

I. Allgemeine Einleitung

I. 1. Hintergrund des Gutachtens

Von 1989 bis 1991 wurden in einem Zeitraum von 18 Monaten 5 Fälle von kindlicher¹ Leukämie, 1 Fall kindlicher aplastischer Anämie und 1 Fall von Leukämie eines jungen Mannes in der Samtgemeinde Elbmarsch auf der niedersächsischen Seite des Elbufers diagnostiziert. Die Gesamtzahl der Kinder in der Samtgemeinde beträgt etwa 1600. Damit wurde ein Cluster kindlicher Leukämien entdeckt.

Nicht allein die Größe des Clusters², sondern vielmehr noch seine auffallende Nähe zu dem weltgrößten Siedewasser-Reaktor (SWR, 1316 MW Kapazität) und einem benachbarten, lang bestehenden Kernforschungszentrum mit Versuchsreaktoren hat zu einer Besorgnis in der Öffentlichkeit geführt. Das Kernkraftwerk Krümmel (KKK) und das Forschungszentrum der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffahrt und Schiffbau (GKSS-Forschungszentrum) befinden sich auf der schleswig-holsteinischen Seite des Elbufers direkt gegenüber der niedersächsischen Samtgemeinde Elbmarsch. Beide Bundesländer, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, haben jeweils eine unabhängige Expertenkommission zur Aufklärung der Leukämieerkrankungen in der Elbmarsch berufen.

Die niedersächsische Kommission wurde 1991 mit der Aufgabe der Ursachenaufklärung beauftragt. Diese Kommission war bereits ein Jahr zuvor mit der Aufklärung einer anderen Häufung kindlicher Leukämie in der Stadt Sittensen in Niedersachsen befaßt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde von der Kommission auf Umwelttoxikologie gelegt, einschließlich Innenraumlufbelastungen der Einwohner der betroffenen Gemeinden. Da sich das Kernkraftwerk (KKK) und das Kernforschungszentrum (GKSS) auf schleswig-holsteinischem Gebiet befinden, hat die Fachkommission Schleswig-Holstein die Klärung der Frage zum Ziel, ob die Erkrankungsfälle in ursächlichem Zusammenhang mit dem Betrieb dieser nuklearen Anlagen stehen - eine Frage, die in der Öffentlichkeit diskutiert wird. Sämtliche Untersuchungen der Fachkommission wurden deshalb auf dieses Ziel hin ausgerichtet. Die Untersuchungen wurden in enger Kooperation mit der Expertenkommission Niedersachsens und einer von Niedersachsen zusätzlich gegründeten Arbeitsgruppe Belastungsindikatoren durchgeführt - zur Förderung der aktiven Mitwirkung Niedersachsens an der Untersuchung der schleswig-holsteinischen Fachkommission.

Die Untersuchungen fallen in die drei Kategorien Epidemiologie, Bioindikatoren und Umweltphysik. Da die Bundesländer mit Ausnahme des Saarlandes und Hamburgs bislang keine Krebsregister geführt haben, war es erforderlich, eine Inzidenzerhebung bezüglich der Leukämien durchzuführen, um die statistische Signifikanz der Häufung zu prüfen. Diese Erhebung hat nicht

¹Kinder im Alter bis zu 14 Jahren.

²Die Inzidenz kindlicher Leukämien beträgt in der BRD $4,3 \times 10^{-5}$, d.h. 0,043 Fälle auf 1000 Kinder.

nur die statistische Signifikanz gezeigt und weiterhin auch eine Erhöhung der Erwachsenen-Leukämien binnen eines 5 km-Radius um die nuklearen Anlagen angezeigt. Daraufhin wurde eine Fall-Kontroll-Studie in Auftrag gegeben. In einer quasi-randomisierten Studie an Kindern aus der betroffenen Samtgemeinde und aus einem Kontrollgebiet - entfernt von jeglichen nuklearen Anlagen - wurden die Häufigkeiten der dizentrischen Chromosomen in peripherem Blut untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung war negativ. Im Gegensatz dazu hat eine von der Bürgerinitiative (BI) angeregte Studie an der Universität Bremen, in der die Geschwister von erkrankten Kindern untersucht wurden, eine statistisch gesicherte Erhöhung der Häufigkeit dizentrischer Chromosomen im Vergleich zu historischen Kontrollwerten der Universität Bremen ergeben. Da Tritium und Kohlenstoff-14 als Indikatoren für unzulässige Freisetzungen von Reaktornukliden dienen können, weil sie in Jahreswachstumsringen³ abgelagert werden, wurde die Menge der Inkorporation dieser beiden Nuklide in Holz von Bäumen bestimmt. Auch diese Untersuchung ergab negative Ergebnisse, bis auf eine kleine auffällige Erhöhung der Werte für das Jahr 1986. Eine Nachuntersuchung haben die Kommissionen in Anbetracht des Arbeitsaufwandes nicht empfohlen. In einer von der BI angeregten, vorausgegangenen Pilotstudie ist das Holz einer Kastanie von der anderen Elbferseite, dem KKK direkt gegenüberliegend, auf Tritium untersucht worden. Die Ergebnisse zeigten deutliche Erhöhungen der Tritium-Aktivitäts-Konzentration, die auf neuere Einträge und nicht auf die zurückliegenden oberirdischen Kernwaffentests zurückzuführen waren. Die Auflösung der Meßwerte in einzelne Jahresabschnitte war nicht möglich, weil sie aufgrund der Dichte der Wachstumsringe in Jahresgruppen zusammengefaßt werden mußten. Die Emissionsaufzeichnungen des KKK wurden rückwirkend von einem unabhängigen Institut (Öko-Institut Darmstadt) analysiert ohne Hinweise auf Unregelmäßigkeiten.

Nach einem vorübergehenden Ausbleiben weiterer Fälle sind erneut kindliche Leukämien in der 5 km-Nahzone auf der anderen Elbseite festgestellt worden, womit die Gesamtzahl der Erkrankungsfälle auf 10 oder 11 - je nach Sichtweise - anstieg. Die Zunahme der Erkrankungsfälle, die den negativen Befunden der offiziellen Untersuchungen⁴ entgegenstanden, veranlaßte die Landesregierung von Schleswig-Holstein, jeweils ein technisches und ein strahlenbiologisches Gutachten in Auftrag zu geben. Ersteres hat zum Ziel, nach den

³Pinien und Eichen aus der Elbmarsch, Würgassen (ein anderer Siedewasserreaktor) und Celle, wo kein Kernreaktor im Umkreis von 40 km ist. Da Pinien im Gegensatz zu Laubbäumen auch in Wintermonaten einen Grundumsatz an Photosynthese aufweisen, hoffte man, auch etwaige Radioaktivitätsfreisetzungen im Winter erfassen zu können.

⁴Nichtsdestotrotz haben die BI und einige kritische Mitglieder der Fachkommission abermals darauf hingewiesen, daß verschiedene Radionuklide in der Umgebung, auch wenn sie in genehmigtem Bereich liegen mögen, auf erhöhte Immissionen deuten. Die Situation wurde durch eine Fernsehsendung ("Monitor") verschärft, nachdem Journalisten herausfanden, daß beim Bau des Reaktordruckbehälters des KKK die Hauptteile nicht paßgenau waren und unter hydraulischem Druck zusammengeschweißt werden mußten.

Möglichkeiten unerkannter Emissionspfade zu suchen, und letzteres soll anhand derzeitiger wissenschaftlicher Erkenntnisse feststellen, ob die Strahlenbelastung in der Umgebung eines Kernkraftwerkes, hier des KKK, stochastische (zufällige) Effekte wie kindliche Leukämien verursachen kann.

Tabelle: Erkrankte Kinder in der 5-km-Nahzone um das KKW Krümmel

Fall	Datum	Geb.-Jahr	Geschlecht	Wohnsitz	Diagnose
1	12/89	1982	w	Tespe	Aplast. Anämie
2	02/90	1986	w	Avendorf	(C)-ALL
3	03/90	1981	m	Tespe	ALL
4	04/90	1981	m	Rönne	Monobl.-L (ANLL)
5	01/90	1989	w	Tespe	(C)-ALL
6	04/91	1979	m	Marschacht	AML
7	05/91	1988	w	Avendorf	(C)-ALL

8	09/94	1993	m	Geesthacht	AML (ANLL)
9	07/95	1984	m	Tespe	ALL
10	08/95	1991	m	Geesthacht	ALL
11	06/96	1993	m	Grünhof	ALL

- ALL = Akute Lymphozytäre Leukämie
 (C)-ALL = (common) Akute Lymphozytäre Leukämie
 AML = Akute Myeloische Leukämie
 ANLL = Akute Nicht-Lymphozytäre Leukämie
 Monobl.-L = Monoblastische Leukämie
 Aplast. = Aplastisch
Fall 6 = hier handelt es sich um einen jungen Erwachsenen

I. 2. Aufgaben

Die Aufgaben wurden in drei Hauptfragestellungen formuliert.

Die **erste Frage** ist, ob in dem in der Bundesrepublik und speziell beim Kernkraftwerk Krümmel (KKK) angewendeten Schutzkonzept (Begrenzung bestimmter Abgaben radioaktiver Stoffe durch verschiedene Grenzwerte - siehe Genehmigung KKK - wissenschaftliche

Erkenntnisse über

- die Entstehung und Abgabe radioaktiver Stoffe (in AKW)
 - die Ausbreitung radioaktiver Stoffe
 - die Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper
 - die Wirkung radioaktiver Stoffe im Körper
- fehlgewichtet oder negiert sind, mit der Folge, daß
- die beobachtete Kinderleukämiehäufung in der Elbmarsch durch die genehmigten bzw. gemessenen Abgaben radioaktiver Stoffe (KKK, GKSS) erklärt werden kann?
 - ein zuverlässiger Schutz vor - stochastischen - Strahlenschäden (Leukämie, Krebs) durch den bestimmungsgemäßen Betrieb von AKW nicht gegeben ist?

Die **zweite Frage** ist, ob der in der Elbmarsch beobachtete Leukämietyp ALL (akute lymphozytäre Leukämie) als Folge von Strahlenexposition festgestellt worden ist? Die Begründetheit der Position

- die RERF (Radiation Effects Research Foundation), nach Atombombenabwurf wurden vermehrt AML (akute myeloische Leukämie) und ALL beobachtet;
 - von Prof. Löffler/Prof. Gaßmann, nach medizinischer Bestrahlung wurden nahezu ausschließlich AML beobachtet,
- ist im Detail zu untersuchen. Im Ergebnis soll damit der Expertenstreit,
- ob die ALL bei Kindern durch Strahlung (ggf. in welchem Dosisbereich?) ausgelöst werden kann und
 - in welchem Verhältnis ALL und AML stehen,
- entschieden werden.

Die **dritte Frage** ist, welche Strahlendosis vorgelegen haben muß, um die beobachtete Anzahl der Leukämien zu induzieren?

I. 3. Aufbau und Umfang

Die drei zur Beantwortung gestellten Fragen umfassen diverse Aspekte der medizinischen Strahlenbiologie, des Strahlenschutzes und der Radioökologie, wobei jedes für sich ein umfangreiches Fachgebiet darstellt. Die Behandlung der angegebenen Themen und Fragen überschreitet bei weitem die Fachkompetenz eines jeden einzelnen Wissenschaftlers. Die Mitwirkung einer Vielzahl von Fachleuten wurde daher ausdrücklich gewünscht. Jedoch ist eine Sammlung von getrennten Fachbeiträgen zu einzelnen Themen, wenn auch mit Bezug auf die gestellten Fragen, allein nicht zweckmäßig. Aus diesem Grunde wurde von dem federführenden Gutachter in Einvernehmen mit den Experten der Abteilung für Reaktorsicherheit am Ministerium für Finanzen und Energie ein Gesamtkonzept vorgelegt. Hierfür sind 29 Einzelthemen entwickelt worden mit dem Gedanken, auf diese Weise die erforderlichen

Informationen aus dem derzeitigen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis zu erhalten, um die gestellten Fragen zu beantworten. Die beteiligten Autoren erhielten Hinweise zum inhaltlichen Umfang der jeweiligen Themen. Abgesehen davon waren die Autoren frei in der Ausarbeitung der Themen. Sie bearbeiteten diese nach ihren eigenen Vorstellungen. Die erstellten Einzelbeiträge sind als Original dem Anhang beigelegt. Das vorliegende Gutachten ist von mir als federführendem Autor unter Verwendung der Informationen aus den beigelegten Beiträgen erstellt worden. Somit ist dem Gutachten Konsistenz in der Erarbeitung verliehen worden. Damit ist es keineswegs eine reine Synopse der Einzelbeiträge. Der federführende Autor beansprucht für sich die Freiheit, basierend auf in über drei Jahrzehnten gewachsenen wissenschaftlichen Erfahrungen aus verschiedenen Bereichen der medizinischen Biologie, nach eigenem Wissen gegebenenfalls auch andere Positionen zu vertreten.

Da der Auftraggeber die Abteilung für Reaktorsicherheit am genannten Ministerium ist, ist es nachvollziehbar, daß ein erheblicher Teil des Gutachtens (und entsprechend die Zahl der Einzelbeiträge) sich mit Fragen zum Thema Strahlenschutz befaßt, insbesondere mit Grenzwerten der Emission und Immission von Radioaktivität durch AKW. Obwohl nationale Regierungen in der Grenzwertfestlegung unabhängig sind, werden dennoch die Empfehlungen einiger Internationaler Körperschaften, wie die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP), das Wissenschaftliche Komitee für Ionisierende Strahlungen der UNO (UNSCEAR) und das Komitee für Biologische Effekte Ionisierender Strahlungen der Akademie der Wissenschaften, USA (BEIR) entweder als solche (von zuständigen nationalen Fachkommissionen) übernommen oder zumindest berücksichtigt bei ihren Empfehlungen an die Regierungen zur Umsetzung in nationale Gesetze/Verordnungen. Daher ist für eine Bewertung der nationalen Verordnungen und Grenzwerte - als logische Konsequenz - die Zurückverfolgung der Empfehlungen auf die ursprüngliche Quelle erforderlich. Es bleibt dennoch festzustellen, ob die nationalen beratenden Körperschaften den Fortschritt der Erkenntnisse in ihre Empfehlungen einbeziehen.

Da im Mittelpunkt die Frage steht, ob kindliche Leukämie durch freigesetzte Radioaktivität verursacht werden kann, muß verschiedenen theoretischen Aspekten der Strahleninduktion von Leukämien nachgegangen werden. Ein angeführtes zentrales Argument gegen die Vorstellung einer Strahlenätiologie ist die Art der Leukämie, nämlich ALL, die in der Elbmarsch überwiegend vorgekommen ist. Erkenntnisse auf diesem Gebiet sind aus epidemiologischen Studien entstanden. Konventionelle toxikologische Prinzipien setzen Erkenntnisse über Dosiswirkungs-Beziehungen voraus, da diese als Beweis der Kausalität angesehen werden. Mangels Wissen über die Induktionsdosis oder aufgrund der Nichtbestimmbarkeit wird die statistische Verdopplungsdosis als hinnehmbarer Kompromiß angesehen.

Die einzelnen Punkte der drei Hauptfragestellungen zu den Aufgaben dieses Gutachtens werden hier der Reihenfolge entsprechend abgehandelt. Jede Frage wird als ein Abschnitt für sich behandelt, beginnend mit einer entsprechenden Einleitung, gefolgt von der Abhandlung spezifischer Themen und einer abschließenden Bilanz zu jedem Unterabschnitt. Eine gesamte Zusammenfassung und Schlußfolgerung wurde in Einklang mit einer allgemeinen Einführung

erstellt.

I. 4. Grundsätze der Strahlenwirkung

Strahlung ist die unvermittelte Übertragung von Energie unabhängig vom Medium und sie kommt als elektromagnetische Wellen oder Teilchen mit Ruhemasse vor. Das elektromagnetische Spektrum - ein winziges Fenster davon ist sichtbares Licht - besteht aus Strahlungen unterschiedlicher Energien. Oberhalb des sichtbaren Lichtes mit ansteigender Frequenz und - damit verbunden - zunehmender Energie folgen Ultraviolett-Strahlung, Röntgen- und Gamma-Strahlung. In umgekehrter Richtung mit abnehmender Energie folgen Infrarot Strahlung, Mikrowellen, Radiowellen unterschiedlicher Frequenzen bis hinunter zu extrem niedrigen Frequenzen (Netzfrequenzen der Stromversorgung). Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional zur Frequenz⁵. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit aller elektromagnetischer Strahlung im Vakuum ist gleich. Röntgen- und Gamma-Strahlung interagiert mit Materie auf atomarer Ebene.

Die Wechselwirkung führt zur Anregung oder Ionisation der Atome. Röntgen- und Gamma-Strahlen werden daher zur "ionisierenden" Strahlung gezählt. Die grundlegenden Prozesse dabei sind Photo- und Comptoneffekt. Bei beiden werden Hüllenelektronen freigesetzt und beschleunigt, die ihrerseits Atome ionisieren können. Bei sehr hoch energetischer Strahlung tritt außerdem die Paarbildung auf, die wieder zur Aussendung von Gammastrahlung führt. Zur ionisierenden Strahlung gehören weiterhin die schnellen geladenen Korpuskeln der Radioaktivität (Alpha und Beta), ferner Neutronen, deren ionisierende Wirkung über Sekundärprozesse erfolgt.

Die biologischen Effekte durch Strahleneinwirkung sind von der Höhe absorbierten Energie abhängig. Die Effizienz der Energieübertragung wird in hohem Maße von den Eigenschaften der Strahlung bestimmt. So sind z.B. Alpha-Teilchen mit 2 positiven Ladungen versehen und haben eine Masse von 4 (Heliumkerne). Aufgrund dessen besitzen die Partikel ein extrem geringes Eindringvermögen⁶ und die Energieübertragung pro Wegstrecke ist hoch. Man spricht von "dicht" ionisierender Strahlung (hoher LET). Als Maß für die Energieübertragung wird der Lineare Energie-Transfer (LET) benutzt. Im Vergleich dazu sind Gamma- und Röntgen-Strahlen wie auch hochenergetische Beta-Teilchen nur locker ionisierend (niedriger LET), sie haben dafür aber eine wesentlich stärkere Eindringtiefe (insbesondere Röntgen- und Gamma-Strahlen). Strahlungen wie Neutronen, Niedrig-Energie-Röntgen-Strahlen und Niedrig-Energie-Betateilchen liegen bezüglich des LET etwa dazwischen (moderater LET).

Die Art der Energieübertragung, gekennzeichnet durch den LET-Wert, beeinflusst die biologischen Effekte tiefgreifend. Anders ausgedrückt: für eine gegebene Dosis (absorbierte

⁵Die Frequenz wird angegeben in Hertz, das einer Schwingung pro Sekunde entspricht.

⁶In biologischen Geweben kann diese Eindringtiefe zwischen 10 und 40 Mikrometer liegen, abhängig von der Art des Gewebes und der Energie der Alpha-Teilchen.

Energie pro Gewebemasse)⁷ werden sich die Wirkungen je nach Strahlenqualität (LET) verändern. Um die biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten zu vergleichen, ist Cobalt-60-Gammastrahlung als Referenzstrahlung festgelegt worden. Für die gleiche biologische Wirkung, unter definierten Bedingungen, wird das Verhältnis der Dosis der Referenzstrahlung zur Dosis der Teststrahlung genommen. Den so erhaltenen Faktor nennt man die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW). Im Strahlenschutz wird die unterschiedliche RBW von Strahlung durch den sog. Qualitätsfaktor Q berücksichtigt. Das Produkt aus Energiedosis und Qualitätsfaktor ergibt die Äquivalentdosis in Sv. Die biologischen Wirkung ionisierender Strahlung sind außer von der Dosis im allgemeinen auch von der Dosisleistung (Dosis pro Zeiteinheit) abhängig.

Als Folgen von Niederdosisbestrahlung beim Menschen werden Mutationen und Krebserkrankungen erwartet. Die Dosiswirkungskurven für diese "stochastischen" Schäden werden als schwellenlos angesehen, d.h. bei Verringerung der Dosis besteht immer noch eine endliche Wahrscheinlichkeit für einen Effekt. Bezüglich des Verlaufes der Dosiswirkungskurve im Niederdosisbereich gibt es unterschiedliche Auffassungen. Die ICRP geht davon aus, daß bei locker ionisierender Strahlungen eine linear-quadratische Dosisabhängigkeit besteht⁸, d.h. es gibt einen Anteil des Effektes, der proportional mit der Dosis ansteigt, und einen Anteil, der mit dem Quadrat der Dosis steigt. Bei der Ableitung der Risikofaktoren für strahleninduzierten Krebs aus Daten, die bei höheren Dosen gewonnen wurden, haben sie daher für den Strahlenschutz im Niederdosisbereich einen Reduktionsfaktor - den DDREF (dose and dose rate effectiveness factor) - von 2 verwendet. Eine Reihe von Autoren hält diese Reduktion nicht für gerechtfertigt und favorisiert einen linearen - also dosisproportionalen - Dosiswirkungsverlauf, der unabhängig von der Dosisleistung ist⁹. Bei strahleninduzierten Tumoren gibt es Beobachtungen über einen umgekehrten Dosisseffekt, d.h. obwohl die Dosen immer geringer werden, ist das Vermögen, Krebs zu provozieren, relativ stärker¹⁰. Dieser Effekt kann auch durch eine Herabsetzung der

⁷Die absorbierte Strahlendosis (radiation absorbed dose, rad) = 100 erg g⁻¹ war die frühere Dosis-Einheit. Heute verwendet man das Gray (Gy) = 1 J kg⁻¹ = 100 rad. Damit ist 1 rad = 1 cGy. Die alte Einheit für die absorbierte Äquivalenz-Dosis war das rem (roentgen equivalent medical). Dies ist jetzt die Einheit Sievert (Sv). 1 Sv = 100 rem oder 1 rem = 1 cSv.

⁸ICRP Publication 60, 1990.

⁹Kellerer, A.M. & Breckow, J: Neue Erkenntnisse zur Dosisrelation nach der Revision der Dosimetrie in Hiroshima und Nagasaki und Auswirkungen auf den Strahlenschutz. In Medizinische Physik 88, Nüsslin, F (Hrsg), Deutsche Gesell. Med. Phys. Tübingen 1988, S. 499-513.

¹⁰Nussbaum, R.H. & Köhnlein, W.: Inconsistencies and open questions regarding low dose health effects of ionising radiations, Environmental Health Perspectives 102 (1994) 656-667.

Dosisleistung erreicht werden ^{11,12}.

Wenn die individuelle Strahlendosis eine bestimmte Höhe überschreitet, führt dies zu deterministischen Schäden, die sich in typischen Krankheitsbildern äußern, deren Ausmaß und Verlauf voraussagbar sind. Sie können akut (als Syndrome¹³), binnen Wochen, Tagen oder sogar binnen Stunden auftreten, je nachdem, um welches Syndrom es sich handelt. Wenn die Dosis subletal war und akute Effekte umgangen sind, d.h. die Dosis unterhalb des Schwellenwertes für das empfindlichste Syndrom (das hämatopoetische Syndrom) lag, können nichtsdestotrotz spätdeterministische Effekte immer noch nach Monaten oder sogar Jahren auftreten. Die andere Schadensart sind die stochastischen Schäden, die auf Wahrscheinlichkeiten beruhen und durch die Nicht-Voraussagbarkeit für das Individuum gekennzeichnet sind. In einer Population hingegen sind die solche stochastischen Schäden durchaus voraussagbar, wobei die Genauigkeit der Vorhersage von der Größe der untersuchte Population beeinflusst wird. Stochastische Schäden sind typisch für niedrige Strahlenexpositionen, die Läsionen sind vererbbar. Wenn somatische Zellen Läsionen erhalten, dann kann daraus Krebs folgen, und wenn Keimzellen betroffen sind, dann entsteht ein genetischer Schaden, der auf die folgende Generation übertragen wird. Wie bereits ausgeführt, besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen deterministischen und stochastischen Schäden darin, daß für die letzteren keine Schwellendosen haben.

Die Strahleneinwirkungen auf Organismen können durch externe Quellen (radioaktive Stoffe oder radiologische Apparate) oder interne Quellen (Inkorporationen von Radionukliden) erfolgen. Die Bestrahlung kann als Ganzkörper-, Teilkörper-Bestrahlung oder stark eingegrenzt auf Organbereiche stattfinden. Die daraus entstehenden Schäden und Reaktionen werden entsprechend unterschiedlich sein. Es ist im allgemein nicht möglich, einen menschlichen Körper homogen¹⁴ zu bestrahlen, d.h. die gleiche Dosis auf beliebige Stellen im Körper zu verabreichen. Dieses ist in der Praxis nur annähernd erreichbar. Die Strahleneinwirkung kann auf verschiedenen Ebenen, namentlich auf molekularer, zellulärer, Gewebe-, Organ- und letztlich auf der Ebene des

¹¹Brenner, D.J. & Hall E.J: The inverse dose-rate effect for oncogenic transformation by neutrons and charged particles: a plausible interpretation consistent with published data. *International Journal of Radiation Biology* 58 (1990),745-758.

¹²Crompton, N.E.A., Barth, B & Kiefer, J: Inverse dose-rate effect for the induction of 6-thioguanine-resistant mutants in chinese hamster V 79-S cells by ⁶⁰Co-gamma-rays. *Radiation Research* 124 (1990) 300-308.

¹³Akute Strahlenerkrankungen werden in drei Syndrome klassifiziert: hämatopoetisches, gastrointestinales und neurologisches Syndrom. Die Namen deuten auf das hauptsächlich betroffene Organsystem hin, welches für das Überleben des Organismus ausschlaggebend ist. Die Schwellenwerte für die Syndrome sind verschieden. Er ist am niedrigsten für das hämatopoetische Syndrom und am höchsten für das neurologische oder Nervensyndrom.

¹⁴Dieses ist für bestimmte medizinische Anwendungen erforderlich, z.B. bei der Vorbereitung vor einer Knochenmarkstransplantation.

Gesamtorganismus, untersucht werden. Die physikalischen Prozesse der Strahleneinwirkung erfolgen, wie bereits erwähnt, augenblicklich und im Bereich von Femtosekunden. Molekulare Reaktionen laufen innerhalb von Milli- bis Pikosekunden ab, während biochemische/physiologische Reaktionen von Sekunden bis zu Stunden hin andauern. Die Wirkungskette, die in komplexen Systemen bis zur Ausbildung einer beobachtbaren Erkrankung führen kann, bedingt u.U. lange Latenzzeiten. Abhängig von der Art der interessierenden Effekte kann die Latenzzeit Wochen, Monate, Jahre (für Späteeffekte) und sogar Jahrzehnte (für stochastische Effekte wie Krebserkrankungen) betragen.

Um die Strahleneinwirkung auf der Organ-/Organismus-Ebene zu verstehen, sind Kenntnisse über die funktionelle Organisation von Geweben¹⁵ erforderlich. In den Geweben findet ein ständiger Umsatz¹⁶ von Zellen statt, wobei die Zellumsatzrate in den verschiedenen Geweben äußerst unterschiedlich ist. Organe mit hohem Zellumsatz sind die hämatopoetischen Organe, das Darmepithel und die Epidermis der Haut. Der Zellumsatz wird durch unipotente bzw. multipotente Stammzellen¹⁷ ermöglicht. Nach neueren Erkenntnissen sind auch im erwachsenen Organismus embryonale mesenchymale Stammzellen in bestimmten Gewebsarten vorhanden. Die Gewebe sind im allgemeinen hierarchisch organisiert; multipotente Stammzellen bilden verschiedene Vorläuferzellen mit begrenzter Vermehrungsfähigkeit. Die Nachkommen der Vorläuferzellen reifen zu entsprechenden gewebetypischen funktionellen Zellen. Die Komplexität der Differenzierungsvorgänge ist eine charakteristische Eigenschaft der betreffenden Gewebe. Die Strahlenempfindlichkeit der Zellen in solchen hierarchischen Systemen ist nicht einheitlich, sondern sehr stark abhängig vom Stadium der Differenzierung; weiterhin kann diese zwischen verschiedenen Gewebearten wiederum sehr stark schwanken. Innerhalb einer Gewebeart ist im allgemeinen zu erwarten, daß die Stammzellen strahlenempfindlicher sind als die ausgereiften Zellen. Es kommt sehr häufig vor, daß Vorläuferzellen und spätere Differenzierungsstadien weitaus empfindlicher sind als die Stammzellen selbst.

Wenn ein Säugetier mit einer Dosis ganzkörperbestrahlt wird, die ausreicht, um akute

¹⁵Ein Gewebe wird als eine Zellpopulation gemeinsamer Funktion und Herkunft definiert. Gewebe können als einfach oder komplex angesehen werden. Organe bestehen aus Geweben, und Organismen bestehen aus Organsystemen.

¹⁶Es wurde früher gedacht, daß bestimmte Gewebe, wie die Neuronen im Zentralnervensystem, Herz- und Skelettmuskeln, beim Erwachsenen keine Fähigkeit zur Erneuerung besitzen. Neuere Erkenntnisse weisen darauf hin, daß auch diese eine Erneuerungsfähigkeit aufweisen, wenn auch stark eingeschränkt.

¹⁷Stammzellen sind Zellen, deren Nachkommen sich weiter vermehren und in reife funktionelle Zellen ausdifferenzieren. Embryonale mesenchymale Stammzellen in Erwachsenen besitzen *Omnipotenz*. Die Zahl der Stammzellen in einem Gewebe ist definiert, und diese Population ist selbsterhaltend. Die morphologische Undefinierbarkeit der Stammzellen macht eine Identifikation unmöglich und erschwert den Fortschritt in ihrer Erforschung.

hämatopoetische Effekte hervorzurufen, sind kurzfristige Änderungen (binnen Stunden) im peripheren Blut festzustellen. Die Zahl der Thrombozyten, gefolgt von Lymphozyten und später Granulozyten fällt ab. Der Grund dafür ist, daß diese Zellen - insbesondere die ersteren beiden - auch als reife Zellen sehr strahlenempfindlich sind. Verstärkt wird diese Abnahme noch durch die Tatsache, daß sie im peripheren Blut nur eine kurze Verweildauer aufweisen¹⁸. Die Erythrozyten sind strahlenresistent. Die Stärke der Abnahme ist abhängig von Dosis und Dosisleistung und ein Tiefpunkt wird gewöhnlich nach einigen Tagen erreicht und kann mehrere Tage andauern - wiederum abhängig von Dosis und Dosisleistung - bis eine Regeneration eintritt. In dieser Zeit beginnt auch die Anzahl der Erythrozyten abzufallen. Das Ausmaß ist wiederum abhängig von Dosis und Dosisleistung. Der verzögerte Abfall bei den Erythrozyten ist auf ihre Strahlenresistenz und ihren sehr langsamen Umsatz zurückzuführen. Versagt die Regeneration tritt der Tod aufgrund fehlender Immunkompetenz mit gleichzeitig zunehmender Anämie ein. Diese kann, aufgrund fehlender Thrombozyten, durch petechiale Blutungen begleitet sein.

Das Knochenmark wird zunächst aufgrund absterbender Zellen und beschleunigter Zellreifung von reifen und differenzierenden Zellen entleert. Das Kompartiment der Stammzellen, das normalerweise die hämatopoetische Homöostase lediglich durch eine kleine Fraktion von etwa 5 bis 10 % sich im Zellzyklus befindlicher Zellen aufrecht erhält, wird gezwungen, den Anteil dieser Fraktion durch Rekrutierung ruhender Stammzellen je nach Schadensausmaß - abhängig von Dosis und Dosisleistung - zu erhöhen. Das Stammzellkompartiment stellt sich zunächst selbst wieder her, bevor es Vorläuferzellen zur weiteren Differenzierung produziert. Ein sehr kleiner Anteil überlebender Stammzellen (schätzungsweise um 5%) genügt, um die vollständige Regeneration sicherzustellen. Bei fortschreitender Wiederherstellung wird die im Zyklus befindliche Fraktion der Stammzellen allmählich herabgesetzt. Nach dem scheinbaren Wiedererlangen der Homöostase kann nicht ausgeschlossen werden, daß Monate später eine erneute Krise im Sinne einer gestörten Hämatopoese in Erscheinung tritt. Diese ist als ein spät-deterministischer Effekt anzusehen und ist auf ein Versagen des Stromas zurückzuführen, welches ein eigenständiges Gewebesystem darstellt und für die Hämatopoese durch Aufrechterhaltung eines adäquaten Mikromilieus verantwortlich ist. Der Zellumsatz dieses Gewebes ist äußerst langsam, und die zugehörigen Stammzellen sind relativ strahlenresistent. Sobald das Stroma sich erholt hat, kann die Hämatopoese normal ablaufen, es sei denn, ein drittes Problem tritt hinzu, und das ist die Manifestation stochastischer Effekte wie Leukämie.

¹⁸Die im peripheren Blut befindlichen Lymphozyten (kleine und große) bestehen im Grunde genommen aus zwei sehr heterogenen Zellpopulationen. Der größte Anteil dieser Zellen gehört in der Tat den immunkompetenten Lymphozyten an. Manche dieser sogenannten Lymphozyten sind eigentlich diverse Stammzellen, die sich gerade im Blutkreislauf befinden, hierunter auch hämatopoetische Stammzellen. Die Zellen einiger Gewebsarten sind hämatopoetischen Ursprungs. Die meisten Lymphozyten sind kurzlebig, aber es gibt auch solche, insbesondere aus der T-Zell-Population, die sehr langlebig sein können (Jahre), und weiterhin sind einige Zellen aus dieser Reihe sogar strahlenresistent.

Die subtilen Wechselbeziehungen zwischen absorbierter Dosis, Dosisleistung und individueller Prädisposition bestimmen letztendlich die Auswirkung von Strahlenschäden. Es bestehen Hinweise darauf, daß die Streuung der menschlichen Strahlenempfindlichkeit¹⁹ groß sein muß, und daß individuelle Empfindlichkeit eine Funktion des Alters ist, wobei der Embryo die höchste Empfindlichkeit aufweist. Da die individuelle Strahlenempfindlichkeit nicht bekannt ist, ist eine Vorhersage über die individuelle Reaktion auf Strahlung nur verallgemeinert möglich. Die Datenbasis für die menschliche Erfahrung stammt aus epidemiologischen Analysen der Atombombenüberlebenden in Japan und aus der medizinischen Praxis, insbesondere aus der Strahlentherapie. Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Kenntnisse über die menschlichen Reaktionen auf ionisierenden Strahlungen unzureichend sind.

Dies ist besonders augenfällig, wenn es sich um Expositionen im Niedrigdosisbereich handelt, in dem akute Effekte nicht auftreten. Es ist in der Tat problematisch, die niedrige Strahlenexposition zu definieren. Da im Bezug auf stochastische Wirkungen die Meinung besteht, daß signifikante Effekte erst ab 50 cGy (0,5 Gy) auftreten, werden von manchen Experten Dosen darunter als niedrige Expositionen angesehen. Andere stufen Dosen unterhalb von 10 cGy (0,1 Gy) und noch andere sogar Dosen unter 5 cGy (0,05 Gy) als niedrige Strahlenexposition ein. Es ist auch möglich, die Exposition einer regionalen Bevölkerung durch die natürliche Hintergrundstrahlung, die für diese Region spezifisch ist, als Maß anzusetzen - unberücksichtigt, ob zusätzliche Expositionen anderer Quellen vorliegen. Diese Umweltorientierung wird im vorliegenden Gutachten bevorzugt, nicht obwohl, sondern weil die Kontroversen, ob Strahlendosen gerade oberhalb der Hintergrundwerte Gesundheitsrisiken bergen können, zwischen den Experten anhalten.

I. 5. Quellen der Strahlenexposition

Die Erdkruste besteht aus Mineralien, denen Familien extrem langlebiger Radionuklide angehören, die seit der Entstehung der Erde bis zum heutigen Tag existieren²⁰. Im Verlauf des radioaktiven Zerfalls werden von diesen Nukliden ionisierende Strahlungen ununterbrochen in die

¹⁹In den letzten Jahren wurde für eine ganze Gruppe von ansonsten diskreten einzelnen menschlichen Erkrankungen eine gemeinsame erblich bedingte ätiologische Basis gefunden, welche auf defiziente DNA-Reparaturmechanismen hinweist. Diese Erkrankungen sind folglich durch Chromosomenfragilität gekennzeichnet. Zellen von Patienten einer dieser Erkrankungen, *Ataxia telangiectasia*, können typischerweise DNA-Schäden durch Röntgenstrahlen nicht reparieren, obwohl sie Schäden durch UV-Licht normal reparieren. Da die verantwortlichen Gene dieser Erkrankungen i.d.R. rezessiv sind, bleiben die Heterozygoten in der Bevölkerung unerkant. Die Reaktionen dieser Heterozygoten auf toxische Einwirkungen, insbesondere ionisierende Strahlung, ist ein Thema aktueller Forschung.

²⁰Diese primordialen Radionuklide sind Kalium-40 (HWZ $1,28 \times 10^9$ a), Thorium-232 (HWZ $1,41 \times 10^{10}$ a), Uran-238 (HWZ $4,47 \times 10^9$ a) und Uran-235 (HWZ $7,04 \times 10^8$ a).

Umwelt ausgestrahlt. Hochenergetische kosmische Strahlen aus dem All dringen durch die Atmosphäre und strahlen auf die Erdoberfläche. Somit erhalten Lebewesen eine Exposition aus kosmischen Strahlen. Ein Großteil der kosmischen Strahlung interagiert mit Komponenten aus den oberen Schichten der Erdatmosphäre, wobei Radionuklide entstehen, die schließlich auch in die Biosphäre eindringen²¹. Die natürliche Strahlenbelastung setzt sich zusammen aus externer Bestrahlung durch hochenergetische kosmische Strahlen, Strahlung aus dem Boden und interner Bestrahlung aus inkorporierten Radionukliden: Kohlenstoff-14, Kalium-40, Radium-226, Radon-222 und die kurzlebigen Zerfallsprodukte Blei-210 und Polonium-210.

In der industrialisierten Welt wird die natürliche Strahlenbelastung zusätzlich durch künstlich erzeugte externe und interne Quellen erhöht. Die Anwendung von Strahlungen für medizinische Zwecke, insbesondere die Röntgendiagnostik, stellt den größten Teil der künstlichen Exposition dar. Das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein nuklearer Industrien (insbesondere nukleare Wiederaufbereitungsanlagen) einschließlich Kernkraftwerken in einer Region beeinflusst zweifelsohne die Strahlenbelastung der umliegenden Bevölkerung. Und schließlich bleibt noch zu erwähnen, daß die oberirdischen Kernwaffentests und die Zerstörung von nuklear angetriebenen Satelliten in der Atmosphäre zu einer globalen Umweltkontamination mit sehr langlebigen Radionukliden, wie Plutonium und Americium, geführt und damit zu einer Erhöhung der Strahlenbelastung beigetragen haben. Weiterhin sind großflächige Umweltkontaminationen in bestimmten geografischen Gebieten entstanden, z.B. die nukleare Katastrophe in Tschernobyl, großflächige Kontaminationen durch Mißmanagement von militärischen nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen in Rußland, die RadioJodfreisetzungen bei Hanford in USA, aufgrund von früherer Ignoranz und der nukleare Unfall Three Mile Island in Harrisburg, USA, um nur die prominentesten Beispiele zu erwähnen.

Die nationale mittlere effektive Äquivalentdosis²² für die Bevölkerung bezüglich ionisierender Strahlungen, wird vom Bundesamt für Strahlenschutz, BRD, für das Jahr 1995 näherungsweise wie folgt angegeben:

• Medizinische Anwendungen (inklusive Radionuklide)	0,15 cSv	(1,5 mSv)
• Inhalationen von Radon mit Folgeprodukten	0,14 cSv	(1,4 mSv)
• Kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	0,03 cSv	(0,3 mSv)
• Terrestrische Strahlung (extern)	0,04 cSv	(0,4 mSv)

²¹Diese kosmogenen Radionuklide sind Tritium, Beryllium-7, Kohlenstoff-14 und Natrium-22.

²²Die effektive Dosis ist eine Bestimmungsgröße, die im Bereich des Strahlenschutzes Anwendung findet. Danach wird die Summe der organspezifisch gewichteten Äquivalentdosen gebildet. Die Begründung hierfür ist zum einen die Berücksichtigung der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeiten verschiedener Gewebearten und zugleich die Schaffung einer Grundlage für die Vergleichbarkeit der Strahlenbelastung inkorporierter Radionuklide und externer Bestrahlung.

• Ingestierte natürliche Radionuklide	0,03 cSv	(0,3 mSv)
• Strahlenbelastung aus Tschernobyl	0,002 cSv	(0,02 mSv)
• Fallout von Kernwaffentests	0,001 cSv	(0,01 mSv)
• Betrieb kerntechnischer Anlagen	0,001 cSv	(0,01 mSv)
• Anwendung in Technik und Haushalt	0,001 cSv	(0,01 mSv)
• Berufliche Strahlenexposition	0,001 cSv	(0,01 mSv)
Insgesamt	0,396 cSv	(3,96 mSv)

II. 0. Aufgabe 1, Teil A: Frage über die Zulänglichkeit der wissenschaftlichen Grundlagen der angewandten Grenzwertregelung hinsichtlich Emissionen und Immissionen aus Kernkraftwerken mit besonderem Bezug zum Kernkraftwerk Krümmel (KKK).

II. 1. Einleitung

II. 1. 1. Das 30 mrem (0,03 cSv) Konzept

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) zum Schutz der Bevölkerung vor schädigenden Wirkungen von ionisierenden Strahlungen wurde 1976 in Deutschland - bzw. in den alten Länder der BRD - erstmals eingeführt. Diese ist 1989 revidiert worden und gilt bis zum heutigen Tag. Obwohl die StrlSchV erst 1976 verabschiedet wurde, war in der Zeit zuvor in den alten Bundesländern eine Atomkommission mit einem Ausschuß zuständig für Strahlenschutz tätig. Die Empfehlungen dieses Ausschusses lehnten sich an die Empfehlungen der ICRP an. Der Grenzwert zum Schutz der Bevölkerung nach dem 30 mrem-Konzept²³ ist auf eine ICRP-Empfehlung von 1965²⁴ zurückzuführen, die auf einer Definition der "genetisch signifikanten Dosis"²⁵ der ICRP basiert und vom zuständigen Ausschuß 1969 übernommen und dann in die StrlSchV von 1976

²³30 mrem = 0,03 cSv = 0,3 mSv

²⁴ICRP Publication 9, 1966

²⁵Als "genetisch signifikante Dosis" wurde die Gonaden-Dosis herangezogen, die sich als vererbare Schäden in Folgegenerationen manifestieren. Da die "genetisch signifikante Dosis" zwischen 6 und 10 rem bzw. cSv abgeschätzt wurde, wurde 5 rem bzw. cSv pro Generation (eine Generation als 30 Jahre angenommen) als ein vertretbarer Wert angesehen mit "genügend Spielraum für die Fortentwicklung von Kernenergie-Programmen". Die ICRP (1958, 1965) betrachtete 5 cSv zuzüglich der Belastungen aus dem natürlichen Hintergrund und medizinischer Anwendungen als hinnehmbares zusätzliche Risiko, betonte aber wiederholt, daß "die genetische Dosis auf das geringst Mögliche gehalten werden sollte". In der Überlegung wurde davon ausgegangen, daß im Durchschnitt die Familienplanung bis zu diesem Alter abgeschlossen ist. Der Ausschuß für Strahlenschutz entschied 1969, daß der Gesamtwert von 5 cSv gleichermaßen der natürlichen Hintergrundstrahlung (externe sowie interne), medizinischen Expositionen und Emissionen aus kerntechnischen Anlagen zugeteilt werden soll.