

Lukas Lorenz
Aufbau- und Verbindungstechnik für die optische
Datenübertragung in der Gerätekommunikation

DRESDNER BEITRÄGE
ZUR AUFBAU- UND VERBINDUNGS
TECHNIK DER ELEKTRONIK

Herausgegeben von
Karlheinz Bock
Klaus-Jürgen Wolter
Thomas Zerna

Band 9

Lukas Lorenz

**Aufbau- und Verbindungstechnik für
die optische Datenübertragung in der
Gerätekommunikation**

TUD*press*

2024

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Aufbau- und Verbindungstechnik für die optische Datenübertragung in der Gerätekommunikation“ am 09.06.2022 als Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden eingereicht und am 16.06.2023 verteidigt.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Georg Mayr
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Karlheinz Bock
Prof. Dr.-Ing. Hubert Lakner (Fraunhofer IPMS)
Prof. Dr.-rer. nat. et Ing. habil. Ulrich Fischer

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

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

ISBN 978-3-95908-643-1

© TUDPress
Thelem Universitätsverlag und
Buchhandel GmbH & Co. KG
Dresden und München
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem.
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor.
Printed in Germany.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Aufbau- und Verbindungstechnik für die optische Datenübertragung in der Gerätekommunikation

Dr.-Ing. Lukas Lorenz

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur habilitatus
(Dr.-Ing. habil.)

genehmigte Habilitation

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Georg Mayr (TU Dresden)

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Karlheinz Bock (TU Dresden)

Prof. Dr.-Ing. Hubert Lakner (Fraunhofer IPMS)

Prof. Dr.-rer. nat. et Ing. habil. Ulrich Fischer (Hochschule Harz)

Tag der Einreichung:	09.06.2022
Tag des Vortrags und Kolloquiums:	16.06.2023
Tag der Probevorlesung:	16.06.2023

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Verzeichnis der genutzten Formelzeichen.....	V
Verzeichnis der enthaltenen eigenen Veröffentlichungen	VII
1 Optische Datenübertragung in der Gerätekommunikation	1
1.1 Einführung in die optische Datenübertragung	1
1.2 Definition der Herausforderungen im Kontext der Gerätekommunikation	4
1.2.1 Klassifikation der Kommunikations- und Verdrahtungsebenen	4
1.2.2 Nutzung optischer Übertragungstechnologien in den Kommunikations- und Verdrahtungsebenen im Überblick.....	6
1.2.3 Definition der Gerätekommunikation und Herausforderungen für die AVT.....	9
1.3 Aufbau und Ziele der Arbeit	12
2 Ausgewählte Grundlagen für die optische Datenübertragung.....	15
2.1 Grundlagen der Lichtausbreitung.....	15
2.1.1 Grundlegende Gesetze.....	15
2.1.2 Lichtausbreitung im Wellenleiter	18
2.1.3 Unterscheidung zwischen Single- und Multimode	20
2.1.4 Dispersion im Wellenleiter	22
2.1.5 Kenngrößen für die Signalübertragung in der Gerätekommunikation	26
2.2 Optische Übertragungsstrecke.....	30
2.2.1 Allgemeiner Aufbau.....	30
2.2.2 Sende- und Empfangselemente	33
2.2.3 Modulation	37
3 Entwurf und Simulation dreidimensionaler Multimode Wellenleiter	41
3.1 Entwurf dreidimensionaler Wellenleiternetzwerke.....	41
3.2 Effiziente Simulation dreidimensionaler Multimode Wellenleiter	47
3.2.1 Anforderungen an die Simulation	47
3.2.2 Simulationsmethoden für Multimode Wellenleiter	48

3.2.3	Zweistufige Simulation für dreidimensionale Multimode Wellenleiter	54
3.3	Abschätzung der Funktionsparameter für 3D-Opto-MID	71
4	Wellenleiterfertigung auf dreidimensionalen Oberflächen	73
4.1	Stand der Technik für die Wellenleiterherstellung	73
4.1.1	Klassifizierung optischer Wellenleiter	73
4.1.2	Herstellungsverfahren für planare Wellenleiter	75
4.2	Fotolithografische Herstellung auf flexiblen Substraten	82
4.3	Aerosol Jet Druck	100
5	Koppelprinzip für die unterbrechungsfreie Buskopplung von optischen Multimode Wellenleitern	120
5.1	Überblick zur Wellenleiterkopplung	120
5.2	Kopplung von Multimodewellenleitern für Kurzstreckenverbindungen 126	
5.2.1	Anforderungen an die Kopplung für optische Bussysteme....	126
5.2.2	Stand der Technik	128
5.3	Theoretische Grundlage der asymmetrischen unterbrechungsfreien Wellenleiterkopplung	130
5.4	Performance asymmetrischer optischer Buskoppler	154
5.5	Lanzzeitstabilität asymmetrischer optischer Buskoppler	172
6	3D-MID unter Berücksichtigung der Besonderheiten optischer Verbindungen	185
6.1	Anforderungen für die Erweiterung von 3D-MID um optische Funktionalität.....	185
6.2	Stand der Technik im Bereich 3D-MID im Hinblick auf optische Funktionalität.....	187
6.3	Konzept für einen 3D-Opto-MID Aufbau	191
6.4	Performance und Langzeitstabilität von Mixed-Material 3D-Opto-MID 207	
7	Zusammenfassung und Ausblick	228
8	Literaturverzeichnis.....	249

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BPM	Beam Propagation Method
CAD	Rechnergestützter Entwurf (engl. computer aided design)
CAM	Rechnergestützte Fertigung (engl. computer aided manufacturing)
CDM	Codemultiplexing (engl. Code Division Multiplexing)
cw-Laser	Dauerstrich-Laser (engl. continuous wave)
e/o	elektro-optisch
ECAD	Elektronischer, rechnergestützter Entwurf
EME	Eigenmode Expansion Method
EOPCB	Elektro-optische Leiterplatte
FC	Flip-Chip
FDTD	Finite Difference Time Domain Method
FEM	Finite-Elemente-Methode
I/O	Datenein-/ausgang (Input/Output)
IoT	Internet der Dinge (engl. internet of things)
IT	Informationstechnik
LED	Leuchtdiode (engl. Light Emitting Diode)
LWL	Lichtwellenleiter
MCAD	Mechanischer, rechnergestützter Entwurf
o/e	opto-elektrisch
ODS	Optisches Entwurfssystem (engl. optical design system)
PCB	Leiterplatte (engl. printed circuit board)
PDM	Polarisationsmultiplexing (engl. Polarization Division Multiplexing)
RCWA	Rigorous Coupled Wave Analysis
Rx	Empfänger (Receiver)
SDM	Raummultiplexing (engl. Space Division Multiplexing)
TAB	Tape-Automated Bonding
TDM	Zeitmultiplexing (engl. Time Division Multiplexing)
TOV	Thru-oxide via (Durchkontaktierung durch Oxidmaterial)
Tx	Sender (Transmitter)
WDM	Wellenlängenmultiplexing (engl. Wavelength Division Multiplexing)

Verzeichnis der genutzten Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
\vec{E}	-	Elektrisches Feld
\vec{H}	-	Magnetisches Feld
\vec{k}	-	Wellenvektor
\vec{r}	-	Vektor im kartesischen Koordinatensystem
η_c	-	Koppeffizienz
μ_0	H/m	Vakuumpermeabilität oder magnetische Feldkonstante
a	dB	Logarithmische Dämpfung eines Systems
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c_M, c	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Medium
D	-	Dämpfung eines Systems
d_{kern}	μm	Kerndurchmesser eines Wellenleiters
E	eV	Energie
E_g	eV	Bandlücke
f_s	Hz	Abtastfrequenz
\hbar	Js	Plancksches Wirkungsquantum
I_0	mA	Strom im Arbeitspunkt des Lasers (engl. bias current)
i_{HF}	mA	Veränderlicher Strom des HF-Signals
I_L	mA	Elektrischer Strom am Laser
I_P	mA	Fotostrom an der Fotodiode
I_{th}	mA	Schwellstrom für den Laser (engl. threshold current)
l_w	cm	Länge eines Wellenleiters
N	-	Anzahl möglicher Moden im Wellenleiter
N_0	-	Anzahl übertragener Bits
$n_{1,2}$	-	Brechungsindex eines Mediums 1 und 2
NA	-	Numerische Apertur
n_{err}	-	Anzahl fehlerhaft detektierter Bits
n_K	-	Brechungsindex des Wellenleiterkerns
n_L	-	Brechungsindex von Luft
n_M	-	Brechungsindex des Wellenleitermantels
P_{in}	mW	Eingangsleistung
P_{opt}	mW	Optische Leistung
P_{out}	mW	Ausgangsleistung
Q	-	Q-Faktor eines Augendiagramms
r	mm	Radius
t	s	Zeit
$t_{11...NN}$	-	Elemente der Transmissionsmatrix

VI

u	-	Wellenfeld
$u_{1...N}$	-	Elemente des Ausgangswellenfeldes
U	V	Signalspannung
ν	1/s	Frequenz
$\nu_{1...N}$	-	Elemente des Eingangswellenfeldes
V	-	normierte Frequenz eines Lichtwellenleiters
x,y,z	-	Kartesische Koordinaten
ϵ_0	F/m	Vakuumpermittivität oder elektrische Feldkonstante
θ_a	-	Ausfallswinkel des Lichtes
θ_c	-	Grenzwinkel der Totalreflexion
θ_e	-	Einfallswinkel des Lichtes
θ_{\max}	-	Maximaler Akzeptanzwinkel des Wellenleiters
λ	nm	Wellenlänge des Lichtes

Verzeichnis der enthaltenen eigenen Veröffentlichungen

Titel	Quelle	Jahr	Seite
Two-Stage Simulation for Coupling Schemes in the Device Communication using Ray Tracing and Beam Propagation Method	IEEE Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)	2018	55
Analysis of bending effects for optical-bus-couplers	IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)	2016	85
Aerosol Jet Printed Optical Waveguides for Short Range Communication	IEEE Journal of Lightwave Technology Vol. 38 no. 13	2020	101
Optical beam propagation and ray tracing simulation of interruption-free asymmetric multimode bus-couplers	IMAPS Journal of Microelectronics and Electronic Packaging Vol. 14 no. 1	2017	132
Asymmetric optical bus coupler for interruption-free short range connections on board and module level	IEEE Journal of Lightwave Technology Vol.35 no. 18	2017	155
Influence of Temperature Cycling on Asymmetric Optical Bus Couplers	IEEE Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)	2020	173
3D-Opto-MID for Asymmetric Optical Bus Couplers	IEEE Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)	2020	192
Reliability of 3D-Opto-MID Packages for Asymmetric Optical Bus Couplers	IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC)	2021	208
Multimode Bus Coupler for Device Communication Integrated in 3D-Opto-MID	IMAPS Journal of Microelectronics and Electronic Packaging Vol. 18 no. 2	2021	231

1 Optische Datenübertragung in der Gerätekommunikation

1.1 Einführung in die optische Datenübertragung

Die Geschichte der optischen Datenübertragung lässt sich bereits sehr weit zurückverfolgen [42,122]. Bereits im Altertum wurden optische Signale zur Kommunikation verwendet. Vor allem für militärische Zwecke wurde mittels Feuerzeichen über sehr weite Strecken kommuniziert. Im alten Griechenland wurde bereits eine digitale Codierung verwendet, bei der mithilfe mehrerer Fackeln Buchstaben übertragen werden konnten, was allerdings nur nachts zuverlässig funktionierte. Jahrhunderte später erlangte die optische Datenübertragung erstmals flächendeckende Bedeutung, als mithilfe optischer Flügeltelegrafien nach Claude Chappe 1794 eine erste dauerhafte Übertragungsstrecke zwischen Paris und Lille etabliert wurde. Weitere folgten bald und auch in anderen Ländern etablierte sich diese Form der Kommunikation. Dabei wurde über weite Landstriche eine Kette aus Türmen gebildet, auf deren Spitze große Schwenkarme angebracht waren. Damit ließen sich Buchstaben codieren und Nachrichten übermitteln. Der größte Nachteil war dabei, die Wetteranfälligkeit und die fehlende Abhörsicherheit [180]. Ab dem 19. Jahrhundert wurde auch in der Schifffahrt ein einheitliches Flaggenalphabet eingeführt, welches bis heute genutzt wird und ebenfalls eine Form der optischen Datenübertragung ist [113].

Mit der Verbreitung der elektrischen Telegrafie und der Übertragung über Kupferkabel und elektromagnetische Wellen, verlor die optische Kommunikation zunächst wieder an Bedeutung. Erst die Entwicklung des Lasers ermöglichte die Einführung der modernen optischen Datenübertragung. Manfred Börner schlug 1965 die erste Datenübertragungsstrecke mit dem bis heute genutzten Schema Laser-Wellenleiter-Fotodiode vor. Ab den 1970er Jahren konnte sich die Glasfaser als Langstreckenverbindung etablieren. Möglich wurde dies durch eine signifikante Reduzierung der Verluste innerhalb der Fasern auf 4 dB/km im Jahre 1972

sowie die Einführung von GaAs Lasern, welche bei Raumtemperatur zuverlässig funktionierten [144,122].

Nachdem die Langstreckenübertragung über Glasfaserkabel lange die einzige Domäne war, in der die optische Übertragung genutzt wurde, kommen in den letzten Jahren zunehmend mehr Bereiche hinzu. Notwendig wird dies durch das exponentielle Wachstum der weltweit generierten Daten und den damit einhergehenden Bedarf an schneller Datenübertragung auf verschiedensten Ebenen [133,64,125]. Treiber dieser Entwicklung sind wachsende Nutzerzahlen datenintensiver Musik- und Videostreams, aber auch die zunehmende Vernetzung im Internet der Dinge, der Industrie 4.0 und insbesondere im autonomen Fahren. Dabei ist es nicht möglich, dem Wachsen der Datenmengen ohne die Nutzung neuer Technologien zu begegnen [171,96].

Die optische Datenübertragung rückt dabei zunehmend in den Fokus. Im Vergleich zu klassischen elektrischen Leitungen aus Kupfer bietet die Photonik zahlreiche Vorteile. Insbesondere bei hohen Übertragungsraten, wie sie zunehmend benötigt werden, bieten optische Verbindungen eine deutlich bessere Energieeffizienz, d.h. notwendige Leistung pro übertragenem Bit (mW/Gbit/s), als elektrische Verbindungen [171,167,96,88]. Im Vergleich zu Kupferleitungen gibt es in der Photonik keine Aufladungen und somit keine parasitären Kapazitäten, welche die Energieeffizienz negativ beeinflussen. Bei Verbindungen mit Geschwindigkeiten höher als 20 Gbit/s kommen diese Aspekte zunehmend zum Tragen, da elektrische Übertragungen bei diesen Übertragungsraten hohe Verstärkungsraten und daher hohe Energiebudgets benötigen [167]. Darüber hinaus müssen bei hohen Übertragungsraten klassische elektrische Leiterzüge impedanzangepasst sein, optische dagegen nicht, was offenere Architekturen ermöglicht [171]. Ebenso bei der Bandbreitendichte ist die Photonik gegenüber der klassischen Elektronik im Vorteil, d.h. die Fläche in Steckverbindern oder auf Verdrahtungsträgern, die zur Übertragung hoher Bandbreiten notwendig ist (Gbit/s/mm²), ist für optische Verbindungen deutlich geringer. Hauptgrund dafür ist, dass mittels Multiplexing ein einzelner Lichtwellenleiter für zahlreiche I/O-Kanäle gleichzeitig genutzt werden kann [71,33]. Weiterhin sind optische Verbindungen unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen, da sie aus nichtleitendem Material bestehen [144,138]. Diese galvanische Trennung kann sich insbesondere in Hochspannungsumgebungen zunutze gemacht werden. Zudem sorgt der Verzicht auf Metall (insbesondere Kupfer) für ein deutlich geringeres Gewicht der Übertragungsleitungen.

Den Vorteilen gegenüber steht der Nachteil der notwendigen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), welche im Vergleich zu elektrischen Verbindungen deutlich aufwändiger ausfällt. Insbesondere die Kopplung zwischen einzelnen Komponenten des optischen Pfades bedarf großer Präzision und ist darüber hinaus anfällig gegenüber Störeinflüssen, Temperaturschwankungen und Alterungserscheinungen [144]. Aufgrund dieses Nachteils konnte sich die Photonik bisher nicht flächendeckend gegen ihre elektrischen Pendanten durchsetzen, sondern nur in vereinzelt Bereichen. Letztere werden im nachfolgenden Unterkapitel genauer betrachtet.

Weiterhin gestaltet sich die Energieübertragung über optische Wellenleiter oft sehr schwierig. Während in der elektrischen Domäne Übertragungs- und Energieversorgungsleitungen einfach nebeneinander integriert werden können, sind für die Energieübertragung in der optischen Domäne aufwändige Konzepte notwendig. Bereits in den 1970er Jahren wurde erstmals die Energieübertragung über optische Fasern (Power over Fiber) demonstriert [26]. Über die Jahre konnte sich die optische Energieübertragung dann in etlichen Anwendungsfeldern etablieren, wie z.B. in Antennen- oder Sensorsystemen [138]. Dabei sind Leistungsübertragungen im dreistelligen Wattbereich möglich [166]. Dennoch ist vor allem die elektro-optische (e/o) und opto-elektrische (o/e) Wandlung mit hohen Leistungen herausfordernd. Dafür müssen dann Laser mit hohen Ausgangsleistungen und Solarzellen mit hoher Effizienz integriert werden [154]. Tabelle 1-1 fasst die Vor- und Nachteile der optischen Datenübertragung noch einmal zusammen.

Tabelle 1-1: Übersicht der Vor- und Nachteile optischer Datenübertragung

Vorteile	Nachteile
Hohe Energieeffizienz bei hohen Übertragungsraten (mW/Gbit/s)	Aufwändige AVT notwendig
Hohe Bandbreitendichte (Gbit/s/mm ²)	Anfälligkeit gegenüber Alterung und Temperaturschwankungen
EMV-resistent	Energieübertragung über optische Wellenleiter sehr aufwändig
Geringes Gewicht	

1.2 Definition der Herausforderungen im Kontext der Gerätekommunikation

1.2.1 Klassifikation der Kommunikations- und Verdrahtungsebenen

Die klassische AVT (engl. electronic packaging) lässt sich in vier Ebenen aufteilen, wie sie in Abbildung 2-14 dargestellt sind [93,117,175]. Ebene 0 oder **Chip-Level** beinhaltet die integrierten Funktionen des Halbleiterchips als ungehäustes Bauelement oder Nacktchip (engl. bare die). Diese Chips erhalten in Ebene 1 oder **Modulebene oder Module-Level** einen ersten Aufbau in Form eines Gehäuses oder einer Umverdrahtungsebene. Beispiele dafür sind klassische Lead Frames, Tape-Automated Bonding (TAB), Flip-Chip (FC) Packages oder mit zunehmender Miniaturisierung Chip-Size/Chip-Scale Packages [44,131,54]. Dies kann einen einzelnen Chip betreffen oder es werden mehrere Chips in einem Gehäuse oder auf einem Interposer als Multi-Chip-Modul (MCM) bzw. Chiplet integriert [27]. Diese Module werden anschließend auf der 2. Ebene – der **Leiterplattenebene oder Board-Level** – zusammengeführt. Dabei erfolgt die Verbindung und Integration mehrerer Module auf einem Verdrahtungsträger. Das können Leiterplatten, Keramiksubstrate oder Folien sein [54]. Schließlich folgt die 3. Ebene die **Rückwandplatinenebene oder Backplane-Level**. Hier werden über ein Motherboard oder eine Freiverdrahtung die einzelnen Leiterplatten untereinander verbunden.

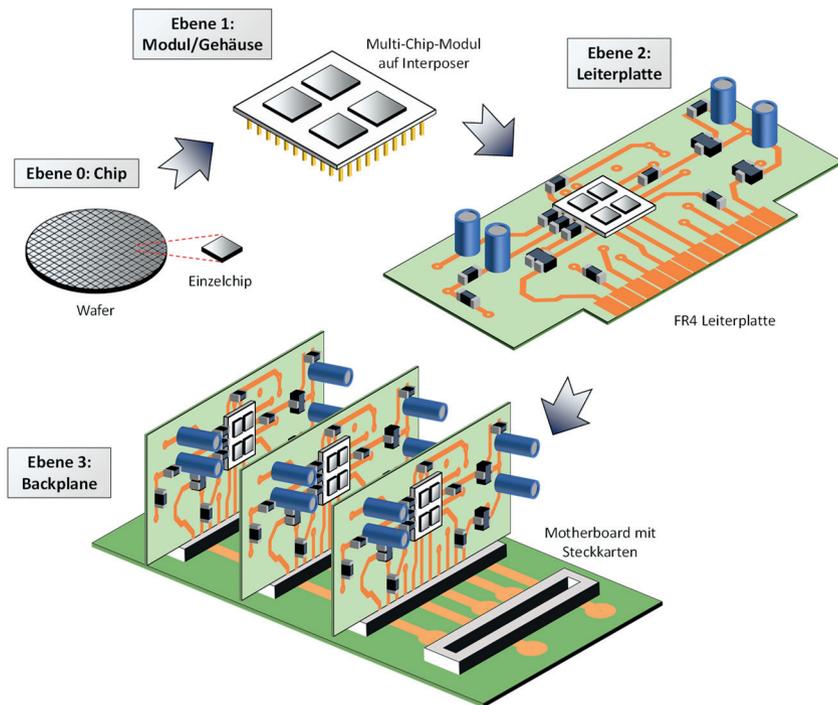


Abbildung 1-1: Klassische Ebenen der AVT (Packaging Levels)

Übergeordnet lässt sich die Kommunikation mittels elektrischer und optischer Signale wiederum in drei wesentliche Bereiche unterteilen, wie sie in Abbildung 1-2 zusammengefasst sind [169]. Die **Telekommunikation** (Telecom) umfasst die Langstreckenübertragung im Kilometerbereich zwischen großen Netzknoten und bildet das Rückgrat der modernen Kommunikation über weite Strecken. Die nächste Domäne ist die **Datenkommunikation** (Datacom), womit im Wesentlichen die Übertragung von Daten über Strecken bis 100 m in Firmen- und Heimnetzen gemeint ist. Relativ neu ist die Definition des letzten Bereichs, der **Rechnerkommunikation** (Computercom), welche vor allem die Verdrahtungsebenen der AVT enthält.

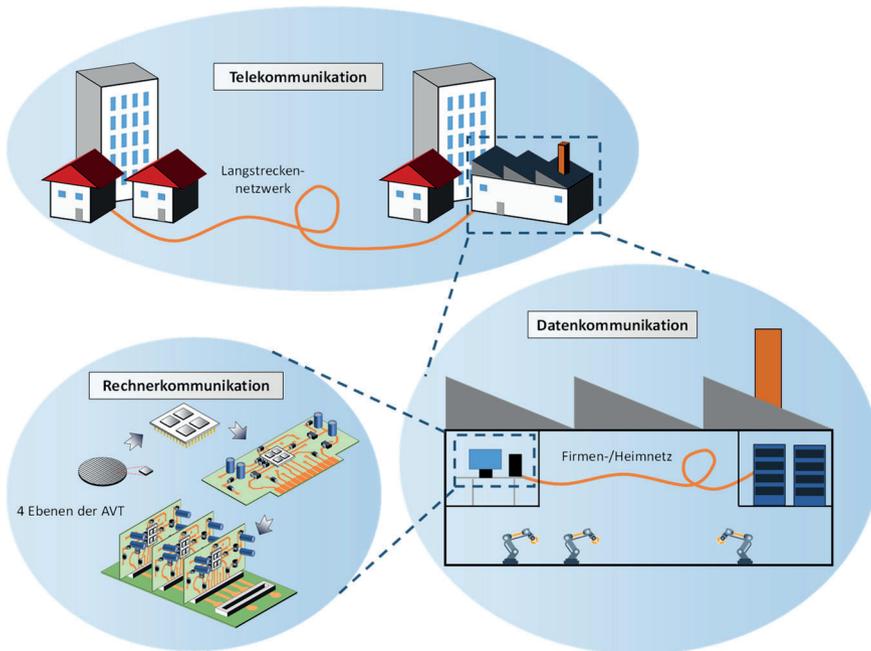


Abbildung 1-2: Klassifikation der übergeordneten Ebenen in der Kommunikation

1.2.2 Nutzung optischer Übertragungstechnologien in den Kommunikations- und Verdrahtungsebenen im Überblick

In den eben dargestellten Übertragungsdomänen und AVT-Ebenen wurden in den vergangenen Jahren das Potential und die Vorteile der Photonik bereits erkannt. Für Langstreckenübertragungen ist die optische Übertragung nicht mehr wegzudenken [96]. Die Übertragung über Glasfasern wird spätestens seit den 1980er Jahren großflächig angewendet und erfolgt über Singlemode Glasfasern. Diese bieten die geringsten Dämpfungen aller Faserntypen (0,x dB/km-Bereich) und haben hohe Lebensdauern von über 20 Jahren [122]. Genutzt werden üblicherweise die beiden Wellenlängenfenster um $\lambda = 1300 \text{ nm}$ und $\lambda = 1550 \text{ nm}$, da dort die Dämpfung in den Glasfasern am geringsten ausfällt [63].

Die Übertragung der Vorteile in die Domäne der Datenkommunikation ist die logische Konsequenz der vorangegangenen Entwicklung. So werden seit den 1990er Jahren Lichtwellenleiterfasern auch für die Gebäudeverdrahtung auf kürzeren Strecken bis ca. 100 m genutzt. Aufgrund geringerer Anforderungen an die

Dämpfung und Lebensdauer kommen hier häufig Multimode Fasern zum Einsatz, welche aufgrund größerer Durchmesser die Ausrichtung der einzelnen Komponenten zueinander erheblich vereinfachen und so Kosten sparen [127]. Als Wellenlänge wird meist $\lambda = 850 \text{ nm}$ eingesetzt, da für diese Wellenlänge kostengünstige Wandlerbauelemente (Laser/Fotodiode) in großer Stückzahl zur Verfügung stehen [127,63]. Rack-to-Rack Verbindungen in Datacenter nutzen ebenfalls bereits optische Fasern [171].

Im Bereich der Rechnerkommunikation wird die Einbindung optischer Übertragungswege vor allem durch Datacenter und Hochleistungsrechner getrieben [171]. Für die Backplane-Ebene werden je nach Anwendung verschiedenste Übertragungs- und Koppelstrategien verwendet [18]. Karte-zu-Karte Verbindungen über Faserbündeln oder auch Einzelfasern sind dabei die verbreitetste Variante [24,40]. Auch eine Nutzung elektro-optischer Leiterplatten (EOPCB) als Motherboard mit entsprechenden Steckplätzen für Tochterkarten werden genutzt, wie es in Abbildung 1-3 dargestellt ist [10,75,70]. Andere Konzepte setzen dagegen auf eine Freistrahübertragung zwischen den einzelnen Teilnehmern im Rückraum des Racks [106] oder innerhalb eines lichtleitenden Layers der Backplane [189].

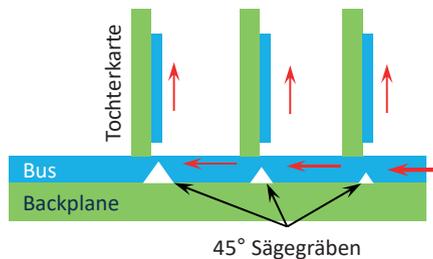


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung einer e/o Backplane mit Tochterkarten [101]

Die Entwicklung optischer Übertragung auf der Leiterplatte konnte in den letzten Jahren ebenfalls deutliche Erfolge vorweisen, welche durch immer höhere Datenraten auf dem Board-Level getrieben werden. Weit verbreitet ist dabei die Nutzung von dünnen Glaslagen in klassischen Leiterplattenverbänden, wie es in Abbildung 1-4 dargestellt ist. Dort werden mittels Ionenaustausch sowohl Multimode [20] als auch Singlemode [149] Wellenleiter eingebracht. Neben

Glas werden auch Polymerlagen im Leiterplattenverbund genutzt, in denen die Wellenleiter mittels Fotolithografie strukturiert werden [104,18,72].

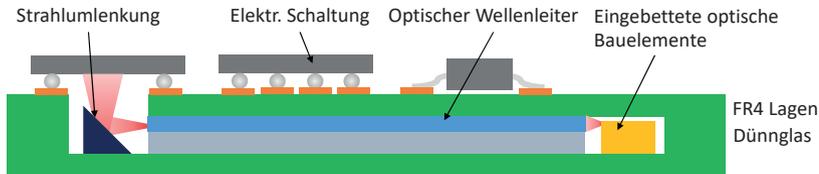


Abbildung 1-4: Schematische Darstellung einer elektro-optischen Leiterplatte (EOPCB) mit Glaslage im FR4-Verbund

Im Bereich der Chip-zu-Chip Verbindungen auf Modul-Level konnten erst in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt werden. Mit optischen Verbindungen soll der Flaschenhals in der Kommunikation zwischen Recheneinheiten untereinander und mit dem Speicher überwunden werden [4]. Dabei stellt vor allem die Kopplung der im Chip integrierten Wellenleiter zu Wellenleitern auf dem Interposer eine große Herausforderung dar. In einem Lösungsansatz ist es Krishna et al. gelungen Verbindungen von photonischen Chips mit klassischen CMOS Chips auf einer wafer-scale Plattform als heterogene Integration mittels Waferbonding und thru-oxide vias (TOV) herzustellen, um nur ein Beispiel zu nennen [151].

Etwas länger als auf Modul-Ebene existieren Lösungen für Wellenleiter auf dem Chip. Neben zahlreichen anderen Anwendungen ist vor allem die Verbindung einzelner Cores auf dem Chip von Interesse, um so die Rechenleistung über parallele Nutzung zu erhöhen [171]. Dies kann beispielsweise über integrierte Wellenleiter-Verbindungen auf dem Wafer realisiert werden [163]. Diese Wellenleiter sind meist in Silizium, Siliziumoxid oder Siliziumnitrid hergestellt, weshalb man auf Chip-Ebene meist allgemein von Silicon-Photonics spricht [140,129,97]. Diese photonischen On-Chip Netzwerke sind bereits zahlreich demonstriert, sowohl in Bezug auf die Architektur [92,50] als auch auf die Wellenleiter selbst [36,164,162]. Die größte Herausforderung stellt aktuell die Integration von Laserquellen dar, welche nicht direkt im Siliziumchip integriert werden können, da Silizium eine indirekte Bandlücke besitzt. Dazu werden aktuell meist System-in-Package Lösungen mit Laser und photonischem Chip genutzt [168].

Dieser kurze und bei weitem nicht vollumfängliche Überblick soll deutlich machen, dass die Vorteile und Potenziale der optischen Datenübertragung bereits

alle Domänen der Kommunikation durchdrungen haben. Abbildung 1-5 fasst diesen Sachverhalt noch einmal zusammen.

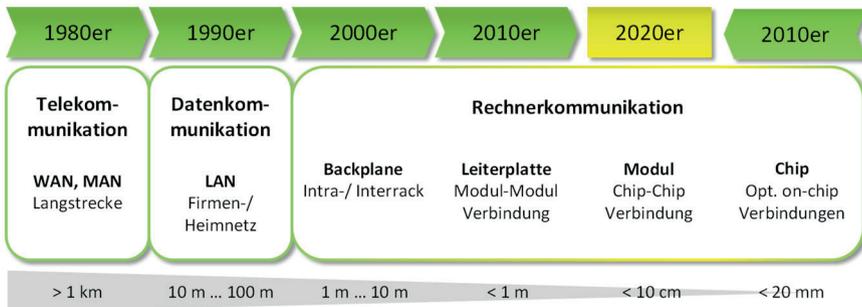


Abbildung 1-5: Erschließung der einzelnen Kommunikationsdomänen und AVT-Ebenen mit optischen Übertragungstechnologien (adaptiert [101])

1.2.3 Definition der Gerätekommunikation und Herausforderungen für die AVT

Der Überblick im vorangegangenen Abschnitt macht deutlich, dass die bisherigen photonischen Lösungsansätze jeweils für die einzelnen Ebenen entwickelt wurden und diese sich ausschließlich auf die klassischen IT-Anwendungen beziehen, d.h. Server, Leiterplatten, Datenkommunikation zwischen Rechnern, etc. Diese streng hierarchische Unterteilung wird den modernen Anforderungen an die Datenkommunikation allerdings nicht mehr gerecht. Die Übertragung von Daten wird zunehmend auch in anderen Bereichen relevant. Dies zeigt sich unter anderem an Trends wie dem Internet der Dinge (IoT), Industrie 4.0 oder dem autonomen Fahren. Dabei werden Dinge, Geräte und Objekte, die traditionell keine Anbindung an ein Netzwerk haben, untereinander und/oder zum Internet verbunden, um in einer Weise zu kommunizieren, die für den Menschen vorteilhaft genutzt werden kann [153]. Beispielsweise Roboterarme, welche mit Sensoren für die Mensch-Maschine-Interaktion ausgerüstet sind, müssen untereinander und ggf. mit dem Rest der Fertigungslinie kommunizieren. Ebenso spielt die Kommunikation zwischen Sensoren und Aktoren beim autonomen Fahren eine entscheidende Rolle. Diese beiden Beispiele haben gemeinsam, dass sie keine genaue Zuordnung in die klassischen Domänen der Datenübertragung oder die Ebenen der AVT erlauben. Dieser neue Bedarf hat es notwendig gemacht, dass im

Rahmen vorangegangener Arbeiten der Begriff der *Gerätekommunikation* eingeführt wurde, wie es in Abbildung 1-6 dargestellt ist [101].

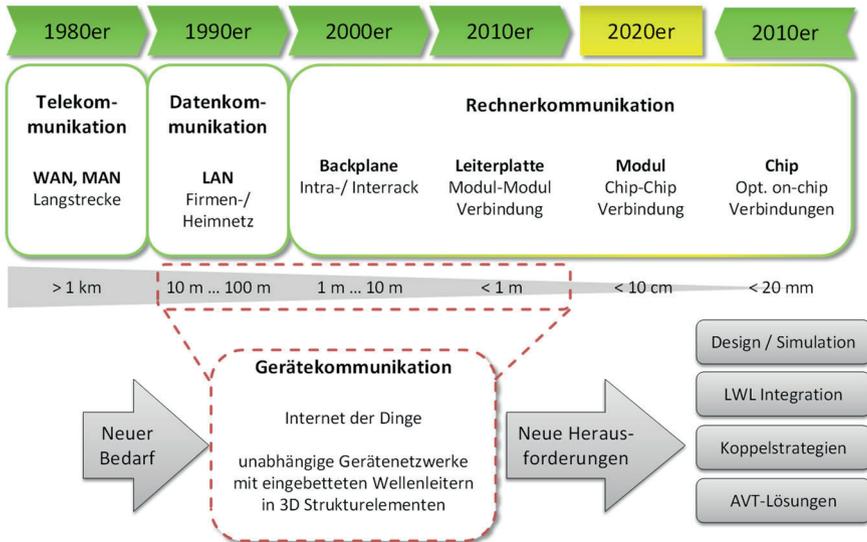


Abbildung 1-6: Erweiterung der Kommunikations- und AVT-Ebenen um das neue Feld der Gerätekommunikation

Die Gerätekommunikation (engl. device communication) erweitert das Spektrum um unabhängige Gerätenetzwerke mit eingebetteten Wellenleitern in 3D Strukturelementen. Das beinhaltet Anwendungen außerhalb der klassischen IT-Infrastruktur. Es werden also nicht – vereinfacht ausgedrückt – kleine Rechner auf den Geräten angebracht und frei verkabelt. Vielmehr sind die Sensoren, Aktoren, Recheneinheiten, etc. im Gerät verteilt, integriert und zum Teil eingebettet. Die Verbindung erfolgt dabei über ebenfalls im Gerät eingebettete Netzwerke, sodass keine klassischen Verdrahtungsträger (z.B. PCBs) mehr zum Einsatz kommen. Davon muss man die, im Bereich des Mobilfunks beheimatete, device-to-device communication abgrenzen. Diese befasst sich mit der drahtlosen Datenübertragung zwischen zwei Mobilfunkteilnehmern ohne den Zwischenweg über die Basisstation [178,39].

In Abbildung 1-7 ist ein Beispiel für eine Anwendung in der Gerätekommunikation dargestellt. Beim autonomen Fahren nehmen unzählige Sensoren und Kameras Unmengen an Daten auf, welche in Echtzeit übertragen und verarbeitet werden müssen [176]. Dabei stellen die Strukturbauteile des Fahrzeuges selbst den dreidimensionalen Verdrahtungsträger dar. In diesem speziellen Beispiel ist der Einsatz optischer Datenübertragung in vielerlei Hinsicht zu bevorzugen. Zum einen können durch die galvanische Trennung Sensoren in der Akkuumgebung ohne Probleme angeschlossen werden. Weiterhin ermöglicht die Nutzung optischer Wellenleiter Netzwerke mit geringem Gewicht, welche über Bussysteme zudem platzsparend sind. Zuletzt können die notwendigen Datenübertragungsraten für Echtzeitanwendungen ohne Schwierigkeiten erreicht werden, bei gleichzeitig geringem Energiebedarf.

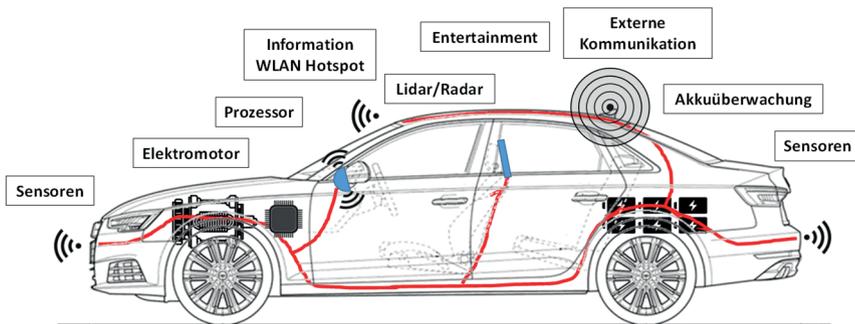


Abbildung 1-7: Beispiel für eine Anwendung in der Gerätekommunikation: Optisches Bussystem als Rückgrat der Kommunikation in einem Elektrofahrzeug

In dieser neuen Ebene kann noch nicht auf breite und etablierte Lösungen zurückgegriffen werden. Getrieben durch den neuen Bedarf, wird die AVT vor enorme Herausforderungen gestellt, insbesondere wenn die Gerätekommunikation mit der Photonik erschlossen werden soll. Es zeigen sich dabei vier zentrale Herausforderungen, wie sie auch in Abbildung 1-6 zusammengefasst werden.

Zu allererst hemmen die fehlenden oder noch sehr rudimentären **Design- und Simulationsumgebungen** für optische Multimode Wellenleiternetzwerke auf dreidimensionalen Oberflächen die Entwicklung. Bisherige Entwicklungsumgebungen vereinen kaum elektrische und optische Übertragungswege.

Nach erfolgreicher Modellierung der Wellenleiternetzwerke müssen geeignete **Fertigungsverfahren** für Wellenleiter gefunden werden. Dabei gilt es, sich

von der Verbindung über klassische Fasern abzugrenzen und auf integrierte, planare Wellenleiter auf 3D-Oberflächen zu setzen. Hierbei sind vor allem Multimode Wellenleiter von Bedeutung, da sich diese mit größeren Toleranzen koppeln und verarbeiten lassen als Singlemode Wellenleiter.

Die Vielzahl an zu verbindenden Geräten oder Modulen (Sensoren, Aktoren, Recheneinheiten, etc.) können nicht alle über Punkt-zu-Punkt Verbindungen kommunizieren. Dies würde zu komplizierten, schweren und platzintensiven Kabelbäumen führen. Hier sind Lösungen für optische Bussysteme gefragt, welche wiederum neue, unterbrechungsfreie **Koppelmechaniken** erfordern.

Zuletzt gilt es, neue **AVT-Technologien** für dreidimensionale opto-mechatronische Geräte (3D-Opto-MID) zu entwickeln. Obwohl Design, Fertigung und Kopplung der Wellenleiter ebenfalls zu den Herausforderungen der AVT zählen, sind für die gesamtheitliche Gestaltung der 3D-Opto-MID Baugruppen weitere technologische Problemstellungen zu lösen, die als gesonderter Punkt betrachtet werden.

1.3 Aufbau und Ziele der Arbeit

Die Photonik hat großes Potential in verschiedensten Anwendungsgebieten. Für die aufkommenden Herausforderungen in der Gerätekommunikation sind dafür allerdings nur wenige Lösungen verfügbar. Dieser Stand der Technik wird in den, das jeweilige Teilgebiet betreffenden, Kapiteln genauer beleuchtet. Allen voran die AVT steht hier im Fokus, um die Photonik auch im neuen Feld der Gerätekommunikation zu etablieren. Während die Erfindung des Lasers und die Reduzierung der Faserdämpfung für die Photonik den Durchbruch in der Telekommunikation bedeutete, kann nun die Weiterentwicklung der AVT für den Durchbruch in der Gerätekommunikation sorgen. Dazu soll in dieser Arbeit folgende Frage im Mittelpunkt stehen, um anhand dessen das Gebiet der AVT für optische Datenübertragung in der Gerätekommunikation zu diskutieren:

Welche Herausforderungen für die AVT gibt es im Zusammenhang mit der optischen Übertragung in der Gerätekommunikation und welche Lösungsansätze liegen vor?

Mit neuen Packaging-Technologien ist es allein nicht getan. Auch andere Bereiche, wie beispielsweise die Netzwerkarchitektur, Entwicklung geeigneter Bauelemente, angepasste Software, etc. sind notwendig. Des Weiteren gibt es neben

der Photonik auch andere Ansätze zur Datenübertragung auf kurzen Strecken. Allen voran sei hier die drahtlose Übertragung von Daten zu nennen, wie die device-to-device communication im Mobilfunk [77,95] oder auch Funkverbindungen auf Backplane-Level [118], um nur zwei zu nennen. Weiterführende Informationen zur drahtlosen Datenübertragung auch in Verbindung mit photonischen Anwendungen finden sich hier: [114]. In dieser Arbeit soll der Fokus allerdings allein auf der AVT für Photonik liegen, um dieses Gebiet in den Grenzen der Gerätekommunikation zu erfassen. Für das Verständnis dieser Arbeit werden dabei ausgewählte Grundlagen in Kapitel 2 vorgestellt. Grundlegende Kenntnisse in den Bereichen, welche in Tabelle 1-2 zusammengefasst sind, werden allerdings vorausgesetzt.

Tabelle 1-2: Übersicht notwendiger Grundlagen inkl. empfohlener Literatur

Gebiet	Empfohlene Literatur
Grundlagen der Elektrotechnik	[58]
Technische Optik	[146,191,141]
Grundlagen der Aufbau- und Verbindungstechnik	[53,43,174]
Grundlagen des Entwurfs und der Konstruktion	[84]

Nach der Wiederholung ausgewählter, allgemeiner Grundlagen der optischen Datenübertragung, werden in dieser Arbeit vier Schwerpunktthemen, entsprechend den oben beschriebenen Herausforderungen, gesetzt:

- Entwurf und Simulation von dreidimensionalen Wellenleitern
- Herstellungsverfahren für Multimodewellenleiter für die Nutzung in 3D
- Koppelprinzipien für die optische Buskopplung
- 3D-Opto-MID Package Technologien

In den einzelnen Kapiteln werden, wenn notwendig, spezifische Grundlagen vorgestellt und der Stand der Technik auf den jeweiligen Gebieten beleuchtet, um eine Einordnung zu ermöglichen. Dazu kommen Ausführungen zu den aktuellen Entwicklungen bezogen auf die optische Gerätekommunikation. Dies wird auch in Form von eingebundenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen des Autors durchgeführt, welche in englischer Sprache vorliegen. Die Quellenangaben in den hier eingebundenen Veröffentlichungen beziehen sich dann jeweils auf das Referenzenverzeichnis der Veröffentlichung und nicht auf das zentrale Literaturverzeichnis. Ziel der Arbeit ist es, einen Überblick zu den vier Schwerpunktthemen zu geben, welche sich abseits der klassischen Domänen und Verdrahtungsebenen

befinden, wobei die Gerätekommunikation im Mittelpunkt steht. Dadurch soll der Leser in die Lage versetzt werden, die Herausforderungen für die Photonik zu erkennen und darauf aufbauend, eigene Forschungsansätze und Lösungen für die AVT zur optischen Datenübertragung in der Gerätekommunikation zu erarbeiten.