



Kommunikation mit Licht - So alt wie die Menschheit

Möglichkeiten und Grenzen optischer Freiraum-Kommunikationslösungen

Abstract

Hohe Bandbreiten, schnelle Installation und Inbetriebnahme – die moderne Art, Daten direkt durch die Atmosphäre zu übertragen, bietet Anwendern viele Vorteile. Doch wo Licht ist, da ist auch Schatten. So schränken Witterungseinflüsse die Reichweite von optischen Richtfunksystemen in unseren Breiten ein. Dabei stellt in erster Linie nicht die überbrückbare Entfernung das Problem dar, sondern die sich aus der Übertragungsdistanz und den atmosphärischen Einflüssen ergebende Verfügbarkeit. Geometrische und atmosphärische Dämpfung, Luftflimmern sowie die eingesetzten Technologien bei Sender und Empfänger beeinflussen die Übertragungsdistanz. In unseren Breiten empfiehlt sich die Freiraumübertragung nur bis ungefähr 2000 Meter.

Text

Die optische Nachrichtenübermittlung ist so alt wie die Menschheit. Schon Griechen und Römer nutzten Feuerzeichen, um Nachrichten über größere Distanzen zu übertragen. Im Laufe der Geschichte verfeinerte und veränderte sich die Übertragung bis hin zu den Flügeltelegraphen, die noch im 19. Jahrhundert im Einsatz waren. Danach trat die optische Übertragung etwas in den Hintergrund - der Siegeszug der Funktechnik begann.

Die Entwicklung optischer Übertragungslösungen bekam in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts durch die Erfindung des Lasers (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) neuen Aufschwung. Mit Hilfe dieser damals revolutionären Technologie gelang es, geeignete schnell modulierbare Lichtquellen zu entwickeln. Sie sind Voraussetzung für breitbandige und sehr zuverlässige optische Übertragungssysteme, die heute Daten mit Transferraten bis in den Gigabit-Bereich hinein übertragen.

Aktuelle Systeme dienen in erster Linie der Übertragung digitaler Signale, wie sie in Daten- und Telekommunikationsnetzen auftreten. Solche, bereits als Impulsfolgen vorliegende Daten, werden mit Hilfe einer Strahlquelle in Form einer Laser-Diode oder Leuchtdiode (LED) direkt durch die Atmosphäre zu einer Empfangsstation gesandt. Alle optischen Systeme benötigen hochwertige Optiken zur Strahlbündelung und zur Erzeugung einer möglichst großen Apertur. Im Empfänger wandeln Fotodioden die optischen Signale wieder zurück in die elektrischen Impulse und stellen sie dann zur weiteren Verarbeitung in den Netzen zur Verfügung. Das Prinzip der Übertragung zeigt Bild 1.

Optischer Richtfunk - flexibles und kosteneffektives Übertragungssystem

Vor ungefähr 13 Jahren begann die kommerzielle Nutzung der optischen Systeme in privaten Netzen. Bis zu diesem Zeitpunkt standen die klassischen Mikrowellen-Richtfunksysteme für die Datenübertragung in privaten Netzen aufgrund der Gesetzeslage nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung. Für eine drahtlose Anbindung verschiedener Niederlassungen mit hohen Bandbreiten für Distanzen bis 2000 Meter boten sich daher die optischen Systeme an. Sie übertragen hohe Bandbreiten, wie sie heute immer öfter für viele Applikationen gefordert werden. Derzeit bewegt sich die Übertragungskapazität zwischen einigen Megabit bis hin zu mehr als einem Gigabit pro Sekunde. Drahtlose optische Systeme sind dabei im Vergleich zu Mietleitungen oder Mikrowellen-Richtfunksystemen gleicher Bandbreite sehr viel kostengünstiger. Auch fallen keine laufenden Miet- oder Lizenzkosten an. Eine Frequenzkoordinierung und -zuteilung durch die Regulierungsbehörde Telekommunikation und Post (RegTP) wie für Mikrowellen-Richtfunksysteme, die mit derzeit 248,- Deutsche Mark pro Jahr zu Buche schlägt, ist nicht notwendig.

Begünstigend für eine breitere Anwendung dieser Technologie kommt hinzu, dass in Ballungszentren wie Berlin, Frankfurt oder München in einigen Frequenzbändern kaum noch Lizenzen für

Mikrowellen-Richtfunkssysteme zu erhalten sind. Nur unter eingeschränkten Bedingungen erteilt die RegTP eine Erlaubnis für ein solches Richtfunkssystem im 23, 26 und 38 GHz Band. Abgesehen von Lichtwellenleitern ist die einzige leistungsfähige Alternative für Distanzen bis 2000 Meter: Optischer Richtfunk.

Besonderheiten und Aufbau der optischen Richtfunkssysteme

Wie alle Richtfunkssysteme benötigen auch die optischen Systeme eine direkte Sichtverbindung. Prinzipiell bestehen optische Richtfunkssysteme aus zwei Stationen, die jeweils einen oder mehrere optische Sender und Empfänger enthalten. Je nach Reichweite sorgen Linsen mit unterschiedlichen Durchmessern für einen sicheren Empfang und die notwendigen Systemreserven. Daraus resultieren verschieden große Gehäuse, die die hochwertige Optik und die Elektronik schützen und für den permanenten Betrieb im Freien unerlässlich sind.

Im Sender emittieren entweder Leuchtdioden oder Halbleiter-Laser-Dioden unsichtbares Infrarotlicht, das von den zu übermittelnden Daten moduliert wird. Nach der Übertragung durch die Luft bündeln in der Gegenstation die Empfangslinsen das IR-Licht wieder auf den Empfänger. Große Linsen gewährleisten ausreichende Reserven, um auch bei widrigen Witterungsbedingungen Daten fehlerfrei zu übertragen.

In den meisten handelsüblichen Systemen kommen Leucht- oder Laser-Dioden mit einer Wellenlänge von ungefähr 850 nm (Nanometer) zum Einsatz. Bei dieser Wellenlänge stehen kostengünstige Sender zur Verfügung, die das Signal mit hohem Wirkungsgrad elektro-optisch umsetzen können und gleichzeitig sehr schnell modulierbar sind. Auf Empfängerseite wandeln leistungsfähige Dioden das breitbandig modulierte, optische Signal wieder in eine elektrische Größe um. Für die optischen Komponenten steht die gesamte Palette der Komponenten für sichtbares Licht zur Verfügung. Und zu guter Letzt erweist sich die Atmosphäre in diesem Wellenlängenbereich als besonders durchlässig bezüglich der atmosphärischen Einflüsse.

Alternativ bietet sich ein Einsatz von elektro-optischen Bauelementen für eine Wellenlänge von 1550 nm an. Allerdings sind die atmosphärischen Einflüsse nicht signifikant geringer.

Atmosphärische Einflüsse auf die optische Datenübertragung

Wie bereits bei den Systemeigenschaften erwähnt, benötigen optische Richtfunksysteme für eine erfolgreiche Übertragung eine direkte Sichtverbindung. Licht, das direkt durch die Atmosphäre geschickt wird, unterliegt dabei Einflüssen, die die maximale Reichweite stark beeinträchtigen. Jeder kennt das Phänomen, dass die Sicht bei Nebel und starkem Schneefall zurückgeht. Weniger bekannt ist, dass auch starke Winde und intensive Sonneneinstrahlung aufgrund der Luftverwirbelungen und dem Flimmereffekt zu einer Beeinträchtigung führen können – als Beispiel sei das Hitzeflimmern im Sommer über einer Asphaltdecke angeführt, das die Abbildung eines Gegenstandes stark verzerrt. Für optische Richtfunksysteme gibt es drei wesentliche Einflussfaktoren bei Querung der Atmosphäre:

- Geometrische Dämpfung;
- Flimmern;
- Molekulare Absorption und Streuung.

Geometrische Dämpfung

Nur ein Bruchteil des ausgesandten Lichtes erreicht auch wirklich den Empfänger (Bild 2). Die Folge ist ein erheblicher Verlust an Übertragungsleistung. Die Größenordnung der geometrischen Dämpfung zeigt folgende Gleichung:

$$a_{geom} = 20 \cdot \log\left(\frac{\alpha \cdot R}{d_e}\right) dB \quad (Gl.1)$$

In der Formel gibt R die Übertragungsdistanz in Metern an, α den Öffnungswinkel (Divergenz) des ausgesandten Lichtstrahls in Millirad¹ und d_e den Durchmesser des Empfängers ebenfalls in

¹ Anmerkung: 17 mrad entspricht ungefähr einem Grad. 1 mrad beschreibt den Winkel, unter dem man 1 Meter auf einer Übertragungsdistanz von 1000 Metern sieht

Metern. Typischerweise liegt die Divergenz eines optischen Senders ungefähr zwischen 0,5 und 25 mrad.

Eine Schwierigkeit beim Systemdesign besteht darin, für eine gegebene Entfernung den bestmöglichen Öffnungswinkel zu finden. Denn Wind und thermische Ausdehnung aufgrund von Sonneneinstrahlung können bei Gebäuden und Befestigungsrohren zu leichten, für das menschliche Auge nicht wahrnehmbaren Schwankungen führen. Bei der optischen Freiraumübertragung werden diese Bewegungen für Strahldivergenzen unter 2 mrad allerdings kritisch, da der nur wenig aufgeweitete Strahl an der Gegenstelle nicht mehr den Empfänger trifft. Auf der anderen Seite sind die Entwickler bestrebt, den Öffnungswinkel so klein wie möglich zu halten, um eine große Systemreserve zu erzielen - speziell zur Überbrückung weiterer Entfernungen auch bei schlechtem Wetter. Der kleinere Winkel verhindert nämlich, dass der Strahl an der Empfangsstation eine zu große Fläche beleuchtet. Die übertragene Energie verteilt sich auf die gesamte Fläche und geht so in den Randbereichen, die außerhalb der Empfangslinsen als Reserve für etwaige Strahlauslenkung dienen, für die Bündelung verloren.

So laufen dann auch die Bestrebungen hin zu einer möglichst großen Empfangslinse. In der Praxis haben sich Durchmesser zwischen 0,2 und 0,3 Meter bewährt. Größere Abmessungen machen die Gehäuse unhandlich und führen bei Distanzen über 500 Meter zu unerwünschten Nebeneffekten, die durch Laufzeitunterschiede der Randstrahlen, Tageslicht-Filterung und Abbildungsfehler der großen Linsen hervorgerufen werden. Alle diese Effekte verschlechtern wieder die Systemleistungen. Bilder 3 und 4 zeigen typische geometrische Dämpfungen in Abhängigkeit von Divergenz und Übertragungsweite. Typische Werte für eine Verbindung von mehreren hundert Metern und einem Empfängerdurchmesser von 0,2 Meter liegen zwischen 15 und 35 dB.

Luftflimmern und Turbulenzen

Sobald Licht direkt durch die Atmosphäre übertragen wird, führt Luftflimmern zu einem Rauschen (Intensitäts-Störmodulation) beim empfangenen Signal. Luftflimmern entsteht durch schnelle Änderungen des Brechungsindex der Luft und ruft Veränderungen bei Fokussierung, Streuung und Strahlauslenkung hervor (Bild 5). Die Größe ist stark abhängig von meteorologischen Rahmenbedingungen, der Höhe des Strahlverlaufs über Boden oder Dächer, dem Untergrund sowie der Empfangsfläche. Typischerweise liegt sie bei etwa 3 dB/km.

Bei Flimmerfrequenzen bis in den kHz-Bereich hinein, erfordert dieser Effekt besondere Beachtung beim Systemdesign. Es muss vermieden werden, dass die schnellen und starken Änderungen in den weiteren Verarbeitungsstufen des Empfangssystems zu Jitter führen. Schon bei der Planung des Übertragungswegs kann der Verantwortliche Maßnahmen gegen Flimmern ergreifen. Vorbeugend sollten Austrittsöffnungen heißer Luft, beispielsweise von Kaminen oder Wärmetauschern von Klimaanlage, möglichst vermieden werden. Bild 6 zeigt den Effekt des Luftflimmerns am Empfänger.

Molekulare Absorption und Streuung

Ein weiterer atmosphärischer Effekt beeinflusst die Datenübertragung mittels Licht in negativer Weise: Die molekulare Absorption und Streuung. Eine Vielzahl von Experimenten und Beobachtungen war nötig, um eine empirische Formel zur Beschreibung abzuleiten. Sie lautet:

$$a_{\text{scatter}} = \frac{17}{S/\text{km}} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda/\mu\text{m}} \right)^{0.195 \cdot S/\text{km}} \frac{\text{dB}}{\text{km}}$$

Das Ergebnis ist abhängig von der Sichtweite S in Kilometer und der Wellenlänge λ in μm . Dabei bezeichnet Sichtweite die Entfernung, in der der Anwender mit bloßem Auge immer noch größere Gebäude erkennen kann. Nebel und Dunst verkürzen also die Sichtweite. Mit obiger Formel errechnet sich bei 800 nm

Wellenlänge eine Dämpfung von 15,8 dB pro Kilometer bei einer Sichtweite von 1 Kilometer. Schon die Halbierung der Sichtweite auf 500 Meter, beispielsweise durch Schneefall, schlägt sich mit 33 dB pro Kilometer nieder. Bei 100 Meter Sichtweite (starker Nebel) sind es sogar 168 dB pro Kilometer! Ein Übersicht für 800 nm und 1550 nm Wellenlänge geben Bilder 7 und 8. Wie bereits weiter oben angeführt, sind die Dämpfungseffekte durch Streuung und Absorption im nahen Infrarot nahezu identisch.

Sende- und Empfangsmodule

Sendequellen: Leucht- oder Laser-Dioden

Als Strahlquelle stehen zwei verschiedene Technologien zur Auswahl: Luminiszenz-Dioden oder VCSEL-Laser (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) (Bild 9 und 10). Beide Quellen arbeiten im nahen Infrarot bei circa 850 nm und haben eine Lebensdauer von mehr als zehn Jahren. Das zu übertragende Signal steuert dabei entweder direkt die Strahlungsintensität oder es moduliert einen hochfrequenten Zwischenträger in Phase und Frequenz.

Beide Systeme liefern ein stark divergentes Licht, so dass sie speziell angepasste Linsen- oder Spiegel-Optiken benötigen. Ziel ist es, einen möglichst homogenen, nahezu parallelen Strahl mit kleiner Divergenz zu erzeugen. Um augensichere Systeme zu konstruieren, sollte die abgestrahlte Leistung nicht höher als 10 bis 20 Milliwatt pro Sender bei Aperturen von mehr als zehn Quadratzentimeter liegen. Moderne optische Übertragungslösungen erfüllen die Anforderungen der Laserklasse 1m. Mit dieser Sicherheitsklasse entfallen einige Sicherheitsbestimmungen, die mit Systemen der Laserklasse IIIb noch verbunden waren. Eine höhere Akzeptanz bei den Anwendern ist die Folge.

Empfänger

Auch bei Empfängern stehen zwei unterschiedliche Dioden zur Verfügung. Einfache Empfänger nutzen sogenannte PIN (Positive

Intrinsic Negative)-Dioden. Um die Systemreserve zu steigern, können APD (Avalanche Photo Diode)-Dioden mit bis zu 10 dB höherer Empfindlichkeit eingesetzt werden. In beiden Fällen bündeln große Empfangslinsen das einfallende Signal wieder auf die Dioden. Typischerweise verfügt ein Empfänger mit PIN-Diode bei 10 MHz Bandbreite über eine Empfindlichkeit von ungefähr -40 dBm. Eine möglichst große Empfangsfläche hat bei optischen Systemen die gleiche Bedeutung wie der Antennengewinn bei Mikrowellen-Systemen.

Pegel-Diagramm

Optische Richtfunksysteme müssen über große Systemreserven verfügen, um den Betrieb auch unter widrigen Wetterbedingungen zu erlauben. Um die Auswirkungen der geschilderten Einflüsse zu verdeutlichen, soll folgende Beispielrechnung für die Systemreserve einer Verbindung über 1,5 Kilometer dienen (Bild 11).

Der Sender strahlt mit einer Leistung von +12 dBm. Verluste treten durch die Optiken bei Sender und Empfänger sowie die Frontscheiben auf, insgesamt circa -5 dB. Die atmosphärischen Effekte tragen mit -15 dB für die geometrische Dämpfung, -1,5dB für die molekulare Dämpfung und Absorption (klares Wetter) bei. Weiterhin führen Flimmern und Turbulenzen noch mal zu je -3 dB Verlust. Die maximale Empfangsleistung liegt damit bei -16 dB. Bei einer minimalen Empfindlichkeit des Empfängers von -40 dB für einen fehlerfreien Empfang ergibt sich eine Systemreserve von 24 dB oder 16 dB/km als bezogene Größe.

Bild 12 zeigt die Reserve eines optischen Systems bei einer geometrischen Dämpfung von 15 dB pro Kilometer und einer Übertragungsentfernung von 1,8 Kilometer. Wie leicht zu erkennen ist, arbeitet das System fehlerfrei bis zu einer Streuung von 25 dB pro Kilometer, was leichtem Schneefall entspricht, aber eben nicht mehr bei dichtem Nebel mit 150 dB pro Kilometer.

Fazit

Die Entscheidung für ein optisches Richtfunksystem hängt letztlich von dessen Verfügbarkeit ab. Diese ist stark an die zu überbrückende Distanz, aber auch an die lokalen Wetterbedingungen geknüpft. Übermäßig großen Versprechungen für Reichweiten über 2 Kilometer für unsere Breiten sollte der Anwender auf jeden Fall skeptisch gegenüberstehen und sie genauestens hinterfragen. Die oben geschilderten Effekte stellen physikalische Gegebenheiten dar und sind systemunabhängig. Bild 13 zeigt abschließend eine Verfügbarkeitskurve, die sich empirisch aus über 1000 Installationen in Deutschland ergeben hat. Und selbst hier wird erkennbar, dass viele Systeme - aufgrund der breiten Streuung der wetterbedingten Dämpfungswerte - statistisch große Abweichungen der Verfügbarkeit nach oben und unten vom Mittelwert haben. So sollte der Anwender immer im Einzelfall prüfen, ob in seiner Region der Einsatz optischer Richtfunklösungen sinnvoll ist. Hersteller und unabhängige Planer sind bei dabei gerne behilflich.

- Bild 1: Prinzip der optischen Freiraumübertragung
- Bild 2: Geometrische Dämpfung: Entfernung R in Meter, Divergenz α in Radiant und dem Empfängerdurchmesser d_e in Meter.
- Bild 3: Geometrische Dämpfung als Funktion der Divergenz α
- Bild 4: Geometrische Dämpfung als Funktion der Übertragungsentfernung R
- Bild 5: Einflüsse von Luftflimmern und Turbulenzen auf Licht in der Atmosphäre
- Bild 6: Beispiel für Signalstärkeschwankungen am Empfänger aufgrund von Luftflimmern
- Bild 7: Wetterbedingte Dämpfung als Funktion der Sichtweite
- Bild 8: Tabelle der wetterbedingten Dämpfung für 800 und 1550 nm
- Bild 9: Bild einer VCSEL-Laser-Diode
- Bild 10: Bild einer Luminiszenz-Diode
- Bild 11: Beispiel für die Berechnung der tatsächlichen und auf 1 km standardisierten Systemreserve
- Bild 12: Wetterabhängiges Leistungsdiagramm
- Bild 13: Verfügbarkeit optischer Richtfunksysteme auf Basis von Statistiken aus mehr als 1000 Installationen