

# Elektrodynamik

Vorlesungs-Skriptum

Andreas Wipf

Theoretisch-Physikalisches-Institut

Friedrich-Schiller-Universität Jena

3. Auflage, WS 2006/2007

1. Auflage SS 2000

©2006 Andreas Wipf, Universität Jena

Kopieren für den privaten Gebrauch unter Angabe des Autors gestattet. Kommerzielle  
Verwertung verboten.

Hinweise auf Druckfehler nehme ich gerne entgegen ([wipf@tpi.uni-jena.de](mailto:wipf@tpi.uni-jena.de))

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Ursprünge der Elektrodynamik</b>	<b>1</b>
1.1	Literaturhinweise . . . . .	1
1.2	Geschichtliches . . . . .	2
1.3	Einleitung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Einführung in die Elektrostatik</b>	<b>8</b>
2.1	Das Coulombsche Gesetz und Maßsysteme . . . . .	9
2.1.1	Messung und Einheit der Ladung . . . . .	9
2.2	Das elektrische Feld . . . . .	13
2.3	Feldgleichungen der Elektrostatik . . . . .	20
2.3.1	Feld einer kugelsymmetrischen Ladungsverteilung . . . . .	22
2.4	Energie des elektrostatischen Feldes . . . . .	24
2.4.1	Probleme mit der Selbstenergie . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Randwertprobleme der Elektrostatik</b>	<b>28</b>
3.1	Ideale Leiter im elektrischen Feld . . . . .	28
3.1.1	Randbedingungen für Metalle . . . . .	30
3.1.2	Eindeutigkeit der Lösung . . . . .	32
3.2	Die Methode der Spiegelladungen . . . . .	32
3.2.1	Punktladung in der Nähe einer ebenen Metallplatte . . . . .	33
3.2.2	Punktladung in der Nähe einer leitenden Kugel . . . . .	34
3.2.3	Leitende Kugel im homogenen Feld . . . . .	37
3.3	Die Methode der Greenschen Funktionen . . . . .	39
3.3.1	Dirichlet-Problem . . . . .	40
3.3.2	Neumann-Problem . . . . .	41
3.4	Kapazitäten . . . . .	42
3.4.1	Kugelkondensator . . . . .	43

<b>4</b>	<b>Multipole und spezielle Funktionen</b>	<b>46</b>
4.1	Dipole und Quadrupole . . . . .	47
4.2	Energie und Drehmoment von Multipolen . . . . .	49
4.3	Differentialoperatoren und spezielle Funktionen . . . . .	50
4.3.1	Differentialoperatoren in rechtwinkligen Koordinaten . . . . .	51
4.4	Legendre-Polynome und Kugelfunktionen . . . . .	52
4.4.1	Potenzreihen und erzeugende Funktionen . . . . .	60
4.4.2	Punktladung in einem geerdeten „Faradaykäfig“ . . . . .	63
4.4.3	Zylindersymmetrische Probleme . . . . .	63
4.5	Multipolentwicklung in Kugelkoordinaten . . . . .	66
4.6	Vollständige Funktionensysteme . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Elektrisches Feld in Materie</b>	<b>70</b>
5.1	Polarisation und dielektrische Verschiebung . . . . .	70
5.2	Grenzflächen zwischen Dielektrika . . . . .	78
5.2.1	Dielektrische Kugel im homogenen elektrischen Feld . . . . .	80
5.3	Clausius-Mosottische Formel . . . . .	83
5.4	Feldenergie im Dielektrikum . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Magnetostatik</b>	<b>87</b>
6.1	Strom und Stromdichte . . . . .	87
6.1.1	Stromerhaltung . . . . .	89
6.2	Das magnetische Feld und das Biot-Savart-Gesetz . . . . .	89
6.3	Die Grundgleichungen der Magnetostatik . . . . .	95
6.3.1	Integrale Form der Grundgleichungen . . . . .	96
6.3.2	Das Magnetostatische Potential . . . . .	97
6.3.3	Das magnetische Feld einer unendlich langen Spule . . . . .	98
6.4	Selbstinduktion . . . . .	99
6.5	Multipolentwicklung . . . . .	101
6.5.1	Kraft und Drehmoment auf einen Dipol im Magnetfeld . . . . .	104
6.6	Magnetismus in Materie . . . . .	105
6.6.1	Makroskopische Grundgleichungen . . . . .	105
6.6.2	Grenzflächen . . . . .	110
6.6.3	Kugel im homogenen Magnetfeld . . . . .	111
<b>7</b>	<b>Maxwellgleichungen</b>	<b>113</b>
7.1	Induktionsgesetz . . . . .	113
7.2	Der Maxwellsche Verschiebungsstrom . . . . .	117
7.3	Die Maxwell-Gleichungen . . . . .	118

7.3.1	Integralform der Maxwellgleichungen . . . . .	120
7.3.2	Elektromagnetische Potentiale . . . . .	122
7.3.3	Eichtransformationen . . . . .	123
7.3.4	Maxwellgleichungen im Vakuum . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Ausbreitung von Wellen</b>	<b>126</b>
8.1	Ebene Wellen . . . . .	127
8.1.1	Monochromatische ebene Wellen . . . . .	130
8.2	Kugelwellen . . . . .	134
8.3	Besselwellen . . . . .	135
8.4	TE- und TM-Wellen . . . . .	137
8.5	Überlagerung von ebenen Wellen . . . . .	138
8.6	Anhang: Fourier-Reihen und Integrale . . . . .	139
<b>9</b>	<b>Wellen in Medien</b>	<b>143</b>
9.1	Wellen in homogenen Leitern . . . . .	143
9.1.1	Transversal-Schwingungen und Skin-Effekt . . . . .	143
9.1.2	Anwendung: Der Skineneffekt im zylindrischen Leiter . . . . .	146
9.1.3	Transversal-Schwingungen bei hohen Frequenzen . . . . .	147
9.2	Dispersion in Isolatoren . . . . .	151
9.3	Kausalität und Kramers-Kronig-Relationen . . . . .	155
<b>10</b>	<b>Relativistische Form der Elektrodynamik</b>	<b>158</b>
10.1	Poincare Transformationen . . . . .	158
10.2	Ströme, Potentiale und Feldstärke . . . . .	162
10.3	Relativistische Feldgleichungen . . . . .	165
10.3.1	Feld einer gleichförmig bewegten Punktladung . . . . .	168
10.4	Erhaltungssätze . . . . .	169
<b>11</b>	<b>Erzeugung und Abstrahlung von Wellen</b>	<b>174</b>
11.1	Inhomogene Wellengleichung . . . . .	174
11.2	Strahlungsfeld in der Fernzone . . . . .	180
11.3	Multipolentwicklung . . . . .	182
11.3.1	Abgestrahlte Leistung . . . . .	185
11.4	Lienard-Wiechert-Potentiale . . . . .	188
11.5	Der Hertzsche Dipol . . . . .	195
11.6	Abstrahlung von bewegten Ladungen . . . . .	196