



Stefanie Fasching, BSc

Untersuchung von Optical Wireless Übertragungsverfahren ausgewählter Satellitenmissionen und Simulation relevanter troposphärischer Witterungseinflüsse

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieur
Masterstudium: Elektrotechnik

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Institut für Hochfrequenztechnik

Betreuer: Ao.Univ.-Prof. Dr. Erich Leitgeb

Graz, Dezember 2024

Kurzfassung

Die Nutzung von Optical Wireless Links ermöglicht die Übertragung großer Datenmengen in kurzer Zeit.

In dieser Arbeit wird untersucht welche Übertragungsverfahren eingesetzt werden um einen optischen Link zwischen Erde und Satelliten zu ermöglichen. Hierbei werden Modulationsarten, die verwendete Wellenlänge und Methoden zur Verbesserung der Linkqualität sowie Fehlererkennung vorgestellt. Weiters wird auf Effekte der Atmosphäre, die zur Dämpfung des Signals führen, eingegangen. Zu diesen Effekten gehören Wetterbedingungen wie Nebel, Schnee, Regen und Wolken sowie atmosphärische Turbulenzen.

Die vorgestellten Satellitenmissionen sind in drei Kategorien eingeteilt: Kleinsatelliten (CubeSats), Relais-Systeme und eine Deep-Space Mission.

Im praktischen Teil wurde ein Programm erstellt mit dem man die Verluste die durch die Witterungsbedingungen entstehen simuliert. Dieses Programm besitzt auch eine grafische Benutzeroberfläche die die Eingabe der benötigten Daten ermöglicht. Bei den Simulationsergebnissen werden unterschiedliche Systeme sowie unterschiedliche Wetterbedingungen miteinander verglichen.

Abstract

The use of optical wireless links enables the transmission of large amounts of data in a short amount of time.

This work examines which transfer methods are used to enable an optical link between earth and a satellite. Types of modulation, used wavelength and methods for improving link quality and error detection are presented. The effects of the atmosphere that lead to attenuation of the signal are also discussed. These effects include weather conditions such as fog, snow, rain and clouds and also atmospheric turbulence.

The satellite missions presented are divided into three categories: small satellites (CubeSats), relay systems and a deep space mission.

In the practical part, a program was created to simulate the losses caused by the weather conditions. This program also has a graphical user interface to enter the required data. The simulation results compare different systems and different weather conditions.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Atmosphärische Effekte	4
2.1.1. Wetter	4
2.1.2. Atmosphärische Turbulenzen	6
2.2. Wahl der Wellenlänge	7
2.3. Modulation	9
2.3.1. OOK - On-off keying	9
2.3.2. PPM - Pulse Position Modulation	11
2.3.3. DPIM - Digital Pulse Interval Modulation	13
2.3.4. PSK - Phasenumtastung, Phase Shift Keying	14
2.3.5. Energieeffizienz, Bandbreiteneffizienz	15
2.4. Verbesserungen, Fehlererkennung	17
2.4.1. Physical Layer	17
2.4.2. TCP upper Layer	21
3. FSO-Systeme in bestehenden Satelliten-Missionen	24
3.1. CubeSat	24
3.1.1. CLICK - CubeSat Laser Infrared CrosslinK	25
3.1.2. PIXL-1, Photo Images Cross Laser	26
3.1.3. TBIRD - TeraByte InfraRed Delivery	26
3.1.4. SeRANIS	27
3.2. Daten-Relais-Systeme	28
3.2.1. EDRS - European Data Relay Satellite	28
3.2.2. LCRD - Laser Communications Relay Demonstration .	30
3.2.3. The Kepler Network	30
3.3. DSOC - Deep Space Optical Communications	31
4. Simulation von Wettereinflüssen bei FSO-Links	33
4.1. Dargestellte Parameter	33
4.1.1. Link Margin	33
4.1.2. Sender- und Empfängergerinn	34
4.1.3. Free Space Path Loss	34
4.1.4. Geometrische Verluste - Strahldivergenz	35
4.1.5. Verlust durch Streuung	35
4.1.6. Szintillation, atmosphärische Turbulenzen	37

4.2. Implementierung	41
4.2.1. Simulation mit Matlab	41
4.2.2. GUI - Grafische Benutzeroberfläche	42
5. Simulationsergebnisse	46
5.1. Vergleich verschiedener FSO-Systeme	46
5.2. Vergleich unterschiedlicher Wetterbedingungen	47
5.3. Einfluss von Turbulenzen	47
6. Schlussfolgerung	50
Literatur	52
A. Quellcode der Simulation in Matlab	59
B. Grafiken zu Verlusten	67
C. Sicherheitshinweise zum Umgang mit Lasern	72

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Laserkommunikationssystem, allgemeiner Aufbau [6]	3
2.2.	Strahldivergenz, Vergleich RF und Optisch [1]	4
2.3.	Absorption einer Standard-Atmosphäre [7]	5
2.4.	Einfluss atmosphärischer Turbulenzen auf die Wellenfront [13] .	7
2.5.	Lichtabsorption des Auges, verschiedene Wellenlängen [15] .	8
2.6.	Dämpfung in Glasfaser [16], modifiziert	9
2.7.	Spektrale Durchlässigkeit der Erdatmosphäre, [17], modifiziert	10
2.8.	Manchester Coding [19]	10
2.9.	Verschiedene Modulationsschemen [13]	11
2.10.	M-PPM [13]	13
2.11.	4-DPIM ohne und mit 1 Guard Slot, 4-PPM [23]	13
2.12.	BPSK [26], modifiziert	14
2.13.	QPSK [24], modifiziert	15
2.14.	DPSK [24]	15
2.15.	Energieeffizienz, Vergleich von OOK, PPM und DPIM [23] . .	16
2.16.	Bandbreiteneffizienz, Vergleich von OOK, PPM und DPIM [23]	17
2.17.	Adaptive Optics (AO) Systems [27]	18
2.18.	Vergleich verschiedener PPM-Arten [28]	20
2.19.	PPM bei moderatem Nebel [28]	21
2.20.	1D-Block Interleaving [29], modifiziert	22
2.21.	Verbindung Bodenstation - Satellite mit HAP [4]	23
3.1.	TESAT CubeLCT [35]	26
3.2.	TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) payload [37]	27
3.3.	EDRS-Satelliten als Relaisstation [42]	29
3.4.	Position von Psyche am 29. Juli 2024 [48], modifiziert	32
4.1.	Aufweitung des Laserstrahls [13]	35
4.2.	Struktur-Parameter, bei moderaten Turbulenzen	38
4.3.	grafische Benutzeroberfläche	44
4.4.	Strahlaufweitung bei einfacher und doppelter Entfernung . .	45
B.1.	Geometrischer Verlust abhängig von der Distanz	68
B.2.	Distanz abhängig vom Elevationswinkel	69
B.3.	Geometrischer Verlust abhängig vom Elevationswinkel	69
B.4.	Dämpfung durch Nebel abhängig von Sichtweite	70
B.5.	Dämpfung durch Regen	70

B.6. Verluste durch Schneefall	71
--	----

Tabellenverzeichnis

3.1.	Technische Daten CLICK [32]	25
3.2.	Technische Daten CubeLCT von TESAT [34], [35]	27
3.3.	Technische Daten TBIRD [38]	28
3.4.	Technische Daten ATHENE-1 (SeRANIS) [40]	28
3.5.	Technische Daten LCT ₁₃₅ Terminal von TESAT [43]	30
3.6.	Technische Daten ILLUMA-T [38]	30
3.7.	Technische Daten SCOT80 Terminal von TESAT [46]	31
3.8.	Technische Daten DSOC [47], [51]	32
4.1.	angenommene Sichtweiten bei Nebel	42
4.2.	cloud number density N und Liquid water content LWC für verschiedene Wolkenarten [55]	42
5.1.	Einstellungen für den Vergleich verschiedener FSO-Systeme .	46
5.2.	Ergebnisse bei Vergleich verschiedener FSO-Systeme	47
5.3.	Einstellungen für den Vergleich verschiedener Wetterbedin- gungen	48
5.4.	Ergebnisse bei Vergleich verschiedener Wetterbedingungen .	48
5.5.	Ergebnisse bei Vergleich von Downlink/Uplink	49

1. Einleitung

In den letzten Jahren hat die steigende Nutzung von Hochgeschwindigkeitsinternet, Videokonferenzen, Live-Streaming etc. zu einem höherem Bedarf an Bandbreite geführt [1]. Im Jahr 2022 war die international genutzte Bandbreite 1228,7 Tbit/s, im Vergleich dazu war sie 2021 bei 979,9 Tbit/s [2].

Eine Free Space Optical (FSO) Verbindung zu einem Low Earth Orbit (LEO) Satelliten ermöglicht die Übertragung großer Datenmengen an Benutzer weiten Teilen der Erde [3]. Satellitenkommunikationssysteme können das terrestrische Netzwerk ergänzen, Netzabdeckung und Qualität verbessern [4].

Bei 6G-Technologien sollen terrestrische und nicht-terrestrische Verbindungen für zukünftige Dienste genutzt werden. Mithilfe von nicht-terrestrischen Netzwerken ist es möglich Gebiete, die vom terrestrischen Netzwerk nicht erreicht werden, anzubinden. Um die Verfügbarkeit von Diensten, Erreichbarkeit und Skalierbarkeit zu gewährleisten werden Nicht-terrestrische Netzwerke ein wesentlicher Teil von 6G-Systemen sein [5].

Neben der hohen Datenrate hat FSO-Kommunikation noch weitere Vorteile wie etwa Abhörsicherheit, fehlende Regulierungen im Frequenzbereich und die Bandbreite. Größe und Gewicht der Sende- und Empfangskomponenten sind kleiner als solche von RF-Geräten (radio frequency). Auch ist der Energieverbrauch in Vergleich zu RF-Komponenten geringer. Außerdem können FSO Systeme schnell einsatzbereit gemacht werden [1].

Im Kapitel 2 wird der theoretische Hintergrund von Laserkommunikationssystemen beschrieben. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf Verbindungen zwischen Erde und Satelliten gelegt.

Im Unterkapitel 2.1 wird auf die atmosphärischen Effekte eingegangen. FSO-Kommunikation kann durch atmosphärische Turbulenzen und das Wetter erheblich beeinträchtigt werden. Zu einer Minderung der Zuverlässigkeit dieser Systeme tragen auch Ausrichtungsfehler der Sende- und Empfangskomponenten und Beam-Wandering bei. Die Wahl der verwendeten Wellenlänge und die Modulationsarten werden in den Unterkapiteln 2.2 und 2.3 behandelt. Methoden zur Verbesserung der Verbindungsqualität und zur Fehlererkennung sind in Unterkapitel 2.4 beschrieben.

Es gibt bereits einige Systeme bei denen Satelliten FSO-Verbindungen zur Kommunikation verwenden. Eine Auswahl davon wird in Kapitel 3 vorgestellt. Zu den bestehenden Missionen gehören CubeSats, Relaisysteme

und eine Deep-Space-Mission.

Wie Verluste die bei Übertragung der Daten durch die Troposphäre auftreten sowie die Verluste durch die Aufweitung des Laserstrahl berechnet werden wird in Kapitel 4 erläutert. Ziel dieser Arbeit war es eine Anwendung mit grafischer Benutzeroberfläche zur Simulation der vorhin genannten Verluste zu erstellen. Die Beschreibung der Implementierung dieser Anwendung befindet sich im Unterkapitel 4.2.

Die Ergebnisse der Simulation unterschiedlicher Systeme und Wetterbedingungen sind in Kapitel 5 zu finden.

2. Grundlagen

Bei Laserkommunikationssystemen wird Information auf einen Laserstrahl moduliert und mit Hilfe eines Teleskops übertragen. Nach der Übertragung durch den freien Raum wird der Laserstrahl von einem anderen Teleskop (Empfänger) eingefangen und auf einen kleinen Punkt in der Brennebene fokussiert, dort wandelt ein Photodetektor das optische Signal in ein elektrisches um. Das elektrische Signal wird anschließend decodiert um die originale Information zu erhalten.

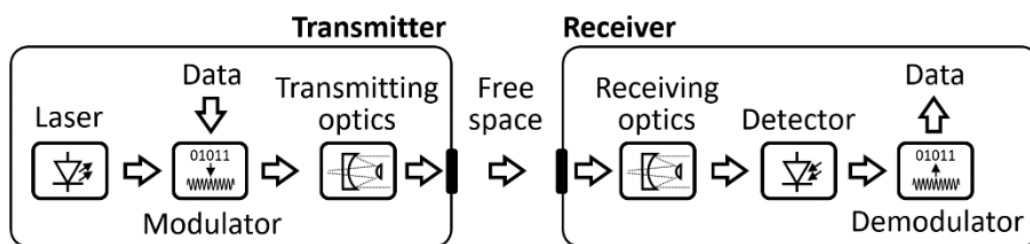


Abbildung 2.1.: Laserkommunikationssystem, allgemeiner Aufbau [6]

Der ausgesendete Lichtstrahl wird im Freiraum auf mehrere Arten beeinträchtigt. Diese sind: geometrischer Verlust, Verlust durch schlechte Ausrichtung der Empfänger, schlechtes Signal-Rauschverhältnis durch Hintergrundrauschen, Störungen und Verlust durch atmosphärische Effekte. Die atmosphärischen Effekte werden im nächsten Unterkapitel näher behandelt.

Die Wellenlänge des Lichts ist sehr klein, dadurch entsteht ein Strahl mit geringer Divergenz. Das ist bei langen Strecken von Vorteil, da die Energiedichte, die beim Empfänger ankommt, größer ist. So kann mehr Energie übertragen werden als wie bei RF, da bei RF die Wellenlängen größer sind. Die Genauigkeit der Ausrichtung muss dann wegen der hohen Richtwirkung höher sein, Pointing und Tracking wird dadurch um einiges anspruchsvoller.

Licht das von anderen Quellen kommt, beispielsweise Sonne oder Mond, kann abgelenkt oder gestreut werden und ins Sichtfeld des Empfänger gelangen. Dies geschieht auch wenn der Empfänger nicht in die Richtung dieser Quellen ausgerichtet ist. Dieses Licht trägt zum Hintergrundrauschen bei [6].

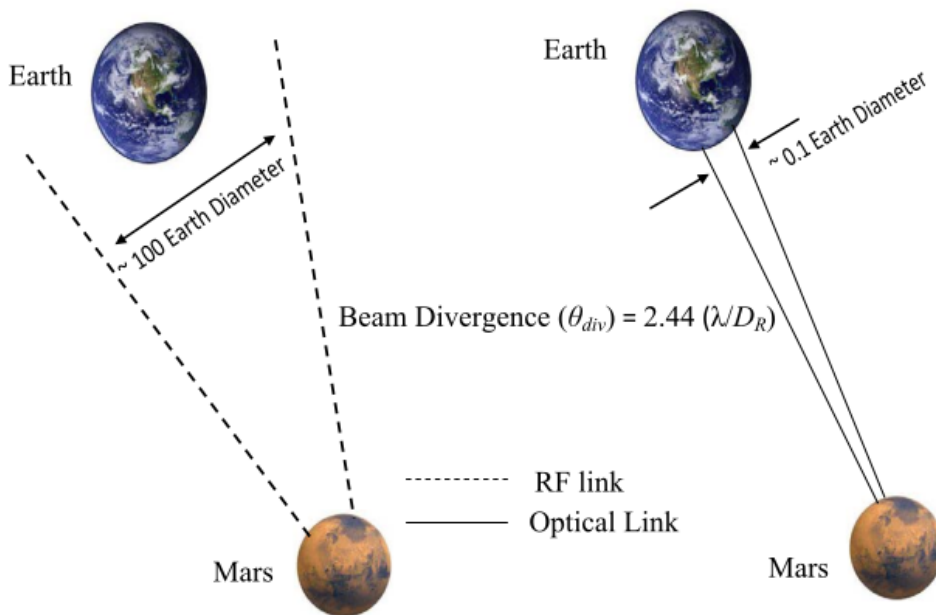


Abbildung 2.2.: Strahldivergenz, Vergleich RF und Optisch, von Mars zu Erde [1]

2.1. Atmosphärische Effekte

Auf dem Weg durch die Atmosphäre kommt es beim optischen Signal zu Verlusten und Verzerrungen. Die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit von FSO-Verbindungen wird so herab gesetzt [1]. In diesem Kapitel werden die Gründe dafür erläutert.

2.1.1. Wetter

Eine Ursache für Verluste am Ausbreitungsweg durch die Atmosphäre sind Absorption und Streuung. Atmosphärische Absorption entsteht hauptsächlich durch Wassermoleküle, Kohlendioxid und Ozon. Sie ist abhängig von der Wellenlänge. Bei Wellenlängen von 1550 nm und klarem Wetter beträgt die molekulare Absorption 0,01 dB/km [1].

Streuung ist ebenso wie Absorption wellenlängenabhängig. Im Infrarot-Bereich, welcher für FSO verwendet wird, kommt es zu Mie-Streuung. Mie-Streuung entsteht wenn die Größe des Partikel in der Atmosphäre im Bereich der Wellenlänge ist. Diese Streuung wird häufig durch Aerosole, Wolken und Nebel hervorgerufen. Viel größere Partikel, verglichen mit der Wellenlänge, führen zu geometrischer Streuung. Dies ist bei Regen, Hagel und Schnee der Fall. Die Dämpfung des Signals kann so groß sein dass das Signal unterbrochen wird [1].

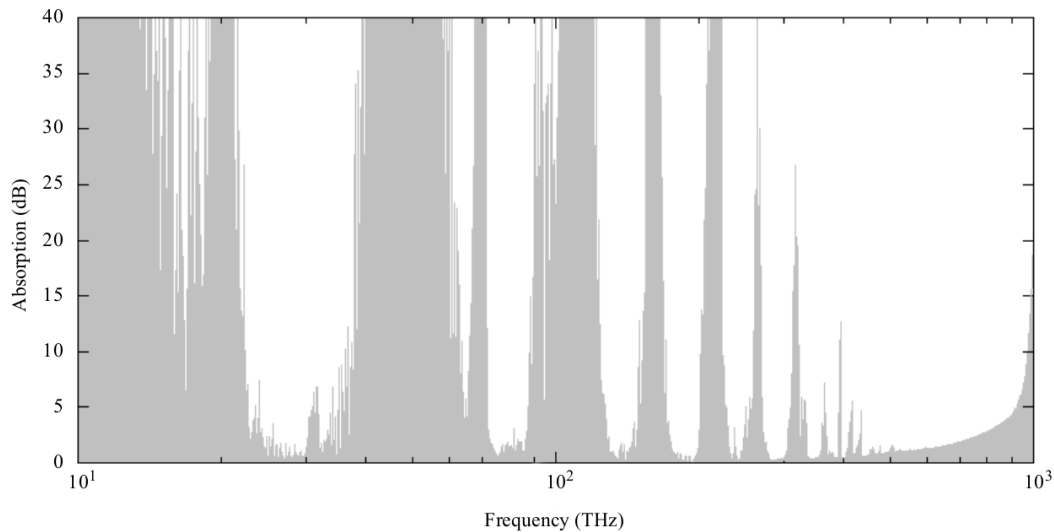


Abbildung 2.3.: Absorption einer Standard-Atmosphäre entlang eines vertikalen Weges [7]

Bei **Nebel** wird das optische Signal in verschiedenste Richtungen gestreut und zum Teil absorbiert. Nebel trägt somit erheblich zur atmosphärischen Dämpfung bei. Je nach Art des Nebels (moderater kontinentaler Nebel bis dichter maritimer Nebel) kann die, durch die Streuung entstandene, Dämpfung 130 dB/km bis 480 dB/km betragen [1], [8]. Die Wahrscheinlichkeit für eine Unterbrechung des Links hängt je nach Ort von Jahreszeit und Uhrzeit ab. So ist zum Beispiel in der Stadt Graz in den Winter- und Herbstmonaten Nachts, mit Beginn in den Abendstunden bis zum frühen Morgen, die Wahrscheinlichkeit einer Verbindungsunterbrechung besonders hoch [9].

Wolken können bis zu einer Höhe von 10 bis 13 km vorkommen. Die Wassertröpfchen, die die Wolken bilden, haben Radien von 0,1 bis 100 μm und sind somit im Größenbereich der Wellenlänge von Infrarotlicht. Wolken verursachen Mie-Streuung und dämpfen daher die übertragene Signalenergie erheblich. Die Dämpfung durch Wolken kann Werte im Bereich von 50 dB/km erreichen. Lichtundurchlässige Wolken können optische Signale stören und sogar unterbrechen. Bei Cirrus-Wolken (Federwolken, in großer Höhe) kommt es zu einer Dämpfung von 4 bis 12 dB [1], [6], [10].

Regentropfen sind mit 100 bis 10.000 μm um einiges größer als die Wellenlänge, dadurch wird das Signal viel weniger beeinträchtigt als bei Nebel. Die Dämpfung kann je nach Stärke des Regens 1 bis 10 dB/km betragen. Besonders in Kombination mit niedrigen Wolken kommt es zu sehr hohen Dämpfungen [1], [11].

Die Dämpfung durch **Schnee** liegt aufgrund der Partikelgröße zwischen der von Regen und Nebel. Schwerer Schneefall ist vergleichbar mit Nebel. Bei der Berechnung der spezifischen Dämpfung wird zwischen nassem und trockenem Schnee unterschieden [1].

2.1.2. Atmosphärische Turbulenzen

Atmosphärische Turbulenzen entstehen durch die zufällige Änderung der Temperatur und des Luftdrucks. Warme und kalte Luft vermischt sich durch Konvektion und Windscherung. Der Einfluss der Druckänderung ist vernachlässigbar, der Brechungsindex wird hauptsächlich von der Temperaturänderung beeinflusst. Es entstehen Zellen in unterschiedlichen Größen und mit unterschiedlichem Brechungsindex, dies führt zu zufälligen Phasen- und Amplitudenänderungen entlang des Ausbreitungswegs. Destruktive und konstruktive Interferenzen sind die Folge. Signale, die kürzere Wellenlängen verwenden, werden von diesen Turbulenzen mehr beeinflusst als solche mit längeren Wellenlängen [1], [6].

Laut [1] gibt es drei Arten von atmosphärischen Turbulenz-Effekten, die abhängig von der Größe der Turbulenzzelle und der Strahlbreite des übertragenen Signals sind:

- **Beam-Wander**
Tritt auf wenn die Turbulenzzellen größer der Lichtstrahl sind. Der Lichtstrahl wird abgelenkt und führt zu einem Verbindungsfehler. Besonders beim Uplink kann dies auftreten, da hier der Lichtstrahl oft kleiner ist als die Turbulenzzelle.
- **Strahlenverbreiterung (beam spreading)**
Kommt vor wenn die Zellen kleiner als der Lichtstrahl sind. Die einfallende Wellenfront wird durch Beugung und Streuung verzerrt.
- **Strahlenszintillation**
Dies entsteht wenn die Zellen in der Größenordnung des Lichtstrahls sind. Die Zellen wirken wie Linsen. Die Signalenergie wird umverteilt und führt zu zeitlich und örtlich schwankender Strahlungsstärke. Dieses Phänomen ist die Hauptursache für Leistungseinbrüche bei FSO-Systemen.

Atmosphärische Turbulenzen führen unter anderem zur Pulsverbreiterung und Depolarisation des Lichts. Depolarisation verringert die durchschnittliche Leistung, eine Dämpfung von 160 dB kann beobachtet werden. Die Turbulenzen können auch zu einem Verlust der örtlichen Kohärenz des ursprünglich kohärenten Lichtstrahls führen. Beim Downlink (satellite-to-ground) wird das Signal am meisten durch Strahlenverbreiterung, Szintillation und Verlust der örtlichen Kohärenz gestört. Beim Uplink dagegen sind Beam-Wander und Angle-of-Arrival Änderungen die hauptsächlichsten

negativen Einflüsse. Allgemein kommt beim Uplink (ground-to-satellite) der Laserstrahl gleich in Kontakt mit der Atmosphäre und wird durch Änderungen des Brechungsindex gestört. Durch diesen Umstand wird das Downlink-Signal weniger gestört als das Uplink-Signal. Die Dämpfung durch die Atmosphäre hängt auch vom Elevationswinkel zwischen Bodenstation und Satelliten ab, da bei niedrigen Elevationswinkeln ist der Weg durch die Atmosphäre länger ist [1], [12].

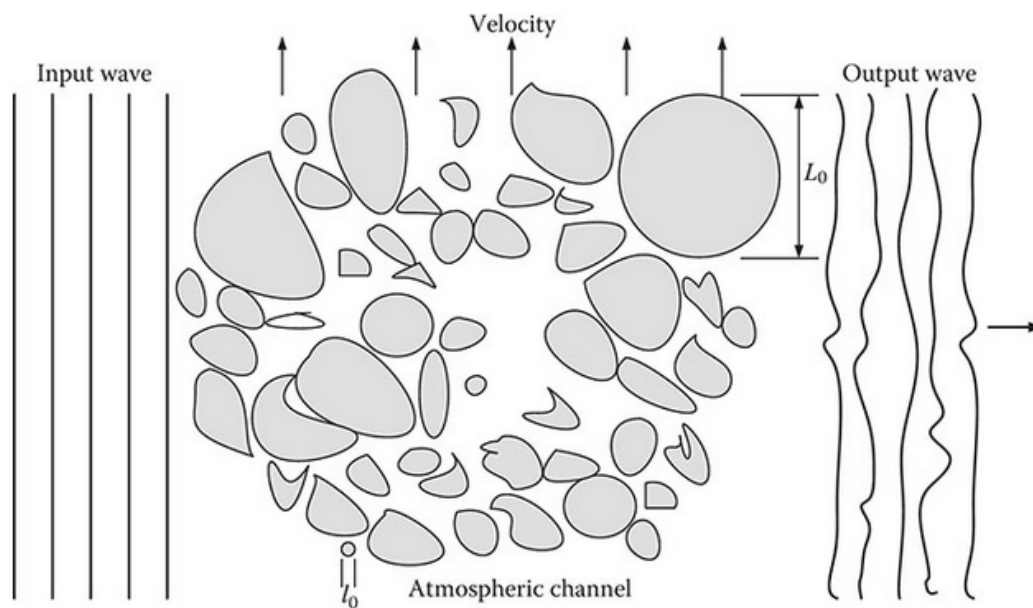


Abbildung 2.4.: Einfluss der atmosphärischen Turbulenzen auf die Wellenfront [13]

2.2. Wahl der Wellenlänge

Bei der Wahl der Wellenlänge müssen mehrere Aspekte beachtet werden. So ist etwa der Antennengewinn (Gain) bei kleineren Wellenlänge größer und die Strahldivergenz geringer, jedoch ist bei größeren Wellenlängen die Linkqualität besser [1], [6].

Vor allem wird auf die Sicherheit bezüglich Augen und Haut geachtet. Wellenlängen zwischen 400 nm und 1400 nm können zu Schäden der Netzhaut (Retina) führen. Bei FSO Systemen werden meistens Laser der Klasse 1 (Laserstrahlung ungefährlich) oder 1M (ungefährlich wenn keine optischen Instrumente, die den Strahlquerschnitt einengen, benutzt werden) verwendet. Die Hornhaut des Auges absorbiert die Lichtenergie ab 1400 nm und FSO-Systeme die mit diesen Wellenlängen arbeiten, können 10 mal mehr

optische Leistung übertragen als solche die mit kürzeren Wellenlängen (z. B. 750 nm oder 850 nm) in der gleichen Sicherheitsklasse [1], [14].

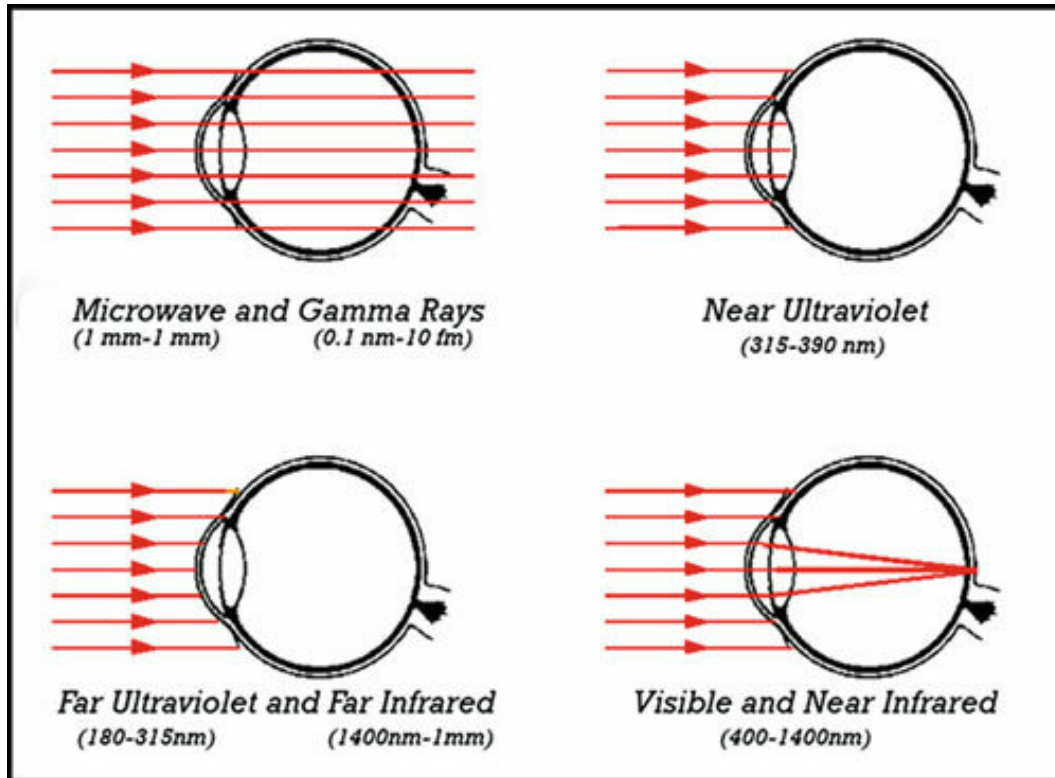


Abbildung 2.5.: Lichtabsorption des Auges, verschiedene Wellenlängen [15]

Aus Gründen der Verfügbarkeit von Sende- und Empfangskomponenten arbeitet man bei FSO Systemen oft mit den gleichen Wellenlängen wie bei fasergebundener Übertragung.

Bei der optischen fasergebundenen Übertragungstechnik haben sich drei Übertragungsfenster in den letzten Jahren etabliert. Grund hierfür sind die Übertragungseigenschaften von Glasfaser. Die Materialabsorption ist bei gewissen Wellenlänge geringer. Das erste Fenster ist bei 850 nm (800 - 900 nm), das zweite und dritte bei 1300 nm (1260 - 1360 nm) und 1550 nm (1530 - 1565). In den Anfangszeiten der Glasfaserübertragung wurde das erste Fenster genutzt. Bei Langstreckenübertragung kommt das zweite Fenster zum Einsatz. Das dritte Fenster wird bei Fernstrecken häufig verwendet [1], [13].

In Low Earth Orbit-Space to Ground Kommunikationssystemen wird auf eine möglichst geringe molekulare Absorption durch die Atmosphäre geachtet. Die meisten Systeme arbeiten daher in dem Bereich von 780 - 850 nm und 1520 - 1600 nm. Um Sicherheit für die Augen zu gewährleisten wird das dritte Fenster verwendet. 1550 nm ist daher oft die Wellenlänge der Wahl. Bei Inter-Satellite Links wird hauptsächlich 1064 nm angewendet,

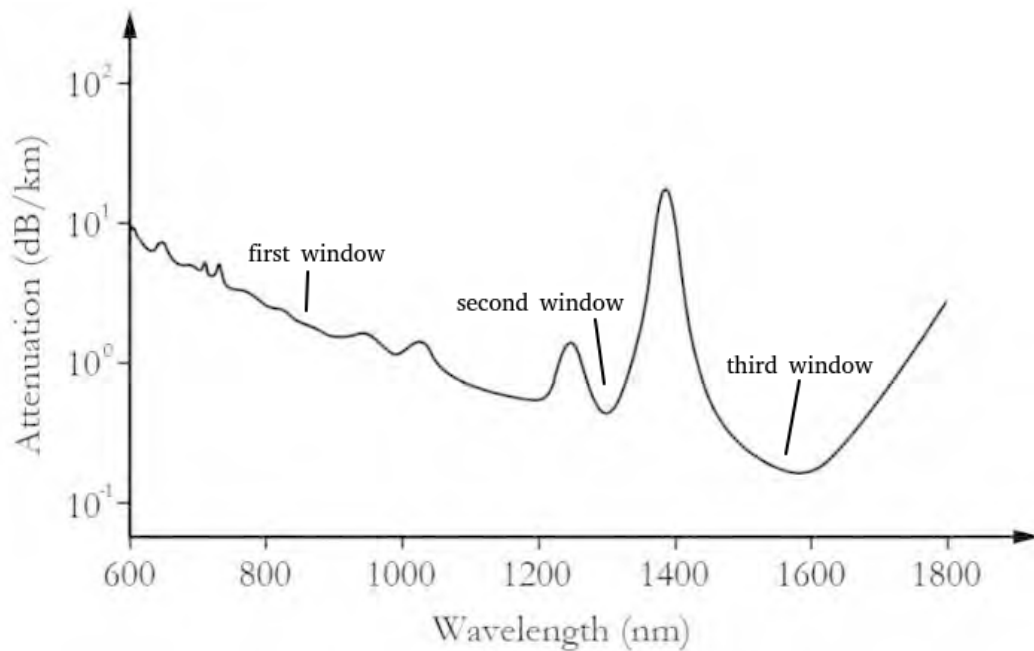


Abbildung 2.6.: Dämpfung in Glasfaser, abhängig von Wellenlänge, [16], modifiziert

da Augensicherheit und Atmosphäre hier nicht von Belang sind [1], [6].

2.3. Modulation

In diesem Kapitel werden gängige Modulationsschemen von FSO-Verbindungen vorgestellt. On-off keying (OOK) und Puls Position Modulation (PPM) sind hierbei die bekanntesten Modulationsarten.

2.3.1. OOK - On-off keying

On-off keying folgt diesem Schema: für eine binäre Eins wird ein Puls gesendet, für eine binäre Null kein Puls. Im Grunde wird einfach der Laser des Senders ein- und ausgeschaltet. Es ist eine intensity binary-level Modulation die Direct Detection (IM/DD) ermöglicht. Das optische Signal wird vom Empfänger direkt in ein elektrisches umgewandelt.

Diese Modulationsart wird oft aufgrund ihrer Einfachheit und der geringen Implementierungskosten verwendet, jedoch ist die Energie- und Spektral-Effizienz vergleichsweise schlecht. Besonders bei LEO-to-Ground Satellitenlinks wird sie angewandt, wegen der simplen Demodulation beim Empfänger. Für die Demodulation reicht ein einfacher Photodetektor [6].

Laut [13] gibt es folgende unterschiedliche Arten:

- no-return-to-zero (NRZ): Die Dauer eines Pulse entspricht 1 Bit.

2. Grundlagen

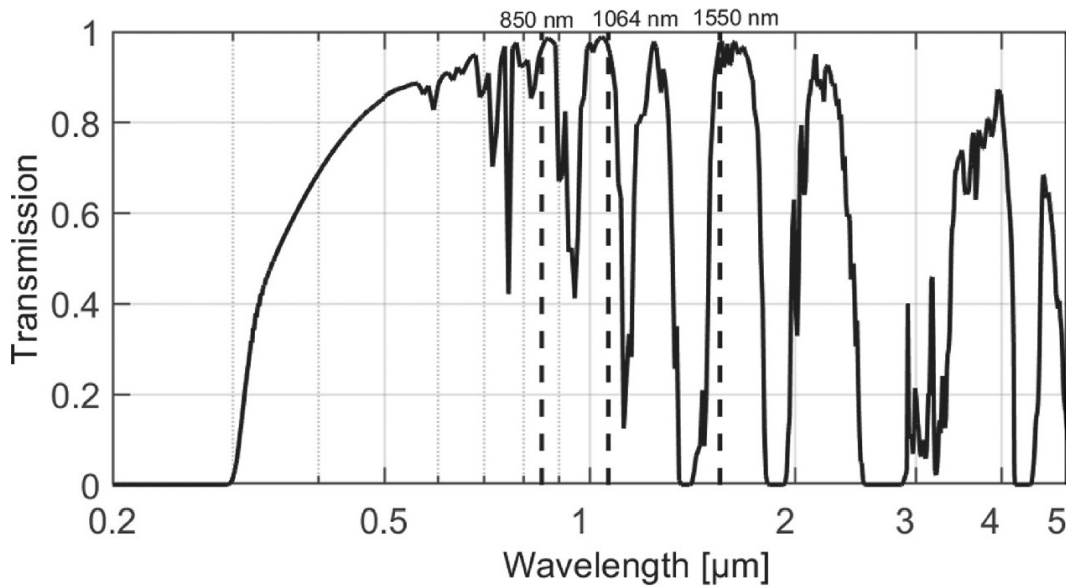


Abbildung 2.7.: Spektrale Durchlässigkeit der Erdatmosphäre, [17], modifiziert

- return-to-zero (RZ): Hier wird in der zweiten Hälfte der Bits nichts gesendet (die Dauer des Pulses ist kürzer als 1 Bit), dadurch wird weniger Energie benötigt als wie bei NRZ. Es wird jedoch die doppelte Bandbreite (im Vergleich zu NRZ) benötigt.
- return-to-zero-inverted (RZI): Bei RZI entspricht ein Impuls einer Null.

Da es bei einer Reihe von Nullen oder Einsen zu einem Verlust der Synchronisation oder der Verbindung kommen kann, wird z.B. Manchester Coding eingesetzt. Das Taktsignal bleibt so erhalten [18].

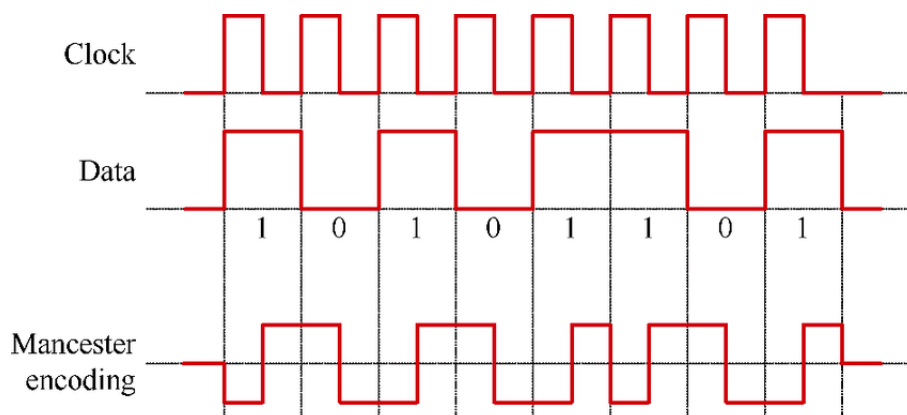


Abbildung 2.8.: Manchester Coding [19]

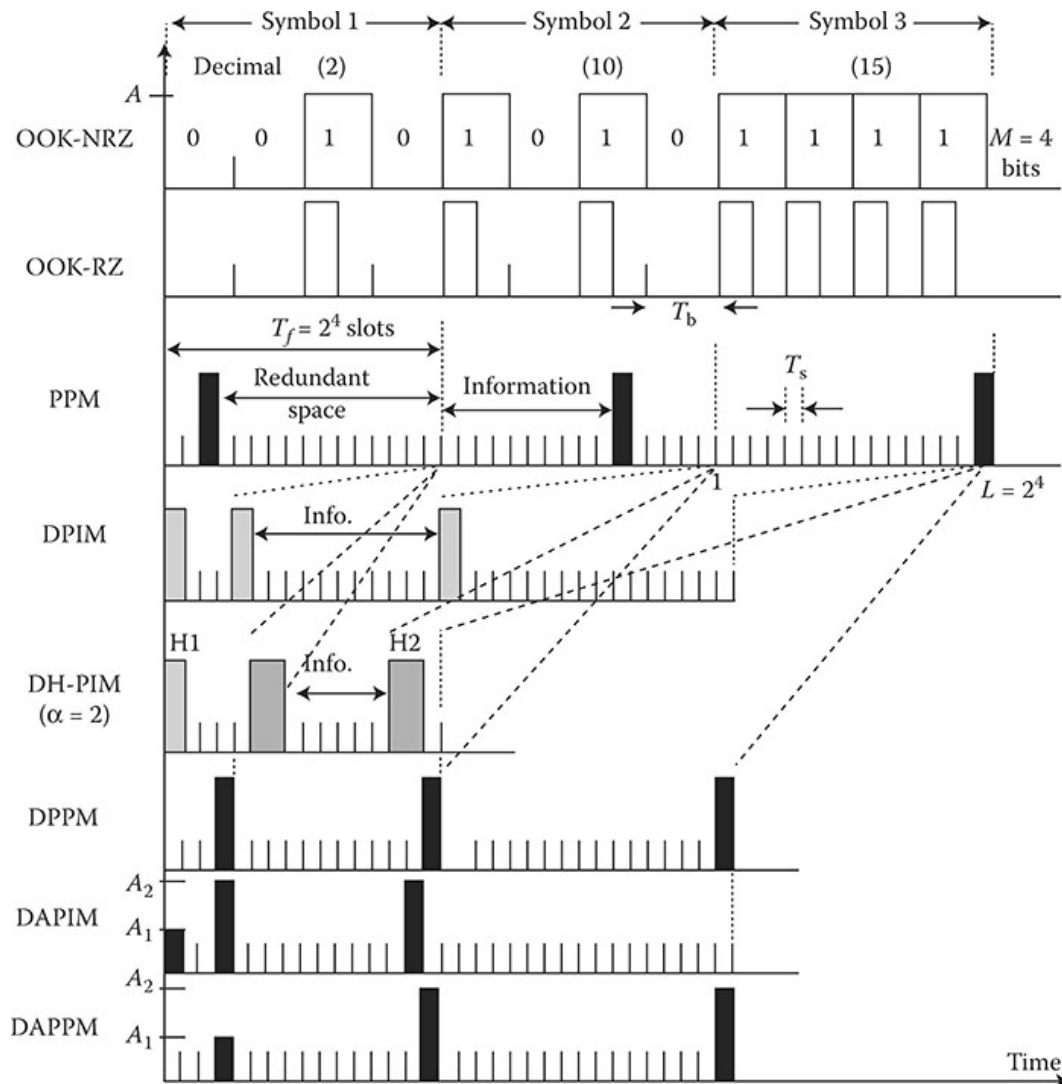


Abbildung 2.9.: Verschiedene Modulationsschemen [13]

2.3.2. PPM - Pulse Position Modulation

Bei Pulse Position Modulation (PPM) bestimmt die Position des Pulses die zu übermittelnde Information.

Verglichen mit OOK hat PPM eine geringere Spektraleffizienz, ist jedoch dafür energieeffizienter. Bei PPM wird eine höhere Spitzenenergie (peak power) übertragen bei gleicher durchschnittlicher Energie [6]. Zusammen mit Sicherheitsfeatures und einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis macht es die PPM zu einer oft verwendeten Technik in FSO Systemen [20].

Von der Pulse Position Modulation gibt es mehrere Varianten: L-PPM (PPM mit L Möglichkeiten), DPPM (differential PPM) und M-PPM (Multilevel-PPM).

L-PPM

Das L von L-PPM gibt die Anzahl der möglichen Pulspositionen an. $L = 2^M$, M ist die Bit-Auflösung. Bei L-PPM wird jedes Symbolintervall in L Zeitslots unterteilt und je nach zu übertragender Information wird ein Puls in einen bestimmten Zeitslot eingefügt. Die Slots ohne Puls bleiben leer. Für diese Modulationsart ist eine Synchronisation notwendig um den Beginn des Symbols zu erkennen.

Wenn L größer 2 ist, wird weniger Energie benötigt im Vergleich zu OOK [21]. Aber es ist mehr Bandbreite notwendig und die Komplexität steigt. Die Komplexität steigt dadurch dass für die Demodulation beim Empfänger Slots und Symbole synchronisiert werden müssen. Aufgrund dieses geringen Energieverbrauchs wird es bei Deep Space Laser Communication verwendet. Mit größeren Werten von L wird die Bandbreiten-Effizienz schlechter, jedoch bessert sich die durchschnittliche Energieeffizienz (average-power efficiency) und es steigt die Robustheit gegen Hintergrundstrahlung. Das Tastverhältnis und das Integrationsintervall der Photodiode bzw. die Slot-Breite sind dann kleiner [1], [13].

DPPM

Bei DPPM (Differential Pulse Position Modulation) werden die Pulse differenziell angeordnet. Hierbei werden die leeren Slots nach dem Puls entfernt [1].

Das Verhältnis zwischen Leistung und Bandbreite wird so verbessert, da leere Slots wegfallen. Die Bandbreiten- und Energieeffizienz ist verglichen mit PPM besser. Eine Synchronisation ist nicht notwendig, jedoch ändert sich die Symboldauer ständig je nach gesendeter Information. Fehler in einem Slot führt nicht nur zu einem Fehler im aktuellen Symbol, sondern auch nachfolgende Symbole werden fehlerhaft [1], [13].

M-PPM

Bei der Multilevel-PPM (M-PPM) wird die Symboldauer auf n Slots aufgeteilt und ein Puls wird in w Slots gesendet. Beispiel: eine $\binom{n}{w} = \binom{4}{2}$ M-PPM hat sechs mögliche Symbole.

Um eine große Hammingdistanz zu erreichen werden nicht alle Symbole verwendet. Dadurch wird Fehlererkennung und Fehlerbehebung erleichtert [13].

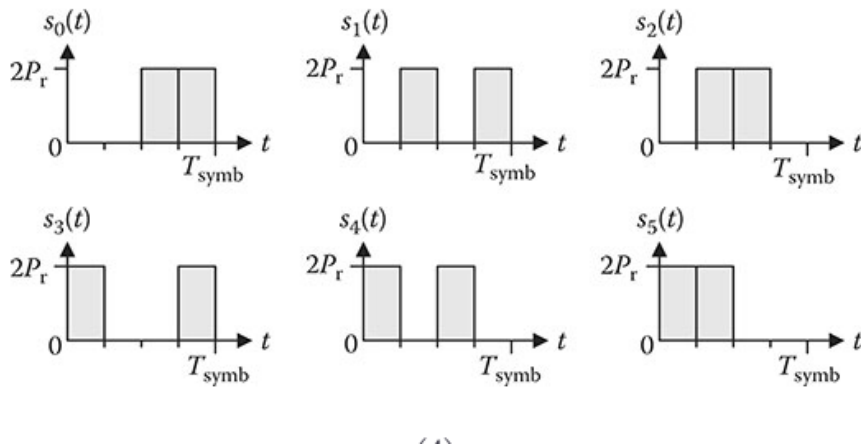


Abbildung 2.10.: $\binom{4}{2}$ M-PPM [13]

2.3.3. DPIM - Digital Pulse Interval Modulation

Hier wird die Information als Abstand zwischen zwei Pulsen kodiert. Im Vergleich zu PPM ist PIM weniger komplex da die Symbolsynchronisation von vornherein eingebaut ist und das Entfernen von ungenutzten Slots bei jeden Symbol führt zu einer höheren Übertragungskapazität [13], [22]. Bei DPIM hat ein Puls die Dauer eines Slots, darauf folgen, je nach Daten, mehrere leere Slots. Die Symboldauer variiert deshalb. Um ISI (inter symbol interference) zu vermeiden kann ein Guard Band, bestehend aus einem oder mehreren leeren Slots, direkt nach dem Puls eingefügt werden. Bei L-DPIM steht L für die Anzahl der möglichen Symbole [1], [13].

Source data	4-DPIM NGB	4-DPIM 1GS	4-PPM
00			
01			
10			
11			

Abbildung 2.11.: 4-DPIM ohne und mit 1 Guard Slot, 4-PPM [23]

2.3.4. PSK - Phasenumtastung, Phase Shift Keying

Bei Phasenumtastung wird die Phase des Trägersignals entsprechend der zu übertragenden Information verändert. In [24] und [25] sind die folgenden Varianten der Phasenumtastung beschrieben.

BPSK - binäre Phasenumtastung, Binary Phase Shift Keying

Die einfachste Variante der Phasenumtastung ist die BPSK. Hierbei werden die binären Symbole als Phasenverschiebungen von 0 oder π rad (180 Grad) kodiert. Ein Bit entspricht einem Symbol. Eine binäre 0 entspricht einer Phasenverschiebung von 0 Grad und eine binäre 1 einer Phasenverschiebung von 180 Grad. Eine alternative Beschreibung ist folgendes: Wenn sich das Signal nicht ändert (auf ein Bit mit Wert 1 folgt noch ein Bit mit Wert 1) bleibt auch die Phase gleich. Bei einem Wechsel des Signals (von 0 auf 1 oder von 1 auf 0) ändert sich die Phase um 180 Grad (π rad). Die Demodulation ist nur mit Synchronisation des Trägersignals möglich.

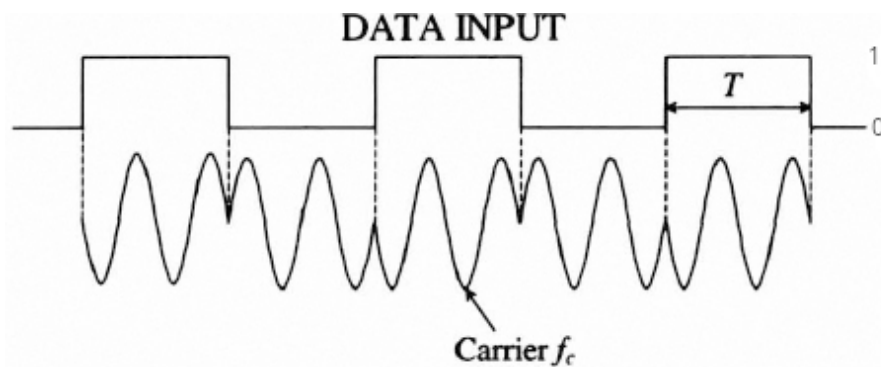


Abbildung 2.12.: BPSK [26], modifiziert

QPSK - Quadraturphasenumtastung, Quadrature Phase Shift Keying

Bei QPSK werden pro Symbol zwei Bits übertragen. Es gibt somit 4 mögliche Symbole. QPSK ist eine Erweiterung der BPSK. Die verwendeten Phasen sind 0, $\pi/2$, π und $3\pi/2$.

DPSK- Differentielle Phasenumtastung, Differential Phase Shift Keying

Bei DPSK hängt die Phase nicht direkt vom übertragenen Bit ab. Eine logische 1 bewirkt eine Phasenänderung von 180 Grad, bei einer 0 bleibt die Phase gleich. Bei der Demodulation wird der Phasenunterschied zwischen zwei Bitperioden verwendet. Daher braucht DPSK keine Trägersynchronisation im Gegensatz zu BPSK.

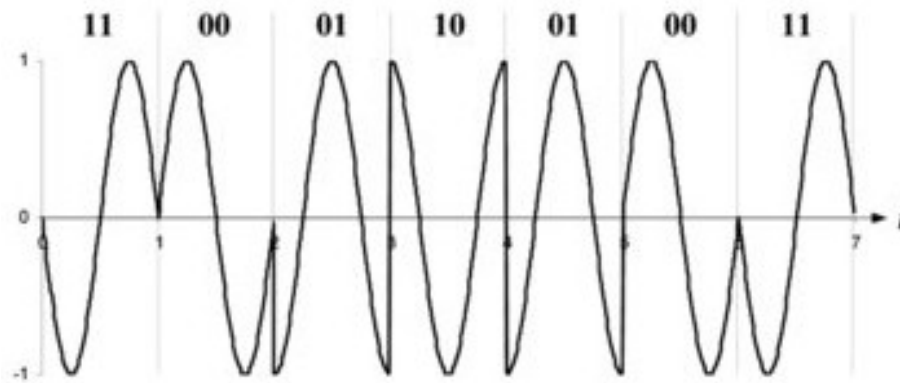


Abbildung 2.13.: QPSK [24], modifiziert

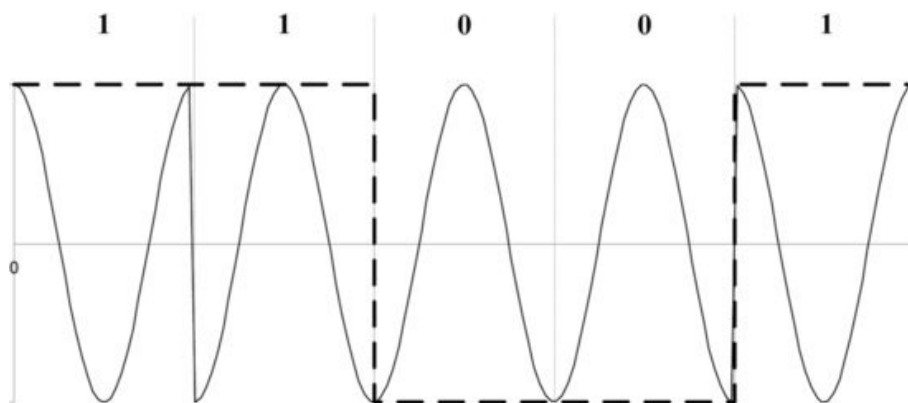


Abbildung 2.14.: DPSK [24]

2.3.5. Energieeffizienz, Bandbreiteneffizienz

Die Energie die ein optischer Sender aussendet ist durch die Sicherheitsbestimmungen für Augen- und Hautsicherheit begrenzt. Außerdem möchte man bei batteriebetriebenen Geräten den Energieverbrauch möglichst gering halten. Die Energieeffizienz ist daher ein wichtiges Kriterium um ein Modulationsschema zu bewerten. Die Energieeffizienz ist die durchschnittliche benötigte Energie um ein gegebenes BER (bit error rate) bei einer gegebenen Datenrate zu erreichen. Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Modulationsschemen ist die Bandbreiteneffizienz. Die Bandbreite die für eine verzerrungsfreie Übertragung zur Verfügung steht ist durch Photodetektorfläche und Kanalkapazität begrenzt. Das Verhältnis zwischen Bandbreiteneffizienz und Energieeffizienz hängt vom Auslastungsgrad γ ($\gamma = \eta_B / \eta_P$) ab [13].

Laut [13] sind Energieeffizienz und Bandbreiteneffizienz wie folgt definiert:

Energieeffizienz η_P :

$$\eta_P = E_{pulse} / \bar{E}_b$$

E_{pulse} ... Energie pro Puls

\bar{E}_b ... durchschnittliche Energie pro Bit

Bandbreiteneffizienz η_B :

$$\eta_B = R_b / B$$

R_b ... erreichbare Bitrate

B ... Bandbreite des Infrarot-Transceivers

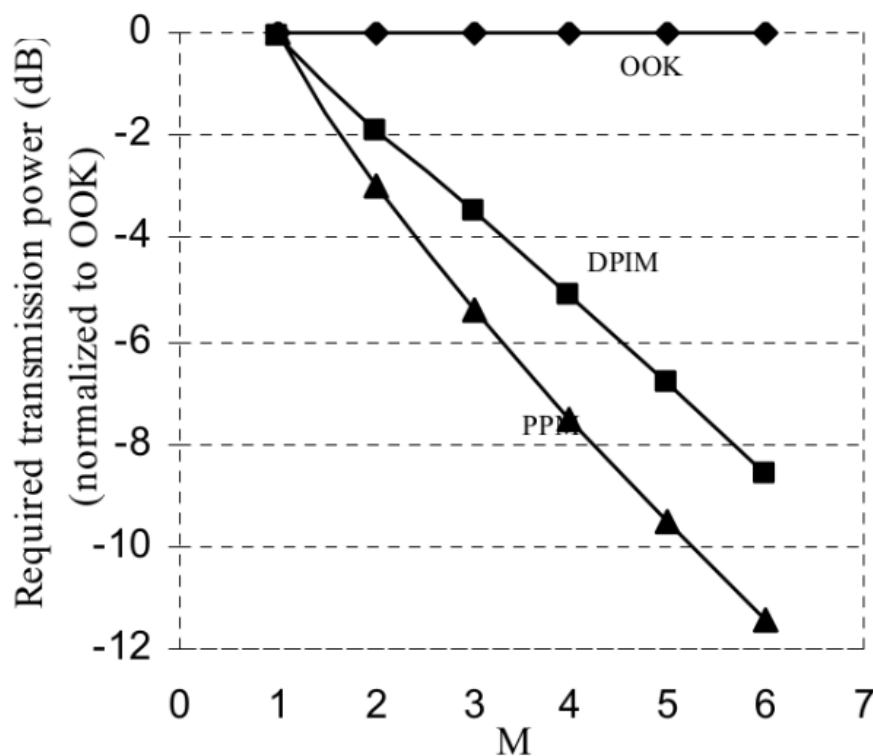


Abbildung 2.15.: Energieeffizienz, Vergleich von OOK, PPM und DPIM [23]

In [23] kommt man zu folgendem Schluss: Bezüglich Übertragungskapazität und Bandbreitenanforderung ist DPIM das effektivste Modulationsschema (wenn man PPM, OOK und DPIM vergleicht). Bei Energieeffizienz und Fehlerwahrscheinlichkeit ist PPM besser.

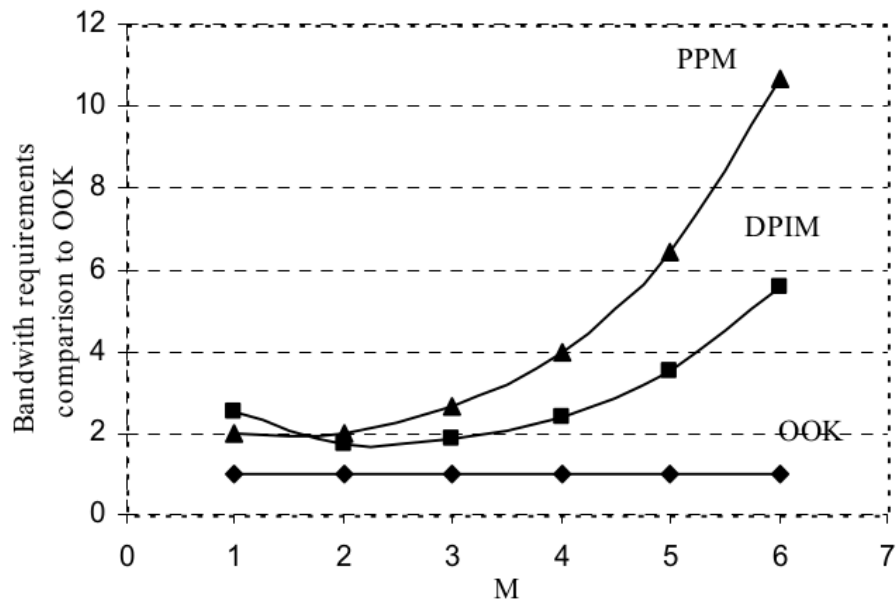


Abbildung 2.16.: Bandbreiteneffizienz, Vergleich von OOK, PPM und DPIM [23]

2.4. Verbesserungen, Fehlererkennung

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über verschiedene Methoden um die Verbindung zu verbessern und um Fehler zu erkennen.

Durch die verschiedenen Effekte die in der Atmosphäre auftreten, kann es zu einer Verschlechterung der Verbindung kommen. Um die Zuverlässigkeit von FSO Systemen bei jeder Wetterlage zu erhöhen gibt es einige Techniken, die auf der physikalischen Ebene und auf der TCP (Transmission Control Protocol) Transport- und Netzwerkebene erfolgen. In [1] sind diese Techniken beschrieben.

2.4.1. Physical Layer

In diesem Kapitel werden Methoden zur Verbesserung der Verbindungsqualität vorgestellt die auf der physikalischen Ebene angewandt werden.

Aperture Averaging / Mittelung der Öffnung

Die Empfangsöffnung wird vergrößert um Auswirkungen von atmosphärischer Turbulenz mit kleinen Zellen zu vermindern. Auch Kanalfading wird reduziert. Atmosphärische Szintillation wird vermindert und die Bit-Error-Rate (BER) verbessert. Durch die vergrößerte Öffnung sammelt der Empfänger auch mehr Hintergrundrauschen ein, darauf sollte bei der Wahl der Empfangsöffnung geachtet werden.

Diversity

Diversity kann sich auf Ort, Zeit und Frequenz beziehen. Mehrere Empfänger senden mehrere Kopien des Signals. Beim Mitteln von unabhängigen Signalpfaden steigt der Diversity Gain. Um den Verbindungsausfall durch Wolken zu minimieren kann man ein Netzwerk aus Bodenstationen verwenden. Die Standorte der Bodenstationen sollten mit Bedacht auf auftretende Bewölkung gewählt werden damit eine hohe Verfügbarkeit gegeben ist [10].

Adaptive Optics

Mit Hilfe von Adaptive Optics können die Auswirkungen von atmosphärischen Turbulenzen abgemildert werden. Somit kann ein unverzerrter Strahl übertragen werden. Bei Adaptive Optics wird in einem geschlossenen Regelkreis der Strahl entsprechend der atmosphärischen Turbulenz korrigiert.

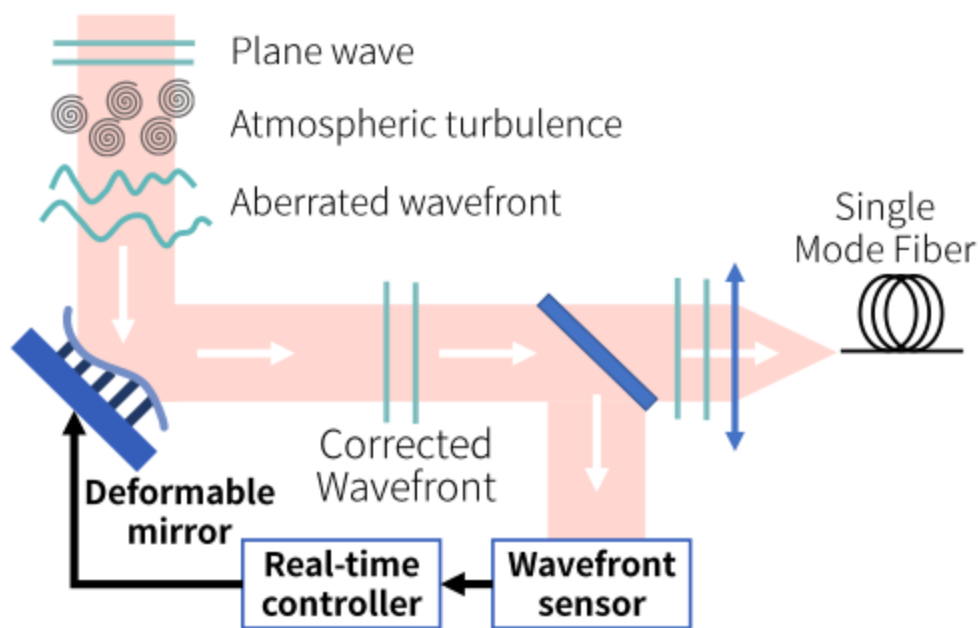


Abbildung 2.17.: Adaptive Optics (AO) Systems [27]

Coding

Mit Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC, Forward Error Correction) kann die Leistungsfähigkeit von FSO-Systemen verbessert werden. Zu diesen Codes gehören Reed-Solomon (RS) Codes, Turbo Codes, Faltungscode, trellis-coded Modulation (TCM) sowie LDPC (low density parity check). Hierbei wird der zu sendenden Nachricht redundante Information hinzugefügt

um etwaige Fehler zu erkennen und zu beheben. Fehlererkennung und Fehlerbehebung erfolgt beim Empfänger. Für die Übertragung mit sehr hohen Datenraten eignen sich besonders LDPC-Codes. Verglichen mit Turbo Codes sind sie weniger komplex und brauchen weniger Rechenzeit. Um die Kanalkapazität zu steigern bieten sie LDPC Codes mit variabler Rate an.

In [21] kommt man beim Vergleich zwischen RS-Codes und Turbocodes zu dem Schluss dass bei zufälligen Fehlern, wie z.B. bei zusätzlichem Umgebungslicht, RS-Codes mit einer Coderate von $\frac{1}{2}$ besser abschneiden als die simulierten Turbocodes. Auch bei atmosphärischen turbulenten Bedingungen, sowohl schwach als auch stark, liefern diese RS-Codes ein besseres Ergebnis als Turbocodes. Bei Nebel kommt es zu Burstfehlern und dann sind Turbocodes mit langen Interleavern zu bevorzugen.

Modulation

Die Wahl des Modulationsschema wird anhand der optischen Energie-Effizienz und Bandbreiten-Effizienz getroffen. Wegen ihrer hohen Energie-Effizienz werden oft binäre Modulationschemen, wie PPM, verwendet.

In [8] wurde festgestellt, dass bei Nebel die hohe Spitzenenergie (peak-to-average power ratio) 4-PPM (L-PPM) zu einer robusteren Modulationsart, verglichen mit OOK, macht.

Um die Auswirkungen von Dämpfung, die durch die Atmosphäre entsteht, und von turbulenzinduzierten Fading abzuschwächen bietet sich Error Control Coded PPM an. OOK bietet eine hohe Bandbreiteneffizienz, jedoch nur geringe Energieeffizienz. L-PPM dagegen erreicht eine höhere Energieeffizienz bei geringerer Bandbreiteneffizienz. Mit einer PPM höherer Ordnung ist eine höhere Spitzenenergie möglich. Mit Hilfe von Kanalcodierung kann die durchschnittliche übertragene optische Energie von FSO-PPM-Verbindungen reduziert werden und dabei eine zuverlässige Kommunikation sichergestellt werden. Den Auswirkungen von turbulenzinduziertem Fading kann durch die Zeitdiversität (time diversity), die die Codierung bereitstellt, entgegengewirkt werden [28].

In [21] und [28] wurden uncodierte und RS-codierte L-PPM-Arten miteinander verglichen, unter anderem bei moderatem Nebel (Abbildung 2.19). Ein Gewinn (gain) von bis zu 25 dB, verglichen zu uncodierten 2-PPM, bei Verwendung von RS-codiertem 256-PPM konnte festgestellt werden (siehe Abbildung 2.18).

Interleaver

Durch atmosphärische Turbulenzen kann es zu Leistungseinbrüchen mit mehreren Millisekunden Dauer kommen die zu langen Burst-Fehlern führen. Diese langen Burst-Fehler können mit FEC nicht mehr korrigiert werden.

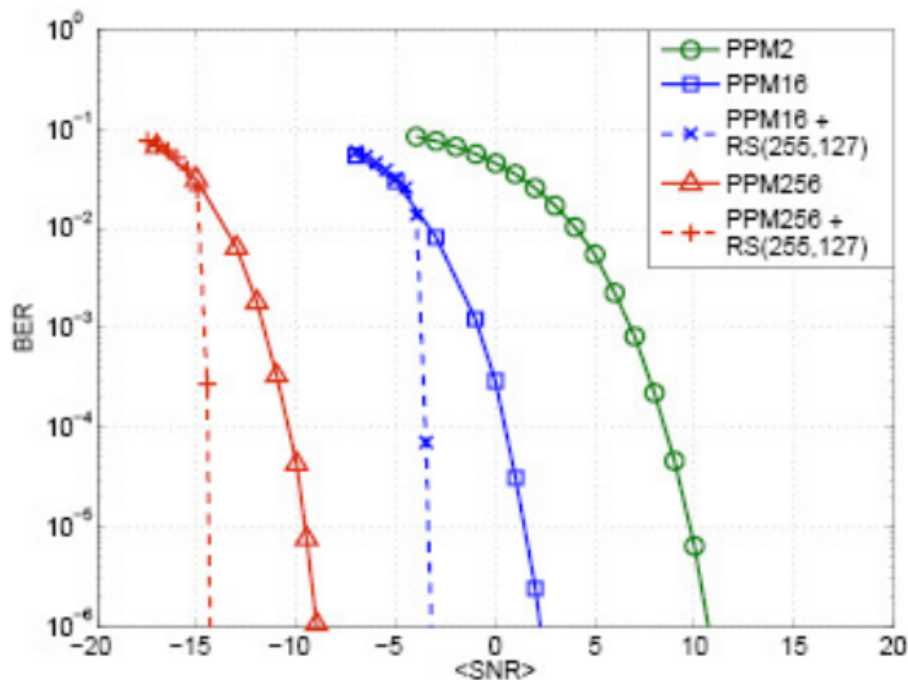


Abbildung 2.18.: Vergleich von 2-PPM, 16-PPM und 256-PPM, teils mit RS-Codierung [28]

Bei Interleavern passiert folgendes: Die Symbole von mehreren Code-Wörtern werden neu angeordnet und somit mit den Symbolen der anderen Wörter vermischt. Beim Zurückordnen der Symbole werden lange Burst-Fehler zu kurzen Fehlern die dann (mit Hilfe von FEC) korrigiert werden können [27], [29].

Unterdrückung von Hintergrundrauschen

Am Tag entsteht das Hintergrundrauschen vor allem durch die Sonnenstrahlung. Bei Verwendung von größeren Wellenlängen gibt es weniger Hintergrundrauschen. Zur Unterdrückung des Rauschens werden Raumfilter verwendet. M-PPM (siehe Kapitel 2.3) eignet sich besonders in diesem Fall, da das Rauschen direkt proportional mit der Breite des Slots ist.

Hybrid RF/FSO

Da FSO-Links sehr stark durch Wetter und atmosphärische Turbulenzen beeinträchtigt werden empfiehlt es sich ein Hybrid RF/FSO System zu verwenden. Dadurch erhöht sich die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Jedoch ist bei RF die Datenrate wesentlich geringer.

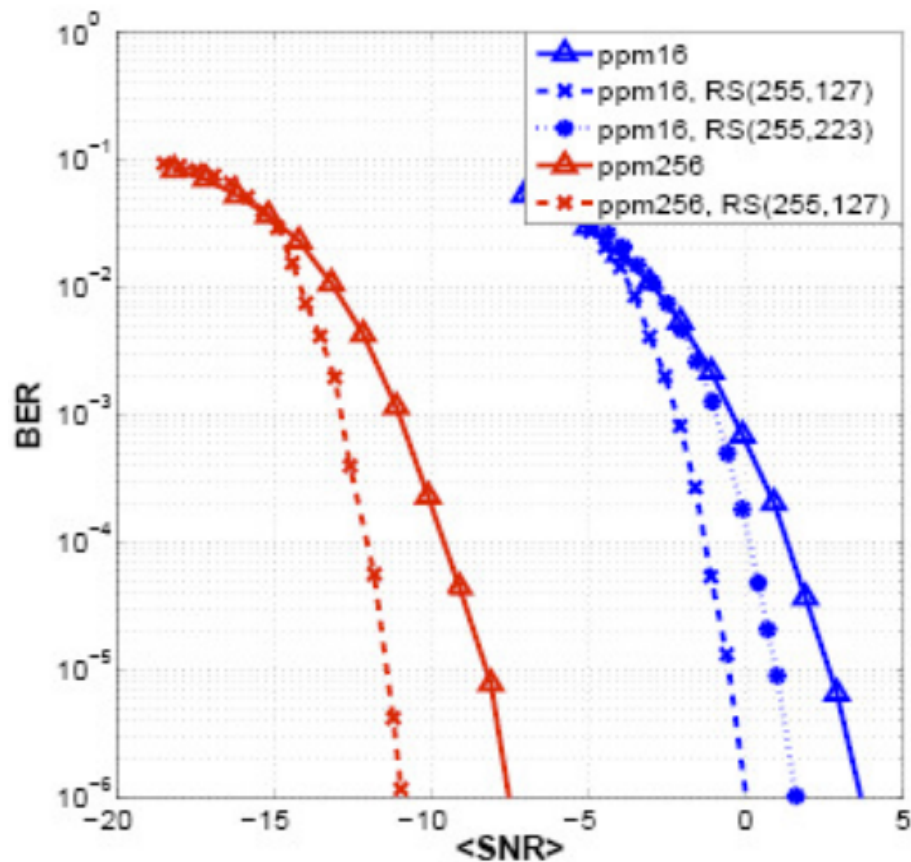


Abbildung 2.19.: Vergleich von PPM mit und ohne Codierung bei moderatem Nebel [28]

HAP- High Altitude Platform

Hierbei wird der FSO Link in zwei Teile geteilt. Jedes dieser Teile ist nun kürzer und Ausrichtungsverluste durch beam wandering sind kleiner. Bei größerem Zenitwinkel ist der Weg durch die turbulente Atmosphäre länger. Wenn die HAP so positioniert wird dass der Zenitwinkel möglichst gering ist, ist der Abstand zwischen Bodenstation und HAP am geringsten und die Verbindung wird weniger durch die Atmosphäre gestört [4].

2.4.2. TCP upper Layer

Hier werden Techniken der Transport- und Netzwerkebene vorgestellt die ebenfalls zur Verbesserung der Verbindungsqualität beitragen können.

Re-Transmission (erneute Übertragung)

Ein Re-Transmissionprotokoll ist beispielsweise ARQ (automatic repeat request). Hier werden Pakete übermittelt. Wenn der Empfänger nach einer

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

(a) Data before interleaving

1	5	9	13
2	6	10	14
3	7	11	15
4	8	12	16

(b) Two-dimensional 4x4 array used for interleaving

1	5	9	13	2	6	10	14	3	7	11	15	4	8	12	16
---	---	---	----	---	---	----	----	---	---	----	----	---	---	----	----

(c) Data after interleaving

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

(d) Data after de-interleaving

Abbildung 2.20.: 1D-Block Interleaving [29], modifiziert

gewissen Zeit den Empfang des Pakets nicht bestätigt, wird das Paket nochmals gesendet. Das passiert solange bis das Paket empfangen wurde oder ein Zähler überschritten wird. Diese Vorgangsweise führt leider zu großen Verzögerungen, hohen Energieverbrauch und Bandbreiteneinbußen. Bei SR-ARQ (selective repeat - ARQ) schickt der Sender Paket ohne auf die Bestätigung zu warten. Erfolgt nach einiger Zeit keine Bestätigung wird erneut übertragen.

Rekonfiguration und Re-Routing

Datenpakete werden über andere bestehende Verbindungen geleitet. Diese Verbindungen können optische sein, aber auch RF-Verbindungen mit niedrigerer Datenrate. Bei einem Verbindungsfehler in einem optischen

2. Grundlagen

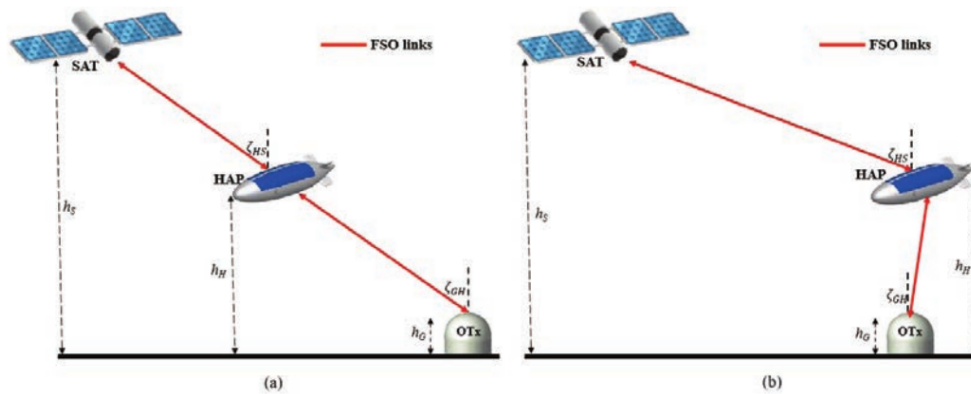


Abbildung 2.21.: Verbindung Bodenstation - Satellite mit HAP, a) großer Zenitwinkel, b) kleiner Zenitwinkel [4]

Satellitennetzwerk wird mit Hilfe von autonomer Rekonfiguration ein alternativer Pfad gewählt. Die Verfügbarkeit einer Verbindung wird so gesteigert.

3. FSO-Systeme in bestehenden Satelliten-Missionen

Im Jahr 1994 hat das Communications Research Laboratory (CRL) aus Japan mit dem Engineering Test Satellite-VI (ETS-VI) den ersten space-to-ground optischen Link vorgeführt.

Im November 2001 demonstrierte die SILEX (Semiconductor-laser Intersatellite Link Experiment) Mission der ESA (European Space Agency) die erste Inter-Satellite Laser-Kommunikationsverbindung. Die Verbindung wurde zwischen den beiden Satelliten SPOT-4 und ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite) aufgebaut. Dabei sandte der Erdbeobachtungssatellit SPOT-4 mittels Laserstrahl Bilddaten an den geostationären Satelliten ARTEMIS und von dort wurden die Daten mit Radiowellen auf die Erde gesendet. Eine Datenrate von 50 Mbps (Megabit pro Sekunde) konnte erreicht werden.

2005 wurde erfolgreich eine bidirektionale Verbindung zwischen dem japanischen Satelliten OICETS und ARTEMIS aufgebaut.

Bei dem 2006 durchgeführten Experiment LOLA wurde zum ersten Mal ein bidirektionaler optischer Link zwischen ARTEMIS und einem Flugzeug in großer Höhe demonstriert.

Ein Link zwischen zwei LEO-Satelliten konnte im Februar 2008 aufgebaut werden. Zwischen dem deutschen Radar-Satelliten TerraSAR-X und dem US-amerikanischen Satelliten NFIRE wurden Daten mit 5,5 Gbps und auf einer Distanz von 5500 km ausgetauscht. Von TerraSAR-X konnte auch eine space-to-ground-Verbindung mit der optischen Bodenstation des DLR (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt) in Oberpfaffenhofen etabliert werden [1], [30].

In den nächsten Unterkapiteln werden aktuelle Missionen neueren Datums vorgestellt. Die Missionen sind unterteilt in CubeSats, Relais-Systemen und Deep-Space-Missionen.

3.1. CubeSat

Ein CubeSat besteht aus einem oder mehreren würfelförmigen Modulen. Ein Modul hat eine Seitenlänge von 10 cm. Es gibt verschiedene Standardgrößen: 1U besteht aus einem Modul, 3U besteht aus drei aneinandergereihten Mo-

Wellenlänge	rund 1550 nm (1535 und 1565 nm)
Datenrate	20 Mbps
optische Leistung	0,2 W
Pointing loss	3 dB
Optical loss	4,69 dB
Durchmesser Optik	0,02 m
Modulation	PPM
Linktyp	LEO - LEO
Linklänge	25 - 580 km

Tabelle 3.1.: Technische Daten CLICK [32]

dulen. Die Größen sind somit genormt und oftmals können überschüssige Kapazitäten einer Trägerrakete genutzt werden um die Satelliten zu starten [31].

3.1.1. CLICK - CubeSat Laser Infrared Crosslink

Die CLICK-Mission der NASA besteht aus zwei 3U-CubeSat-Satelliten. Mit Hilfe von zwei full-duplex Laserkommunikationsterminals soll es möglich sein Datenraten von 20 Mbit/s bei einem Abstand von 25 bis 580 km zu erreichen.

Ziel der Mission ist es Lasercomcrosslinks (full duplex, gleichzeitig senden und empfangen) zwischen LEO CubeSats zu demonstrieren. Damit wird ein Grundstein für beispielsweise Satellitenschwärme für Remote sensing oder globale Konstellationen gelegt.

Beide Satelliten werden zusammenhängend als ein einziges Objekt in den Orbit gebracht und entfernen sich dann voneinander. Der Abstand beträgt nach 2,3 Tagen 5 km und erreicht nach 127,8 Tagen 500 km. Am Ende der Mission treten die Satelliten in die Erdatmosphäre ein.

CLICK A ist die erste Mission. Sie dient dazu Teile des Laserkommunikationssystems mit Hilfe eines einzigen Satelliten auszutesten. Dies geschieht durch die Kommunikation zwischen dem LEO-Satelliten in einer Höhe von 400 km und einer mobilen Bodenstation (30 cm Teleskop). Der Launch von CLICK A war am 15.7.2022.

Bei der zweiten Mission, CLICK B/C, wird dann die full duplex (Senden und Empfangen zur gleichen Zeit) Kommunikation zwischen zwei CubeSats getestet. Außerdem soll gezeigt werden dass der Abstand und die relative Position der Satelliten mit einer Genauigkeit von 0,5 Metern gemessen werden kann. Der Launch ist für 2024 geplant [32], [33].

3.1.2. PIXL-1, Photo Images Cross Laser

PIXL-1 ist eine 3U CubeSat-Mission des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und TESAT. Der Launch war am 24.1.2021 in einen sonnen-synchronen Orbit. Ziel dieser Mission ist es die Fähigkeiten des CubeLCT (Cube Laser Communication Terminal) zu demonstrieren. Bei dieser Mission werden hochauflösende Bilder von CubeSats über ein CubeLCT an eine optische Bodenstation übertragen. Mit German Space Operation Center (GS-OC) wird über VHF (Very High Frequency, 30-300 MHz) und S-Band (2-4 GHz) kommuniziert. Der CubeLCT von Tesat ist ein Laserkommunikations-transmitter für die Übertragung von LEO zum Boden mit einer Datenrate von 100 Mbps. Bei der Entwicklung dieses Terminals war nicht eine hohe Datenrate das Ziel, sondern ein möglichst kompaktes Design um optische Kommunikation auch auf Kleinstsatelliten einzusetzen [34], [35].

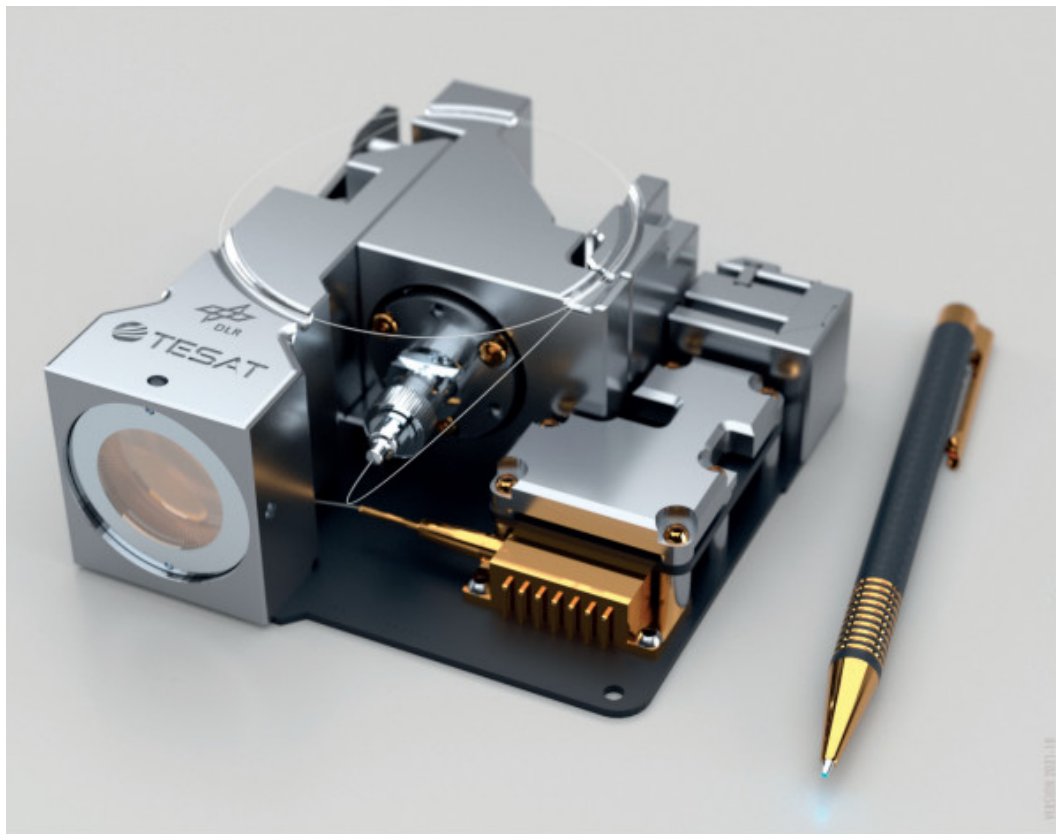


Abbildung 3.1.: TESAT CubeLCT [35]

3.1.3. TBIRD - TeraByte InfraRed Delivery

TBIRD ist eine Kleinsatelliten-Demonstration der NASA. Mit Hilfe von Laserkommunikation werden Datenraten von 200 Gbps beim Downlink

3. FSO-Systeme in bestehenden Satelliten-Missionen

Datenrate	100 Mbps LEO to ground
Energieverbrauch	8.5 W
Reichweite	1500 km
Wellenlänge	1530 bis 1565 nm
Modulation	OOK

Tabelle 3.2.: Technische Daten CubeLCT von TESAT [34], [35]

erreicht. TBIRD ist eine Payload der Pathfinder Technology Demonstrator 3 - Mission. Der Launch war im Mai 2022. Im Mai 2023 wurde zum ersten Mal eine Datenrate von 200 Gbps erreicht. Die Bodenstation befindet sich in Table Mountain, Kalifornien, und wird mit dem LCRD geteilt [36], [37].

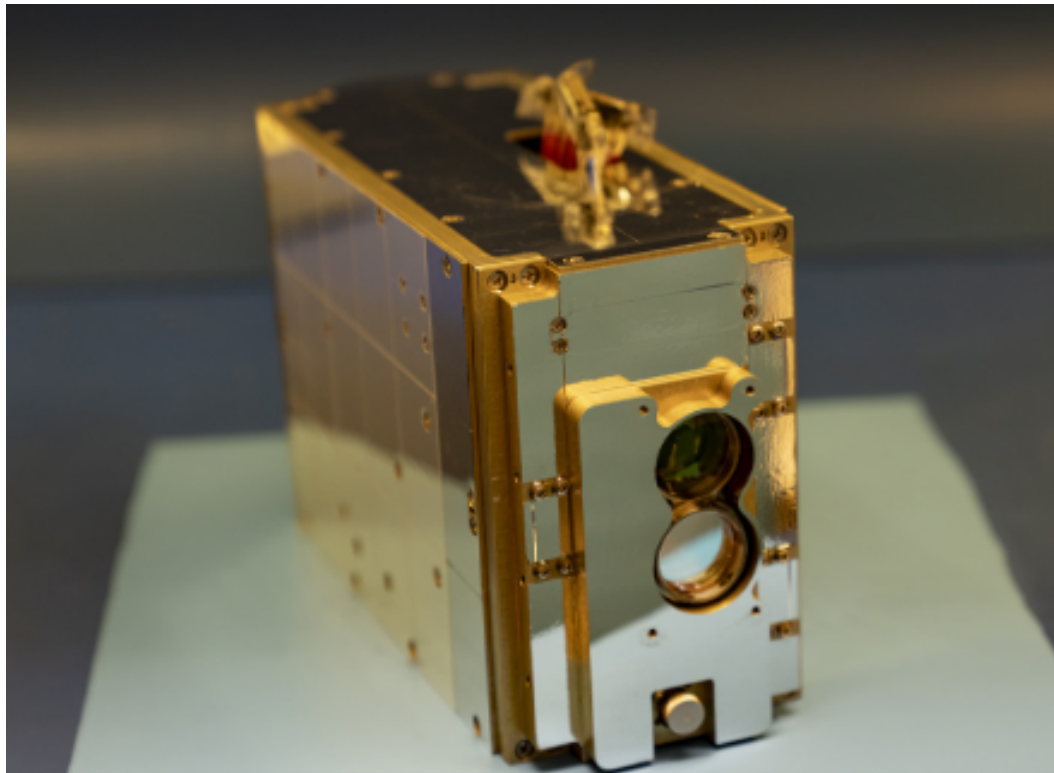


Abbildung 3.2.: TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) payload [37]

3.1.4. SeRANIS

SeRANIS (Seamless Radio Access Networks for Internet of Space) ist ein multifunktionales Satellitenlabor der Universität der Bundeswehr München. Der Launch ist geplant für 2025. Es ist dafür gedacht mehrere Technologien miteinander zu kombinieren und zum Einsatz zu bringen. Der verwendete Satellit wird ATHENE-1 sein. Sein Orbit wird sich in 500 bis 600 km

Datenrate	200 Gbps LEO to ground
Energieverbrauch	100 W
Reichweite	482 km
Wellenlänge	1550 nm
Modulation	QPSK

Tabelle 3.3.: Technische Daten TBIRD [38]

	Uplink	Downlink
Wave length	1590 nm	1550 nm
mean source power	36 dBm	30 dBm
TX aperature	0,075 m	0,02 m
RX aperature	0,02 m	0.41 m
modulation	OOK	OOK
RX gain	105,5 dB	118,4 dB
TX gain	91,9 dB	94,3 dB
pointing loss	0 dB	3 dB
TX internal loss	3 dB	1 dB

Tabelle 3.4.: Technische Daten ATHENE-1 (SeRANIS) Uplink und Downlink [40]

Höhe befinden. Die Signale werden mit optischen OOK moduliert (CCSDS Standard O3K) [39], [40].

3.2. Daten-Relais-Systeme

Bei Daten-Relais-Systemen befinden sich die Satelliten im geostationären Orbit. Sie dienen dazu Information zwischen nicht-geostationären Satelliten, diversen Flugsystemen und Bodenstationen auszutauschen. Ziel ist es große Datenmengen ohne großen Zeitverlust zu übertragen. Dies wird dadurch erreicht dass die geostationären Satelliten im Gegensatz zu z.B. LEO-Satelliten immer Sichtverbindung zur Bodenstation haben [41].

3.2.1. EDRS - European Data Relay Satellite

Neben der Übertragung großer Datenmengen und erhöhter Verfügbarkeit eines Links durch die Sichtverbindung zwischen dem GEO-Satellit und der Bodenstation, kann mit dem EDRS die Information von Erdbeobachtungssatelliten auf, anders als bisher, europäische Bodenstationen übermittelt werden. Das Erdbeobachtungsprogramm Copernicus ist der erste Nutzer des EDRS.

Das europäische Daten Relais System besteht zum heutigen Zeitpunkt

aus zwei optischen Kommunikationssatelliten, EDRS-A (Start Jänner 2016) und EDRS-C (Start August 2019). Bis zur Fertigstellung sollen zwei weitere Satelliten folgen. Am Boden gibt es drei Kontrollzentren und ein Netzwerk von Bodenstationen [41], [42].

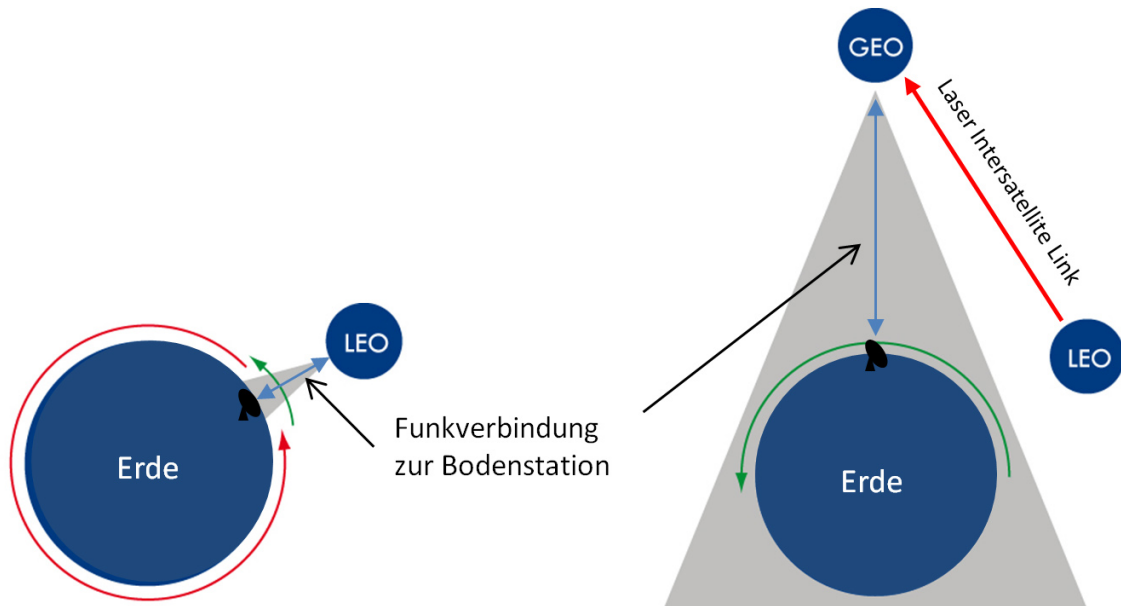


Abbildung 3.3.: EDRS-Satelliten als Relaisstation [42]

EDRS-A besteht aus einem optical inter-satellite-Link und einem Ka-band inter-satellite-Link, die als Gastnutzlast auf dem Satelliten Eutelsat 9B East betrieben werden. Seine orbitale Position ist 9° Ost.

Der zweite EDRS-Satellit ist EDRS-C (orbitale Position 31° Ost) und besitzt auch einen optical inter-satellite-Link. Dies ermöglicht den beiden Satelliten mit 1,8 Gbit/s miteinander zu kommunizieren. Der Ka-band feeder link sendet mit 300Mbit/s zum Boden.

Es ist geplant EDRS-D (Start 2024) über Japan zu positionieren um die Asien-Pazifik-Region abzudecken. Mit einem weiteren Satelliten (EDRS-E, Start 2026) über Amerika könnte weltweite Abdeckung erreicht werden. Es wird das LCT₁₃₅ von TESAT als Laserkommunikationsterminal verwendet [41], [42].

TDP1 - Technology Demonstration Payload No.1

TDP₁ kann als eine Vorläufer-Mission des EDRS angesehen werden. Es wurde entworfen als Proof of Concept vom Datentransfer zwischen LEO-Satelliten und Erde mit Hilfe von geostationären Relais-Satelliten. Am 25.

3. FSO-Systeme in bestehenden Satelliten-Missionen

Sendeleistung	2.2 W
Wellenlänge	1064 nm
Modulation	homodyne BPSK
Teleskopdurchmesser	135 mm

Tabelle 3.5.: Technische Daten LCT₁₃₅ Terminal von TESAT [43], verwendet bei EDRS und TDP₁

Datenrate	10000 Mbps
Modulationsart	DPSK
Wellenlänge	1550 nm

Tabelle 3.6.: Technische Daten ILLUMA-T [38]

Juli 2013 war der Launch des Satelliten Alphasat-I-XL, an Board ist das TDP-1 Laser Communication Terminal (LCT) als Payload. Ebenso an Board ist ein Ka-Band payload. Es werden Satellite-to-Ground Links vom LCT an verschiedene Bodenstationen ausgeführt. Diese Mission verwendet das LCT₁₃₅ von TESAT [43].

3.2.2. LCRD - Laser Communications Relay Demonstration

LCRD ist das Zwei-Wege-Relais-System der NASA. Die Satelliten befinden sich im geostationären Orbit. Ziel ist es dass andere Missionen, die Laserkommunikation verwenden, keine Sichtverbindung zur Erde brauchen und stattdessen ihre Daten an LCRD senden, von dort wird es an die Erde weitergesendet.

Die Bodenstationen befinden sich in Table Mountain, Kalifornien, und Haleakala, Hawaii [44].

ILLUMA-T, Integrated Laser Communications Relay Demonstration Low-Earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal

ILLUMA-T ist ein Payload an Bord der Internationalen Raumstation ISS. Das Terminal dient dazu wissenschaftliche Daten von Experimenten und Messinstrumenten an Board der Raumstation an LCRD zu senden. Vom LCRD werden die Daten an eine Bodenstation übermittelt und von dort aus zum Mission Operation Center gesendet. Der Launch war im November 2023 [44].

3.2.3. The Kepler Network

Kepler Communications, Inc. ist ein Anbieter von Satellitenkommunikation mit Sitz in Kanada. Zum The Kepler Network gehört eine bestehende

optical head aperature	80 mm
Wellenlänge	1550 nm
Modulation	OOK

Tabelle 3.7.: Technische Daten SCOT80 Terminal von TESAT [46]

Konstellation von 21 RF-Satelliten und soll zu einem hybriden optischen Datenrelais-Netzwerk ausgebaut werden. Es ist geplant den optischen Service ab 2025 anzubieten.

Im November 2023 war der Launch von zwei Satelliten mit SCOT80 optischen Terminals von TESAT an Bord. Die beiden Satelliten fungieren als Relaisatelliten im erdnahen Orbit (LEO) in einer Höhe von ca. 520 bzw. 530 km Höhe. Via optischen inter-satellite Links werden Daten zwischen den zwei übertragen [45].

3.3. DSOC - Deep Space Optical Communications

DSOC ist die erste Demonstration von optischer Kommunikation außerhalb des Erd-Mond-Systems der NASA. Die NASA möchte damit testen wie Laserkommunikation die Datenübertragungsraten von Deep Space Missionen erhöhen kann.

Das DSOC-System besteht aus einem Flug-Laser-Transceiver, einem Boden-Laser-Sender und einem Boden-Laser-Empfänger. Der Launch war am 13. Oktober 2023. Der Transceiver ist eine piggyback-Nutzlast der Psyche Raumsonde, die den Asteroiden Psyche erforschen soll. Die Psyche-Mission selbst verwendet RF-Technologie zu Kommunikationszwecken.

Da es bisher keine Infrastruktur für "deep space optical communications" gab, wurden zwei Teleskope auf der Erde so weit auf den Stand gebracht dass sie mit dem Transceiver auf der Raumsonde kommunizieren können. Der Sender wurde in das Optical Communications Telescope Laboratory der JPL Table Mountain Einrichtung nahe Wrightwood, Kalifornien integriert. Das vom Sender gesendete modulierte Signal dient als Beacon, damit der Laserstrahl zielgerichtet auf die Erde gesendet werden kann.

Bei der Übertragung eines 15-Sekunden-Videos in ultra-high-definition Qualität über eine Strecke von 31 Millionen Kilometer an die Erde konnte eine maximale Datenrate von 267 Mbps erzielt werden. Dieses Experiment fand am 11. Dezember 2023 statt.

Am 8. April 2024 wurde auf einer Distanz von 226 Million Kilometer (1,5 mal die Entfernung zwischen Sonne und Erde) Daten von Psyche zur Erde gesendet. Eine Datenrate von 25 Mbps wurde dabei erreicht.

Am 24 Juni 2024 wurde eine Datenrate von 6,25 Mbps gemessen. Die maximale Datenrate lag bei 8,3 Mbps. An diesem Tag betrug die Entfernung

3. FSO-Systeme in bestehenden Satelliten-Missionen

	Flug-transceiver	Bodensysteme
Sendeleistung	4 W average	5 KW average
Wellenlänge	1550 nm	1064 nm
Modulation	PPM	PPM
Teleskopdurchmesser	22 cm	1 m (uplink) / 5 m (downlink)

Tabelle 3.8.: Technische Daten DSOC [47], [51]

zwischen der Raumsonde und der Erde 390 Millionen Kilometer [47]–[50].

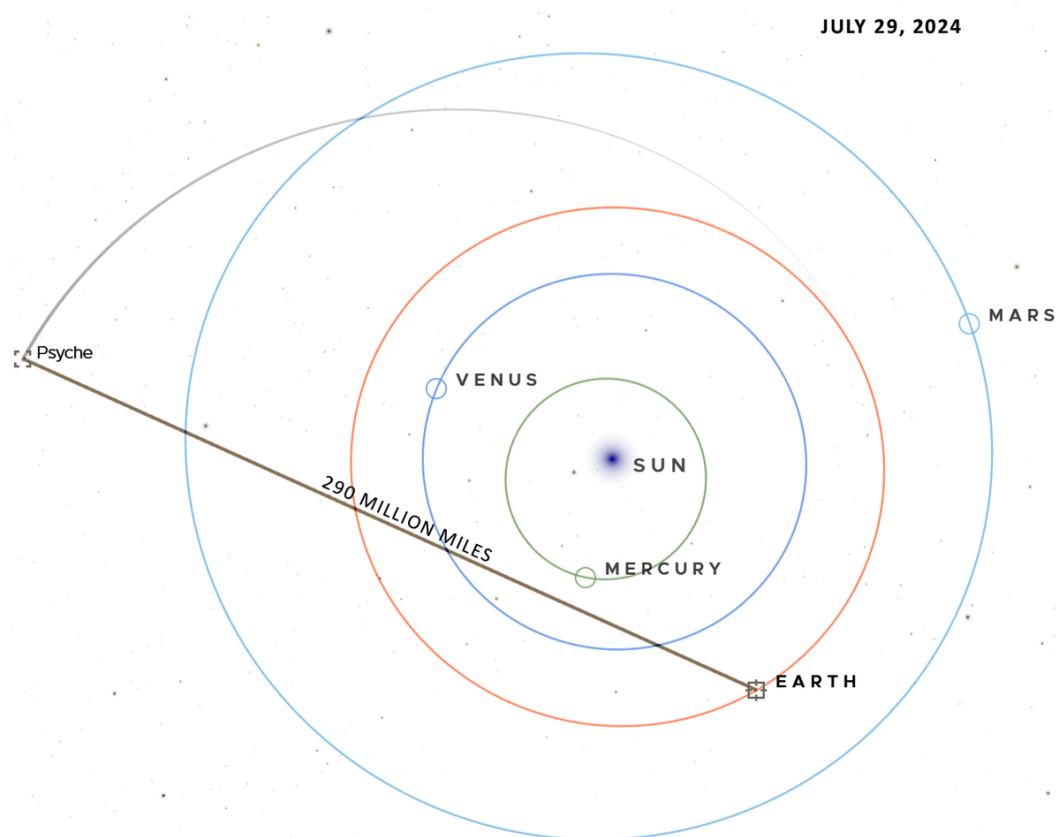


Abbildung 3.4.: Position von Psyche am 29. Juli 2024, Entfernung zur Erde 460 Millionen Kilometer (290 Millionen Meilen) [48], modifiziert

4. Simulation von Wettereinflüssen bei FSO-Links

Bei der Simulation wird die Dämpfung die durch die Strahlaufweitung entsteht und die Verluste die in der Troposphäre auftreten berechnet. Diese Verluste entstehen durch Wetterbedingungen wie Nebel, Regen, Wolken und Schnee. Außerdem kommt es durch atmosphärische Turbulenzen ebenfalls zu einer Dämpfung des Signals.

4.1. Dargestellte Parameter

In diesem Teil werden die in der Simulation implementierten Formeln beschrieben.

4.1.1. Link Margin

Die durchschnittliche empfangene optische Leistung P_r wird auf folgende Art berechnet:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \eta_r \cdot \eta_t \cdot L_{fs} \cdot L_{atmosphere} \cdot L_{pe} \quad (4.1)$$

$$L_{atmosphere} = L_{ab} \cdot L_{cloud} \cdot L_{rain} \cdot L_{snow} \cdot L_{tur} \quad (4.2)$$

P_t :	gesendete optische Leistung
G_r :	Empfängergewinn
G_t :	Sendergewinn
η_r :	optische Effizienz Empfänger
η_t :	optische Effizienz Sender
L_{fs} :	free space path loss, Freiraumdämpfung
$L_{atmosphere}$:	Verluste die durch die Atmosphäre entstehen
L_{ab} :	Verluste durch Streuung und Absorption in der Atmosphäre
L_{cloud} :	Verluste durch Wolken und Nebel
L_{rain} :	Verluste durch Regen
L_{snow} :	Verluste durch Schnee
L_{tur} :	Verluste durch atmosphärische Turbulenzen
L_{pe} :	Verluste durch Pointing Error

Der Link Margin in dB ergibt sich wie folgt:

$$LM = P_t - P_r \quad (4.3)$$

4.1.2. Sender- und Empfängergerinn

Laut [7] lässt sich der Gewinn (Gain) für die Sende- und Empfangsantennen auf folgende Art berechnen:

$$G = \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \quad (4.4)$$

G	Gewinn	[dB]
D	Durchmesser Antenne	[m]
λ	Wellenlänge	[m]

4.1.3. Free Space Path Loss

Der Free Space Path Loss FSPL (in dB) zwischen Sender und Empfänger lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$FSPL = \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d_{GS}} \right)^2 \quad (4.5)$$

d_{GS} beschreibt den Abstand zwischen Sender und Empfänger. Bei Links zwischen Satellit und Bodenstation wird dieser Abstand (slant distance) laut [52] so berechnet:

$$R = R_E + h_{GS} \quad (4.6)$$

$$H = h_{Sat} - h_{GS} \quad (4.7)$$

$$d_{GS} = R \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{R+H}{R} \right)^2 - \cos(\theta_e)^2} - \sin(\theta_e) \right) \quad (4.8)$$

Laut [53] kann die Entfernung zwischen Sender und Empfänger auch mittels Flat Earth Model auf folgende Weise angenähert werden:

$$d_{GS} = (h_{Sat} - h_{GS}) \cdot \sec(\theta_z) \quad (4.9)$$

Je kleiner der Elevationswinkel ist desto größer ist die Abweichung zwischen dieser Annäherung und der Entfernung laut Formel 4.8.

R_E	Erdradius (Annahme: 6,378.1 km)	[km]
h_{GS}	Höhe der Bodenstation über Seehöhe	[km]
h_{Sat}	Höhe des Satelliten	[km]
θ_e	Elevationswinkel	[°]
θ_z	Zenitwinkel ($\theta_z = 90 - \theta_e$)	[°]

4.1.4. Geometrische Verluste - Strahldivergenz

Alternativ zu der Berechnung von Gewinn der Sende -und Empfangsantennen und des Free Space Path Losses und anschließender Bilden der Summe dieser drei Werte, kann der geometrische Verlust verwendet werden.

Durch die Aufweitung des Laserstrahls kommt es bei langen Übertragungsstrecken zur Dämpfung des Signals beim Empfänger, da der Strahl breiter ist als die Linse des Empfängers und daher nicht die gesamte Information bei Empfänger ankommt. Laut [54] berechnet sich diese Dämpfung (in dB) wie folgt:

$$a_{geo} = 20 \cdot \log \left(\frac{D_{tx} + \theta \cdot R}{D_{rx}} \right) \quad (4.10)$$

D_{tx}	Linsendurchmesser Sender	[m]
D_{rx}	Linsendurchmesser Empfänger	[m]
R	Distanz zwischen Sender und Empfänger	[km]
θ	Strahldivergenz (beam opening angle) Sender	[mrad]

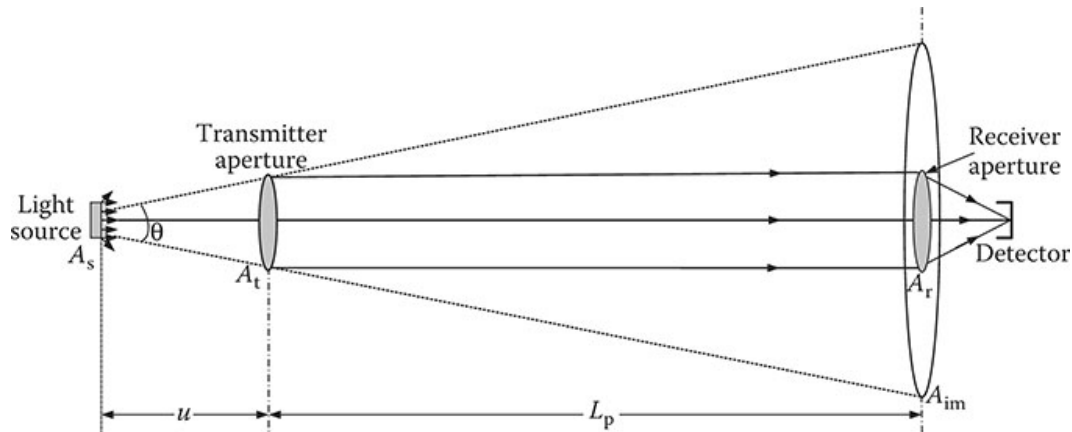


Abbildung 4.1.: Aufweitung des Laserstrahls [13]

4.1.5. Verlust durch Streuung

Durch Partikel und Wassertröpfchen in der Atmosphäre kommt es zu Streuung entlang des Ausbreitungsweges und somit zu einer Dämpfung des

Signals.

Wolken- und Nebelverluste

Der Einfluss von Wolken und Nebel wird in [55] beschrieben. In diesem Modell wird angenommen das Nebel sich wie eine Wolke mit Bodenkontakt verhält. Um die Dämpfung zu berechnen wird die Sichtweite benötigt. Die Sichtweite V (in km) lässt sich aus dem liquid water content (LWC) und der cloud number density (N) bestimmen.

$$V = \frac{1.002}{(LWC \cdot N)^{0.6473}} \quad (4.11)$$

Dämpfungskoeffizient:

$$A = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (4.12)$$

Der Koeffizient δ wird durch das Kim-Model definiert.

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V < 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases} \quad (4.13)$$

Die Dämpfung durch Wolken und Nebel in dB ergibt sich so:

$$a_{Cl} = 4.3429 \cdot A \cdot d_T \quad (4.14)$$

d_T ist hierbei die Dicke (vertikale Ausdehnung) der Troposphäre bzw. der Wolke oder des Nebels.

Niederschlag

In [56] und [1] werden Formeln für die Berechnung der Dämpfung durch Regen und Schnee vorgestellt. Der Einfachheit halber verwendet man für die Berechnung nur die Regenrate. Für ein genaueres Ergebnis bräuchte man noch die Tropfengröße, die Fallgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, die Deformation der Tropfen, sowie deren Neigung.

$$a_{rain} = 1.076 \cdot R^{2/3} \quad (4.15)$$

Bei Schnee wird zwischen trockenem und nassem Schnee unterschieden.

$$a_{snow} = a \cdot S^b \quad (4.16)$$

Multiplikativer Dämpfungskoeffizient bei nassem Schnee:

$$a = 1.023 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda + 3.7855466 \quad (4.17)$$

Multiplikativer Dämpfungskoeffizient bei trockenem Schnee:

$$a = 5.42 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda + 5.4958776 \quad (4.18)$$

Die Werte des potentiellen Dämpfungskoeffizienten b sind $b = 1.38$ (trockener Schnee) und $b = 0.72$ (nasser Schnee).

R	Regenrate	[mm/h]
a_{rain}	Dämpfung durch Regen	[dB/km]
S	Schneerate	[mm/h]
λ	Wellenlänge	[nm]
a	multiplikativer Dämpfungskoeffizient	[dB · h/m ²]
a_{snow}	Dämpfung durch Schneefall	[dB/km]

4.1.6. Szintillation, atmosphärische Turbulenzen

Die unterschiedlichen Brechungsindizes die durch Temperatur- und Druckunterschiede entstehen führen zu einer Dämpfung des Signals. Laut [56] berechnen sich bei "weak fluctuation" die Verluste durch Szintillation in dB wie folgt:

$$a_{scin} = 2 \cdot \sqrt{23.17 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 10^9 \right)^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot l^{11/6}} \quad (4.19)$$

λ ist die Wellenlänge in nm. Die Distanz innerhalb der Troposphäre wird mit l [m] bezeichnet. Die Strukturkonstante C_n^2 [$m^{-2/3}$] kann Werte zwischen 10^{-16} (low turbulence) und 10^{-13} (high turbulence) annehmen [57].

In den nächsten Abschnitten wird die Dämpfung durch Szintillation auf eine andere Art berechnet. Zuerst wird der Turbulenz-Struktur-Parameter C_n^2 in Abhängigkeit von der Höhe modelliert. Für die anschließende Bestimmung des Szintillationsverlustes muss festgelegt werden wie viel der Übertragungszeit ausfallen darf und der Szintillationsindex berechnet werden.

Turbulenz-Struktur-Parameter

Der Turbulenz-Struktur-Parameter C_n^2 ist abhängig von der Höhe und beschreibt die Stärke der atmosphärisch-induzierten Turbulenz in $m^{-2/3}$. Die Strukturkonstante C_n^2 [$m^{-2/3}$] kann Werte zwischen 10^{-16} (low turbulence) und 10^{-13} (high turbulence) annehmen [57]. Es gibt mehrere Modelle die

diesen Parameter beschreiben. Im folgenden wird das Hufnagel-Valley 5/7 Modell verwendet.

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v_{rms}}{27} \right)^2 (10^{-5} \cdot h)^{10} \cdot e^{\frac{-h}{1000}} + 2.7 \cdot 10^{16} \cdot e^{\frac{-h}{1500}} + C_0 \cdot e^{\frac{-h}{100}} \quad (4.20)$$

v_{rms} ist die r.m.s. (root mean square) Windgeschwindigkeit entlang des vertikalen Wegs. Wenn die Windgeschwindigkeit unbekannt ist wird ein Wert von 21 m/s für v_{rms} angenommen. C_0 ist der Nennwert von C_n^2 auf Bodenniveau und hat einen von $1.7 \cdot 10^{-14} m^{-2/3}$ [58].

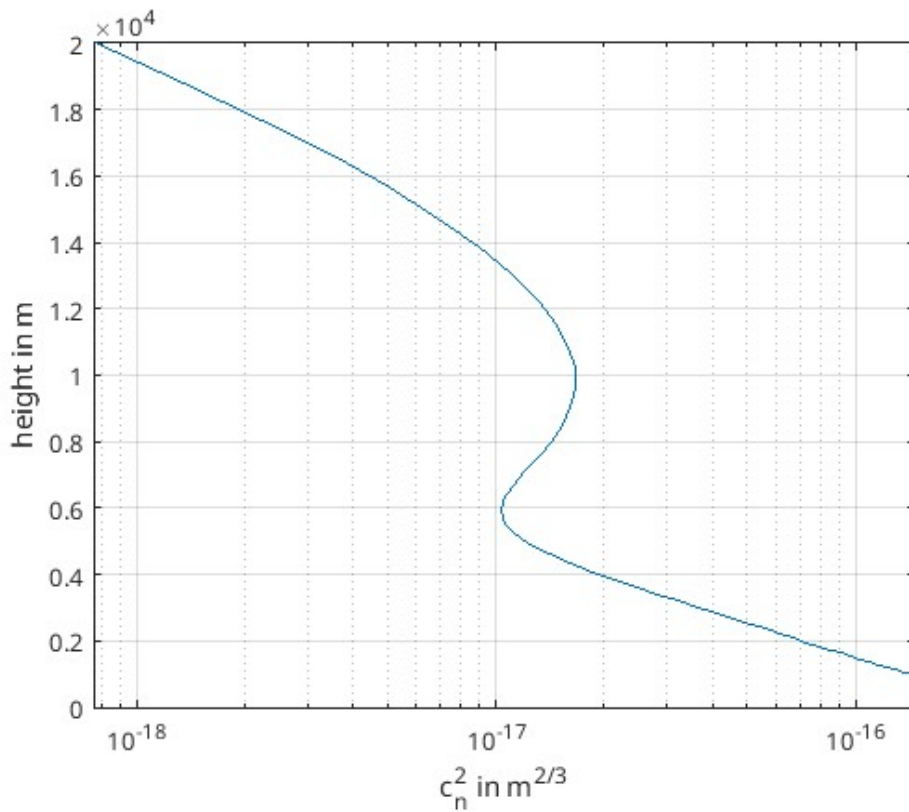


Abbildung 4.2.: Struktur-Parameter, bei moderaten Turbulenzen ($C_0 = 1.7 \cdot 10^{-14} m^{-2/3}$, $v_{rms} = 21 m/s$)

Verlust durch Szintillation

In [1], [6] und [53] werden die Verluste, die durch Szintillation entstehen, beschrieben.

Durch atmosphärische Turbulenzen kommt es zu Fading und damit zu Verlusten. Beim Threshold Approach wie in [59] beschrieben gilt folgendes: Das Modell nimmt eine log-normal Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

an. Der Parameter p_{thr} ist die akzeptierte Ausfallzeit bei der die empfangene Leistung unter einem gewissen Minimum liegt ($P_{RX} < P_{min}$). Als zusätzlichen Verlust betrachtet man die benötigte Leistungs-Marge zwischen der durchschnittlichen empfangenen Leistung P_0 und P_{min} . Dieser Verlust wird als Szintillationsverlust definiert.

$$L_{SI} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{min}}{P_0} \right), L_{SI} < 0 \quad (4.21)$$

Bei diesem Ansatz geht man davon aus, dass bei $P_{RX} < P_{min}$ kein Empfang von Daten möglich ist. Diese eher pessimistische Annahme passt gut zu Übertragungsprotokollen wie Ethernet oder Digitalfernsehen [59].

Nach Einsetzen der log-normal Empfangsleistungsverteilung in obige Formel wird der Szintillationsverlust in dB so berechnet:

$$L_{SI} = 4.343 \operatorname{erf}^{-1}(2p_{thr} - 1) [2 \ln(\sigma_i^2 + 1)]^{1/2} - 1/2 \ln(\sigma_i^2 + 1) \quad (4.22)$$

σ_i^2 ist der Szintillationsindex.

In [6] ist die Berechnung des Szintillationsindexes wie folgt beschrieben. Beim Downlink verwendet man diese Formeln:

$$\sigma_{Bd}^2 = 2.25 k^{7/6} ((\sec(\theta_z))^{11/6} \int_{h_{GS}}^{h_{Sat}} C_n^2(h) (h - h_{GS})^{5/6} dh \quad (4.23)$$

$$\sigma_{I,downlink}^2 = \exp \left[\frac{0.49 \sigma_{Bd}^2}{(1 + 1.11 \sigma_{Bd}^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51 \sigma_{Bd}^2}{(1 + 0.69 \sigma_{Bd}^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \quad (4.24)$$

Beim Uplink werden folgende Formeln genutzt:

$$\sigma_{Bu}^2 = 2.25 k^{7/6} d_{GS} \int_{h_{GS}}^{h_{Sat}} C_n^2(h) \left(1 - \frac{h - h_{GS}}{h_{Sat} - h_{GS}} \right)^{5/6} \left(\frac{h - h_{GS}}{h_{Sat} - h_{GS}} \right)^{5/6} dh \quad (4.25)$$

$$\sigma_{I,uplink}^2 = \exp \left[\frac{0.49 \sigma_{Bu}^2}{(1 + 0.56 \sigma_{Bu}^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51 \sigma_{Bu}^2}{(1 + 0.69 \sigma_{Bu}^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \quad (4.26)$$

Der Parameter k ist die Wellenzahl ($k = 2\pi/\lambda$) und θ_z ist der Zenithwinkel in Grad.

Atmosphärische Kohärenzlänge

Die atmosphärische Kohärenzlänge r_0 wird auch Fried's Parameter genannt. Die Kohärenzlänge beschreibt den effektiven Durchmesser einer Öffnung, die durch atmosphärische Turbulenzen beeinflusste Energie empfängt. Wenn der Durchmesser einer Öffnung kleiner oder gleich der Kohärenzlänge r_0 ist, wird diese Öffnung die Energie eines kohärenten Teils der Wellenfront

einfangen. Bei einem größeren Durchmesser wird eine gestörte Wellenfront empfangen. Ein kleiner Wert von r_0 wird mit starken Turbulenzen in Verbindung gebracht [1], [53], [58].

$$r_0 = \left(0.423 k^2 \sec(\theta_z) \int C_n^2(h) dh \right)^{-3/5} \quad (4.27)$$

k	Wellenzahl ($2 \cdot \pi / \lambda$)	$[m^{-1}]$
C_n^2	Turbulenz-Struktur-Parameter	$[m^{-2/3}]$
θ_z	Zenitwinkel	$[^\circ]$

Beam Wander

Es kann durch Turbulenzzellen die größer sind als der Lichtstrahl sind zu einer Ablenkung des Strahls kommen. Da beim Downlink der Strahl breiter als eine Zelle der Turbulenz kann dieser Effekt beim Downlink vernachlässigt werden [53].

In [60] und [53] werden folgende Formeln für die Berechnung des Verlusts durch Beam Wander angegeben:

$$\langle r_c^2 \rangle = 0.54 d_{GS}^2 \left(\frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left(\frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3} \quad (4.28)$$

$$d_T^2 = 8W_0^2 \quad (4.29)$$

$$\theta_{BW} = \frac{\sqrt{\langle r_c^2 \rangle}}{d_{GS}} \quad (4.30)$$

$$L_{BW} = \exp(-G_T \theta_{BW}^2) \quad (4.31)$$

$\langle r_c^2 \rangle$	beam wander Varianz	
θ_{BW}	angular beam wander	[rad]
d_{GS}	Abstand zwischen Sender und Empfänger	[m]
W_0	Strahlradius Sender	[m]
L_{BW}	Verlust durch beam wander	
G_T	Sender-Gewinn	

Turbulenzinduzierte Strahlverbreiterung

Der im folgenden beschriebene Verlust tritt nur beim Uplink auf und wird in [1] und [53] beschrieben. Turbulenzinduziertes beam spreading tritt auf wenn die Turbulenzzellen kleiner als die Strahlenbreite sind. Die so entstehende Beugung und Streuung des einfallenden Strahls führt zu einer Verzerrung der Wellenfront. Durch Beam Wander bewegt sich der Lichtstrahl (den man eine kurze Zeit betrachtet, short term) und dadurch vergrößert sich die Ausdehnung des Lichtstrahls (die man längere Zeit betrachtet, long term) am Empfänger.

Mit Hilfe der Strehl-Zahl kann der Verlust durch turbulenzinduzierte Strahlverbreiterung berechnet werden. In diesem Fall ist es das Verhältnis zwischen on-axis mean Bestrahlung im Fall von Turbulenzen und ohne Turbulenzen auf der Bildebene des Empfängers. Mit folgender Formel wird der Verlust in dB berechnet.

$$L_{SR} = \left[1 + \left(\frac{D_{tx}}{r_0} \right)^{5/3} \right]^{-6/5} \quad (4.32)$$

4.2. Implementierung

Im Folgenden wird beschrieben wie mit Hilfe von Matlab die Verluste durch Witterungseinflüsse berechnet werden. Außerdem wird die grafische Benutzeroberfläche, die zur Eingabe der benötigten Parameter sowie zur Ausgabe der berechneten Dämpfungen verwendet wird, vorgestellt.

4.2.1. Simulation mit Matlab

Für die Berechnung des Streuverlusts durch Wolken und Nebel wird die Troposphäre in Schichten unterteilt und für jede Schicht wird mit Hilfe des liquid water contents und der cloud number density bzw. mit Hilfe der Sichtweite die Dämpfung berechnet. Die Schichten und ihre Höhe richten sich nach den eingestellten Wetterbedingungen. Die erste Schicht ist die unterste. Sie hat eine Höhe von 0,5 km. Die nächste Schicht erstreckt sich bis zur Wolkenbasis in 2 km Höhe. Bei Wolken folgt eine Schicht mit 1 km Höhe bzw. bei Nimbostratus-Wolken mit 4 km Höhe. Sind keine Wolken angegeben ist diese Schicht 0 km hoch. Die letzte Schicht geht bis zum Ende der Troposphäre. Bei Nebel werden für die Berechnung der Dämpfung verschiedene Sichtweiten je nach Art des Nebels verwendet. Diese in Tabelle 4.1 angegebenen Sichtweiten orientieren sich an den Werten in [61].

Bei Wolken kommen die in [55] erwähnten Werte für LWC (liquid water content) und N (cloud number density) zum Einsatz um die Sichtweite und in Folge daraus die Dämpfung zu berechnen. Die Werte befinden sich in der

Nebelart	Sichtweite
haze	2,8 km
thin	2 km
moderate	0,5 km
thick	0,2 km

Tabelle 4.1.: angenommene Sichtweiten bei Nebel

Wolkenart	N (cm^{-3})	LWC (g/m^3)
Cumulus	250	1,0
Stratus	250	0,29
Stratocumulus	250	0,15
Altostratus	400	0,41
Nimbostratus	200	0,65
Cirrus	0,025	0,06405

Tabelle 4.2.: cloud number density N und Liquid water content LWC für verschiedene Wolkenarten [55]

Tabelle 4.2. In Schichten in denen weder Nebel noch Wolken vorkommen, wird eine Sichtweite von 100 km angenommen.

Für die Berechnung des Szintillationsverlusts laut Formel 4.22 wird eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 5% ($p_{threshold} = 0,05$) angenommen. Der Turbulenz-Struktur-Parameter auf Bodenniveau nimmt je nach Stärke der Turbulenz verschiedene Werte an. Bei *low turbulence* ist er $3 * 10^{-16}$, bei *moderate* ist er $1,7 * 10^{-14}$ und bei *high* hat er einen Wert von $1,7 * 10^{-13}$.

Die Strehl-Ratio und die Dämpfung durch Beam Wander werden nur beim Uplink berechnet.

4.2.2. GUI - Grafische Benutzeroberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit dem Qt Designer (Version 5.15.8) gestaltet. Aus dem so erstellten ui-File wurde mittels Python ein lauffähiges Programm erzeugt. In dem Python-File wird die Matlab-Funktion für das Erstellen des Link Budget mit Hilfe einer Matlab-Engine aufgerufen. Die so gewonnenen Ergebnisse werden in eine .mat-Datei gespeichert und auf der Benutzeroberfläche dargestellt.

Einstellmöglichkeiten der GUI

Die einzelnen Einstellmöglichkeiten der Benutzeroberfläche werden in diesem Abschnitt genauer erläutert.

Link-Parameter:

- (a) wave length: Hier wird die Wellenlänge in Nanometer angegeben.
- (b) link type: Es kann zwischen Downlink und Uplink ausgewählt werden.
- (c) elevation angle: Das ist die Eingabe des Elevationswinkel. Er wird in Grad angegeben. Ein Winkel von 90° einer Ausrichtung der Bodenstation senkrecht nach oben.

Einstellungen Sender/Transmitter und Empfänger/Receiver

- (a) aperatur diameter: Hier wird der Durchmesser der Linse der Empfangsoptik eingetragen. Der Wert wird in Meter angegeben.
- (b) height: An dieser Stelle wird Höhe der Station angegeben. Die Höhe bezieht sich auf die Seehöhe und wird in Kilometer angegeben.
- (c) pointing error, field of view: Hier kann der Aufweitungswinkel des Laserstrahls eingetragen in Milliradian werden. Je größer dieser Winkel ist umso weniger Energie kommt beim Empfänger an (siehe Abschnitt 4.1.4).

Einstellungen der Atmosphäre

- (a) Fog: Aus der Liste können folgende Arten von Nebel eingetragen werden: none, haze, thin, moderate und thick.
- (b) Clouds: Hier kann man auch einer Liste einen Wolkentyp auswählen. Zur Auswahl stehen : none, Cumulus, Stratus, Stratocumulus, Altostratus, Nimbostratus und Cirrus.
- (c) height troposphere: An dieser Stelle wird die Höhe der Troposphäre eingetragen. Je nach Jahreszeit und Ort variiert die Höhe der Troposphäre. Die Angabe erfolgt in Kilometer.
- (d) percipitation: Die Art des Niederschlags kann hier ausgewählt werden. Wird Regen (rain) oder Schnee (snow) ausgewählt, erscheint ein Slider mit dem die Regenrate in mm/h eingestellt wird.
- (e) snow characteristic: Ob es sich um trockenen oder nassen Schnee handelt wird hier eingestellt.
- (f) turbulence: Es kann zwischen drei Stärken der atmosphärischen Turbulenz ausgewählt werden: low, moderate und high.

Aus der angegebenen Höhe (height) des Senders und des Empfängers wird der Abstand zwischen den beiden ermittelt. Der Abstand hat großen Einfluss auf die Berechnung des geometrischen Verlusts, der durch die Aufweitung des Lichtstrahls entsteht. Die Abbildung 4.4 zeigt, dass die Fläche des Strahls bei doppelter Entfernung erheblich größer ist als bei einfacher Entfernung. Da die Fläche des Empfängers gleich bleibt, kommt dort, bei größerer Entfernung zum Sender, weniger Energie an.

4. Simulation von Wettereinflüssen bei FSO-Links

Effects on Optical Link

Datei
Scenarios

Link

wave length in nm:

link type:

elevation angle in degree:

Transmitter

aperture diameter in m:

height in km above sea level:

pointing error, field of view in mrad:

Receiver

aperture diameter in m:

height in km above sea level:

pointing error, field of view in mrad:

Atmosphere

Fog:

Clouds:

height troposphere in km:

precipitation: ☒ none ☐ rain ☐ snow

0 mm/h

snow characteristic: ☒ dry ☐ wet

turbulence: ☒ low ☐ moderate ☐ high

Calculate

Link Budget

	Effect	Attenuation / Gain in dB
1	Receiver Gain	126.14
2	Transmitter Gain	86.14
3	Free Space Path Loss	269.64
4	Geometrical Loss	57.48
5	Scattering Loss	0.41
6	Rain Loss	0.0
7	Snow Loss	0.0
8	Scintillation Loss 1	1.6
9	Scintillation Loss 2	1.97
10	Strehl Ratio	0.0
11	Beam Wander Loss	0.0

Abbildung 4.3.: grafische Benutzeroberfläche

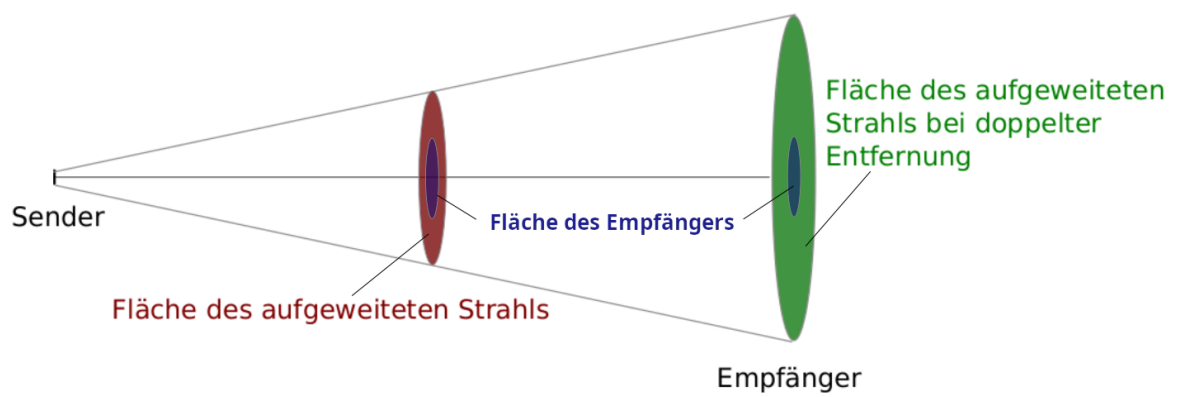


Abbildung 4.4.: Strahlaufweitung bei einfacher und doppelter Entfernung

5. Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation bei unterschiedlichen Bedingungen vorgestellt. Es werden hierbei Space-To-Ground Links simuliert. Im ersten Abschnitt werden verschiedene Systeme miteinander verglichen. Die Systeme unterscheiden sich dabei bei der verwendeten Wellenlänge, der Höhe des Satelliten, Elevationswinkel und Linsendurchmesser. Im zweiten Abschnitt werden die Wetterbedingungen variiert. Beim dritten Abschnitt unterscheidet man zwischen Uplink und Downlink. Der angegebene Szintillationsverlust wurde mit der Formel 4.22 berechnet.

5.1. Vergleich verschiedener FSO-Systeme

In diesem Teil werden verschiedene System miteinander verglichen. In der Tabelle 5.1 sind jene Parameter angeführt die sich bei den Simulationen für den Vergleich verschiedener Systemen nicht ändern. Aus der Tabelle 5.2 ist ersichtlich dass bei einer größeren Entfernung zwischen Sender und Empfänger der geometrische Verlust höher ist, ebenso bei einem geringeren Elevationswinkel da auch hier der Abstand zwischen Sender und Empfänger größer ist. Der Elevationswinkel hat auch die anderen Verluste Einfluss, da der Weg des Lichtstrahls durch Atmosphäre bei geringerem Elevationswinkel verlängert ist. Ein größerer Linsendurchmesser bei Sender und/oder Empfänger führt zu einer Verringerung des geometrischen Verlusts.

Linktyp	Downlink
Höhe der Bodenstation	0 m
Höhe Troposphäre	12 km
Nebel	kein Nebel
Wolken	wolkenlos
Niederschlag	kein Niederschlag
atmosphärische Turbulenzen	gering

Tabelle 5.1.: Einstellungen für den Vergleich verschiedener FSO-Systeme

5. Simulationsergebnisse

eingestellt					
Wellenlänge	1550 nm	1064 nm	1550 nm	1550 nm	1550 nm
Elevationswinkel	60°	60°	40°	60°	60°
Sender (Satellit)					
Linsendurchmesser	2 cm	2 cm	2 cm	10 cm	2 cm
Field of view	0,2 mrad	0,2 mrad	0,2 mrad	0,2 mrad	0,2 mrad
Höhe	550 km	550 km	550 km	550 km	36000 km
Empfänger					
Linsendurchmesser	60 cm	60 cm	60 cm	1 m	60 cm
Field of view	0,2 mrad	0,2 mrad	0,2 mrad	0,2 mrad	0,2 mrad
simuliert					
geometrischer Verlust	46,40 dB	46,40 dB	48,65 dB	41,97 dB	81,76 dB
Verlust Wolken, Nebel	0,44 dB	0,82 dB	0,60 dB	0,44 dB	0,44 dB
Szintillationsverlust	2,21 dB	2,71 dB	2,85 dB	2,21 dB	2,21 dB
Niederschlag	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB

Tabelle 5.2.: Ergebnisse bei Vergleich verschiedener FSO-Systeme

5.2. Vergleich unterschiedlicher Wetterbedingungen

Hier werden die Auswirkungen verschiedener Wetterszenarien betrachtet. Aus der Tabelle 5.4 ist ersichtlich, dass dichter Nebel und Wolken zu erheblichen Verlusten führen. In der Tabelle 5.3 befinden sich die Einstellungen für der Simulation die bei der Simulation unterschiedlicher Wetterszenarien gleich bleiben.

5.3. Einfluss von Turbulenzen

In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zwischen Up- und Downlink ersichtlich. Die Verluste durch Beam Wander und Beam Spreading werden beim Downlink vernachlässigt.

5. Simulationsergebnisse

Linktyp	Downlink
Wellenlänge	1550 nm
Elevationswinkel	60°
Höhe Troposphäre	12 km
Sender	
Linsendurchmesser	2 cm
Field of view	0,2 mrad
Höhe (über Meeresniveau)	550 km
Empfänger	
Linsendurchmesser	60 cm
Field of view	0,2 mrad
Höhe (über Meeresniveau)	0 km
Atmosphärische Turbulenzen	gering

Tabelle 5.3.: Einstellungen für den Vergleich verschiedener Wetterbedingungen

eingestellt					
Wolken	keine	keine	Cumulus	keine	keine
Nebel	leicht	dicht	keiner	keiner	keiner
Regen	keiner	keiner	keiner	4 mm/h	keiner
Schnee	keiner	keiner	keiner	keiner	4 mm/h, nass
simuliert					
geometrischer Verlust	46,40 dB	46,40 dB	46,40 dB	46,40 dB	46,40 dB
Verlust Wolken, Nebel	2,90 dB	49,45 dB	698,26 dB	0,44 dB	0,44 dB
Szintillationsverlust	2,21 dB	2,21 dB	2,21 dB	2,21 dB	2,21 dB
Niederschlag	0 dB	0 dB	0 dB	6,26 dB	24,71 dB

Tabelle 5.4.: Ergebnisse bei Vergleich verschiedener Wetterbedingungen

5. Simulationsergebnisse

eingestellt		
Wellenlänge	1550 nm	1550 nm
Elevationswinkel	60°	60°
Linktype	Downlink	Uplink
Sender		
Linsendurchmesser	2 cm	10 cm
Field of view	0,04 mrad	0,04 mrad
Höhe	550 km	0,4 km
Empfänger		
Linsendurchmesser	10 cm	2 cm
Field of view	0,04 mrad	0,04 mrad
Höhe	0,4 km	550 km
Atmosphäre		
Niederschlag	keiner	keiner
Wolken, Nebel	keine	keine
atmosphärische Turbulenzen	gering	gering
simuliert		
geometrischer Verlust	47,99 dB	61,99 dB
Verlust Wolken, Nebel	0,44 dB	0,44 dB
Niederschlag	0 dB	0 dB
Szintillationsverlust	2,11 dB	3,83 dB
Verlust Strehl Ratio	0 dB	0,90 dB
Verlust Beam Wander	0 dB	2,32 dB

Tabelle 5.5.: Ergebnisse bei Vergleich von Downlink/Uplink

6. Schlussfolgerung

Es wurde in dieser Arbeit untersucht und in Folge simuliert welche Dämpfung auf das Signal, am Weg vom Sender zum Empfänger durch die Troposphäre, wirkt. Dabei wurden die Verluste durch Wetterphänomene wie Wolken, Nebel, Schnee und Regen anhand der in der Benutzeroberfläche eingegebenen Werte berechnet. Auch Verluste durch atmosphärische Turbulenzen wurden simuliert. Durch diese Turbulenzen kommt es zu Szintillationen, Strahlverbreiterung (beam spreading) und Strahlablenkung (beam wander). Teil der Simulation war auch der geometrische Verlust, der bei allen, auch bei Verbindungen die nicht durch die Atmosphäre gehen, auftritt.

Daher wurde sichtbar welcher großen Einfluss das Wetter auf die Dämpfung des Signals hat.

Kommt es bei einer Verbindung zu Verlusten, zum Beispiel aufgrund von leichtem Nebel, kann man durch Änderung der Modulationsart von OOK auf L-PPM und dem daraus resultierendem Gewinn die Verbindungsqualität verbessern. Bei der L-PPM ist ein höherer Wert der möglichen Pulspositionen, zum Beispiel 256, besonders von Vorteil. In Kombination mit Reed-Solomon-Coding oder Turbocodes können die Ergebnisse nochmals verbessert werden. Zudem bewirken Interleaver dass Burstfehler eher korrigiert werden können.

Bei den betrachteten Satellitenmissionen fällt auf, dass meistens eine Wellenlänge von 1550 nm verwendet wird. Ansonsten wurde eine Wellenlänge von 1064 nm gewählt. Als Modulationsarten werden OOK, PPM und PSK eingesetzt. PSK-Modulation kommt vor allem bei den vorgestellten Daten-Relais-Systemen zum Einsatz. Die Deep-Space-Mission DSOC nutzt PPM.

Anhand der untersuchten Satellitenmissionen wird klar, dass Free Space Optics bei Earth-Space-Links eine Technologie mit Zukunft sind und die Anzahl an Anwendungsmöglichkeiten stetig wächst. So sind auch für die nächsten Jahre einige neue Missionen geplant.

Als Erweiterung der Simulation für die Zukunft wäre denkbar den Verlust durch molekulare Absorption hinzu zu nehmen. Die typischen verwendeten Wellenlängen führen nur zu einem geringen Absorptionsverlust, da sie so gewählt wurden dass der Absorptionsverlust möglichst gering ausfällt. Eine mögliche weitere Erweiterung wäre es reale Daten zu verwenden, z.B. Wettervorhersagen um abzuschätzen ob eine Verbindung möglich ist. Bei einem bestehenden Bodenstationsnetzwerk kann dann entschieden werden ob zur Verbindungsverbesserung eine andere Bodenstation ausgewählt

werden sollte.

Literatur

- [1] H. Kaushal und G. Kaddoum, »Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques,« *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Jg. 19, Nr. 1, S. 57–96, 2017. DOI: 10.1109/COMST.2016.2603518 (siehe S. 1, 4–9, 12, 13, 17, 24, 36, 38, 40, 41).
- [2] ITU, *International bandwidth usage*, online, accessed 20 Sep, 2023. Adresse: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/2022/11/24/ff22-international-bandwidth-usage/> (siehe S. 1).
- [3] E. Elsaidy und T. Rakia, »A Unified Performance Analysis of OGS-to-Satellite FSO UpLink under Turbulence and Beam Wander,« in *2022 5th International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, 2022, S. 1–6. DOI: 10.1109/ICCSPA55860.2022.10018972 (siehe S. 1).
- [4] R. Samy, H.-C. Yang, T. Rakia und M.-S. Alouini, »Space-Air-Ground FSO Networks for High-Throughput Satellite Communications,« *IEEE Communications Magazine*, Jg. 60, Nr. 12, S. 82–87, 2022. DOI: 10.1109/MCOM.002.2200018 (siehe S. 1, 21, 23).
- [5] G. Araniti, A. Iera, S. Pizzi und F. Rinaldi, »Toward 6G Non-Terrestrial Networks,« *IEEE Network*, Jg. 36, Nr. 1, S. 113–120, 2022. DOI: 10.1109/MNET.011.2100191 (siehe S. 1).
- [6] A. Carrasco-Casado und R. Mata-Calvo, »Space Optical Links for Communication Networks,« in *Springer Handbook of Optical Networks*, B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer und Y. Zhao, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 1057–1103, ISBN: 978-3-030-16250-4. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4_34. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_34 (siehe S. 3, 5–7, 9, 11, 38, 39).
- [7] I. T. U. R. S. (ITU-R), »Technical and operational characteristics of satellites operating in the range 20–375 THz. Recommendation ITU-R S.1590 (09/2022),« 2022. Adresse: <https://www.itu.int/rec/R-REC-S.1590-0-200209-I/en> (siehe S. 5, 34).

- [8] J. Perez, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari, M. Ijaz und H. L. Minh, »Ethernet FSO Communications Link Performance Study Under a Controlled Fog Environment,« *IEEE Communications Letters*, Jg. 16, Nr. 3, S. 408–410, 2012. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.012412.112072 (siehe S. 5, 19).
- [9] E. Leitgeb, M. Gebhart, P. Fasser, J. Bregenzer und J. Tanczos, »Impact of atmospheric effects in Free Space Optics transmission systems,« *Proc SPIE*, Apr. 2003. DOI: 10.1117/12.483802 (siehe S. 5).
- [10] H. Ivanov, P. Pezzei und E. Leitgeb, »Estimation of Cloud-induced Optical Attenuation over Near-Earth and Deep-space FSO Communication Systems,« in *2021 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2021, S. 1–5. DOI: 10.23919/SoftCOM52868.2021.9559077 (siehe S. 5, 18).
- [11] E. Leitgeb und T. Plank, »Combination of Free Space Optics (FSO) and RF for different wireless application scenarios,« in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, S. 1–4 (siehe S. 5).
- [12] D. Giggenbach, A. Shrestha, C. Fuchs, C. Schmidt und F. Moll, »system aspects of optical LEO-to-ground links,« in *International Conference on Space Optics — ICSO 2016*, B. Cugny, N. Karafolas und Z. Sodnik, Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Bd. 10562, SPIE, 2017, S. 1635–1643. DOI: 10.1117/12.2296054. Adresse: <https://doi.org/10.1117/12.2296054> (siehe S. 7).
- [13] Z. Ghassemlooy, W. Popoola und S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, 1. Aufl. CRC Press, 2013, ISBN: 9781439851883 (siehe S. 7–9, 11–13, 15, 35).
- [14] H. Eichler und J. Eichler, *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2015, ISBN: 9783642414381. Adresse: <https://books.google.at/books?id=4n7DCgAAQBAJ> (siehe S. 8).
- [15] »Overview of Wireless Optical Communication Systems - Scientific Figure on ResearchGate.« online. (accessed 24 Jul, 2023), Adresse: https://www.researchgate.net/figure/Pictorial-representation-of-light-absorption-in-the-eye-for-different-wavelengths-50_fig9_312133486 (siehe S. 8).
- [16] »New spectroscopic techniques and architectures for environmental and biomedical applications - Scientific Figure on ResearchGate.« online. (accessed am 24 Jul, 2023), Adresse: https://www.researchgate.net/figure/5-Attenuation-of-an-optical-fiber-as-a-function-of-the-wavelength_fig3_291147735 (siehe S. 9).

- [17] D. Giggenbach und A. Shrestha, »Atmospheric absorption and scattering impact on optical satellite-ground links,« *International Journal of Satellite Communications and Networking*, Jg. 40, Nr. 2, S. 157–176, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/sat.1426>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/sat.1426>. Adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1426> (siehe S. 10).
- [18] O. Bouchet, *Wireless optical telecommunications* (ISTE), 1st edition. London : Hoboken, N.J.: ISTE Ltd. ; John Wiley & Sons, 2012, ISBN: 1-118-56263-1 (siehe S. 10).
- [19] »Vibration wave downhole communication technique - Scientific Figure on ResearchGate.« online. (accessed 25 Sep, 2023), Adresse: https://www.researchgate.net/figure/Manchester-encoding-principles_fig4_316192789 (siehe S. 10).
- [20] X. Fu, G. Chen, T. Tang, Y. Zhao, P. Wang und Y. Zhang, »Research and Simulation of PPM Modulation and Demodulation System on Spatial Wireless Optical Communication,« in *2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics*, 2010, S. 1–5. DOI: 10.1109/SOP0.2010.5504142 (siehe S. 11).
- [21] S. Muhammad, T. Javornik, I. Jelovčan und E. Leitgeb, »Comparison of hard-decision and soft-decision channel coded M-ary PPM performance over free space optical links,« *European Transactions on Telecommunications*, Jg. 20, S. 746–757, Nov. 2008. DOI: 10.1002/ett.1343 (siehe S. 12, 19).
- [22] D. Fan, »Applications of Modulation schemes of outdoor free-space optical communication,« in *2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, 2014, S. 1724–1729. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7015289 (siehe S. 13).
- [23] G. A. Mahdiraji und E. Zahedi, »Comparison of Selected Digital Modulation Schemes (OOK, PPM and DPIM) for Wireless Optical Communications,« in *2006 4th Student Conference on Research and Development*, 2006, S. 5–10. DOI: 10.1109/SCORED.2006.4339297 (siehe S. 13, 16, 17).
- [24] S. Krouk E. Semenov, *Modulation and coding techniques in wireless communications*, Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, N.J., 2011 (siehe S. 14, 15).
- [25] M. Hufschmid, *Information und Kommunikation: Grundlagen und Verfahren der Informationsübertragung*. Wiesbaden: Teubner, 2006, ISBN: 9783835101227 (siehe S. 14).
- [26] J. Dunlop, *Digital mobile communications and the TETRA system*, Chichester, England ; New York, 1999 (siehe S. 14).

- [27] D. R. Arrieta, S. Almonacil, J.-M. Conan u. a., »Proof-of-Concept Real-Time Implementation of Interleavers for Optical Satellite Links,« *Journal of Lightwave Technology*, Jg. 41, Nr. 12, S. 3932–3942, 2023. DOI: 10.1109/JLT.2023.3270769 (siehe S. 18, 20).
- [28] S. S. Muhammad, T. Javornik, I. Jelovcan, E. Leitgeb und O. Koudelka, »Reed Solomon coded PPM for Terrestrial FSO Links,« in *2007 International Conference on Electrical Engineering*, 2007, S. 1–5. DOI: 10.1109/ICEE.2007.4287281 (siehe S. 19–21).
- [29] Y. Shi, X. M. Zhang, Z.-C. Ni und N. Ansari, »Interleaving for combating bursts of errors,« *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Jg. 4, Nr. 1, S. 29–42, 2004. DOI: 10.1109/MCAS.2004.1286985 (siehe S. 20, 22).
- [30] P. Martín Pimentel, B. Rödiger, C. Schmidt u. a., »Cube laser communication terminal (CubeLCT) state of the art,« *Acta Astronautica*, Jg. 211, S. 326–332, 2023, ISSN: 0094-5765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.06.026>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576523003260> (siehe S. 24).
- [31] online. (accessed 13 Sep, 2024), Adresse: <https://austria-in-space.at/de/geschichte/was-sind-cubesats.php> (siehe S. 25).
- [32] online. (accessed 2 Jul, 2024), Adresse: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=0&article=3653&context=smallsat&type=additional> (siehe S. 25).
- [33] online. (accessed 2 Jul, 2024), Adresse: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2019/05/click_fact_sheet_19april2019_508.pdf (siehe S. 25).
- [34] P. M. Pimentel, B. Rödiger, C. Schmidt u. a., »Cube laser communication terminal (CubeLCT) state of the art,« *Acta Astronautica*, Jg. 211, S. 326–332, 2023, ISSN: 0094-5765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.06.026>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576523003260> (siehe S. 26, 27).
- [35] online. (accessed 4 Jul, 2024), Adresse: <https://satsearch.co/products/tesat-cubelct> (siehe S. 26, 27).
- [36] online. (accessed 12 Sep, 2024), Adresse: <https://www.ll.mit.edu/research/projects/terabyte-infrared-delivery-tbird> (siehe S. 27).
- [37] online. (accessed 12 Sep, 2024), Adresse: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/10/tbird_fact_sheet_v2.pdf?emrc=e8317f (siehe S. 27).
- [38] online. (accessed 2 Jul, 2024), Adresse: https://roadmaps.mit.edu/index.php/Satellite_Lasercom (siehe S. 28, 30).
- [39] online. (accessed 2 Jul, 2024), Adresse: <https://seranis.de/en/home-en/> (siehe S. 28).

- [40] R. T. Schwarz, M. T. Knopp, H. L. Son, A. Koehler und A. Knopp, »Optical Ground Station for Free-Space Optical Communication Research and Experimentation,« in *Photonic Networks; 24th ITG-Symposium*, 2023, S. 1–4 (siehe S. 28).
- [41] ESA. »European Data Relay Satellite System (EDRS) Overview.« (accessed 17 May, 2024), Adresse: <https://artes.esa.int/european-data-relay-satellite-system-edrs-overview> (siehe S. 28, 29).
- [42] DLR. »Das Europäische Daten Relais System.« online. (accessed 25 Jun, 2024), Adresse: <https://www.dlr.de/de/ar/themen-missionen/kommunikation-navigation/satellitenkommunikation/edrs> (siehe S. 29).
- [43] T. e. a. Doensdorf-Sternal E.; Marynowski. »Agile Optical Satellite-to-Ground-Link Operation with the current TDP₁ Optical Link Planning System.« (2023) (siehe S. 30).
- [44] online. (accessed 2 Jul, 2024), Adresse: <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/laser-communications-relay-demonstration-lcrd-overview/> (siehe S. 30).
- [45] online. (accessed 4 Jul, 2024), Adresse: <https://www.satellitetoday.com/technology/2024/06/11/kepler-validates-tesat-optical-communications-terminals-in-orbit-test/> (siehe S. 31).
- [46] online. (accessed 4 Jul, 2024), Adresse: https://epic-photonics.com/wp-content/uploads/2022/04/4.1-Nils-Hoepcke-TESAT_public_sharable-on-website.pdf (siehe S. 31).
- [47] online. (accessed 12 Sep, 2024), Adresse: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/03/tglavich_dsoc.pdf?emrc=710136 (siehe S. 32).
- [48] online. (accessed 16 Okt, 2024), Adresse: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-laser-comms-demo-makes-deep-space-record-completes-first-phase/> (siehe S. 32).
- [49] online. (accessed 16 Okt, 2024), Adresse: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-optical-comms-demo-transmits-data-over-140-million-miles/> (siehe S. 32).
- [50] online. (accessed 16 Okt, 2024), Adresse: <https://www.nasa.gov/missions/psyche-mission/nasas-optical-comms-demo-transmits-data-over-140-million-miles/> (siehe S. 32).
- [51] S.-P. C. Emmanuel Domfeh Aboagye, *Deep space optical communications (DSOC) downlink simulation with varying PPM order*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03232-z> (siehe S. 32).

- [52] J. Liang, A. U. Chaudhry, E. Erdogan und H. Yanikomeroglu, »Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks,« in *2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2022, S. 471–476. DOI: 10.1109/WoWMoM54355.2022.00073 (siehe S. 34).
- [53] M. Cantore, D. Monopoli, M. G. Angelo Altamura Alberto Mengali und A. D’Orazio. »Link budget analysis of bi-directional LEO and GEO optical feeder links advancing the beam wander model’s accuracy.« (2024) (siehe S. 34, 38, 40, 41).
- [54] N. Witternigg, M. Schönhuber, E. Leitgeb und T. Plank, »Feasibility assessment of optical technologies for reliable high capacity feeder links,« *Acta Astronautica*, Jg. 89, S. 254–260, 2013, ISSN: 0094-5765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.04.007>. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576513001197> (siehe S. 35).
- [55] M. S. Awan, Marzuki, E. Leitgeb, B. Hillbrand, F. Nadeem und M. S. Khan, »Cloud attenuations for free-space optical links,« in *2009 International Workshop on Satellite and Space Communications*, 2009, S. 274–278. DOI: 10.1109/IWSSC.2009.5286364 (siehe S. 36, 41, 42).
- [56] B. Hillbrand, »Erweiterung des FSO-Kanalmodells für mehrere Atmosphärenschichten und Implementierung der ERA-15 Daten,« Master’s thesis, TU Graz, 2010 (siehe S. 36, 37).
- [57] S. Muhammad, P. Kohldorfer und E. Leitgeb, »Channel modeling for terrestrial free space optical links,« Bd. 2005, Aug. 2005, 407–410 Vol. 1, ISBN: 0-7803-9236-1. DOI: 10.1109/ICTON.2005.1505832 (siehe S. 37).
- [58] I. T. U. R. S. (ITU-R), »P.1621 : Propagation data required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz,« 2015. Adresse: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1621/en> (siehe S. 38, 40).
- [59] D. Giggenbach und H. Henniger, »Fading-loss assessment in atmospheric free-space optical communication links with on-off keying,« *Optical Engineering*, Jg. 47, S. 046 001–1, Apr. 2008. DOI: 10.1117/1.2951952 (siehe S. 38, 39).
- [60] R. Barrios, S. Dimitrov, R. Mata Calvo und D. Giggenbach, »Link Budget Assessment for GEO Feeder Links based on Optical Technology,« *International Journal of Satellite Communications and Networking*, Aug. 2020. Adresse: <https://elib.dlr.de/97153/> (siehe S. 40).
- [61] B. S. Willebrand Heinz und Ghuman, *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks*. Sams Publishing, 2001, ISBN: 0-672-32245-X (siehe S. 41).

Appendix

Appendix A.

Quellcode der Simulation in Matlab

```

1 function res = calculateLinkBudget(wavelength,...
2                                     link_type,...
3                                     elevation_angle
4                                     ,...
5                                     tx_diameter,...
6                                     tx_height,...
7                                     tx_point_err,
8                                     ... %field of
9                                     view
10                                    rx_diameter,...
11                                    rx_height,...
12                                    rx_point_err,...
13                                    cloud_type,...
14                                    fog_type,...
15                                    height_tropos,
16                                    ...
17                                    percipitation,
18                                    ...
19                                    rain_rate,...
20                                    snow_char,...
21                                    turbulence)
22
23 zenith_angle = 90 - elevation_angle; % zenith angle
24     in degrees
25 wavelength = wavelength *1e-9; % wave length in m
26 link_type = lower(link_type);
27 turbulence = lower(turbulence);
28 percipitation = lower(percipitation);
29 ground_station_height = min([tx_height rx_height]);
30 satellite_height = max([rx_height tx_height]);
31
32 %% calculations
33 %% systematic attenuation
34 %% get transmitter and receiver gain
35 txGain = (pi*tx_diameter/wavelength)^2;
36 G_tx = 10*log10(txGain); % in dB
37 rxGain = (pi*rx_diameter/wavelength)^2;
38 G_rx = 10*log10(rxGain); % in dB
39
40 % calculate distance between satellite and ground
41     station in km
42 % distance of the optical beam through troposphere

```

```

    in km
36 % due to slantlonger than height of troposphere minus
    GS height
37 RE = 6378.1; % radius of earth in km
38 R = RE + ground_station_height;
39 H = satellite_height - ground_station_height;
40 %distance between satellite and GS in km
41 dGS = R * (sqrt(((R+ H)/R)^2 - cosd(elevation_angle)
    ^2) ...
42     - sind(elevation_angle)) ;
43
44 % distance of the optical beam through troposphere in
    km
45 distanceTroposphere = R * ...
46     (sqrt(((R+ height_tropos)/R)^2 - cosd(
        elevation_angle)^2) ...
47     - sind(elevation_angle)) ;
48
49 %% free space path loss
50 % free-space path loss between the ground station and
    satellite in dB
51 L_fspl = fspl(dGS*1e3,wavelength);
52
53 %% geometric path attenuation
54 % dGS is in km, tx_diameter and rx_diameter in m
55 L_geo = 20 * log10((tx_diameter + tx_point_err * ...
56     dGS) / rx_diameter);
57
58 %% losses due to fog and clouds
59 cloud_basis = 2; % in km
60 visibility_clear_sky = 100;
61 fog_thickness = 0.5; % vertical expansion in km
62
63 % lower layer - ground to end of fog
64 % loss due to fog
65 % values according to Free-Space Optics, Willebrand,
    Ghuman
66 switch lower(fog_type)
67     case "none"
68         visibility = visibility_clear_sky;
69     case "haze"
70         visibility = 2.8;
71     case "thin"

```

```

72     visibility = 2;
73     case "moderate"
74         visibility = 0.5;
75     case "thick"
76         visibility = 0.2;
77 end
78 aFogCoeff = extinctionCoeff(visibility, wavelength);
79 % scattering loss due to fog and clouds in dB
80 L_fog = 4.3429*aFogCoeff*fog_thickness;    ...
81
82 % layer between fog and clouds
83 visibility = visibility_clear_sky;
84 aFogCoeff = extinctionCoeff(visibility, wavelength);
85 L_fog = L_fog + 4.3429*aFogCoeff*(cloud_basis-
    fog_thickness);
86
87 % layer with clouds
88 % use of kim model
89 % cnc - cloud number concentration in cm-3
90 % lwc - Liquid water content in g/m-3
91 % calculation of visibility using cloud number
    concentration
92 % and liquid water content
93 if strcmp(cloud_type , 'none')
94     cloud_thickness = 0;
95 else
96     switch lower(cloud_type) % case insensitive
97         case 'cumulus'
98             cnc = 250;
99             lwc = 1;
100             cloud_thickness = 1;
101         case 'stratus'
102             cnc = 250;
103             lwc = 0.29;
104             cloud_thickness = 1;
105         case 'stratocumulus'
106             cnc = 250;
107             lwc = 0.15;
108             cloud_thickness = 1;
109         case 'altostratus'
110             cnc = 400;
111             lwc = 0.41;
112             cloud_thickness = 1;

```

```

113         case 'nimbostratus'
114             cnc = 200;
115             lwc = 0.65;
116             cloud_thickness = 4;
117         case 'cirrus'
118             cnc = 0.025;
119             lwc = 0.06405;
120             cloud_thickness = 1;
121     end
122     visibility = 1.002/((lwc*cnc)^0.6473);    %
123     Calculate visibility in km
124     aFogCoeff = extinctionCoeff(visibility,
125         wavelength);
126     L_fog = L_fog + 4.3429*aFogCoeff*cloud_thickness;
127 end
128 %layer above clouds, until end of troposphere
129 visibility = visibility_clear_sky;
130 aFogCoeff = extinctionCoeff(visibility, wavelength);
131 L_fog = L_fog + ...
132     4.3429*aFogCoeff*(height_tropos - cloud_thickness
133         - cloud_basis);
134 % take elongation of path due to angle of elevation
135 into account
136 L_fog = L_fog*distanceTroposphere/height_tropos;
137 %% Rain loss
138 L_rain = 0;
139 if strcmp(percipitation, 'rain')
140     L_rainpkm = 1.076 * rain_rate^(2/3);
141     L_rain = L_rainpkm * (cloud_basis) *cscd(
142         elevation_angle);
143 end
144 %% Snow loss
145 % a, b: attenuation coefficients
146 L_snow = 0;
147 if strcmp(percipitation, 'snow')
148     if strcmp(snow_char, 'dry')
149         b = 1.38;
150         a = 5.42 * 1e-5*wavelength*1e9 + 5.4958776;
151     elseif strcmp(snow_char, 'wet')
152         b = 0.72;

```

```

151         a = 1.023*1e-4*wavelength*1e9 + 3.7855466;
152     end
153     L_snowpkm = a * rain_rate^b;
154     L_snow = L_snowpkm * (cloud_basis) * cscd(
        elevation_angle);
155 end
156
157 %% Scintillation
158 % c0: structur constant (at ground level), strength
    of turbulence, ...
159 if strcmp(turbulence, 'low')
160     c0 = 3*1e-16;
161 elseif strcmp(turbulence, 'moderate')
162     c0 = 1.7 *1e-14;
163 else %high
164     c0 = 1.7 *1e-13;
165 end
166 factor_scin = 1.23;
167 L_si_1 = 2 * sqrt(factor_scin* (2*pi*1e9/(wavelength
    *1e9)))^(7/6) ...
168     * c0 *(distanceTroposphere*1e3)^(11/6));
169
170 %% Scintillation loss (Alternative)
171 % no effect by height of troposphere because
    turbulence stucture
172 % parameter intergrated from ground to height of
    satellite
173 pThreshold = 0.05; % probability received power
    under wanted threshold
174 k = 2* pi / wavelength; % wavenumber
175
176 if strcmp(link_type, 'downlink')
177     fun = @(h,c0) hv_5_7(h,c0).*(h-
        ground_station_height*1e3).^(5/6);
178     integral_c_n = integral(@(h) fun(h,c0),
        ground_station_height*1e3,...
179         satellite_height*1e3);
180     sigma_r_2 = 2.25*k^(7/6)*sec(deg2rad(zenith_angle
        ))^(11/6)*integral_c_n;
181     sigma_r = sqrt(sigma_r_2);
182     sigma_i_2 = exp(0.49*sigma_r_2/(1+1.11*sigma_r
        ^ (12/5)))^(7/6) ...
183         + 0.51*sigma_r_2/(1+0.69*sigma_r^(12/5))

```



```

184         ^ (5/6)) - 1;
185     L_si = 4.343*erfinv(2*pThreshhold - 1)*(2*log(
186         sigma_i_2+1))^(1/2) ...
187     - 1/2*log(sigma_i_2+1);
188     L_si = -L_si;
189 elseif strcmp(link_type, 'uplink')
190     fun = @(h,c0) hv_5_7(h,c0).*...
191     (1-(h-ground_station_height*1e3)/(H.*1e3)).^(5/6)
192     ...
193     .*(h-ground_station_height*1e3)/(H*1e3).^(5/6);
194     integral_c_n = integral(@(h) fun(h,c0),
195     ground_station_height*1e3,...
196     satellite_height*1e3);
197     sigma_r_2 = 2.25*k^(7/6)*(dGS*1e3)^(5/6)*
198     integral_c_n;
199     sigma_r = sqrt(sigma_r_2);
200     sigma_i_2 = exp(0.49*sigma_r_2/(1+1.11*sigma_r
201     ^ (12/5)))^(7/6) ...
202     + 0.51*sigma_r_2/(1+0.69*sigma_r^(12/5))
203     ^ (5/6)) - 1;
204
205     L_si = 4.343*erfinv(2*pThreshhold - 1)*(2*log(
206     sigma_i_2+1))^(1/2) ...
207     - 1/2*log(sigma_i_2+1);
208     L_si = -L_si;
209 end
210
211 %% turbulence induced beam spreading
212 L_sr = 0;
213 L_bw = 0;
214 % only calculated for uplink
215 if strcmp(link_type, 'uplink')
216     c_n_2_integral = integral(@(h) hv_5_7(h,c0),...
217     ground_station_height*1e3,satellite_height*1
218     e3);
219     r_0 = (0.423*k^2*sec(zenith_angle*pi/180)*
220     c_n_2_integral)^(-3/5);
221     L_sr = (1+ (tx_diameter/r_0)^(5/3))^(6/5); %
222     strehl ratio
223 %% turbulence induced beam wander
224 W_0 = sqrt((tx_diameter^2)/8);
225 beam_wander_variance = 0.54*(dGS*1e3)^2 ...
226     *((wavelength/(2*W_0))^2)*((2*W_0/r_0)^(5/3))

```

```

216         ;
        angular_beam_wander = sqrt(beam_wander_variance)
        /(dGS*1e3);
217     L_bw = -10*log10(exp(-txGain*angular_beam_wander
        ^2));
218 end
219
220 %% end result is all lossessummed up
221 res = - L_geo - L_fog - L_rain - L_snow - L_bw -
        L_si - L_sr;
222 disp("Total loss is " + num2str(res) + " dB");
223
224
225 % save workspace in file
226 save data.mat
227 end

```

```

1  % get extinction coefficient of loss due to fog /
    clouds
2  % visibility: visibility in km
3  % wavelength: wavelength in m
4  function aCoeff = extinctionCoeff(visibility,
    wavelength)
5      % get attenuation coefficient
6      if visibility<=0.5
7          delta = 0;
8      elseif visibility>0.5 && visibility<=1
9          delta = visibility - 0.5;
10     elseif visibility>1 && visibility<=6
11         delta = 0.16*visibility + 0.34;
12     elseif visibility>=6 && visibility<=50
13         delta = 1.3;
14     else % visibility>50
15         delta = 1.6;
16     end
17     aCoeff = (3.91/visibility)* ...
18         ((wavelength*1e9/550)^-delta); %
        Extinction coefficient
19 end

```

Appendix B.

Grafiken zu Verlusten

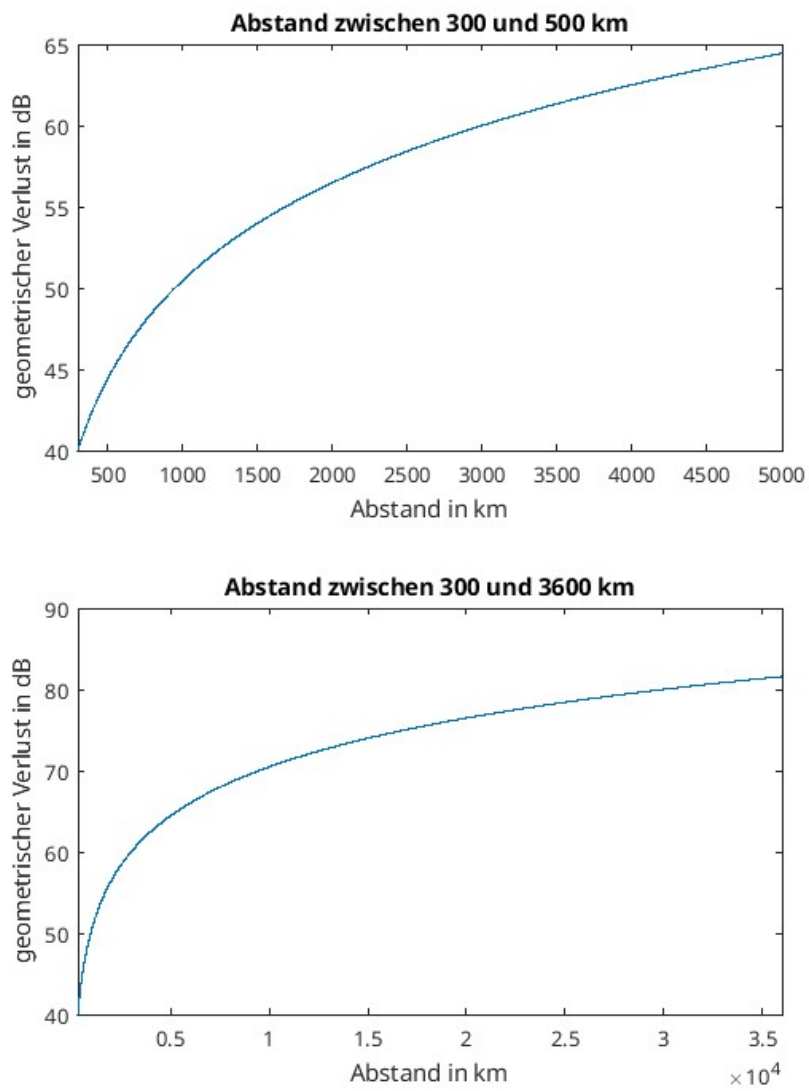


Abbildung B.1.: Geometrischer Verlust abhängig von der Distanz

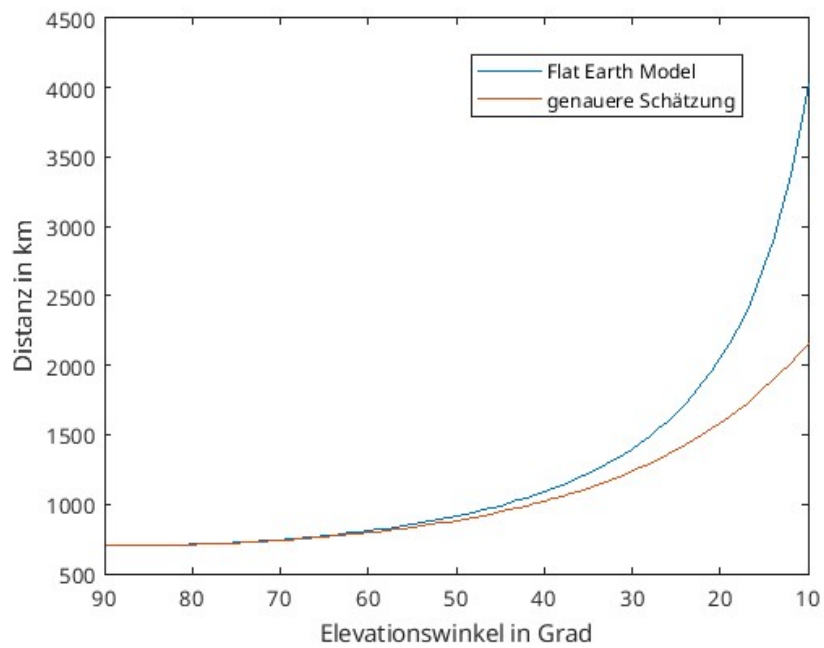


Abbildung B.2.: Distanz zwischen Bodenstation und Satellit abhängig vom Elevationswinkel, unterschiedliche Berechnungsarten (Flat Earth Model, Formel 4.9, und eine genauere Schätzung, Formel 4.8)

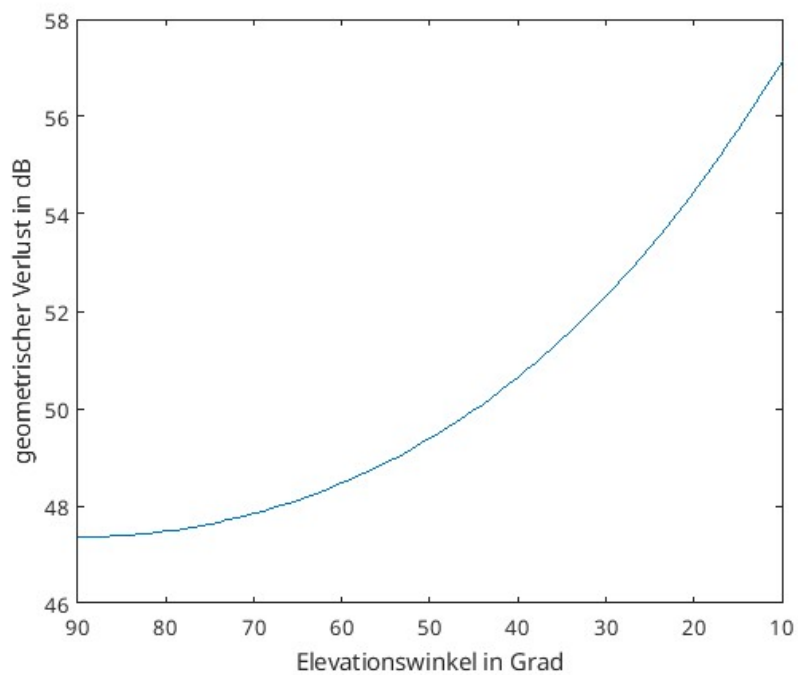


Abbildung B.3.: Geometrischer Verlust abhängig vom Elevationswinkel

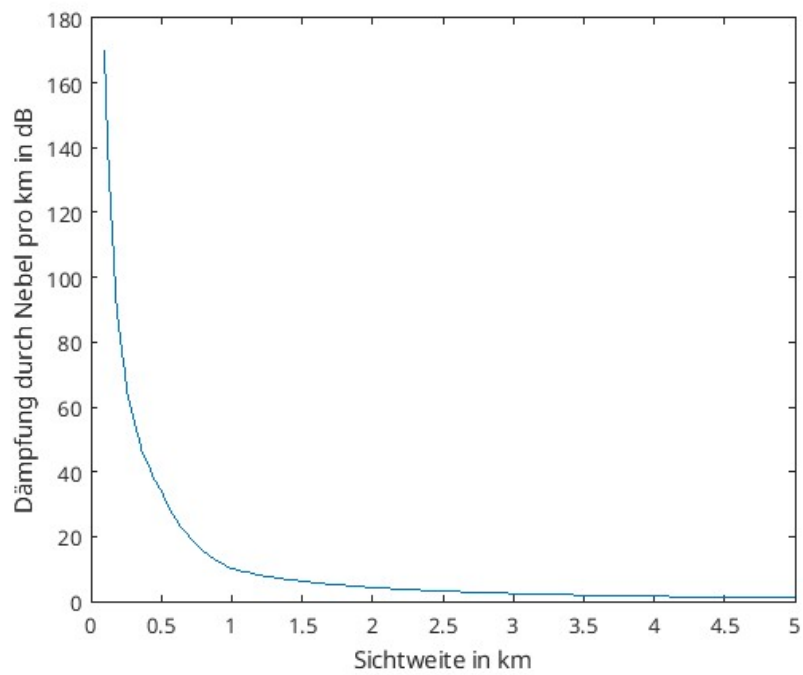


Abbildung B.4.: Dämpfung durch Nebel abhängig von Sichtweite

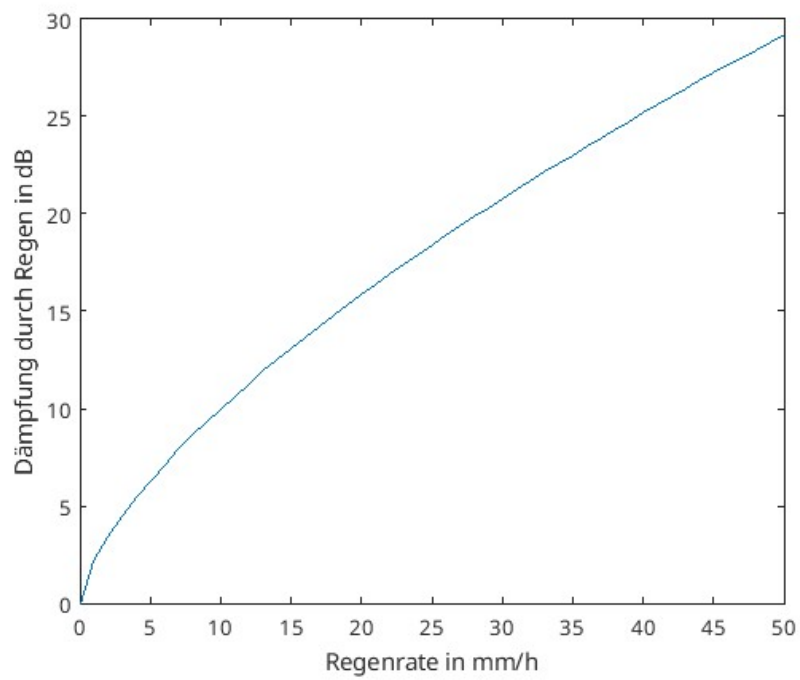


Abbildung B.5.: Dämpfung durch Regen

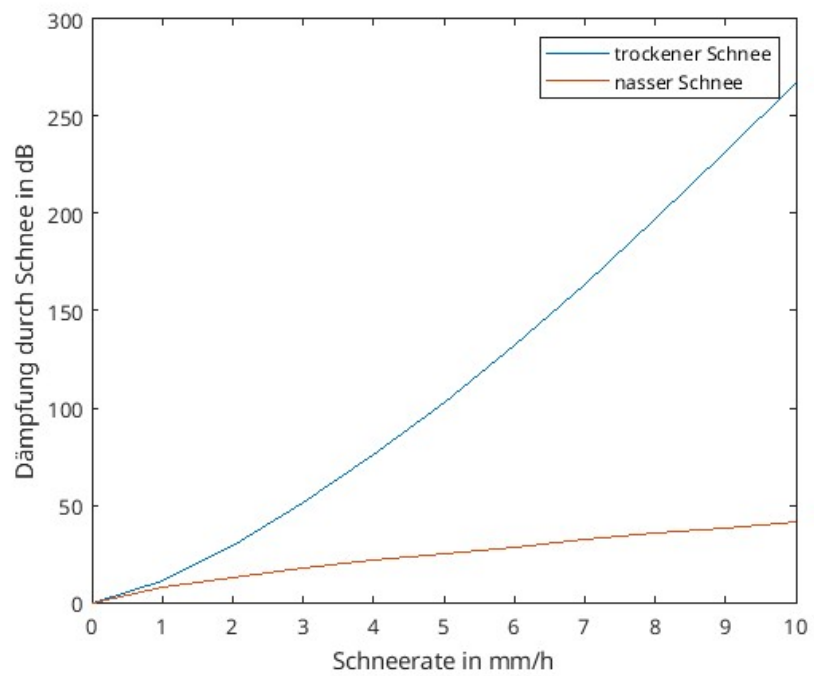


Abbildung B.6.: Verluste durch Schneefall

Appendix C.

Sicherheitshinweise zum Umgang mit Lasern

Sicherheitshinweise zum Umgang mit Lasern

Aufgrund der besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung und der sich daraus ergebenden biologischen Wirkungen sind besondere Schutz- und Vorsichtsmaßnahmen bei der Anwendung von Laserstrahlung erforderlich. Für die Festlegung der in jedem Einzelfall zu treffenden Maßnahmen werden die Laser entsprechend ihrem Gefährdungspotenzial in Klassen eingeteilt. Am wichtigsten sind Schutzmaßnahmen bei der Anwendung von leistungsstarken Lasern in der Technik und der Medizin, wo vor allem das Bedienungspersonal geschützt werden muss. Maßgebend für die Einteilung der Lasereinrichtungen in der Klassen 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4 ist die ÖNORM EN 60825-1.

Laserklasse 1:

Zur Klasse 1 gehören solche Laser, die auch bei dauernder Bestrahlung unter den maximal zulässigen Bestrahlungswerten liegen. Laser der Klasse 1 sind ungefährlich (augensicher) und benötigen unabhängig von der emittierten Wellenlänge außer der entsprechenden Kennzeichnung auf dem Gerät keinerlei weitere Maßnahmen.

Laserklasse 1M:

Die zugängliche Laserstrahlung liegt in einem Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 4000 nm. Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente z.B. Lupe, Linse oder Teleskope verkleinert wird. In diesen Fällen kann eine der Klassen 3B oder 3R entsprechende Gefährdung auftreten.

Laserklasse 2:

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Einwirkungsdauer (bis 0,25 s) auch für das Auge ungefährlich. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereiches von 400 nm bis 700 nm haben Klasse 1. Zufällige kurzzeitige Einwirkung (bis 0,25 s) schädigen das Auge nicht, da der Lidschlussreflex das Auge automatisch ausreichend gegen längere Bestrahlung schützen kann. Klasse 2 Laser dürfen deshalb ohne weiteren Schutz eingesetzt werden, wenn sichergestellt ist, dass kein ein absichtliches Hineinschauen für die Anwendung länger als 0,25 s erforderlich ist, oder (z. B. Durch Medikamenteneinwirkung) der Lidschlussreflex unterdrückt ist. $P_{\text{Grenz}} = 1 \text{ mW}$, Kennzeichnung erforderlich.

Laserklasse 2M:

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Einwirkungsdauer (bis 0,25 s) für das Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente verkleinert wird. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereiches von 400 nm bis 700 nm entsprechen Klasse 1M.

Laserklasse 3A:

Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge ungefährlich, solange der Querschnitt nicht durch optische Instrumente (Lupen, Linsen, Teleskope) verkleinert wird! Ist dies nicht der Fall, so ist die ausgesandte Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm) bei kurzzeitiger Einwirkungsdauer (bis 0,25 s), in den anderen Spektralbereichen auch bei Langzeitbestrahlung ungefährlich.

Anmerkung: Bei Lasereinrichtungen der Klasse 3A handelt es sich um Laser, die nach der alten Norm klassifiziert worden sind.

Laserklasse 3R:

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 10^6 nm und ist gefährlich für das Auge. Es muss eine entsprechende Kennzeichnung z.B. Gefahrenpiktogramm vorhanden sein, Mitarbeiter müssen über die Gefahren unterwiesen werden und Schutzbrillen sind zu tragen. Ein Laserschutzbeauftragter ist zu bestellen. Die Leistung bzw. die Energie beträgt maximal das Fünffache des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung für Klasse 2 (5mW), in den übrigen Wellenlängenbereichen das fünffache des Grenzwertes für Klasse 1. Für cw Laser beträgt der Grenzwert der zugänglichen Strahlung 5 mW.

Laserklasse 3B:

Bei dieser Klasse ist der direkte Blick in den Strahl für das menschliche Auge sehr schädlich und mit irreversiblen Schäden ist zu rechnen. Die Haut wird bei kurzem Kontakt noch nicht geschädigt. Sind entsprechende Laser im Einsatz, müssen Schutzbrillen verpflichtend getragen werden. Des Weiteren muss der Einsatz dieser Geräte durch eine von außen sichtbare Warnlampe signalisiert werden. Die Nutzung der Laser ist bei der Behörde anzumelden und ein Laserschutzbeauftragter ist verpflichtend zu bestellen. Die Leistungsgrenze im kontinuierlichen Betrieb liegt bei 500mW.

Ein Strahlbündel kann aber ohne Gefährdung sicher über einen diffusen Reflektor (Diffusor) betrachtet werden, wenn folgende Bedingungen **gleichzeitig** gelten:

- Der minimale Beobachtungsabstand zwischen Schirm und Hornhaut des Auges ist 13 cm.
- Die maximale Beobachtungsdauer 10 s.
- Es treten keine gerichteten Strahlanteile auf, die ins Auge treten können.

Ein Strahlenbündel kann und darf nur dann über einen Diffusor betrachtet werden, wenn keine gerichteten Strahlanteile auftreten. Bei einigen Lasern dieser Leistungsklasse ist auch eine Gefährdung der Haut durch die zugängliche Laserstrahlung möglich!

Laserklasse 4:

Die zugängliche Laserstrahlung ist sowohl für das Auge als auch für die Haut gefährlich. Ebenfalls kann diffus gestreute Strahlung gefährlich sein. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahr verursachen.

Anmerkung:

Lasereinrichtungen der Klasse 4 sind in der Regel Hochleistungslaser, deren Ausgangsleistung bzw. -energien die Grenzwerte der zugänglichen Strahlung (GZS) für Klasse 3 B übertreffen (d.h. >500 mW). Die Laserstrahlung von Lasereinrichtungen der Klasse 4 ist so intensiv, dass bei jeglicher Art von Exposition der Augen oder der Haut mit Schädigungen zu rechnen ist. Außerdem muss bei der Anwendung von Lasereinrichtungen der Klasse 4 immer geprüft werden, ob ausreichende Maßnahmen gegen Brand- und Explosionsgefahren getroffen sind.

Verwendung von Schutz- und Justierbrillen

Laser ab der Schutzklasse 3B dürfen nur mit Schutz- und Justierbrillen bedient werden! Schutzbrillen absorbieren das Licht fast vollständig, d.h. der Laserstrahl und zum Beispiel Interferenzerscheinungen werden fast unsichtbar. Solche Brillen sind für Justierarbeiten daher nicht geeignet. Spezielle Justierbrillen absorbieren typisch etwa 90 % und schützen so lediglich vor zufällig auftreffender, diffuser Strahlung, nicht aber vor dem direkten Strahl! Für die Auswahl geeigneter Schutzbrillen ist eine Kenntnis der Laserleistung und der Wellenlänge notwendig.

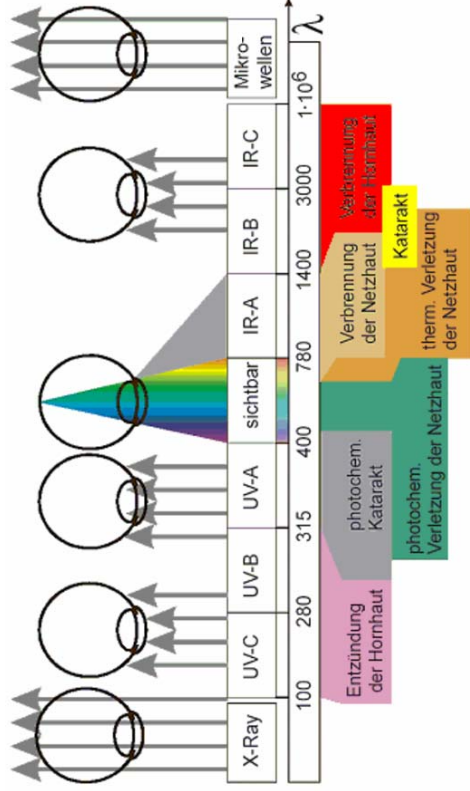
Verantwortlich für die Einhaltung der Schutzmaßnahmen ist der Betreiber der Lasereinrichtungen. Er hat u.a. dafür Sorge zu tragen, dass die Lasergeräte einer Laserschutzklasse zugeordnet und entsprechend gekennzeichnet sind. Beim Betrieb solcher Laser muss ein Laserbereich abgegrenzt und gekennzeichnet sein. Außerdem muss der Betreiber von Lasereinrichtungen der Klassen 3R, 3B und 4 sachkundige Personen als Laserschutzbeauftragte bestellen. MitarbeiterInnen die Lasereinrichtungen der Klassen 1M, 2, 2M, 3R, oder 4 anwenden oder sich im Laserbereich von Lasern der Klassen 3R, 3B und 4 aufhalten, müssen über die Wirkungen der Laserstrahlung und die erforderlichen Schutzmaßnahmen belehrt werden. Für den Betrieb von Lasereinrichtungen der Klassen 3R, 3B und 4 müssen vom Betreiber geeignete Laserbrillen, Schutzkleidung oder Schutzhandschuhe zur Verfügung gestellt werden. Auch für die Einhaltung der speziellen Sicherheitsanforderungen für den Betrieb der verschiedenen Lasertypen ist der Betreiber verantwortlich.

Merke:

- Augenverletzungen durch Laser sind oft nur schwer als solche zu erkennen und zu diagnostizieren, weil das Krankheitsbild oft auch zu anderen Ursachen oder Schädigungen passt.
- Augenverletzungen durch Laser werden oft vom Verletzten gar nicht als solche wahrgenommen, weil es sich z.B. nur um geringfügige Verletzungen in der Peripherie der Retina handelt.
- Auch mit Schutzbrille sollte nicht in den gerichteten Laserstrahl geschaut werden.
- Räume, in denen Laser verwendet werden, sind durch Warnzeichen zu kennzeichnen.
- Das Betreten von gekennzeichneten Räumen ist nur einem befugten Personenkreis gestattet, gegebenenfalls auch erst nach einer Belehrung oder Einweisung.
- Der Arbeitsraum ist zu beleuchten, um eine Dunkeladaptation des Auges und damit eine besondere Empfindlichkeit der Netzhaut entgegenzuwirken.
- Im Arbeitsraum sollten keine brennbaren oder explosiven Stoffe aufbewahrt werden.
- Die Versuchsanlage ist so abzuschirmen, dass gerichtete Primär- und/oder Sekundärstrahlung nicht austreten können.
- An jeder Lasereinrichtung ist, ein Hinweis anzubringen, auf dem auf die Art des zu nutzenden Augenschutzes hingewiesen wird.
- Reflektierende Flächen im Strahlengang sind zu entfernen oder abzudecken, notfalls auch mit matter Farbe zu streichen. Ebenso sollte der Experimentierraum mit einem hellen, matten Anstrich versehen sein.
- Im Arbeitsraum sollten keine blanken Gegenstände (Metalle, Glas, etc.) herumstehen.
- Die Laseranlage sollte durch Not-Aus-Schalter und einen auch von außen bedienbaren Hauptschalter ausschaltbar sein.
- Der Betrieb von Lasern sollte außen durch ein entsprechendes Signallicht erkennbar sein.
- Vor dem Einschalten eines Lasers müssen alle im Raum befindlichen Personen davon in Kenntnis gesetzt werden.
- Ein in Betrieb gesetzter Laser darf nicht ohne Aufsicht bleiben.
- Schutzbrillen sollten regelmäßig und gewissenhaft auf mögliche Beschädigungen kontrolliert werden, insbesondere nach intensiver und energiereicher Bestrahlung.

Wechselwirkungen mit dem Auge

Besonders gefährdet ist das Auge, da eine geringfügige Einwirkung durch den Laserstrahl irreparable Schäden hervorrufen kann.

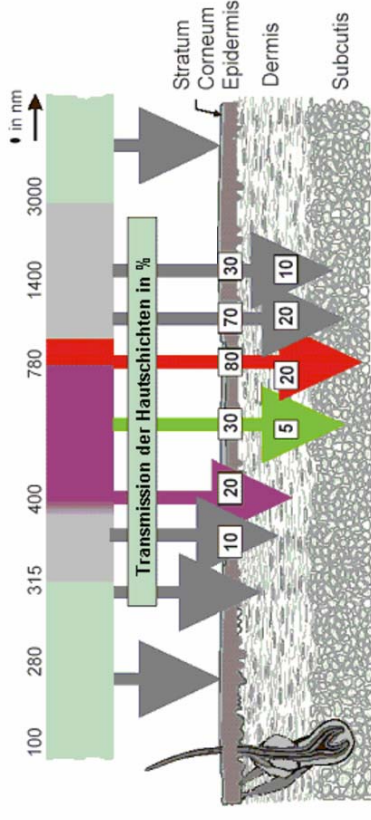


Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in das Auge

- UVC (100 nm - 280 nm): Absorption an der Hornhaut, Photokonjunktivitis (Bindehautentzündung)
- UVB (280 nm - 315 nm): Photokeratitis (Entzündung der Hornhaut)
- UVA (315 nm - 380 nm): Absorption in der Linse, photochemischer Katarakt (grauer Star)
- VIS (380 nm - 780 nm): hohe Gefährdung v.a. der Netzhaut, photochemische bzw. thermische Wirkung, Vorteil: Lidschlußreflex ($< 0,25$ s beim gesunden Menschen)
- IRA (780 nm - 1400 nm): gefährlich, Strahlung dringt bis Netzhaut vor, wird aber nicht wahrgenommen \Rightarrow kein Lidschlußreflex, Katarakt
- IRB (1400 nm - 3000 nm): Absorption hauptsächlich in vorderer Augenkammer, thermische Schädigung
- IRC (ab 3000 nm - 1 mm): Absorption in der Hornhaut, thermische Schäden

ACHTUNG bei Lasern besteht in der Regel die größte Gefahr bei Augeneinstellung auf Unendlich, da dann paralleles Licht maximal auf die Retina fokussiert wird!

Wechselwirkungen mit der Haut



Eindringtiefe von Laserstrahlung in die Haut

- UVC (100-280nm): starke Absorption, dringt nur in dünne Oberflächenschicht ein
- UVB (280-315nm): Erytheme (Hautrötung), Schwellwert ca. $0,1 \text{ J/cm}^2$
- UVA (315-380nm): direkte Pigmentierung der Haut, Schwellwert ca. 10 J/cm^2
- VIS (380-780nm): größte Eindringtiefe, photochemische Prozesse, therm. Wirkungen
- IRA (780-1400nm) und IRB (1400-3000nm): Eindringtiefe wird kleiner, Verbrennungen
- IRC (ab 3000nm-1mm): Absorption an der Hautoberfläche, Verbrennungen

Kennzeichnung der Lasereinrichtungen

Die Kennzeichnung der Laser wird in der Regel bereits durch den Hersteller vorgenommen. Die Kennzeichnung erfolgt durch das Symbol Laserwarnschild (in der Regel in der Nähe der Strahlaustrittsöffnung). Zusätzlich müssen ein Hinweisschild mit Informationen zu der Laserklasse (mit Normangabe) und dem entsprechenden Warnhinweis sowie ein Hinweisschild mit den Spezifikationen angebracht sein.



Laserwarnschild

Laser Klasse 1 Nach DIN EN 60825-1:2001-11		Laserstrahlung Nicht direkt mit optischen Instrumenten betrachten Laser Klasse 1M Nach DIN EN 60825-1:2001-11	
Klasse 1		Klasse 1M	
Laserstrahlung Nicht in den Strahl blicken Laser Klasse 2 Nach DIN EN 60825-1:2001-11		Laserstrahlung Nicht in den Strahl blicken oder direkt mit optischen Instrumenten betrachten Laser Klasse 2M Nach DIN EN 60825-1:2001-11	
$P \leq 1 \text{ mW}$ $\lambda = 650 \text{ nm}$		$\lambda = 650 \text{ nm}$ $E \leq 25 \text{ W/m}^2$	
Klasse 2		Klasse 2M	
Laserstrahlung Direkte Bestrahlung der Augen vermeiden Laser Klasse 3R Nach DIN EN 60825-1:2001-11		Unsichtbare Laserstrahlung Nicht dem Strahl aussetzen Laser Klasse 3R Nach DIN EN 60825-1:2001-11	
Unsichtbare Laserstrahlung Direkte Bestrahlung der Augen vermeiden Laser Klasse 3R Nach DIN EN 60825-1:2001-11		Unsichtbare Laserstrahlung Direkte Bestrahlung der Augen vermeiden Laser Klasse 3R Nach DIN EN 60825-1:2001-11	
400 nm bis 700 nm		700 nm bis 1.400 nm	
Andere Wellenlängen		Andere Wellenlängen	
$P_0 = \text{_____}$ W $\lambda = \text{_____}$ nm		$P_0 = \text{_____}$ W $\lambda = \text{_____}$ nm	
Klasse 3R		Klasse 3R	

Nicht dem Strahl aussetzen Laser Klasse 3B Nach DIN EN 60825-1:2001-11	Unsichtbare Laserstrahlung Nicht dem Strahl aussetzen Laser Klasse 3B Nach DIN EN 60825-1:2001-11
400 nm bis 700 nm	
Andere Wellenlängen	
$P_0 = \text{ } W$ $\lambda = \text{ } \text{nm}$	$P_0 = \text{ } W$ $P_P = \text{ } W$ $t = \text{ } \text{s}$ $F = \text{ } \text{J}$ Hz $\lambda = \text{ } \text{nm}$
Klasse 3B	
Laserstrahlung Bestrahlung von Auge oder Haut durch direkte oder Streustrahlung vermeiden Laser Klasse 4 Nach DIN EN 60825-1:2001-11	Unsichtbare Laserstrahlung Bestrahlung von Auge oder Haut durch direkte oder Streustrahlung vermeiden Laser Klasse 4 Nach DIN EN 60825-1:2001-11
400 nm bis 700 nm	
Andere Wellenlängen	
$P_0 = 20 W$ $\lambda = 457 \text{ nm} - 514 \text{ nm}$	$P_0 = 100 W$ $P_P \leq 5,5 \text{ kW}$ $t = 0,1 \text{ ms} - 10 \text{ ms}$ $F = \text{ } \text{J}$ Einzelpuls bis 300 Hz $\lambda = 1.064 \text{ nm}$
Klasse 4	

Die vorher dargestellten Hinweisschilder mit den Spezifikationen sind nur beispielhaft und werden abweichende Informationen enthalten. Die Angaben zur Spezifikation enthalten die folgenden Parameter:

- P_0 : Gesamtleistungsleistung (cw) bzw. mittlere Strahlungsleistung eines gepulsten Lasers (Einheit: W)
- P_P : Strahlungsleistung, ausgestrahlt innerhalb eines Impulses eines gepulsten Lasers (Einheit: W)
- E: Bestrahlungsstärke (Einheit: W/m^2)
- F: Pulswiederholfrequenz (Einheit: Hz)
- t: Dauer eines Einzelimpulses (Einheit: s)
- λ : Wellenlänge der Laserstrahlung (Einheit: nm)

Kennzeichnung des Laserbereiches für die Laser Klasse 3R, 3B und 4:

Das Laserwarnschild und der Hinweisschild "Warnung vor Laserstrahlung" werden gefordert.

Empfohlen wird die Verwendung des Hinweisschildes mit Informationen zu der Laserklasse und dem entsprechenden Warnhinweis (in Deutsch und Englisch)

Abgrenzung und Kennzeichnung der Laserbereiche

Bauliche Schutzmaßnahme	Klasse	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Wände, Decken, Böden: Massiv, nicht brennbar, matt, hell, diffus reflektierend							X	X
Installationen: nicht metallisch (reflektierend)							X	X
Lichtinstallationen: großzügig, regelbar							X	X
Elektroinstallationen: hinreichende Anzahl von Not-Aus-Schaltern, Raum- und Stromkreis							X	X
Abschirmungen: hohe Absorption, schwer entflammbar							X	X
Spiegelnde Reflektionen: unbeabsichtigte Reflektionen sind zu vermeiden						X	X	X
Strahlweg: Strahl ist am Ende seines zweckdienlichen Weges zu begrenzen		X	X	X	X	X	X	X
Laserbereich: kennzeichnen, falls im Arbeits- oder Verkehrsbereich ("Warnung vor Laserstrahl")			X	X				
Laserbereich: abgrenzen und Grenzen kennzeichnen ("Warnung vor Laserstrahl")						X	X	X
Betriebsanzeige: Warnleuchten an allen Zugängen zum Laserbereich								X

Organisatorische Schutzmaßnahme	Klasse	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Anzeige: (§5) Anzeige des Betriebs bei BG Chemie und Gewerbeaufsichtsamt (durch Projektleiter *)						X	X	X
Laserschutzbeauftragter: (§6) schriftlich bestellen						X	X	X
Laserbereich: (§7) Grenzen festlegen, falls im Arbeits- oder Verkehrsbereich			X	X	X			
Laserbereich: Grenzen festlegen						X	X	X
Fernbedienbare Verriegelung: an Raum- oder Stromkreis anschließen							X	X
Schlüsselschalter: Schlüssel abziehen, wenn außer Betrieb							X	X
Laserschutzbrillen: (§8) geeigneten Augenschutzgeräte nach DIN EN 207 verwenden						X	X	X
Laserjustierbrillen: geeigneten Augenschutz nach DIM EN 208 verwenden						X	X	X
Schutzkleidung: bei Gefährdung (z.B. Handschuhe)						X	X	X
Unterweisung: erforderlich für alle Anwender		X	X	X	X	X	X	X
Unterweisung: erforderlich für alle Versicherten im Laserbereich						X	X	X
Beschäftigungsbeschränkung: (§ 11) für Jugendliche						X	X	X
Ärztliche Versorgung: (§ 12) Augenarzt aufsuchen, falls Verdacht auf Augenschaden	X	X	X	X	X	X	X	X