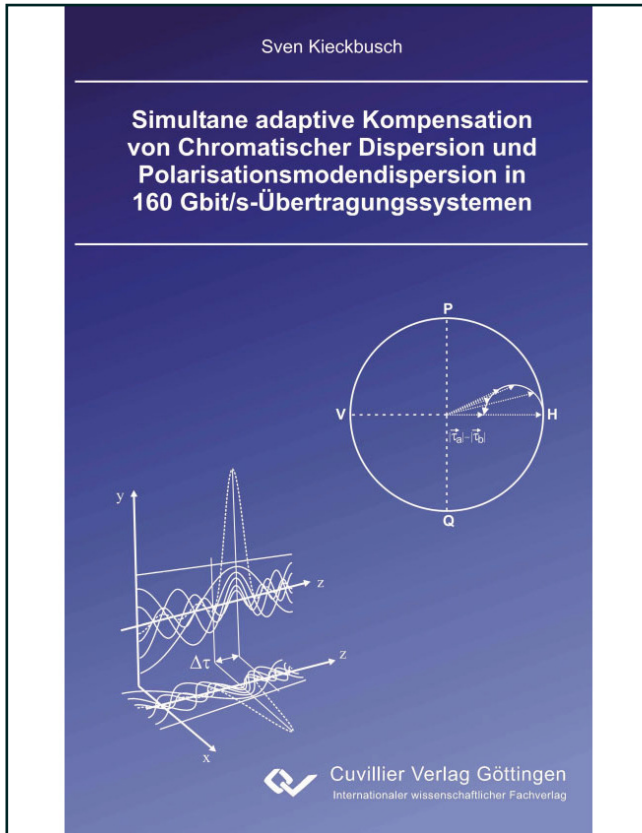




Sven Kieckbusch (Autor)  
**Simultane adaptive Kompensation von  
Chromatischer Dispersion und  
Polarisationsmodendispersion in 160 Gbit/s-  
Übertragungssystemen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1122>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Faseroptische Übertragungssysteme . . . . .	1
1.1.1. Signalbeeinträchtigungen . . . . .	2
1.1.2. Methoden zur Erhöhung der Übertragungsrate . . . . .	6
1.1.3. Modulationsformate . . . . .	9
1.1.4. Forward-Error-Correction . . . . .	11
1.1.5. Beurteilung der Übertragungsqualität . . . . .	11
1.2. Zielsetzung und Gliederung der Arbeit . . . . .	14
<b>2. Chromatische Dispersion</b>	<b>17</b>
2.1. Dispersionsursachen . . . . .	17
2.1.1. Materialdispersion . . . . .	17
2.1.2. Wellenleiterdispersion . . . . .	18
2.2. Beschreibung und Modellierung von Chromatischer Dispersion	19
2.3. Messung von Chromatischer Dispersion . . . . .	21
2.4. Signalbeeinträchtigungen . . . . .	21
2.5. Umwelteinflüsse . . . . .	22
2.6. Kompensation von Chromatischer Dispersion . . . . .	25
2.6.1. Statische Kompensation von CD . . . . .	25
2.6.2. Dynamische Kompensation von CD . . . . .	26
2.6.3. Monitorsignale für CD . . . . .	28
<b>3. Polarisationsmodendispersion</b>	<b>31</b>
3.1. Dispersionsursachen . . . . .	31
3.2. Darstellungsformen des Polarisationszustandes . . . . .	33
3.2.1. Jones-Formalismus . . . . .	33
3.2.2. Müller-Formalismus . . . . .	34
3.2.3. Poincaré-Kugel . . . . .	35

## Inhaltsverzeichnis

3.3. Beschreibung und Modellierung von PMD . . . . .	35
3.3.1. PSP-Modell . . . . .	38
3.3.2. PMD-Vektor . . . . .	38
3.3.3. Simulation . . . . .	39
3.4. Messung von Polarisationsmodendispersion . . . . .	40
3.5. Signalbeeinträchtigungen . . . . .	42
3.6. Umwelteinflüsse . . . . .	42
3.7. Kompensation von Polarisationsmoden-Dispersion . . . . .	43
3.7.1. Dynamische Kompensation von PMD . . . . .	43
3.7.2. Monitorsignale für PMD . . . . .	46
<b>4. Faser-Bragg-Gitter</b> . . . . .	<b>49</b>
4.1. Funktionsweise von Faser-Bragg-Gittern . . . . .	49
4.2. Mathematische Beschreibung von Bragg-Gittern . . . . .	50
4.2.1. Gekoppelte Modengleichungen . . . . .	51
4.2.2. Lösung für schwache Gitter . . . . .	56
4.2.3. Lösung für uniforme Gitter . . . . .	56
4.2.4. Gruppenlaufzeitverhalten . . . . .	57
4.2.5. Transfermatrix-Methode . . . . .	58
4.3. Apodisierte Faser-Bragg-Gitter . . . . .	60
4.4. Gechirpte Faser-Bragg-Gitter . . . . .	60
4.5. Veränderung des effektiven Brechungsindex . . . . .	61
4.6. Photosensitivität von Quarzgläsern . . . . .	61
4.7. Methoden zur Herstellung von FBGs . . . . .	63
4.7.1. Gitterbelichtung mit Phasenmasken . . . . .	63
4.7.2. Interferometrische Gitterbelichtung . . . . .	64
4.7.3. Nachträgliche Belichtung . . . . .	64
4.8. Gitter-Synthese und Gitter-Rekonstruktion . . . . .	65
4.9. Verwendeter UV-Laser und typische Faser . . . . .	65
4.10. Messung spektraler und räumlicher Eigenschaften von FBGs . . . . .	66
<b>5. Interferometrische Messung komplexer Übertragungsfunktionen</b> . . . . .	<b>67</b>
5.1. Interferometer-Aufbau . . . . .	67
5.2. Lokaler Messkopf für In-Situ-Messungen . . . . .	71
5.3. Nichtlineare Frequenzverstimmung . . . . .	72
5.3.1. Kosinusförmig gestörte Frequenzverstimmung . . . . .	73
5.3.2. Bestimmung der optimalen Korrektur-Verzögerung . . . . .	77

<b>6. Simultane Kompensation von PMD und CD</b>	<b>81</b>
6.1. Anordnung der Teilkomponenten . . . . .	81
6.2. Einfluss von PMD, CD und Chirp auf den DOP eines modulierten Signals . . . . .	82
6.2.1. Analytische Betrachtung . . . . .	82
6.2.2. Simulation . . . . .	83
6.2.3. Interpretation . . . . .	83
6.2.4. Experiment . . . . .	85
6.2.5. Schlussfolgerung . . . . .	87
<b>7. Teilkomponente zur Kompensation von CD in 160 Gbit/s-Systemen</b>	<b>89</b>
7.1. Konzept . . . . .	90
7.2. FBG-Design . . . . .	92
7.3. Iteratives Verfahren zur Herstellung apodisierter und gechirpter FBGs . . . . .	96
7.3.1. Aufbau und Prinzip . . . . .	96
7.3.2. Einfluss der Flutbelichtung auf den Kopplungsfaktor . . . . .	100
7.4. Herstellung geeigneter FBGs . . . . .	110
7.4.1. Einfluss von Gruppenlaufzeitvariationen . . . . .	111
7.4.2. Polarisation des UV-Schreibstrahls . . . . .	113
7.4.3. Anregung von Mantelmoden . . . . .	115
7.4.4. Alterungsverhalten und Annealing von FBGs . . . . .	119
7.4.5. FBG-Design unter Berücksichtigung von starker ortsabhängiger Flutbelichtung und Annealing . . . . .	122
7.5. Erreichbare Dispersionsverstimmung . . . . .	122
7.6. Methoden zur Abstimmung . . . . .	126
7.7. Mechanischer Aufbau . . . . .	127
7.8. Kalibration . . . . .	128
7.9. Regelalgorithmus . . . . .	129
7.10. Charakterisierung . . . . .	130
7.11. Experimentelle Untersuchung im 160 Gbit/s-System . . . . .	133
<b>8. Teilkomponente zur Kompensation von PMD in 160 Gbit/s-Systemen</b>	<b>139</b>
8.1. Konzept . . . . .	139
8.2. Entwurf eines abstimmbaren DGD-Elementes . . . . .	141
8.3. Mechanischer Aufbau . . . . .	146

## *Inhaltsverzeichnis*

8.4. Kalibration . . . . .	147
8.5. Vorabtests im Übertragungssystem . . . . .	148
8.6. Regelalgorithmus . . . . .	149
8.7. Charakterisierung . . . . .	150
8.8. Experimentelle Untersuchung im 160 Gbit/s-System . . . . .	150
8.8.1. Systemtest mit emulierter PMD . . . . .	150
8.8.2. Übertragungsexperiment über verlegte Faserstrecke . . . . .	152
<b>9. Kombination beider Teilkomponenten</b>	<b>157</b>
9.1. Realisierung mit erweitertem PMD-Gütesignal . . . . .	157
9.2. Charakterisierung . . . . .	162
9.3. Übertragungsexperiment . . . . .	164
<b>10. Zusammenfassung</b>	<b>167</b>
<b>A. Abhängigkeit des DOP von DGD, CD und Chirp</b>	<b>171</b>
A.1. Analytische Betrachtung . . . . .	171
A.2. Berücksichtigung der konstanten Differenzphase . . . . .	176
A.3. Interpretation für gechirpte Pulse . . . . .	177
<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>181</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>183</b>