



Abschlussbericht Teil 1 – Kurze Darstellung



Dokumenteigenschaft

Titel	FACTOR Abschlussbericht Teil 1 – Kurze Darstellung
Betreff	Förderkennzeichen: 16KIS1607
Institut	Institut für Kommunikation und Navigation
Erstellt von	Alexander Sauter
Beteiligte	Alexander Sauter, Gianluigi Liva
Geprüft von	Alexander Sauter
Freigabe von	Alexander Sauter
Datum	21.10.2025
Version	1.0

Aufgabenstellung

Ziel dieses Projektes ist der Entwurf eines neuartigen Fehlerkorrekturverfahrens die eine Umsetzung von Datenraten von mindestens 100 Gbit/s für low-earth orbit (LEO) Datenlinks von Satelliten zur Basisstation zulassen. Für die wirtschaftliche Nutzung sollen die entwickelten Fehlerkorrekturverfahren auf FPGA/ASIC implementiert werden. Eine Datenübertragung in dieser Größenordnung mit einer Hardwareimplementierung bedeutet einen technischen Fortschritt der einen Wettbewerbsvorteil mit sich bringt.

Die Firma Creonic soll im Zuge dieses Projektes einen Zugang zum stark wachsenden Markt für optische Freiraumkommunikation erhalten. Ebenfalls hat die Firma Tesat ein Interesse an diesem Projekt da die zukünftigen Generationen der optischen Datenübertragungssysteme Datenraten von 100 Gbit/s oder höher umsetzen sollen. Die entwickelten Fehlerkorrekturverfahren kommen hierbei zu Einsatz. Die Technische Universität (TU) Kaiserslautern ist an der wissenschaftlichen Verwendung in Rahmen von Master und Doktorarbeiten im Bereich der hochratigen Datenübertragung interessiert.

Stand der Wissenschaft und Technik

In der modernen Kommunikationstechnik sind Fehlerkorrekturverfahren ein unabdingbarer Bestandteil für zuverlässige Datenübertragung. Dekodierung fortschrittlicher Fehlerkorrekturverfahren ist mit einer erheblichen Berechnungskomplexität verbunden. Auch die Hardwareimplementierung solcher Verfahren stellt eine große Herausforderung dar. Aus diesem Grund wurden lange Zeit keine Fehlerkorrekturverfahren in der Freiraumoptik verwendet und auf Reed-Solomon-Codes, wie sie auch heute noch im Standard zu finden sind, zurückgegriffen. Diese Codes sind jedoch weit von der Shannon Leistungsgrenze entfernt. Jene Grenze die das theoretische Limit bezüglich der Korrekturfähigkeit von Kanalcodes angibt. Für terrestrische Systeme existieren Codes die eine Datenrate von über 100 Gbit/s zulassen wie zum Beispiel Turbo Codes oder Low-Density Parity-Check (LDPC) Codes. Auch eine effiziente Implementierung auf Hardware lässt sich mit solchen Codes umsetzen. Turbo Codes oder LDPC Codes für eine terrestrische Übertragung besitzen nur eine kurze Blocklänge. Das DLR hat auf dem Gebiet der hochratigen Datenübertragung von mehr als 100 Gbit/s Vorarbeit für terrestrische Links geleistet.

Ablauf des Vorhabens

Für das Vorhaben wurden im Vorfeld sechs Arbeitspakete definiert. Das erste Arbeitspaket beinhaltet die Spezifikation des Kommunikationssystems und beschreibt wichtige Kennzahlen für die die einzelnen Systemkomponenten festgelegt wurden. Ein ständiger Austausch zwischen den Verbundpartnern erfolgte ständig. Ein wesentlicher Bestandteil dieses ersten Arbeitspakets war die Beschreibung des Kommunikationskanals. Die Kohärenzzeit (Zeit in der die Kanalimpulsantwort konstant ist) für den Downlink (Satellit zu Bodenstation) beträgt 2 Millisekunden. Um Fehler durch auftretenden Bursts Errors zu beseitigen ist eine Reihe von Codewörtern auf eine Dauer von 20 Millisekunden zu Übertragen. Über diese Kennzahlen ist die Auswahl des Kanalkodierverfahrens auf Spatially Coupled (SC) LDPC Codes gefallen (Arbeitspaket 2). SC LDPC bieten mit ihrem periodischen Aufbau eine Hardwarefreundliche Implementierung und unterschützen die geforderten Datenraten. Durch den ständigen Austausch mit der TU Kaiserslautern ist ein weitere Implementierungsverfahren in Form von interleaving hinzugefügt worden. Da das interleaving die Speicherung von Daten auf Hardware voraussetzt, war das DLR auf einer Hardware angelehnte Implementierung auf Software von der TU Kaiserslautern angewiesen. Interleaver verwürfeln das Codewort innerhalb der angegebenen Zeit von 20 Millisekunden. Durch die

Verwürfelung ist das zu dekodierende Codewort weniger anfällig für Burst Errors. Ein SC LDPC Code kann durch einen sog. Tanner Graphen repräsentiert werden. Ein Tanner Graph ist ein bipartiter Graph der zwei Disjunkte Mengen (in Variable Nodes und Check Nodes) über Kanten verbindet. Der iterative Dekodierprozess findet durch den Austausch von Nachrichten zwischen diesen Variable- und Check Nodes statt. Dabei müssen die Nachrichten quantisiert werden, um die internen Durchsatzraten für deine Übertragung von 100 Gbit/s zu gewährleisten. Dabei wurde ein quaternary message passing (QMP) Algorithmus implementiert, der für den Austausch der Nachricht von Check Nodes zu Variable Nodes zwei Bits in Anspruch nimmt. Die Idee hinter QMP ist, zwischen hohen und niedrig zuverlässigen Nachrichten zu unterscheiden (-H, -L, +L, +H), wobei ein Bit das Vorzeichen angibt und das zweite hoch oder niedrig signalisiert. Der Einsatz eines Sliding Window Dekodier reduziert die Latenz gegenüber einem Dekodierverfahren das den Nachrichtenaustausch auf dem ganzen Graphen durchführt. Nach Abschluss des Designs für die Kanalkodierverfahren wurden die Softwarepakete für die Implementierung auf Hardware der Firma Creonic übergeben (Arbeitspaket 3). Für den Uplink wurde der Übertragungskanal neu berechnet, da sich die physikalischen Eigenschaften ändern. Die Kohärenzzeit für den Uplink beträgt 1.62 Millisekunden. Arbeitspakt 4 ist die Labordemonstration aus den IP-Cores des Fehlerkorrekturmechanismuses.