

Einleitung

In der Lichttechnik von Kraftfahrzeugen haben sich in den letzten Jahren enorme Veränderungen ergeben. Sowohl im Innen- als auch im Außenraum werden immer mehr konventionelle Glühlampen durch anorganische Leuchtdioden unterschiedlicher Farbe ersetzt. Die Vorteile liegen insbesondere in der flachen Aufbautechnik und in der hohen Lebensdauer, die abhängig vom Einsatzgebiet, bis zu 100 000 Stunden beträgt. Mittels neuartiger Spritzgusstechnik können LEDs in nahezu beliebige Formen gegossen werden; eine Kombination von LED und Abbildungsoptik in kompakter Bauweise wird dadurch ermöglicht. Somit finden LEDs an vielen Stellen im Fahrzeuginnen- und außenraum Verwendung.

Durch die einfache Modulierbarkeit von Leuchtdioden besteht die Möglichkeit vorhandene Scheinwerfer und Leuchten zusätzlich zum Datenaustausch zu benutzen. Für die Sendeelemente ist kein weiterer Bauraum erforderlich, was zu einer Reduzierung von Kosten und Gewicht führt. Zusätzlich wird, durch die optische Datenübertragung, die Strahlenbelastung durch Elektromog auf ein Minimum reduziert.

In der vorliegenden Arbeit werden Potentiale und Grenzen von LED Beleuchtungselementen als Sendeelemente für die optische Freiraumdatenübertragung zwischen und innerhalb von Kraftfahrzeugen untersucht.

Beispielsweise kann durch Modulation von LED-Bremsleuchten eine unidirektionale Datenkommunikation zwischen Fahrzeugen aufgebaut werden, um damit wichtige, verkehrsrelevante Daten wie z.B. Fahrbahnbeschaffenheit, Verzögerung und Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges an nachfolgende Fahrzeuge zu übertragen. Diese Informationen können dann je nach Dringlichkeit entweder an den Fahrer oder an die Bordelektronik weitergeleitet werden. In Extremsituationen könnte z.B. die Notbremsung eines vorausfahrenden Fahrzeuges direkt von der Bordelektronik verarbeitet und eine automatische Bremsung ausgeführt werden. Somit kann die Reaktionszeit des Fahrers und die Aufbauzeit der Bremse, die in der Summe ca. eine Sekunde beträgt und mehr als der Hälfte des gesamten Anhalteweges entspricht, umgangen werden. Dabei ergibt sich bereits bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h eine Reduzierung des Anhalteweges um 27 m.

Durch den zukünftigen Einsatz weißer LEDs in Frontscheinwerfern, bzw. durch die gleichzeitige Nutzung von Infrarot-LEDs für Nachtsichtsysteme und zur Freiraumkommunikation, kann eine bidirektionale Datenkommunikation zwischen Fahrzeugen realisiert werden.

Für die praktische Realisierung ist die Unterscheidung verschiedener Fahrzeuge, die zum Beispiel auf Parallelfahrbahnen nebeneinander fahren, wichtig. Vor allem hier zeigt die optische Übertragung im Vergleich zu funkbasierten Systemen (wie z.B. Wireless LAN) Vorteile. In dieser Arbeit wird ein System entwickelt, das eine solche Trennung verschiedener Teilnehmer durch die Verwendung von Empfangsdiodenarrays einfach und effektiv ermöglicht.

Im Fahrzeuginnenraum werden LEDs zunehmend zur ambienten Beleuchtung eingesetzt. Flächige Beleuchtungselemente, in Farbe und Helligkeit variierbar, sollen dem Fahrer mehr Komfort und eine bessere Orientierung im Fahrzeug ermöglichen und zukünftig während der gesamten Fahrt eingeschaltet sein. Auch hier besteht die Möglichkeit der gleichzeitigen Nutzung zur Datenübertragung. Stationäre Endgeräte wie Fensterheber und Sitzverstellung können kabellos an den Automobil-Datenbus (CAN-Bus) angebunden werden. Mobile Endgeräte wie Laptops und PDAs können gleichermaßen mit dem Infotainment-/Telematikbus MOST verbunden werden. Ein großer Vorteil der optischen Freiraumdatenübertragung ist die Möglichkeit zusätzliche Steuergeräte an bestehende Datennetze anzubinden. Im Fahrzeug sind dabei, insbesondere bei nachträglicher Erweiterung, keine aufwendigen Umbaumaßnahmen erforderlich.

Die heute in der Infrarotdatenübertragung eingesetzten Sende-/Empfängerschaltungen können nicht direkt zur Freiraumkommunikation zwischen und innerhalb von Kraftfahrzeugen verwendet werden. In den Standards der Infrared Data Association (IrDA) wird von Kurzstreckenverbindungen ausgegangen, um die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Teilnehmer zu vermeiden. Die Empfängerschaltungen sind dementsprechend nur für einen geringen Dynamikbereich und einen geringen Sichtwinkel ausgelegt, während bei der Kommunikation zwischen Fahrzeugen ≈ 40 dB Dynamikbereich und aufgrund der Abstrahlcharakteristik von Standard-Heckleuchten ein Sichtwinkel von bis zu 80° erforderlich ist. Im Fahrzeuginnenraum wird ebenfalls ein möglichst großer Empfangsbereich benötigt, um die oben beschriebene Funktionalität sicherzustellen. Die IrDA-Sendesaltungen sind zur Ansteuerung von wenigen LEDs ausgelegt, während bei Verwendung von Standard-LED-Beleuchtungselementen zur Kommunikation bis zu 100 LEDs gleichzeitig angesteuert werden. Die in den IrDA-Standards definierten Codierverfahren eignen sich dagegen gleichermaßen für Kurz- und Langstreckenverbindungen und können sowohl für Infrarot- als auch für sichtbare Sendeelemente verwendet werden.

In dieser Arbeit werden zunächst die Anforderungen an ein optisches Freiraumdatenübertragungssystem definiert. Dazu werden die erforderliche Reichweite und die benötigte Datenrate anhand von Einsatzmöglichkeiten bestimmt. Durch Messungen im und am Fahrzeug ergeben sich die Störgrößen (Hintergrundlicht) bei der optischen Freiraumkommunikation, die mit den theoretisch zu erwartenden Werten verglichen werden. In Kapitel zwei wird zunächst die Modulierbarkeit von Standard-Beleuchtungs-LEDs untersucht. Anschließend werden unterschiedliche Codierverfahren vorgestellt und nach Bandbreite- und Leistungseffizienz für den Einsatz in der optischen Freiraumdatenübertragung klassifiziert. Als Ergebnis dieser Betrachtungen wird eine Sendeschaltung entworfen und prototypisch aufgebaut, die verkehrsrelevante Daten vom CAN-Bus abgreift und als Datenpaket den LEDs hochfrequent aufmoduliert. Abgeleitet von den Anforderungen an das optische Freiraumdatenübertragungssystem und den gesetzlichen Regelungen für Kfz-Leuchten wird in Kapitel drei ein Empfängerkonzept vorgestellt und prototypisch realisiert. Insbesondere werden dabei unterschiedliche Konzepte zur Störlichtunterdrückung und zur Erhöhung des Dynamikbereichs betrachtet. Mittels PSpice-Simulationen wird die berechnete Übertragungsfunktion verifiziert sowie eine Abschätzung der auftretenden Rauschgrößen vorgenommen. Anhand von gemessenen Bitfehlerraten und Augendiagrammen wird die Empfängerschaltung abschließend charakterisiert. In Kapitel vier wird die optische Freiraumdatenkommunikation zwischen Fahrzeugen vorgestellt. Um die Beeinflussung durch andere Teilnehmer zu er-

mitteln, werden reale Fahrszenen mit einer geeigneten Optik auf einen Schirm abgebildet und mittels Videokamera erfasst. Ausgehend von den ermittelten Daten wird ein Konzept zur Trennung verschiedener Teilnehmer und zur Ermittlung von Abstandsinformationen vorgestellt. Die dazu erforderliche Abbildungsoptik wird mit einem Simulationsprogramm optimiert. Die theoretisch mögliche Reichweite wird mittels einer Rauschanalyse ermittelt und anhand simulierter Fahrsituationen im Labor experimentell verifiziert. Mit Rückleuchten eines aktuellen Mercedes Fahrzeuges werden die Fahrsituationen anschließend im Freiraum nachgestellt und mit den Labormessungen verglichen. In einem abschließenden Kapitel werden Anwendungen multifunktionaler Beleuchtungselemente im Fahrzeuginnenraum aufgezeigt und demonstriert.

Kapitel 1

Anforderungen an optische Freiraumdatenübertragungssysteme

In diesem Kapitel werden Anforderungen an Freiraumdatenübertragungssysteme definiert. Dazu gehört eine Abschätzung der zu übertragenden Datenrate, die für die Kommunikation erforderliche Mindestreichweite, sowie eine Betrachtung der auftretenden Störgrößen. Bei der Datenkommunikation zwischen Fahrzeugen ergibt sich als weitere Anforderung die Trennung benachbarter Teilnehmer und die Vermeidung der gegenseitigen Störung. Dieses Kapitel setzt grundlegende Kenntnisse geometrischer Zusammenhänge sowie strahlungsphysikalischer und lichttechnischer Größen voraus, die in Anhang A bzw. Anhang B ausführlich beschrieben sind.

1.1 Erforderliche Datenrate

Bei der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ergibt sich die erforderliche Datenrate D_{req} aus der Anzahl der zu übertragenden Informationen (Bitanzahl B) und der für die Übertragung der Signale zur Verfügung stehenden Zeit t_1 zu

$$D_{\text{req}} = \frac{B}{t_1} \quad . \quad (1.1)$$

Mögliche zu übertragende Daten sind in Tabelle 1.1 mit entsprechender benötigter Bitanzahl aufgelistet. Diese Informationen können dazu verwendet werden wichtige Aussagen über das Fahrverhalten vorausfahrender Fahrzeuge und den entsprechenden Straßenzustand zu erhalten. Neben den Nutzdaten muss auch eine Synchronisationssequenz sowie eine Information zur Unterscheidung benachbarter Fahrzeuge mit übermittelt werden. Zur Unterscheidung könnten z.B. die letzten 6 Ziffern der Fahrgestellnummer, der aktuelle Kilometerstand oder auch eine generierte Zufallszahl herangezogen werden. Insgesamt ergibt sich somit eine Datenlänge von $B \approx 160$ Bit. Die für die Übertragung (t_1) und Auswertung (t_2) zur Verfügung stehende Zeit $t_{\text{gesamt}} = t_1 + t_2$ erhält man aus der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit V_{max} und einem als zulässig angenommenen Reaktionsweg s_{reakt}

$$t_{\text{gesamt}} = \frac{s_{\text{reakt}}}{V_{\text{max}}} \quad . \quad (1.2)$$

Mit $V_{\text{max}} = 250$ km/h und $s_{\text{reakt}} = 0.1$ m folgt $t_{\text{gesamt}} = 1.44$ ms. Für die Verarbeitung der empfangenen Signale wird eine Zeit von $t_2 = 1$ ms angenommen¹. Die für die Übertragung

¹1 ms entspricht 16 000 Operationen bei Verwendung eines 16 MHz AVR RISC Mikrocontrollers

Tabelle 1.1: Zu übermittelnde relevante Informationen bei der optischen Freiraumkommunikation zwischen Fahrzeugen. Die Informationen mit der dazugehörigen Auflösung entsprechen den Datenpaketen auf dem CAN-Bus.

Information	Auflösung	Bitanzahl
Geschwindigkeit 0 ... 250 km/h	1 km/h	8 Bit
Beschleunigung $-10.24 \dots + 10.08 \text{ m/s}^2$	0.08 m/s^2	8 Bit
ESP Status (Vollbremsung, ESP aktiv, ...)	1 Byte	8 Bit
Scheibenwischer (Stufe)	0,1,2,3	2 Bit
Gierrate $-327.68 \dots + 327.67 \text{ }^\circ/\text{s}$	$0.01 \text{ }^\circ/\text{s}$	16 Bit
Lenkwinkel 0 ... 720°	0.5°	11 Bit
GPS Position		64 Bit
Synchronisation		11 Bit
Codierung zur Unterscheidung		25 Bit

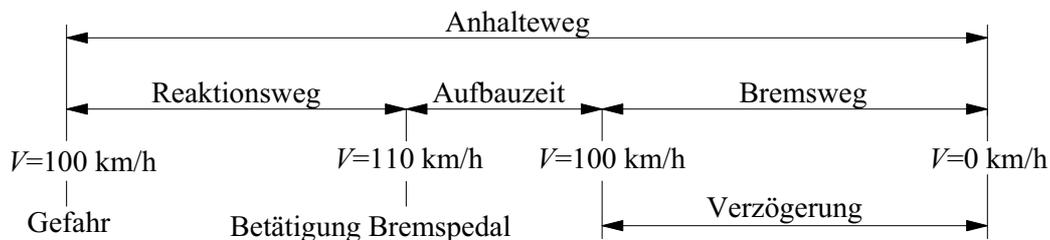


Bild 1.1: Zusammenhang zwischen Reaktions-, Brems- und Anhalteweg.

zur Verfügung stehende Zeit ist somit $t_1 = 0.44 \text{ ms}$ und mit Gleichung (1.1) folgt für die erforderliche Datenrate $D \geq 370 \text{ kBit/s}$.

Im Fahrzeuginnenraum ist die erforderliche Datenrate durch die entsprechende Anwendung festgelegt. Bei einer gewünschten Anbindung der optischen Freiraumübertragungsstrecke an den CAN-Bus im Automobil treten Datenraten von bis zu 500 kBit/s auf. Damit ist die kabellose Ansteuerung stationärer Endgeräte wie z.B. Fensterheber, Sitzverstellung, usw. sowie mobiler Diagnosegeräte möglich. Bei Anbindung an Infotainmentsysteme wie z.B. den D²-Bus (5.6 MBit/s) oder dem Nachfolgesystem MOST (Media Oriented System Transport, 22.4 MBit/s) sind entsprechend höhere Datenraten erforderlich.

1.2 Erforderliche Reichweite

Bei der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zum nachfolgenden Fahrzeug sollen sicherheitsrelevante Informationen ausgetauscht werden. Die dafür benötigte Reichweite wird durch den Anhalteweg eines Fahrzeuges bestimmt. In Bild 1.1 ist der gesamte Anhalteweg dargestellt, der sich aus Reaktionsweg, Aufbauzeit und Bremsweg zusammensetzt. Vom Moment der Gefahr bis zur Betätigung des Bremspedals kann sich die Geschwindigkeit zunächst

Tabelle 1.2: Vorgegebener Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und minimaler Bremsweg bis zum Stillstand in Abhängigkeit der Richt- bzw. Höchstgeschwindigkeit in Deutschland für verschiedene Straßentypen.

Straßentyp	Richt- bzw. Höchstgeschwindigkeit	Sicherheitsabstand	Bremsweg
Stadtstr.	50 km/h	25 m	≈ 10 m
Landstr.	100 km/h	50 m	≈ 40 m
Bundesstr.	100 km/h ^a	50 m	≈ 40 m
Autobahn	130 km/h . . . 250 km/h	65 m . . . 125 m	≈ 65 m . . . ≈ 240 m

^azweispurig

sogar noch erhöhen, wenn der Fahrer in diesem Moment gerade beschleunigt (z.B. Überholvorgang). Bis die Bremse dann greift und die maximale Verzögerung einsetzt, verringert das Fahrzeug während der sogenannten Aufbauzeit der Bremse die Geschwindigkeit nur geringfügig. Der eigentliche Bremsweg, der Zeitraum in dem das Fahrzeug maximal verzögert und zum Stillstand kommt, entspricht dabei weniger als der Hälfte des gesamten Anhalteweges. Mittels Datenkommunikation zwischen Fahrzeugen könnte der Reaktionsweg verkürzt und die Aufbauzeit komplett entfallen, indem die Bremse bereits beim automatischen Erkennen der Gefahr vorbereitet wird. Geht man von einem stehenden Fahrzeug (z.B. Stauende) aus, muss zur Vermeidung einer Kollision die Kommunikationsreichweite somit mindestens dem Bremsweg entsprechen. Der Bremsweg s_{brems} ergibt sich aus der Geschwindigkeit V und der maximalen Bremsverzögerung a_{max} zu

$$s_{\text{brems}} = \frac{V^2}{2a_{\text{max}}} \quad (1.3)$$

Maximal erreichbare Verzögerungen bei trockener Straße liegen bei $a_{\text{max}} \approx 10 \text{ m/s}^2$. Für die empfohlene Richtgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen ergibt sich damit ein Bremsweg von $s_{\text{brems}} \approx 65 \text{ m}$, der quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt und bei 200 km/h bereits $s_{\text{brems}} \approx 150 \text{ m}$ beträgt. Um den Fahrer in kritischen Situationen rechtzeitig warnen zu können, soll die mögliche Kommunikationsreichweite mindestens dem vorgegebenen Sicherheitsabstand (die Hälfte der angezeigten Fahrzeuggeschwindigkeit in [m]) zwischen Fahrzeugen entsprechen. In Tabelle 1.2 sind verschiedene Straßentypen mit entsprechender zulässiger Richt- bzw. Höchstgeschwindigkeit und den daraus resultierenden erforderlichen Sicherheitsabständen und Bremswegen dargestellt.

Die minimale Reichweite für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sollte somit $\approx 65 \text{ m}$ betragen. Ein optimaler Wert liegt zwischen 125 m . . . 150 m damit auch bei Geschwindigkeiten von bis zu 200 km/h auf Autobahnen rechtzeitig vor einem Stauende gewarnt und eine Kollision vermieden werden kann.

Aus der geforderten Reichweite und der gesetzlich vorgegebenen Lichtstärke der Schluss-/Bremsleuchten (siehe Abschnitt 4.1.1) lässt sich der geforderte Dynamikbereich für den Empfänger abschätzen. Da die Beleuchtungsstärke E_v mit dem Quadrat der Entfernung h