

1 Einleitung

In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst etwas allgemeiner auf die Motivation zur Optimierung und ihre Verwendung in der Technik eingegangen. Einem groben Überblick über die historische Entwicklung der künstlichen Intelligenz, speziell der Optimierung, folgt die Feststellung des aktuellen Standes der Technik für die Kompensation der chromatischen Dispersion. Danach werden die Ziele und die zum Erreichen dieser Ziele notwendigen Arbeiten vorgestellt. Abschließend folgt eine kurze Zusammenfassung über die Inhalte der einzelnen Kapitel der vorliegenden Arbeit.

1.1 Optimierung in der Technik

1.1.1 Historische Entwicklung

Wissenschaft ergibt sich aus dem großen menschlichen Wunsch, die Welt zu verstehen und zu steuern. Im Laufe der Geschichte haben wir Menschen allmählich einen großartigen Wolkenkratzer des Wissens aufgebaut, der uns ermöglicht, in unterschiedlichem Umfang, das Wetter, die Sonnen- und Mondfinsternisse, die Bewegungen der Planeten, den Verlauf von Krankheiten, die Stadien der Sprachentwicklung bei Kindern, den Aufstieg und den Abfall des Wirtschaftswachstums und ein riesiges Panorama von anderen natürlichen, sozialen und kulturellen Phänomenen vorauszusagen und zu kontrollieren. Erst vor kurzer Zeit glaubten wir verstanden zu haben, welche die tatsächlichen Grenzen unserer Fähigkeit zum Vorhersagen sind. Im Laufe der Ären haben wir immer komplexer werdende Mittel entwickelt, um viele Seiten unseres Lebens und unserer Wechselwirkung mit der Natur zu kontrollieren. Wir haben aber auch gelernt, häufig auf die harte Weise, wie riesig der Umfang anderer unkontrollierbarer Phänomene ist. Der Antrieb des Menschen zu Erfinden und zu Entwickeln war immer der Bedarf das Leben zu vereinfachen, die Natur zu bewältigen, das Universum zu entdecken oder die eigene Neugier zu befriedigen. Die ersten modernen Menschen Homo sapiens sowie deren Vorfahren Homo habilis und Homo erectus haben bereits in der Steinzeit vor 2,5 Millionen Jahren Werkzeuge entwickelt und Feuer genutzt um u. a. sich zu verteidigen und Essen zu beschaffen. In der danach folgenden Bronzezeit und Eisenzeit begann man Metalle für Werkzeuge und Waffen zu verwenden. Diese sind robuster und halten länger. Mit den ersten Notwendigkeiten der Kommunikation und Handel zwischen Individuen wurde das Konzept der Zahlen und der Nachrichtenübertragung entwickelt. Das älteste bekannte Rechenhilfsmittel, der Abakus, wurde vermutlich um 3000 v. Chr. von Babyloniern erfunden. Die erste Rechenmaschine wurde bereits im ersten Jahrhundert v. Chr.

mit dem Computer von Antikythera erfunden. Die in 1206 durch al-Dschazari¹ erfundene astronomische Uhr wird als erster programmierbarer „Rechner“ betrachtet. 1623 baute Wilhelm Schickard² die erste Vier-Spezies-Maschine und damit den ersten mechanischen Rechner der Neuzeit. 1642 folgte die Rechenmaschine von Blaise Pascal³ die Pascaline. Die Einführung der elektronischen Rechner ist wohl die revolutionärste Entwicklung in der Geschichte der Wissenschaft und Technik gewesen. Diese fortlaufende Revolution erhöht unsere Fähigkeit, die Natur zu verstehen, zu kontrollieren und zu steuern auf eine Art und Weise, die vor einem halben Jahrhundert noch unvorstellbar war. Für viele ist die Krönung dieser Revolution die Erschaffung neuer Arten von intelligenten Wesen und sogar von neuen Formen des Lebens. Die Ziele der Erstellung künstlicher Intelligenz und des künstlichen Lebens können zurück zum Anfang des Computeralters verfolgt werden. Die ersten Computer-Wissenschaftler wie z. B. Kurt Gödel, Alan Turing und Alonzo Church waren durch Visionen motiviert wie das Erstellen von intelligenten Computerprogrammen, die eine lebensähnliche Fähigkeit zur Selbstreproduktion und eine Anpassungsfähigkeit zur Umwelt haben sollten.

Diese früheren Pioniere der Informatik waren vielleicht mehr an der Biologie und an der Psychologie interessiert als an der Elektrotechnik. Es sollte deshalb nicht überraschend sein, dass die ersten Computer nicht nur für die Berechnung von Raketenflugbahnen und zum Entschlüsseln militärischer Codes eingesetzt wurden, sondern auch für die Modellierung des menschlichen Gehirns, der Nachahmung menschlichen Lernens und der Simulation der biologischen Evolution. In der Biologie hat die Evolution jedes Lebewesen überleben lassen, dass sich optimal an seine Umgebung anpasst. So sind Optimierungen in der belebten Welt der Biologie etwas „natürliches“ und finden ständig statt. Die Natur wurde und wird immer noch als Vorbild für die Optimierung technischer und wirtschaftlicher Prozesse gesehen. Zuletzt ließen sich J. Homberger und H. Gehring von der Fakultät Wirtschaftswissenschaft der Fern Universität Hagen von Ameisen inspirieren. In ihnen sehen sie die „Träger eines von der Natur vorgegebenen Problemlösungskonzeptes“ [Fuh08]. Dieses biologische Optimierungssystem der Ameisen setzten sie mit zwei Unternehmen in einer Logistik-Software für die Kfz-Tourenplanung um [Hom99]. Auch die Welt der Physik bedient sich der Optimierung. 1746 sprach Pierre Maupertuis⁴ als erster von einem

¹ Badi' Al-Zaman al-Dschazari:

arabischer Ingenieur und Autor des 12. Jahrhunderts

² Wilhelm Schickard:

deutscher Astronom und Mathematiker (1592-1635)

³ Blaise Pascal:

französischer Mathematiker, Physiker und Philosoph (1623-1662)

⁴ Pierre Louis Moreau de Maupertuis :

französischer Mathematiker, Astronom und Philosoph (1698-1759)

allgemeingültigen Prinzip der Natur, extremal oder optimal abzulaufen (Prinzip der kleinsten Wirkung). So durchläuft ein Lichtstrahl in einem Medium von allen denkbaren Wegen von einem Punkt zum anderen den Weg mit der geringsten Laufzeit (Fermatsches Prinzip). W. R. Hamilton⁵ hat nachgewiesen, dass das Zeitintegral über die Differenz von kinetischer und potentieller Energie für die tatsächliche Bewegung eines Körpers minimal ist. Mathematiker und Informatiker haben eine Vielfalt an analytischen, numerischen und statistischen Methoden entwickelt, um fast alle Probleme (u. a. Optimierungsprobleme) zu lösen. Man versucht zwar nach Möglichkeit immer zu optimieren, aber zum Glück ist nicht alles was um uns ist optimal. Es gibt auch Bereiche bei denen die Optimierung nichts zu suchen hat, wie z. B. Literatur, Musik und Kunst.

Die neuen intelligenten Programme, Simulationssoftware, Optimierungsalgorithmen und auch Computerspiele haben zu wachsenden Anforderungen an die Speicherkapazität und die Verarbeitungszeit zur Folge. Um Diese zu erfüllen, entwickelt die Computerindustrie ständig immer leistungsfähigere Rechner mit schnelleren Prozessoren und größeren Speicher. Durch stete Weiterentwicklung und Verkleinerung der elektronischen Komponenten und Speichermedien wurden gleichzeitig immer größere Kapazitäten und Geschwindigkeiten in der Datenverarbeitung und Speicherung ermöglicht, deren aktuelle Werte heute bereits in Gigahertz und Terabyte gemessen werden. Die Fachleute der Computerbranche wissen aber schon, dass sie mit der heutigen Halbleitertechnologie fast an der Grenze des physikalisch Möglichen sind. Die Optimierung der Kapazität und Geschwindigkeit durch Miniaturisierung der auf Silizium basierenden Komponenten in Chips und Prozessoren wird in einigen Jahren nicht mehr möglich sein. Immer kleiner und kürzer werdende elektrische Verbindungen verhalten sich immer weniger wie echte Leiterbahnen und durch das weitere Zusammenrücken der Einzelkomponenten beginnen diese sich gegenseitig und erheblich mit ihrem Elektromog zu stören, können also nicht mehr ausreichend voneinander entkoppelt werden. Die, auf herkömmliche Weise noch zu erreichenden, Taktraten werden wohl aus genau diesen Gründen die magische 10 GHz Marke niemals erreichen, geschweige denn überschreiten können. Eine weitere Optimierung ist damit endgültig ausgeschlossen. Es ist also notwendig, völlig neue Wege zu finden. Die so genannten Lichttechnologien oder auch Photonik genannt bieten eine attraktive Lösungsmöglichkeit [Techno]. Alle elektrischen Verbindungen würden dann durch optische Wege ersetzt. Komponenten könnten bis zur molekularen Ebene verkleinert, miteinander vernetzt und störungsfrei nebeneinander

⁵ Sir William Rowan Hamilton: irischer Mathematiker und Physiker (1805-1865)

betrieben werden. In jedem einzelnen Lichtkanal können gleichzeitig Hunderte von Signalen mit unterschiedlichen Wellenlängen übertragen werden. Somit könnten Prozessortaktfrequenzen bis annähernd 500 THz realisiert werden und dies bei einer kaum messbaren Verlustleistung und einem traumhaften Störsignalabstand. Ganz zu schweigen von den Vorteilen durch einen problemlosen drei-dimensionalen Aufbau jedes einzelnen Chips und der gesamten Schaltung in allen beliebigen Raumrichtungen. Hierdurch ließe sich die Größe aller Baugruppen sogar im Verhältnis von insgesamt eins zu einer Milliarde reduzieren [Techno]. Um dies erreichen zu können werden u. a. photonische Kristalle entwickelt und optimiert. Diese könnten zu Schlüsselkomponenten für die zukünftige Technologie werden. Natürlich muss die Datenübertragung der schnellen Prozessor-Taktrate gewachsen sein. Deshalb setzt man schon heute auf die optische Nachrichtentechnik und die Faserübertragung. Theoretisch fast unbegrenzte Übertragungskapazität erreichte man 1977 mit der Entwicklung der Singlemode-Faser, die in verschiedenen Variationen noch heute Stand der Technik ist [Ell06]. Die Singlemode-Faser sind hauptsächlich konzipiert, um bei den Wellenlängen $\lambda = 1310 \text{ nm}$ oder $\lambda = 1550 \text{ nm}$ eingesetzt zu werden. Sie haben sowohl eine sehr geringe Dämpfung im so genannten C-Band um 1550 nm als auch eine geringe Dispersion im sog. O-Band um 1310 nm. Mit der Entwicklung von Erbium-dotierten Faser-Verstärkern (EDFA) und Raman-Faserverstärkern (RFA) hat man das Problem der Dämpfung bewältigt [Des02], [Ell06]. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Kompensation der Dispersion werden im nächsten Abschnitt präsentiert.

1.1.2 Stand der Technik

Heutzutage findet der größte Teil der Datenübertragung über Monomode-Glasfasern statt. Bei der Verwendung von modulierbaren Lasern können Daten mit einer Übertragungsrate von mehr als 160 Gbit/s bei einem einzelnen Kanal [Fat09] und von mehreren Tbit/s bei Multikanalbetrieb [Sch03], [Hwa07], [Sch09] transportiert werden. Überschreitet die Übertragungsgeschwindigkeit die 10 Gbit/s-Grenze, so spielt die chromatische Dispersion (CD) eine große Rolle, da sie eine zeitliche Aufweitung der kurzen Impulse zur Folge hat. Die Impulsinterferenz ist von dem Dispersionswert des Übertragungsmediums, der Datenbitrate, der spektralen Breite der optischen Quelle und der Faserlänge abhängig. Die Polarisationsmodendispersion PMD und die zeitlich abhängige chromatische Dispersion stören bei Übertragungsraten von mehr als 40 Gbit/s erheblich [Slavo].

Eine verzerrungsfreie Impulsübertragung über Langstrecken ist somit nur möglich, wenn die Dispersion kompensiert wird. Die am stärksten genutzte Technik zur Dispersions-

kompensation ist die dispersionskompensierende Faser (DCF), siehe Abbildung 1.1.1 (c). Die Übertragungsstrecke besteht dann i. a. aus alternierenden Monomodefasern und dispersionskompensierenden Fasern. Aufgrund der begrenzten Silizium Dotierungskonzentration können konventionelle DCF keine sehr hohen Dispersionswerte kompensieren. Typische Dispersionswerte liegen dann zwischen -100 und -300 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ [Che09]. Mit DCF bestehend aus optimierten zwei räumlich von einander getrennten konzentrischen asymmetrischen Kernen und einem passenden Mantel können CD von bis zu 5100 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ kompensiert werden [Thy96], [Aug00], [Pan03]. Diese Struktur unterstützt zwei Moden, den Grundmodus und einen höheren Modus. Um eine hohe negative Dispersion zu erreichen und eine Monomode-Übertragung zu gewährleisten, sollten die Faserkerne eine hohe Brechzahl und einen kleinen Durchmesser haben. Sehr viel höhere negative chromatische Dispersionswerte kann man mit Hilfe von photonischen kompensierenden Fasern (PCF) erreichen. Durch die Optimierung der geometrischen Parameter der PCFs, einschließlich der Gitter-Konstante und des Radius der Luft-Löcher, können hohe negative Dispersionswerte über einen weiten Wellenlängenbereich erreicht werden. Ähnlich wie bei der DCF, wird um die PCF ein äußerer Ring mit einer größeren Brechzahl als die der photonischen Kristallfaser eingebracht. Die größere Brechzahl des Außenrings kann erzeugt werden, indem kleinere Luft-Löcher als die des inneren photonischen Kristalls verwendet werden oder die ursprünglichen Löcher mit Silizium aufgefüllt werden. Der innere Kern wird durch das Weglassen vom mittleren Luftloch des zweidimensionalen hexagonalen photonischen Kristalls erzeugt. So entsteht eine Doppelkern-PCF (DCPCF), siehe Abbildung 1.1.1 (a) und (b). Diese können chromatische Dispersionswerte von bis zu 55000 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ bei 1550 nm kompensieren, wenn das mittlere Loch nicht weggelassen sondern z. B. mit Silizium aufgefüllt wird [NiY04], [Hut05], [Zho08], [Nak07], [Che09], [WuM08], [Pol07].

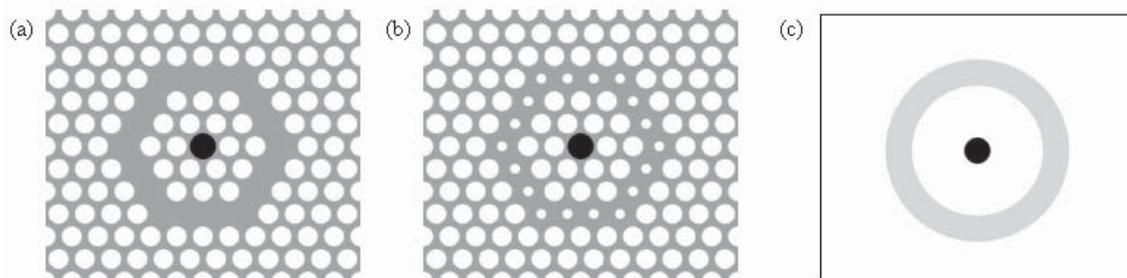


Abbildung 1.1.1 Mögliche Faserstrukturen um sehr hohe CD-Werte zu kompensieren. (a) und (b) DCPCF, (c) DCF [Hut05]

Extrem hohe negative chromatische Dispersionswerte von $-500000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ können theoretisch mit Hilfe von Faser Bragg Gitter (FBG) erreicht werden. FBG bestehen aus mehreren konzentrischen Schichten mit verschiedenen Brechzahlen [Eng03], [Ouy02], [Hin98]. Auch Multimode-Fasern, bei denen die Modi höherer Ordnungen in der Nähe der Grenzwellenlänge hohe Dispersionswerte aufweisen, werden für die Dispersionskompensation eingesetzt. Die Dispersionswerte, die mittels Multimode-Faser kompensiert werden können, sind kleiner als $1000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ [Poo94], [Gna00], [Gha02], [Ram01], [Ram07]. Chirped Bragg Gitter und 2D photonische Kristalle werden ebenfalls verwendet, um die Dispersion zu kompensieren [Hin98], [Pet05], [Hoa09], [Hus09]. Die 2D photonischen Kristalle bei [Pet05] können eine Dispersion von ca. $-150 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{mm})$ bzw. $-15 \cdot 10^7 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ haben.

Ein weiteres Thema, das berücksichtigt werden soll, ist der Wellenlängenbereich, über dem die hohe negative Dispersion zu finden ist. Da der EDFA in DWDM-Netzwerken im C-Band (1530-1565 nm) und L-Band (1570-1610 nm) eingesetzt wird, sollte die Halbwertsbreite (engl. FWHM) der negativen Dispersion etwa 100 nm breit sein, um diese Bereiche abzudecken. Das Problem ist, dass hohe negative Dispersionswerte und große Halbwertsbreiten nicht gleichzeitig erzielt werden können. So muss man einen Kompromiss finden. Die FWHM der Doppelkernfaser mit einem Dispersionswert von $-1800 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ist nur 20 nm [Aug00] und die Dispersion bei einem breiten Wellenlängenbereich ist weniger als $-200 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ [Aug02]. Das FBG mit einem Dispersionswert von $-500000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ hat eine FWHM von ca. 20 nm [Eng03]. Die PCF mit einem Dispersionswert von -18000 hat eine FWHM von nur ca. 4 nm [NiY04]. Die Halbwertsbreite bei Multimode-Fasern ist größer als 40 nm [Ram01], [Hut05].

Um zeitlich abhängige CD zu kompensieren, eignen sich die vorherigen Methoden nicht. Hier sind adaptive, abstimmbare Kompensatoren erforderlich. Es gibt z. B. abstimmbare DCPCF, die $19000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ kompensieren können [YuC08]. Hier werden die Luft-Löcher mit Flüssigkeit gefüllt um die Brechzahl, bzw. die Dispersion zu steuern. Eine Änderung der CD von $0 \text{ ps}/\text{nm}$ bis $2000 \text{ ps}/\text{nm}$ kann man mit einem abstimmbaren photonischen optischen Dispersionskompensator auf Siliziumbasis erreichen [Jon07]. Mit abstimmbaren Faser-Bragg-Gittern kann man z. B die CD von $312,6 \text{ ps}/\text{nm}$ bis $35,9 \text{ ps}/\text{nm}$ ändern [Han05], [Kim09]. Virtually-Imaged-Phased-Arrays können einen Einstellbereich von $-4080 \text{ ps}/\text{nm}$ bis $850 \text{ ps}/\text{nm}$ haben [Lee06]. Adaptive Delay-Line-Filter können auch als abstimmbaren Kompensatoren der CD eingesetzt werden [Dut05], [Ker06].