

Andreas Tausendfreund

# Laser-optische Messverfahren zur Charakterisierung von Oberflächendefekten im Nanometerbereich

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gert Goch  
Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und wissenschaftliche Fragestellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Nanoanalytik . . . . .	5
2.2	Laser-optische Streulicht-Messverfahren . . . . .	7
2.3	Wechselwirkung elektromagnetischer Felder mit Mikro- und Nanostrukturen . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Theorie und Methoden</b>	<b>15</b>
3.1	Numerische Methoden der rigorosen Streutheorie . . . . .	15
3.1.1	Differential-Gleichungs-Methoden . . . . .	16
3.1.2	Integral-Gleichungs-Methoden . . . . .	21
3.1.3	Auswahl der Methode . . . . .	24
3.2	Methode der Diskreten Dipol Approximation . . . . .	26
3.3	Amsterdamer Diskrete Dipol Approximation (ADDA) . . . . .	36
3.4	Erzeugung und Eigenschaften der untersuchten Nanostrukturen	39
<b>4</b>	<b>Simulationsalgorithmen</b>	<b>43</b>
4.1	Erweiterung des ADDA-Codes unter Verwendung des Müller-Kalküls . . . . .	43
4.2	Grundlegende Überlegungen und Untersuchungen zur Streulicht-Simulation . . . . .	45

4.2.1	Zusammenhang zwischen lateraler Ausdehnung des Streukörpers und Strahlbreite der Beleuchtungsquelle	47
4.2.2	Zusammenhang zwischen Polarisierbarkeit, Iterationsverfahren und Dipolzahl . . . . .	49
4.2.3	Einfluss der Schichtdicke des Streukörpers . . . . .	51
4.2.4	Einfluss des Brechungsindexes . . . . .	54
4.2.5	Résumé der Vorbetrachtungen . . . . .	56
4.3	Rechenzeitoptimierte Algorithmen . . . . .	57
4.3.1	Geeignete Preconditioner . . . . .	57
4.3.2	Parallelisierung und Implementierung auf eine Grafikkarte . . . . .	60
4.3.3	Segmentierung der Oberfläche . . . . .	62
4.3.4	Vernachlässigung von Fernwechselwirkungen . . . . .	72
4.4	Vergleich der verschiedenen Algorithmen . . . . .	75
4.5	Numerisch generierte Oberflächenmodelle . . . . .	76
4.6	Simulationsergebnisse . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Messtechnische Verifikation der Algorithmen</b>	<b>85</b>
5.1	Aufbau des Referenzmesssystems . . . . .	85
5.2	Messergebnisse . . . . .	90
5.3	Vergleich mit den Simulationen . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Charakteristische Streulicht-Verteilungen</b>	<b>95</b>
6.1	Identifikation von defektspezifischen Streulicht-Merkmalen . . . . .	95
6.2	Optimierte Auswertalgorithmen . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Problemangepasste In-Prozess-Messverfahren</b>	<b>101</b>
7.1	Kamerabasierte Verfahren . . . . .	101
7.2	Verfahren mit Photodetektoren . . . . .	105
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>111</b>

<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b>	<b>115</b>
A.1	Tensorrechnung . . . . .	115
A.2	Abstrakte Räume . . . . .	117
A.3	Green-Funktion . . . . .	119
<b>B</b>	<b>Beschreibung der Lichtstreuung</b>	<b>123</b>
B.1	Differentialgleichungen der Elektrodynamik . . . . .	123
B.2	Lichtstreuung . . . . .	126
B.3	Herleitung der Volumen-Integral-Gleichung . . . . .	128
B.4	Komponentenschreibweise der Green'schen Dyade . . . . .	131
B.5	Integration über die Singularität der Green'schen Dyade . . . . .	148
B.6	Polarisierbarkeit . . . . .	151
B.7	Müller-Matrix-Kalkül . . . . .	153
	B.7.1 Stokes-Formalismus . . . . .	153
	B.7.2 Müller-Matrix . . . . .	156
<b>C</b>	<b>Krylov-Unterraum-Verfahren</b>	<b>159</b>
<b>D</b>	<b>Nomenklatur</b>	<b>161</b>
<b>E</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>165</b>