

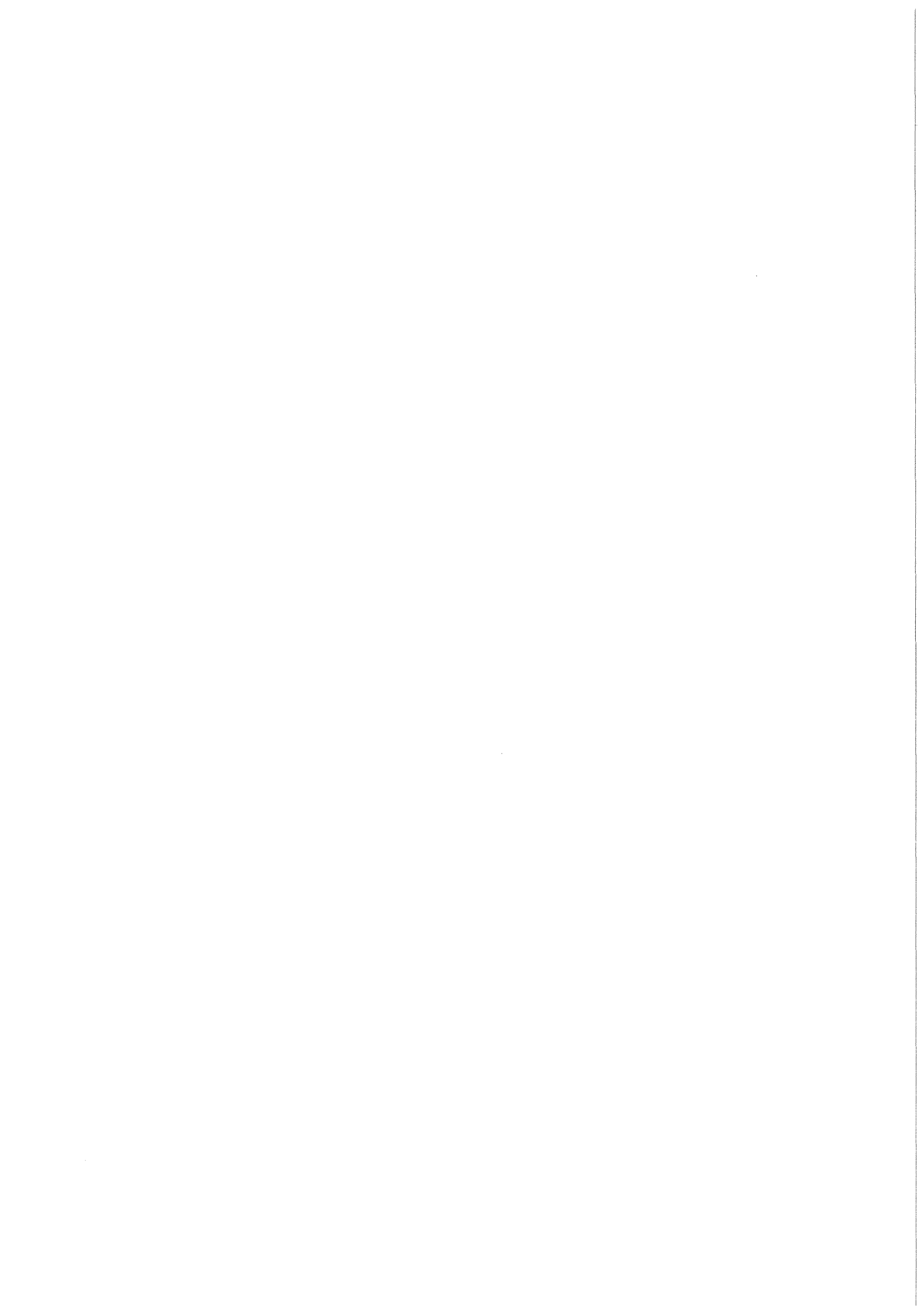


KfK 3932
August 1985

**Berechnung von Gamma-
Feldern auf Verkehrsflächen und
in Räumen von Häusern einer
Stadtlandschaft nach einer
Ablagerung radioaktiven
Materials**

O. Graf
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Nukleare Sicherheit
KfK 3932

Berechnung von Gamma-Feldern auf Verkehrsflächen und in Räumen
von Häusern einer Stadtlandschaft nach einer Ablagerung
radioaktiven Materials^{*)}

Otto Graf

^{*)} von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe
genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

ZUSAMMENFASSUNG

Eine möglichst genaue Kenntnis der Abschirmwirkung von Gebäuden gegenüber äußerer Gamma-Strahlung ist sowohl für realistische Risiko-untersuchungen für kerntechnische Anlagen als auch zur Planung von Notfallschutzmaßnahmen notwendig.

In der vorliegenden Arbeit werden aus der Literatur entnommene Messungen von Ablagerungsgeschwindigkeiten für bauliche Oberflächen ausgewertet. Aus den vorhandenen Daten wird die Empfehlung abgeleitet, für Straßen und Gebäudedächer eine Ablagerungsgeschwindigkeit für trockene Ablagerung von 0.4 cm/s zu verwenden. Die Kontamination der Außenwand wird bei Hochhäusern und freistehenden Einzelgebäuden gleich der des Daches gesetzt, während sie bei allen anderen Gebäuden vernachlässigt werden kann.

Zur Durchführung der erforderlichen Dosisleistungsberechnungen wurde ein Verfahren entwickelt, das eine Kombination von Punkt-Kern-Integration (Rechenprogramm QAD-CG-E) und SN-Transportrechnung (Rechenprogramm DOT 4.2) darstellt. Dieses mit Hinblick auf die Aufgabenstellung optimale Verfahren bezüglich exakter Berücksichtigung der 3-dimensionalen heterogenen Struktur von Häusern, möglichst hoher Genauigkeit und der notwendigen großen Zahl von Rechenläufen wurde durch Nachrechnung einiger Fälle mit dem Monte-Carlo Transportprogramm SAM-CE und durch Nachrechnung eines amerikanischen Abschirmexperiments überprüft.

Die Auswertung einer Literatur- und Datenrecherche führte zu einer Liste von 12 Haustypen (Wohngebäuden), die für die Bundesrepublik Deutschland repräsentativ sind. Die Gebäudegeometrien werden durch Verknüpfen von ca. 150 bis 300 geometrischen Grundkörpern in das Rechenprogramm QAD-CG-E eingegeben ("Kombinatorische Geometrie").

Mit diesen 12 Haustypen wurde die Abschirmrechnung für das Isotop Cs-137 durchgeführt. Dabei ergab sich eine hohe Abschirmwirkung für die Gebäudetypen "Hochhaus" und "Reihenhaus" (Abschirmfaktor ≈ 0.1) und eine niedrige Abschirmwirkung der Gebäudetypen "Bungalow" und "Fertigteilhaus" (Abschirmfaktor ≈ 0.3). Die übrigen Gebäudetypen weisen einen Abschirmfaktor von ≈ 0.1 auf. Ergänzende Rechnungen mit den Isotopen J-131 und La-140 zeigen den Einfluß der Gamma-Energie auf den Abschirmfaktor. Außerdem wurden für das Innere der Gebäudetypen "Doppelhaus", "Fertigteilhaus" und "Hochhaus" Gammfelder, d.h. räumliche Dosisleistungsverteilungen, berechnet und in Form von Isodosislinien graphisch dargestellt. Die Isodosislinien wurden dazu in Quer- und Längsschnitte durch die Gebäude eingezeichnet. Diese Schnittbilder wurden mit dem dafür entwickelten Programm PICTURE-CG erzeugt.

Calculation of gamma fields on roads and inside buildings of an urban area caused by deposition of radioactive material

ABSTRACT

For the purpose of realistic probabilistic risk assessment for nuclear power facilities as well as for emergency planning a detailed knowledge of the shielding properties of buildings is necessary.

This work describes measurements of deposition velocities for building surface materials, which are taken from the literature. From the available data the recommendation can be extracted to use a dry deposition velocity of 0.4 cm/s for roads and roofs. The possible contamination of the outer walls should be considered in the same way for multi-storey and stand-alone buildings. For other building types it can be neglected.

The necessary dose-rate calculations were performed using a new combination of point-kernel-integration technique (computercode QAD-CG-E) and SN-transport method (computercode DOT 4.2). This procedure seems to be an optimum with respect to the task to consider the irregular 3-dimensional shielding structures, to give good accuracy and to perform a large number of single calculations. The validity and accuracy of the procedure was checked by some Monte-Carlo calculations (computercode SAM-CE) and by recalculation of an U.S. shielding experiment.

The evaluation of a literature and data investigation yielded a list of 12 building types, which are representative for the Federal Republic of Germany. The geometries of the buildings were composed of approx. 150 to 300 basic geometrical bodies. This is the input for the computer code QAD-CG-E ("combinatorial geometry").

Shielding calculations were performed for these 12 building types with an assumed contamination by Cs-137. The building types "multi-storey building" and "serial house" show a good shielding efficiency (shielding factor \approx 0.1), while the types "bungalow" and "Fertigteil house" offer the lowest shielding (shielding factor \approx 0.3). The other building types show a mean value of the shielding factor of \approx 0.1. Additional calculations with the isotopes I-131 and La-140 show the influence of the gamma energy on the shielding factor. Moreover gamma fields, that means spatial dose-rate distributions, were calculated for a "semi-detached house", a "Fertigteil house" and a "multi-storey building". The results are presented by isodose lines, which are drawn in vertical and horizontal cross-sections through the buildings. These cross-sections were generated by the new PICTURE-CG program.

	Seite
<u>Inhalt</u>	
1. Einleitung	1
2. Ablagerung von radioaktiven Aerosol - Partikeln aus einer vorüberziehenden Schadstofffahne auf baulichen Oberflächen	7
2.1 Bisher durchgeführte Experimente zur Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit für bauliche Oberflächen	11
2.2 Herleitung von repräsentativen Ablagerungsgeschwindigkeiten zur Verwendung in Sicherheits- und Risikoanalysen	13
3. Ermittlung der Abschirmwirkung von Gebäuden gegenüber äußerer Gamma-Strahlung	15
3.1 Definition des Abschirmfaktors und des Dosisreferenzwertes	15
3.2 Diskussion und Bewertung der verschiedenen vorliegenden Gamma-Transport Rechenmethoden im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf die heterogene Struktur von Häusern	16
3.2.1 Punkt-Kern Integration	17
3.2.2 S_N -Transportrechnung	20
3.2.3 Monte-Carlo Transportrechnung	21
3.3 Bisher angewandte Vorgehensweise zur Bestimmung der Abschirmwirkung von Häusern	22
3.4 Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur rechnerischen Bestimmung der Abschirmwirkung von Häusern	23
3.5 Überprüfung des verbesserten Verfahrens anhand eines Abschirmexperiments	28
4. Ermittlung repräsentativer Gebäudetypen	30
4.1 Bausubstanz in der Bundesrepublik Deutschland und Identifizierung repräsentativer Gebäudetypen	30
4.2 Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der repräsentativen Gebäudetypen aus statistischen Daten	31

	Seite
5. Ermittlung von Gamma-Feldern und Abschirmfaktoren für repräsentative Gebäudetypen und Verkehrsflächen	34
5.1 Gamma-Felder auf Verkehrsflächen und innerhalb von Gebäuden (Isodosislينien)	34
5.2 Abschirmfaktoren für repräsentative Gebäudetypen	35
5.3 Diskussion der Energieabhängigkeit der Abschirmfaktoren	37
5.4 Sensitivitätsuntersuchung zu einigen Gebäudeparametern	38
6. Vergleich mit bisher angewandten Abschirmfaktoren	40
6.1 Abschirmfaktoren der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen"	40
6.2 Abschirmfaktoren in Risikostudien	41
6.2.1 Abschirmfaktoren der amerikanischen "Reactor Safety Study", die aus Fallout-Messungen gewonnen wurden	41
6.2.2 Abschirmfaktoren der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke"	42
7. Zusammenfassung und Ausblick	43
Anhang A : Modell der trockenen Ablagerung nach Gregory und Chamberlain	48
A.1: Interzeption durch Wirbeldiffusion	48
A.2: Sedimentation	50
Anhang B : Elementare Wechselwirkungsprozesse beim Durchgang von Gamma-Strahlung durch Materie	52
B.1: Photoeffekt	52
B.2: Comptoneffekt	53
B.3: Paarbildung	55
B.4: Gesamtwirkungsquerschnitt	56
Anhang C : Konzept der kombinatorischen Geometrie zur Behandlung komplexer Strukturen	58
C.1: Eingabe einer 3-dimensionalen Geometrie in Rechenprogramme	58
C.2: Beispiel: "NDL simple blockhouse shielding structure"	59

	Seite
Anhang D : PICTURE-CG, Ein FORTRAN-Programm zur Darstellung beliebig im Raum orientierter Schnitte durch eine 3-dimensionale Struktur über Drucker und Plotter	61
D.1: Programmbeschreibung	61
D.2: Eingabebeschreibung	62
D.3: Beispiel: Horizontaler Schnitt durch ein Einfamilienhaus	64
Literatur	65

1. Einleitung

Der Betrieb kerntechnischer Anlagen ist, wie die Anwendung jeder Art von Technik, mit einem gewissen Risiko für den Menschen verbunden. Die Risiken aus verschiedenen Techniken quantitativ zu bestimmen und einem Vergleich zu unterziehen, ist ein allgemeiner Wunsch. Es ist charakteristisch für die Kerntechnik, daß denkbare Schadensfälle in den Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs, die einen Einfluß auf die Umwelt haben, mit sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten verknüpft sind. Daher stehen zur Ermittlung des Risikos, das durch den Gebrauch der Kerntechnik entsteht, keine Erfahrungswerte zur Verfügung. Vielmehr müssen die konstitutiven Elemente des Risikos, nämlich Schadensumfang und zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit, durch Modellsimulationen bestimmt werden.

In sogenannten Risikostudien versucht man, anhand mathematisch/numerischer Modelle eine Vielzahl denkbarer häufigkeitsbewerteter Unfallszenarien (im Idealfall: alle denkbaren) durchzurechnen und die dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten zu ermitteln, die zu einem bestimmten Schadensumfang geführt haben. Eine dieser Studien ist die "Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke" (DRS). Die Phase A dieser Studie (Bu 81) lehnt sich in ihrer Vorgehensweise noch im wesentlichen an die amerikanische "Reactor Safety Study" (US 75) an, wobei die enthaltenen Modelle und Daten auf deutsche Verhältnisse übertragen wurden.

Die Ergebnisse der Phase A dieser Studie zeigen, daß der Expositionspfad "Externe Bestrahlung durch abgelagerte Aktivität" in vielen Fällen den bedeutendsten Beitrag zur Gesamtbelastung liefert. Da sich außerdem die Gegenmaßnahmen "Evakuierung", "schnelle Umsiedlung" und "Umsiedlung" an den Dosen dieses Expositionspfades orientieren, bestimmt er den Umfang der von den genannten Gegenmaßnahmen betroffenen Personen und Flächen.

Die Strahlenexposition über diesen Pfad kann durch

- Abschirmung der Strahlung durch Aufsuchen von Gebäuden
- Verlassen des kontaminierten Gebietes

reduziert werden. Die Entscheidung über den optimalen Einsatz dieser beiden Maßnahmen setzt eine gute Kenntnis der Abschirmwirkung der betreffenden Gebäude voraus.

Die Abschirmwirkung von Gebäuden gegenüber externer Strahlung kann unter Umständen eine erhebliche Reduzierung der errechneten Dosen und somit der Unfallfolgen bewirken, falls an Stelle einer Evakuierung der Bevölkerung das Aufsuchen von Gebäuden bzw. Kellern angeordnet bzw. empfohlen wird (in der Schweiz als "vertikale Evakuierung" bezeichnet).

In der amerikanischen "Reactor Safety Study" wird die Abschirmwirkung von Gebäuden nur sehr pauschal behandelt. Dies erscheint dort insofern akzeptabel, als die amerikanische "Sicherheitsphilosophie" im Falle einer potentiellen Gefährdung der Evakuierung stets den Vorzug gibt. In Mitteleuropa liegen aber aufgrund der höheren Bevölkerungsdichte und der i.a. massiveren Bauweise der Wohngebäude andere Verhältnisse vor, die eine Evakuierung erschweren und stattdessen eventuell das Aufsuchen von Gebäuden ratsam erscheinen lassen. Die bisher in der "DRS Phase A" angewandten Abschirmfaktoren wurden aus der "Reactor Safety Study" übernommen bzw. abgeleitet und sind nicht ausreichend, da sie die in der Bundesrepublik Deutschland vorhandene Bausubstanz nicht berücksichtigen.

Die "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen" (Bu 77b) enthalten lediglich Bereiche von Schutzfaktoren für wenige, nur grob spezifizierte Gebäudetypen.

Es ist daher sowohl zur Verbesserung des der DRS zugrunde liegenden Unfallfolgenmodells als auch zur Planung von Notfallschutzmaßnahmen notwendig, die Abschirmwirkung der in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Gebäude zu untersuchen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, die Abschirmwirkung von Gebäuden, die für die Bundesrepublik Deutschland repräsentativ sind, gegenüber externer Bestrahlung durch abgelagerte Aktivität genauer als bisher und unter Berücksichtigung ihrer heterogenen Struktur zu bestimmen. Wegen der großen Zahl von Kombinationen von Abschirmstruktur und Gammaquelle ist dazu ein effizientes Verfahren erforderlich.

Die bisher eingeführten Rechenmethoden zur Abschirmrechnung werden vorgestellt und Vor- und Nachteile jeder Methode diskutiert. Zur Lösung der in dieser Arbeit vorgegebenen Aufgaben wurde eine Kombination von Punkt-Kern-Integrationsmethode und Transportmethode entwickelt. Dieser neue Ansatz

stellt das optimale Verfahren dar im Hinblick auf die i.a. gegenläufigen Forderungen, sowohl die Geometrie der abschirmenden Struktur, als auch die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse (siehe Anhang B) exakt zu berücksichtigen. Es wird gezeigt, daß die Monte-Carlo-Methode, die zunächst am geeignetsten im Hinblick auf die Aufgabenstellung erscheint, aufgrund des extrem hohen Rechenaufwandes und auch wegen prinzipieller Schwierigkeiten bei großen und/oder massiven Abschirmungen (Betonhochhaus, Keller) nur für spezielle Einzelfälle brauchbar ist, wodurch sie als universelles Instrument zur Durchführung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Rechnung ausscheidet.

Der Punkt-Kern-Integrations-Code QAD-CG aus Los Alamos (Ca 77), der sich bereits dadurch auszeichnet, beliebig komplexe 3-dimensionale Abschirmgeometrien handhaben zu können, wurde im Sinne der Aufgabenstellung weiterentwickelt in Richtung mehr Flexibilität bezüglich Eingabe der Gammaquelle und Steuerung der Ausgabe. Mit der erweiterten und verbesserten Version QAD-CG-E ist es nun möglich, innerhalb vertretbarer Rechenzeiten räumliche Dosisleistungsverteilungen (Gamma-Felder) zu berechnen.

Die Punkt-Kern-Integrationsmethode ist mit Hinblick auf die große Anzahl von Rechenläufen, die für Untersuchungen dieser Art erforderlich sind, und der Komplexität und den geometrischen Abmessungen der betrachteten Abschirmstrukturen die geeignete Methode. Sie stellt allerdings bezüglich der Behandlung der physikalischen Wechselwirkungsprozesse beim Durchgang von Gamma-Strahlung durch Materie (siehe Anhang B) insofern eine Näherung dar, als der Beitrag der Streustrahlung zur Dosisleistung nur näherungsweise durch das sog. "build-up Faktor Konzept" berücksichtigt wird. Dies führt insbesondere für Dosisleistungsberechnungen in Kellern bei einer Kontamination des umliegenden Erdbodens zu größeren Fehlern. Um diese Fehler zu korrigieren, wurden Abschirmrechnungen an einem geometrisch stark vereinfachten sogenannten "Standardhaus" mit dem S_N -Transportprogramm DOT 4.2 (Rh 73, Rh 82) durchgeführt, das die Boltzmann'sche Transportgleichung in 2-D Geometrie numerisch löst. Daraus wurden Korrekturfaktoren abgeleitet, die auf die mit Hilfe von QAD-CG-E ermittelten Ergebnisse angewandt werden.

Um die mit Hilfe dieses Verfahrens bestimmten Dosisleistungen zu verifizieren, wurden einige Fälle mit dem Monte-Carlo Programm SAM-CE (Co 75b) nachgerechnet. Zur Validierung dieser neuartigen Vorgehensweise wurde ein amerikanisches Gamma-Abschirmexperiment (Re 64, Sp 80) ausgewertet und nachgerechnet.

Zusätzlich wurde zur anschaulichen Darstellung von Gamma-Feldern in Form von Isodosislينien das Programm PICTURE-CG (siehe Anhang D) entwickelt, mit dem Schnitte beliebiger Raumorientierung durch eine 3-dimensionale Abschirmstruktur gezeichnet werden können. Anhand der graphischen Darstellung der Gamma-Felder innerhalb verschiedener Gebäudetypen wird der Einfluß der Fenster und Türen deutlich.

In der Literatur finden sich sowohl berechnete als auch aus Messungen gewonnene Abschirmfaktoren für verschiedene Gebäudestrukturen.

- Über Messungen berichten insbesondere Spencer et al in der Publikation NBS-520 (Sp 80), die einen umfassenden Überblick über experimentelle und theoretische amerikanische Arbeiten auf diesem Gebiet gibt. Wegen der i.a. leichteren Bauweise U.S. amerikanische Häuser, und weil in dieser Publikation das Fallout-Feld nach einer Kernwaffenexplosion mit seinem gegenüber einer unfallbedingten Kontamination andersartigen Quell-Gammaspektrum im Mittelpunkt steht, sind die darin enthaltenen Werte nicht auf deutsche Verhältnisse übertragbar bzw. anwendbar. Sie decken das Spektrum der in der Bundesrepublik vorkommenden Gebäudetypen nicht ab. Wegen des großen experimentellen Aufwandes sind solche Messungen i.a. schwierig durchzuführen und wurden deshalb in Deutschland bis jetzt nicht unternommen.

- Berechnungen von Abschirmfaktoren von Häusern und Kellern wurden von verschiedenen Autoren durchgeführt, beispielsweise von Eisenhauer (Ei 64) und von Burson und Profio (Bu 75) mit Hilfe der überholten sog. "Standard Method" (Oc 67). Die Werte aus (Bu 75) fanden in der amerikanischen "Reactor Safety Study" (US 75) Verwendung. Eine Arbeit aus jüngster Zeit ist die von Hedemann Jensen (He 85), der Abschirmfaktoren für typische dänische Häuser mit Hilfe eines einfachen Punkt-Kern-Integrationsprogramms berechnet und zur Verwendung in Risikostudien empfiehlt. In diesen Arbei-

ten wird die i.a. komplexe Geometrie von Häusern unter starken Näherungen betrachtet, um sie für die Rechenprogramme handhabbar zu machen. Cohen (Co 75a) hat im Auftrag des "US Department of Defense" Berechnungen von Abschirmfaktoren für Gebäude einer nicht näher bezeichneten westdeutschen Stadt gegen Kernwaffen-Fallout durchgeführt. Cohen verwandte dazu auch teilweise den 3-D Monte-Carlo Code SAM-CE (Co 75b), mit dem sich die komplexe Struktur von Gebäuden im Prinzip exakt erfassen läßt. Allerdings können wegen des sehr hohen Rechenaufwandes Dosisleistungen nur an einzelnen Detektorpunkten berechnet werden. Dies reicht im Sinne der Aufgabenstellung dieser Arbeit nicht aus, da die Berechnung von Gamma-Feldern (räumliche Dosisleistungsverteilung) nicht möglich ist. Die Monte-Carlo-Methode ist praktisch nicht mehr anwendbar, wenn die Abschirmstruktur sehr groß und/oder sehr massiv ist (z.B. Betonhochhäuser, Keller). Schließlich decken die von Cohen untersuchten Gebäudetypen das in der Bundesrepublik Deutschland vorhandene Spektrum von Gebäuden nicht ab.

Die Kontaminationsverteilung auf den Oberflächen einer Stadtlandschaft wie Dächer, Wände und Straßen stellt die Eingangsgröße zur Abschirmrechnung dar. In der vorliegenden Arbeit wird daher zunächst die Modellierung der Ablagerungsprozesse radioaktiven Materials auf baulichen Oberflächen diskutiert. Als Ergänzung ist im Anhang A das zugrunde liegende Ablagerungsmodell nach Gregory und Chamberlain dargestellt. Danach ist der entscheidende Parameter die sog. Ablagerungsgeschwindigkeit. Diese muß experimentell bestimmt werden. Erst in jüngster Zeit sind in den "Riso National Laboratories", Dänemark, und beim "National Radiological Protection Board", England, Experimentalprogramme angelaufen, die sich speziell mit der Ablagerung auf baulichen Oberflächen befassen. Die Auswertung erster Experimente (Ro 81) führt zu Ablagerungsgeschwindigkeiten, die nach Haustyp und Art der Oberfläche aufgeschlüsselt sind. Diese Werte sind allerdings nur Abschätzungen, da das verwendete Modell lediglich phänomenologisch den Effekt beschreibt, der von verschiedenen meteorologischen Gegebenheiten (z.B. turbulente Windströmung über einer Stadtlandschaft) in z.T. unbekannter Weise bestimmt wird. Deshalb sind Messungen anderer Autoren mit künstlichen Oberflächen in Freilandversuchen und Windkanalexperimenten (Sehmel 73, Jonas und Vogt 82) z.T. nicht konsistent. Die Problematik wird diskutiert und Annahmen zur Kontaminationsverteilung abgeleitet.

Im weiteren werden Überlegungen gezeigt, die zur Identifizierung der repräsentativen Gebäudetypen geführt haben. Die Häufigkeitsverteilung dieser Gebäudetypen wird aus statistischen Daten (St 72, St 75, St 78) ermittelt.

Für diese Gebäudetypen wurden Abschirmrechnungen durchgeführt und dabei Aussagen zur räumlichen Verteilung der Gamma-Dosisleistung innerhalb der Gebäude (Ermittlung von geschützten und ungeschützte Stellen) und zur Energieabhängigkeit der Abschirmfaktoren gemacht. Eine Sensitivitätsuntersuchung zu einigen wichtigen Gebäudeparametern zeigt die unterschiedliche Bedeutung einzelner Modellierungsdetails. Da die Feinheit der Modellierung nur durch Aufwand-zu-Nutzen Überlegungen begrenzt zu werden braucht, konnte so der Aufwand zur detaillierten Modellierung auf die wesentlichen Parameter gerichtet werden. Dies sind die Fensterflächen und die Stärke und Dichte der Außenwände.

Es werden die hier berechneten Abschirmfaktoren mit solchen verglichen, die bisher in Risikostudien verwendet oder zur Anwendung im Katastrophenfall empfohlen wurden. Dabei zeigt sich die Konservativität der bisher verwendeten Abschirmfaktoren.

2. Ablagerung von radioaktiven Aerosol - Partikeln aus einer vorüberziehenden Schadstofffahne auf baulichen Oberflächen

Die Ausgangsgröße zur Berechnung des quasistationären Gamma-Feldes in einer Stadtlandschaft ist die Aktivitätskonzentration der Radionuklide auf den baulichen Oberflächen wie Straßen, Hausdächern und -wänden sowie Vorgärten und Parks. Zwar entsteht eine Strahlenexposition ebenfalls direkt durch die vorüberziehende Aktivitätsfahne, diese liefert jedoch nach der Analyse der Phase A der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" in den meisten Fällen einen geringeren Beitrag zur Gesamtbelastung (Bu 81), (Ba 82). Während des Durchzugs der Aktivitätsfahne wird sich ein Teil der darin enthaltenen Radionuklide aufgrund verschiedener physiko-chemischer Prozesse ablagern. Die abgelagerte Menge an Aktivität bestimmt zusammen mit deren Verweildauer auf den Oberflächen und den Zerfallseigenschaften (Halbwertszeit, Zerfallsenergie) entscheidend die potentielle Exposition der anwesenden Bevölkerung. Davon leitet sich die Notwendigkeit verschiedener Schutz- und Gegenmaßnahmen her, und damit, unter Berücksichtigung der Wirkung dieser Maßnahmen, die tatsächliche Strahlenexposition. Daher besteht ein Bedarf an möglichst genauer quantitativer Kenntnis der Ablagerungsprozesse sowohl für realistische Expositionsuntersuchungen als auch für die Planung von Notfallschutzmaßnahmen.

Diesem Wissensbedürfnis steht bis jetzt ein gewisser Kenntnismangel gegenüber. Es fehlt sowohl ein aus dem physikalischen Verständnis der Ablagerungsprozesse heraus gewachsenes einheitliches Modell, als auch die vollständige und konsistente experimentelle Bestimmung der relevanten Parameter für die vorhandenen Modelle, die auf vereinfachenden Annahmen und/oder integralen Betrachtungsweisen beruhen. Die Ursache für diesen Mangel liegt in der Komplexität des Zusammenwirkens der verschiedenen Ablagerungsprozesse. Aerosoltröpfchen und feste Partikeln können sowohl trocken, d.h. durch Wirbeldiffusion und Interzeption oder Sedimentation, als auch naß, d.h. durch Einwirkung von Niederschlägen abgelagert werden. Gasförmige Stoffe können, falls sie wasserlöslich sind, naß abgelagert werden, oder

trocken durch Interzeption. Andererseits können Niederschläge die transportierten Stoffe auch unmittelbar in den Boden oder in die Kanalisation abführen (run-off) oder schon vorhandene Ablagerungen abwaschen (wash-off). Diese besonders komplizierte Situation bei nasser Ablagerung ist bislang kaum untersucht. In bisher vorliegenden Risikostudien werden daher als konservative Abschätzung die dosisreduzierenden Witterungseffekte vernachlässigt, obwohl gerade in bebauten Gebieten eine starke Wirkung des run-off Effektes zu erwarten ist. In der vorliegenden Arbeit wird die nasse Ablagerung nicht berücksichtigt, weil (1) der im Stadtgebiet bedeutsame run-off Effekt quantitativ nicht bekannt ist und (2) experimentelle Befunde aus Messungen von Langzeitablagerungen darauf hinweisen, daß Naßablagerung nur etwa 15% der Gesamtablagerung ausmacht (Ro 81).

Um die trockene Ablagerung von Aerosoltröpfchen zu beschreiben kann man ansetzen (Gr 45, Ch 53, Un 84; s. auch Anhang A):

Partikelfluß zur Oberfläche F (Ci/s m^2) in gegebener Höhe $z \sim$
Partikelkonzentration $c(z)$ (Ci/m^3) in der Höhe z

$$F(z) \sim c(z)$$

Die Proportionalitätsgröße v_d in

$$F(z) = v_d(z) \cdot c(z)$$

hat die Dimension einer Geschwindigkeit und wird Ablagerungsgeschwindigkeit genannt. Sie ist i.A. außer von der Höhe z von der Art (chemische Beschaffenheit) und Größe der Partikel oder Tröpfchen, der Windgeschwindigkeit, dem Turbulenzzustand der Atmosphäre und besonders von der Struktur (Rauhigkeit) der Oberfläche abhängig.

Die Berechnung der Ablagerungsgeschwindigkeit würde die Berücksichtigung der einzelnen physikalischen Prozesse beinhalten, die die Ablagerung ausmachen. Ein theoretisches Modell, daß zumindest alle wichtigen Einflüsse berücksichtigt und konsistent ist mit dem überwiegenden Teil der Messungen, ist nicht verfügbar.

Zur experimentellen Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit wird häufig die zeitintegrierte Form der Definition von v_d herangezogen:

$$v_d = \frac{K_o \left[\frac{C_i}{m^2} \right]}{C_I \left[\frac{C_i \cdot s}{m^3} \right]}$$

mit K_o spezifische Oberflächenkontamination und C_I zeitintegrierte Luftkonzentration in Bodennähe. Eine so bestimmte Ablagerungsgeschwindigkeit liefert nur eine phänomenologische Beschreibung der Ablagerung und gilt entsprechend nur unter genau den Bedingungen, zu denen sie bestimmt wurde. Die wünschenswerte Verallgemeinerung und damit Vorhersagbarkeit von Ablagerungsgeschwindigkeiten müßte in Wechselwirkung mit der Theorie geleistet werden.

Ahmed (Ah 79) gibt einen ausführlichen Überblick über die Theorie des Teilchentransports aus einem Luftstrom über die turbulente Grenzschicht zu einer Oberfläche und die möglichen Abscheidemechanismen. Ein wesentlicher Parameter dabei ist die Rauigkeit der Oberfläche. Das Häusermeer einer Stadt ist in diesem Zusammenhang eine sehr raue Oberfläche. Zahlreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen befassen sich mit der Ablagerung auf Vegetation und auch künstlichen Oberflächen (z.B. Ah 79, Jo 79, Jo 82). Diese Oberflächen sind jedoch vergleichsweise dicht belegt mit niedrigen Rauigkeitselementen, sodaß sich eine turbulente Grenzschicht entwickeln kann, aus der die Rauigkeitselemente nicht wesentlich herausragen.

Mit Hinblick auf die Ablagerung speziell auf städtischen Oberflächen ergeben sich zwei mögliche Betrachtungsweisen:

- Ablagerung auf der Stadtoberfläche als Ganzes; die Gebäude stellen die Rauigkeitselemente dar.

Diese Betrachtungsweise verlangt eine Gesamtablagerungsgeschwindigkeit, die nicht zwischen den einzelnen Arten von Oberflächen wie Hausdächern,

-wänden und Straßen unterscheidet. Dies wäre aber notwendig, um die Konzentrationsverteilungen auf den verschiedenen Oberflächen zu erhalten, die die Eingangsgrößen für exakte Dosisberechnungen im Falle radioaktiver Ablagerungen sind. Außerdem sind bis jetzt keine Experimente zur Bestimmung von Ablagerungsgeschwindigkeiten über Städten bekannt geworden.

- Ablagerung auf den Oberflächen wie Dächer, Wände etc. im einzelnen.

Dies setzt eine Kenntnis der Strömungsverhältnisse um ein einzelnes Gebäude voraus. Pernpeintner (Pe 80) und Meroney (Me 82) haben solche Untersuchungen theoretisch und experimentell durchgeführt. Es bleibt jedoch das Problem der Beeinflussung des Strömungsfeldes durch benachbarte Gebäude und die Frage der Verallgemeinerbarkeit einzelner rechnerischer oder experimenteller Resultate.

Bei verschiedenen Risikountersuchungen (z.B. Bu 81) zeigte sich die große Bedeutung des Expositionspfades "Externe Bestrahlung durch abgelagerte Aktivität". Da die abgelagerte Aktivität am Ort verbleibt, während die nicht abgelagerte mit der weiterziehenden Schadstofffahne wegtransportiert wird, stellt es für Dosisberechnungen am betroffenen Ort eine konservative Abschätzung dar, wenn man die Ablagerungsgeschwindigkeit überschätzt. Das gilt allerdings nicht unbedingt für Schadensberechnungen, da umgekehrt durch eine Unterschätzung der Ablagerungsgeschwindigkeit die Schadstoffe rechnerisch weiter verbreitet werden und damit i.A. ein größerer Personenkreis betroffen ist. Für Dosis- bzw. Abschirmberechnungen in Städten kann man aber, solange ein geeignetes Modell fehlt, aus Experimenten an einzelnen baulichen Oberflächen wie Ziegeldächern, geteerten Flächen und vertikalen Wänden konservative Abschätzungen für die Ablagerungsgeschwindigkeiten und damit für die Kontaminationsverteilung auf den Oberflächen ableiten.

2.1 Bisher durchgeführte Experimente zur Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit für bauliche Oberflächen

Experimentelle Bestimmungen von Ablagerungsgeschwindigkeiten speziell für bauliche Oberflächen werden erst seit etwa 1980 in Dänemark (Risø Laboratories) und England (Nat. Rad. Protection Board) durchgeführt. Interessant sind in diesem Zusammenhang jedoch auch die Messungen an künstlichen Oberflächen wie Metall und Filterpapier im Freien (Jo 82) und im Windkanal (Se 73).

Sehmel (Se 73) führte 1973 eine Reihe von Windkanalversuchen durch, bei denen er die Ablagerungsgeschwindigkeit auf dem technisch glatten Boden, den Wänden und der Decke des Windkanals in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser bestimmt hat. Danach ist die Ablagerungsgeschwindigkeit im Partikeldurchmesserbereich zwischen $0.1 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ und für eine Schubspannungsgeschwindigkeit von $U_* = 34.1 \text{ cm/s}$ für den Boden etwa 5 mal größer als für die Wände. Nach Jonas (Jo 82) liegt die in der Bundesrepublik im Jahresmittel zu erwartende Schubspannungsgeschwindigkeit bei 27 cm/s . Für die Deckenfläche bestimmte Sehmel Ablagerungsgeschwindigkeiten, die stets unter denen für die Wände liegen und für $U_* = 34.1 \text{ cm/s}$ und einen Partikeldurchmesser von $1 \mu\text{m}$ ein scharfes Minimum aufweisen. Für Teilchengrößen kleiner $0.1 \mu\text{m}$ gleichen sich die Ablagerungsgeschwindigkeiten für die betrachteten Oberflächen einander an, da dann nur molekulare (Braun'sche) und turbulente Diffusion wirksam sind.

Roed (Ro 81) veröffentlichte 1981 Untersuchungen über Cs-137 Fallout aus Kernwaffentests auf Gebäudeoberflächen. Die folgende Tabelle (Tab. 1) zeigt über jeweils mehrere Proben gemittelte Ablagerungsgeschwindigkeiten für verschiedene Dach- und Wandmaterialien. Die Werte für die Dachmaterialien sind nicht direkt in (Ro 81) enthalten, sondern durch Auswertung von dort beschriebenen Kontaminationsmessungen abgeleitet. Die Auswertung erfolgte analog zu der bei den Wandmaterialien, wie sie in (Ro 81) beschrieben ist. Roed bestimmte diese Werte durch eine kombinierte Meß-Rechenmethode, die den zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentration in

der Luft und den radioaktiven Zerfall berücksichtigt.

Oberfläche	mittlere Ablagerungsgeschwindigkeit v_d (cm/s)
Dachmaterialien	
rote Ziegel	0.25
glasierte Ziegel, Zementdachsteine	0.1
Schiefer, Wellen eternit	0.05
Eternit	0.01
Wandmaterialien	
gelbe Ziegelsteinmauer	0.02
geputzte Mauer	0.04

Leider wurden unverputzte Beton- und Waschbetonwände nicht untersucht, die für moderne mehrgeschossige Gebäude in der Bundesrepublik typisch sind. Aufgrund der ähnlichen Struktur der Rauigkeit einer Betonoberfläche im Vergleich zu einer verputzten Oberfläche und des relativ geringen Unterschieds zwischen der glatten Ziegelsteinmauer und der geputzten Mauer kann v_d für Betonwände zu 0.04 cm/s abgeschätzt werden. Da sich die den Messungen und Berechnungen zugrunde liegende Kontamination über Jahre erstreckte, läßt sich keine Zuordnung der Ergebnisse zu bestimmten meteorologischen Bedingungen (Schubspannungsgeschwindigkeit) treffen. Roed schätzt ab, daß nur maximal 15% der abgelagerten Aktivität durch nasse Ablagerung (wash out, rain out) verursacht worden sind. Mit Hinblick auf die Streubreite der Werte erscheint dies hier vernachlässigbar.

Ablagerungsexperimente, die zwischen 1975 und 1980 in der Kernforschungsanlage Jülich durch Horbert (Ho 76), Jonas (Jo 79) und Jonas und Vogt (Jo 82) auf unbedecktem Erdboden und künstlichen Oberflächen (Filterpapier, glatte und strukturierte Metalle) durchgeführt wurden, ergaben Ab-

lagerungsgeschwindigkeiten zwischen 0.01 und 0.04 cm/s. Dabei betrug die Partikeldurchmesser der verwendeten radioaktiv markierten CuSO_4 Aerosol-Tröpfchen zwischen $1 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$, die Schubspannungsgeschwindigkeit lag zwischen 10 cm/s und etwa 40 cm/s.

Über die Ablagerungsexperimente, die zur Zeit am Nat. Radiological Protection Board, England, für bauliche Oberflächen durchgeführt werden, liegen noch keine veröffentlichten Ergebnisse vor.

2.2 Herleitung von repräsentativen Ablagerungsgeschwindigkeiten zur Verwendung in Sicherheits- und Risikoanalysen

Die Auswertung der Messungen von Roed (Ro 81) läßt den Schluß zu, daß die Ablagerungsgeschwindigkeit auf Hausdächern mit den gebräuchlichsten Baumaterialien "rote Ziegel" und "Zementdachsteine" etwa 5 mal größer ist als auf Hauswänden. Da diese Messungen auf Cs-Fallout über mehrere Jahre aus Kernwaffentests beruhen, kann man annehmen, daß sich Schwankungen im Partikeldurchmesser und in den meteorologischen Bedingungen weggemittelt haben. Messungen von Sehmel im Windkanal (Se 73) bestätigen den Faktor 5. Die Untersuchungen in der KFA Jülich (Ho 76, Jo 82) zeigen niedrigere Absolutwerte der Ablagerungsgeschwindigkeit, und zwar für Erdboden und glatte Flächen im Mittel 0.03 cm/s. Diese Untersuchungen wurden mit $4 \mu\text{ CuSO}_4$ Aerosolen durchgeführt. In den Werten von Roed ist auch NaAblagerung enthalten, die allerdings nach Roed weniger als 15% der Gesamtablagerung ausmacht. Bei der Versuchsauswertung fiel auf, daß die hohen Werte für V_d dann auftraten, wenn die Oberfläche der Probe sehr klein war, d.h. vermutlich mit einem größeren Meßfehler beaufschlagt sind.

Die Abschirmrechnungen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst mit einer Normkontamination des Daches, der Wände und des umliegenden Bodens mit 1 TBq/m^2 Cs-137 durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß der Dosisbeitrag der Wände nur bei den mehrgeschossigen Gebäuden wesentlich zur Gesamtdosis innen beiträgt. Bei ein- und zweistöckigen Gebäuden tritt der Einfluß der

Wandkontamination zurück wegen der viel größeren Aktivität der Bodenquelle und der relativ guten Gamma-Transparenz des Daches. Außerdem haben einige Gebäudetypen (s. Abb.5) zwei unmittelbar angrenzende Nachbarn (Reihenhaus, Blockbebauung, Kernbebauung), so daß die Bedeutung der Wandkontamination weiter abnimmt.

Mit Hinblick auf den im Teilchenbereich um $1\mu\text{m}$ dominierenden Ablagerungsmechanismus "Wirbeldiffusion und Interzeption" kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, daß die Ablagerungsgeschwindigkeit auf den Wänden eines freistehenden, über das Häusermeer einer Stadt hinausragenden Gebäudes gleich der auf Dach und Boden ist.

Dies bedeutet zusammenfassend: Ablagerungsexperimente auf realen Stadtlandschaften sind bis jetzt nicht durchgeführt worden. Einzelmessungen für verschiedene Baumaterialien und sonstige künstliche glatte Oberflächen im Windkanal und Feldversuch streuen um eine Größenordnung. Die Ablagerung auf Wänden ist wahrscheinlich geringer als auf gleichartigen horizontalen Oberflächen, möglicherweise bis zu einem Faktor 5. Bei ein- und zweigeschossigen Gebäuden tragen kontaminierte Außenwände nur einen geringen Teil zu der Gesamtdosis im Inneren bei, selbst wenn die flächenspezifische Kontamination gleich der des Daches und Bodens ist. Dagegen ist die Wandkontamination die entscheidende Gamma-Quelle bei freistehenden mehrgeschossigen Gebäuden. Bei diesen Gebäudetypen empfiehlt es sich als konservative Abschätzung die Ablagerungsgeschwindigkeit auf die Außenwände gleich der auf das Dach zu setzen.

Aufgrund dieser Überlegungen wird in dieser Arbeit der Empfehlung von Roed (Ro 81) gefolgt, für Aerosole die Ablagerungsgeschwindigkeit auf den städtischen Oberflächen "Dach" und "Straßen" von 0.04 cm/s zu verwenden. Die Kontamination der Wände wird bei den Haustypen, die nicht wesentlich über das mittlere Niveau der Gebäude hinausragen, vernachlässigt. Bei den Gebäudetypen, die freistehend und hoch sind, wird die Wandkontamination gleich der des Daches gesetzt.

3. Ermittlung der Abschirmwirkung von Gebäuden gegenüber äußerer Gamma-Strahlung

3.1 Definition des Abschirmfaktors und des Dosisreferenzwertes

Als Maß der Schutzwirkung eines Gebäudes gegen eine äußere Gamma-Strahlenquelle wird häufig der sogenannte "Abschirmfaktor" verwendet. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Dosisleistung innerhalb einer Abschirmung zur Dosisleistung, die in 1 m Höhe über einer ideal glatten, unendlich ausgedehnten Ebene mit gleicher flächenspezifischer Kontamination entstehen würde.

$$\text{Abschirmfaktor} = \frac{\text{Dosisleistung innerhalb einer Abschirmung}}{\text{Dosisleistung ohne Abschirmung}}$$

Der Nenner dieses Quotienten wird auch Dosisreferenzwert genannt. Gelegentlich findet sich auch der Begriff "Schutzfaktor", z.B. in den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz" (Bu 77b), womit der Kehrwert des Abschirmfaktors gemeint ist.

Die Definition des Abschirmfaktors impliziert, daß die kontaminierte Fläche bei der Dosisberechnung sowohl mit als auch ohne Abschirmung unendlich ausgedehnt ist. Dies können die meisten Rechenprogramme nicht handhaben, da sie nur über ein endliches Volumen numerisch integrieren können. Abb. 1 zeigt die Dosisleistung in 1 m Höhe über dem Mittelpunkt einer quadratischen, ideal glatten als kontaminiert angenommenen Fläche aufgetragen über der Kantenlänge dieser Fläche. Die Dosisleistung wurde berechnet mit dem Punkt-Kern-Integrationscode QAD-CG-E für eine Kontamination dieser Fläche durch 1 TBq/m² der 3 Nuklide J-131, Cs-137 und La-140. Diese drei Nuklide wurden gewählt, da sie von den nach einer Freisetzung aus einer kerntechnischen Anlage zu erwartenden Nukliden ein weiches (J-131), ein mittleres (Cs-137) und ein hartes Gammaspektrum (La-140) repräsentieren (siehe Tab.2). Die Kurven erreichen bei etwa a=300 m den asymptotischen Wert, den sog. Dosisreferenzwert. Eine Quellfläche dieser Größe ent-

spricht also praktisch der in der Definition des Abschirmfaktors geforderten unendlich ausgedehnten Fläche. Allerdings wäre ein so berechneter Abschirmfaktor nur für freistehende Einzelgebäude, wie z.B. Gehöfte realistisch. Gebäude einer Stadtlandschaft haben Nachbarn, die die dahinterliegende Quellfläche soweit abschirmen, daß praktisch bedeutungslos wird. Andererseits können die kontaminierten Wände der Nachbargebäude eine Gammaquelle darstellen und einen nennenswerten Dosisbeitrag liefern.

Sowohl der Modellansatz der Ablagerungsgeschwindigkeit als auch die Definition des Abschirmfaktors gelten im Prinzip für horizontale Oberflächen. Im Falle der Ablagerung auf senkrechten Wänden wird bei der Dosisberechnung mit Abschirmung eine größere Gesamtaktivität angesetzt als beim Dosisreferenzwert. Dies entspricht nicht exakt der Definition des Abschirmfaktors.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, realistische Abschirmfaktoren zu berechnen, und verwendet deshalb realistische Situationen als Grundlage der Dosisberechnungen. Bei der Darstellung der hier berechneten Abschirmfaktoren werden diese Randbedingungen mit angegeben, z.B. eine nur begrenzte Ausdehnung der Bodenquelle oder die Berücksichtigung der Wandkontamination.

3.2 Diskussion und Bewertung der verschiedenen vorliegenden Gamma-Transport Rechenmethoden im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf die heterogene Struktur von Häusern

Zur Berechnung der Schwächung von Gamma-Strahlung beim Durchgang durch Materie muß im Prinzip die Boltzmann'sche Gamma-Transportgleichung gelöst werden, die den Gamma Transport im 6-dimensionalen Phasenraum (r, E, Ω) exakt beschreibt (Fa 59, Ja 70, Pr 79, Ch 84):

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} F(r, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_T F(r, E, \vec{\Omega}) = \iint \Sigma_s(E' \rightarrow E, \vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}') F(r, E, \vec{\Omega}') dE' d\Omega' + S(r, E, \vec{\Omega}) \quad (3.1)$$

Verlust durch Verlust durch Hineinstreuen Quelle
Herausstreuen Absorption

Diese Integro-Differentialgleichung ist einer allgemeinen analytischen Lösung nicht zugänglich. Zur numerischen Lösung sind die drei Verfahren "Punkt-Kern-Integration", "S_N-Transport-" und "Monte-Carlo-Transportrechnung" eingeführt. Jede der drei Methoden hat Vor- und Nachteile und ist in ihrer Anwendbarkeit eingeschränkt.

3.2.1 Punkt-Kern-Integration

Bei der Punkt-Kern-Integrations Methode wird die ausgedehnte Gamma-Quelle in Einzelpunkte diskretisiert, die dann als isotrope Punktquellen betrachtet werden. Die Gesamtdosisleistung erhält man durch Aufsummierung der Beiträge aller Einzelpunkte. Der ungestreute Gamma-Fluß ϕ einer isotropen Punktquelle in einem homogenen Medium in Abhängigkeit vom Abstand r vom Quellpunkt ist

$$\phi(r) = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-\mu_a r} \quad (3.2)$$

wobei $S(1/s)$ = Quellstärke
 $\mu_a(1/cm)$ = linearer Schwächungskoeffizient (Absorption)
 $\phi(1/cm^2s)$ = Gamma-Fluß
 $r(cm)$ = Abstand Quellpunkt zu Detektorpunkt

Gl. (3.2) ist die exakte Lösung der Boltzmann'schen Transportgleichung für den ungestreuten Anteil einer isotropen Punktquelle in einem homogenen Medium. In der Realität finden beim Durchgang der Gammaquanten durch Materie neben Absorptions- auch Streuprozesse statt (siehe Anhang B). Der Gesamtfluß setzt sich zusammen aus dem Direktanteil nach Gl. (3.2) und einem Streuanteil. Dies wird bei der Punkt-Kern-Integrationsmethode näherungsweise durch Einführung des sog. "build-up factor" Konzepts berücksichtigt. Der build-up Faktor ist definiert als

$$B(\mu \cdot r, E) = \frac{\phi_{\text{gesamt}}}{\phi_{\text{nicht gestreut}}} \quad (3.3)$$

und ergibt in Gl. (3.2) eingeführt

$$\phi_{\text{ges}}(r) = \frac{S}{4\pi r^2} \cdot B(\mu \cdot r, E, \text{Material}) \cdot e^{-\mu \cdot r} \quad (3.4)$$

Zur Berechnung von Dosisleistungen wird dieser Ausdruck über das Volumen der Gammaquelle integriert und mit einem Fluß-zu-Dosis⁺ Konversionsfaktor multipliziert.

Ein Code, der auf dieser Methode basiert und mit dem ein großer Teil der dieser Arbeit zugrundeliegenden Dosisberechnungen durchgeführt wurde, ist das dafür weiterentwickelte Programm QAD-CG-E. Dieser Code ging aus dem Los Alamos Programm QAD-CG (Ca 77) hervor und enthält ein sog. "Combinatorial Geometry Package", mit dem im Prinzip beliebig komplexe 3-dimensionale Konfigurationen von Gammaquelle und Abschirmstruktur behandelt werden können (siehe Anhang C). Dabei wird von jedem Quellpunkt zum sogenannten "Detektorpunkt", für den die Dosisleistung berechnet werden soll, die direkte Verbindungslinie gelegt. Zur Berechnung des ungestreuten Anteils wird der Exponent der Schwächungsfunktion $e^{-\sum_i \mu_i \cdot r_i}$ additiv aus den durchstoßenen Schichtdicken und ihren entsprechenden Schwächungskoeffizienten μ_i zusammengesetzt und mit dem Ausdruck für die geometrische Schwächung $\frac{1}{4\pi r^2}$ multipliziert. Dieses Verfahren wird ray tracing genannt (Ca 77). Der gestreute Anteil wird durch den build-up Faktor B berücksichtigt. Dieser hängt in der vorliegenden Version des Codes QAD-CG-E nur von der Schichtdicke in Einheiten der freien Weglängen $\sum_i \mu_i \cdot r_i$ zwischen Quellpunkt und Detektor und von der Energie der Gammaquanten ab. QAD-CG-E enthält energieabhängige Schwächungskoeffizienten nach (St 67) und build-up Faktoren nach (Go 54) als Funktion der mittleren freien Weglängen und der Energie unter Benutzung von Capo's Formel. Das Material des

⁺ Dosis = absorbierte Energie pro Masseneinheit
Dosisleistung = Dosis/Zeit

Streuers wird als Parameter fest vorgegeben. Dabei kann in der vorliegenden Version zwischen Wasser, Aluminium, Eisen, Blei und Beton gewählt werden. Da die Streuprozesse in dem hier betrachteten Energiebereich von 0.1 MeV bis 2 MeV an Hüllenelektronen erfolgen (siehe Anhang B), hat die sogenannte "effektive Ordnungszahl" des Streumediums den entscheidenden Einfluß auf den build-up Faktor. Die effektive Ordnungszahl Z_{eff} ergibt sich zu

$$Z_{\text{eff}} = \sum_k w_k Z_k \quad (3.5)$$

mit w_k = Gewichtsanteil

Z_k = Elektronenzahl des Atoms oder Moleküls der Komponente k
der Mischung

Für die Rechnungen zur vorliegenden Arbeit wurde der build-up Parameter "Aluminium" gewählt, da die effektive Ordnungszahl der gebräuchlichen Baumaterialien ($Z_{\text{eff}} \approx 11.5$) sowie der Luft ($Z_{\text{eff}}=14.4$) der Ordnungszahl von Aluminium ($Z=13$) in der gegebenen Auswahl am nächsten kommt. Diese relativ einfache Vorgehensweise ist gerechtfertigt, da die Streuung durch das build-up Faktor Konzept ohnehin nur näherungsweise berücksichtigt wird und die build-up Faktoren für die hier betrachteten Materialien und Gammaenergien nicht stark variieren.

Der hier verwendete Punkt-Kern-Integrationscode QAD-CG-E hat den Vorteil, 3-dimensionale Quell- und Abschirmstrukturen behandeln zu können. Dies war ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit. Die relativ einfache und schnelle Methode der Punkt-Kern-Integration erlaubt eine große Zahl von Parametervariationen sowie die Berechnung von räumlichen Dosisleistungsverteilungen. Dem steht wegen der nur näherungsweise Berücksichtigung der Streuung eine größere Ungenauigkeit der absoluten Werte der berechneten Dosisleistungen gegenüber. Bei den hier besonders interessierenden Fällen mit geringer Abschirmung, bei denen die Direktstrahlung den wesentlichen Beitrag zur Dosisleistung liefert, ist der zu erwartende Fehler geringer als bei Fällen mit hoher Abschirmung. Sind außerdem das Ziel Abschirmfak-

toren, d.h. relative Dosisleistungen bezogen auf den Fall ohne Abschirmung, so tritt der Teil dieser Ungenauigkeit nicht auf. Als kritischer Fall, bei dem ein größerer Fehler zu erwarten ist, bleibt allerdings die Berechnung der Dosisleistung im Keller eines Gebäudes bei Kontamination der umgebenden Erdoberfläche. Die direkte Verbindung zwischen Quell- und Detektorpunkt geht durch Erdreich, was eine gute Abschirmung vortäuscht, während in der Realität ein nennenswerter Dosisbeitrag durch Luftstreuung ins Erdgeschoß und von dort in den Keller entsteht. Dieses Phänomen ("in and down scattering", Sp 80) wurde mit Hilfe der S_N -Transportmethode an einem Einfachsthaus untersucht und Korrekturfaktoren abgeleitet (siehe Kap. 3.4), die auf die Ergebnisse der Punkt-Kern-Methode angewandt werden.

3.2.2 S_N -Transportrechnung

Eine zweite Möglichkeit, Abschirmrechnungen durchzuführen, besteht darin, die Boltzmann'sche Gamma-Transportgleichung soweit zu vereinfachen, bis sie einer numerischen Lösung zugänglich ist.

Beschränkt man sich bei der numerischen Behandlung der Boltzmann Gleichung auf zwei geometrische Dimensionen und diskretisiert die Energie- und Winkelabhängigkeit des Gamma-Flusses, so erhält man die zweidimensionale S_N -Transportnäherung. Dies ist in dem Programm DOT 4.2 (Rh 82) verwirklicht, das im Zusammenhang mit dem Gammateil der Wirkungsquerschnittbibliothek VITAMIN C (Ra 78) an der Universität Stuttgart für einige Rechnungen zur vorliegenden Arbeit zur Verfügung stand. Mit Hilfe der S_N -Methode wird zwar die Boltzmann Gleichung in 2-dimensionaler Geometrie numerisch exakt gelöst, aber die Berücksichtigung heterogener Strukturen (z.B. eines Fensters, s. Abb.3) ist wegen der Zylindersymmetrie nur mit Schwierigkeiten möglich (z. B. durch mit dem Fensteranteil gewichtete Superposition einer Rechnung mit und ohne umlaufendes Fenster). Daraus folgt, daß für solche Abschirmgeometrien, die auf Zylindersymmetrie zurückführbar sind, mit der S_N -Transport Rechnung eine höhere Rechengenauigkeit zu erwarten ist als mit der Punkt-Kern-Integrationsmethode. Für Parameterstudien an realen

Gebäuden (kubischer Aufbau, heterogene Struktur) ist die S_N -Transport-Methode wegen ihrer Unflexibilität bezüglich der Geometrie und auch wegen des relativ hohen Rechenaufwandes ungeeignet. Sie wurde in der vorliegenden Arbeit benutzt, um Vergleichsrechnungen mit der Punkt-Kern-Integrationsmethode an einem stark vereinfachten sog. "Standardhaus" durchzuführen (Fr 84) und Korrekturfaktoren für die Fälle herzuleiten, bei denen die Punkt-Kern-Integrationsmethode aus prinzipiellen Gründen größere Fehler liefert (z.B. Dosisleistungen in Kellern bei Kontamination des umgebenden Erdbodens, siehe Kap. 3.4).

3.2.3 Monte-Carlo-Transportrechnung

Eine Kombination zwischen hoher Flexibilität bezüglich 3-dimensionaler Geometrie und hoher Rechengenauigkeit stellt die dritte gebräuchliche Methode dar, die Monte-Carlo Transportrechnung. Bei dieser wird der "Lebenslauf" vieler einzelner Gamma-Quanten von der Quelle bis zur Absorption bzw. bis in die Nähe des Detektors rechnerisch verfolgt. Entsprechend den über die Wirkungsquerschnitte gegebenen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der einzelnen Wechselwirkungsprozesse (siehe Anhang B) wird mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators eine Teilchen-trajektorie erzeugt. Die Gesamtheit aller berechneten "Lebensläufe" wird statistisch ausgewertet. Die Genauigkeit des Ergebnisses hängt entscheidend davon ab, wieviele Gamma-Quanten in die Nähe des Detektors gelangen. Die Zahl wird umso geringer sein, je besser die Abschirmung und je größer die Entfernung zwischen Quelle und Detektor ist. Ein für die Zwecke der vorliegenden Arbeit geeignetes Monte-Carlo Transport Programm ist SAM-CE (Co 75b), das wie QAD-CG-E das "Combinatorial Geometry Package" enthält und für einige Rechnungen an der Universität Hannover zur Verfügung stand. Die Erfahrung zeigt, daß der extrem hohe Rechenaufwand Parameterstudien mit den hier betrachteten Gebäudegeometrien nicht zuläßt. Zuverlässige Ergebnisse konnten nur bei relativ dünnen Abschirmungen (z.B. eine Wand oder Decke) und kurzen Distanzen zwischen Quelle und Detektor (z.B. Wand-oder Dachkontamination) erzielt werden.

3.3 Bisher angewandte Vorgehensweise zur Bestimmung der Abschirmwirkung von Häusern

Bereits seit den fünfziger Jahren bestand in den USA im Zusammenhang mit der Kernwaffenentwicklung ein Bedarf, die Abschirmwirkung von Gebäuden und insbesondere von Schutzgebäuden (Bunkern) zu kennen. Dazu wurden einerseits Abschirmfaktoren experimentell mit Hilfe von künstlichen Quellen oder mit Hilfe des Fallout infolge eines Kernwaffentests bestimmt (z.B. zusammengestellt in Sp 80). Andererseits wurde unter der Federführung des "U.S. Office of Civil Defense" eine sogenannte "Engineering Method" oder "Standard Method" entwickelt (Oc 67), (Br 71). Die experimentell gefundenen Abschirmfaktoren sind auf mitteleuropäische Verhältnisse nur bedingt anwendbar, da sie nicht für das in der Bundesrepublik Deutschland anzutreffende Spektrum von Gebäudetypen bestimmt wurden und nur wenige Aussagen über geschützte und ungeschützte Positionen in den Gebäuden ableitbar sind. Die Abschirmfaktoren der amerikanischen "Reactor Safety Study" (US 75) und der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" sind daraus abgeleitet (Bu 77b). Die "Standard Method" beruht auf der Superposition von Standardfällen, die mit Geometriefaktoren gewichtet werden. Diese Standardfälle sind

- (1) isotrope Flächenquelle,
- (2) isotrope Punktquelle,
- (3) anisotrope Flächenquelle und
- (4) Rückstreuung.

Zur Berechnung von (1) bis (3) wurde die sogenannte "Momentenmethode" (Go 54), zur Berechnung von (4) die Monte-Carlo Methode verwendet. Die Momentenmethode löst die Boltzmann Gleichung für ein unendlich ausgedehntes, homogenes Medium durch Entwicklung der Winkelabhängigkeit des Gamma-Flusses in Legendre Polynome und Bildung der Momente der Flußverteilung, welche die Raumintegrale des Flusses an der Stelle r multipliziert mit Potenzen der Koordinaten (x,y,z) sind. Dadurch wird die ursprüngliche von 6 Variablen abhängige (r, \vec{E}, Ω) Integro-Differentialgleichung in eine Folge von linearen Differentialgleichungen übergeführt, die nur noch die Energie E als Variable enthalten. Diese werden integriert und aus den berechneten

Momenten der Fluß rekonstruiert. Die Berechnungen von Goldstein (Go 54) mit der Momentenmethode werden heute nur noch zur Ableitung von build-up Faktoren (siehe Kap. 3.2.1) benutzt. Die "Standard Method" ist in ihrem Genauigkeitsanspruch im Prinzip etwa gleichwertig mit der Punkt-Kern-Integrationsmethode, aber in der Durchführung sehr umständlich für bereits mäßig komplexe Abschirmprobleme. Dies war akzeptabel, solange 3-dimensionale Geometrie-Handhabungsprogramme, wie z.B. das "Combinatorial Geometry Package" noch nicht zur Verfügung standen.

In den Jahren sind parallel zur Leistungssteigerung der Rechenanlagen an verschiedenen Stellen Punkt-Kern-Integrationsprogramme entwickelt worden (z.B. Bu 77a, He 85), die sämtliche aber nicht die Flexibilität bezüglich der Abschirmgeometrie und Quellkonfiguration des für diese Arbeit entwickelten Programms QAD-CG-E haben.

3.4 Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur rechnerischen Bestimmung der Abschirmwirkung von Häusern

Zur Lösung der gestellten Aufgabe wurde nach dem in Abb.2 dargestellten Schema vorgegangen. Wegen der notwendigen großen Zahl von Rechenläufen wurde für Abschirmrechnungen an realen Häusern das hierfür weiterentwickelte Punkt-Kern-Integrationsprogramm QAD-CG-E verwendet. Zusätzlich wurden Vergleichsrechnungen zwischen QAD-CG-E und dem S_N -Transportcode DOT 4.2 (Fr 84) an einem stark vereinfachten sog. "Standardhaus" (Abb.3) durchgeführt. Daraus wurden Korrekturfaktoren für die zuvor mit QAD-CG-E errechneten Abschirmfaktoren abgeleitet. Diese Vorgehensweise wurde überprüft durch Nachrechnung einiger Fälle mit dem Monte-Carlo Code SAM-CE (Do 84).

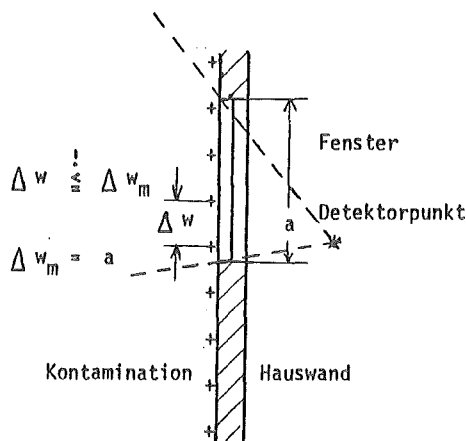
QAD-CG-E enthält eine Datenbibliothek für Gamma-Schwächungskoeffizienten, die aus (St 67) abgeleitet sind. Die build-up Faktoren werden nach Capo's Formel (Ca 77) berechnet:

$$B_i = b_0 + b_1 \cdot (\mu_i r_i) + b_2 \cdot (\mu_i r_i)^2 + b_3 \cdot (\mu_i r_i)^3 \quad (3.6)$$

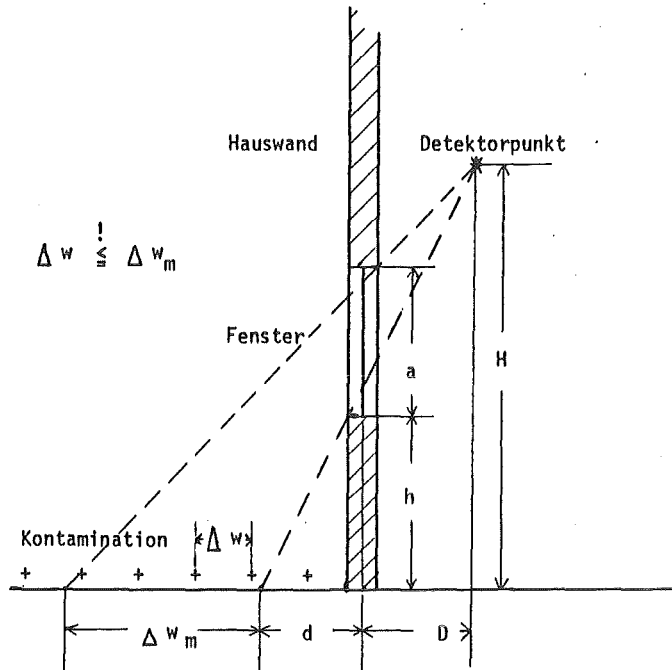
- mit B_i build-up Faktor der i-ten Energiegruppe
 b_0 ./ b_3 Energieabhängige Koeffizienten, die aus Polynomfits der
build-up Daten von (Go 54) berechnet werden
 $\mu \cdot r_i$ mittlere freie Weglängen in der i-ten Energiegruppe

Die Originalversion QAD-CG (Ca 77), die bereits das sog. "Combinatorial Geometry Package" (siehe Anhang C) enthält, mit welchem eine nahezu beliebig komplexe 3-dimensionale Abschirmstruktur modelliert werden kann, wurde erweitert um Unterprogramme, die die Eingabe der Gammaquelle und die Weiterverarbeitung der Ausgabe wesentlich vereinfachen. Außerdem wurde das Programm so modifiziert, daß sich die Zahl der möglichen Quellpunkte von 10^6 auf 10^9 erhöht. Damit ist die Feinheit der Diskretisierung der Gammaquelle, die die Rechengenauigkeit besonders bei ausgedehnten Quellen wesentlich beeinflussen kann, nur noch durch die Rechenzeit begrenzt.

Die notwendige Auflösung kann mit Hilfe folgender Überlegung bestimmt werden: Bei der Punkt-Kern-Integrationsmethode werden von jedem Quellpunkt zu jedem Detektorpunkt gedanklich gerade Verbindungslinien gezogen ("ray tracing"). Da aus den Durchstoßpunkten dieser Linien durch die Oberflächen der einzelnen Schichten der Abschirmstruktur sowohl die Schwächung als auch der buildup bestimmt werden, muß die Diskretisierung der Gammaquelle mindestens so fein sein, daß die kleinsten für die Abschirmrechnung wichtigen Objekte noch getroffen werden. Dies sind bei einem Haus wegen ihrer guten Transparenz gegen Strahlung die Fenster und Türen. Die Anforderung an die Feinheit der Diskretisierung im Falle einer Kontamination der Gebäudewände wird anschaulich wie in der folgenden Skizze ersichtlich direkt durch die Abmessungen der Fenster und Türen bestimmt:



Daraus folgt, daß der Abstand zwischen den Quellpunkten Δw nicht größer werden darf, als die kleinste charakteristische Länge a der betrachteten Abschirmstruktur. Dies ist bei Gebäuden das Minimum von Fensterbreite und -höhe und Türbreite. Bei der Berechnung der Referenzdosisleistung (siehe Kap. 3.1) ist die Höhe des Detektors über dem Boden (1 m) die kleinste charakteristische Länge. Bei einer Kontamination des umgebenen Bodens kann die Mindestauflösung aus der folgenden Skizze abgeleitet werden:



Aus der Geometrie ergibt sich unter Vernachlässigung der Dicke der Wand:

$$\frac{\Delta w_m + d}{h + a} = \frac{\Delta w_m + D + d}{H} \quad (3.7)$$

und

$$\frac{d}{h} = \frac{D + d}{H} \quad (3.8)$$

aus Umformung folgt

$$d = \frac{h D}{H - h} \quad (3.9)$$

eingesetzt in Gl. (3.7) ergibt

$$(\Delta w_m H^2 - 2 \Delta w_m h H + \Delta w_m h^2) - \Delta w_m a H + \Delta w_m a h = a H D$$

$$\Delta w_m = \frac{a H D}{(H - h)^2 - a (H - h)} \quad (3.10)$$

Beispiel: Detektorpunkt im 1. Obergeschoß, die mindestens erforderliche Auflösung Δw_m wird durch die Fenster im Erdgeschoß bestimmt. Detektorhöhe über dem Erdniveau $H=450$ cm, Detektorabstand von der Wand $D=100$ cm, Höhe des Fensters über dem Boden $h=100$ cm, Fensterhöhe $a=120$ cm; dies ergibt eine Mindestauflösung Δw_m von 67.1 cm.

Während mit QAD-CG-E die Geometrie der Abschirmung und der Gammaquelle in sehr guter Näherung (nur durch den Aufwand der Modellierung begrenzt) behandelt werden kann, stellt das build-up-Faktor Konzept zur Berücksichtigung der Streuung nur eine relativ grobe Näherung dar. Dies führt in den Fällen zu größeren Fehlern, bei denen die Direktstrahlung nur einen geringen Beitrag zur Gesamtdosisleistung liefert (z.B. Dosisleistung im Keller bei Kontamination der umgebenden Erdoberfläche, "in and down scattering")

Um hier Abhilfe zu schaffen, wurde folgende Ergänzung des Verfahrens angewandt: An einem stark vereinfachten sog. "Standard Haus" (siehe Abb.3) wurden vergleichende Abschirmrechnungen mit QAD-CG-E und dem S_N -Transportprogramm DOT 4.2 durchgeführt (Fr 84) und zur Normierung der QAD-CG-E Ergebnisse benutzt. Von der S_N -Transportmethode kann eine wesentlich höhere Rechengenauigkeit erwartet werden, da sie die Boltzmanngleichung numerisch löst. Mit beiden Methoden wird die Dosisleistung im Erdgeschoß und im Keller sowie die Referenzdosisleistung (siehe Kap. 3.1) berechnet. Als

Gammaquelle wird eine Kontamination des Daches und des unendlich ausgedehnten umgebenden Bodens angenommen. Die Rechnungen wurden mit Cs-137 (bedeutendstes Nuklid für Langzeitbestrahlung vom Boden), J-131 (von den freigesetzten Nukliden repräsentativ für weiches Gammaskpektrum) und La-140 (repräsentativ für hartes Spektrum) durchgeführt. Tab. 2 zeigt die verwendeten Gammalinien mit ihren Intensitäten und Spektren (Er 79). Unabhängig vom Nuklid, d.h. von der Energie, zeigt der Vergleich der Ergebnisse beider Methoden systematische Unterschiede. In Tab. 3 sind die Verhältnisse der DOT 4.2 zu den QAD-CG-E Ergebnissen dargestellt. Die Dosisleistung im Erdgeschoß und die Referenzdosisleistung wird von QAD-CG-E überschätzt, die Dosisleistung im Keller unterschätzt. Daraus ergibt sich eine (geringere) Überschätzung des Abschirmfaktors im Erdgeschoß und eine (höhere) Unterschätzung des Abschirmfaktors im Keller durch QAD-CG-E. Dies hat seine Ursache in der nur näherungsweise Berücksichtigung der Streuung durch QAD-CG-E. Während die Überschätzung des Abschirmfaktors durch QADCG-E im Erdgeschoß Konservativität bedeutet, kann die Unterschätzung des Abschirmfaktors im Keller nicht toleriert werden. In der Tendenz wird die Übereinstimmung für höhere Energien besser, da dann der Direktanteil der Strahlung zunehmende Bedeutung gewinnt.

Daraus folgt für die Korrektur der mit QAD-CG-E berechneten Abschirmfaktoren: Der Abschirmfaktor für das Erdgeschoß wird um mindestens das 1.25-fache (Cs-137), maximal um das 1.43-fache (J-131) überschätzt; als Korrekturfaktor für Detektorpunkte oberhalb des Erdniveaus wird daher der Kehrwert der kleineren Abweichung verwendet: $K_0=0.8$. Der Abschirmfaktor für den Keller wird mindestens um das 1.49-fache, maximal um das 1.71-fache unterschätzt; der entsprechende Korrekturfaktor für Detektorpunkte unterhalb des Erdniveaus ist durch die größere Abweichung gegeben: $K_0=1.71$.

Um dieses Verfahren zu verifizieren, wurden, soweit möglich, einige Fälle für das "Standardhaus" nach Abb.3 und für das Hochhaus nach Abb.10 mit dem Monte-Carlo Transportprogramm SAM-CE nachgerechnet. Dies erfolgte in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover (Do 84). Die beiden Codes QAD-CG-E und SAM-CE benutzen identische Geometrien. Der Vergleich erfolgte auf der Basis von Dosisleistungen, die mit einer angenommenen Kontami-

nation des Daches der Wände und des umgebenden Erdbodens mit 1 TBq/m^2 ($\approx 27 \text{ Ci/m}^2$) Cs-137 berechnet wurden. Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen mit dem verbesserten Verfahren dieser Arbeit (QAD-CG-E mit Korrektur) und mit Monte-Carlo (SAM-CE) sind in Tab.4 einander gegenübergestellt. Zusätzlich ist in Tab. 4 jeweils der Quotient der beiden Resultate angegeben. Wie ersichtlich ist die Übereinstimmung für die Fälle "Wandkontamination" beim Standardhaus und "Dachkontamination" beim Hochhaus besonders gut. In diesen Fällen ist der Abstand zwischen Quelle und Detektor am kleinsten und daher der Beitrag der Streustrahlung am geringsten. Für die anderen Fälle ergeben sich Abweichungen der Resultate des verbesserten Verfahrens von dem Monte-Carlo Ergebnissen von bis zu $+ 38\%/-28\%$. Im Hinblick darauf, daß die Eingangsgröße zur Berechnung der Aktivitätskonzentration auf baulichen Oberflächen, nämlich die Ablagerungsgeschwindigkeit nur in der Größenordnung sicher bestimmt ist, kann die Übereinstimmung als befriedigend bezeichnet werden.

3.5 Überprüfung des verbesserten Verfahrens anhand eines Abschirm- experiments

In Zusammenhang mit der Kernwaffenentwicklung wurden in den USA zwischen 1958 und 1970 einige Abschirmexperimente durchgeführt, teils mit künstlichen Gammaquellen, teils unter Verwendung des Fallout nach Testexplosionen (Sp 80). Zum Zweck der Validierung des der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Rechenverfahrens wurde ein Experiment des U.S. Army Nuclear Defense Laboratory, Edgewood Arsenal, Maryland, nachgerechnet. Dieses Experiment, im weiteren NDL-Experiment genannt, ist im Gegensatz zu anderen in der Literatur so detailliert beschrieben (Re 64, Sp 80), daß eine Nachrechnung möglich war. Es handelt sich um ein einstöckiges, quaderförmiges Gebäude aus Betonsteinen mit quadratischem Grundriß, bei dem die Fenster mit Betonsteinen zugemauert wurden. Wegen der Symmetrie der Struktur wurde nur ein Achtel des umgebenden Bodens auf der der Tür gegenüberliegenden Seite mit Cs-137 Punktquellen in der in Abb. 4 gezeigten Anordnung versehen. Durch Ummauern des Gebäudes mit Betonsteinen wurde die Wandstärke in 3 Stufen variiert, von denen die dünnste (10.16 cm) und die dickste (29.53 cm) nachgerechnet wurde. Außerdem wurde die Höhe des mittig

gelegenen Detektors in 3 Stufen variiert. Tab. 5 zeigt das Verhältnis der mit QAD-CG-E berechneten zu den gemessenen Dosisleistungen mit und ohne (Werte in Klammern) die in Kap. 3.4 ermittelten Korrekturfaktoren. Die Verbesserung durch Anwendung der Korrekturfaktoren ist deutlich sichtbar. Die verbleibenden Abweichungen können erklärt werden einerseits durch die nicht exakt experimentgetreue Modellierung der Gammaquelle (im Experiment nahm die Maschenweite des Punktquellengitters mit zunehmender Entfernung vom Gebäude zu, in der Rechnung war sie konstant) und durch die Tatsache, daß die chemische Zusammensetzung der Betonsteine nicht dokumentiert war und aus der gegebenen Dichte nur näherungsweise erschlossen werden konnte. Zum anderen können sowohl verbleibende Ungenauigkeiten des Rechenprogramms und der zugrundeliegenden Daten als auch Meßfehler zu Abweichungen führen. Die maximale Abweichung tritt bei dünner Wand und Detektorhöhe null mit 31% bezogen auf den Meßwert auf. Im Fall der Detektorhöhe 91 cm (3 ft), die der Schwerpunktshöhe eines stehenden Menschen entspricht, beträgt die maximale Abweichung 14% vom Meßwert.

4. Ermittlung repräsentativer Gebäudetypen

4.1 Bausubstanz in der Bundesrepublik Deutschland und Identifizierung repräsentativer Gebäudetypen

Zum Zweck der Berechnung von Abschirmfaktoren war es notwendig, die in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Substanz an Wohnungsgebäuden auf eine begrenzte Zahl von repräsentativen Typen bezüglich Geometrie und Baumaterialien zurückzuführen. Die diesbezüglichen Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes (St 72, St 75, St 83) unterscheiden mit "Gebäudeart" lediglich Gebäude mit verschiedener Zahl von Wohnungen, landwirtschaftliche Gebäude sowie Nichtwohngebäude mit Wohnraum und Wohnheime und führen daher nicht auf Gebäudetypen in der geforderten Aufschlüsselung.

In einer Studie der "Forschungsgemeinschaft Bauen und Wohnen" (He 81), Stuttgart, über das "Einsparpotential von Heizenergie in den Wohngebäuden Baden-Württembergs" findet sich eine Liste von 11 Gebäudetypen, die sich auf Expertenbefragungen in Statistischen Ämtern, Baurechtsämtern und von bautechnischen Sachverständigen stützt. Diese Liste wurde erweitert um den Typ "Fertigteilhaus", der unter Strahlenschutzgesichtspunkten bedeutsam ist. Abb.5 zeigt skizzenhaft die so insgesamt erfassten 12 Haustypen. Nach dieser Studie lassen sich bei der Stichprobe vor Ort etwa 10% der Gebäude nicht ohne Probleme in diese Liste einordnen (Fachwerkhäuser, Terrassenhäuser, Laubengang - oder Maisonettetypen etc.), da sie in Gebäudegröße und -form starke Unterschiede aufweisen, die sie einer schematischen Typisierung entziehen. Obwohl daher eine vollständige Aufteilung der Bausubstanz in der Realität nicht möglich ist, werden die Gebäudetypen-Häufigkeiten in der Summe zu 1, bezogen auf die gesamte Bausubstanz der Statistik, angenommen. Da solche Studien für andere Bundesländer nicht vorliegen, wird es als plausibel erachtet, die Liste der Gebäudetypen auf das Bundesgebiet zu anzuwenden.

4.2 Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der repräsentativen Gebäudetypen aus statistischen Daten

In der Gebäude- und Wohnungszählung 1968 (St 72) und der 1% Wohnungsstichprobe 1972 (St 75) wurde die prozentuale Verteilung der Gebäude aufgeschlüsselt nach Zahl der Wohnungen bzw. dem Kriterium "landwirtschaftliches Wohngebäude" einerseits und der sog. "Gemeindegrößenklasse" andererseits.

Die Gemeindegrößenklassen sind:

- Gemeindegrößenklasse I : bis 20000 Einwohner (GGK I)
- Gemeindegrößenklasse II : 20000 bis 100000 Einwohner (GGK II)
- Gemeindegrößenklasse III: über 100000 Einwohner (GGK III)

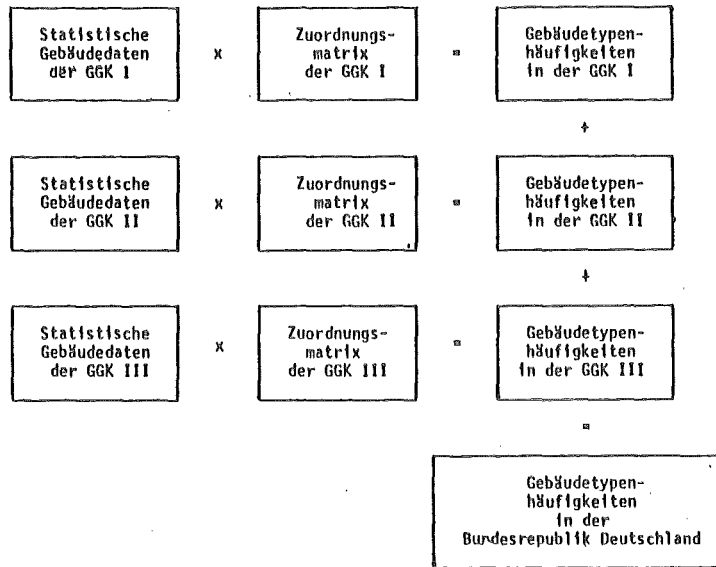
In Abb. 5 sind zu den Gebäudetypen ihre Häufigkeiten in den 3 Gemeindegrößenklassen angegeben. Sie sind im wesentlichen der Studie (He 81) entnommen (Expertenbefragung und Stichprobenahme) und um den Typ "Fertigteilhaus" ergänzt. Da der Gebäudetyp erst seit 1979 im Zuge der Baugenehmigung statistisch erfaßt wird, beziehen sich statistische Angaben in Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes zum Gebäudetyp in der erforderlichen Aufschlüsselung nur auf Gebäudeneuzugänge, nicht aber auf den Bestand. Aufgrund der Verfolgung der Tendenz bei Eigenheimbaugesuchen in (Bu 82) kann aber geschlossen werden, daß 12% der bestehenden Einfamilienhäuser (Typ2) und 2% der bestehenden Doppelhäuser (Typ3) in Fertigteilbauweise erstellt worden sind.

Der o.a. Expertenbefragung und Stichprobenahme liegen Gemeindegrößenklassen zugrunde, die vor der Kreisreform sinnvoll waren, die in Baden-Württemberg 1972 stattfand. In der 1% Wohnungsstichprobe 1978 (St 78) wurde zu den Begriffen "Hochverdichtete Region", "Region mit Verdichtungsansätzen" und "Ländliche Region" übergegangen, die ihrerseits wieder in 7 Intervalle vom "Oberzentrum" bis zur "Gemeinde ohne zentralörtliche Be-

deutung" untergliedert sind. Um diese neueste Statistik verwenden zu können, werden die darin enthaltenen absoluten Zahlen der Wohngebäude im Bundesgebiet nach folgendem Schema auf die Gemeindegrößenklasse abgebildet:

	Hochverdichtete Region	Region mit Verdichtungsansätzen	Ländliche Region
GGK I bis 20 000 Einwohner	----- Gemeinden ohne zentralörtliche Bedeutung ----- ----- Unterzentren -----		
GGK II 20 000 bis 100 000 Einwohner	kleines + großes Mittelzentrum	kleines mittleres } Mittelzentr. 0.5xgroßes }	kleines + großes Mittelzentrum
GGK III über 100 000 Einwohner	Oberzentrum Großzentrum	0.5xgroßes Mittelzentr. Oberzentrum	Oberzentrum

Dies führt zu den in Tab.6 dargestellten absoluten Zahlen von Wohngebäuden aufgeschlüsselt nach Zahl der Wohnungen bzw. landwirtschaftlichen Wohngebäuden und Gemeindegrößenklassen. Abb. 6 zeigt schematisch die Zuordnung der Gebäudetypen zu den Gebäudedaten der amtlichen Statistik. Zur Berechnung der Gebäudetyphäufigkeit für das Bundesgebiet wird nach folgendem Schema vorgegangen:



Die allgemeine Form der Zuordnungsmatrizen zeigt Abb. 7, wobei die noch zu bestimmenden Koeffizienten w_1 bis z_2 gemäß dem Schema in Abb.6 gesetzt wurden. Die absolute Zahl der Gebäude in den 12 Typklassen a bis m ergibt sich aus den Gebäudetypenhäufigkeiten (Abb.5) und der Gesamtzahl der Gebäude (Tab.6) in jeder Gemeindegrößenklasse. Damit lassen sich die Koeffizienten w_1 bis z_2 durch Lösen des linearen Gleichungssystems bestimmen; das Ergebnis ist in Tab.7 dargestellt. Die Anwendung des oben skizzierten Verfahrens führt schließlich zu den in Tab.8 errechneten Gebäudezahlen der einzelnen Typen und Gemeindegrößenklassen und der gesuchten Häufigkeitsverteilung für das gesamte Bundesgebiet.

5. Ermittlung von Gamma-Feldern und Abschirmfaktoren für repräsentative Gebäudetypen und Verkehrsflächen

Zur Berechnung von räumlichen Dosisleistungsverteilungen ("Gamma-Feldern") auf Verkehrsflächen und innerhalb von Gebäuden einer Stadtlandschaft wurde das in Kap. 3.2 diskutierte dafür weiterentwickelte Punkt-Kern-Integrationsprogramm QAD-CG-E benutzt. Diese Rechnungen wurden mit einer Normkontamination von 1 TBq/m^2 ($\cong 27 \text{ Ci/m}^2$) der jeweils kontaminierten Fläche durchgeführt. Die Ergebnisse dienen mehr qualitativen Zwecken: Isodosislinien zeigen die Transparenz der Fenster und Türen sowie den dosisreduzierenden Einfluß der Innenwände. Zur Berechnung von Abschirmfaktoren wird das verbesserte Verfahren nach Kap. 3.4 angewandt.

5.1 Gamma-Felder auf Verkehrsflächen und innerhalb von Gebäuden (Isodosislinien)

Zur qualitativen Bestimmung des Gamma-Feldes auf Verkehrsflächen werden zwei praktische Grenzfälle betrachtet. Ein Detektor befindet sich in 1 m Höhe und 2.50m Abstand von der Hauswand eines niedrigen, freistehenden Hauses (es wurde das "Standardhaus", Abb.3, verwendet), dessen Dach und umgebender Erdboden bis zu einem Radius von 500 m um das Haus mit Cs-137 kontaminiert ist. Dies entspricht einer praktisch unendlich ausgedehnten Flächenquelle.

Der andere Grenzfall besteht in einem Detektor in 1 m Höhe und 2 m Abstand von der Hauswand eines zweistöckigen Gebäudes, dessen Dach und umgebender Boden in 10m Umkreis um das Haus mit Cs-137 kontaminiert ist. Dieser Fall repräsentiert die Situation auf einer Straße, bei der die gegenüberliegende Häuserzeile die dahinterliegende Quelle abschirmt. Die Wände werden als nicht kontaminiert angenommen. Tab.9 zeigt die Dosisleistungen für Fall 1 (ungünstiger Fall, niedrige Abschirmung und große Quelle) und Fall 2 (günstiger Fall, hohe Abschirmung und kleine Quelle) zusammen mit der Referenzdosisleistung für eine ideal glatte unendlich ausgedehnte Ebene

und die daraus berechneten Abschirmfaktoren. Die Abschirmfaktoren unterscheiden sich deutlich. Daraus ist ersichtlich, daß bereits die Stadtlandschaft an sich als "rauhe Oberfläche" eine stark dosisreduzierende Wirkung besitzt gegenüber einer dünn bebauten Fläche (ländliches Gebiet).

Zur qualitativen Darstellung der Gamma-Felder innerhalb von Gebäuden wurden Isodosislinien für die Gebäudetypen "Doppelhaus", "Fertigteilhaus" und "Hochhaus" in je einer horizontalen und einer vertikalen Schnittebene berechnet und in Schnittbilder, die mit dem Programm PICTURE-CG erzeugt wurden, eingezeichnet (Abb.8 bis 10). Dabei wurde gemäß den Überlegungen in Kap.2.2 für das Doppel- und das Fertigteilhaus eine Kontamination des Daches und des umgebenden Bodens angenommen, während für das Hochhaus zusätzlich noch eine Kontamination der Wände berücksichtigt wurde. Deutlich sichtbar ist die Transparenz der (geschlossenen) Fenster und Türen sowie die dosisreduzierende Wirkung der Innenwände.

5.2 Abschirmfaktoren für repräsentative Gebäudetypen

Mit Hilfe des in Kap. 3.4 beschriebenen Verfahrens wurden Abschirmfaktoren für die als repräsentativ für die Bundesrepublik Deutschland identifizierten Gebäudetypen berechnet. Die Rechnungen wurden mit einer Normkontamination von $1 \text{ TBq/m}^2 \text{ Cs-137}$ ($\cong 27 \text{ Ci/m}^2$) auf den Dächern und der umgebenden Erdoberfläche durchgeführt, bei den mehr als zweistöckigen Gebäuden (Typ 6,7,10 und 12 in Abb.5 und Tab.10) wurde gemäß den Überlegungen in Kap. 2.2 zusätzlich eine Kontamination der Wände angenommen. Bei diesen Gebäudetypen entsteht aufgrund ihrer Höhe und massiven Bauweise der überwiegende Dosisbeitrag durch die Kontamination der Wände während bei den niedrigen Gebäuden die Bedeutung der Wandkontamination gegenüber der Dachkontamination vernachlässigt ist. Die Ergebnisse zeigt Tab.10. Die Lage der Detektorpunkte wurde möglichst wirklichkeitsnah gewählt, d.h. 1 m über dem Etageboden und mindestens 1 m Abstand zur nächsten Wand oder zum Fenster. Sind in Tab. 10 Bereiche von Abschirmfaktoren angegeben, so bezieht sich dies auf verschiedene Detektorpositionen. Einzelne Zahlenwerte wurden an repräsen-

tativen Positionen bestimmt. Demnach haben den höchsten Abschirmfaktor für Räume über Erdniveau und damit die niedrigste Abschirmwirkung die Haustypen 1 (=Bungalow) mit 0.29, und 4 (=Fertigteilhaus) mit 0.29 bis 0.13. Diese Gebäudetypen sind einerseits in relativ leichter Bauweise erstellt und haben in Bezug auf ihre geringe Höhe einen großen Dachanteil der Oberfläche. Aus den Isodosislينien der vertikalen Schnittebene in den Abb.8 und 9 wird die Transparenz der ziegelgedeckten Dächer im Verhältnis zur Gebäudewand deutlich sichtbar. Die Abschirmfaktoren der übrigen nicht mehr als zweistöckigen Gebäude liegen zwischen 0.05 und 0.15 mit Ausnahme des Reihenhauses. Dieser Haustyp hat per definitionem zwei unmittelbar angrenzende Nachbarn und somit eine besonders kleine der Strahlung ausgesetzte Oberfläche. Dies führt zu Abschirmfaktoren um 0.005. Mittlere Abschirmfaktoren 0.02 erreichen die Gebäude mit mehr als zwei Stockwerken (Typ 6,7,10 und 12) aufgrund ihrer massiven Bauweise entweder mit großer Wandstärke (bei den älteren Gebäuden) oder mit der guten Abschirmwirkung von Beton. Dies gilt insbesondere für die unteren Stockwerke dieser Gebäude. Aus der Auswertung der Statistik (St 78) nach Kap. 4.2 ergibt sich, daß über 60% der Bevölkerung in Hochhäusern (Typ 6) wohnt.

In Tab. 10 ist für einige Gebäudetypen neben dem repräsentativen Abschirmfaktor auch der in Fensternähe angegeben. Für Einfamilien-, Doppel- und Fertigteilhaus ist dieser etwa doppelt so hoch wie der mittlere. Für Gebäude mit niedrigen mittleren Abschirmfaktoren wird der Wert in Fensternähe bis zu 10 mal so groß wie der repräsentative Wert (Hochhaus, Erdgeschoß des dörflichen Wohnhauses).

Keller haben Abschirmfaktoren um 0.002. Für das Fertigteilhaus, dessen Keller teilweise über das Erdniveau hinausragt, ergibt sich ein Wert von 0.007.

5.3 Diskussion der Energieabhängigkeit der Abschirmfaktoren

Die meisten Messungen und Berechnungen von Abschirmfaktoren wurden mit dem Nuklid Cs-137 durchgeführt, das für die langfristige Exposition vom Boden nach unfallbedingten Freisetzungen eine große Bedeutung hat. Der Abschirmfaktor hängt außer von der Geometrie der Gammaquelle und der Abschirmung auch von der Energie und Intensität der Gammastrahlung ab. Cs-137 (bzw. das radiologisch wirksame Tochternuklid Ba-137m) zeigt eine intensive Gammalinie von 0.661 MeV und einer Intensität von 90% und liegt damit etwa in der Mitte des für freigesetzte Radionuklide relevanten Bereichs von 0.1 bis 1.5 MeV.

Um die Energieabhängigkeit der zunächst mit Cs-137/Ba-137m bestimmten Abschirmfaktoren zu untersuchen, wurden die Abschirmrechnungen für das "Standardhaus" (Abb.3) mit den Nukliden J-131 und La-140 wiederholt. Diese Nuklide sind einerseits nach (Bu 81) von Bedeutung für Unfallfolgenrechnungen und repräsentieren andererseits ein weiches (J-131) und ein hartes Gammaspektrum (La-140) im Bereich der freigesetzten Radionuklide. Tab. 2 zeigt die berücksichtigten Gammalinien mit ihren Intensitäten und Spektren in VITAMIN-C (Ra 78) Gruppenstruktur, wobei Linien mit einer Intensität <1% vernachlässigt wurden.

Tab.11 zeigt die Abschirmfaktoren für das Standardhaus im Erdgeschoß, Keller und außerhalb (5 m von der Hauswand entfernt) für jedes der drei Nuklide. Die am wenigsten abgeschirmte Detektorposition außerhalb zeigt eine vernachlässigbar geringe Variation des Abschirmfaktors. Für das Erdgeschoß ergibt sich für Cs-137 ein etwa 1.4 mal höherer Abschirmfaktor als für J-131, aber für das energiereiche La-140 nur der 1.1 fache Wert wie für Cs-137. Die stark abgeschirmte Detektorposition im Keller zeigt die größte Variation mit etwa 2 für Cs-137/J-131 und 1.6 für La-140/Cs-137. Dies zeigt, daß der Einfluß der Gammaenergie auf den Abschirmfaktor eindeutig von der Güte der Abschirmung abhängt: Je effektiver die Abschirmung desto größer der Einfluß. Die maximale Unterschätzung eines für eine Cs-137/Ba-137m Quelle bestimmten Abschirmfaktors bezüglich den Nukliden mit energiereichen Gammalinien beträgt 1.6.

5.4 Sensitivitätsuntersuchung zu einigen Gebäudeparametern

Um die Sensitivität der errechneten Abschirmfaktoren gegenüber Ungenauigkeiten in der Wandstärke der Außenwände und Zwischendecken sowie der Fläche des Kontaminationsgebiets um das Gebäude festzustellen, wurde mit dem Gebäudetyp "Doppelhaus" (Typ 3) eine Parameterstudie durchgeführt. Das Ergebnis ist in den Abb. 11 bis 13 dargestellt.

Die Nenn-Wandstärke der Außenwand beträgt 27.7 cm. Die Variation der Dicke der Außenwand von 3 cm auf 30 cm reduziert den Abschirmfaktor im Obergeschoß von 0.16 auf 0.12, im Erdgeschoß von 0.12 auf 0.03. Eine weitere Zunahme der Wandstärke auf 60 cm verringert den Abschirmfaktor nur noch unwesentlich. Dies erklärt sich dadurch, daß die Einstrahlung durch das Dach ab 30 cm Wandstärke den Abschirmfaktor kontrolliert. Auch bei dünnen Außenwänden (leichte Bauweise) resultiert im Obergeschoß etwa 75% und im Erdgeschoß immerhin 30% der Exposition aus der Kontamination des Daches.

Die Variation der Dicke der Zwischendecken zwischen Erd- und Obergeschoß sowie Ober- und Dachgeschoß von 3cm auf 22cm (Abb.12) zeigt für das Obergeschoß eine drastische Variation des Abschirmfaktors um den Faktor 20, da hier wie bereits erwähnt die Dachkontamination den dominierenden Beitrag liefert. Für das Erdgeschoß nimmt der Abschirmfaktor dagegen nur um die Hälfte auf 0.03 ab. Dieser Wert wird ab ca. 14cm Deckenstärke erreicht und bleibt dann konstant.

Die Variation der Größe der umgebenden kontaminierten Bodenfläche (Abb.12) von 10^3 m^2 (= einem Kontaminationsradius von etwa 18 m) bis 10^6 m^2 ($\hat{=}$ einer unendlich ausgedehnten Kontaminationsebene) führt zu einem Anstieg des Abschirmfaktors im Obergeschoß um den Faktor 1.3, im Erdgeschoß um den Faktor 1.7. Der Unterschied zwischen den Stockwerken liegt wiederum in der höheren Bedeutung der Dachkontamination für das Obergeschoß und damit der größeren Empfindlichkeit des Erdgeschoßes gegen die Veränderung der Ausdehnung der Bodenquelle. Eine Bodenquelle von ca. 18 m Radius entspricht etwa

den Verhältnissen in einer Stadtlandschaft (Straßen), da die Nachbargebäude die dahinterliegende Kontamination abschirmen (siehe auch Kap. 5.1). Für ein freistehendes Haus kann aus Abb. 13 abgelesen werden, daß für eine kontaminierte Fläche von 10^4 m^2 ($\hat{=}$ einem Kontaminationsradius von 56 m) bereits 95% des asymptotischen Wertes erreicht sind.

6. Vergleich mit bisher angewandten Abschirmfaktoren

Abschirmfaktoren werden hauptsächlich angewendet bei Sicherheitsüberlegungen in Katastrophenschutzplänen. Katastrophenschutzpläne werden von Behörden der Bundesländer erstellt auf der Grundlage der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen" (Bu 77b), die Angaben zu Schutzfaktoren enthalten. Dies sind Kehrwerte von Abschirmfaktoren. Die weitere wichtige Anwendung war bisher in Risikostudien, z.B. die amerikanische "Reactor Safety Study" (US 75) und die "Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke" (Bu 81). Anhand des Vergleichs der dort verwendeten Abschirmfaktoren mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten soll der fortgeschrittene Kenntnisstand verdeutlicht werden.

6.1 Abschirmfaktoren der "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen"

In den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen" (Bu 77b) sind Schutzfaktorbereiche für verschiedene Bauwerke angegeben. Der Schutzfaktor ist definitionsgemäß der Kehrwert des Abschirmfaktors. (Bu 77b) befaßt sich hauptsächlich mit der Schutzwirkung von Kellern und speziellen Strahlenschutzräumen. Diese stehen größeren Bevölkerungskreisen nicht zur Verfügung und waren daher nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Eine Differenzierung nach Gebäudetypen wird nur sehr pauschal vorgenommen. Angaben, die einen Vergleich mit den Resultaten der vorliegenden Arbeit zulassen, sind in Tab. 12 zusammengestellt. Der Begriff "mittig gelegener Raum" wird in (Bu 77b) verwendet, ohne definiert worden zu sein; ebenso wird keine Information darüber gegeben, wie diese Zahlen entstanden sind (Rechnung?, Messung?). Die in Spalte zwei in Tab.12 gegenübergestellten eigenen Resultate zeigen den Bereich zwischen geschützten und ungeschützten (Fensterhöhe) Stellen auf. Während die Übereinstimmung bei oberirdischen Räumen in mehrstöckigen Gebäuden recht gut ist, wird die Abschirmwirkung von Kellern und Räumen in kleinen Gebäuden sowohl

in Massiv- als auch in Leichtbauweise deutlich unterschätzt. Lediglich im Dachgeschoß eines Fertigteilhauses oder in einem Bungalow können unter ungünstigen Bedingungen (z.B. freistehendes Gebäude, hohe Wandkontamination) Werte des Abschirmfaktors bis zu 0.6 auftreten.

6.2 Abschirmfaktoren in Risikostudien

6.2.1 Abschirmfaktoren der amerikanischen "Reactor Safety Study", die aus Fallout-Messungen gewonnen wurden

Tab.13 zeigt eine Gegenüberstellung von Abschirmfaktoren, die aus amerikanischen Fallout-Messungen bestimmt wurden, mit etwa entsprechenden Resultaten der vorliegenden Arbeit. Diese gemessenen Abschirmfaktoren wurden u.a. in der amerikanischen "Reactor Safety Study" (US 75) verwendet. Der Vergleich weist in der Tendenz etwas niedrigere Werte der Abschirmfaktoren der vorliegenden Arbeit aus. Der Grund dafür ist der Unterschied im Spektrum der Gammaquelle. Während der größte Teil der Abschirmrechnungen zur vorliegenden Arbeit mit der 0.661 MeV Gammalinie von Cs-137/Ba-137m durchgeführt wurde, enthält das Gammaskpektrum von Kernwaffenfallout energiereiche Linien, die zu höheren Abschirmfaktoren führen. Cs-137 wurde in den Rechnungen gewählt, da es einerseits eine wichtige Rolle bei der Langzeitexposition nach unfallbedingten Freisetzungen spielt und andererseits in der Mitte des zu erwartenden Energiespektrums liegt. Zum Einfluß der Energie auf den Abschirmfaktor siehe Kap. 5.3. Eine weitere Ursache könnte in der meist leichteren Bauweise US-amerikanischer Gebäude liegen, als dies in der Bundesrepublik Deutschland üblich und den untersuchten repräsentativen Gebäudetypen zugrunde gelegt ist. Die Verhältnisse der Werte für die einzelnen Detektorpositionen zueinander zeigen eine befriedigende Übereinstimmung. Eine genaue Nachrechnung einzelner Fallout-Messungen war nicht möglich, da die erforderlichen Daten (Geometrie, chemische Zusammensetzung der Wände etc.) nicht publiziert worden sind.

6.2.2 Abschirmfaktoren der "Deutschen Risikostudie-Kernkraftwerke"

Die in der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" (Sch 78), (Bu 81) verwendeten Abschirmfaktoren sind Mittelwerte aus der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Literatur. Es werden lediglich die drei Gebäudetypen "Ein- und Zweifamilienhäuser", "größere Wohngebäude" und "Hochhäuser" unterschieden. Im Vergleich mit den Resultaten der vorliegenden Arbeit stellen die Werte i.a. eine für Risikostudien eventuell akzeptable sehr konservative Abschätzung dar. Eine Ausnahme davon bilden allerdings die Gebäudetypen "Fertigteilhaus" und "Bungalow", deren niedrige Abschirmwirkung nicht berücksichtigt wird. Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit könnten bei einer Weiterentwicklung des der Risikostudie zugrunde liegenden Unfallfolgenmodells folgende Abschirmfaktoren für die Strahlung vom Boden angewandt werden:

Ein- und Zweifamilienhäuser in Leichtbauweise: (Gebäudetyp 1 und 4 in Abb. 5)	0.3
Wohngebäude mit bis zu 3 Stockwerken in Massivbauweise: (Gebäudetyp 2,3 und 8 bis 11)	0.15
Hochhäuser und Keller: (Gebäudetyp 5,6,7 und 12)	0.01

Diese Abschirmfaktoren entsprechen den oberen Grenzen der in Tab.10 angegebenen Bereiche und sind daher immer noch ausreichend konservativ. Durch die Beibehaltung der Einteilung der Gebäudetypen in drei Gruppen würde der Rechenaufwand für das Unfallfolgenmodell nicht ansteigen.

Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit resultierte aus der Analyse der Ergebnisse von Risikostudien, speziell der "Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke" Phase A, wonach bei unfallbedingten Freisetzungen radioaktiven Materials aus Kernkraftwerken in die Atmosphäre der Expositionspfad "externe Strahlung durch abgelagerte Aktivität vom Boden" in den meisten Fällen den bedeutendsten Beitrag zur Gesamtbelastung liefert. Um die Gegenmaßnahmen "Evakuierung" und "Aufsuchen von Gebäuden" optimal einsetzen zu können, ist sowohl für Risikountersuchungen als auch zur Planung von Notfallschutzmaßnahmen eine gute Kenntnis der Abschirmwirkung von Gebäuden erforderlich.

In dieser Arbeit wird die Problematik der Ablagerung auf den städtischen Oberflächen wie Hausdächern und -wänden sowie Straßen diskutiert und Annahmen über die Kontaminationsverteilung auf einer Stadtlandschaft abgeleitet. Davon ausgehend wird die Abschirmwirkung der in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen Gebäude gegen Gammastrahlung berechnet.

Zur Beschreibung der Ablagerung auf baulichen Oberflächen wurde auf den integralen Ansatz nach Gregory und Chamberlain zurückgegriffen, mit dem die sog. Ablagerungsgeschwindigkeit als dem Verhältnis zwischen bodennaher Luftkonzentration und dem Partikelstrom zum Boden eingeführt wird. Die experimentelle Bestimmung von Ablagerungsgeschwindigkeiten speziell auf baulichen Oberflächen wurde in den dänischen Riso Laboratories durch Messungen von Fallout infolge amerikanischer Kernwaffentests unternommen. Danach sind die Aerosoldurchmesser in dieser großen Entfernung vom Ort der Detonation ähnlich denen, die nach einer unfallbedingten Freisetzung aus einem Kernkraftwerk zu erwarten sind ($\approx 1 \mu\text{m}$). Es wurden Ablagerungen der Isotope Cs-137 und Sr-90 untersucht, die auch bei Kernkraftwerkschadensfällen von Bedeutung sind.

Die Ergebnisse dieser Messungen lassen schließen, daß die Ablagerung auf Hauswänden bis zu einem Faktor 5 niedriger ist, als auf horizontalen oder leicht geneigten baulichen Oberflächen. Allerdings streuen experimentell bestimmte Ablagerungsgeschwindigkeiten für künstliche glatte Oberflächen verschiedener Autoren um eine Größenordnung (mittlerer Wert 0.04 cm/s).

Langzeitablagerungen im Freien enthalten den Beitrag der nassen Ablagerung, der etwa 15% beträgt. Bei Kurzzeitablagerung kann die nasse Ablagerung zum dominierenden Prozeß werden und zusammen mit dem run-off Effekt die tatsächliche Kontamination der Oberflächen bestimmen. Da der run-off Effekt quantitativ noch nicht untersucht ist, blieb die nasse Ablagerung in dieser Arbeit unberücksichtigt.

Abschirmrechnungen, die zunächst mit einer Normkontamination aller äußeren Oberflächen und des umgebenden Bodens mit verschiedenen Gebäudetypen durchgeführt wurden, zeigen, daß die Wandkontamination bei niedrigen (< 3 Geschosse) Bauwerken nur einen geringen Beitrag zur Dosisleistung innen liefert. Daher kann bei diesen Gebäuden zur Bestimmung des Abschirmfaktors die Wandkontamination vernachlässigt werden. Bei höheren Gebäuden, bei denen die Wandkontamination den wesentlichen Beitrag zur Dosisleistung liefert, wird die Ablagerungsgeschwindigkeit auf den Wänden gleich der auf horizontalen Oberflächen gesetzt. Dies stellt eine konservative Abschätzung dar, da viele Gebäude in Städten unmittelbar angrenzende Nachbarn haben und diese Wandflächen nicht kontaminierbar sind.

Im Hinblick auf die Berechnung der Abschirmwirkung von Gebäuden unter Berücksichtigung ihrer heterogenen Struktur werden die eingeführten Methoden zur Berechnung der Abschwächung von Gammastrahlen beim Durchgang durch Materie, nämlich Punkt-Kern-Integration, S_N -Transportrechnung und Monte-Carlo-Transportrechnung, beschrieben und auf ihre Anwendbarkeit zur Berechnung der Abschirmwirkung realer Gebäude hin untersucht. Kriterien dieser Überlegungen waren dabei die erreichbare Genauigkeit, die Möglichkeiten zur Berücksichtigung komplexer 3-dimensionaler Geometrien sowie der notwendige Rechenaufwand mit Hinblick auf die große Anzahl der zu berechnenden Fälle. Als den drei Rechenmethoden entsprechende Computerprogramme wurden das Punkt-Kern-Integrationsprogramm QAD-CG-E, das S_N -Transportprogramm DOT 4.2 und das Monte-Carlo-Transportprogramm SAM-CE verwendet. Die Codes QAD-CG-E und SAM-CE verfügen über ein sog. "Combinatorial Geometry Package" mit welchem beliebig komplexe Abschirmstrukturen aus einfachen Grundkörpern zusammengesetzt werden können. Die Untersuchung zeigte, daß

der Punkt-Kern-Integrationscode für die gestellte Aufgabe am geeignetsten ist bezüglich der Vielzahl von Einzelrechnungen bei nicht zu großen Genauigkeitsanforderungen. Der S_N -Transportcode bietet eine bessere Genauigkeit der Ergebnisse, kann aber bereits nur mäßig komplexe Abschirmungen (kubische Geometrie) nicht mehr handhaben, da nur 2-dimensionale Strukturen berechnet werden können. Der Monte-Carlo Code eignet sich wegen der Abmessungen der Gebäudestrukturen und des Rechenaufwandes nur für Einzelfälle, z.B. zur Verifikation von Ergebnissen anderer Verfahren.

Die Abwägung der Gesichtspunkte "Vielseitigkeit bzgl. heterogener Abschirmstrukturen" und "Schnelligkeit" (große Zahl von Rechnungen) führte zu dem Verfahren, die Abschirmrechnungen mit dem dafür weiterentwickelten Punkt-Kern-Integrationsprogramm QAD-CG-E durchzuführen und anhand eines idealisierten "Standardhauses" (1 Fenster, Zylindersymmetrie) durch Anwendung des S_N -Transportprogramms DOT 4.2 Korrekturfaktoren herzuleiten. Diese werden auf die Punkt-Kern Ergebnisse angewendet. Die Monte-Carlo Methode wurde dazu benutzt, diese Vorgehensweise zu verifizieren, indem einige Fälle nachgerechnet wurden, bei denen die Monte-Carlo Methode anwendbar ist. Die maximalen Abweichungen der mit dem hier vorgestellten Verfahren berechneten Dosisleistungen von mit der Monte-Carlo Methode berechneten betragen + 38%/-28%.

Zur Validierung des Verfahrens wurde ein Abschirmexperiment an einem Einfachsthaus nachgerechnet, das beim Nuclear Defense Laboratory, Edgewood Arsenal, USA durchgeführt wurde. Dabei lagen die mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens berechneten Dosisleistungen in 1 m Höhe für dünne Wände (Wandstärke 10.16 cm) um 14% unter dem Meßwert, während für dicke Wände (Wandstärke 29.53 cm) die Abweichung $< 0.5\%$ betrug.

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war die Berechnung der Abschirmwirkung der in der Bundesrepublik Deutschland vorkommenden Wohngebäude. Dazu wurden Statistiken zur Wohnungsversorgung der Bevölkerung ausgewertet und eine Liste von 12 repräsentativen Gebäudetypen aufgestellt. Demnach ist der häufigste Gebäudetyp (26.2%) das Einfamilienhaus in gemauerter Bauweise, während sich die meisten Wohnungen (67.6%) in Wohnblocks und Hochhäusern befinden. Ebenfalls von Bedeutung ist der Typ "Fertigteilhaus", der zwar nur 4.0% der Gebäude und 1.7% der Wohnungen beiträgt, aber besonders ungünstige Abschirmeigenschaften aufweist. Die Abschirmwirkung von Kellern wurde ebenfalls untersucht.

Den Abschirmrechnungen wurde eine angenommene Kontamination mit Cs-137 zugrunde gelegt. Das Isotop Cs-137/Ba-137m hat eine intensive Gammalinie bei 0.661 MeV (90%). Vergleichsrechnungen zur Untersuchung der Energieabhängigkeit der Abschirmfaktoren mit J-131 (wesentliche Gammalinie bei 0.365 MeV mit 81%) und La-140 (wesentliche Gammalinien 0.487 MeV mit 43%, 0.9 MeV mit 37% und 1.596 MeV mit 95%) ergeben im Falle des Jods um etwa einen Faktor 1.4 niedrigere, im Falle des Lanthans um etwa einen Faktor 1.2 höhere Abschirmfaktoren. J-131 und La-140 repräsentieren im Rahmen der beim radioaktiven Zerfall auftretenden Gammaenergien ein besonders weiches und ein besonders hartes Gammaskpektrum. Mit Hinblick auf die radiologische Bedeutung von Cs-137 ist es gerechtfertigt, Abschirmfaktoren für die Anwendung z.B. in Risikostudien für dieses Isotop zu berechnen. Die Bandbreite der Abschirmfaktoren bzgl. anderer Isotope wird durch die o.a. Faktoren beschrieben.

Die Berechnung der Gamma-Felder, d.h. der räumlichen Dosisleistungsverteilungen für die Gebäudetypen "Doppelhaus", "Hochhaus" und "Fertigteilhaus" aufgrund der im Kap. 2.2 beschriebenen Kontaminationssituation macht die Transparenz der (geschlossenen) Fenster und Türen sowie die Abschirmwirkung auch der Innenwände deutlich und rechtfertigt den Aufwand bei der Modellierung der Geometrie. Diese drei Gebäudetypen repräsentieren je ein Gebäude mit mittlerer, guter und ungünstiger Abschirmwirkung. Das Verhältnis des Abschirmfaktors für eine Position in Fensternähe zu einer Position mitten im Raum beträgt bis zu einem Faktor zwei, wobei die Fensteröffnung besonders dann große Bedeutung hat, wenn die übrige Außenwand gut abge-

schirmt (z.B. beim Typ "Hochhaus"). Die Abschirmfaktoren für eine durchschnittliche Position in den mittleren und unteren Stockwerken der mehr als 3-stöckigen Gebäude sind 0.03 oder kleiner, im obersten Stockwerk 0.04. Freistehende Einzelgebäude, die vor allem in ländlichen Gebieten auftreten, haben Abschirmfaktoren zwischen 0.1 und 0.15. Eine Ausnahme hiervon stellen die Typen "Bungalow" und "Fertigteilhaus" dar, deren Abschirmfaktoren wegen der großen kontaminierbaren Oberfläche, der Transparenz des Daches und der leichten Bauweise nur bei 0.3 liegen. Besonders günstig wegen seiner kleinen kontaminierbaren Oberfläche ist das Reihenhaus mit Abschirmfaktoren von 0.005 bis 0.007. Keller bieten einen mittleren Abschirmfaktor von 0.04.

Der Vergleich mit den "Rahmenempfehlungen für den Katastropenschutz.." zeigt, daß dort die Abschirmwirkung von Kellern und kleinen Gebäuden bis zu einem Faktor 10 unterschätzt wird, während die Abschirmfaktoren für die übrigen Gebäudetypen, soweit spezifiziert, bestätigt werden. Der Vergleich mit den Abschirmfaktoren der DRS Phase A zeigt die Konservativität der dort angewandten Werte mit Ausnahme der Gebäudetypen "Fertigteilhaus" und "Bungalow". Für eine weiterentwickelte Version des Unfallfolgenmodells der DRS könnten die in dieser Arbeit untersuchten Gebäudetypen in drei Gruppen eingeteilt und folgende Abschirmfaktoren angewendet werden: (1) Gebäude in Leichtbauweise 0.3, (2) Wohngebäude mit bis zu drei Stockwerken in Massivbauweise 0.15 und (3) Hochhäuser und Keller 0.01.

Zur weiteren Verbesserung der Modellierung des Expositionspfades "Externe Bestrahlung durch abgelagerte Aktivität" müssen die Modelle weiterentwickelt werden, die die Eingangsgrößen zur Abschirmrechnung liefern. Dies sind Modelle zur Beschreibung des Verhaltens von Radionukliden in Stadtlandschaften (Ablagerung, run-off, wash-off).

Anhang A: Modell der trockenen Ablagerung nach Gregory und Chamberlain

Die Ablagerungsgeschwindigkeit v_d ist definiert als das Verhältnis Partikelfluß zum Boden D ($1/\text{cm}^2 \text{ s}$) zur Partikelkonzentration c ($1/\text{cm}^3$) in der darüber befindlichen Luft, wobei diese Größen von der Höhe z abhängen (Ch 53), (Un 84):

$$v_d(z) = - \frac{D(z)}{c(z)} \quad (\text{A } 1)$$

Für den hier vorliegenden Teilchengrößenbereich von $0,1 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m } \phi$ sind die wesentlichen Ablagerungsmechanismen "Interzeption durch Wirbeldiffusion" und "Sedimentation". v_d kann also aufgespalten werden in einen Teil v_k der auf Wirbeldiffusion zurückzuführen ist, und einen Teil v_s , der die Sedimentation berücksichtigt.

A.1 Interzeption durch Wirbeldiffusion

Nach Lumley und Panofsky (Lu 64) ist in einer turbulenten Oberflächenschicht der vertikale Partikelfluß nahezu unabhängig von der Höhe. Unter der Voraussetzung horizontaler Homogenität und adiabatischen Wetterbedingungen kann man für den vertikalen Gradienten der mittleren Windgeschwindigkeit schreiben:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = \frac{U_*}{K z} \quad (\text{A } 2)$$

mit U_* (cm/s) Schubspannungsgeschwindigkeit
 K (/) Karman Konstante ($K \approx 0.4$)
 z (cm) Höhe über dem Erdniveau

Falls die Oberfläche mit hohen und dichten Rauigkeitselementen belegt ist, wird eine Nullpunktverschiebung für z notwendig:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} = \frac{U_*}{K(Z-L)} \quad (\text{A } 3)$$

Nach Ahmed (Ah 79) ist für L das 0.6-fache der mittleren Höhe der Rauigkeitselemente typisch. Die Integration von Gl. (A 3) ergibt

$$\bar{U}(Z) = \frac{U_*}{K} \ln \frac{Z-L}{z_0} \quad (\text{A } 4)$$

z_0 (cm) wird Rauigkeitslänge genannt.

Gemäß Gl. (A 4) würde $\bar{U}=0$ für $z=L+z_0$. Dies entspricht nicht ganz den Meßergebnissen, wonach erst bei $z=0$ \bar{U} exakt null wird. Analog zu Gl.(A 2) kann man für den Gradient der mittleren Partikelkonzentration schreiben

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial Z} = \frac{c_*}{K \cdot Z} \quad (\text{A } 5)$$

Dabei ist c_* so definiert, daß der mittlere Partikelfluß

$$D = - c_* \cdot U_* \quad (\text{A } 6)$$

ist.

Die Integration von Gl. (A 5) und Einführung einer Nullpunktverschiebung wie im Falle der mittleren Windgeschwindigkeit ergibt

$$\bar{c} - \bar{c}_0 = \frac{c_*}{K} \ln \frac{(Z-L)}{z_0} \quad (\text{A } 7)$$

wobei c_0 die mittlere Konzentration in der Höhe $z=L+z_0$ ist. Wie bei der mittleren Windgeschwindigkeit wird in der Realität \bar{c} erst bei $z=0$ zu null und dies auch nur unter der Voraussetzung, daß die Oberfläche alle Partikel absorbieren kann, die sie erreichen. Dies ist jedoch i.a. nicht der Fall.

Wie bereits erwähnt, setzt sich die Ablagerungsgeschwindigkeit v_d aus einem durch Wirbeldiffusion und einem durch Sedimentation bestimmten Anteil zusammen. Zur Abschätzung einer oberen Schranke für den durch Wirbeldiffusion bestimmten Teil kann man in die Definitionsgleichung für v_d (Gl. A 1) die Definitionsgleichung für c_* Gl. (A 6) und Gl. (A 7) einsetzen und erhält nach Erweiterung mit K/c_*

$$v_d = \frac{K U_*}{\ln \frac{z-L}{z_0} + K \frac{\bar{c}_0}{c_*}} \quad (A 8)$$

Handelt es sich bei der Oberfläche um einen idealen Absorber, so wird $\bar{c}_0 = 0$ und v_d maximal. Daraus folgt

$$v_k = v_d \leq \frac{K U_*}{\ln \frac{z-L}{z_0}} \quad (A 9)$$

Und schließlich mit Hilfe von Gl. (A 4)

$$v_k \leq \frac{U_*^2}{\bar{U}} \quad (A 10)$$

A.2 Sedimentation

Zur Abschätzung des Teils der Ablagerungsgeschwindigkeit, der durch die Gravitation hervorgerufen wird ("Sedimentation"), setzt man unter der Annahme kugelförmiger Partikel und Gültigkeit des Stoke'schen Gesetzes ein Kräftegleichgewicht an:

Die Reibungskraft K_R ist für kugelförmige Partikel

$$K_R = 3\pi \rho_L \nu d v_s \quad (A 11)$$

worin ρ_L (g/cm³) und ν (cm²/s) die Dichte und die kinematische Viskosität der Luft bedeuten, d (cm) und v_s (cm/s) Durchmesser und Relativgeschwindigkeit der Partikeln sind. Die Schwerkraft K_g auf die Partikel ist

$$K_g = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_p - \rho_L) g \quad (A 12)$$

worin ρ_p (g/cm³) die Dichte der Partikel und g (cm/s²) die Erdbeschleunigung bedeuten.

Kräftegleichgewicht ergibt

$$3\pi \rho_L \nu d v_s = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_p - \rho_L) g$$

und die gesuchte Sedimentationsgeschwindigkeit v_s

$$v_s = \frac{d^2 g}{18 \nu} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_L)}{\rho_L} \quad (A 13)$$

Anhang B: Elementare Wechselwirkungsprozesse beim Durchgang von
Gamma-Strahlung durch Materie (nach Ja 60)

Beim Durchgang von Photonen durch Materie können über 10 verschiedene Arten der Wechselwirkung eintreten. Für den im Zusammenhang mit unfallbedingten Freisetzungen aus kerntechnischen Anlagen in Frage kommenden Energiebereich von 0.1 bis maximal 5 MeV sind jedoch nur drei Wechselwirkungsprozesse von Bedeutung, die mit den Elektronen der Atomhülle als Streupartner ablaufen: Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung. Bei Photonenenergien zwischen 0.01 und 0.1 MeV (weiche Röntgenstrahlung) spielt die kohärente (Rayleigh'sche) Streuung, bei der der Rückstoß des gestreuten Photons rein elastisch vom ganzen Atom aufgenommen wird, eine gewisse Rolle; allerdings beträgt der Anteil dieses Effekts an der Gesamtabschwächung weicher Röntgenstrahlung maximal 10%. Bei Photonenenergien > 15 MeV gewinnt der Kernphotoeffekt, d.h. die (γ, n) Reaktion am Atomkern, Bedeutung. Die Schwellenergie für die (γ, n) -Reaktion ist gleich der Neutronenbindungsenergie, der Wirkungsquerschnitt ist jedoch bei Photonenenergien < 15 MeV sehr klein.

B.1 Photoeffekt

Ein auf ein Hüllenelektron auftreffendes Photon mit einer höheren Energie E als die Bindungsenergie des Elektrons E_x löst dieses aus der Atomhülle heraus. Dieser Effekt heißt "Photoeffekt" und ist in Abb. B.1. schematisch dargestellt. Die Energie des einfallenden Photons, vermindert um die Bindungsenergie des Elektrons der x -ten Schale, wird vollständig in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt:

$$\frac{m_e v^2}{2} = E - E_x \quad (\text{B } 1)$$

Ein Elektron kann elektromagnetische Strahlung nur absorbieren, wenn es in einem Atom gebunden ist. Bei im Vergleich zur Bindungsenergie hohen

Photonenenergien erscheint die Bindung als verhältnismäßig schwach, dabei sinkt der Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt mit zunehmender Photonenenergie schnell von seinem scharfen Maximum bei $E=E_K, E_L, E_M, \dots$ ("Absorptionsecke") ab. Mit zunehmender Ordnungszahl nimmt die Bindungsenergie der Hüllenelektronen und damit der Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt stark zu. Unter der Voraussetzung $E > E_K$ finden etwa 80% der photoelektrischen Absorptionen in der K-Schale statt, deren Elektronen am festesten gebunden sind.

Der Wirkungsquerschnitt für den Photoeffekt in der K-Schale eines Atoms der Ordnungszahl Z ist näherungsweise

$$\sigma_{\text{Phot, K}} = \frac{8\pi r_0^2}{3} \cdot \frac{Z^5}{137^4} \cdot 4\sqrt{2} \left(\frac{m_e c^2}{E} \right)^{7/2} \quad (\text{B } 2)$$

wobei $r_0 = 2.82 \cdot 10^{-13}$ cm der sog. Elektronenradius und $m_e \cdot c^2 = 0.51$ MeV die Elektronen-Ruhemasse ist.

Der Photoeffekt hat auch bei Absorbern hoher Ordnungszahl nur bis zu Energien von etwa 1.5 MeV einen wesentlichen Einfluß auf die Photonenabsorption. Der Abspaltung eines inneren Hüllenelektrons folgt die Einnahme der Fehlstelle durch ein Elektron aus einer äußeren Schale, das dadurch fester gebunden wird und die Differenz der Bindungsenergie als sog. Fluoreszenzphotonen geringer Energie abstrahlt. Aufgrund ihrer niedrigen Energie und damit verbundenem geringen Durchdringungsvermögen kann die Fluoreszenzstrahlung bei der Abschirmrechnung vernachlässigt werden, sodaß der Photoeffekt als echter Absorptionsprozeß betrachtet werden kann.

B.2 Compton-Effekt

Der als Compton-Effekt bezeichnete inelastische Stoß zwischen einem Photon und einem Hüllenelektron wird in der Theorie als elastische Streuung

eines Photons an einem ungebundenen, stationären Elektron behandelt, da für Photonenenergien > 0.1 MeV die Abtrennarbeit für das Elektron im allgemeinen vernachlässigbar klein ist (Ausnahme: Bindungsenergie der K-Schalenelektronen der schweren Elemente, die die Größenordnung 0.1 MeV erreicht). Bei der Compton-Streuung (Abb. B.2) gibt das Photon einen Teil seiner Energie an das gestoßene Elektron ab und erfährt eine Richtungsänderung. Der Wirkungsquerschnitt für Compton-Streuung σ_s ist etwa proportional zur Zahl der Hüllenelektronen Z .

Zwischen der Energie des einfallenden Photons E_0 , der des gestreuten Photons E und dem Streuwinkel ϑ besteht mit Einführung des Parameters ϵ_0 , $\epsilon_0 = E_0/m_e \cdot c^2$, $m_e \cdot c^2 = 0.51$ MeV Ruheenergie des Elektrons, folgende Beziehung:

$$E = \frac{E_0}{1 + \epsilon_0 (1 - \cos \vartheta)} \quad (B\ 3)$$

Für kleine Streuwinkel ist $\cos \vartheta \approx 1$ und $E \approx E_0$. Für sehr große einfallende Photonenenergie $\epsilon_0 \gg 1$ nähert sich E einem Maximalwert, der nur noch vom Streuwinkel abhängt. Der Verhältnis E/E_0 nimmt für einen gegebenen Streuwinkel mit steigender Energie des einfallenden Photons ab. Der differentielle Kollisionswirkungsquerschnitt eines freien Elektrons für die Streuung unpolarisierter Photonen der Energie E_0 unter einem Richtungswinkel ϑ in ein differentielles Raumwinkelelement $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ wird durch die Klein-Nishina-Formel in guter Näherung wiedergegeben

$$d(\epsilon \sigma) = \frac{r_0^2}{2} d\Omega \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - \sin^2 \vartheta \right) \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{Elektron}} \right] \quad (B\ 4)$$

und ist in Abb. B.3 dargestellt. Bei nichtrelativistischen Energien $E_0 \ll 1$ ist der differentielle Wirkungsquerschnitt symmetrisch in bezug auf $\cos \vartheta$. Mit zunehmender Photonenenergie wächst die Asymmetrie der Wirkungsquer-

schnittskurve und der Anteil der Vorwärtsstreuung. Der differentiale Streuwirkungsquerschnitt $d(e\sigma_s)$ bezüglich des Energieinhalts der gestreuten Photonen folgt aus der Beziehung

$$d(e\sigma_s) = \frac{E}{E_0} d(e\sigma) \quad (B 5)$$

Einsetzen von Gl.(B 3) und (B 4) in Gl.(B 5) ergibt den differentialen Streuwirkungsquerschnitt für unpolarisierte Photonenstrahlung als explizite Funktion des Streuwinkels ϑ und der einfallenden Photonenenergie E_0 :

$$d(e\sigma_s) = r_0^2 d\Omega \left(\frac{1 + \cos^2 \vartheta}{2} \right) \cdot \left(\frac{1}{(1 + E_0(1 - \cos \vartheta))^3} \right) \cdot \left(1 + \frac{E_0^2 (1 - \cos \vartheta)^2}{(1 + \cos^2 \vartheta)(1 + E_0(1 - \cos \vartheta))} \right) \quad (B 6)$$

Ein durch Compton-Kollision gestreutes Photon hat einen Energieverlust erfahren, der sein Durchdringungsvermögen herabsetzt. Bei genügender Abschwächung der Energie durch mehrere Streuprozesse kann das Photon schließlich durch den Photoeffekt absorbiert werden.

B.3 Paarbildung

Photonen mit einer Energie > 1.02 MeV können sich im Coulomb-Feld eines Atomkerns in ein Elektron-Positron Paar umwandeln (Abb. B.4). Der Energieüberschuß über das Ruhemassenäquivalent $2 \cdot m_e \cdot c^2 = 2 \cdot 0.51$ MeV erscheint bis auf einen geringen, auf den Kern übertragenen Betrag als kinetische Energie des Teilchenpaares, das sich vorzugsweise in Richtung des eingefallenen Photons bewegt. Paarbildung kann auch im Kraftfeld eines

Hüllenelektrons eintreten; dieser Prozeß hat jedoch eine Schwellenenergie von 2.04 MeV, und die Rückstoßenergie des Hüllenelektrons ist ziemlich groß.

Der Wirkungsquerschnitt für Paarbildung ist etwa proportional zu $(E-1.02)$, E in M_eV , und (z^2+z) , wobei der erste Term die in Kernkraftfeldern, der zweite die in Elektronenkraftfeldern ablaufenden Prozesse erfaßt. Ein theoretischer Ausdruck für σ_{paar} läßt sich nicht in geschlossener Form anschreiben.

Die entstehenden Positronen haben nur eine kurze Lebensdauer und vereinigen sich nach Abbremsung mit einem Elektron. Dabei zerstrahlt die Masse zu zwei 0.51 MeV Photonen (Vernichtungsstrahlung). Wegen der verhältnismäßig geringen Energie dieser Strahlung und ihrer isotropen Verteilung, die den in Richtung des einfallenden Photons fortlaufenden Anteil klein macht, wird für Abschirmrechnungen die Paarbildung als echter Absorptionsprozeß angesehen.

B.4 Gesamtwirkungsquerschnitt

Die Gesamtwahrscheinlichkeit für das Eintreten von Wechselwirkungen zwischen Photonen und Materie ist die Summe der Wahrscheinlichkeiten des Eintritts der Elementarprozesse. Da andere als die drei besprochenen Elementarprozesse nur einen sehr geringen Einfluß auf die Gesamtschwächung haben, kann man in guter Näherung für den Gesamtwirkungsquerschnitt schreiben:

$$\sigma_{\text{ges}} = \sigma_{\text{photo}} + \sigma_s \cdot Z_e + \sigma_{\text{paar}}$$

In Tab. B.1 ist die Energie- und Ordnungszahlabhängigkeit der Elementarprozesse zusammengestellt; die relative Bedeutung der drei Teilwirkungsquerschnitte ist in Abb. B.5 als Funktion der Photonenenergie und der Ordnungszahl dargestellt. Die Kurven stellen die Grenzen dar, auf denen zwei der Teilwirkungsquerschnitte gleich groß sind.

Der makroskopische Wirkungsquerschnitt Σ wird häufig als linearer Absorptionskoeffizient μ (cm^{-1}) bezeichnet. Ergänzend zu Abb. B.5 ist in Abb. B.6 der Verlauf von μ_{Photo} , μ_{Comp} , μ_{Paar} und μ_{ges} qualitativ in Abhängigkeit von der Photonenenergie eingezeichnet und zeigt die funktionale Abhängigkeit von μ_{ges} von der Photonenenergie sowie die Beiträge der elementaren Wechselwirkungsprozesse in den verschiedenen Energiebereichen.

Anhang C: Konzept der kombinatorischen Geometrie zur Behandlung komplexer Strukturen

C.1 Eingabe einer 3-dimensionalen Geometrie in Rechenprogramme

Um komplexe, unsymmetrische 3-dimensionale Strukturen für Rechenprogramme handhabbar zu machen, wurde von Guber et al. (Gu 67) bei der Mathematical Applications Group, Inc., (MAGI) das sogenannte "Combinatorial Geometry Subroutine Package" entwickelt. Dieses Programmsystem gestattet die Komposition nahezu beliebig komplexer 3-dimensionaler Strukturen durch logische Verknüpfung einer nur durch die endliche Rechen- und Speicherkapazität der Rechenanlage begrenzte Zahl von geometrischen Grundkörpern. Es wurde bereits mit einer ganzen Reihe von Rechenprogrammen verknüpft, die eine 3-D Struktur als Eingabe benötigen, z.B. die Monte-Carlo Codes SAM-CE (Co 75 b), MORSE-CG (Co 70), etc. und ist auch in dem Punkt-Kern-Integrationsprogramm QAD-CG-E enthalten, das in der vorliegenden Arbeit intensiv benutzt wurde.

Die zur Verfügung stehenden Grundkörper sind:

- rechtwinkliges Parallelepipid (Quader parallel zu den Koordinatenachsen)
- Quader
- Kugel
- Kreiszyylinder
- elliptischer Zylinder
- Kegelstumpf
- Ellipsoid
- Prisma
- unregelmäßiger Polyeder mit 6 Flächen

Die zu untersuchende Struktur, die aus beliebig vielen Materialien bestehen kann, wird so in Einzelkörper aus dem oben genannten Vorrat zerlegt, daß jede geometrische oder materialbezogene Einzelheit aufgelöst ist. Dabei wird für die Körper je nach Kompliziertheit (einfachste Körper: Kugel, kompliziertester: Polyeder) ein oder mehrere Ortsvektoren aufgestellt, die die Lage des Körpers im Koordinatensystem festlegen.

Weitere Kanten-, Höhen- und Radiusvektoren bestimmen dann Ausdehnung und Raumorientierung des Körpers. Während zur Darstellung des "NDL simple blockhouse" (siehe Beispiel unten) nur 4 Grundkörper benötigt wurden, sind zur Modellierung realer Gebäude mindestens 150 Grundkörper nötig. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit komplexeste Gebilde war das Hochhaus, vor allem wegen der vielen Fenster. Es wurde aus 275 Körpern zusammengesetzt. Hier zeigt sich ein Nachteil der Kombinatorischen Geometrie gegenüber primitiveren Programmen, der zu einem relativ hohen Arbeitsaufwand bei der Eingabe komplexer Geometrien führt: Symmetrieeigenschaften können kaum ausgenutzt werden. Anschließend an die Liste der Körper werden sogenannte "Zonen" definiert, die zum Beispiel mit Materialien korrespondieren, d.h. Listen von Partialdichten chemischer Elemente. Diese Zonen werden durch Verknüpfen der Körper mit den logischen Operatoren $\langle \text{und} \rangle$, $\langle \text{oder} \rangle$ und $\langle \text{nicht} \rangle$ erzeugt. Eine Fehlerquelle für den Anwender ist dabei die Verwechslung des logischen $\langle \text{und} \rangle$ mit dem sprachlichen "und". Die Zone "Luft" bei einem Abschirmproblem setzt sich beispielsweise zusammen aus dem Innenraum "und" (sprachlich) der Umgebungsluft. Logisch formuliert heißt das "Luft ist innen $\langle \text{oder} \rangle$ außen". Andernfalls ergibt die Schnittmenge "innen $\langle \text{und} \rangle$ außen" zweier Körper, die sich nicht überlappen, die leere Menge.

C.2 Beispiel: "NDL simple blockhouse shielding structure"

Als Beispiel dient die zum Nachrechnen des "NDL simple blockhouse shielding experiments" verwendete Struktur nach Abb.4. Bei dieser einfachen Struktur wurde nur der Körpertyp "Rechtwinkliges Parallelepipid" (RPP) verwendet, der durch die Koordinaten von x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max} , z_{\min} und z_{\max} eindeutig beschrieben wird. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt auf dem Boden im Zentrum des Gebäudes. Alle Koordinatenangaben erfolgen in (cm).

Einschließender Körper, um sicherzustellen, daß kein Raumpunkt undefiniert bleibt:

RPP 1 -100000. +100000. -100000. +100000. -100. +10000.

Bodenkörper, der der Region "Erde" zugeordnet wird:

RPP 2 -100000. +100000. -100000. +100000. -100 0.0

Inhalt des Gebäudes:

RPP 3 -182.88 +182.88 -182.88 +182.88 0.0 +243.88

Umhüllende des Gebäudes:

RPP 4 -193.04 +193.04 -193.04 +193.04 0.0 +254.04

Es werden drei Zonen definiert, denen die entsprechenden Partialdichten der chemischen Elemente zugeordnet werden:

Luft: 001 OR +1 -2 -4 OR +3

Erde: 002 +2

Wand: 003 +4 -3

Anhang D: PICTURE-CG, Ein FORTRAN-Programm zur Darstellung beliebig im Raum orientierter Schnitte durch eine 3-dimensionale Struktur über Drucker und Plotter

Zur Überprüfung der korrekten Eingabe einer Abschirmstruktur für das in Anhang C beschriebene "Combinatorial Geometry Subroutine Package" und zum Erzeugen von Vorlagen für das Einzeichnen von Isodosislينien (Kl 81) wurde das Programm PICTURE-CG entwickelt. In der Literatur findet sich die Beschreibung eines Programms PICTURE (Ir 70), das ebenfalls zum Testen von Geometrieangaben dient. Dessen Algorithmus ist allerdings auf ein völlig anderes Geometrie-Paket (GEOM) zugeschnitten und nicht auf die Kombinatorische Geometrie übertragbar. Außerdem leistet PICTURE nur Ausgabe auf einen Schnelldrucker, das Einzeichnen von Isodosislينien ist nicht möglich.

D.1 Programmbeschreibung

Da zu den Abschirmrechnungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Punkt-Kern-Integrationsmethode in Zusammenhang mit der Kombinatorischen Geometrie benutzt wurde, lag der Gedanke nahe, den darin enthaltenen "ray-tracing"-Algorithmus zum Zweck der graphischen Darstellung der Abschirmstruktur zu verwenden. Punkt-Kern-Integration bedeutet, von jedem diskretisierten Quellpunkt zu jedem Detektorpunkt eine Sichtlinie zu ziehen ("ray track") und die dabei durchstoßenen Schichten bezüglich ihrer Dicke und Beschaffenheit zu analysieren.

In PICTURE-CG wird zunächst aus den Eingaben der problembezogenen Koordinaten von diagonal gegenüberliegenden Eckpunkten der gewünschten Schnittfläche sowie zweier konsistenter Richtungsvektoren die rechteckige Schnittfläche konstruiert. Dann werden von der einen Kante zur gegenüberliegenden eine von der gewünschten Auflösung abhängige Zahl von parallelen Strahlen geschickt. Dabei wird für jeden Strahl ein Zeilenvektor mit der Information des Inhalts der durchstoßenen Schicht gefüllt, d.h. die Struk-

tur wird in der gewünschten Schnittfläche zeilenweise abgetastet. Diese Zeilenvektoren können entsprechend verarbeitet auf einem Plotter ausgegeben werden. Standardmäßig wird für das Medium Luft der Zeichenstift abgehoben vom Papier bewegt, für jedes andere gesenkt. Bei der Ausgabe auf Schnelldrucker geschieht die Abtastung in Spalten von 130 Zeichen Breite, falls das Bild aufgrund des gewählten Maßstabs breiter ist als die Papierbahn. Ein besonderer Rundungsalgorithmus verhindert die Akkumulation von Rundungsfehlern bei der Zuordnung der Schichtdicken zu den Druckerstellen auf dem Papier. Die Ausgabe auf Plotter eignet sich besonders zum Einzeichnen von Isodosislينien, während die Ausgabe auf Schnelldrucker mit der zusätzlichen Information der Zonennummer der Kombinatorischen Geometrie an der entsprechenden Stelle für schnelle Geometrietests geeignet ist.

D.2 Eingabebeschreibung

Die Eingabe für PICTURE-CG besteht zunächst in der Beschreibung des Systems gemäß den Regeln der Kombinatorischen Geometrie, wie sie für die Abschirmrechnung mit QAD-CG-E benutzt wird. Die weitere spezielle Eingabe für PICTURE-CG wird damit verkettet. Für PICTURE-CG existieren zwei kartesische Koordinatensysteme: Ein dreidimensionales problembezogenes x,y,z System und ein zweidimensionales u,v System auf der Zeichenebene. Das u,v System ist so orientiert, daß u in Richtung des Papiertransports und v senkrecht dazu von links nach rechts zeigt. Der Bildaufbau zur Druckerausgabe unterscheidet sich deutlich von der zur Plotterausgabe, da bei der Druckerausgabe wegen der begrenzten Auflösung von 130 Druckstellen pro Zeile eine Aufteilung des Bildes in mehrere Spalten (Streifen) vorgesehen ist, während bei der Plotterausgabe ein Faktor die Größe des Bildes nahezu unabhängig von der Auflösung bestimmt (bei dem Größenverhältnis zwischen einem Gebäude und der Zeichenfläche). Daher existiert PICTURE-CG in verschiedenen Versionen je nach Ausgabeart, die jedoch beide in gleicher Weise auf Routinen der Kombinatorischen Geometrie zugreifen.

Für die Plotterversion beginnt die PICTURE-CG spezifische Eingabe mit je einem Datensatz

IPT	(freies Format, integer, Kennzahl für den Plottertyp, Standard:3)
FACTOR	(freies Format, real, Größe des Bildes in V-Richtung, die Größe in U-Richtung wird automatisch so bestimmt, daß ein maßstabsgerechtes Bild entsteht)

Bei Ausgabe auf Drucker entfallen diese beiden Datensätze.

Die nächsten 3 Datensätze sind gleich für beide Versionen:

-1 Ø	beliebiger Text	(Format 2I2, 76A1, programminterne Kennzahlen, liegen in Zusammenhang mit QAD-CG-E fest)				
XO	YO	ZO	XU	YU	ZU	(Format 6E10.5, "linke obere" und "rechte untere" Ecke der Schnittfläche in Problemkoordinaten (cm))
UX	UY	UZ	VX	VY	VZ	(Format 6E10.5, Richtungsvektoren in U- und V-Richtung)

Der letzte Datensatz kontrolliert die Auflösung:

Plotterversion:

DELU	(Format E10.5, Auflösung des Bildes in U-Richtung in (cm); d.h. alle DELU-cm wird ein Strahl durch die Struktur gezogen)
------	--

Druckerversion:

NV	(Format 5X,I5, Anzahl der Druckspalten, falls ≥ 130 wird das Bild in mehrere Streifen aufgeteilt; die Anzahl der Druckzeilen wird automatisch so bestimmt, daß ein in etwa maßstäbliches Bild entsteht.)
----	---

D.3 Beispiel: Horizontaler Schnitt durch ein Einfamilienhaus

Abb. D.1 zeigt als Beispiel einer mit PICTURE-CG erzeugten Zeichnung einen horizontalen Schnitt durch ein Einfamilienhaus (Typ 2 in Abb.5). Bei dieser Struktur liegt der Koordinatenursprung in der Mitte des Gebäudes auf dem Boden des Kellers. Die Eingabe für PICTURE-CG, die dieses Bild erzeugte, war:

```
3
16.
-1  0          EF-Haus
-1100.  +1100.  +331.  +1100.  -1100.  +331.
  1.0    0.0    0.0    0.0    1.0    0.0
  2.0
```

Während des Umsetzens des Bauplanes in die Eingabe der Kombinatorischen Geometrie war diese Testmöglichkeit sehr nützlich.

Literatur

- Ah 79 Ahmed, A.A.: Untersuchungen zur Aerosoldeposition an Oberflächen, Diss. Universität Gießen, 1979.
- Ba 82 Bayer, A.; Burkart, K.; Ehrhardt, J.; Hübschmann, W.; Schückler, M.; Vogt, S.; Jacobi, W.; Paretzke, H.G.; Trott, K.-R.; Hofer, E.; Krzykacz, B.: The German Risk Study: Accident Consequence Model and Results of the Study
Nuclear Technology, 59 (1982), pp. 20-50
- Br 71 Bramlitt, E.T.; Eisenhauer, C.M.: A Discussion and Tabulation of the Data Used to Construct the Charts in the OCD Standard Method for Fallout Gamma Radiation Shielding Analysis
Report TR 70, Office of Civil Defense, 1971.
- Bu 75 Burson, Z.G.; Profio, A.E.: Structure Shielding from Cloud and Fallout Gamma Ray Sources for Assessing the Consequences of Reactor Accidents.
Report EGG-1183-1670, 1975
- Bu 77a Burson, Z.G.; Profio, A.E.: Structure Shielding in Reactor Accidents
Health Physics, 33 (1977), pp.287-299
- Bu 77b Der Bundesminister des Innern
Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen, Bonn (1977).
Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 31, pp 683-718
- Bu 81 Der Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.):
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 8:
Unfallfolgenrechnungen und Risikoergebnisse.
Verlag TÜV Rheinland, 1981.

- Bu 82 Der Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau
(Hrsg.): Der Wohnungsbau 1981, sowie Anmerkung zur Entwicklung
des sozialen Wohnungsbaus im Jahre 1981
Bundesbaublatt 30 (1982), Heft 12
- Ca 77 Cain, V.R.: A Users Manual for QAD-CG, the Combinatorial Geometry
Version of the QAD-P5A Point Kernel Shielding Code
Bechtel Computer Code NE 007
Bechtel Power Corporation, Gaithersburg, Maryland RSIC-CCC 307,
1977
- Ch 53 Chamberlain, A.C.: Aspects of Travel and Deposition of Aerosol
and Vapor Clouds
Report AERE-HP/R-1261, 1953
- Ch 84 Chilton, A.B.; Shultis, J.K.; Faw, R.E.: Principles of Radiation
Shielding
Prentice Hall, 1984
- Co 75a Cohen, M.O.: Protection Afforded by Towns against Fallout from
Tactical Nuclear Weapons
Mathematical Appl. Group Inc.
Report DNA 3858F, 1975
- Co 75b Cohen, M.O.; Troubetzkoy, E.S.; Lichtenstein, H.; Steinberg, H.;
Beer, M.: SAM-CE, A Three Dimensional Monte-Carlo Code for the
Solution of the Forward Neutron and Forward and Adjoint Gamma Ray
Transport Equations, Revision D
Report AD-A035 864/85L; NR: MR-7021-Rev D, 1975
- Di 72 Dimitrijević, C.: Praktische Berechnung der Abschirmung von
radioaktiver und Röntgen-Strahlung
Verlag Chemie, 1972

- Do 84 Dorner, R.; Vogt, H.-G.: Universität Hannover, persönliche Mitteilung, 1984
- Ei 64 Eisenhauer, C.: An Engineering Method for Calculating Protection Afforded by Structures Against Fallout Radiation
NBS Monograph 76, 1964
- Er 79 Erdtmann, G.; Soyka, W.: The Gamma Rays of the Radionuclides
Verlag Chemie, 1979
- Fa 59 Fano, U.; Spencer, L.V.; Berger, M.J.: Penetration and Diffusion of X-Rays
in Flügge, S. (Hrsg.): Handbuch der Physik, Band 38/2, Neutronen und verwandte Gammastrahlprobleme, Springer 1959.
- Fr 84 Friedlein, H.P.; Hehn, G.: Universität Stuttgart, persönliche Mitteilung, 1984
- Go 54 Goldstein, H.; Wilkins jr, J.E.: Calculations of the Penetration of Gamma Rays
Report NYO 3075, 1954.
- Gr 45 Gregory, P.H.: The Dispersion of Airborne Spores
Trans. British Mycological Society 28 (1945) (Parts I and II)
pp.26-72.
- Gr 78 Grimesey, R.A.; McCracken, R.T.: Loft Gamma Densitometer Background Fluxes
Loft Technical Report LTR 141-70
- Gu 67 Guber, W. et al.: A Geometric Description Technique Suitable for Computer Analysis of Both the Nuclear and Conventional Vulnerability of Armored Military Vehicles
Report MAG1-6701, 1967.
- He 63 Hehn, G.: Das Strahlungsfeld des Reaktors
Thiemig Taschenbuch Bd. 22, 1963

- He 81 Heide, R.; Henning, U.; Volwahren, A.: Einsparpotential von Heizenergie in den Wohngebäuden Baden-Württembergs
Forsch. Gemeinschaft Bauen und Wohnen
Bericht FBW Nr. 134, 1981 + Anhang Gebäudedaten
- He 85 Hedemann Jensen, P.: Shielding Factors for Gamma Radiation from Activity Deposited on Structures and Ground Surfaces
Nucl. Technology 68 (1985), pp. 29-39
- Ho 76 Horbert, M.; Vogt, K.-J.; Angeletti, L.: Untersuchungen zur Ablagerung von Aerosolen auf Vegetation und anderen Grenzflächen
Bericht Jül-1288, 1976.
- Ir 70 Irving, D.C.; Morrison, G.W.: PICTURE, An Aid in Debugging GEOM Input Data
Report ORNL-TM-2892, 1970
- Ja 60 Jaeger, Th.: Grundzüge der Strahlenschutztechnik
Springer 1960
- Ja 70 Jaeger, R.G.; Blizard, E.P.; Chilton, A.B.; Grotenhuis, M.; Hömig, A.; Jaeger, Th.A.; Eisenlohr, H.H. (Ed): Engineering Compendium on Radiation Shielding
Vol. I: Shielding Fundamentals and Methods
Vol. II: Shielding Materials
Vol. III: Shield Design and Engineering
Springer 1970
- Jo 79 Jonas, R.: Statusbericht über die Feldversuche zur Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit von Aerosolen
Zentralabteilung für Strahlenschutz der KFA Jülich
ZST-Bericht Nr. 295, 1979
- Jo 82 Jonas, R.; Vogt, K.J.: Untersuchungen zur Ermittlung der Ablagerungsgeschwindigkeit von Aerosolen auf Vegetation und anderen Probenahme Flächen
Bericht Jül-1780, 1982

- Jo 84 Jonas, R.: Ablagerung und Bindung von Luftverunreinigungen an Vegetation und anderen atmosphärischen Grenzflächen
Bericht Jül-1949, 1984
- Kl 81 Kleinheins, S.: Persönliche Mitteilung, 1981
- Lu 64 Lumley, J.L.; Panofsky, H.A.: The Structure of Atmospheric Turbulence, New York, Interscience-Wiley, 1964
- Me 82 Meroney, R.N.: Turbulent Diffusion near Buildings
in: Plate, E. (Ed.): Engineering Meteorology, Elsevier, 1982
- Oc 67 Office of Civil Defense, U.S. Dept. of Defense (Ed.): Shelter design and analysis - fallout radiation shielding
Report TR-20, Vol. 1, 1967, Change 1 (1969), Change 2 (1970), Change 3 (1974)
- Pe 80 Pernpeintner, A.: Experimentelle Untersuchungen zur Ausbreitung von Schadstoffen in der Umgebung von Bauwerken
Fortschrittsberichte der VDI Zeitschriften, Reihe Umwelttechnik (15) Nr. 15, 1980
- Pr 79 Profio, A.E.: Radiation Shielding and Dosimetry, Wiley-Interscience, 1979
- Ra 78 Radiation Shielding Information Center (Ed.): VITAMIN-C, 171 Neutron, 36 Gamma-ray Group Cross-Sections in AMPX and CCC Interface Formats for Fusion and LMFBR Neutronics, ORNL, Report DLC-41, 1978
- Re 64 Rexroad, R.E.; Schmoke M.A.; Tiller, H.J.; Foderaro, A.; Degelman, L; Kowal, G.:
Point-to-Point Kernel Analysis of an Experiment to Determine Wall Penetration of a Squarebased Concrete Structure by Gamma Radiation
Nucl. Science and Eng. 20 (1964), pp. 66-79

- Rh 73 Rhoades, W.A.; Mynatt, F.R.: The DOT Two-dimensional Discrete Ordinate Transport Code
Report ONRL-TM-4280, 1973
- Rh 82 Rhoades, W.A.; Childs, R.L.: An updated Version of the DOT 4 One- and Two-dimensional Neutron/Photon Transport Code
Report ONRL-5851, 1982
- Ro 81 Roed, J.: Undersøgelse af overfladedeposering med henblik på beregning af deponeringen af luftbæret materiale frigjort ved kernenedsmeltning i kraftreaktorer
Risø-M-2274, 1981
Übersetzt aus dem Dänischen von H. Bokelund, bearbeitet von O. Graf: Untersuchung und Berechnung der Oberflächenablagerung von luftgetragendem Material, das nach einem Kernschmelzen in einem Kernkraftwerk freigesetzt wird
Bericht KfK-tr-698
- Sch 78 Schückler, M.: Persönliche Mitteilung, 1978
- Se 73 Sehmel, G.A.: Particle Eddy Diffusivities and Deposition Velocities for Isothermal Flow and Smooth Surfaces
Aerosol Science 4, (1973) 125-138;
- Se 80 Sehmel, G.A.: Particle and Gas Dry Deposition:
A Review. Atmospheric Environment 14 (1980), pp. 983-1011
- Sp 62 Spencer, L.V.: Structure Shielding against Fallout Radiation from Nuclear Weapons
NBS Monograph 42, 1962
- Sp 80 Spencer, L.V.; Chilton, A.B.; Eisenhauer, C.M.: Structure Shielding Against Fallout Gamma Rays from Nuclear Detonations
NBS Special Publication 570, 1980
- St 67 Storm, E.; Israel, H.J.: Photon Cross Sections from 0.001 to 100 MeV for Elements 1 through 100
Report LA-3755, 1967

- St 70 Straker, E.A.; Stevens, P.N.; Irving, D.C.; Cain, V.R.: The MORSE Code - A Multigroup Neutron and Gamma-Ray Monte Carlo Transport Code
Report ORNL 4585, 1970
- St 72 Statistisches Bundesamt: Gebäude und Wohnungszählung vom 25. Oktober 1968, Heft 4: Gebäude und Wohnungen nach Baualter, Größe und Ausstattung
Verlag Kohlhammer 1972
- St 75 Statistisches Bundesamt: 1% Wohnungsstichprobe 1972, Heft 2: Gebäude, Wohnungen
Verlag Kohlhammer 1975
- St 78 Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: 1% Wohnungsstichprobe 1978, Drucksache Nr. 3, Gebäudebogen
Stuttgart 1978
- St 83 Statistisches Bundesamt: 1% Wohnungsstichprobe 1978
Teil 1: Gebäude und Wohneinheiten
Selbstverlag, 1983.
- Un 84 Underwood, B.Y.; Cooper, P.J.; Holloway, N.J.; Kaiser, G.D.; Nixon, W.: Review of Specific Effects in Atmospheric Dispersion Calculations
CEC-Report EUR-8935 EN, 1984
- US 75 U.S. Nuclear Regulatory Commission: Reactor Safety Study, Appendix VI: Calculation of Reactor Accident Consequences
Report WASH-1400 (NUREG 75 (014)), 1975
- Wo 82 Wood, J.: Computational Methods in Reactor Shielding
Pergamon Press 1982

Tab. 1: Ablagerungsgeschwindigkeiten für verschiedene
Dach- und Wandmaterialien (nach Ro 81)

Oberfläche	mittlere Ablagerungs- geschwindigkeit v_d (cm/s)
Dachmaterialien:	
rote Ziegel	0.25
glasierte Ziegel, Zement- dachsteine	0.10
Schiefer, Wellen eternit	0.05
Eternit	0.01
Wandmaterialien:	
gelbe Ziegelsteinmauer	0.02
geputzte Mauer	0.04

Tab. 2: Gammalinien und Spektren für J-131, Cs-137 und La-140
(nach Er 79) in VITAMIN-C Gruppenstruktur. Es werden
nur Linien mit einer Intensität >1% berücksichtigt.

Nuklid	Energie (MeV)	Intensität (%)	Spektrum [†] (MeV)	Gruppe
J-131	0.02946	1.35	1.17 E-3	35
	0.02978	2.59		
	0.08018	2.62	2.10 E-3	31
	0.28429	6.06	1.72 E-2	28
	0.36448	81.24	2.96 E-1	27
	0.63697	7.27	4.63 E-2	22
	0.72289	1.80	1.30 E-2	21
Cs-137/ Ba-137m	0.03182	2.70	2.30 E-3	32
	0.03219	3.82		
	0.03640	1.14		
	0.66162	90.00	5.96 E-1	22
La-140	0.32875	18.50	6.08 E-2	27
	0.43255	2.98	1.29 E-2	26
	0.48703	43.00	2.09 E-1	25
	0.75179	4.19	3.15 E-2	21
	0.81580	22.32	3.17 E-1	20
	0.86786	5.36		
	0.91960	2.61		
	0.92525	6.92		
	1.59620	95.47	1.52 E+0	17
	2.52183	3.43	8.65 E-2	14

[†]Spektrum = Energie x Intensität

Tab. 3: Verhältnis der mit DOT 4.2 errechneten Dosisleistungen und Abschirmfaktoren zu den mit QAD-CG-E errechneten für ein "Standardhaus" mit Dach und Bodenkontamination durch J-131, Cs-137 und La-140

Nuklid		Verhältnis		
		J-131	Cs-137	La-140
$\frac{\text{DOT4.2}}{\text{QAD-CG-E}}$				
bzgl. Dosisleistung im	Erdgeschoß	0.63	0.70	0.63
	Keller	1.54	1.41	1.20
bzgl. Referenzdosisleistung		0.90	0.96	0.81
bzgl. Abschirmfaktor im	Erdgeschoß	0.70	0.80	0.79
	Keller	1.71	1.62	1.49

Tab. 4: Vergleich von Dosisleistungen, die mit dem verbesserten Verfahren (QAD-CG-E + Korrektur) und mit Monte-Carlo (SAM-CE) für das "Standardhaus" n. Abb. 3 und für ein Hochhaus n. Abb.10 berechnet wurden

Kontamination: 1 TBq/m ² Cs-137	QAD-CG-E + Korrektur	SAM-CE	Verhältnis QAD-CG-E/SAM-CE
<u>"Standardhaus"</u>			
Dosisleistung im Erdgeschoß			
Kont. d. Daches und d. umg. Erdbodens im Umkreis von r=300 m	6.04 E+4	4.39 E+4	1.38
Kontamination der Wände	1.23 E+4	1.14 E+4	1.08
<hr/>			
Dosisleistung im Keller			
Kont. d Daches und des umg. Erdbodens	1.21 E+3	9.27 E+2	1.31
Kontamination der Wände	8.69 E+1	9.80 E+1	0.89
<hr/>			
<u>Hochhaus, Det. 10</u> (s. Abb. 10)			
Kontamination des Daches	3.04 E+3	2.95 E+3	1.03
Kontamination der Wände	4.68 E+3	6.52 E+3	0.72













Tab. 5: Verhältnis der für das "NDL - simple blockhouse shielding experiment" mit QAD-CG-E berechneten Dosisleistungen zu den gemessenen für drei Detektorpositionen und zwei Wandstärken, Werte in () ohne Korrektur

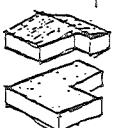
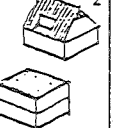
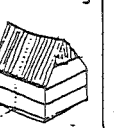
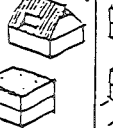
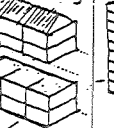
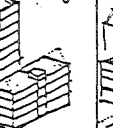
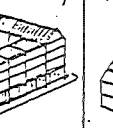
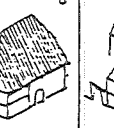
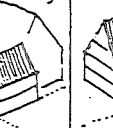
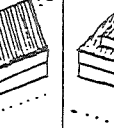
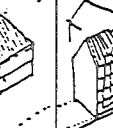
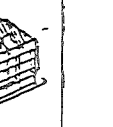
Detektorhöhe (m)	Wandstärke (cm)	
	10.16	29.53
0.0	(1.64) 1.31	(1.40) 1.12
0.91 ($\hat{=}$ 3 ft)	(1.07) 0.86	(1.27) 1.00
1.83 ($\hat{=}$ 6 ft)	(1.17) 0.94	(1.56) 1.24

Tab. 6: Anzahl der Wohngebäude aufgeschlüsselt nach Zahl der Wohnungen bzw. landwirtschaftlichen Wohngebäuden und Gemeindegrößenklassen (GGK), Stand 1978

Wohngebäude	Gemeindegrößenklasse		
	GGK I	GGK II	GGK III
- mit 1 Wohnung	2 633 000	1 749 250	962 550
- mit 2 Wohnungen	1 108 200	925 200	472 700
- mit 3 und mehr Wohnungen	323 600	637 050	967 350
landwirtschaftliche Wohngebäude	357 200	94 900	18 900
zusammen	4 072 700	3 314 400	2 411 500

Tab. 7: Zuordnungsmatrizen der statistischen Gebäudedaten zu den Gebäudetypenhäufigkeiten der drei Gemeindegrößenklassen (GGK I bis III)

Gebäudetyp													insgesamt
	Einzelhaus	Einfamilienhaus	Doppelhaus	Fertighaus	Reihenhäuser	Mehrstöcker/Hochhaus	Karobehäuser	Hof	Hof im Innenbereich	öffentl. Wohn- und Geschäftshaus	Villa	Gründerzeitblockbebauung	
GGK I													
Gebäude mit 1 Wohnung	-	.453	-	.054	.046	-	-	-	.447	-	-	-	1
Gebäude mit 2 Wohnungen	-	-	.794	.022	-	-	-	-	.184	-	-	-	1
Gebäude mit 3 u. mehr Wohnungen	-	-	-	-	-	.252	.038	-	.370	.088	.252	-	1
landwirtschaftl. Gebäude	-	-	-	-	-	-	-	.912	.088	-	-	-	1
GGK II													
Gebäude mit 1 Wohnung	.019	.616	-	.074	.095	-	-	-	.196	-	-	-	1
Gebäude mit 2 Wohnungen	-	-	.931	.057	-	-	-	-	.012	-	-	-	1
Gebäude mit 3 u. mehr Wohnungen	-	-	-	-	-	.312	.052	-	.168	.208	.260	-	1
landwirtschaftl. Gebäude	-	-	-	-	-	-	-	.699	.301	-	-	-	1
GGK III													
Gebäude mit 1 Wohnung	.063	.413	-	.052	.273	-	-	-	.181	-	-	-	1
Gebäude mit 2 Wohnungen	-	-	.954	.032	-	-	-	-	.014	-	-	-	1
Gebäude mit 3 u. mehr Wohnungen	-	-	-	-	-	.494	.142	-	.002	-	.100	.262	1
landwirtschaftl. Gebäude	-	-	-	-	-	-	-	.510	.490	-	-	-	1

	 1	 2	 3	 4	 5	 6	 7	 8	 9	 10	 11	 12
	Bungalow	Einfamilienhaus	Doppelhaus	Fertighaus	Reihenhaus	Mehrspanner/ Bochhaus	Kernbebauung	Hof	Hof im Innenbereich	dörf. Wohn- und Geschäfts- haus	Villa	Gründerzeit- blockbebauung
GGK I	-	1192749	879911	166562	121118	81547	12297	325766	1532025	28477	81547	-
GGK II	33236	1077538	861361	182181	166179	198760	33127	66335	489545	132506	165633	-
GGK III	60641	414859	450956	65179	262776	477871	137364	9639	192035	-	96735	253446
insgesamt	93877	2685146	2192228	413922	550073	758178	182788	401740	2213605	160983	343915	253446
0/0	0.9	26.2	21.4	4.0	5.4	7.4	1.8	3.9	21.6	1.6	3.4	2.5

Tab. 8: Anzahl der Wohngebäude in den Typ- und Gemeindegrößenklassen und die Häufigkeitsverteilung für das gesamte Bundesgebiet

Tab. 9: Dosisleistungen und Abschirmfaktoren für eine ungünstige (Fall 1) und eine günstige Position (Fall 2) im Freien in einer Stadtlandschaft, die mit einer Normkontamination von 1 TBq/m² Cs-137 (\approx 27 Ci/m²) belegt ist

	Fall 1	Fall 2
Dosisleistung (mrem/h)	2.56 E+5	1.05 E+5
Referenzdosisleistung (mrem/h)		2.86 E+5
Abschirmfaktor	0.89	0.37

Tab.10: Repräsentative Abschirmfaktoren für 12 Gebäudetypen

Nr.	Typ	Wohnungen je Gebäude (mittel)	Häufigkeit		Abschirmfaktoren bei Boden- und Dachkontamination ⁺
			des Gebäudetyps	d. Wohn. in jew. Gebäudetyp	
1	Bungalow	1	.009	.002	0.31
2	Einfamilien- haus	1	.262	.045	DG 0.17, EG 0.04, Keller 0.002
3	Doppelhaus	3	.214	.111	EG 0.09, OG 0.16 ⁺⁺ Fenster 0.12
4	Fertigteilm- haus	2.5	.040	.017	DG 0.31, EG 0.13 Fenster 0.24 Keller 0.007
5	Reihenhaus	1	.054	.009	DG 0.007, EG 0.005
6	Mehrspänner, Hochhaus	53	.074	.676	1 St: 0.005 - 0.03 4.St: 0.003 - 0.03 8.St: 0.014 - 0.037
7	Kernbebauung	7.5	.018	.023	0.01
8	Hof	1	.039	.007	0.15
9	Hof im Innen- bereich	1	.216	.037	0.12
10	dörfliches Wohnhaus	10.5	.016	.029	EG: 0.03 - 0.15 OG: 0.06 - 0.10
11	Villa	3	.034	.018	0.12
12	Gründerzeit- blockbebauung	6	.025	.026	0.01

⁺ Detektor 1 m über jew. Etagenboden, mindestens 1 m Abstand zu Fenster oder Wand.

Quelle: Cs-137, $E_{\text{gamma}} = 0.661 \text{ MeV}$, $I = 90\%$

Bei Haustyp 6,7,10 und 12 auch Kontamination der Außenwände berücksichtigt
(liefert bei diesen Typen z.T. überwiegenden Dosisbeitrag).

⁺⁺ EG = Erdgeschoß, OG = Obergeschoß, DG = Dachgeschoß, St = Stockwerk

Tab.11: Abschirmfaktoren für das "Standardhaus" nach Abb. 3 für die Nuklide J-131, Cs-137/Ba-137m und La-140

	J-131	Cs-137	La-140
Erdgeschoß	0.191	0.263	0.301
Keller	0.0012	0.0025	0.0040
außerhalb (5 m von der Hauswand entfernt)	0.918	0.894	0.909

Tab.12: Gegenüberstellung der reziproken Schutzfaktoren aus den "Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz ..." (Bu 77b) und der Abschirmfaktoren der vorliegenden Arbeit

Detektorposition	"Rahmenempfehlung für den Katastrophenschutz ..."	im Rahmen der vorliegenden Arbeit berechnet
<p>"mittig gelegene Räume" in oberen Stockwerken von mehrstöckigen Gebäuden in Massivbauweise</p>	<p>0.004 - 0.02</p>	<p>0.003 - 0.03</p>
<p>Keller ohne ungeschützte Wände in 1 bis 2-stöckigen Gebäuden</p>		<p>Keller 0.002-0.007</p>
<p>"mittig gelegene Räume" in mehrstöckigen Gebäuden in Leichtbauweise</p>	<p>0.02 - 0.1</p>	<p>0.03 - 0.1</p>
<p>"mittig gelegene Räume" im Erdgeschoß von 1 bis 2-stöckigen Gebäuden in Massivbauweise</p>	<p>0.1 - 0.5</p>	<p>0.04 - 0.17</p>
<p>Räume über Erdniveau in leichten Wohnbauten</p>	<p>> 0.5</p>	<p>0.13 - 0.3 unter besonders ungünstigen Bedingungen bis 0.6</p>

Tab.13: Gegenüberstellung von Abschirmfaktoren aus Fallout-Messungen und Abschirmfaktoren der vorliegenden Arbeit

Detektorposition	Fallout Messungen (aus Bu 75)	vorliegende Arbeit
1 m über einer 15 m breite Straße	0.55 (0.4 - 0.6)	0.37
ein- und zweistöckiges Holzhaus (≙Fertigteilhaus)	0.4 (0.2 - 0.5)	0.29 (0.13 - 0.61)
ein- und zweistöckiges Haus in Massivbauweise	0.2 (0.04 - 0.4)	0.1 (0.04 - 0.17)
Keller	0.03 (0.02 - 0.05)	0.007 (0.002 - 0.01)
Hochhäuser: Erdgeschoß	0.05 (0.01 - 0.08)	0.01 (0.005 - 0.03)
Hochhäuser: obere Stockwerke aber nicht oberstes	0.01 (0.001 - 0.02)	0.01 (0.003 - 0.03)

Tab. B.1: Funktionale Abhängigkeit der Elementarprozesse von der Energie E der Photonen und der Ordnungszahl z des Abschirmmediums (nach Wo 82)

Wechselwirkungs- prozeß	E-Abhängigkeit	z-Abhängigkeit
Photoeffekt	$1/E$ für $E > 0.5$ MeV $1/E^3$ für $E < 0.5$ MeV	$z^{4.5}$
Comptoneffekt	$1/E$	z
Paarbildung	E für $4 < E < 10$ MeV	z^2 oder z

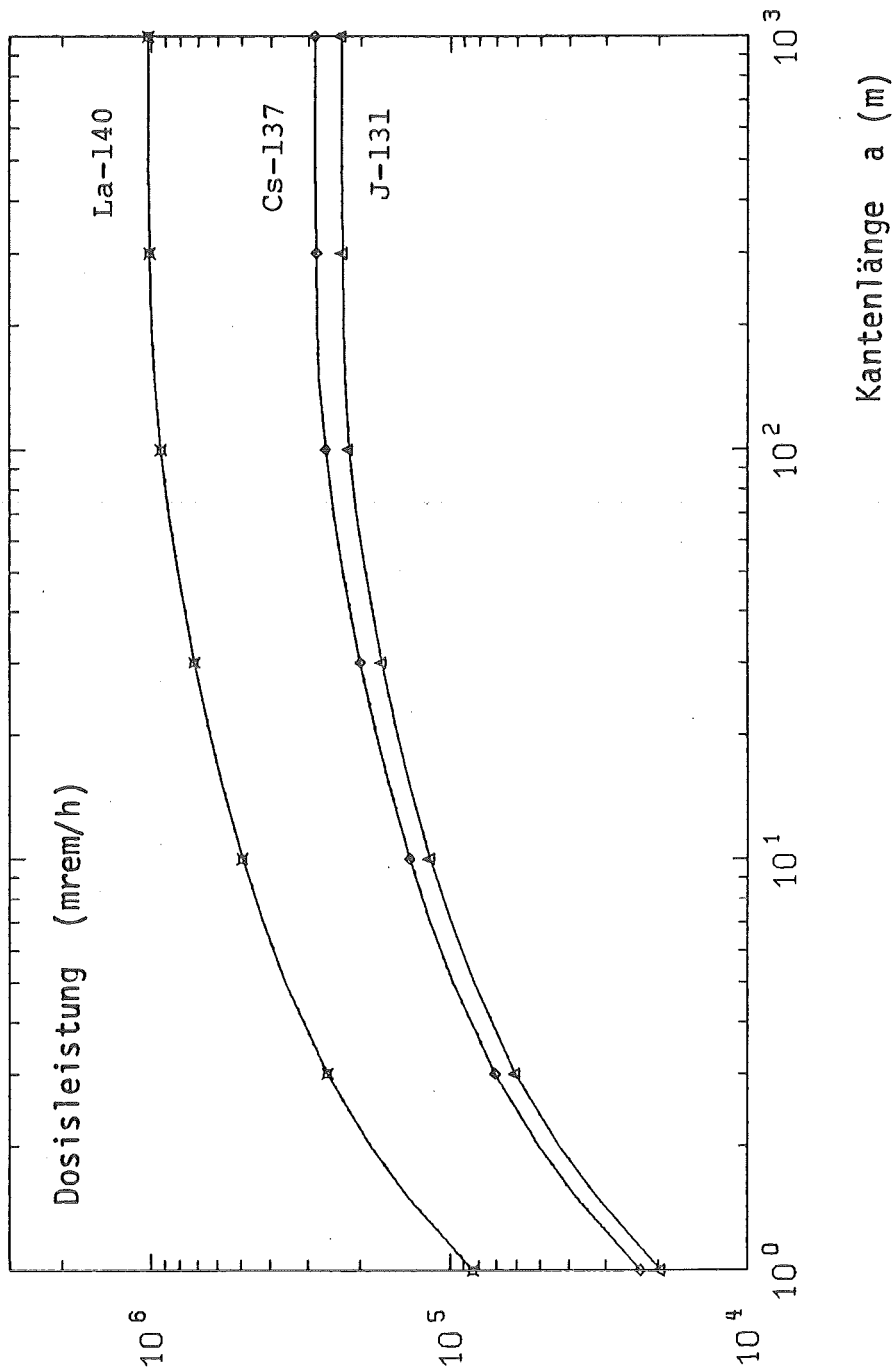
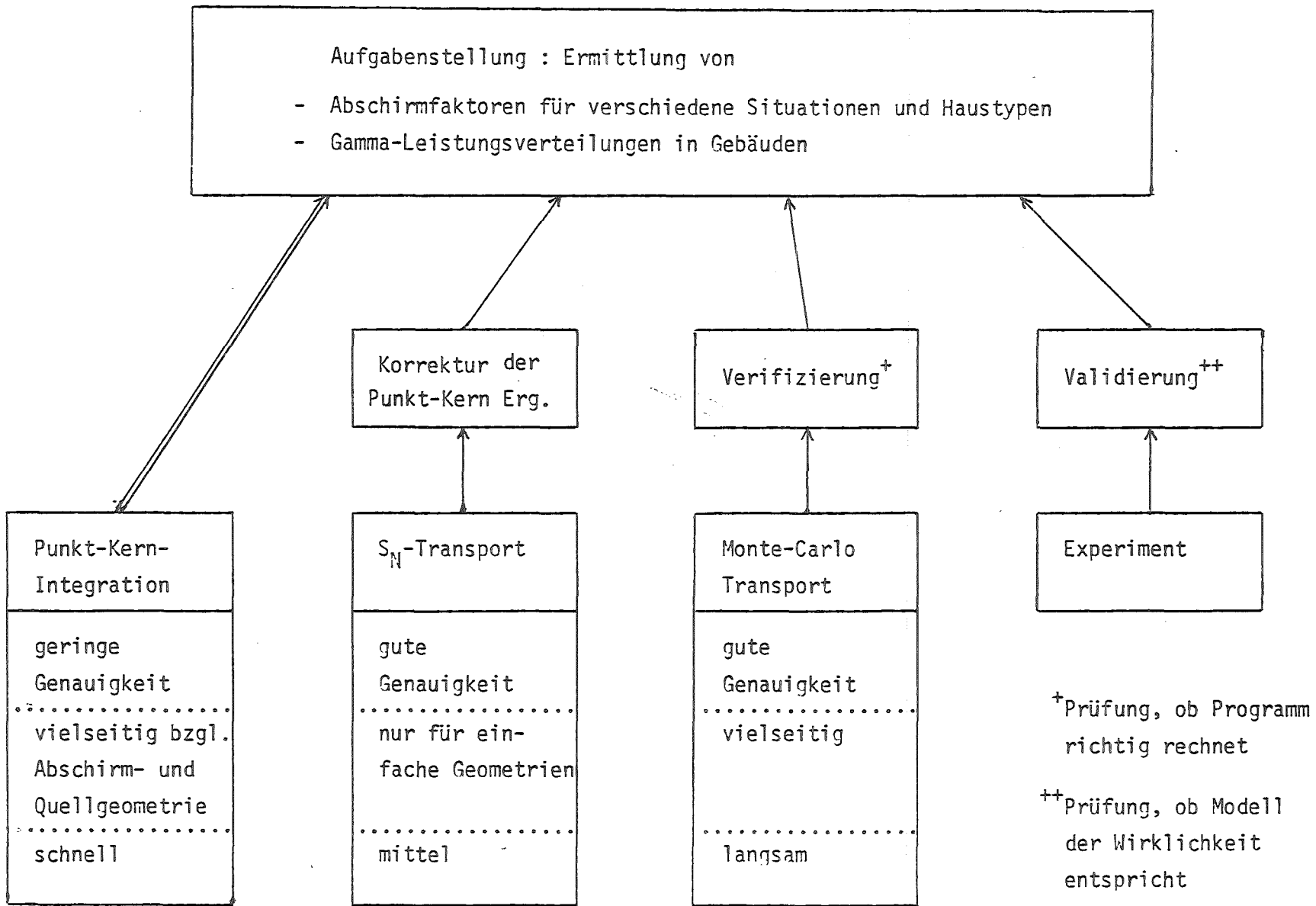
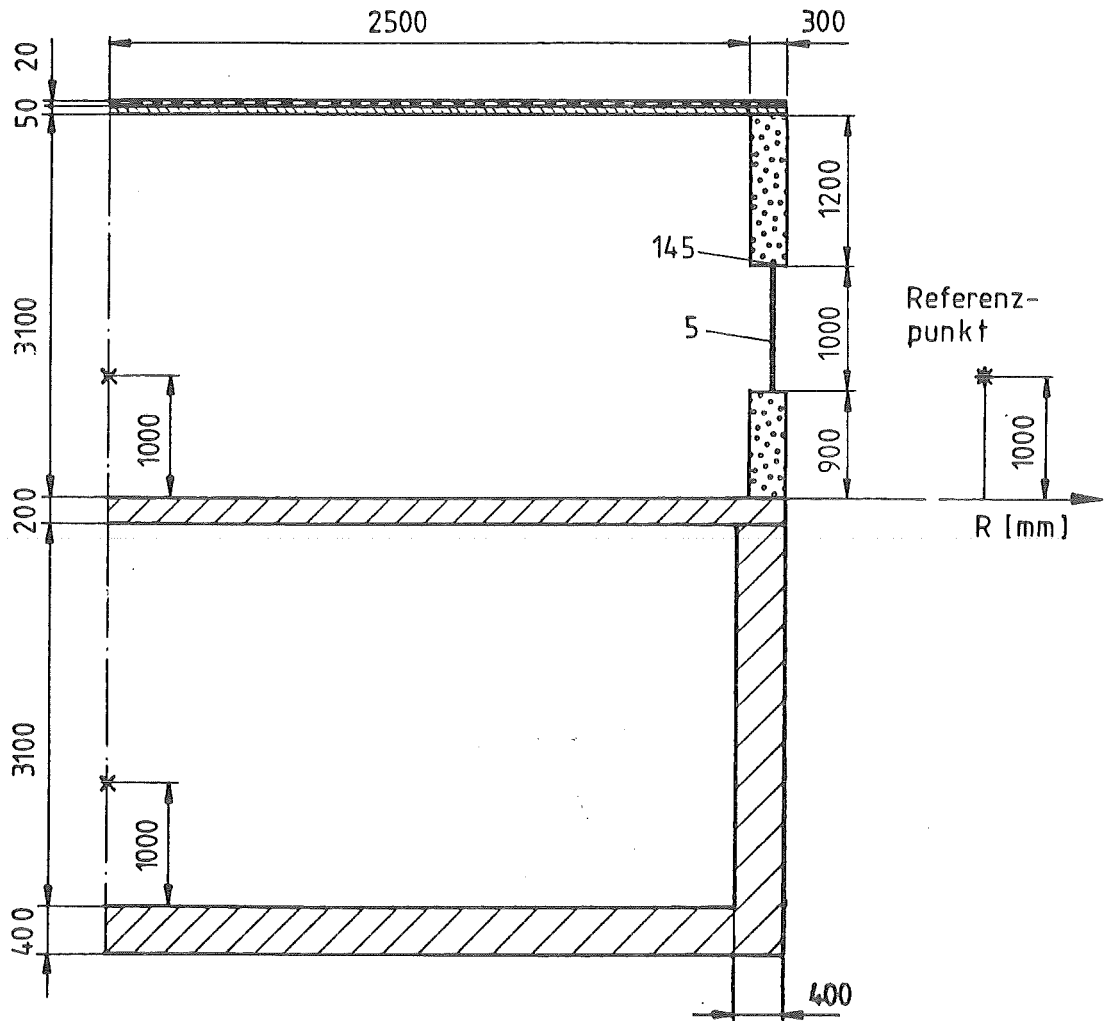


Abb. 1: Dosisleistung in 1 m Höhe über einer quadratischen, ideal glatten Fläche in Abhängigkeit von der Kantenlänge a für eine Kontamination dieser Fläche mit 1 TBq/m^2 durch die Nuklide J-131, Cs-137 und La-140

Abb. 2: Vorgehensweise zur Berechnung von Abschirmfaktoren (schematisch)













- | | |
|---|--|
|  Beton |  Erdreich |
|  Ziegelmauer |  Luft |
|  Dachziegel |  Detektorpunkte |
|  Holz |  Glas |

Abb. 3: "Standardhaus" für Vergleichsrechnungen zur Ableitung von Korrekturfaktoren

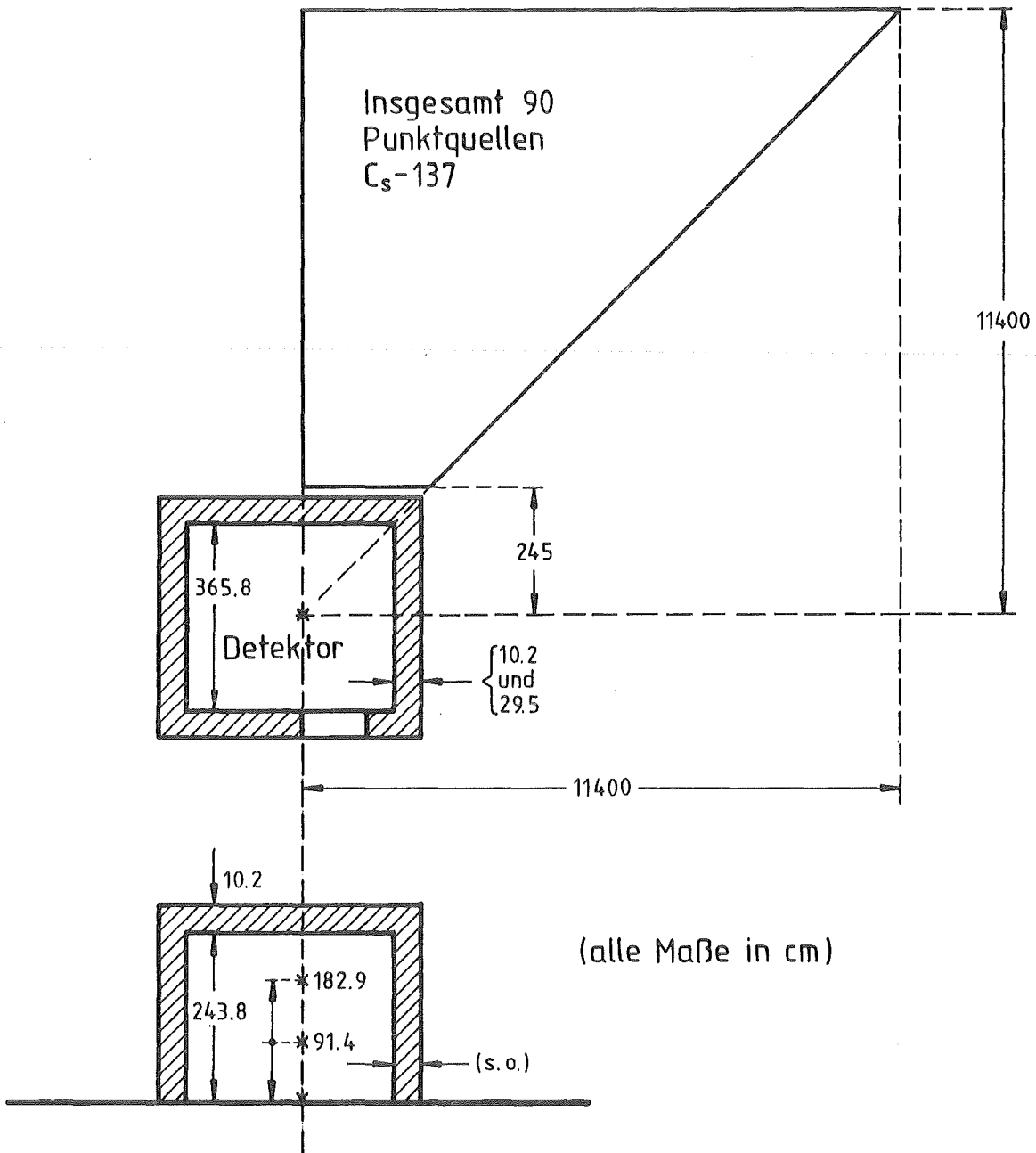


Abb. 4: Anordnung von Abschirmung und Gammaquelle beim "NDL-Simple Blockhouse Shielding Experiment" (Re 64, Sp 80)

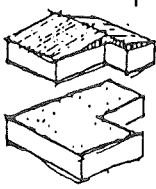
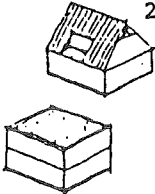
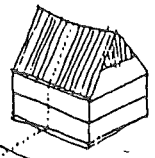
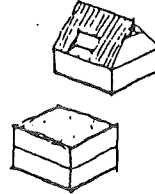
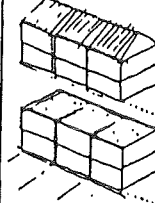
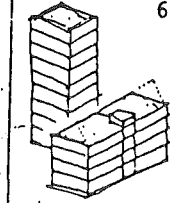
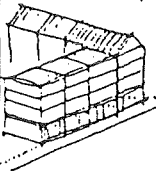
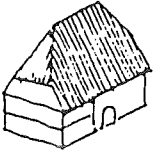
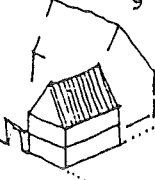
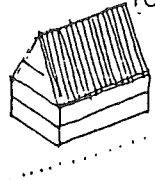
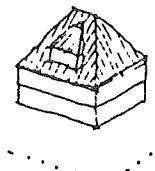
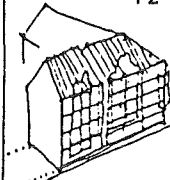
Gemeindegrößen- klasse	1	2	3	4	5	6	
							
	Bungalow	Einfamilien- haus	Doppelhaus	Fertighaus	Reihenhaus	Mehrspanner/ Hochhaus	
GGK I	-	29.3	21.6	4.1	3.0	2.0	
GGK II	1.0	32.5	26.0	5.5	5.0	6.0	
GGK III	2.5	17.2	18.7	2.7	10.9	19.8	
	7	8	9	10	11	12	insge- samt (%)
							
	Kernbebauung	Hof	Hof im Innenbereich	dörfli. Wohn- und Geschäfts- haus	Villa	Gründerzeit- blockbebauung	
GGK I	0.3	8.0	29.0	0.7	2.0	-	100
GGK II	1.0	2.0	12.0	4.0	5.0	-	100
GGK III	5.7	0.4	7.6	-	4.0	10.5	100

Abb. 5: Repräsentative Gebäudetypen für die Bundesrepublik Deutschland und ihre Häufigkeiten (%) in drei Gemeindegrößenklassen (GGK I bis III)

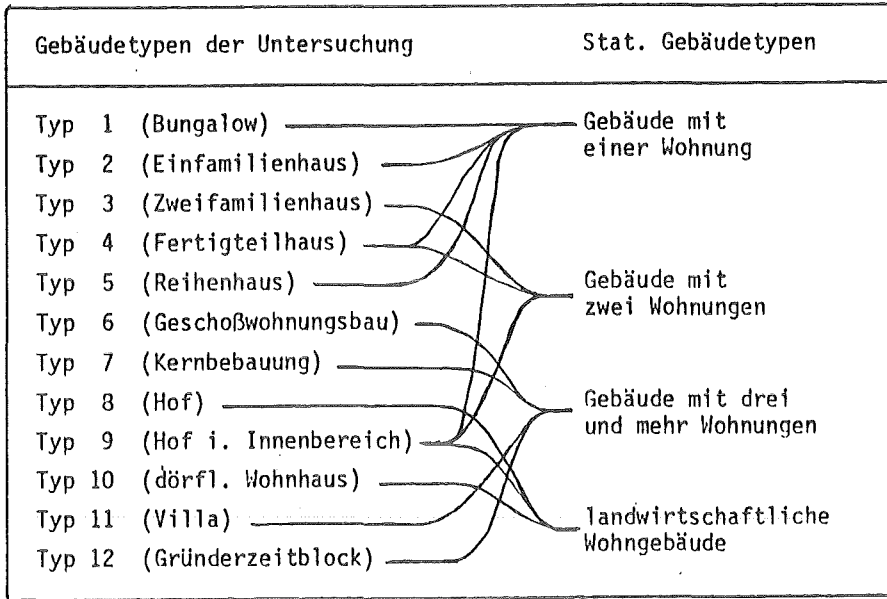
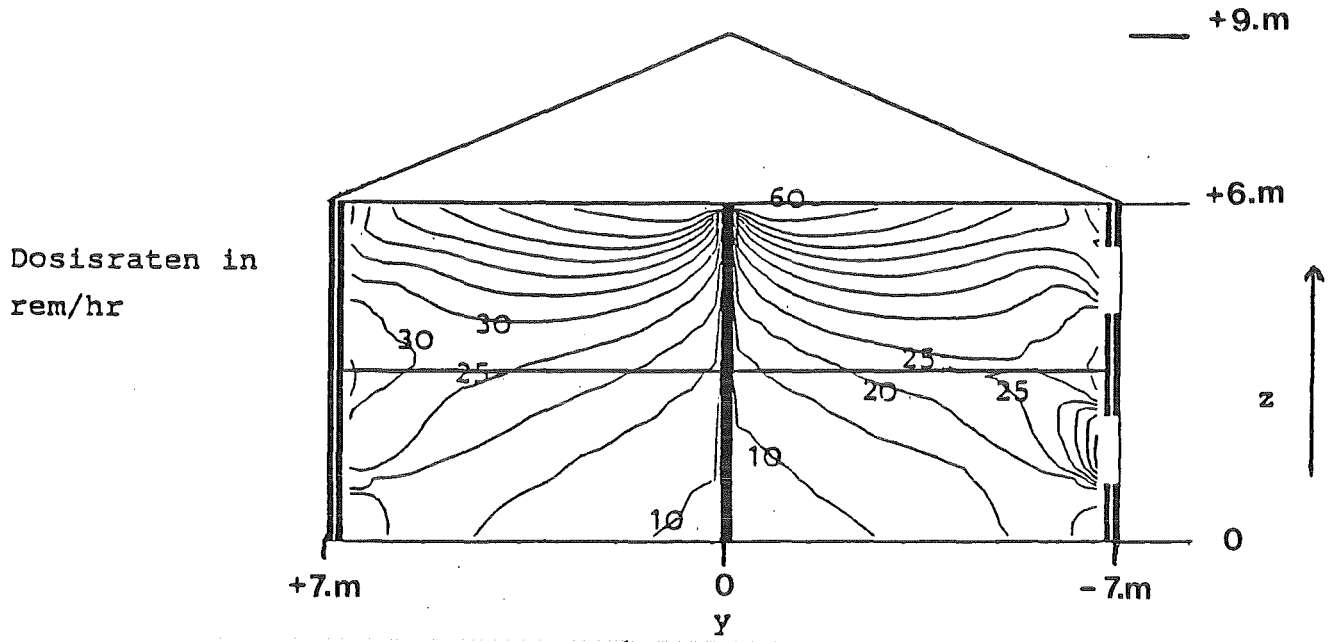


Abb. 6: Schematische Zuordnung der Gebäudetypen zu den Gebäudedaten der amtlichen Statistik (nach He 81 und eigene Ergänzung)

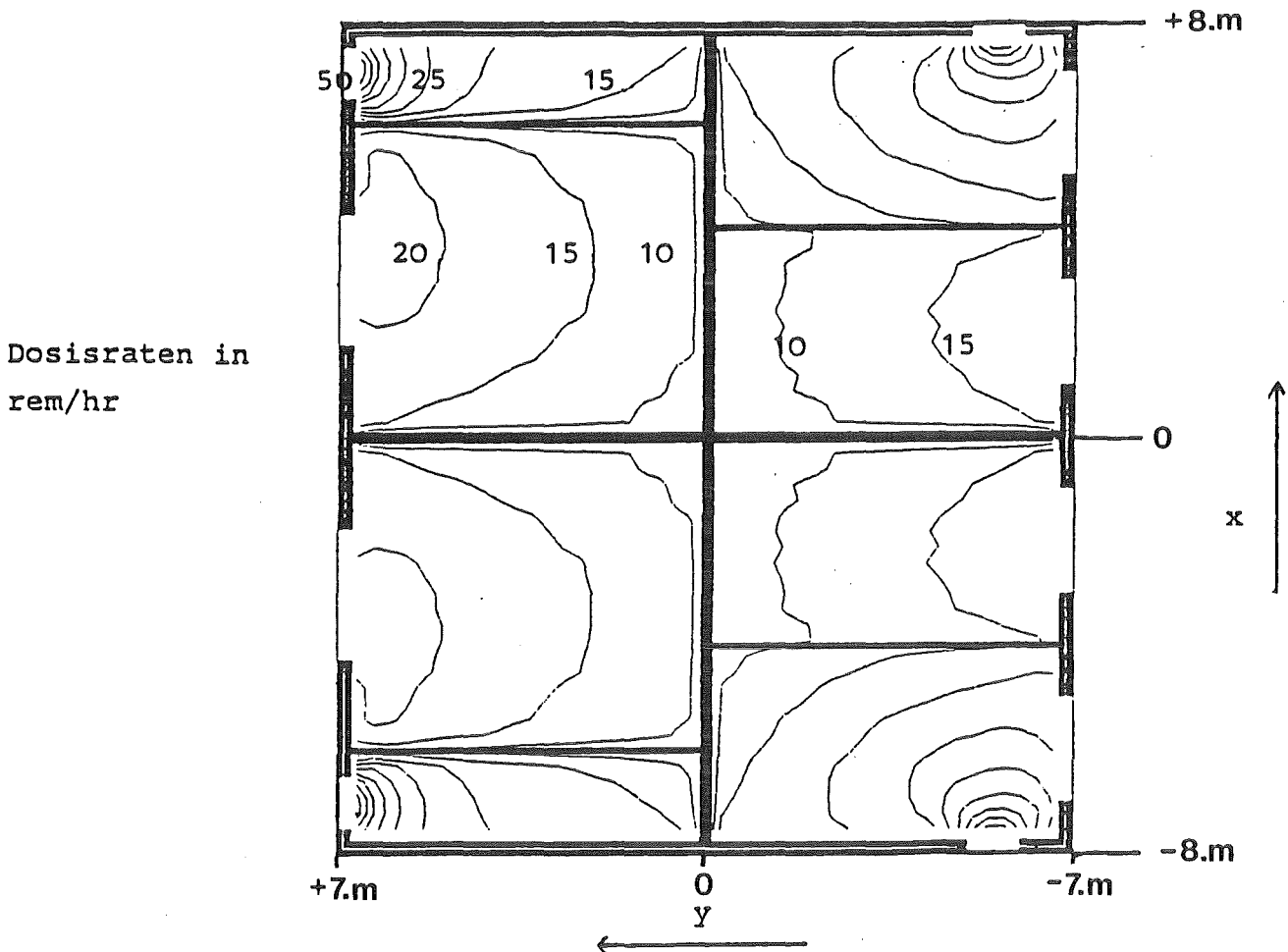
	Gebäudetyp												
	1(a)	2(b)	3(c)	4(d)	5(e)	6(f)	7(g)	8(h)	9(i)	10(k)	11(l)	12(m)	
Gebäude mit einer Wohnung (w)	w ₁	w ₂	-	w ₃	w ₄	-	-	-	w ₅	-	-	-	w ₁ +w ₂ +w ₃ +w ₄ +w ₅ = 100%
Gebäude mit zwei Wohnungen (x)	-	-	x ₁	x ₂	-	-	-	-	x ₃	-	-	-	x ₁ +x ₂ +x ₃ = 100%
Gebäude mit drei und mehr Wohnungen (y)	-	-	-	-	-	y ₁	y ₂	-	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₁ +y ₂ +y ₃ +y ₄ +y ₅ +y ₆ = 100%
landwirtschaftl. Wohngebäude (z)	-	-	-	z ₁	z ₂	-	-	z ₁	z ₂	-	-	-	z ₁ +z ₂ = 100%
	a = w ₁	b = w ₂	c = x ₁	d = w ₃ e = w ₄ f = x ₂ g = y ₁ h = y ₂	e = w ₅	f = y ₁	g = y ₂	h = z ₁	i = w ₅ j = x ₃ k = y ₃ l = y ₄ m = y ₅	k = y ₄	l = y ₅	m = y ₆	

a - m Absolute Zahl der Gebäude in den 12 Typenklassen
w - z Gebäudezahl aus der amtl. Gebäudestatistik (Fortschreibung bis 31.12.78)
w₁-z₂ Prozentuale Anteile der stat. Gebäudezahl, zugeordnet den 12 Typenklassen

Abb. 7: Allgemeine Form der Zuordnungsmatrix der 12 Gebäudetypen zu den Gebäudedaten der Statistik



Aufriß bei $x = -15\text{m}$



Grundriß bei $z = +1.0\text{m}$

Abb. 8: Isodosislinien innerhalb eines vereinfachten Doppelhauses in gemauerter Bauweise bei einer Kontamination des Daches und des umgebenden Bodens mit 1 TBq/m^2 Cs-137 ($\cong 27\text{ Ci/m}^2$)

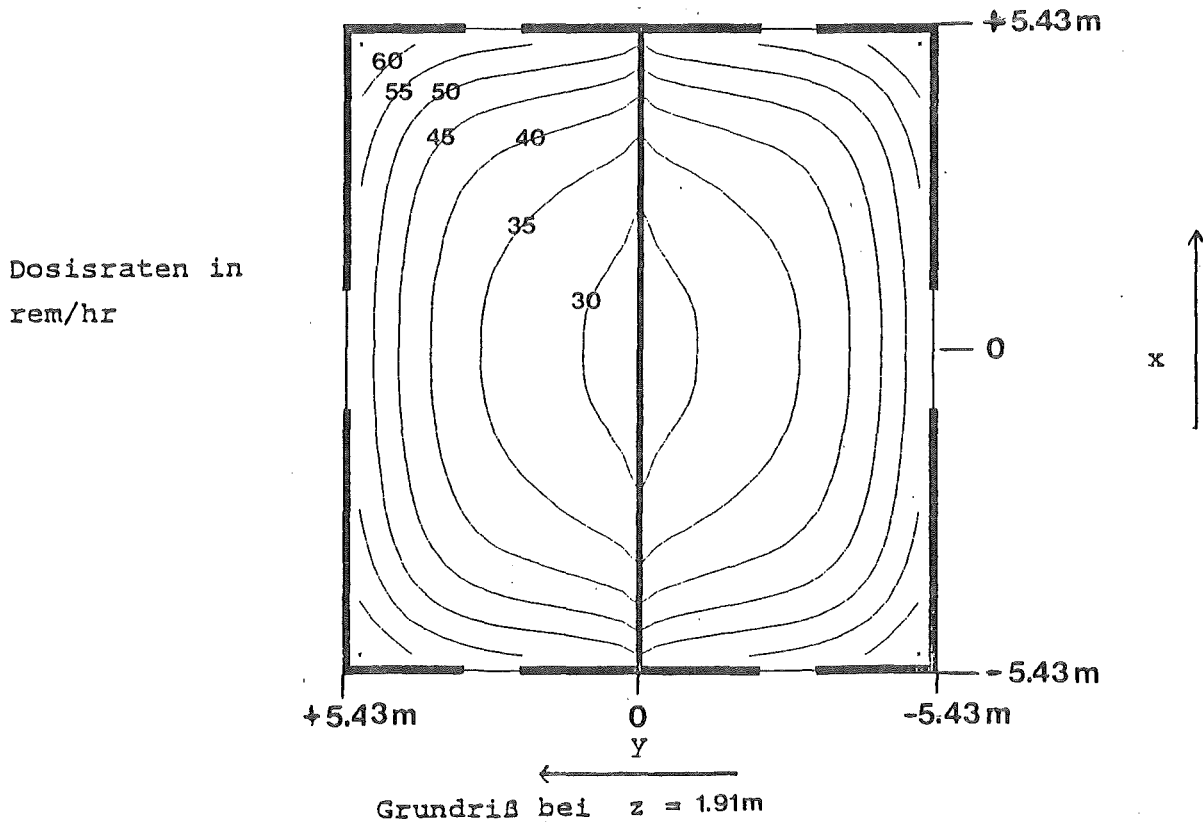
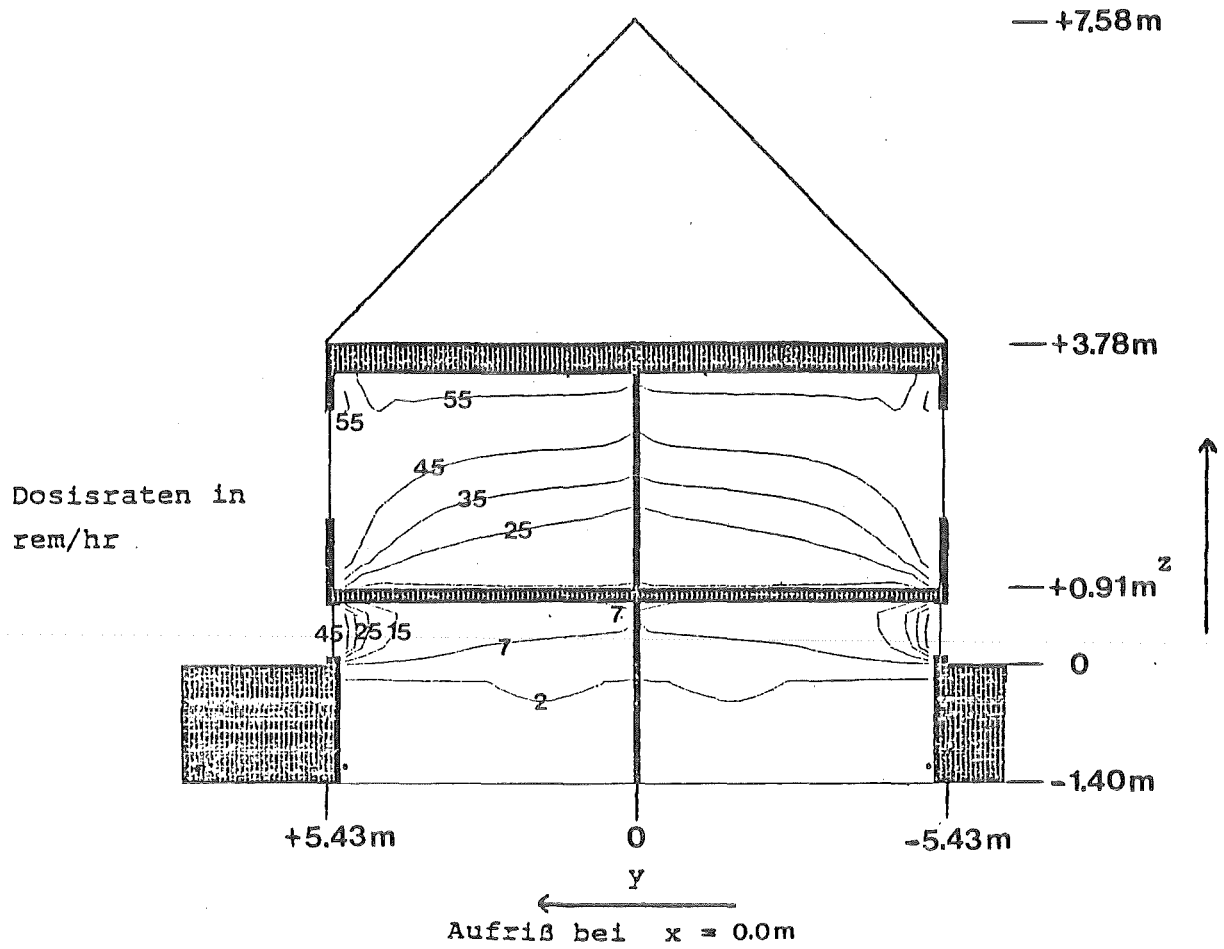


Abb. 9: Isodosislinien innerhalb eines vereinfachten Fertigteilhauses für eine Kontamination des Daches und des umgebenden Bodens mit 1 TBq/m^2 Cs-137

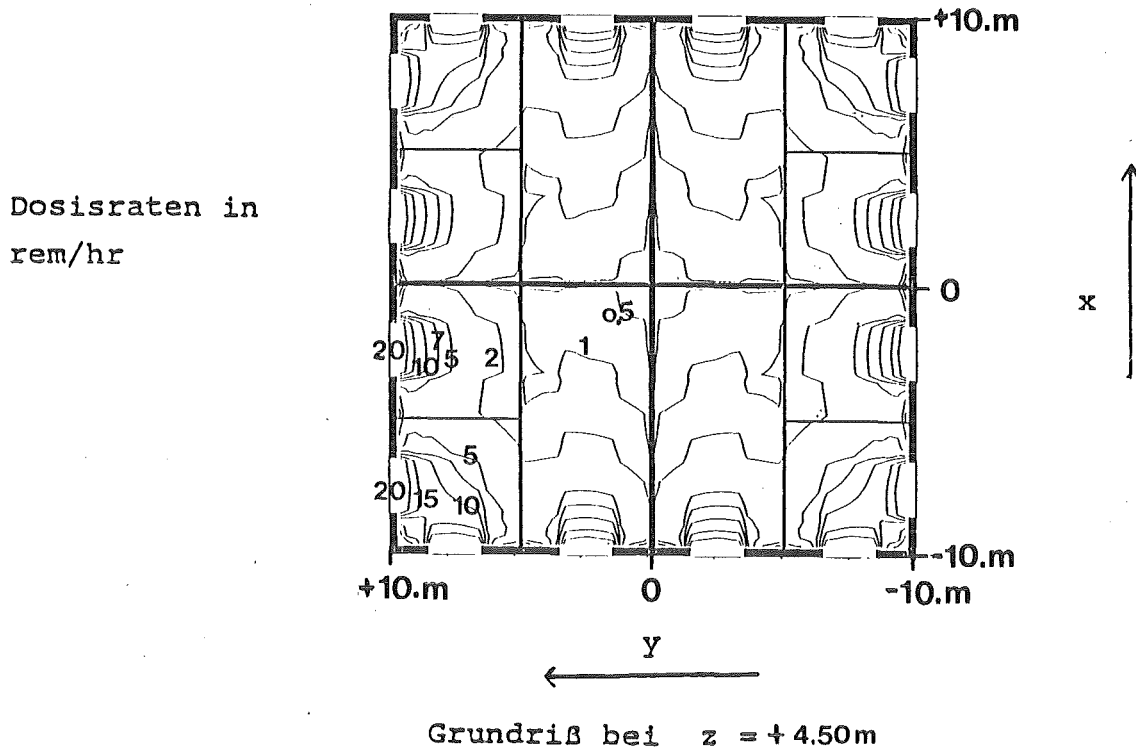
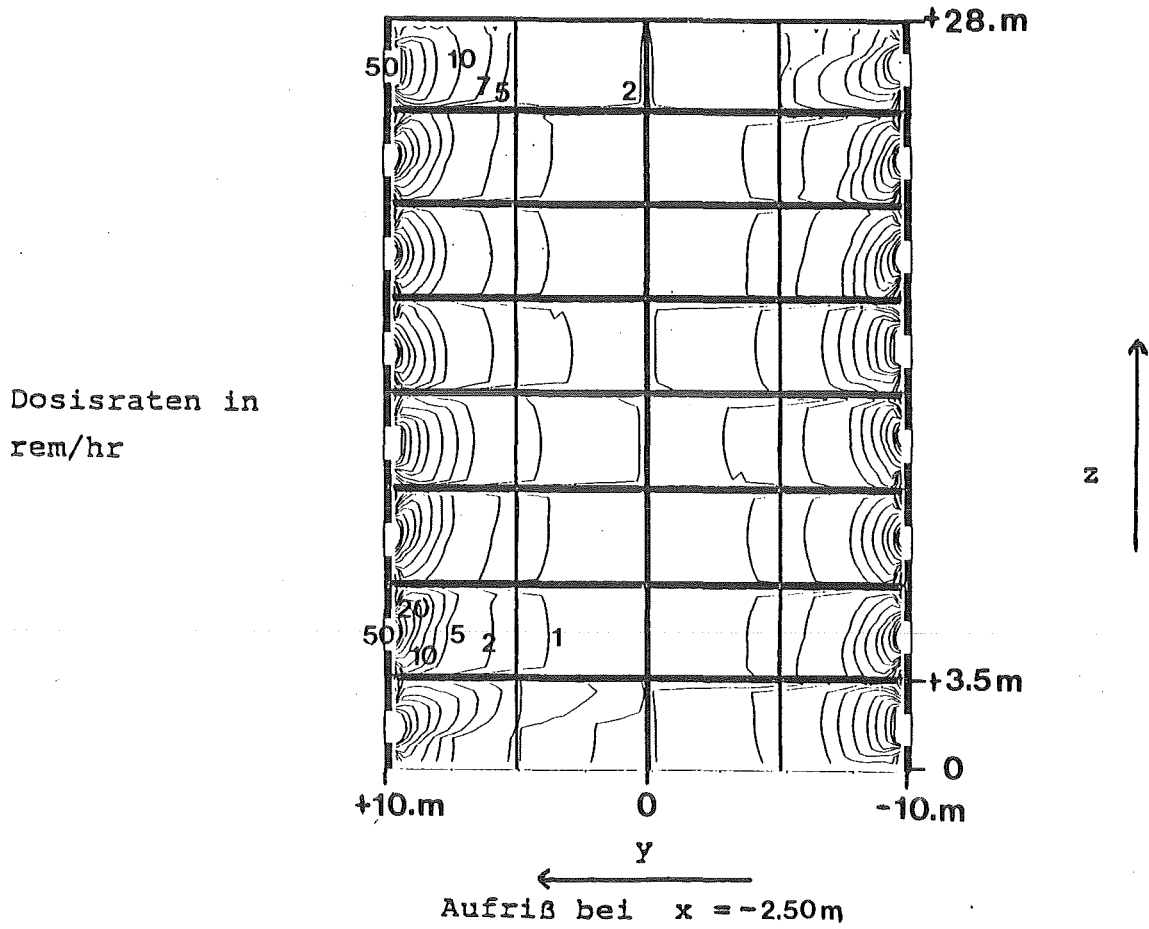


Abb.10: Isodosenlinien innerhalb eines vereinfachten Hochhauses für eine Kontamination des Daches, der Wände und des umgebenden Bodens mit 1 TBq/m^2 Cs-137

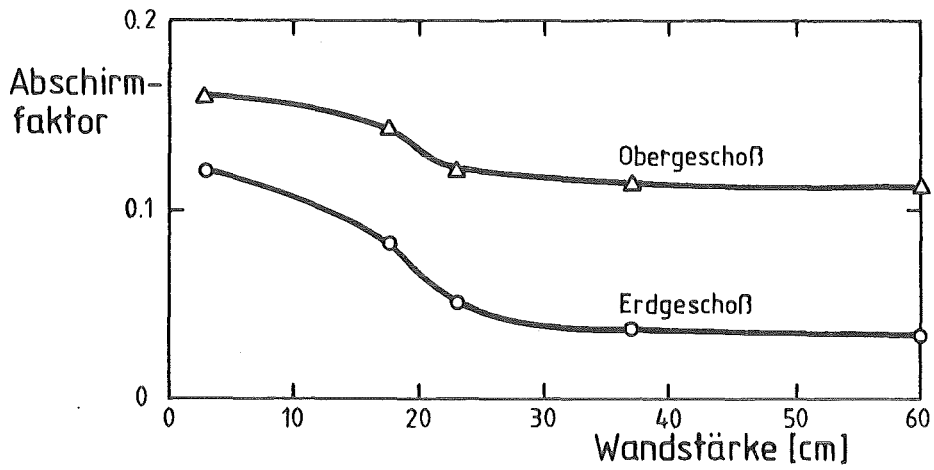


Abb.11: Einfluß der Variation der Wandstärke der Außenwände eines Doppelhauses auf den repräsentativen Abschirmfaktor

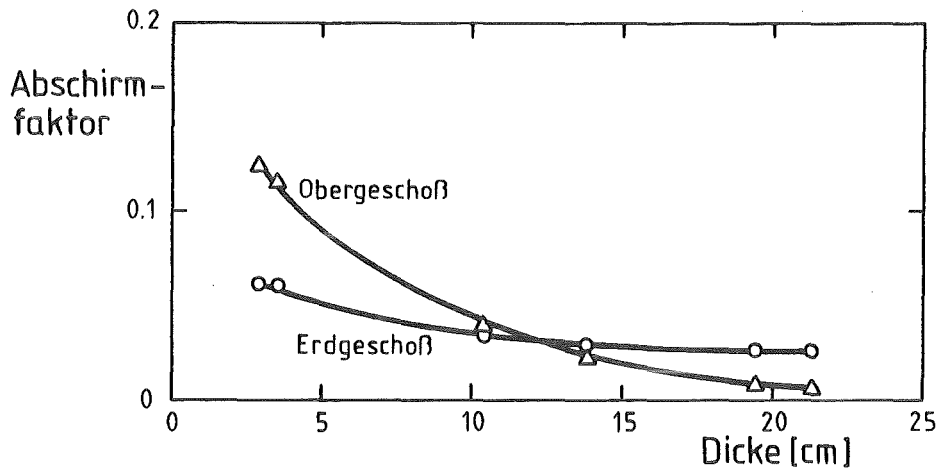


Abb.12: Einfluß der Variation der Dicke der Zwischendecken eines Doppelhauses auf den repräsentativen Abschirmfaktor

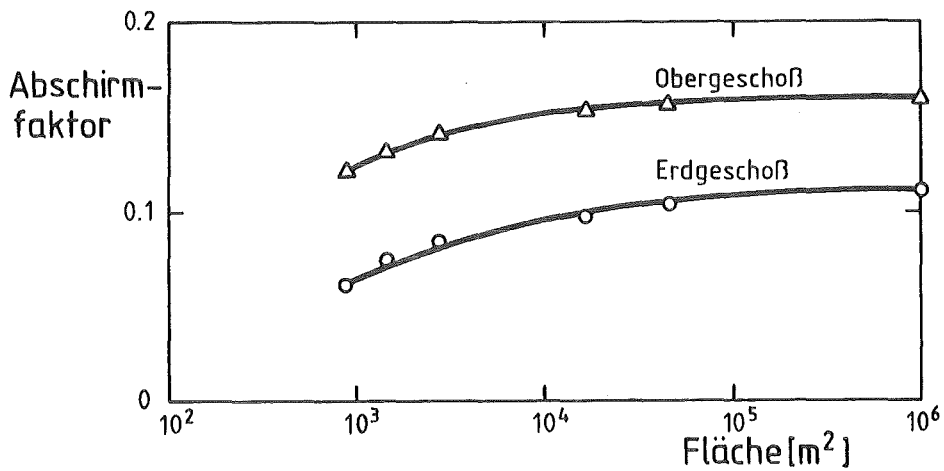


Abb.13: Einfluß der Variation der Größe der umgebenden kontaminierten Fläche auf den repräsentativen Abschirmfaktor eines Doppelhauses

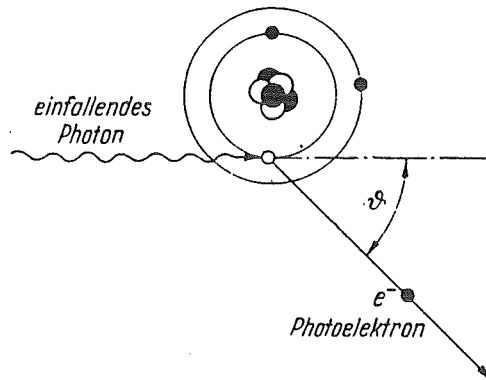


Abb.B.1 Schematische Darstellung des Photoeffekts

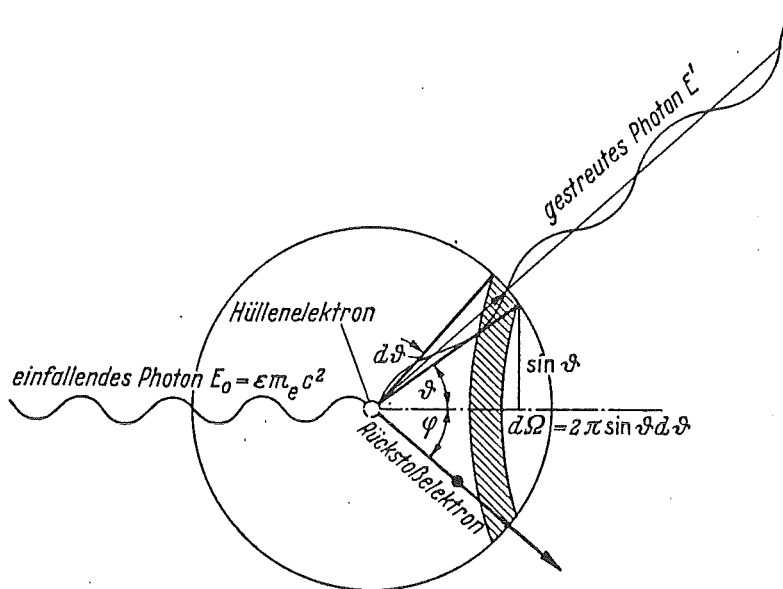


Abb.B.2 Schematische Darstellung der Compton-Streuung

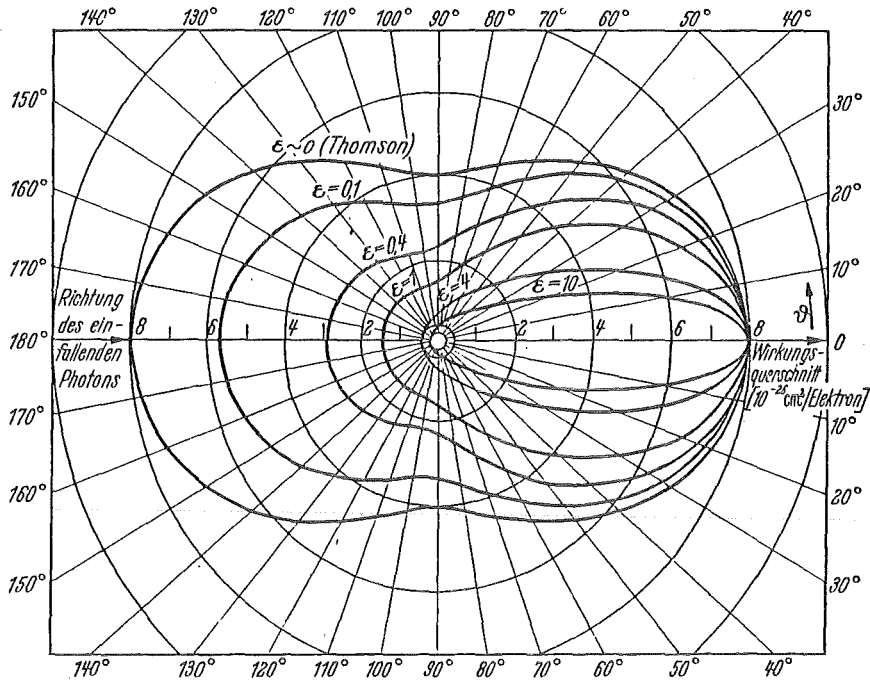


Abb.B.3 Differentialer Kollisionswirkungsquerschnitt für Compton-Streuung von Photonen der Energie $\epsilon m_e c^2$ als Funktion des Streuwinkels ϑ (aus Ja 60)

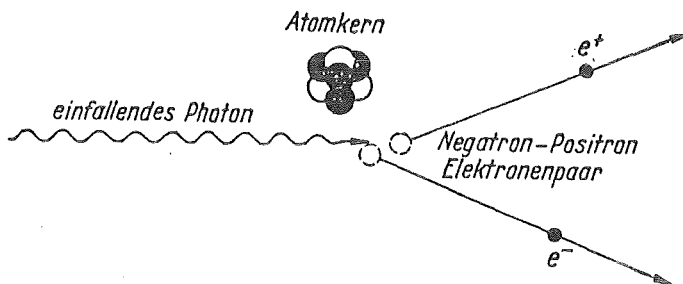


Abb.B.4 Schematische Darstellung der Paarbildung

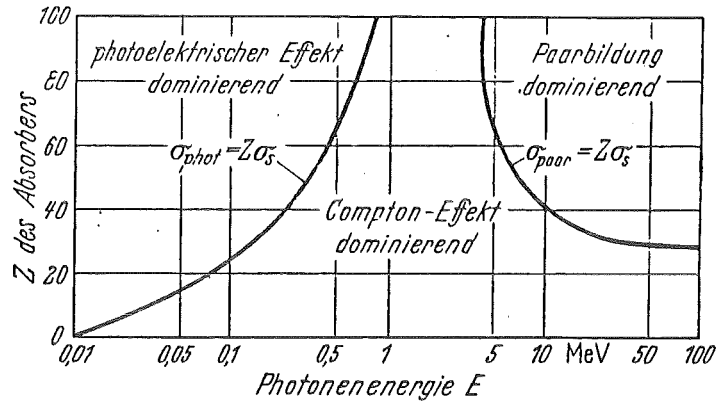


Abb.B.5 Relative Bedeutung der drei Teilwirkungsquerschnitte σ_{phot} , σ_{comp} und σ_{paar} als Funktion der Photonenenergie und der Ordnungszahl des durchstrahlten Mediums (aus Ja 60)

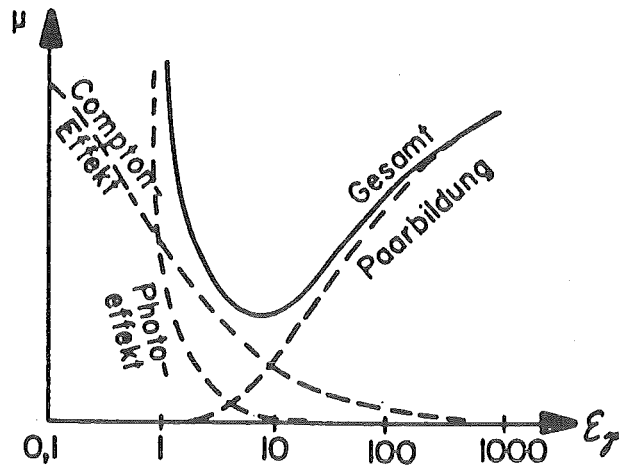


Abb.B.6 Linearer Absorptionskoeffizient μ der drei Teileffekte als Funktion der Photonenenergie



1 METER

X = Detektorpunkt

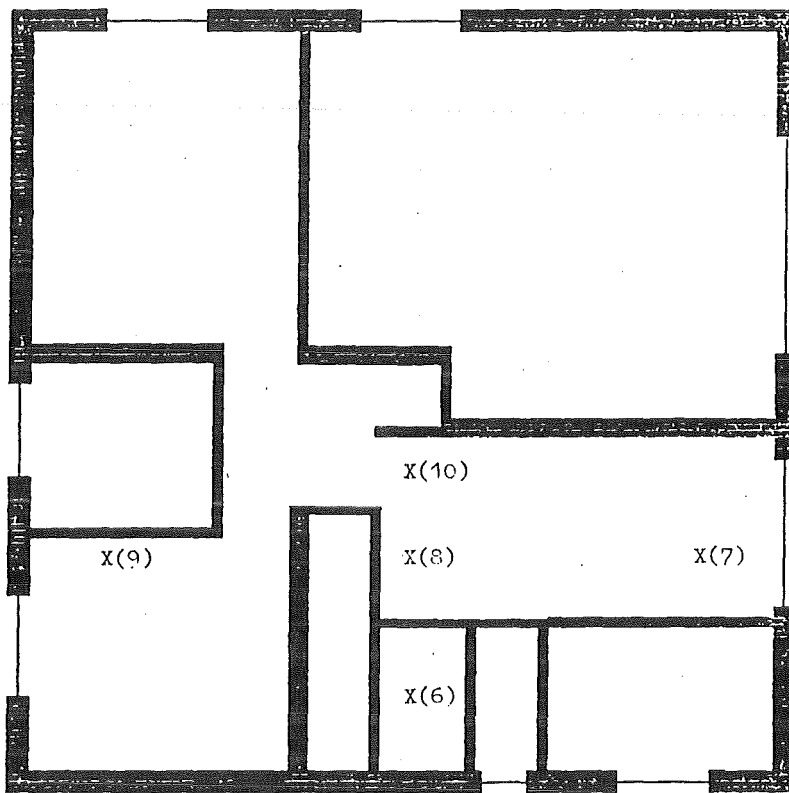


Abb.D.1 Beispiel eines mit Hilfe des Programms PICTURE-CG erzeugten Schnittbildes: Horizontaler Schnitt durch ein Einfamilienhaus