeräte	205
B	Messaufbauten	207
B.1	Messungen des Frequenzgangs	207
B.1.1	Allgemeines Vorgehen	207
B.1.2	Transmitter: LED-Strom	207
B.1.3	Transmitter: Optisches Signal	208
B.1.4	Receiver	208

B.2	Messung der THD	209
B.2.1	Allgemeines Vorgehen	209
B.2.2	THD im LED-Strom	210
B.2.3	THD im optischen Transmittersignal	210
B.2.4	THD im Ausgangssignal	210
B.3	Rauschmessungen	210
B.4	Temperaturcharakterisierung	211
C	Übersicht: Kommerzielle OPVs	213
D	Übersicht: Kommerzielle Leistungstransistoren	215
E	Übersicht: Kommerzielle NIR-LEDs	217
F	Übersicht: Kommerzielle Si-PIN-PDs	219
G	Übersicht über die Komponenten der betrachteten Schaltungen	221
H	Veröffentlichungsliste (Chronologisch, 23.02.2021)	223
	Literaturverzeichnis der Anhänge	225

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum. Die Definition der Spektralbereiche erfolgt nach <i>DIN 5031-7</i> [53]	1
1.2	Schwerpunkte der Arbeit	2
2.1	Taxonomie der OWC. Modifiziert nach Haas [82]	5
2.2	Ausgewählte Anwendungsfelder der OWC	7
3.1	Optisch-drahtlose Datenübertragungsstrecke	12
3.2	Geometrische Anordnung von Transmitter und Receiver	13
3.3	Schematische Darstellung einer LED. Modifiziert nach Säckinger [232]	14
3.4	LED-Kennlinien	16
3.5	LED-Modell. Aufbauend auf den LED-Ersatzschaltbildern nach Lee [151], Li et al. [158] und Shatalov et al. [234] wurde das Modell analog zum PD-Ersatzschaltbild nach Piels et al. [204] aufgebaut.	16
3.6	Schematische Darstellung eines VCSEL und eines KE. Adaptiert nach Jung [120] und Meschede [172]	18
3.7	Schematische Darstellung einer PIN-PD. Modifiziert nach Säckinger [232]	21
3.8	PD-Modell. Modifiziert nach Piels et al. [204] und Säckinger [232]	22
3.9	Übersicht über Modulationsarten. Modifiziert nach Islim et al. [112]	26
3.10	NRZ-OOK-Signal im Zeit- und Frequenzbereich. Adaptiert nach Razavi [212]	27
3.11	OFDM-Signal im Zeit- und Frequenzbereich. Adaptiert nach Armstrong [10]	28
3.12	Rauschtypen. Modifiziert nach Säckinger [232]	30
3.13	Überblick über Rauschquellen im OWC-Kanal	32
3.14	Interne Rauschquellen im Receiver nach Hobbs [95]	34
3.15	Übertragungscharakteristik eines nichtlinearen Systems. Modifiziert nach Säckinger [232]	36
3.16	Harmonische und Intermodulationsprodukte über dem Spektrum. Adaptiert nach Säckinger [232]	37
3.17	Reflexionsgrad über dem Einfallswinkel	40
3.18	Klassifizierung geometrischer Flächen. Modifiziert nach Domhardt [58]	40
3.19	Étendue in einem System der geometrischen Optik. Modifiziert nach Winston et al. [278]	43
3.20	Brechungsindex n verschiedener Gläser über λ [74][186]	44
4.1	Optische Empfangsleistung Φ_{RX} in Abhängigkeit des Sichtfeldwinkels	49
4.2	CNR über der Entfernung	50
4.3	OFDM-Datenrate über der Distanz für verschiedene Bandbreiten	52

4.4	Einfacher, digitaler Treiber	56
4.5	Analoger Treiber	57
4.6	TPSQ mit optischer Rückkopplung	58
4.7	Grundlegende Transmitterschaltung	60
4.8	Bandbreitenerweiterung mittels Equalizing im Frequenzbereich	64
4.9	Pre-Equalizing vor der TPSQ	65
4.10	Pre-Equalizing innerhalb der TPSQ	66
4.11	Layoutabhängige, parasitäre Effekte im Transmitter	68
4.12	AC-Kleinsignalanalyse des Treibers	70
4.13	Übertragungsfunktion des Treibers	72
4.14	Übertragungsfunktion des Transmitters	73
4.15	DC-Linearität des Transmitters	74
4.16	Entwicklung der THD im Transmitter	75
4.17	PD-Gehäusetypen	81
4.18	Differentielle TIA-Konfigurationen [31, 131][232]	84
4.19	Post-Equalizing mittels aktivem HP	89
4.20	Parasitäre Kapazitäten des Widerstands R_f	90
4.21	NAD-TIA-Receiver	91
4.22	Simulierter Betrag der Transimpedanz im NAD-TIA-Receiver	92
4.23	Rauschabschätzung zum Receiver in NAD-TIA-Konfiguration	93
4.24	Rauschen über der optischen Eingangsleistung und CNR in Abhängigkeit der Photodiodenkapazität in der NAD-TIA-Konfiguration	94
4.25	TIA+PA-Receiver	95
4.26	Simulierter Betrag der Transimpedanz im TIA+PA-Receiver	96
4.27	Rauschabschätzung zum Receiver in TIA+PA-Konfiguration	97
4.28	Rauschen über der optischen Eingangsleistung und CNR in Abhängigkeit der Photodiodenkapazität in der TIA+PD Konfiguration	98
4.29	Frequenzgang des Receivers in NAD-TIA-Konfiguration	99
4.30	Frequenzgang des Receivers in TIA+PA-Konfiguration	100
4.31	Rauschspannungsdichte und NEP des Receivers in NAD-TIA- Konfiguration	101
4.32	Rauschspannungsdichte und NEP des Receivers in TIA+PA- Konfiguration	101
4.33	Entwicklung der THD über dem Eingangssignal im NAD-TIA-Receiver	103
4.34	Entwicklung der THD über dem Eingangssignal im TIA+PA-Receiver	104
4.35	Messaufbau zu den DCO-OFDM-Messungen	113
4.36	OFDM-Eingangssignale und Referenz-CNR	114
4.37	Datenrate und BLER über der Empfangsleistung	115
4.38	CNR über dem Spektrum für verschiedene Empfangsleistungen	116
4.39	Datenrate über dem Empfangslevel für verschiedene Eingangsspan- nungen	118
4.40	PSD für verschiedene Eingangssignalstärken	119
4.41	Datenrate über dem Empfangslevel für verschiedene LED- Arbeitspunkte	119
4.42	Datenrate über dem Arbeitspunktstrom der LED	120

4.43	Datenrate über dem Empfangslevel für verschiedene OFDM-Bandbreiten	120
4.44	Datenrate über der Umgebungstemperatur	121
5.1	Oberflächenkonstruktion mittels Strahlziehen	133
5.2	Leitungstransferproblem [140][272]	135
5.3	Randstrahlenprinzip und optimierte Eingangsvektoren	136
5.4	Framework zum Entwurf von Freiformlinsen	137
5.5	TIR-Transmitterlinse und Parametrisierung des Quellen- und Zielraums [141]	142
5.6	Bestrahlungsstärke einer rotationssymmetrischen Transmitter-TIR-Linse [141]	143
5.7	Schematische Darstellung von Transmitter-Freiform-Fresnellinsen	145
5.8	Computergrafik der Transmitter-Freiform-Fresnellinse	146
5.9	Emissionsprofil der Transmitter-Freiform-Fresnellinse	147
5.10	Methoden zur Vergrößerung der scheinbaren Ausdehnung der Strahlenquelle [140]	148
5.11	Optische Simulation zur Mehrwegelinse [140]	150
5.12	Fotografien der Mehrwegelinse [140]	150
5.13	Gemessenes Abstrahlprofil der Mehrwegelinse [140]	151
5.14	Messung zur Augensicherheit der Mehrwegelinse [140]	152
5.15	DTIRC und Messaufbau	154
5.16	DTIRC und dessen optischer Konzentrationsfaktor	155
5.17	Querschnittsdarstellung der ersten TIR-Receiverlinse	156
5.18	Optischer Konzentrationsfaktor und Empfangsleistung der rotationssymmetrischen TIR-Receiverlinse	157
5.19	Zweites Entwurfsbeispiel einer rotationssymmetrischen TIR-Receiverlinse	159
5.20	Optischer Konzentrationsfaktor der zweiten rotationssymmetrischen TIR-Receiverlinse	159
5.21	Renderdarstellung der TIR-R-Fresnellinse	161
5.22	Optischer Konzentrationsfaktor und Empfangslevel der Receiver-TIR-R-Freiform-Fresnellinse	162
5.23	Darstellung des Hybridlinsensystems und des Vergleichssystems [138]	165
5.24	Abstrahlprofil des Hybridlinsensystems und des Vergleichssystems [138]	166
5.25	Empfangsleistung und Übersprechen im Hybridlinsensystem und im Vergleichssystem [138]	167
6.1	Anwendungsszenario: Kommunikation und Ortung in Innenräumen	169
6.2	Fotografische Aufnahme von Front- und Backend [135]	171
6.3	Empfangslevel und Datenrate im FOV	172
6.4	Empfangslevel entlang Y- und Z-Achse	173
6.5	Datenrate entlang Y- und Z-Achse	173
6.6	P2P-, P2MP- und MP2MP-Messungen	175
6.7	Messung zur netzwerkbasierter Lokalisierungsmethode	176
6.8	I2I am Beispiel smarter Leuchtmasten	178
6.9	Simulation der Datenrate in der Y-Z-Ebene mit Freiform-Fresnellinsen 180	

B.1	Messaufbau: Referenzmessung zum Frequenzgang	208
B.2	Messaufbau: Frequenzgangmessung im LED-Strom	208
B.3	Messaufbau: Frequenzgangmessung im optischen Transmittersignal . .	209
B.4	Messaufbau: Frequenzgangmessung am Receiver	209
B.5	Messaufbau: Referenzmessungen der THD	210
B.6	Messaufbau: THD-Messungen	211
B.7	Messaufbau: Rauschmessungen am Receiver	211
B.8	Messaufbau: Temperaturcharakterisierung des AFE	212

Tabellenverzeichnis

3.1	Modellgrößen zum LED-Modell	17
3.2	Typische Kennwerte von LEDs und LDs im Vergleich	20
3.3	Modellparameter zum PD-Modell	23
3.4	Typische Kennwerte von PIN-PDs und APDs	25
3.5	Eigenschaften von mineralischen Gläsern und Kunststoffglas	44
4.1	Kennwerte des verwendeten OFDM-Signals	47
4.2	Anforderungen an den Transmitter	53
4.3	Auswahl geeigneter, kommerziell erhältlicher NIR-LEDs	55
4.4	Vergleich der Treiberkonzepte	59
4.5	Auswahl geeigneter Konverter-OPVs	61
4.6	Auswahl geeigneter OPVs für die TPSQ	62
4.7	Transistoren für den Treiberschaltkreis	63
4.8	Transmitter im Vergleich mit Systemen aus der Literatur	79
4.9	Anforderungen an den Receiver	80
4.10	Übersicht kommerziell erhältlicher Si-PIN-Photodioden	82
4.11	Auswahl geeigneter OPVs für den Receiver mit Einzeldraht-Ausgang	86
4.12	Auswahl voll differentieller OPVs für den Receiver	87
4.13	Empfängerschaltungen im Vergleich mit OWC-Systemen aus der Literatur	112
4.14	OFDM-Signalaussteuerung im Transmitter	114
4.15	OFDM-Transceiver im Vergleich mit Systemen aus der Literatur	130
5.1	Kennwerte der rotationssymmetrischen Transmitter-TIR-Linse und entsprechenden Vergleichssystemen	143
5.2	Parameter zur Abschätzung des Gefahrenpotentials für das Auge nach DIN EN 60825-1:2015-07 [140]	153
5.3	Technologien zur Datenübertragung in rotierenden Szenarien	164
5.4	Minimale Empfangsleistung der Hybridlinse in einem rotierenden Szenario.	168
A.1	Messgeräte	205
C.1	Übersicht über geeignete OPVs mit Einzeldraht-Ausgang	213
C.2	Übersicht über geeignete voll differentielle OPVs	214
D.1	Übersicht über kommerziell erhältlicher Transistoren	215
E.1	Übersicht über kommerziell erhältliche NIR-LEDs	217
F.1	Übersicht über kommerziell erhältlicher Si-PIN-Photodioden.	219

G.1	Komponenten der Transmitterschaltung	221
G.2	Komponenten des NAD-TIA-Receivers	221
G.3	Komponenten des TIA+PA-Receivers	222

Abkürzungsverzeichnis

5G	5. Generation des Mobilfunks (5G)
AC	Wechsel- bzw. Wechselanteil (engl. <i>alternating current</i>)
ACO-OFDM	Asymmetrisch übersteuertes OFDM (engl. <i>asymmetrically clipped optical OFDM</i>)
ADC	Analog-Digital-Wandler (engl. <i>analog-to-digital converter</i>)
AD-TIA	Ausbalancierter, differentieller Transimpedanzverstärker
APE	Analoges optisch-drahtloses Frontend
APD	Avalanche-Photodiode
ASIC	Anwendungsspezifische integrierte Schaltung (engl. <i>application-specific integrated circuit</i>)
AGC	Automatische Verstärkungsregelung (engl. <i>automatic gain control</i>)
AR	Erweiterte Realität (engl. <i>Augmented-Reality</i>)
BLER	Blockfehlerrate (engl. <i>block error ratio</i>)
BER	Bitfehlerrate (engl. <i>bit error ratio</i>)
BERT	Bitfehlerratenest (engl. <i>bit error ratio test</i>)
BJT	Bipolartransistor (engl. <i>bipolar junction transistor</i>)
BPSK	binäre Phasenumtastung
CAP	engl. <i>carrier-less amplitude and phase modulation</i>
CM	Gleichspannungs-Pin (engl. <i>common mode</i>)
CNR	Träger-zu-Rausch-Verhältnis (engl. <i>carrier-to-noise ratio</i>)
CPC	engl. <i>compound parabolic concentrator</i>
COP	Cycloolefin-Polymer
CIM	Farbintensitätsmodulation (engl. <i>color intensity modulation</i>)
CSK	engl. <i>color-shift-keying</i>
DAC	Digital-Analog-Wandler (engl. <i>digital-to-analog converter</i>)
DC	Gleich-/ Gleichanteil (engl. <i>direct current</i>)
DD	Direkte Detektion
DCO-OFDM	Optisches orthogonales Frequenzmultiplexverfahren mit DC-Bias (engl. <i>DC-biased optical OFDM</i>)
DHCP	engl. <i>dynamic host configuration protocol</i>
DTIRC	engl. <i>dielectric totally internally reflecting concentrator</i>
DSP	Digitaler Signalprozessor
DUT	Prüfling (engl. <i>device under test</i>)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Aktivierungs-Pin (engl. <i>enable</i>)
FB	Rückkopplung (FB, engl. <i>feedback</i>)
FET	Feldefekttransistor
FFT	Schnelle Fourier-Transformation (engl. <i>fast Fourier transform</i>)
FK	Fluoreszenzkonzentratoren

FORJ	faserbasierter Drehübertrager (engl. <i>fiber optic rotary joint</i>)
FOV	Sichtfeld (engl. <i>field of view</i>)
FPGA	engl. <i>field programmable gate array</i>
FSO	Optischer Richtfunk (engl. <i>free space optics</i>)
FWHM	Halbwertsbreite (engl. <i>full width at half maximum</i>)
GBP	Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (engl. <i>gain bandwidth product</i>)
HF	Hochfrequenz
HHI	Heinrich-Hertz-Institut
HP	Hochpass
HLLED	Hochleistungsleuchtdiode
I2I	Infrastruktur-zu-Infrastruktur-Kommunikation
IC	Integrierter Schaltkreis (engl. <i>integrated circuit</i>)
IFFT	Inverse schnelle Fourier-Transformation (engl. <i>inverse fast Fourier transform</i>)
IGES	engl. <i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
IM	Intensitätsmodulation
IOSB	Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung
IPMS	Institut für Photonische Mikrosysteme
IRC	Infrarotkommunikation (IRC, engl. <i>infrared communications</i>)
ISI	Symbolübersprechen, auch Intersymbolinterferenz
JFET	engl. <i>Junction-FET</i>
KE	Kantenemitter
LD	Laserdiode
LED	Leuchtdiode
Li-Fi	Light-Fidelity
LNA	rauscharmer Verstärker (engl. <i>low noise amplifier</i>)
LOS	Sichtverbindung (engl. <i>line of sight</i>)
LSR	Flüssigsilikon (engl. <i>liquid silicone rubber</i>)
MAC	engl. <i>media access control</i>
MP2MP	Multipunkt-zu-Multipunkt
NAD-TIA	nicht ausbalancierter, differentieller TIA
NAPD-TIA	nicht ausbalancierter, pseudo-differentieller TIA
NEP	äquivalente Rauschleistung (engl. <i>noise-equivalent power</i>)
NIR	Nahinfrarot
NRZ	engl. <i>non-return-to-zero</i>
NURBS	nicht-uniforme rationale B-Splines (engl. <i>non-uniform rational B-Splines</i>)
OFDM	Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (engl. <i>orthogonal frequency division multiplexing</i>)
OLED	organische Leuchtdiode
OCC	optische Kamerakommunikation (engl. <i>optical camera communications</i>)
OPV	Operationsverstärker
OOK	engl. <i>on-off keying</i>
OSI-Modell	engl. <i>Open Systems Interconnection model</i>
OWC	optisch-drahtlose Kommunikation (engl. <i>optical wireless communications</i>)

P2MP	Punkt-zu-Multipunkt
P2P	Punkt-zu-Punkt
PA	Nachverstärker (engl. <i>post amplifier</i>)
PAM	Pulsamplitudenmodulation
PAPR	Spitze-zu-Durchschnittsleistungs-Verhältnis (engl. <i>peak-to-average power ratio</i>)
PC	Polycarbonat
PD	Photodiode
PCB	Leiterplatte (engl. <i>printed circuit board</i>)
PEI	Polyetherimide
PIN-PD	positiv-intrinsisch-negativ Photodiode (engl. <i>positive intrinsic negative photodiode</i>)
PMMA	Polymethylmethacrylat
POE	Primäres optisches Element
PPM	Puls-Pausen-Modulation
PRBS	Pseudo-zufällige Bit-Sequenz (engl. <i>pseudo random bit sequence</i>)
PWM	Pulsweitenmodulation
PHY	Physikalische Schicht
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
QPSK	Quadraturphasenumtastung
RCLED	Leuchtdiode mit optischen Resonator (engl. <i>resonant cavity LED</i>)
RF	Hochfrequenz (engl. <i>radio frequency</i>)
RX	Receiver
SiPM	Silizium-Photomultiplier (engl. <i>silicon photomultiplier</i>)
SMD	oberflächenmontiertes Bauelement (engl. <i>surface-mounted device</i>)
SMS	engl. <i>simultaneous multiple surface</i>
SNMP	engl. <i>simple network management protocol</i>
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl. <i>signal-to-noise ratio</i>)
SOE	Sekundäres optisches Element
SPAD	engl. <i>single-photon avalanche photodiode</i>
THD	Totale harmonische Verzerrung (engl. <i>total harmonic distortion</i>)
TDMA	Zeitmultiplex (engl. <i>time-division multiple access</i>)
TIA	Transimpedanzverstärker (engl. <i>transimpedance amplifier</i>)
TIA+PA	Einzeldraht-TIA mit Nachverstärker
TIR	Totalreflexion (engl. <i>total internal reflection</i>)
TIR-R	Totalreflexion und Brechung (engl. <i>total internal reflection - refraction</i>)
TO	engl. <i>transistor outline</i>
TPSQ	Transistor-Präzisionsstromquelle
TPSQ-OF	Transistor-Präzisionsstromquelle mit optischer Rückkopplung
TX	Transmitter
UVC	ultraviolette Kommunikation (engl. <i>ultra violet communications</i>)
V2V	Vehikel-zu-Vehikel-Kommunikation
VCSEL	engl. <i>vertical-cavity surface-emitting laser</i>
VGA	Verstärker mit variabler Verstärkung (engl. <i>variable gain amplifier</i>)
VLC	Kommunikation mittels sichtbarem Licht (engl. <i>visible light communications</i>)

VPPM	variable Puls-Pausen-Modulation
VR	virtuelle Realität
μ LED	Mikro-LED

Symbolverzeichnis

Allgemein

A	Fläche allgemein
a_i	i -ter Koeffizient eines Polynoms
C_4	Korrekturfaktor für die Augensicherheit
C_6	Korrekturfaktor für die Augensicherheit
d	Abstand allgemein
i	Laufvariable, natürliche Zahl
j	Laufvariable, natürliche Zahl
k	Laufvariable, natürliche Zahl
l_P	Abstand zwischen PD und Konzentratorausgang
N	natürliche Zahl
N_s	Zahl der Samples bzw. Messwerte
M	natürliche Zahl
x	Koordinate entlang der X-Dimension senkrecht zur optischen Achse
y	Koordinate entlang der Y-Dimension senkrecht zur optischen Achse
z	Entfernung, Distanz entlang der optischen Achsen
z_{ideal}	Entfernung mit der idealen Datenrate
z_{max}	maximale Reichweite
z_{min}	minimale Reichweite
ρ_{rel}	relative Wahrscheinlichkeit

Elektrische Größen

A	Verstärkung allgemein
A_{PA}	Verstärkung des Nachverstärkers
A_{TIA}	Verstärkung des OPVs des TIAs
A_{TOF}	Verstärkung des OPVs in der TPSQ-OF
A_{TPSQ}	Verstärkung des OPVs in der TPSQ
ΔB_{An}	Analysebandbreite im Oszilloskop
C	Kapazität allgemein
C_{BE}	Basis-Emitter-Kapazität
C_{BC}	Basis-Kollektor-Kapazität
C_{CE}	Kollektor-Emitter-Kapazität
C_d	Sperrschichtkapazität einer Diode
C_f	Rückkopplungskapazität (TIA)
C_{GD}	Gate-Drain-Kapazität
C_{in}	Eingangskapazität
C_{ISS}	Eingangskapazität am Transistor ($C_{GD/BC} + C_{GS/BE}$)
C_{LEDj}	Summe aus Sperrschicht- und Diffusionskapazität einer LED

$C_{\text{LED par}}$	parasitäre Kapazitäten am LED-Gehäuse bzw. den Anschlüssen
C_{OSS}	Ausgangskapazität am Transistor ($C_{\text{GD/BC}} + C_{\text{DS/CE}}$)
C_{par}	parasitäre Kapazität allgemein
C_{PD}	Kapazität einer PD
$C_{\text{PD par}}$	parasitäre Kapazitäten am PD-Gehäuse bzw. den Anschlüssen
C_{RSS}	Transferkapazität am Transistor ($C_{\text{GD/BC}}$)
C_{τ}	Modellkapazität, die mit R_{τ} einen Tiefpass bildet
D_{LED}	ideale Diode im LED-Ersatzschaltbild
E_{g}	Bandlücke
e_{n}	auf den Eingang bezogene Spannungsrauschdichte
f	Frequenz allgemein
$f_{-3\text{dB}}$	-3dB-Frequenz
f_{RX}	Bandbreite des Receivers allgemein
Δf	betrachteter Frequenzbereich, Spektralabschnitt
GBP	Verstärker-Bandbreite-Produkt (engl. <i>gain-bandwidth product</i>)
g_{m}	Transkonduktanz allgemein
$g_{\text{m T}}$	Transkonduktanz der Transistorstufe (Transistor und Widerstand)
$g_{\text{m}\tau}$	Modellgröße zur Anpassung der Einheit im PD-Ersatzschaltbild
HD_i	i -te harmonische Verzerrung
H_{LED}	Übertragungsfunktion der LED
H_{RX}	Übertragungsfunktion des Receivers
H_{TPSQ}	Übertragungsfunktion der TPSQ
H_{TR}	Übertragungsfunktion des Treibers
H_{TX}	Übertragungsfunktion des Transmitters
$H_{\text{TX RX}}$	Übertragungsfunktion des gesamten Kanals
$H_{\text{TX RX 0}}$	normierte Übertragungsfunktion des gesamten Kanals
H_{v}	Übertragung des Vorwärtsnetzwerks in einem Regelkreis
I_{B}	Basisstrom eines Bipolartransistors
I_{C}	Kollektorstrom eines Bipolartransistors
I_{D}	Drainstrom eines Feldeffekttransistors
I_{LED}	LED-Strom allgemein
$I_{\text{LED j}}$	LED-Strom durch die ideale Diode im LED-Ersatzschaltbild
$I_{\text{LED DC}}$	LED-Arbeitspunktstrom
$I_{\text{LED DC}}^{\text{ideal}}$	LED-Arbeitspunktstrom, bei dem die DR_{max} maximal wird
I_{PD}	Photostrom allgemein
$I_{\text{PD amb}}$	Photostrom durch das Umgebungslicht
$I_{\text{PD d}}$	Dunkelstrom einer PD
$I_{\text{PD DC}}$	Gleichanteil des Photostroms
$I_{\text{PD DC}}^{\text{krit}}$	Gleichanteil des Photostroms, ab dem es zum Übersteuern kommt
I_{th}	Schwellwertstrom (engl. <i>threshold current</i>) einer Laserdiode
$I_{\Phi \text{TX}}$	Modellgröße der optischen Leistung im LED-Ersatzschaltbild
$I_{\Phi \text{RX}}$	Modellgröße der optischen Leistung im PD-Ersatzschaltbild
IM_i	Intermodulationsprodukt i -ter Ordnung
i_{Em}	Signalstrom durch einen Emitter
i_{LED}	Signal- bzw. AC-Anteil des LED-Stroms
i_{n}	Stromrauschdichte am TIA-Eingang

u_n Em	Stromrauschdichte durch den Emitter
i_n enc	Stromrauschdichte durch das e_n -C-Rauschen
i_n in	auf den Eingang bezogene Stromrauschdichte
i_n Rf	thermische Stromrauschdichte des Widerstandes R_f
i_n sh	Stromrauschdichte des Schrotrauschens
i_n tot	Summe der Stromrauschdichten am TIA-Eingang
i_{PD}	Signal- bzw. AC-Anteil des Photostroms
i_{PD}	Signal- bzw. AC-Anteil des Photostroms in der Referenz-PD
\mathbf{k}_{eL}	Wellenvektor eines Elektrons im Leitungsband
\mathbf{k}_{eV}	Wellenvektor eines Elektrons im Valenzband
\mathbf{k}_{ph}	Wellenvektor eines Photons
$L_{LED\ par}$	parasitäre Induktivität der LED-Anschlüsse
$L_{PD\ par}$	parasitäre Induktivität der PD-Anschlüsse
L_s	Serieninduktivität
M_{APD}	Multiplikationsfaktor APD
M_B	Modulationstiefe
N_{in}	Rauschleistung am Eingang eines Systems
N_a	zusätzliche Rauschleistung eines Systems
N_s	Anzahl der gemessenen Samples
$P_{RX\ tot}$	Leistungsaufnahme des Receivers
P_{sig}	Signalleistung
P_{sig}^i	Signalleistung des i -ten Subträgers
P_n	Rauschleistung
P_n^i	Rauschleistung des i -ten Subträgers
$P_{TX\ tot}$	Leistungsaufnahme des Transmitters
P_{tot}	Leistungsaufnahme des Transceivers
R_f	rückgekoppelter Widerstand
R_L	Lastwiderstand
$R_{LED\ s}$	Serienwiderstand im LED-Ersatzschaltbild
R_{PD}	Sensitivität einer PD
$R_{PD\ p}$	Parallelwiderstand im PD-Ersatzschaltbild
$R_{PD\ s}$	Serienwiderstand im PD-Ersatzschaltbild
R_{RPD}	Modellgröße der PD-Sensitivität im LED-Ersatzschaltbild
$R_{\eta\ sl}$	Modellgröße der Steigungseffizienz im LED-Ersatzschaltbild
R_τ	Modellwiderstand, der mit C_τ einen Tiefpass bildet
$r_{RS\ on}$	Leistungswiderstand
T	Temperatur
t	Zeit allgemein
t_{ex}	Anregungszeit von Ladungsträgern
t_f	Abfallzeit (bspw. einer LED)
t_l	Lebensdauer einer Komponente
t_r	Anstiegszeit (bspw. einer LED)
t_{tr}	Transitzeit von Ladungsträgern durch die PD-Diffusionszone
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung
U_{bias}	Vorspannung im PD-Netzwerk
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung

U_{cm}	Gleichspannung (an einem OPV)
U_{DS}	Drain-Source-Spannung
U_{GS}	Gate-Source-Spannung
U_{LED}	Vorwärtsspannung einer LED
U_{max}	maximale Spannung (Vorspannung)
U_o	Modellgröße zum Verknüpfen der Stufen im PD-Ersatzschaltbild
U_{PD}	PD-Spannung
U_{th}	Schwellenspannung (engl. threshold voltage)
U_{τ}	Modellgröße zum Verknüpfen der Stufen im LED und PD-Ersatzschaltbild
u_{in}	Eingangssignal am Transmitter
$u_{mess\ i}$	i -ter abgetasteter Spannungsmesswert
$u_{n\ enc}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang durch ϵ_n -C-Rauschen
$u_{n\ ex}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang durch externes Rauschen
$u_{n\ i}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang durch internes Rauschen
$u_{n\ nl}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang durch nichtlineare Verzerrungen
$u_{n\ sh}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang durch Schrotrauschen
$u_{n\ out}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang durch den Nachverstärker
$u_{n\ pa}$	Spannungsrauschdichte am Receiverausgang
$u_{n\ tot}$	Summe der Spannungsrauschdichten am Receiverausgang
$u_{n\ Tr}$	Spannungsrauschdichte durch den Treiber
$u_{n\ TX}$	Spannungsrauschdichte durch den Transmitter
u_o	Spannungssignal am Ausgang allgemein
u_{out}	Spannungssignal am Receiverausgang
u_{out+}	positives Spannungssignal am Receiverausgang
u_{out-}	negatives Spannungssignal am Receiverausgang
$u_{TIA\ in}$	Spannung am invertierenden Eingang des TIA
$u_{TIA\ out}$	Spannung am (positiven) Ausgang des TIA
Z_f	Rückkopplungsimpedanz des TIAs
$Z_{f\ of}$	Rückkopplungsimpedanz des TIAs in der TPSQ-OF
Z_T	Transimpedanz des Empfängers
β	Rückkopplungsfaktor (der TPSQ)
ϵ_r	relative Permittivität
η_{sl}	Steigungseffizienz eines Emitters
η_{TX}	Effizienz des Transmitters
$\eta_{TX\ el}$	Effizienz des elektronischen Transmitters
μ_r	Permeabilitätszahl
ω	Kreisfrequenz
ω_p	Kreisfrequenz des Eingangspols am TIA

Geometrische Größen

A_{in}	Fläche der Eingangsapertur einer Optik
A_{out}	Fläche der Ausgangsapertur einer Optik
A_{PD}	aktive Fläche der PD
A_{TXFOV}	Fläche, die vom Transmitter bestrahlt wird
\mathbf{C}	Kurve im Raum
d_{PD}	Kantenlänge der PD
l_{PD}	Entfernung Konzentrador-PD
\mathbf{N}	Vektorfeld der Oberflächennormalen
\mathbf{n}	Normalenvektor (einer Oberfläche)
$\mathbf{n}_{i,j}$	j -ter Normalenvektor der i -ten Kurve
$\mathbf{n}_{i,j}^{\text{PD}}$	j -ter Normalenvektor der i -ten Kurve der PD-Oberfläche
\mathbf{n}_{RX}	optische Achse des Receivers in Vektorform
\mathbf{n}_{TX}	optische Achse des Transmitters in Vektorform
$\mathbf{o}_{i,j}$	Richtungsvektor des j -ten austretenden Strahls der i -ten Kurve
\mathbf{P}	Punkt allgemein
\mathbf{P}_0	Quellpunkt
$\mathbf{P}_{i,j}$	j -ter Punkt der i -ten Kurve
$\mathbf{P}_{i,j}^{\text{PD}}$	j -ter Punkt der i -ten Kurve der PD-Linse
\mathbf{P}_t	Zielpunkt
R_α	Rotationsmatrix
r_{in}	Radius der Eingangsapertur
r_{out}	Radius der Ausgangsapertur
r_t	Radiusparameter im Zielraum
\mathbf{r}_{RX}	Ortsvektor der Receiverposition
\mathbf{r}_{TX}	Ortsvektor der Transmitterposition
r_t	radiale Variable in der Zielebene
$\mathbf{t}_{i,j}$	Tangentialvektor des i -ten Punkts auf der j -ten Kurve
$\mathbf{v}_{i,j}$	Richtungsvektor des j -ten einfallenden Strahls der i -ten Kurve
$\mathbf{v}''_{i,j}$	Richtungsvektor des j -ten Strahls der i -ten Kurve im zweiten Abschnitt
$\mathbf{v}'''_{i,j}$	Richtungsvektor des j -ten Strahls der i -ten Kurve im dritten Abschnitt
α	Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle (Augensicherheit)
θ	Polarwinkel allgemein
θ_{FOV}	Sichtfeldwinkel allgemein
θ_i	Einfallswinkel in den Receiver
θ_a	Akzeptanzwinkel (max. Einfallswinkel eines Konzentrators)
θ'_a	Anfangswinkel des optimierten Akzeptanzwinkelintervalls
θ''_a	Endwinkel des optimierten Akzeptanzwinkelintervalls
θ_e	Emissionswinkel am Transmitter
θ_{out}	Ausgangswinkel/ Kopplungswinkel (vom Konzentrador zur PD)
θ_s	Polarwinkel im Quellenraum
θ_{se}^i	Endwinkel eines Polarwinkelabschnitts im Quellenraum
$\Delta\theta_s$	Polarwinkelabschnitt im Quellenraum
θ_{TX}	Sichtfeldwinkel Transmitter (Polarwinkel)

θ_{RX}	Sichtfeldwinkel Receiver (Polarwinkel)
ϑ	Azimutwinkel allgemein
ϑ_s	Azimut des Gitters im Quellenraum
ϑ_t	Azimut des Gitters im Zielraum
σ_s	infinitesimales Flächenelement im Quellenbereich
σ_t	infinitesimales Flächenelement im Zielbereich
Ψ_{TX}	räumliche Anordnung des Transmitters
Ψ_{RX}	räumliche Anordnung des Receivers
Ω_s	Quellenraum
Ω_t	Zielraum

Mechanische Größen

ρ	Dichte
r_r	Rundungsradius der Abrundungen an den Linsen

Nachrichtentechnik

B	Bandbreite (des OFDM Signals)
$BLER$	Blockfehlerrate (engl. <i>block error rate</i>)
CNR	Träger-zu-Rausch-Verhältnis (engl. <i>carrier-to-noise ratio</i>)
CNR_0	Minimales, notwendiges CNR
DR	Datenrate
DR_a	Datenrate in der Anwendungsmessung mittels <i>iperf 3.1.3</i>
DR_{max}	maximale Datenrate in Abhängigkeit von Φ_{RX}
f_c	Trägerfrequenz
f_c^i	Trägerfrequenz des i -ten Trägers
Δf_c	Trägerabstand
M_b	Modulationstiefe
N_c	Trägeranzahl eines Mehrträger-modulierten Signals
P_n	Rauschleistung
P_{sig}	Signalleistung
PSD	spektrale Leistungsdichte des Signals (engl. <i>power spectral density</i>)
SNR	Signal-zu-Rauschverhältnis allgemein
SR	Symbolrate
T_s	Symboldauer
η_{spec}	spektrale Effizienz
η_{tot}	Leistung pro Bit

Optische Größen

c_n	Lichtgeschwindigkeit in einem Material mit Brechungsindex n
D^*	spezifische Detektivität
E	Bestrahlungsstärke allgemein
$E_{etendue}$	<i>Étendue</i>
E_{TX}	vom Transmitter erzeugte Bestrahlungsstärke

E_{\min}	minimale Bestrahlungsstärke in einer Ebene
E_{ph}	Energie eines Photons
f_{ph}	Frequenz eines Photons
g_o	optischer Konzentrationsfaktor der Receiveroptik
$g_{o\max}$	maximaler optischer Konzentrationsfaktor der Receiveroptik
H_o	Übertragungsfunktion des optischen Kanals
$H_{o\text{of}}$	optische Dämpfung von der LED zur PD in der TPSQ-OF
H_{TPSQv}	Übertragungsfunktion des Vorwärtsnetzwerks der TPSQ
I_e	Strahlungsintensität
L_o	optischer Verlust
NEP	äquivalente Rauschleistung, engl. <i>noise equivalent power</i>
n	Brechungsindex, auch Brechzahl
R_{FR}	Reflexionsgrad in Folge von Reflexionsverlusten
R_α	Rotationsmatrix
$\eta_{\text{RX}o}$	Effizienz der Receiveroptik
$\eta_{\text{TX}o}$	Effizienz der Transmitteroptik
$\eta_{\text{TX}o\text{eff}}$	effektive Effizienz der Transmitteroptik
λ	Wellenlänge allgemein
λ_{cl}	Cut-On-Wellenlänge
λ_{ch}	Cut-Off-Wellenlänge
λ_p	Wellenlänge mit der Spitzenleistung
λ_{ph}	Wellenlänge eines Photons
$\Delta\lambda$	spektrale Bandbreite (Halbwertsbreite)
ρ_s	Leistungsdichte im Quellenraum
ρ_t	Leistungsdichte im Zielraum
Φ	optische Leistung oder auch optischer Fluss allgemein
Φ_{GZS}	Grenzwert der zulässigen Strahlungsleistung
Φ_{TX}	optische Sendeleistung am Transmitter allgemein
Φ_{TXDC}	Gleichanteil der optischen Sendeleistung des Transmitters
Φ_{TXAC}	Wechselanteil der optischen Sendeleistung des Transmitters
$\Phi_{\text{TXAC}}^{\text{eff}}$	Effektivwert des Wechselanteils der optischen Leistung des Transmitters
Φ_{RX}	optische Leistung, die auf die PD einfällt
Φ_{RXcross}	optische Leistung des Übersprechens
$\Phi_{\text{RXcross}1}$	optische Leistung des Übersprechens im Transceiver
$\Phi_{\text{RXcross}2}$	optische Leistung des Übersprechens aus der Umgebung
Φ_{RXDC}	Gleichanteil der optische Leistung, die auf die PD einfällt
$\Phi_{\text{RXAC}}^{\text{eff}}$	Effektivwert des Wechselanteils der optische Leistung an der PD
$\Phi_{\text{RXDC}}^{\text{ideal}}$	optische Leistung an der PD, bei der DR_{\max} erreicht wird
Φ_{RXmin}	Empfindlichkeit des Transceivers (min. optische Leistung)
Φ_{RXDCmin}	Empfindlichkeit des Transceivers (min. optische DC-Leistung)
ϕ	Transferfunktion vom Quellenraum in den Zielraum

Physikalische Konstanten

c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($2,998 \times 10^8$ m/s)
e	Elementarladung ($1,902 \times 10^{-19}$ C)
h	Plancksches Wirkungsquantum ($6,626 \times 10^{-34}$ J s)
\hbar	reduziertes Plancksches Wirkungsquantum ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$)
ε_0	elektrische Feldkonstante ($8,854 \times 10^{-12}$ A s/(V m))
μ_0	magnetische Feldkonstante ($1,256 \times 10^{-6}$ N/A ²)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die optisch-drahtlose Kommunikation (OWC, engl. *optical wireless communications*) erlebte unter dem Begriff *Light-Fidelity* (Li-Fi) eine Renaissance in der Forschung und beginnt in neuen Anwendungsfeldern Fuß zu fassen. Schon vor dem Aufkommen des Li-Fi-Begriffs war der Datentransfer mittels optisch-drahtloser Signale wohlbekannt. So erreichte die Infrarot-Fernbedienung eine große Verbreitung. Zeitweise wurden Infrarotschnittstellen in Mobiltelefonen und anderer Unterhaltungselektronik verwendet, um Datenübertragung über Kurzstrecken zu ermöglichen. Das heutige Interesse an der OWC lässt sich auf den *Frequency Crunch*, d. h. der Mangel an zur Verfügung stehenden Funkfrequenzen, zurückführen. Dieser Mangel resultiert aus dem exponentiellen Wachstum des mobilen Datenverkehrs [82, S.443][42, 279]. Die 5. Generation des Mobilfunks (5G) versucht bereits dieses Problem zu adressieren [279]. Durch die verbesserten Übertragungseigenschaften, wie Datenraten im Gbit/s-Bereich und Latenzen von wenigen Millisekunden [197], werden darüber hinaus neue Anwendungen wie autonomes Fahren ermöglicht [279]. Wenn die neuen Funktechnologien erfolgreich sind, werden zukünftig auch andere Anwendungen, die heute noch über Kabel angebunden sind, drahtlose Kommunikation einsetzen [279]. Dadurch beschleunigt sich das Wachstum des mobilen Datenaufkommens noch weiter [279].

Mit der OWC gibt es eine Alternativtechnologie, die andere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums nutzt. Abb. 1.1 stellt einen Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums nach *DIN 5031-7* [53] dar und markiert die ultraviolette Kommunikation (UVC, engl. *ultraviolet communications*), die Kommunikation mittels sichtbaren Lichts (VLC, engl. *visible light communications*) und die Infrarotkommunikation (IRC, engl. *infrared communications*). Die räumlich begrenzten Kanäle sind für verschiedene Anwendungen vorteilhaft. Im industriellen Umfeld garantieren sie Störsicherheit. In Innenräumen erlauben sie wiederum Lokalisierung sowie

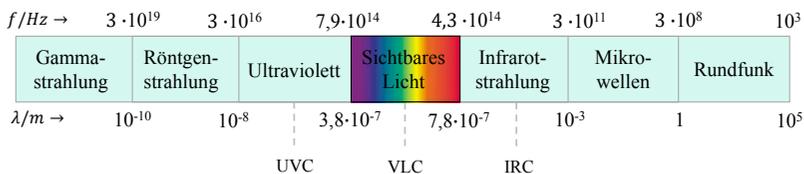


Abb. 1.1. Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum mit den zugehörigen Kommunikationstechnologien. Die Definition der Spektralbereiche erfolgt nach *DIN 5031-7* [53].

hohe Übertragungskapazitäten, da auf engem Raum viele Kanäle unabhängig voneinander koexistieren können. Mitunter ermöglicht die OWC eine Reduzierung der Systemkomplexität gegenüber 5G-Technologien [83, 84] und dementsprechend auch gegenüber zukünftigen Funktechnologien mit noch höherer Komplexität.

1.2 Ziel der Arbeit

Wie Abb. 1.2 illustriert, lässt sich ein optisch-drahtloser *Transceiver* in den *Transmitter* (TX) und den *Receiver* (RX) untergliedern. Darüber hinaus ist eine Separation in Backend und Frontend möglich. Neben der digitalen Datenverarbeitung, die weitestgehend auf dem Backend stattfindet, ist das Frontend für die Performanz des Transceivers maßgebend.

Diese Arbeit widmet sich der detaillierten Untersuchung des analogen optisch-drahtlosen Frontends (AFE) zur bidirektionalen Kommunikation mit Spitzendatenraten von mehr als 1 Gbit/s. Im *Open Systems Interconnection model* (OSI-Modell) ist die Arbeit in der Bitübertragungsschicht angesiedelt. Wie Abb. 1.2 illustriert, umfasst dies die elektronischen und die optischen Komponenten. Nach allgemeinen Betrachtungen zum elektrischen Entwurf sollen konkrete Entwurfsbeispiele auf Platinebene unter Nutzung kommerziell erhältlicher Komponenten entwickelt und messtechnisch untersucht werden. Die Untersuchungen haben zum Ziel, Bandbreite, Linearität und Empfindlichkeit des AFE zu verbessern, um Datenrate und Reichweite des Transceivers zu maximieren.

Unter Nutzung eines kommerziell erhältlichen digitalen Signalprozessors (DSP) wird die Übertragung von Signalen untersucht, die nach dem orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) moduliert sind. Die Übertragungseigenschaften werden in Abhängigkeit vom Empfangspegel, der Signalaussteuerung, dem Arbeitspunkt, der Bandbreite und der Temperatur untersucht, um wesentliche Zusammenhänge darzustellen. Die Funktionalität wird in einem Ethernetnetzwerk untersucht, wobei unter anderem eine Punkt-zu-Multipunkt (P2MP) Anordnung mit mehreren aktiven Verbindungen betrachtet wird.

Das wesentliche Herausstellungsmerkmal ist die detaillierte Untersuchung von Freiformoptiken im Kontext der OWC. Im Rahmen der Arbeit wird ein Framework

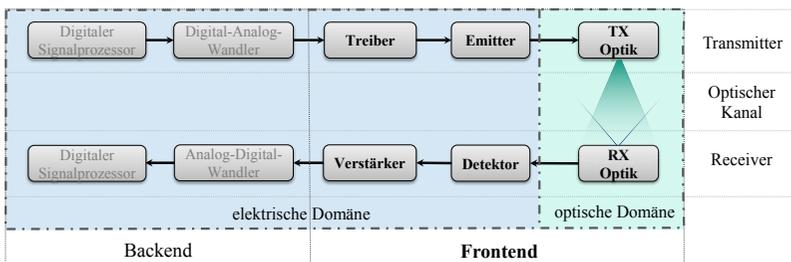


Abb. 1.2. Vereinfachtes Kanalmodell, wobei die Schwerpunkte der Arbeit hervorgehoben sind.

zur Berechnung von Freiformlinsen entwickelt, welches in Bezug auf Li-Fi bisher einzigartig ist. Mit Hilfe verschiedener Entwurfsbeispiele wird das Potential dieser Linsen für die OWC untersucht. Das Framework nutzt *Ray-Mapping*-Algorithmen zur Konstruktion von Transmitterlinsen. Für den Entwurf von Receiverlinsen werden auf dem Randstrahlenprinzip aufbauende Methoden implementiert. Ein Entwurfsbeispiel untersucht, wie sich die optische Effizienz und die Homogenität innerhalb des Sichtfelds (FOV, engl. *field of view*) durch den Einsatz von totalreflektierenden Linsen verbessern lässt. Ein weiteres Entwurfsbeispiel prüft, wie sich die Augensicherheit mit Hilfe einer Mehrwegelinse verbessern lässt. Darüber hinaus wird untersucht, inwiefern Freiform-Fresnellinsen in Verbindung mit dem untersuchten AFE für eine Infrastruktur-zu-Infrastruktur-Kommunikation (I2I) genutzt werden können. Diese Arbeit verknüpft die elektronischen und optischen Aspekte. So erlaubt es das Framework, die Entwicklung der Datenrate über dem FOV darzustellen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das nachfolgende Kapitel 2 legt den Stand der Technik dar. Hierbei wird die OWC zunächst kategorisiert. Im Anschluss werden Anwendungen betrachtet und ein Überblick über die Standardisierung und Forschung gegeben. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den physikalischen und technologischen Grundlagen der OWC. Kapitel 4 befasst sich anschließend mit einer detaillierten Untersuchung des AFE. Diese Betrachtungen sind zunächst allgemein gehalten und werden danach auf konkrete Entwurfsbeispiele bezogen. Die Schaltungsbeispiele werden anschließend messtechnisch untersucht und die Ergebnisse entsprechend diskutiert. Im Kapitel 5 wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Framework zum Entwurf von Freiformlinsen beschrieben. Es werden verschiedene Entwurfsbeispiele für Transmitter- und Receiverlinsen betrachtet, um das Potential von Freiformlinsen für die OWC zu evaluieren. Im Anwendungskapitel 6 wird die Funktionalität des untersuchten AFE in realer Umgebung nachgewiesen. Hierzu wird das AFE in ein konventionelles Ethernetnetzwerk eingegliedert und so mobile Kommunikation sowie Ortung in Innenräumen demonstriert. In einem weiteren Anwendungsbeispiel wird der entwickelte Transceiver mit Freiform-Fresnellinsen kombiniert, um I2I zu ermöglichen. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst und ein Ausblick in die Zukunft der OWC gegeben.