

# **Modellierung des transienten Betriebsverhaltens EDFA-verstärkter optischer Übertragungstrecken unter Berücksichtigung des spektralen Lochbrennens**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades

**Doktor-Ingenieur**  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Holtmannspötter  
aus Warendorf

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung : 11. November 2016  
Vorsitzender des Promotionsorgans : Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch  
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. B. Schmauß  
Prof. Dr.-Ing. F. Küppers

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

**Michael Holtmannspoetter**

**Modellierung des transienten Betriebsverhaltens  
EDFA-verstärkter optischer Übertragungsstrecken  
unter Berücksichtigung des spektralen Lochbrennens**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5223-7

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Wachstum des Datenvolumens optischer Netze . . . . .	5
2.2	Erhöhung der Kapazität der Übertragungskanals . . . . .	5
2.3	Erbium-dotierter Faserverstärker (EDFA) . . . . .	7
2.4	Dynamische, transparente Netze . . . . .	7
2.5	Herausforderungen für moderne optische Netze . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Eigenschaften des EDFA</b>	<b>11</b>
3.1	Elektronenniveaus des Erbiumions . . . . .	12
3.2	Stark-Effekt . . . . .	15
3.3	Verbreiterungsmechanismen . . . . .	16
3.3.1	Homogen verbreiterte Übergänge . . . . .	17
3.3.2	Inhomogen verbreiterte Übergänge . . . . .	19
3.4	Gesamtprofile der Übergänge . . . . .	20
3.5	Wechselwirkungsquerschnitte . . . . .	22
3.5.1	Gesamtwechselwirkungsquerschnitt des Erbiumions in der Glasmatrix . . . . .	23
3.6	Verstärkungsspektrum und Sättigung optischer Übergänge im Allgemeinen . . . . .	25
3.7	Verstärkungsspektrum und Sättigung für den EDFA . . . . .	26
3.7.1	Kompression und Sättigung . . . . .	28
3.8	Verstärkungsprozess des EDFA . . . . .	31
3.8.1	Vereinfachtes Termschema . . . . .	31
3.8.2	Übergänge innerhalb des Erbiumions . . . . .	34
3.8.3	Rauschen . . . . .	35
3.9	Aufbau von Erbium-dotierten Faserverstärkern . . . . .	40

3.9.1	Einstufiger Aufbau . . . . .	40
3.9.2	Mehrstufiger Aufbau . . . . .	41
3.9.3	Elektronischen Regelung . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Einflüsse auf die spektrale Leistungsverteilung des Kanalmultiplex</b>	<b>47</b>
4.1	Stimulierte Raman-Streuung (SRS) . . . . .	48
4.1.1	Mechanismus des SRS bei Mehrkanaldatenübertragung	48
4.1.2	Einfluss der SRS auf die optische Übertragung . . . . .	51
4.1.3	Integration des SRS in die Simulationsumgebung . . . . .	52
4.2	Spektrales Lochbrennen (SHB) . . . . .	54
4.2.1	Mechanismus des SHB im EDFA . . . . .	55
4.2.2	Einfluss des SHB auf die optische Übertragung . . . . .	58
4.2.3	Integration des SHB in die Simulationsumgebung . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Ratengleichungen des EDFA</b>	<b>61</b>
5.1	Standardmodell für EDFAs ohne SHB . . . . .	61
5.1.1	3-Niveau-Ratengleichungen . . . . .	61
5.2	Modelle für das spektrale Lochbrennen in EDFAs . . . . .	65
5.2.1	Modell von E. Desurvire . . . . .	66
5.2.2	Model M. Nishihara . . . . .	67
5.2.3	Model von M. Bolshtyansky . . . . .	68
5.3	3-Niveau-Modell für EDFAs mit SHB . . . . .	71
5.3.1	Grundannahmen für die Herleitung . . . . .	71
5.3.2	Eigenschaften der Abweichungsfunktion . . . . .	73
5.3.3	Ratengleichungen der Einzel-Erbiumionen . . . . .	76
5.3.4	Stationärer Zustand der Einzelionen . . . . .	79
5.3.5	Mittelung des stationären Zustands der Einzelionen . . . . .	80
5.3.6	Mittelung der Ratengleichungen der Einzelionen . . . . .	91
5.3.7	Ratengleichungen für das 2-Niveau-Termschema . . . . .	101
5.3.8	Isolierte Betrachtung des SHB . . . . .	104
5.3.9	Betrachtung der Terme der Besetzungsdichten . . . . .	109
5.3.10	Termschema für das SHB-Modell des EDFA . . . . .	112
5.4	Fazit . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Numerische Modellierung der Erbium-dotierten Faser</b>	<b>115</b>
6.1	Implementierung des Rauschens . . . . .	115

6.2	Numerische Lösung der Ratengleichungen des EDFA . . . . .	117
6.2.1	Explizites Euler-Verfahren . . . . .	117
6.2.2	Stationärer Zustand . . . . .	118
6.2.3	Splittingverfahren . . . . .	119
6.2.4	Dynamische Simulation . . . . .	122
<b>7</b>	<b>Heuristische Ermittlung der Kovarianzmatrix des spektralen Lochbrennens</b>	<b>125</b>
7.1	Indirekter Ansatz . . . . .	125
7.1.1	Methode der Differenzverstärkungsspektren . . . . .	127
7.1.2	Vereinfachte Differenzspektrenmethode . . . . .	131
7.1.3	Anfitten einer Zeile der SHB-Kovarianzmatrix . . . . .	136
7.2	Messaufbau . . . . .	140
7.2.1	Signalpfad . . . . .	141
7.2.2	Pumppfad . . . . .	141
7.2.3	Verstärkerpfad . . . . .	142
7.2.4	Messpfad . . . . .	142
7.3	Praxiseinsatz des heuristischen Verfahrens . . . . .	143
7.3.1	Problemstellungen für die Messdatenerfassung . . . . .	143
7.3.2	Lösungen für das eingangsseitige Spektrum . . . . .	149
7.3.3	Lösungen für das ausgangsseitige Spektrum . . . . .	158
7.3.4	Bestimmung der Parameter der EDF . . . . .	161
7.3.5	Basislinie . . . . .	166
7.4	SHB-Kovarianzmatrix . . . . .	167
7.4.1	Symmetrie . . . . .	168
7.4.2	Messung mit erhöhter Signaleingangsleistung als Vergleichswert . . . . .	170
7.5	Fazit . . . . .	174
<b>8</b>	<b>Reaktion EDFA-verstärkter Übertragungsstrecken auf transiente Ereignisse</b>	<b>177</b>
8.1	Auslösende Effekte und inhärente Zeitkonstanten . . . . .	178
8.2	Dynamisches Verhalten des Verstärkergewinns eines einzelnen Verstärkers . . . . .	180
8.2.1	Abhängigkeit von der Verstärkersättigung vor dem transienten Vorgang . . . . .	181
8.2.2	Abhängigkeit von der Änderung des Gewinns . . . . .	182

8.3	Verstärkerkaskaden . . . . .	183
8.4	Gewinn-Regelung . . . . .	185
8.5	Stimulierte Ramanstreuung als auslösender Effekt für Pegeltransienten . . . . .	186
8.5.1	Dynamisches Verhalten . . . . .	188
8.5.2	Bleibende Abweichungen nach transientem Ereignis . . . . .	190
8.5.3	Gegenmaßnahmen . . . . .	190
8.6	Spektrales Lochbrennen als auslösender Effekt für Pegeltransienten . . . . .	191
8.6.1	Bleibende Abweichung nach transientem Ereignis . . . . .	191
8.6.2	Dynamisches Verhalten . . . . .	196
8.6.3	Gegenmaßnahmen . . . . .	201
8.7	Optisches Übertragungssystem für Systemsimulationen . . . . .	203
8.7.1	Hintergrund . . . . .	203
8.7.2	Simulationsanordnung . . . . .	204
8.7.3	Regelung . . . . .	205
8.7.4	Gewinnglättungsfilter . . . . .	206
8.7.5	Raman-Tilt-Filter . . . . .	207
8.8	Fazit . . . . .	208
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>209</b>
<b>A</b>	<b>Fehlerabschätzung</b>	<b>213</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>219</b>
	<b>Bildverzeichnis</b>	<b>226</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>234</b>
	<b>Summary</b>	<b>237</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>241</b>