

# 1. Einleitung

Wegen immer neu aufkommender Anwendungsmöglichkeiten, die ein hohes Internet-Datentransfervolumen beanspruchen (wie z.B. Cloud-Computing oder HDTV-Videoübertragung), steigt kontinuierlich die Nachfrage nach höheren Datenübertragungsraten durch die Endanwender. Bisher konnte diesen Anforderungen genügt werden, jedoch könnte sich in einigen Jahren die sog. letzte Meile bzw. das Zugangsnetz (engl. *access network*) - also die Verbindung eines Endanwenders in das Kernnetz eines Service-Anbieters - als Flaschenhals erweisen. Die heutzutage in diesem Bereich eingesetzten Technologien wie der kabelgebundene DSL-Zugang oder die kabellose LTE-Verbbindung besitzen eine Bandbreite, die bei Übertragungsraten von 1 GBit/s fast komplett ausgereizt ist. Bei Glasfaserkabeln hingegen ist die verfügbare Bandbreite so groß, dass bei diesem Übertragungsmedium der Engpass in den nächsten Jahrzehnten bei der für die Übertragung erforderlichen kostengünstigen Signalverarbeitung liegt.

Es sind bereits optische Zugangsnetze im praktischen Einsatz. Um die Kosten gering zu halten, werden bei diesen nur einfachste Übertragungsverfahren (wie z.B. On-Off-Keying) verwendet. Mit dem bereits aus der Weitverkehrstechnik bekannten kohärenten Übertragungsverfahren kombiniert mit digitaler Signalverarbeitung ließen sich viele Verbesserungen wie größere Reichweiten, geringerer Energieverbrauch oder höhere Übertragungsraten bewerkstelligen.

Die kommerzielle Vermarktung eines solchen kohärenten Access-Systems ist aus Kostengründen zum momentanen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll. Wegen des zunehmenden Preisverfalls für optische Komponenten aufgrund verbesserter Herstellungsprozesse und größerer Volumina kann in den nächsten Jahren aber mit einer wirtschaftlichen Produktion eines solchen Systems gerechnet werden. Um jedoch zeitgleich mit dem Aufkommen kostengünstiger Komponenten mit einem ausgereiften System auf den Markt treten zu können, muss mit der Entwicklung entsprechend frühzeitig begonnen werden.

## 1.1. Ziel der Arbeit

Diese Arbeit entstand aus der Idee eines Industrieunternehmens, die Schwierigkeiten für den Bau eines Modems mit kohärentem Empfang für ein solches Zugangsnetz zu analysieren und zu überwinden. Für die Entwicklung der erforderlichen Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung wurde ein Forschungsprojekt mit der Universität der Bundeswehr München ins Leben gerufen, im Rahmen dessen der Inhalt dieser Dissertation erarbeitet wurde.

Aufgabe war, sämtliche Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung zu erforschen, die für die Übertragung einzelner Bits notwendig sind (höher liegende Protokolle wurden nicht untersucht). Dabei war der Empfänger Hauptgegenstand des Projekts, aber auch der Sender

wurde betrachtet. Einige der Algorithmen (Parallelisierung von FIR-Filterung, Taktrückgewinnung und Detektion) wurden nach erfolgreicher Simulation auch in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL implementiert, so dass die Algorithmen in Echtzeit in der zur Verfügung stehenden Hardware laufen konnten. Für die Umsetzung der übrigen Algorithmen in VHDL wurden diese dem Industriepartner übergeben, der auch die Verantwortung für den Hardwareaufbau hatte.

Eine Schwierigkeit lag darin, Algorithmen und die zugehörigen Strukturen zu finden, die sich mit aktuell verfügbarer Hardware aufbauen lassen. Es musste daher ein Kompromiss zwischen Performance und Implementierungsaufwand für die einzelnen Algorithmen herausgearbeitet werden, bzw. neue Architekturen gefunden werden. Insbesondere der Empfänger in der Vermittlungsstelle stellt eine Herausforderung dar, da dieser die Daten von mehreren Teilnehmern gleichzeitig empfangen muss, d.h. mehrere Empfängerstrukturen parallel aufgebaut werden müssen. Wenn diese aus Kostengründen in einem einzigen digitalen Chip unterkommen sollen, muss dieser Chip zum einen sehr effiziente Filteralgorithmen zur Kanaltrennung besitzen (diese benötigen in der Regel die meiste Chipfläche), um überhaupt Platz in einem einzigen Chip zu finden. Zum anderen hat jeder empfangene Kanal eine andere Taktphase, so dass der Empfänger in der Vermittlungsstelle für jeden einzelnen empfangenen Kanal eine separate Taktrückgewinnung benötigt. Die oft verwendete Möglichkeit, dass sich der Chiptakt des Empfängers an den Sendetakt angleicht, entfällt somit aufgrund der Vielzahl verschiedener Taktquellen. Vielmehr ist der Chiptakt des Empfängers fest vorgeben und durch digitale Interpolation wird der Takt zwischen Sender und Empfänger synchronisiert (vollkommen digitale Taktrückgewinnung).

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt daher in der Entwicklung einer neuartigen zweistufigen Weighted-Overlap-Add-Struktur (WOLA-Struktur) zur Kanaltrennung und einer neuen parallelisierten Architektur für die digitale Taktrückgewinnung. Zudem werden auch die anderen Algorithmen auf die Tauglichkeit einer parallelisierten Echtzeitimplementierung untersucht.

Im Vergleich zu den Weitverkehrssystemen wird in den Access-Systemen zwar mit geringeren Symbolraten gearbeitet, für viele Algorithmen bedeutet dies jedoch lediglich, dass eine weniger starke Parallelisierung (s. Abschnitt 2.5.2) zum Einsatz kommt. Vielmehr besteht eine Schwierigkeit darin, dass bei den geringeren Symbolraten die Algorithmen viel stärker durch das Phasenrauschen eines Lasers beeinflusst werden. Dafür treten in Zugangsnetzen aufgrund geringerer Reichweiten und kleinerer Signalbandbreiten weniger Verzerrungen auf der Glasfaser auf als in Weitverkehrsnetzen.

## 1.2. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird ein Überblick über das Einsatzgebiet von Zugangsnetzen und die Systemarchitektur des betrachteten Systems gegeben. Zudem werden die Anforderungen an den zu entwerfenden Sender und Empfänger angesprochen. Anschließend werden in Kapitel 3 in Kürze die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten optischen Komponenten wie Fasern oder Modulatoren erläutert.

Die Reihenfolge der restlichen Kapitel ergibt sich aus dem auf Seite 14 abgebildetem Blockschaltbild des Empfängers (Abbildung 2.7). Von links beginnend werden die einzelnen Blöcke fortlaufend betrachtet. Als erster Block wird im ersten Hauptkapitel 4 die Kanaltrennung untersucht und dort besonders auf die Weighted-Overlap-Add-Struktur eingegangen. Diese Struktur kombiniert die Filterung eines Kanals mit dem Heruntermischen in das Basisband auf sehr effiziente Weise. Im sich anschließenden Kapitel 5 werden die Möglichkeiten aufgezeigt, um die Polarisationsschwankungen auf der Faser durch digitale Signalverarbeitung auszugleichen. In diesem Kapitel wird auch dargestellt, welche Vorrichtungen im Empfänger getroffen werden müssen, um auf zwei zueinander orthogonalen Polarisationen gleichzeitig Daten übertragen zu können (Polarisationsmultiplexing).

Kapitel 6 widmet sich der parallelisierten Implementierung von FIR-Filtern, während im darauffolgenden zweiten Hauptkapitel 7 die Taktrückgewinnung genauer analysiert wird. Dabei wird ein neu entwickeltes einfaches Schema für eine Echtzeitimplementierung bei Parallelisierung vorgestellt. Verfahren zur Trägerfrequenzkorrektur werden in Kapitel 8 angesprochen. Schließlich dient Kapitel 9 dazu, verschiedene Wege aufzuzeigen, wie eine differentielle Detektion durchgeführt werden kann. Auch werden hier aktuelle Erkenntnisse über die Fehlerkorrektur (engl. *forward error correction*, FEC) zusammenfassend dargestellt. Zum Abschluss wird in Kapitel 10 der entstandene Demonstrator vorgestellt und ein Ausblick über mögliche Verbesserungen in einer nächsten Version gegeben.

Daniel Schmidt

Signalverarbeitung für leistungsfähige Empfänger in optischen Zugangsnetzen

2015 / 176 Seiten / 27,80 € / ISBN 978-3-89574-872-1

Verlag Dr. Köster, Berlin / [www.verlag-koester.de](http://www.verlag-koester.de)