

Berichte aus der Medizinischen Physik

Horst Müller

**Physikalische Grundlagen für
die Funktionssimulation der
Ionisations-Durchstrahlkammer
in der Röntgendiagnostik**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Satz: Martin Sievers – Einfach schöner publizieren, Trier.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1183-8

ISSN 1617-2965

Shaker Verlag GmbH • Postfach 10 18 18 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
Einleitung	9
1 Röntgenstrahlung als Eingangsgröße	15
2 Auslösung der Photonen-Wechselwirkungen	27
3 Freie Weglänge der Photonen	39
4 Koordinaten der Photonen und Elektronen	43
4.1 Photonen	43
4.2 Elektronen	49
4.3 Grenzüberschreitungen	50
4.4 Elektronen im elektrostatischen Feld	52
5 Wechselwirkung von Photonen mit Materie; Rayleigh-Streuung	61
5.1 Streuquerschnitt und Atom-Formfaktor	61
5.2 Atom-Formfaktor für chemische Verbindungen und Stoffgemische	66
5.3 Auslösung der Streuwinkel	71
6 Wechselwirkung von Photonen mit Materie; Compton-Streuung	77
6.1 Energie und Impuls von Photonen und Elektronen	77
6.2 Differenzieller Streuquerschnitt nach Klein-Nishina	83
6.3 Energie nach Klein-Nishina mittels „Inverse Distribution Method“	86
6.4 Energie nach Klein-Nishina mittels „Composition and Rejection Technique“	88

6.5	Energie nach Waller-Hartree mittels „Composition and Rejection Technique“	97
6.6	Methode der Impuls-Approximation	101
6.7	Integraler Streuquerschnitt	101
7	Wechselwirkung von Photonen mit Materie; Photoabsorption	107
7.1	Auslösung der Elektron-Photon-Kaskade	107
7.2	Auslösung des Streuwinkels der <i>K</i> -Schale	121
7.3	Auslösung des Streuwinkels der <i>L1</i> -Schale	128
7.4	Auslösung des Streuwinkels der <i>L2</i> -Schale	129
7.5	Auslösung des Streuwinkels der <i>L3</i> -Schale	141
8	Wechselwirkung von Elektronen mit Materie; Coulomb-Streuung	147
8.1	Entscheidung über Einzel- oder Mehrfachstreuung	147
8.2	Differenzieller Streuquerschnitt	153
8.3	Integraler Streuquerschnitt	155
8.4	Auslösung des Streuwinkels	158
9	Wechselwirkung von Elektronen mit Materie; Møller-Streuung	161
9.1	Energie und Streuwinkel der Elektronen	161
9.2	Differenzieller Streuquerschnitt	172
9.3	Integraler Streuquerschnitt	178
9.4	Auslösung des Streuwinkels	180
10	Auslösung der Elektronen-Wechselwirkungen	185
11	Ionisierung der Luft und Ionenstrom im Messfeld	189
11.1	Begründung der deterministischen Beschreibung	189
11.2	Eigenschaften der Luft	191
11.3	Prinzipielle Vorgänge bei der Ionisierung	195
11.4	Abschätzung der Ionisierungsrate	196
11.5	Ionisierungsrate und differenzieller Energieverlust	198
11.6	Grundgleichungen für den Ionisierungsstrom	209
11.7	Historie der analytischen Lösungsansätze	215

11.8	Allgemeine numerische Lösung der Grundgleichungen .	237
11.9	Elektrische Feldstärke und Sättigungskurve für $I \approx I_{\text{sat}}$.	248
11.10	Ionisation bei Berücksichtigung der Diffusion	257
12	Ablauf der Gesamt-Simulation	291
	Liste der physikalischen Konstanten	295
	Tabellenverzeichnis	297
	Abbildungsverzeichnis	299
	Literaturverzeichnis	307

Zusammenfassung

Die Darstellung der physikalischen Grundlagen für die Funktionssimulation der Ionisations-Durchstrahlkammer in der Röntgentechnik umfasst die mathematische Beschreibung der Wechselwirkungen von Photonen mit Festkörpern in einer für die Monte-Carlo-Simulation geeigneten Form. Es werden die Rayleigh- und die Compton-Streuung sowie die Photoabsorption einbezogen. Die bei den letzten beiden Effekten entstehenden Sekundärelektronen werden nach den Gesetzen der Coulomb- und Møller-Streuung auf ihrem Weg und mit ihren Energieänderungen verfolgt. Aufgrund dünner Schichten wird die Theorie der Einzelstreuung angewendet. Das Ziel der Simulation ist die Ermittlung der spektralen Elektronenflussdichte in dem mit Luft gefüllten Messfeld der Ionisationskammer bei Vorgabe eines Energiespektrums der Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von der Spannung an der Röntgenröhre. Der Einfluss der Geometrie und der Materialien auf die spektrale Elektronenflussdichte liefert Hinweise für die Konstruktion der Ionisations-Durchstrahlkammer. Mit den Zustandsdaten der Luft und der Energie der Sekundärelektronen wird der differenzielle Energieverlust ermittelt. Letzterer ermöglicht zusammen mit der spektralen Energieflussdichte die Bestimmung der Ionisierungsrate. Die Ionisierung der Luft wird durch ausführliche Behandlung der entsprechenden Grundgleichungen beschrieben, die die Bedingungen für einen linearen Zusammenhang zwischen Ionisierungsrate und Ionenstrom ergeben.