



KfK 2706
ASA/ZE-15/78
Oktober 1978

Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

Studienleiter: H. Paschen
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

**Teil VI:
Kernmaterialüberwachung**

Hauptbearbeiter: R. Avenhaus

Kernforschungszentrum Karlsruhe

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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH
ISSN 0303-4003

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Abteilung für Angewandte Systemanalyse

KfK 2706
ASA/ZE-15/78

KONSEQUENZEN DES GROSSTECHNISCHEN EINSATZES DER KERNENERGIE
IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Studienleiter: H. Paschen

Teil VI: Kernmaterialüberwachung

Hauptbearbeiter: R. Avenhaus

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

Teil VI: Kernmaterialüberwachung

Zusammenfassung

Kernmaterial bedarf eines besonderen Schutzes wegen seines hohen wirtschaftlichen Wertes, wegen seiner großen Toxizität (besonders Plutonium) und wegen seiner Verwendbarkeit zum Bau von nuklearen Waffen. Üblicherweise wird der Gesamtkomplex der Kernmaterialüberwachung eingeteilt in die Kernmaterialsicherung, die den generellen Schutz von Material und Anlagen beinhaltet, und in die Spaltstoffflußkontrolle, die dem Zweck der Nicht-Weiterverbreitung von nuklearen Waffen dient.

In dieser Arbeit werden Entwicklung, technisch-organisatorischer Stand und offene Fragen der Spaltstoffflußkontrolle ausführlich dargestellt. Der Bereich der Kernmaterialsicherung wird nur kurz angesprochen, da sich die hier zu treffenden Maßnahmen praktisch nicht von den entsprechenden Maßnahmen in anderen Bereichen unterscheiden.

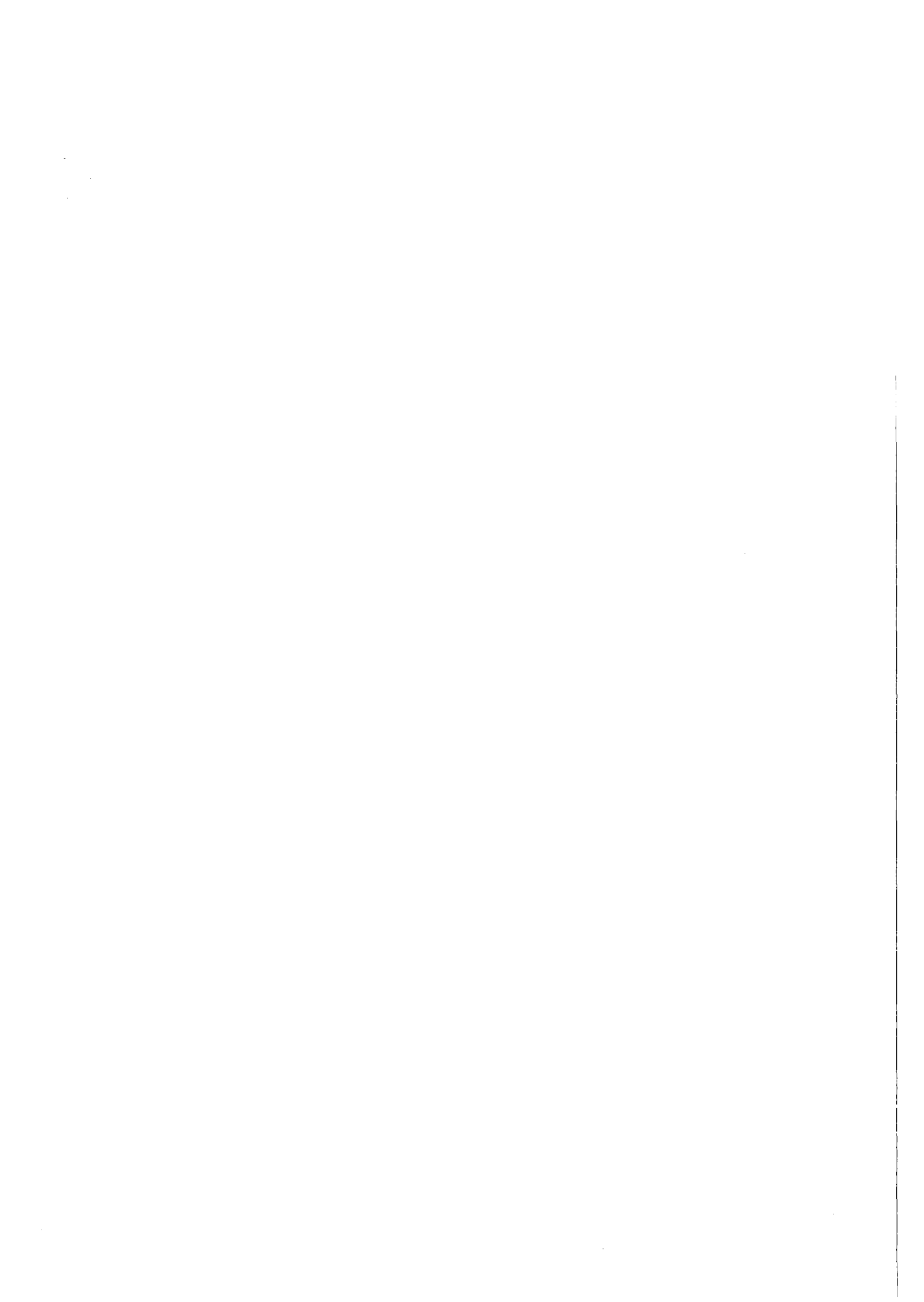
Consequences of Large-scale Implementation of Nuclear Energy in the Federal Republic of Germany

Part VI: Nuclear Material Control

Abstract

Nuclear material requires special protective measures because of its great economic importance, its toxicity (especially plutonium), and its military value. Usually the total complex of nuclear material control is subdivided into a) physical protection measures which are applied to protect nuclear material and installations, and b) international safeguards which are intended to reduce the hazard of nuclear proliferation.

In this paper, the present technological and organizational status and some open questions of international nuclear material safeguards are presented in some detail. Physical protection will be touched upon only briefly, as the measures to be taken here do not differ, in principle, from those to be taken elsewhere.



Die Studie "Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland" wurde im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) erstellt.

Sie umfaßt die folgenden Teilstudien:

- Teil I: Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen und mögliche Versorgungsprobleme bei einem großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
- Teil II: Fragen der Brennstoffentsorgung bei einem großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
- Teil III: Wirtschaftliche Fragen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
- Teil IV: Umweltauswirkungen von Kernkraftwerken und Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufs
- Teil V: Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie
- Teil VI: Kernmaterialüberwachung

Autoren (Teil VI):

- Kapitel 1: Dr. R. Avenhaus¹⁾
- Kapitel 2: Dr. R. Avenhaus¹⁾
- Kapitel 3: Dr. D. Sellinschegg²⁾

1) Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung
in der Technik (IDT)

2) Kernforschungszentrum Karlsruhe, Entwicklungsgruppe Kernmaterial-
sicherung (EKS)

Teil VI:

Kernmaterialüberwachung

G l i e d e r u n g:

1. Einführung

2. Spaltstoffflußkontrolle
 - 2.1 Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen
 - 2.2 Das Modellabkommen der IAEA
 - 2.3 EURATOM-Kontrollen
 - 2.4 Quantitative Analysen
 - 2.4.1 Aufstellung einer Materialbilanz
 - 2.4.2 Datenverifikation
 - 2.4.3 Effektivität und globale Parameter der Kontrollen
 - 2.5 Anwendungsbeispiel
 - 2.6 Offene Fragen
 - 2.6.1 Probleme der Implementierung
 - 2.6.2 Probleme großer Anlagen

3. Kernmaterialsicherung

Literaturverzeichnis

1. Einführung

Kernmaterial bedarf eines besonderen Schutzes wegen seines hohen wirtschaftlichen Wertes, wegen seiner großen Toxizität (besonders im Falle von Plutonium) und schließlich wegen seiner militärischen Bedeutung, d.h. wegen seiner Verwendbarkeit zum Bau von nuklearen Waffen. Üblicherweise wird der Gesamtkomplex der Kernmaterialüberwachung eingeteilt in die Kernmaterialsicherung, die den generellen Schutz von Material und Anlagen beinhaltet, und in die Spaltstoffflußkontrolle, die dem Zweck der Nicht-Weiterverbreitung von nuklearen Waffen dient. Die Kernmaterialsicherung stellt eine nationale Aufgabe dar, der man mit protektiven (und natürlich auch mit detektierenden) Maßnahmen gerecht werden kann. Die Spaltstoffflußkontrolle stellt eine nationale und internationale Aufgabe dar, der man im internationalen Rahmen im wesentlichen mit detektierenden Maßnahmen gerecht zu werden versucht.

Im folgenden soll der Bereich der Spaltstoffflußkontrolle etwas ausführlicher behandelt werden, da es für die hier auftretenden Fragestellungen praktisch keine Parallelen gab und somit ganz neuartige Wege zur Lösung beschritten werden mußten. Der Bereich der Kernmaterialsicherung soll nur kurz angesprochen werden, da sich die hier zu treffenden Maßnahmen nicht wesentlich von den entsprechenden Maßnahmen in anderen Bereichen unterscheiden.

Einen Überblick über den Stand der internationalen Entwicklung des Gesamtgebietes im Jahr 1974 gibt das Buch von Willrich und Taylor /Willrich, M.; Taylor, T.B. (1974)/, eine knappe zusammenfassende Darstellung aus bundesdeutscher Sicht ist in der Dokumentation der Bundesregierung "Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie" von 1977 gegeben /BMFT (1977)/. Eine sehr leistungswerte Darstellung der politischen Aspekte der Spaltstoffflußkontrolle sowie der Entwicklungen, die sich daraus ergaben, wurde von Ungerer im Rahmen einer Analyse der Rolle der internationalen Organisationen bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie gegeben /Ungerer (1975)/.

Es ist im Augenblick nicht ganz einfach, den gegenwärtigen Stand der internationalen Entwicklung der Spaltstoffflußkontrolle zu beschreiben, da gerade in den letzten beiden Jahren neue Entwicklungen in Gang gekommen sind,

deren Konsequenzen noch nicht abzusehen sind. Aus diesem Grunde wurde in der nachfolgenden Darstellung eine Dreiteilung gewählt, entsprechend der

- in einem ersten Teil (Abschnitte 2.1, 2.2 und 2.3) das in internationalen Verträgen festgelegte System der Spaltstoffflußkontrolle, wie es sich etwa im Jahr 1974 darstellte, qualitativ beschrieben wird;
- in einem zweiten Teil (Abschnitte 2.4 und 2.5) in groben Zügen gezeigt wird, mit welchen Methoden eine quantitative Analyse dieses internationalen Überwachungssystems durchzuführen ist und worin Zweck und Ziel einer solchen Analyse liegen;
- in einem letzten Teil (Abschnitt 2.6) möglichst vorurteilsfrei offene Fragen diskutiert werden.

Dabei wurde im letzten Teil bewußt darauf verzichtet, Prognosen über zukünftige Entwicklungen zu erstellen, da gerade im hier angesprochenen Bereich die politische "Großwetterlage" den Gang der Dinge in einer zur Zeit kaum abschätzbaren Weise beeinflussen kann.

2. Spaltstoffflußkontrolle

2.1 Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen

Bei den Verhandlungen zum Nichtverbreitungsvertrag (NV-Vertrag) in den Jahren 1965-1968 wurde schon zu einem frühen Zeitpunkt der Kontrollaspekt eingebracht. Über die Details solcher internationalen Kontrollen gab es jedoch zu Beginn noch keine klaren oder aber sehr unterschiedliche Auffassungen, obwohl es in den U.S.A. und in der U.d.S.S.R. schon seit über 20 Jahren Erfahrungen mit nationalen Kontrollen gab und obwohl die Internationale Atomenergie Organisation (IAEO) in Wien seit längerer Zeit mit trilateralen Kontrollen betraut worden war und entsprechende Prozeduren entwickelt hatte /IAEO (1968)/.

Da die Nicht-Kernwaffenstaaten befürchteten, daß die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Kernindustrie durch solche internationalen Kontrollen beeinträchtigt werden könnte, einigten sie sich sehr bald darauf, daß Kontrollen nur dann akzeptiert werden könnten, falls diese die Bedingungen der Rationalität, der Objektivität und der Formalisiertheit erfüllen würden. "Rational" heißt dabei, daß es vernünftige Gründe für jede einzelne Kontrollmaßnahme geben muß; "objektiv" heißt, daß nicht ein Staat bzw. eine Anlage gegenüber anderen benachteiligt werden darf; und "formalisiert" heißt, daß die Kontrollen nach vorgeschriebenen Regeln ausgeführt werden müssen.

An dieser Stelle begann nun die Mitarbeit der zuständigen wissenschaftlichen und technischen Fachleute, die Vorschläge für Kontrollverfahren machen sollten, die die oben genannten Bedingungen erfüllen könnten. Drei Kontrollprinzipien wurden zur Diskussion gestellt, nämlich /Bennett, C.A.; Granqvist, D.P. (1967)/ Materialbilanzierung, Dichte Umhüllung und Beobachtung. Unter Materialbilanzierung (accountability) ist bei der hier gegebenen Problematik der Vergleich

zwischen dem "Buchinventar", d.h. den aufaddierten Materialein- und -ausgängen in bzw. aus einer Materialbilanzzone während der Inventurperiode, und dem realen Inventar am Ende der Inventurperiode zu verstehen. Unter Dichter Umhüllung (containment) ist sowohl die physische Sicherung des spaltbaren Materials z.B. durch Betonmauern oder durch unfallsichere Behälter zu verstehen, als auch die Anbringung von Siegeln, die Einrichtung von Alarmanlagen etc. Schließlich gibt es Orte und Situationen in der Kernindustrie, wo als einzige Überwachungsmaßnahme die direkte Beobachtung (surveillance) denkbar ist, z.B. bei Umladevorgängen in Reaktoren.

Aus der Beschreibung der drei genannten Prinzipien wird sofort klar, daß das Materialbilanzierungsprinzip die drei oben genannten Bedingungen am besten, das Beobachtungsprinzip diese Bedingungen dagegen am schlechtesten erfüllt. In der Tat wurde der Materialbilanzierung auch der Vorzug gegeben; als Konzept der "strategischen Punkte" fand es in der endgültigen Formulierung des Nichtverbreitungsvertrages seinen Platz /IAEO (1970), Präambel/.

Am 12. Juni 1968 wurde der Entwurf des NV-Vertrages von der UN-Generalversammlung gebilligt, am 1. Juli 1968 in Moskau, Washington und London unterzeichnet. Die IAE0 in Wien wurde mit der Durchführung der im Vertrag vorgesehenen Kontrollen betraut. Am 5. März 1970 trat der Vertrag in Kraft, nachdem er von 43 Staaten ratifiziert worden war.

In die Zeit der Verhandlungen um den Inhalt des NV-Vertrages fällt die Gründung des Projektes Spaltstoffflußkontrolle im Kernforschungszentrum Karlsruhe /Gupta, D.; Häfele, W. (1968)/, dessen Ziel es sein sollte, bei der Ausgestaltung der internationalen Kontrollen mitzuwirken, damit die Interessen der Bundesrepublik Deutschland als einem wesentlich betroffenen Land in geeigneter Weise berücksichtigt würden. Im Rahmen des Projektes wurde eine rege Aktivität entfaltet, die bald Anerkennung fand; so veranstaltete die IAE0 im Juli 1970

in Karlsruhe ein Internationales Symposium /IAEO (1970)/ und lud den Leiter des Projektes bei der Genfer Konferenz 1971 ein, einen Übersichtsvortrag zum Stand der Systemanalyse der Kontrolle des spaltbaren Materials zu halten /Häfele, W. (1971)/.

2.2 Das Modellabkommen der IAEO

Gleich nach Inkrafttreten des NV-Vertrages ging die IAEO daran, die Folgerungen aus dem in Artikel III enthaltenen Mandat für die Organisation der Kontrollen zu ziehen. Das IAEO-Sekretariat mußte in die Lage versetzt werden, Kontrollabkommen mit denjenigen Nicht-Kernwaffenstaaten auszuhandeln, die den NV-Vertrag ratifiziert hatten und damit verpflichtet waren, mit der IAEO Verhandlungen aufzunehmen. Der IAEO-Gouverneursrat beschloß deshalb in einer Sondersitzung im April 1970, einen Ausschuß einzusetzen, der Vorschläge über die Rolle der IAEO im Zusammenhang mit den vom NV-Vertrag vorgeschriebenen Sicherungsmaßnahmen und im besonderen über den Inhalt der im NV-Vertrag vorgesehenen Übereinkünfte unterbreiten sollte. Um eine möglichst breite Basis für diese Vorschläge zu gewinnen, wurde auch den Mitgliedsstaaten, die nicht im Gouverneursrat vertreten waren, die Möglichkeit eröffnet, im Ausschuß mitzuwirken. Die Bundesrepublik konnte daher an den Arbeiten des Ausschusses teilnehmen.

Die Lösung der dem Ausschuß übertragenen Aufgabe schien der Quadratur des Zirkels zu gleichen. Dennoch gelang es dem Ausschuß, in insgesamt 81 Sitzungen zu einem offenbar alle Delegationen befriedigenden Ergebnis zu gelangen. Im März 1971 legte er dem IAEO Gouverneursrat seinen Abschlußbericht vor /IAEO (1971)/. Formal als Verhandlungsrichtlinien für den Generaldirektor gefaßt, stellten die insgesamt 116 Paragraphen umfassenden Vorschläge praktisch ein Modellabkommen dar. Dazu kamen Bestimmungen über die Finanzierung der Kontrollen sowie Empfehlungen über die physische Sicherheit von Kernmaterial und

die Verwirklichung der von den Vereinigten Staaten und Großbritannien im Zusammenhang mit dem NV-Vertrag gemachten Angebote, ihre zivile Kernenergie-tätigkeit freiwilligen internationalen Sicherungsmaßnahmen zu unterwerfen. Die Vorschläge des Ausschusses wurden vom Gouverneursrat im April 1971 gebilligt.

Im folgenden sollen nur einige spezielle Aspekte des Modell-Abkommens angesprochen werden, bezüglich der Gesamtproblematik sei auf den äußerst lesenswerten Artikel von W. Ungerer /Ungerer, W. (1975)/ zu diesem Thema verwiesen.

Das Ziel der Kontrolle wurde in § 28 des Modell-Abkommens sehr präzise wie folgt definiert:

"Das Abkommen soll vorsehen, daß das Ziel der Überwachung die rechtzeitige Entdeckung einer Entwendung signifikanter Mengen Kernmaterials aus friedlichen Aktivitäten zum Bau von Kernwaffen oder anderer explosiver Vorrichtungen oder für andere unbekannte Zwecke ist, und die Abschreckung solcher Entwendung durch das Risiko einer frühzeitigen Entdeckung."

Gleichzeitig wurden im nächsten und übernächsten Paragraphen die Kontrollprinzipien und das zu erreichende Ergebnis einer konkreten Kontrolle festgelegt:

"Zu diesem Zweck soll das Abkommen die Verwendung der Materialbilanzierung als die Überwachungsmaßnahme von fundamentaler Bedeutung vorsehen, mit dichter Umhüllung und Beobachtung als wichtigen ergänzenden Maßnahmen.

Das Abkommen soll vorsehen, daß die technische Schlußfolgerung der Verifikationsaktivitäten der IAEA eine Aussage in bezug auf jede Materialbilanzzone über den Fehlbetrag für eine Inventurperiode sein soll, wobei auch die Genauigkeitsgrenzen angegeben werden sollen."

Damit war also die dominierende Rolle des Materialbilanzierungsprinzips festgeschrieben worden, was eine Erfüllung der früher ge-

nannten Bedingungen bedeutete. Damit war auch klargelegt worden, daß das spaltbare Material, nicht jedoch die kerntechnischen Anlagen Gegenstand der Kontrollen waren, was zu Beginn der Verhandlungen gar nicht selbstverständlich war und womit eine große Sorge der kerntechnischen Industrie ausgeräumt werden konnte.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis der Verhandlungen war die Festlegung der Überwachungsprozedur. Entsprechend dem Modell-Abkommen führt der Anlagebetreiber eine Materialbuchhaltung. Zu diesem Zweck wird die Anlage in Materialbilanzonen eingeteilt, so daß

- die Kernmaterialmenge bei jeder Weitergabe in jede oder aus jeder Materialbilanzzone bestimmt werden kann, und
- der reale Bestand an Kernmaterialien in jeder Materialbilanzzone, falls erforderlich, in Übereinstimmung mit festgelegten Verfahren bestimmt werden kann.

Die für die Erstellung einer Bilanz in einer Materialbilanzzone erforderlichen Messungen sollen an Schlüsselmeßpunkten vorgenommen werden, d.h. an Orten, an denen das Kernmaterial in einer für die Messung geeigneten Form vorkommt.

Durch die Festlegung der Materialbilanzonen und der Schlüsselmeßpunkte sind die räumlichen Elemente des Überwachungssystems festgelegt. Weitere für die Überwachungsprozedur notwendige Elemente sind die Meß-, Protokoll- und Berichterstattungssysteme.

Das Meßsystem ist im wesentlichen nur für den Teil des Brennstoffzyklus, in dem das Kernmaterial in offener Form gehandhabt wird, von Bedeutung. Es müssen an allen Schlüsselmeßpunkten Instrumente bzw. Verfahren vorhanden sein, die das Kernmaterial mit hinreichender Genauigkeit zu messen gestatten, und es muß diese Genauigkeit bekannt bzw. nachprüfbar sein. Da die vorhandenen Instrumente bzw. Verfahren vielfach den neuen Anfor-

derungen nicht entsprechen, lag hier in den letzten 10 Jahren ein besonderer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet (siehe z.B. /IAEO (1970), IAE0 (1975)/).

Im Protokollsystem werden die mit den Instrumenten und Verfahren gewonnenen Primärdaten festgehalten, so daß diese auch für spätere Nachprüfungen zur Verfügung stehen. Im Berichterstattungssystem werden die Modalitäten des Berichtswesens zwischen nationaler (bzw. regionaler) und internationaler (IAEO) Überwachungsbehörde festgelegt. Grundsätzlich nimmt der Betreiber einer kerntechnischen Anlage alle Daten auf, die zur Erstellung einer Materialbilanz notwendig sind, und berichtet diese der für ihn zuständigen nationalen bzw. supranationalen Behörde. Diese gibt die Daten in zusammengefaßter Form an die IAE0 weiter. Die IAE0 verifiziert diese Daten durch unabhängige Messungen auf der Basis von Stichprobenplänen. Ergeben sich zwischen den berichteten und den IAE0-Daten keine signifikanten Unterschiede, so übernimmt die IAE0 alle Daten (d.h. auch die nichtverifizierten) des Anlagebetreibers und prüft die Materialbilanz nach.

Zur Verifikation der Betreiberdaten durch die IAE0 sind Routineinspektionen in den betreffenden kerntechnischen Anlagen vorgesehen. Der maximale Umfang dieser Routineinspektionen ist im Modell-Abkommen nach oben wie folgt begrenzt:

- Für Reaktoren und Lager: 50 IMT⁺) pro Jahr und Anlage,
- für Anlagen mit Pu oder mit Uran mit mehr als 5 % U-235:
30 x \sqrt{E} IMT pro Jahr und Anlage,

⁺) Ein Inspektionsmanntag (IMT) sind 8 Stunden Inspektionstätigkeit in der Anlage pro Tag; diese 8 Stunden dürfen nicht auf verschiedene Kalendertage verteilt werden. 300 Inspektionsmanntage sind ein Inspektionsmannjahr.

- für alle sonstigen Anlagen: $100 + 0,4 \times E$ IMT pro Jahr und Anlage,

wobei E das Inventar oder den Jahresdurchsatz - je nachdem, was größer ist - von nuklearem Material, ausgedrückt in effektiven Kilogramm⁺, darstellt. Für Anlagen mit weniger als 5 eff. kg soll jährlich höchstens eine Routineinspektion durchgeführt werden.

2.3 EURATOM-Kontrollen

Auf der Grundlage des Modell-Abkommens konnte das IAE0-Sekretariat in der Folgezeit ohne größere Schwierigkeiten die nach dem NV-Vertrag erforderlichen Kontrollabkommen mit Nichtkernwaffenstaaten, die Vertragsparteien waren, abschließen. Ein besonderes Problem stellten jedoch die EURATOM-Länder dar. Sie hatten anlässlich der Unterzeichnung des NV-Vertrags im November 1969 erklärt, sie würden den NV-Vertrag erst dann ratifizieren, wenn zwischen EURATOM und IAE0 ein Abkommen abgeschlossen sei, das auf der Grundlage des Prinzips der Verifikation beruhe und die politischen, wirtschaftlichen und technischen Aufgaben von EURATOM nicht beeinträchtige.

Die Verhandlungen über ein Verifikationsabkommen wurden im November 1971 aufgenommen und dauerten bis Juli 1972. Sie waren schwierig; so mußte bei der IAE0-Delegation zunächst erst einmal Verständnis für die

⁺) Das effektive Kilogramm stellt ein grobes Maß für die Schwierigkeit der Herstellung nuklearer Sprengkörper aus bestimmten Kernmaterialien dar. Bezüglich der genauen Definition sei auf /IAEO (1971)/ verwiesen; z.B. gilt: 1000 kg U mit 90 % U-235 \cong 810 kg eff; 1000 kg U mit 20 % U-235 \cong 40 kg eff; 1000 kg U mit 3,16 % U-235 \cong 1 kg eff; 1000 kg Pu \cong 1000 kg eff.

institutionelle Struktur der Gemeinschaft, für die von den einzelnen Mitgliedsstaaten unabhängige Stellung der Kommission und ihre direkt auf die Benutzer von Kernmaterial sich erstreckenden Befugnisse auf dem Gebiet von Sicherungsmaßnahmen sowie für die Modalitäten der Buchführung und Inspektionen der Kommission geweckt werden.

Das Abkommen, bezüglich dessen Inhalt auf die Literatur verwiesen wird /Boulanger (1972)/, wurde am 5. April 1973 unterzeichnet und zusammen mit dem NV-Vertrag am 20.2.1974 vom Deutschen Bundestag ratifiziert; am 21.2.1977 trat das IAE0-EURATOM Verifikationsabkommen in Kraft. Der Abschluß dieses Abkommens wurde von EURATOM und von der IAE0 als Erfolg angesehen. Die Unsicherheit über die Zukunft des IAE0-Kontrollsystems schien damit behoben. Die Gemeinschaft war als eines der Durchführungsorgane des Nichtverbreitungsvertrages anerkannt worden.

Aus der Sicht eines Staates, der den EURATOM- und den IAE0-Kontrollen unterliegt, läßt sich die Überwachungsprozedur zusammenfassend in den folgenden Schritten darstellen (siehe /BMFT (1977)/):

- Bereitstellung von Anlagedaten (Anlagebetreiber → EURATOM → IAE0),
- Festlegung der Infrastruktur für die Überwachung, der Überwachungstätigkeiten und des Inspektionsaufwandes (EURATOM / IAE0; Zustimmung des betroffenen Staates),
- Messungen; Registrierung von Daten im Protokollsystem durch den Anlagebetreiber,
- Berichterstattung (Anlagebetreiber → EURATOM → IAE0),
- Inspektionen (EURATOM / IAE0),
- Mitteilung der Ergebnisse der Überwachungstätigkeiten (IAE0 / EURATOM → betroffener Staat).

2.4 Quantitative Analysen

Nachdem die Prinzipien der Überwachung sowie die gesamte Überwachungsprozedur einmal festgelegt worden waren, konnte man an die Aufgabe gehen, eine quantitative Analyse des Systems durchzuführen (obwohl es natürlich lange vorher Vorarbeiten gegeben hatte und diese Vorarbeiten den Ablauf der Verhandlungen beeinflusst hatten). Wesentliche zu beantwortende Fragen waren

- Was bedeutet "signifikanter Unterschied"?
- Wie haben die Stichprobenpläne zur Datenverifikation auszusehen, damit ein vorgegebener Inspektionsaufwand optimal verwendet wird?
- Wie groß muß der Inspektionsaufwand für eine bestimmte Anlage in einer bestimmten Zeit sein?

Der zu behandelnde Sachverhalt enthält aus zwei Gründen zufällige Komponenten: einmal wegen der zufälligen Meßfehler und zum anderen wegen der notwendigerweise zufälligen Auswahl der zu verifizierenden Daten. Daher müssen bei der Analyse Methoden der Mathematischen Statistik eingesetzt werden. Darüber hinaus muß man zumindest bei der Konzipierung der Überwachung davon ausgehen, daß der Betreiber Material entwenden möchte - andernfalls gäbe es ja gar keinen Grund für Kontrollen -, und weiter, daß eine Entwendung so geschickt wie möglich durchgeführt werden wird. M.a.W. es müssen Entwendungsstrategien und zugehörige Inspektionsstrategien betrachtet werden, daher müssen Methoden der Spieltheorie eingesetzt werden.

Seit 1968 und, wie schon erwähnt, besonders seit 1970, sind von verschiedenen Arbeitsgruppen in der Welt, insbesondere auch im Kernforschungszentrum Karlsruhe, umfangreiche Analysen dieser Art durchgeführt worden. Im folgenden soll nur ein kurzer Einblick gegeben

Tabelle 1a

MATERIALBILANZIERUNG
EINE INVENTURPERIODE

(T_0, T_1) : BETRACHTETES ZEITINTERVALL

I_0 : REALES INVENTAR BEI T_0

D : SUMME ALLER EIN- UND AUSGÄNGE IN (T_0, T_1)

$B = I_0 + D$: BUCHINVENTAR BEI T_1

I_1 : REALES INVENTAR BEI T_1

$MUF := B - I_1$ (MATERIAL UNACCOUNTED FOR)

NULLHYPOTHESE H_0 :

$$E(MUF | H_0) = 0$$

ALTERNATIVE HYPOTHESE H_1 :

$$E(MUF | H_1) = M$$

EINSEITIGER SIGNIFIKANZTEST

$$MUF \leq s \rightarrow H_0 \text{ WAHR}$$

$$MUF \geq s \rightarrow H_1 \text{ WAHR}$$

s : SIGNIFIKANZGRENZE

$$1 - \alpha := \text{PROB} \{ MUF \leq s | H_0 \}$$

$$\beta := \text{PROB} \{ MUF \leq s | H_1 \}$$

α : FEHLALARMWAHRSCHEINLICHKEIT

$1 - \beta$: ENTDECKUNGSWAHRSCHEINLICHKEIT

ALLE MESSFEHLER NORMALVERTEILT:

$$\text{PROB}\{A \leq X\} = \Phi\left(\frac{X - \mu}{\sqrt{\text{VAR } A}}\right); \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z dt \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

Tabelle 1b

MATERIALBILANZIERUNG

EINE INVENTURPERIODE (FORTS.)

DANN SIND I_0 , D , I_1 NORMALVERTEILT

UND MUF IST NORMALVERTEILT

VAR I_0 , VAR D , VAR I_1 : VARIANZEN VON I_0 , D , I_1

$$\text{VAR MUF} =: \sigma^2 = \text{VAR } I_0 + \text{VAR } D + \text{VAR } I_1$$

DANN

$$1 - \alpha = \Phi\left(\frac{s}{\sigma}\right)$$

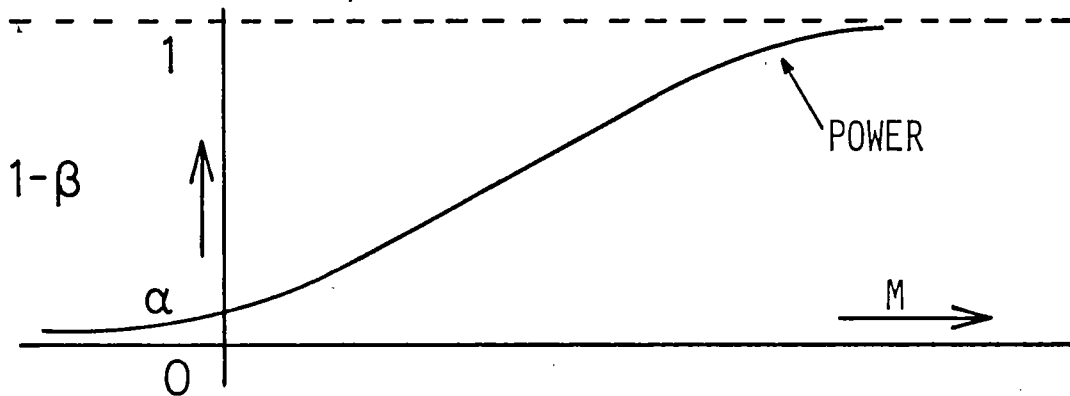
UND

$$1 - \beta = \Phi\left(\frac{M}{\sigma} - \frac{s}{\sigma}\right)$$

ODER

$$1 - \beta = \Phi\left(\frac{M}{\sigma} - U_1 - \alpha\right)$$

U: INVERSE VON Φ



EIGENSCHAFTEN:

- 1) $1 - \beta$ WÄCHST MIT WACHSENDEM M FÜR GEgebenES σ, α
- 2) $1 - \beta$ WÄCHST MIT WACHSENDEM α FÜR GEgebenES σ, M
- 3) $1 - \beta$ WÄCHST MIT FALLENDDEM σ FÜR GEgebenES α, M

FRAGE:

WIE SIND DIE WERTE VON α, M ZU WÄHLEN?

Tabelle 2a

DATENVERIFIKATION

EINE MATERIALKLASSE

N ZU VERIFIZIERENDE MESSEINHEITEN

BETREIBER BERICHTET MESSWERTE

$$X_J = T_J + D + E_J \quad J = 1 \dots N$$

T_J : WAHRER MATERIALGEHALT

E_J : ZUFÄLLIGER FEHLER

D: EICHFEHLER

$\text{VAR } E_J =: \sigma_{BR}^2 \quad J = 1 \dots N$ VARIANZ DES ZUFÄLLIGEN FEHLERS

$\text{VAR } D =: \sigma_{BS}^2$ VARIANZ DES EICHFEHLERS

NORMALVERTEILTE FEHLER

$$X_J - T_J \sim \text{No} (0, \sigma_{BR}^2 + \sigma_{BS}^2)$$

INSPEKTOR VERIFIZIERT N DATEN, DIE AUS DEN N BERICHTETEN ZUFÄLLIG AUSGEWÄHLT WURDEN

ERGEBNISSE SIND $Y_J, \quad J = 1 \dots N.$

IM FALLE KEINER ENTWENDUNG

$$Y_J - T_J \sim \text{No} (0, \sigma_{IS}^2 + \sigma_{IR}^2) \quad J = 1 \dots N$$

IM FALLE DER ENTWENDUNG DES BETRAGES μ VON DER J-TEN MESSEINHEIT

$$Y_J - T_J \sim \text{No} (-\mu, \sigma_{IS}^2 + \sigma_{IR}^2) \quad J = 1 \dots N$$

STATISTISCHES VERFAHREN FÜR DEN DATENVERGLEICH:

DEFINIERE

$$D := \frac{N}{N} \cdot \sum_{J=1}^N (X_J - Y_J)$$

NICHT ALLE BETREIBERDATEN WERDEN VERWENDET.

Tabelle 2b

DATENVERIFIKATION

EINE MATERIALKLASSE (FORTS.)

THEOREM: IM FALLE KEINER ENTWENDUNG (H_0) HAT MAN

$$E(D|H_0) = 0$$

IM FALLE VON R VERFÄLSCHUNGEN UM DEN BETRAG μ (H_1)

$$E(D|H_1) = \mu \cdot R =: M$$

SIGNIFIKANZTEST FÜR D, ERGEBNIS

$$1 - \beta = \sum_L \Phi \left(\frac{\mu \cdot L}{\sqrt{N \cdot \sigma_R^2 + N^2 \sigma_S^2}} - U_{1-\alpha} \right) \cdot \frac{\binom{R}{L} \binom{N-R}{N-L}}{\binom{N}{N}}$$

$$\sigma_R^2 := \sigma_{BR}^2 + \sigma_{IR}^2, \quad \sigma_S^2 := \sigma_{BS}^2 + \sigma_{IS}^2$$

EINFACHERE FORMEL:

NORMALVERTEILUNGSNÄHERUNG MIT KORREKTEM ERWARTUNGSWERT UND KORREKTER VARIANZ

$$1 - \beta = \Phi \left(\frac{\mu \cdot R - U_{1-\alpha} \cdot \sigma_{D/H_0}}{\sigma_{D/H_1}} \right)$$

WOBEI

$$\sigma_{D/H_0}^2 = N^2 \cdot \left(\frac{\sigma_R^2}{N} + \sigma_S^2 \right)$$

$$\sigma_{D/H_1}^2 = N^2 \cdot \left(\frac{\sigma_R^2}{N} + \mu^2 + \mu^2 \cdot \frac{R}{N} \cdot \frac{N-R}{N} \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot \frac{N}{N-1} - \frac{1}{N-1} \right) \right)$$

UND α DIE FEHLALARMWAHRSCHEINLICHKEIT.

FORMEL KANN Z.B. VERWENDET WERDEN ZUR BESTIMMUNG DES STICHPROBENUMFANGES N , WENN DIE WERTE DER PARAMETER

$$\alpha, \beta, R, \mu, N \text{ UND } \sigma^2$$

GEGEBEN SIND.

BEMERKUNG: ALTERNATIVE STATISTISCHE VERFAHREN SIND DENKBAR.

werden, im übrigen wird wieder auf die angegebene Literatur verwiesen /IAEO (1975)/, /Avenhaus, R. (1977)/. Vorher soll noch einmal betont werden, daß die nachfolgende Annahme, daß der Anlagebetreiber Material entwendet, für Analysezwecke notwendig ist - es soll damit keineswegs unterstellt werden, daß der Anlagebetreiber auch wirklich Material entwendet wird.

2.4.1 Aufstellung einer Materialbilanz

Die Analyse des Problems der Aufstellung einer Materialbilanz in einer Materialbilanzzone für eine Inventurperiode ist in den Tabellen 1a und 1b skizziert (siehe z.B. /IAEO (1975)/). Das Ergebnis ist eine Relation zwischen den drei Größen

- Fehlalarmwahrscheinlichkeit α
- zu entwendende Menge M
- Entdeckungswahrscheinlichkeit $1-\beta$

wenn wir einmal die Varianz σ^2 als (durch die Güte der Meßinstrumente) gegeben annehmen. Dies bedeutet also, daß wir die Werte von α und M vorgeben müssen, wenn wir den Wert der Entdeckungswahrscheinlichkeit $1-\beta$ bestimmen wollen. Aber welche Werte sind vorzugeben? Diese Frage können wir im Rahmen dieser Analyse nicht beantworten, wir kommen im übernächsten Abschnitt auf sie zurück.

2.4.2 Datenverifikation

Die Analyse des Problems der Verifikation einer Klasse von Betreiberdaten (z.B. Eingangsdaten einer Wiederaufarbeitungsanlage) ist in den Tabellen 2a und 2b dargestellt. Die Übertragung dieser Analyse auf

mehrere Klassen von Betreiberdaten (z.B. Eingangs-, Ausgangs- und Abfalldaten) erfordert größeren Aufwand und kann hier nicht angemessen dargestellt werden (siehe z.B. /Avenhaus, R. (1977)/). Wir erhalten ein ganz ähnliches Ergebnis wie vorher, nur kommt hier eine vierte Größe hinzu, nämlich

- Inspektionsaufwand C (ausgedrückt durch die Zahl der zu verifizierenden Daten).

Wir stehen also vor einem ähnlichen Problem wie vorher: Wieder müssen wir die Werte von α und M und zusätzlich den Wert des Inspektionsaufwandes vorgeben, wenn wir den Wert der Entdeckungswahrscheinlichkeit $1-\beta$ bestimmen wollen.

2.4.3 Effektivität und globale Parameter der Kontrollen

Im Rahmen des auf dem Materialbilanzierungsprinzip beruhenden Überwachungssystems definieren wir als Effektivität des Systems die Gesamtentdeckungswahrscheinlichkeit als Funktion von Aufwand, Fehlalarmwahrscheinlichkeit und zu entwendender Menge. In unserem speziellen Fall setzt sich diese Entdeckungswahrscheinlichkeit zusammen aus der Wahrscheinlichkeit, eine Entwendung zu entdecken, die durch eine Datenfälschung verdeckt werden soll, und aus der Wahrscheinlichkeit, eine Entwendung (ohne Datenfälschung) zu entdecken, die durch die Fehler der Materialbilanz verdeckt werden soll.

An dieser Stelle können wir nun die vorher aufgeworfenen Fragen nach der Festlegung der Werte von Aufwand, Fehlalarmwahrscheinlichkeiten sowie der Vorgabe von zu entwendenden Mengen beantworten. Dazu gehen wir aus von dem Ziel der Kontrolle: Es soll die Entwendung von im Sinne des NV-Vertrages signifikanten Mengen rechtzeitig erkannt und damit eine abschreckende Wirkung ausgeübt werden. Dies bedeutet also, daß bei einem Zeitraum von z.B. einem Jahr der Wert von M für eine bestimmte Material-

bilanzzone in der Größenordnung einiger Kilogramm liegen wird. Die Einzelwerte M_1 und M_2 für das Materialbilanzierungs- bzw. Datenverifikationsproblem ergeben sich dann aus einer Optimierung, da wir unterstellen, daß der Betreiber seine Entwendung in der für ihn günstigsten Weise einrichtet. Die Werte von Inspektionsaufwand und Gesamt-Fehlalarmwahrscheinlichkeit α können wir nicht in ähnlicher Weise bestimmen, allerdings erhalten wir für einen vorgegebenen Wert von α durch entsprechende Optimierung die Werte der Einzelfehlalarmwahrscheinlichkeiten α_1 und α_2 . Sind jedoch die Werte von Inspektionsaufwand, Gesamt-Fehlalarmwahrscheinlichkeit und zu entwendender Menge einmal vorgegeben, so können wir die Gesamt-Entdeckungswahrscheinlichkeit berechnen und nachprüfen, ob das Resultat mit dem Ziel der Kontrolle und dem eingesetzten Aufwand in Einklang steht.

Wir sehen also, was die quantitative Analyse eines bestimmten Überwachungssystems leisten kann: Es müssen die Werte einiger globaler Parameter subjektiv vorgegeben werden. Mit ihrer Hilfe lassen sich dann alle anderen Fragen wie Einzelfehlalarmwahrscheinlichkeiten, Optimierung von Stichprobenplänen und Effektivität des Gesamtsystems beantworten. Es sei nur am Rande vermerkt, daß sich auch die Werte dieser Parameter berechnen ließen, wenn Zahlenwerte für Gewinn bzw. Verlust eines Staates im Fall nichtentdeckter bzw. entdeckter Entwendung angegeben werden könnten - dies hat sich jedoch als völlig unmöglich herausgestellt.

2.5 Anwendungsbeispiel

Zur Veranschaulichung der im vorhergehenden Abschnitt gegebenen Darstellung der quantitativen Analysen soll jetzt die Anwendung auf ein realistisches Beispiel skizziert werden; eine ausführliche Beschreibung findet sich in /Avenhaus, R.; Golly, W.; Krüger, F.J. (1977)/.

Die Brennelement-Fabrikationsanlage der Reaktor-Brennelement Union Hanau (RBU) stellt im wesentlichen Brennelemente für Leichtwasser-Reaktoren her. Es wird in dieser Anlage also Uran mit einer Anreicherung von bis zu 3 % U-235 verarbeitet, wobei das Uran in Form von gasförmigem Uranhexafluorid bzw. flüssigem Uranyl Nitrat angeliefert wird und (im wesentlichen) in fertig assemblierten Brennelementen die Anlage verläßt. Der Jahresdurchsatz beträgt ca. 600 t Uran.

Entsprechend der in der Tabelle 1 gegebenen Übersicht ist es zur Analyse des Materialbilanzierungssystems notwendig, alle Materialflüsse (Eingänge, Ausgänge einschließlich Abfällen) sowie das gesamte reale Inventar zu erfassen und die aufaddierten Meßungenauigkeiten (genauer: die Varianzen der aufaddierten Meßfehler) zu bestimmen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den "systematischen" Meßfehlern zu; einmal, weil sie viel schwieriger als die zufälligen Fehler zu erfassen sind, und zum anderen, weil sie bei vielen Messungen die Genauigkeit der Summe aller Messungen entscheidend bestimmen, da sich die zufälligen Fehler "herausmitteln".

In Tabelle 3 sind die auf ein Jahr bezogenen Materialflüsse und -inventare sowie ihre Meßfehlervarianzen zusammengestellt. Gleichzeitig findet sich in dieser Tabelle die Varianz der Differenz von Buch- und realem Inventar, $\text{var}(\text{MUF}) = \sigma_{\text{MUF}}^2$, am Ende der einjährigen Inventurperiode, wobei es von ausschlaggebender Bedeutung ist, ob das nicht meßbare Prozeßinventar mit 10 % oder mit 50 % Genauigkeit geschätzt wird. Mit Hilfe des Wertes von $\text{var}(\text{MUF})$ läßt sich dann entsprechend der in Tabelle 1 gegebenen Formel die Entdeckungswahrscheinlichkeit als Funktion von Fehlalarmwahrscheinlichkeit mit Entwendungsmenge M_1 bestimmen.

Hinsichtlich der Analyse des Problems der Datenverifikation ergab sich im Falle der RBU, daß wegen der dort gegebenen besonderen Verhältnisse nur drei Materialklassen für eine Verifikation in Frage kamen: Brennstäbe, Pelletkästen und Pulvereimer. In Tabelle 4a sind die für die Bestimmung von optimalen Stichprobenplänen erforderlichen Daten

Tabelle 3: Auf ein Jahr bezogene Materialdurchsätze und -inventare sowie deren Meßfehlervarianzen für die Brennelement-Fabrikationsanlage der RBU (nach/Avenhaus, R.; Golly, W.; Krüger, F.J. (1977)/)

	Material- kategorie	Uranmenge t U	Materialgruppe	Varianz var kg ² U	Varianz var kg ² U	Standard- abweichung σ kg U
Betreiber ¹⁾	Eingänge	520	UF ₆ -Lieferungen	64	20 513	143,22
		80	UNH-Lieferungen	20 449		
	Ausgänge	245	Brennstäbe	25 281	45 513	213,34
		220	Pellet-Ausgänge	12 544		
		135	Pulver-Ausgänge	52 ² + 22 ²		
		0,9	Abfälle	60 ² + 30 ²		
	Inventar	19	Restmengen	6 ² + 56 ²	716 984	846,75
		18	Zwischenlager	5 ² + 47 ² + 3 ²		
		-	verstecktes Inventar	2 500		
		15,9	gemessenes Prozeßin- ventar	50 ² + 70 ²		
8,4		geschätztes Prozeß- inventar	700 569			
	MUF				1 499 994	1 225
Inspek- tor ²⁾	Inventar		geschätztes Prozeß- inventar	2 563 201	2 579 616	1 606
	MUF				5 225 258	2 286

¹⁾ Prozeßinventar wird mit 10 % Genauigkeit geschätzt, $\sigma_{\text{MUF}}/\text{Eingang} = 0,20 \%$

²⁾ Prozeßinventar wird wie in ¹⁾ geschätzt, außer Fallsäulen und Wirbelbetten, die mit 50 % Genauigkeit geschätzt werden, $\sigma_{\text{MUF}}/\text{Eingang} = 0,38 \%$

zusammengestellt; in Tabelle 4b sind die Ergebnisse der Optimierung: optimale Stichprobenumfänge und zugehörige Entdeckungswahrscheinlichkeit für verschiedene Entwendungsmengen M_2 und verschiedene Kontrollaufwendungen C zusammengestellt. ¹⁾

Mit Hilfe der in den Tabellen 3 und 4 wiedergegebenen Daten ließe sich die Gesamt-Entdeckungswahrscheinlichkeit für das kombinierte Überwachungssystem (Datenverifikation und Materialbilanz) als Funktion von Fehlalarmwahrscheinlichkeit, Entwendungsmenge $M = M_1 + M_2$ und Kontrollaufwand C bestimmen. Es zeigt sich jedoch, daß für $0 < M < 4$ (to Uran) das Minimum der Gesamt-Entdeckungswahrscheinlichkeit immer bei $M_1 = M, M_2 = 0$ liegt. Dies hat seinen Grund darin, daß im Verhältnis zur Datenverifikation die Materialbilanzierung relativ "ungenau" ist, d.h. im Falle einer Entwendung, die kleiner ist als 4 (to Uran), immer versucht werden wird, keine Daten zu verfälschen, sondern die Ungenauigkeit der Materialbilanzierung auszunützen. Aus diesem Grund ist die Gesamt-Entdeckungswahrscheinlichkeit im wesentlichen durch die Entdeckungswahrscheinlichkeit bei der Materialbilanzierung gegeben.

Es muß an dieser Stelle betont werden, daß es sich bei dem oben skizzierten Datenverifikationssystem erst um einen Vorschlag handelt, da bis heute noch keine Routine für derartige Prozeduren besteht. Aus diesem Grund sind alle Analysen dieser Art noch von vorläufigem Charakter, im Augenblick existieren noch nicht einmal für alle Anlagen des Brennstoffzyklus solche Analysen. Hier liegt ein sehr aktuelles Arbeitsgebiet, das von verschiedenen Gruppen aktiv bearbeitet wird (siehe z.B. /Kotte, U.; Büker, H.; Stein, G. (1976)/, /Hough, C.G.; Schneider, R.A.; Stewart, K.B.; Jaech, J.L.; Bennett, C.A. (1974)/, /Shipley, J.P., Cobb, D.D.; Dietz, R.J.; Evans, M.L.; Schelonka, E.P.; Smith, D.B.; Walton, R.B. (1977)/).

¹⁾ Die optimalen Stichprobenumfänge (r_1^0, r_2^0, r_3^0) des Betreibers und (n_1^0, n_2^0, n_3^0) des Inspektors für vorgegebene Werte von M_2 und C ergeben sich aus der Lösung des folgenden Optimierungsproblems:

$$\begin{array}{ll} \max & \min \\ (n_1, n_2, n_3): & (r_1, r_2, r_3): \\ C = \sum_i \epsilon_i \cdot n_i & M = \sum_i \mu_i \cdot \gamma_i \end{array} \quad (1 - \pi(1 - \frac{r_i}{N_i})^{n_i})$$

Tabelle 4 a: Parameter des sich aus der Datenverifikation bei der Brennelement-Fabrikationsanlage der RBU ergebenden Stichprobenkontroll-Problems (nach /Avenhaus, R.; Golly, W; Krüger, F.J. (1977)/)

Materialart	Jahresdurchsatz t Uran	Materialinhalt einer Kontrolleinheit kg Uran	Zahl der Kontrolleinheiten pro Jahr N_i	Aufwand je Kontrolleinheit Inspektor-Stunde	Grenzaufwand, wenn alle Einheiten kontrolliert würden Inspektor-Tage	Verfälschungswert je Einheit μ kg Uran
Stäbe	245	46 ¹⁾	5325	1,0	666	46
Pelletkästen	220	62	3550	1,5 ²⁾	666	6,2
Pulvereimer	100	44	2270	1,5 ²⁾	426	4,4

¹⁾ Bei den Stäben erfolgt die Stichprobenprüfung durch Anwesenheit des Inspektors bei dem Stabmeßgerät (rod scanner). Eine Kontrolleinheit sind die 20 Stäbe, die während seiner jeweils einstündigen Anwesenheit gemessen werden.

²⁾ Bei den Pulver- und Pelletbehältern sind folgende Bearbeitungszeiten des Inspektors angesetzt worden: Wägen 15 Minuten, Probeziehen 15 Minuten und Urananalyse 60 Minuten.

Tabelle 4 b: Optimierung des Aufwandes für Stichprobenkontrollen in der Brennelement-Fabrikationsanlage der RBU. M_2 : Entwendungsmenge, C: Aufwand, $\underline{r}^0 = (r_1^0, r_2^0, r_3^0)$: optimale Betreiber-Stichprobenumfänge, $\underline{n}^0 = (n_1^0, n_2^0, n_3^0)$: optimale Inspektor-Stichprobenumfänge, $1-\beta_2^0$: garantierte Entdeckungswahrscheinlichkeit

M_2 /kg/	300		500		700		1000	
r_1^0	6		9		13		18	
r_2^0	6		9		12		18	
r_3^0	4		6		8		11	
$C_1 = 50$ MT	$n_1^0 = 334$ $n_2^0 = 30$ $n_3^0 = 14$	$1-\beta_2^0 = 0,367$	335 30 14	0,493	335 30 14	0,621	335 30 14	$1-\beta_2^0 = 0,742$
$C_2 = 100$ MT	$n_1^0 = 669$ $n_2^0 = 60$ $n_3^0 = 27$	$1-\beta_2^0 = 0,595$	669 60 27	0,742	669 60 27	0,855	669 60 27	$1-\beta_2^0 = 0,933$
$C_3 = 150$ MT	$n_1^0 = 1003$ $n_2^0 = 90$ $n_3^0 = 41$	$1-\beta_2^0 = 0,742$	1004 90 41	0,869	1004 90 41	0,945	1004 90 41	$1-\beta_2^0 = 0,983$

2.6 Offene Fragen

In den vorangehenden Abschnitten wurden der vertragliche Rahmen, die Grundprinzipien, die Prozeduren sowie quantitative Analysen des Überwachungssystems in seiner heutigen Form dargestellt. In diesem Abschnitt sollen einige noch offene Fragen diskutiert werden, die sich im wesentlichen in die folgenden beiden Gruppen zusammenfassen lassen:

- Probleme der Implementierung,
- Probleme großer Anlagen bzw. Brennstoffzyklen.

Diese Fragen sind technisch-organisatorischer Natur. Daneben gibt es die wirtschaftlich-politische Proliferationsproblematik. Stichworte hierfür sind die "Londoner Leitlinien" /Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Januar 1978)/ sowie das im Herbst 1977 von Präsident Carter initiierte "INFCE-Programm" (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation Program) /Loosch, R. (1978)/. Für diese Problematik gilt jedoch das am Ende der Einführung Gesagte in ganz besonderem Maße, weswegen an dieser Stelle, d.h. im Rahmen einer Studie über Kernmaterialüberwachung in heutiger Form, nicht näher darauf eingegangen werden soll.

2.6.1 Probleme der Implementierung

Im Sommer 1977 wurden in der Bundesrepublik Deutschland die ersten Inspektionen nach dem Verifikationsabkommen durchgeführt. Da diese noch prototypischen Charakter hatten, kann man noch nicht absehen, ob sie sich in dieser Form bewähren werden, m.a.W., eine wirkliche Erfahrung mit den nunmehr eingeführten Kontrollen besteht noch nicht.

Die Probleme der Implementierung sind

- organisatorischer Art (Einarbeitung der Inspektoren und der Anlage-Vertreter in die Materie, Aufbau einer Infrastruktur für die Materialbilanzierung und des Berichtswesens, Ermöglichung der Datenverifikation z.B. bei der Inventur u.ä.m.) und

- technisch-wissenschaftlicher Art (Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Instrumente zur Messung von in unterschiedlichen chemischen und physikalischen Formen vorliegendem Kernmaterial, Verbesserung der Meßgenauigkeit und Verringerung des Aufwandes bei vorhandenen Instrumenten, Entwicklung einfacher Auswertungsverfahren u.ä.m.).

Für Anlagen heutigen Typs stellen diese Probleme nach allgemeiner Auffassung keine unüberwindlichen Hindernisse dar, wenn geeignete Anstrengungen gemacht werden.

2.6.2 Probleme großer Anlagen

Eine zentrale offene Frage ist durch die schnell wachsenden Durchsätze kerntechnischer Anlagen gegeben: Während die heute erreichbaren Meßgenauigkeiten bei den existierenden Anlagen Aussagen erlauben, die den derzeit festgelegten Kontrollzielen /Rometsch, R.; Lopez-Menchero, E.; Ryzhov, M.N.; Hough, C.G.; Panitkov, Yu. (1976)/ einigermaßen gerecht werden, stellt dies für zukünftige Großanlagen noch ein Problem dar, da die Ungenauigkeiten der wesentlichen Messungen in etwa proportional zum Durchsatz sind und in absehbarer Zeit nicht um Größenordnungen verbessert werden können.

Ein Weg zur Lösung dieser Frage wird in der geeigneten Definition der Kontrollziele für solche Großanlagen gesucht; in der Tat ist bis heute noch nicht festgelegt, ob sich z.B. der Wert der "goal quantity" M auf den Staat oder die Anlage, auf ein Jahr oder eine Inventurperiode beziehen soll. Ein zweiter Weg besteht darin, bei nationalen Einrichtungen stärker als bisher Materialbilanzierungsmaßnahmen durch direkte Inspektionen und Umhüllungsmaßnahmen zu ergänzen. Dieser Weg ist schwierig: Wegen der erwähnten Problematik der Objektivierung von Aussagen über die Wirksamkeit dieser Maßnahmen können ganz unterschiedliche Auffassungen über deren notwendigen Umfang ("how safe is safe enough?") vertreten

werden bis hin zu einem Punkt, an dem die Wirtschaftlichkeit der betreffenden Anlagen in Frage gestellt wird - dies zu vermeiden war ja gerade der Sinn der in Abschnitt 2.4 skizzierten quantitativen Analysen. Trotzdem stellt dieser Weg eine Hauptrichtung zukünftiger Forschungsanstrengungen dar.

3. Kernmaterialsicherung

Im Unterschied zu dem internationalen Kernmaterialüberwachungssystem im Rahmen des NV-Vertrages, das die Abzweigung von Kernmaterial durch einen Staat bzw. den Betreiber einer Anlage zur Herstellung von nuklearen Waffen bzw. anderen nuklearen Sprengkörpern rechtzeitig detektieren soll, hat das nationale Kernmaterialsicherungssystem die Aufgabe,

- den Diebstahl von Kernmaterial für illegale Zwecke, z.B. zur Herstellung von nuklearen Sprengkörpern oder zur Dispersion von Kernmaterial, um eine radiologische Verseuchung herbeizuführen, sowie
- Sabotageakte gegen kerntechnische Einrichtungen

durch subnationale Gruppen, insbesondere Terroristen, zu verhindern bzw. zu detektieren und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Bedingt durch die strategische Bedeutung (insbesondere im Falle von Plutonium und hochangereichertem Uran) und durch die Toxizität von Kernmaterial gibt es seit der Handhabung solcher Materialien ein System zur Sicherung gegen Eingriffe Dritter. In den letzten Jahren ist durch die Ausbreitung der Kernenergie jedoch die Menge an umlaufendem Kernmaterial beträchtlich gestiegen und zudem ist der politisch oder kriminell motivierte Terrorismus in zunehmendem Maße ein weltweites Phänomen geworden. Das Problem der Sicherung von Kernmaterial ist dadurch stärker in den Vordergrund gerückt und spielt heute auch bei der Frage der Akzeptanz der Kernenergie eine entscheidende Rolle.

Aus nationaler Sicht ist man bestrebt, das Risiko absichtlicher Störungen bzw. deren Folgen auf ein angemessenes Maß zu reduzieren. Um dies zu gewährleisten, hat man in der Bundesrepublik Deutschland ein Sicherungssystem, das rein rechtlich gesehen durch das Atomgesetz geregelt und damit Bestandteil für die Genehmigung von kerntechnischen Anlagen und Kernmaterialtransporten ist, soweit es sich um Schutzmaßnahmen handelt, für die der Betrei-

ber einer kerntechnischen Einrichtung aufzukommen hat. Darüber hinausgehende Schutzmaßnahmen obliegen den für die öffentliche Sicherheit zuständigen Behörden. Die Anforderungen an das Sicherungssystem im Rahmen des Atomgesetzes sind in entsprechenden Maßnahmenkatalogen durch den Bundesminister des Innern geregelt und werden regelmäßig dem neuesten Stand der Erkenntnisse auf diesem Gebiet angepaßt.

In Analogie zur Reaktorsicherheit könnte man sich vorstellen, daß der Grad der Sicherung für eine kerntechnische Einrichtung sich an dem Risiko infolge Einwirkung Dritter orientiert, d.h. dem Produkt aus dem Schaden - der durch eine vorgegebene Tätergruppe infolge illegaler Aktionen mit dem Material einer Anlage bzw. an der Anlage selbst ausgelöst wird - und der Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines solchen Schadens. Dieser ist u.a. abhängig von der Art, der Menge, der chemischen und physikalischen Form des in einer kerntechnischen Einrichtung gehandhabten oder gelagerten Kernmaterials und von dem Kenntnisstand, den Fähigkeiten und der Ausrüstung der Gruppe. Theoretisch sind Anlagen, in denen sich größere Mengen an Plutonium, Uran-233 oder hochangereichertem Uran befinden, potentielle Ziele für den Diebstahl solchen Materials zur Herstellung von nuklearen Sprengsätzen, wenn man davon ausgeht, daß es Tätergruppen mit einschlägigem Sachverstand und geeigneter, sehr aufwendiger technischer Ausrüstung gibt. In Anlagen, in denen sich Plutonium und andere radioaktive Materialien in entsprechender Form befinden, die sich zur Herbeiführung von radiologischen Verseuchungen eignen, ist ein Diebstahl solchen Materials theoretisch ebenfalls möglich. Sabotageakte werden vor allem bei solchen kerntechnischen Einrichtungen berücksichtigt werden müssen, in denen hochradioaktive Materialien freigesetzt werden können.

Entsprechende Ansätze zur Ermittlung des Risikos durch Einwirkung Dritter sind gemacht worden /Bahm, W.; Nägele, G.; Sellinschegg, D. (1975)/, /Bennett, C.A.; Murphey, W.M.; Sherr, T.S. (1975)/. Das Ziel solcher Untersuchungen ist es, eine Basis für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Sicherungsmaßnahmen und den möglichen Konsequenzen durch illegale Aktionen zu schaffen. Das Problem dabei ist jedoch die Ermittlung

von Wahrscheinlichkeiten. Denn in diesem Fall hat man es nicht nur mit rein technischen Vorgängen zu tun, wie zum Teil in der Reaktorsicherheitsforschung, sondern es spielt menschliches Verhalten herein. Es ist wohl kaum möglich, eine Wahrscheinlichkeit dafür anzugeben, daß es eine Tätergruppe gibt, die eine kerntechnische Einrichtung ins Auge faßt, um dort Material zu stehlen oder eine Erpressung durch Androhung eines Sabotageaktes herbeizuführen, da die Zusammenhänge für die Entstehung solcher Gruppen weitgehend unbekannt sind. Um diesem Problem aus dem Wege zu gehen, ist z.B. in /Bahm, W.; Nägele, G.; Sellinschegg, D. (1975)/ versucht worden, das Gefährdungspotential einer Anlage durch das bedingte Risiko wie folgt auszudrücken:

$$R_{/i} = \sum_{ijk} D_{i,j,k} \cdot P_1(D_{i,j,k}/i,j,k) \cdot P_2(i,j,k/i,j) \cdot P_3(i,j/i).$$

Dabei bedeutet:

- $R_{/i}$: Risiko infolge Einwirkung Dritter unter der Bedingung, daß Tätergruppen $i=1,2\dots$ existieren
- $D_{i,j,k}$: Schaden durch die Gruppe i , in der Anlage j , durch die illegale Aktion k
- $P_1(D_{i,j,k}/i,j,k)$: Wahrscheinlichkeit, daß $D_{i,j,k}$ durch die Gruppe i in Anlage j infolge Aktion k eintritt
- $P_2(i,j,k/i,j)$: Wahrscheinlichkeit, daß Aktion k in Anlage j durch Gruppe i erfolgt
- $P_3(i,j/i)$: Wahrscheinlichkeit, daß Anlage j durch Gruppe i attackiert wird.

Der Vorteil einer solchen probabilistischen Analyse liegt zunächst nicht in der Angabe von quantitativen Ergebnissen, sondern in der rein qualitativen Erfassung der Struktur der gesamten Problematik und der Aufzeigung der Zusammenhänge. Zur Zeit sind eine Reihe von probabilistischen Ansätzen zur Behandlung von Sicherheitsproblemen in verschiedenen Ländern in Arbeit.

International wird durch INFCIRC 225 der IAEA /IAEO (1977)/ ein pragmatisches Vorgehen empfohlen, indem für bestimmte Arten von Kernmaterialien jeweils drei nach der Menge der Materialien unterschiedliche Kategorien festgelegt werden, für die verschiedene Grade der Sicherung gelten sollen (siehe Tab. 5).

Ein grober Rahmen für die Sicherungsmaßnahmen entsprechend den drei Sicherungskategorien ist für Kernmaterialien in Betrieb und Lager sowie während des Transports ebenfalls in /IAEO (1977)/ in Form von Empfehlungen angegeben.

Die wesentlichen Komponenten des Sicherungssystems sind:

- Schaffung von abgestuften Sicherungszonen um das strategische Kernmaterial mit entsprechender Widerstandszeit
- Beschränkung des Zugangs in die Sicherungszonen auf autorisiertes Personal und Personen mit Begleitung
- Errichtung eines Systems zur Entdeckung von Unstimmigkeiten
- Erstellung eines Kommunikationssystems zur Übermittlung der Information in eine Zentrale und zur Verständigung von Hilfskräften.

Vor allem in den Staaten, die beträchtliche Mengen an strategisch bedeutendem Kernmaterial handhaben oder lagern, sind Forschungs- und Entwicklungsprogramme unterwegs mit dem Ziel, neue Ergebnisse und Technologien in das Sicherungssystem einzuarbeiten, um damit das Risiko durch illegale Aktionen Dritter so klein wie möglich zu machen.

Tabelle 5: Kategorisierung von Kernmaterial^e

Material	Form	Kategorie (kg)		
		I	II	III
1. Plutonium ^{a,f}	unbestrahlt ^b	≥ 2	> 0,5 aber < 2	$\leq 0,5^c$
2. Uran-235 ^d	unbestrahlt ^b			
	- ≥ 20 % U-235 Anreicherung	≥ 5	> 1 aber < 5	$\leq 1^c$
	- ≥ 10 % aber < 20 % U-235 Anreicherung	-	≥ 10	$< 10^c$
	- > Natururan aber < 10 % U-235 Anreicherung	-	-	≥ 10
3. Uran-233	unbestrahlt ^b	≥ 2	> 0,5 aber < 2	$\leq 0,5^c$

a Plutonium, außer mit einer Plutonium-238 Isotopenkonzentration größer 80 %

b Nicht im Reaktor bestrahltes Material oder im Reaktor bestrahltes Material mit einem Strahlungslevel, ungeschirmt, ≤ 100 rad/Stunde in einem Meter Abstand

c Geringere als radiologisch signifikante Mengen sollten ausgenommen werden

- d Natururan, abgereichertes Uran und Thorium sowie solche Mengen von auf weniger als 10 % angereichertem Uran, die nicht in Kategorie III fallen, sollen entsprechend sorgfältiger Managementpraxis gesichert werden.
- e Bestrahltes Material sollte je nach Einstufung des frischen Brennstoffs wie Material der Kategorien I, II oder III geschützt werden. Wenn die Dosisleistung in 1 m Abstand (ohne Abschirmung) 100 rad/h übersteigt, sollte Brennstoff, der vor seiner Bestrahlung der Kategorie I bzw. II zuzuordnen war, nur um eine Kategoriestufe (von I nach II bzw. von II nach III) umklassifiziert werden.
- f Die zuständigen staatlichen Behörden sollten einschätzen, ob es eine glaubhafte Bedrohung durch Plutoniumdispersion für mißbräuchliche Zwecke gibt. Der Staat sollte dann nach eigenem Ermessen Schutzmaßnahmen treffen, die zu einer der Kategorien I, II oder III gehören. Unabhängig von der Mengenzuordnung der Tabelle sollte der Staat dabei die Zuordnung von Plutonium-Mengen, -Isotopengemischen und -Formen zu den Schutzkategorien je nach Einschätzung der Dispersionsgefahr vornehmen.

Literatur:

Avenhaus, R.; Golly, W.; Krüger, F.J.

Kernmaterialbilanzierung und Datenverifikation in der Brennelement-Fabrikationsanlage der Reaktor-Brennelement Union Hanau.
Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe KFK 2403, Juni 1977

Avenhaus, R.

Material Accountability - Theory, Verification, Applications.
J. Wiley, New York - London, Dezember 1977

Bahm, W.; Nägele, G.; Sellinschegg, D.

Risk Classification for Nuclear Facilities in Connection with the
Illegal Use of Nuclear Materials.
International Symposium of Safeguards of Nuclear Materials, Vienna,
Oct. 20-24, 1975

Bennett, C.A.; Granqvist, D.P.

Safeguards System Studies;
Proceedings of the Symposium on Safeguards Research and Development,
Argonne Nat. Lab., Juni 1967

Bennett, C.A.; Murphey, W.M.; Sherr, T.S.

Societal Risk Approach to Safeguards Design & Evaluation.
June 1975, Energy Research and Development Administration,
Washington, D.C. 20545

Boulanger, W.

Das Verifikationsabkommen IAEO-EURATOM.
Atomwirtschaft-Atomtechnik, Vol. 17, Nr. 9/10, p. 510, 1972

Bundesminister für Forschung und Technologie

Sicherungsfragen. Auszug aus einer Dokumentation der Bundesregierung
zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. Bonn 1977

Gupta, D.; Häfele, W.

Das Prinzip eines instrumentierten Systems zur Überwachung des Spaltstoffflusses auf dem friedlichen Sektor der Kernenergie.
ATKE 11, pp. 229-236, 1968

Häfele, W.

Systems Analysis in Safeguards of Nuclear Material; Invited Paper;
Proceedings of the Fourth International Conference on the Peaceful
Uses of Atomic Energy, Genf, 6.-16. Sept. 1971, Vol. 9, pp. 303-322

Hough, C.G.; Schneider, R.A.; Stewart, K.B.; Jaech, J.L.; Bennett, C.A.

Example of Verification and Acceptance of Operator Data - Low Enriched
Uranium Fabrication.

Bericht der Battelle Northwest Laboratories BNWL-1852, UC-15,
August 1974

IAEO

The Agency's Safeguards System.

IAEO-Dokument INFCIRC/66, Rev. 2, September 1968

IAEO

Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons;
verfügbar als IAEO-Dokument INFCIRC/140, April 1970

IAEO

Proceedings of the IAEO Symposium on Safeguards Techniques in
Karlsruhe, 1970

IAEO

The Structure and Content of Agreements between the Agency and
States required in Connection with the Treaty on the Non-
Proliferation of Nuclear Weapons.

IAEO-Dokument INFCIRC/153, Mai 1971

IAEO

Proceedings of the IAEA Symposium on Safeguarding Nuclear Material.
Wien, Oktober 1975

IAEO

The Physical Protection of Nuclear Material.
INFCIRC/225, June 1977

Kotte, U.; Büker, H.; Stein, G.

Procedure for the Accounting and Control of Nuclear Materials in Large Research Centres, as Related to the Needs of International Safeguards. Bericht der Kernforschungsanlage Jülich, IAEA Research Contract No. 1574/RB, April 1976

Loosch, R.

Das internationale Programm zur Beurteilung des Kernbrennstoff-Kreislaufs INFCE
Atomwirtschaft-Atomtechnik, Vol. 23, Nr. 1, S. 33, 1978

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung

Richtlinien der Gruppe der Nuklearlieferländer für den Nuklearexport
Bulletin Nr. 6, pp. 45 ff., Januar 1978

Rometsch, R.; Lopez-Mencheró, E.; Ryzhov, M.N.; Hough, C.G.;
Panitkov, Yu.

Proceedings of the IAEA Symposium on Safeguarding Nuclear Materials, Vol. I, p. 3-14, Wien 1976

Shipley, J.P.; Cobb, D.D.; Dietz, R.J.; Evans, M.L.; Schelonka, E.P.;
Smith, D.B.; Walton, R.B.

Coordinated Safeguards for Materials Management in a Mixed-Oxide Fuel Facility.
Bericht des Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California LA-6536, UC-15, Februar 1977

Ungerer, W.

Die Rolle internationaler Organisationen bei der Verhinderung mißbräuchlicher Verwendung der Kernenergie.
Beitrag zum Sammelband "Kernenergie und internationale Politik",
R. Oldenburg Verlag, München 1975

Willrich, M.; Taylor, T.B.

Nuclear Theft: Risks and Safeguards.
Ballinger Publ. Comp. Cambridge, Mass., U.S.A., 1974