

Kinderkrebs um Atomkraftwerke

Einfluss der Form der Dosis Wirkungsbeziehung auf das Leukämierisiko

Von Alfred Körblein

Bei der Ermittlung des Strahlenrisikos wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die Strahlenwirkung proportional zur Dosis ist. Wenn aber diese Annahme nicht zutrifft und die Strahlenwirkung überproportional mit der Dosis ansteigt, führt eine Mittelung der Dosis dann zu einer Unterschätzung des Risikos, wenn die Dosisbelastung starke örtliche und zeitliche Schwankungen aufweist, wie das charakteristisch für die Strahlenbelastung im Nahbereich von Kernkraftwerken ist. Dies ist der Grundgedanke, der dazu beitragen soll, die Erklärungslücke zwischen den Befunden der KiKK-Studie und dem momentanen Stand des radiobiologischen Wissens zu schließen.

Die Ergebnisse der KiKK Studie geben Rätsel auf. Die Erhöhung der Krebs- und Leukämieinzidenz im Nahbereich von Kernkraftwerken widerspricht um mindestens 3 Größenordnungen den offiziellen Risikoschätzungen. Mögliche andere Risikofaktoren wurden in der KiKK-Studie nicht identifiziert.

Nun gibt es seit längerem Kritik an der Dosisberechnungsmethode, der sogenannten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu Paragraph 47 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), insbesondere im Zusammenhang mit dem

bekanntem Leukämiecluster in der Elbmarsch nahe dem KKW Krümmel. Sie wurde unter anderem im Strahlenbiologischen Gutachten zum Ausdruck gebracht, welches vom Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein 1997 in Auftrag gegeben und 2001

fertiggestellt wurde [1]. Neben dem Hauptgutachter Dr. Stevenson waren daran eine Vielzahl von Experten verschiedener Fachrichtungen beteiligt (insgesamt enthält das Gutachten 30 Anhänge mit Expertenbeiträgen).

Das Gutachten dokumentiert eine Reihe von Schwach-

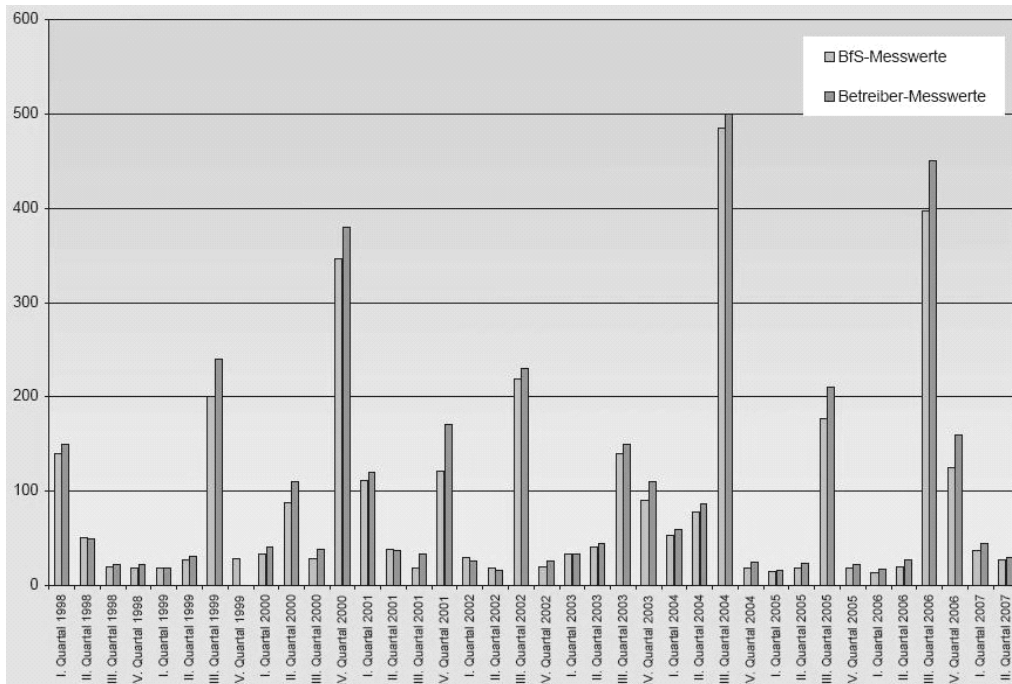


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der C-14 Emissionen des Kernkraftwerks Neckarwestheim (Dreimonats-Mittelwerte). Aus BFS-Jahresbericht 2007

Fig. 2: Isolines of the fallout dispersion coefficient for a height of 150 m

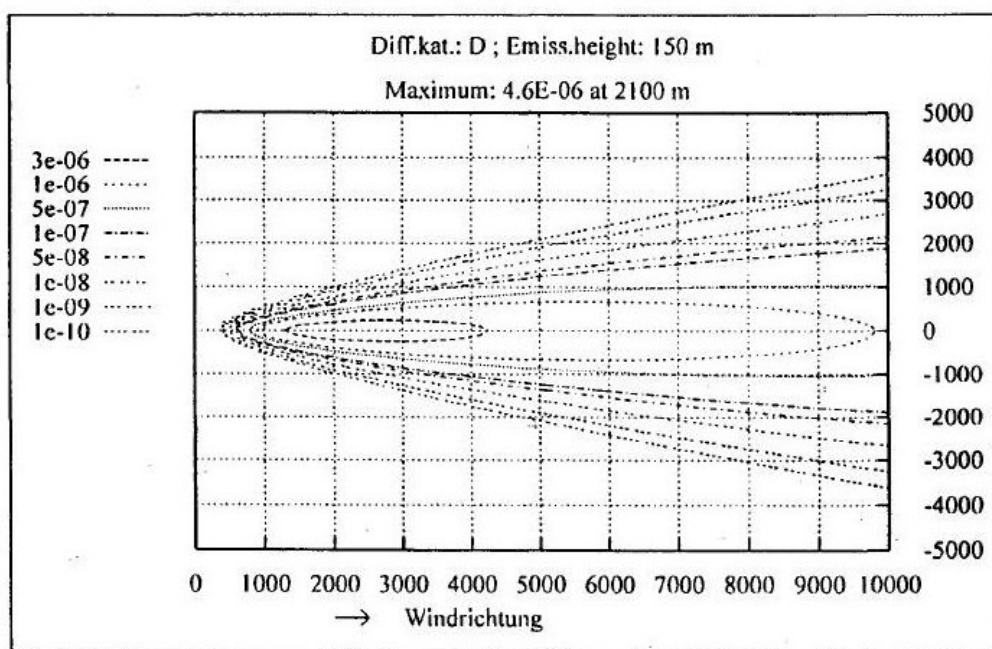


Abbildung 2: Isolinien des Fallout-Dispersionskoeffizienten. Aus O. Schumacher [2].

Model for Leukemogenesis in Children

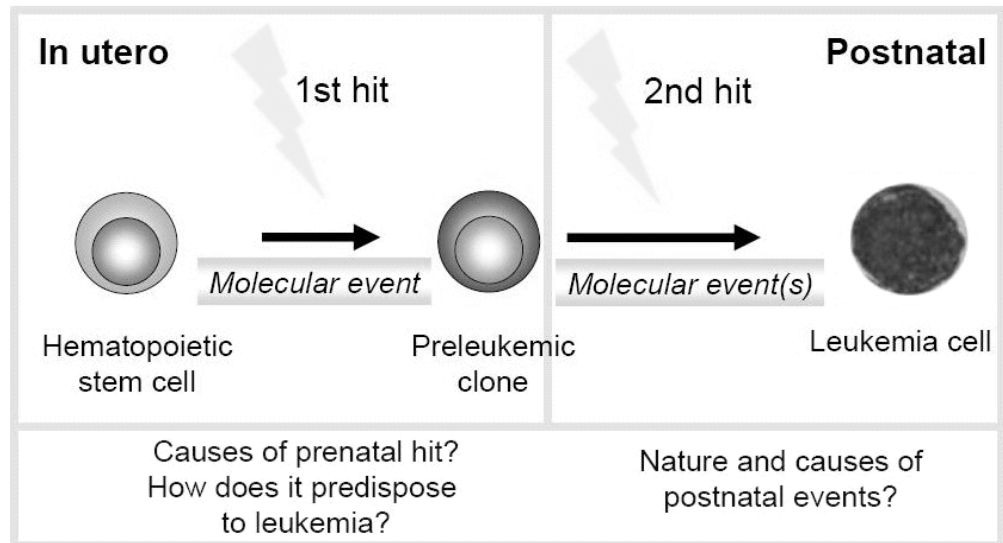


Abbildung 3: Zwei-Hit-Modell der Leukämieinduktion *in utero* (nach Claudia Rössig, Universitätsklinikum Münster).

punkten der Dosisberechnung nach AVV [2]. Die Strahlenschutzverordnung soll sicherstellen, dass die Strahlenexposition einer beliebigen Einzelperson auch unter ungünstigsten Annahmen den Grenzwert von 0,3 Millisievert (mSv) pro Jahr nicht überschreitet. Diesem Anspruch kann die Strahlenschutzverordnung aber nicht gerecht werden, da die Schwankungsbreiten für die in die Rechnung eingehenden Parameter unter Umständen mehrere Größenordnungen annehmen können. Allerdings sollten sich individuelle Unterschiede in der Strahlenbelastung durch räumliche und zeitliche Mittelung teilweise aufheben. Die Genauigkeit der Schätzung der Kollektivdosis hängt dann von der Vollständigkeit der Erfassung der Emissionen, der Korrektheit der Ausbreitungsmodelle, der Vollständigkeit der Expositionspfade und der Richtigkeit der Dosisfaktoren ab. Die Größenordnung einer möglichen systematischen Unterschätzung des Strahlenrisikos ist schwer zu beziffern, sie ist aber sicher sehr viel kleiner als die Schwankungsbreite der individuellen Strahlenbelastung. Dass die Rechnung nach AVV die Kollektivdosis um einen Faktor 1000 unterschätzt, ist schwer vorstellbar. Was wurde bisher übersehen?

Bei der Ermittlung des Strahlenrisikos wird im allgemeinen vorausgesetzt, dass die Strahlenwirkung proportional zur Dosis ist. Wenn aber diese Annahme nicht zutrifft und die Strahlenwirkung überproportional mit der Dosis ansteigt, führt eine Mittelung der Dosis dann zu einer Unterschätzung des Risikos, wenn die Dosisbelastung starke örtliche und zeitliche Schwankungen aufweist, wie das charakteristisch für die Strahlenbelastung im Nahbereich von Kernkraftwerken ist.

Für die quantitative Abschätzung des Effekts mache ich

die folgenden Modellannahmen. Erstens, die Zusatzdosis durch den KKW-Betrieb betrage im Mittel 0,1 mSv pro Jahr, also circa 10 Prozent der Hintergrundstrahlung, und damit 1 bis 2 Größenordnungen mehr als nach AVV berechnet. Zweitens, die Dosis-Wirkungsbeziehung sei positiv gekrümmt. Drittens, die Strahlenbelastung der Anwohner von Kernkraftwerken sei durch große zeitliche und örtliche Schwankungen charakterisiert.

Dass die Emissionen von Kernkraftwerken diskontinuierlich sind, zeigt die Abbildung 1, welche allerdings nur Quartalsmittelwerte darstellt. Tages- oder Stundenabgaben können noch größere Schwankungen aufweisen. Abbildung 2 zeigt die Unterschiede in der örtlichen Belastung innerhalb der Abluftfahne des Kernkraftwerks, die in der gleichen Entfernung einige Größenordnungen betragen können. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die gesamte Strahlenexposition eines Jahres in einem Zehntel der Zeit abgegeben wird und das Strahlenrisiko proportional

zur Dosis hoch 3,5 ist (wie bei der Perinatalsterblichkeit in Deutschland nach Tschernobyl), bewirkt eine im Jahresmittel um 10 Prozent gegenüber der (weitgehend konstanten) Hintergrundstrahlung erhöhte Strahlenbelastung ein um 103 Prozent erhöhtes Strahlenrisiko.

Wie ließe sich nun eine gekrümmte Form der Dosis-Wirkungsbeziehung strahlen-

biologisch erklären? In meiner Arbeit zur Sterblichkeit von Neugeborenen in Deutschland nach Tschernobyl fand ich eine nicht-lineare Beziehung zwischen Perinatalsterblichkeit und der Cäsiumbelastung der Schwangeren [3]. Der Zusammenhang konnte am besten durch eine Potenzfunktion mit dem Exponenten 3,5 (95% Vertrauensbereich 1,5 bis 7,5) beschrieben werden.

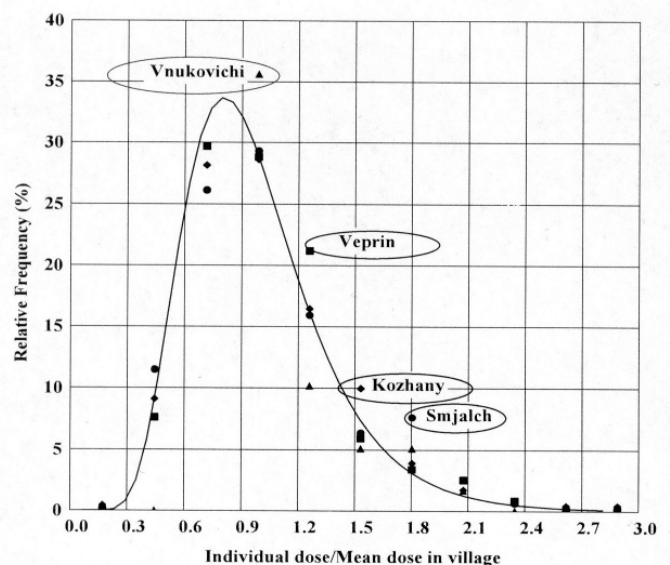


Abbildung 4: Dosismessungen an Bewohnern aus Siedlungen im Gebiet Bryansk, Russland, und Lognormalverteilung

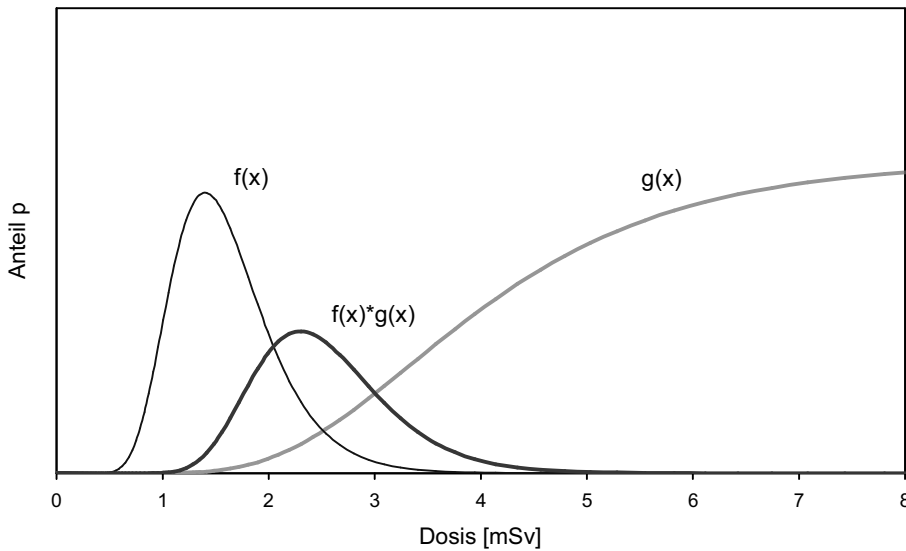


Abbildung 5: Angenommene Verteilungskurven: Dosisverteilung $f(x)$, Strahlenempfindlichkeit $g(x)$ und Produktterm $f(x) \cdot g(x)$. Die Fläche unter $f(x) \cdot g(x)$ ist proportional zur Zahl geschädigter Individuen.

Für die Dosisabhängigkeit der Schadenswahrscheinlichkeit (Strahlenempfindlichkeit) wird eine kumulierte Lognormalverteilung $g(x)$ angenommen. Der Anteil p geschädigter Individuen an der Gesamtzahl der Mitglieder des Kollektivs ist dann das Integral über $f(x) \cdot g(x) \cdot dx$ von $x = 0$ bis ∞ (Abbildung 5).

Im folgenden wird eine numerische Integration durchgeführt für 5 Werte des Medianwerts der Dosis ($\mu = 1,0$ bis $1,8$ mSv) und für eine geometrische Standardabweichung $\sigma = 0,3$. Für die Strahlenempfindlichkeit $g(x)$ wird $\mu = 4$ mSv und $\sigma = 0,4$ angenommen (Abbildung 6). Die Rechnung ergibt für die 5 Integrale die folgenden Werte:

μ (mSv)	p
1,0	0,0056
1,2	0,0149
1,4	0,0311
1,6	0,0551
1,8	0,0867

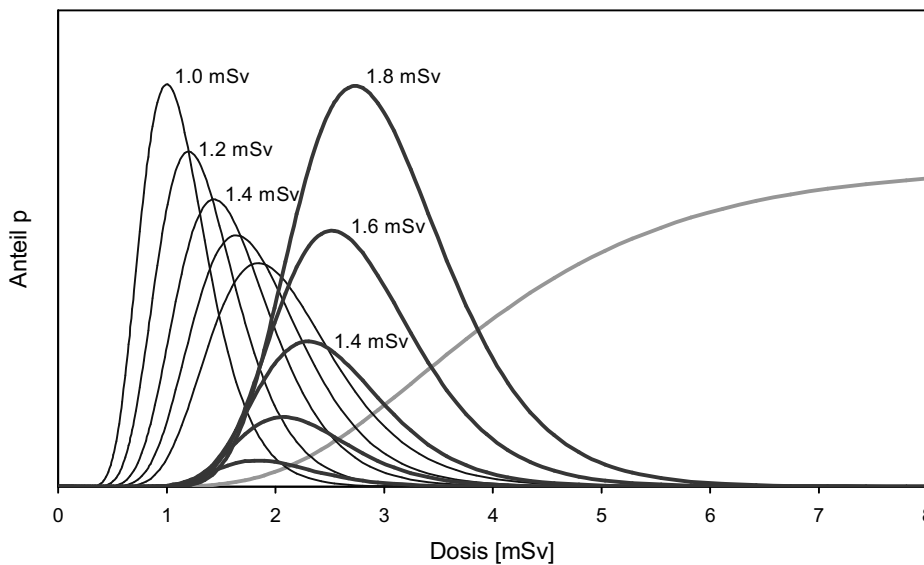


Abbildung 6: Verteilungskurven für fünf Medianwerte der Strahlendosis (1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 mSv) und für die Strahlenempfindlichkeit. Die Fläche unter den Kurven für den Produktterm $f(x) \cdot g(x)$ ist proportional zur Zahl geschädigter Individuen.

Der Zusammenhang zwischen Strahleneffekt p und Dosis x kann durch eine Potenzfunktion $p \sim x^n$ mit $n = 4,2$ beschrieben werden. Eine deutlich bessere Anpassung gelingt aber mit einer kumulierten Lognormalverteilung. Die Summe der Fehlerquadrate (ein Maß für die Güte der Anpassung) verringert sich um mehrere Größenordnungen von $8,6 \cdot 10^{-6}$ auf $1,6 \cdot 10^{-9}$. Der Medianwert ergibt sich zu $3,55$ mSv und die Standardabweichung zu $0,50$.

Außerdem zeigte sich eine Verschiebung von 6 bis 8 Monaten zwischen den Maxima der Cäsiumbelastung und den Maxima der Perinatalsterblichkeit. Das bedeutet eine Schädigung des Embryos in der besonders empfindlichen Hauptorganbildungsphase. Stark gekrümmte Dosis-Wirkungsbeziehungen fanden sich auch bei Fehlbildungen in Bayern nach Tschernobyl [4] und bei Totgeburten in Cardiff, wo eine pharmazeutische

Fabrik sehr hohe Tritiumemissionen aufweist (A. Körblein, unveröffentlicht).

Auch Leukämien können pränatal durch Strahlung induziert werden. Wie in Abbildung 3 skizziert, kann eine hämatopoetische Stammzelle in utero durch einen ersten „Hit“ in einen präleukämischen Clon verwandelt werden, aus dem postnatal nach einem zweiten Hit eine Leukämiezelle entsteht.

Nehmen wir an, die individuelle Dosisbelastung innerhalb eines bestrahlten Kollektivs sei durch eine Lognormalverteilung $f(x) = 1/(x \cdot \sigma \cdot (2\pi)^{1/2}) \cdot \exp(-(\ln(x) - \ln(\mu))^2 / 2\sigma^2)$ gekennzeichnet, wo x die Dosis, μ der Medianwert der Verteilung und σ die geometrische Standardabweichung ist. Eine solche Verteilung fand sich bei Ganzkörpermessungen in betroffenen Regionen nahe Tschernobyl (Abbildung 4).

Um zu prüfen, welches der beiden konkurrierenden Modelle (Potenzansatz oder Lognormalverteilung) den Verlauf der Dosis-Wirkungsbeziehung besser beschreibt, werden nun nur die ersten 3 Datenpunkte der obigen Tabelle ($\mu = 1,0$ bis $1,4$ mSv) für die Schätzung der Parameter herangezogen. Dann wird verglichen, welches der beiden Modelle den weiteren Verlauf der Daten besser prognostiziert. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der

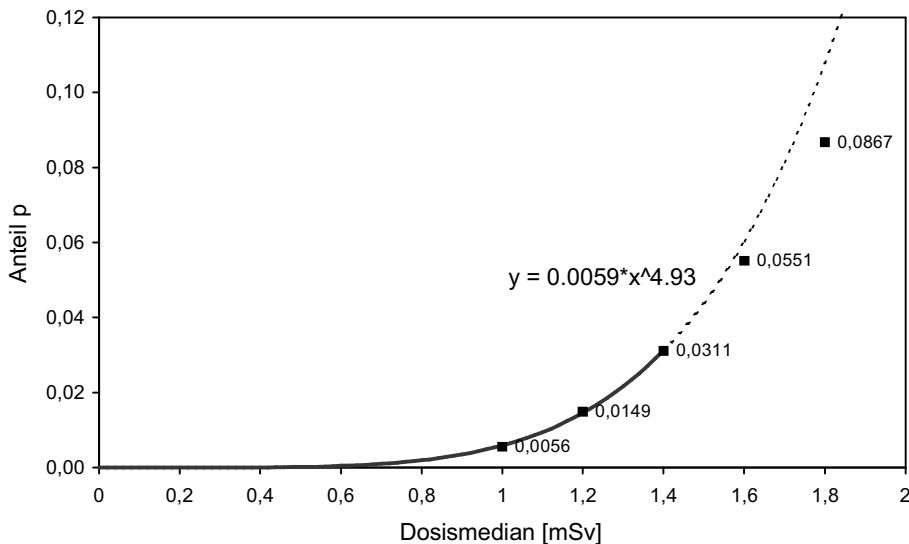


Abbildung 7: Anteil p geschädigter Individuen für 5 Werte des Medians der Strahlendosis und Ergebnis einer Regression im Dosisbereich 1-1,4 mSv mit einem Modell, bei dem der Dosisexponent aus den Daten geschätzt wird. Die gepunktete Linie ist die Extrapolation zu höheren Dosiswerten.

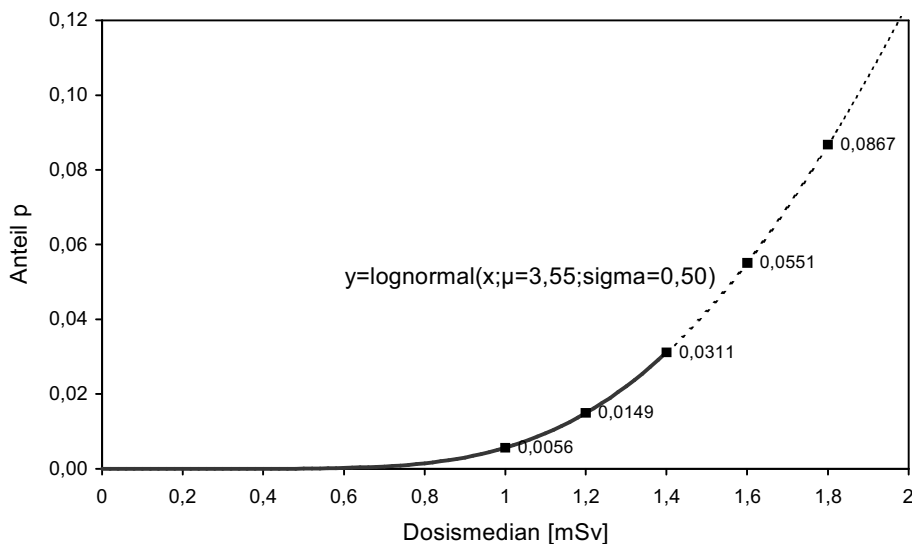


Abbildung 8: Anteil p geschädigter Individuen für 5 Werte des Medians der Strahlendosis und Ergebnis einer Regression im Dosisbereich 1-1,4 mSv mit einer Lognormalverteilungsmodell. Die gepunktete Linie ist die Extrapolation zu höheren Dosiswerten.

Anpassung mit der Potenzfunktion. Die beste Schätzung für den Exponenten ist $n=4,9$. Die Prognosewerte für $\mu=1,6$ und $\mu=1,8$ liegen deutlich über den Werten in der obigen Tabelle. Mit dem Lognormalverteilungsmodell stimmt die Prognose dagegen exakt mit dem Ergebnis der Rechnung (Punkte) überein (Abbildung 8).

Das hier vorgestellte Modell soll zeigen, dass ein ursächli-

cher Zusammenhang zwischen Strahlenbelastung und den in der KiKK-Studie beobachteten erhöhten Leukämieraten um Kernkraftwerke durchaus vorstellbar ist. Dies widerspricht der Aussage der Autoren der KiKK-Studie, dass die Ergebnisse grundsätzlich nicht mit den Emissionen der Kernkraftwerke zu erklären seien. Das Modell beruht auf einer überproportionalen Strahlenwirkung infolge einer stark gekrümmten Dosis-Wirkungs-

beziehung einerseits und zeitlich und örtlich fluktuierenden Strahlenbelastungen andererseits. Die Krümmung der Dosis-Wirkungsbeziehung folgt allein aus der plausiblen Annahme, dass sowohl die individuellen Dosisbelastungen als auch die Strahlenempfindlichkeiten in einem Kollektiv zufallsverteilt sind. Das Modell kann die erhöhte Leukämieinzidenz bei Kleinkindern zumindest teilweise erklären. Allerdings wurde vorausge-

setzt, dass die Berechnungen nach AVV die mittlere Strahlenbelastung im Nahbereich von Kernkraftwerken um mindestens eine Größenordnung unterschätzen.

1. Stevenson AFG: Strahlenbiologisches Gutachten. http://www.strahlentelex.de/_03_Hauptgutachten_Stevenson--vollstaendig.pdf
2. Schumacher O. Zuverlässigkeit der AVV hinsichtlich der Emissionsausbreitungs-Berechnungen und Dosisermittlung. Anhang zum strahlenbiologischen Gutachten. http://www.strahlentelex.de/_C1_Zuverlaessigkeit_der_AVV_Schumacher_O.pdf
3. Körblein A, Küchenhoff H. Perinatal Mortality in Germany following the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys* 1997; 36 (1): 3-7.
4. Küchenhoff H, Engelhardt A, Körblein A in: Health Effects of the Chernobyl Accident. European Committee on Radiation Risk (2006). Eds: CC Busby and AV Yablokov. http://www.greenaudit.org/ecrr_2006_chernobyl_2_0_years_on.htm