

# Abschlussbericht (V2)

## Untersuchung und Bewertung des Detrimentbegriffs im Strahlenschutz

Bearbeiterin: B.Sc. Samaneh Emami  
Projektleiter : Prof. Dr. Joachim Breckow

Vorhaben (FKZ) : 3615 S 72264

*Dieser Bericht ist barrierefrei gemäß der ISO-Norm 14289-1:2012-07 (PDF/UA).  
Barrierefreie Aufbereitung durch das Bliz ([www.thm.de/bliz](http://www.thm.de/bliz)) an der Technischen  
Hochschule Mittelhessen.*

*Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss  
nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Projektziel</b> .....	<b>7</b>
<b>3 AP1: Aufbereitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik</b> ..	<b>9</b>
3.1 Grundlagen.....	9
Stochastische Strahlenwirkungen .....	9
Risiko und Risikoeffizient RI .....	10
Detriment (Schadensmaß) .....	11
3.2 Historische Entwicklung des Schadensmaßes "Detriment" .....	15
Detriment-Modell nach ICRP 26 .....	15
Detriment-Modell nach ICRP 60 .....	15
3.3 Detriment-Modell nach ICRP 103 .....	18
<b>4 AP2: Untersuchung der eingehenden Annahmen und alternativer Konzepte</b> .....	<b>22</b>
4.1 Vorstellung der Beobachtungsgruppen und des Untersuchungszeitraums ....	22
4.2 Berechnung der strahlungsunabhängigen Parameter .....	23
Verlust an Lebenserwartung .....	23
Krebsletalitätsfaktor $k_T$ .....	34
Verlust an Lebensqualität $q_T$ :.....	38
4.3 Abhängigkeit des Detriments von der Krebsletalität .....	40
Deutschland .....	40
4.4 Berechnung des Detriments im Zeitraum von 1980 bis 2012 in zwei Beobachtungsregionen .....	43
Deutschland .....	43
USA.....	45
4.5 Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des Detriments und des Letalitätsfaktors .....	46

Deutschland .....	46
USA .....	53
4.6    Andere Modelle zur Schadensentwicklung.....	58
Health-adjusted life expectancy (HALE) .....	58
Quality Adjusted Life Years (QALY).....	59
Disability Adjusted Life Years (DALY).....	61
<b>5    Abschließende Betrachtung .....</b>	<b>66</b>
<b>Literatur... .....</b>	<b>68</b>

**Anhang**

**Die Berechnung des Detriments für ausgewählte Krebserkrankungen innerhalb der Zeit 1980-2012-Deutschland**

**Die Berechnung des Detriments für ausgewählte Krebserkrankungen innerhalb der Zeit 1980-2012-USA**

## Zusammenfassung

Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP definiert in ihren Empfehlungen ICRP 103 ein Maß für das strahleninduzierte Zusatzrisiko für stochastische Strahlenwirkungen, das so genannte "Detriment" (Schadensmaß). Hierbei handelt es sich um das Produkt aus den Risikoeffizienten für einzelne Organe bzw. Krebsarten und der Schadenshöhe und damit um ein mit der Schadenshöhe gewichtetes Risiko pro Dosis. Während die Risikoeffizienten von den Bedingungen der Strahlenexposition abhängen, ist die Schadenshöhe davon unabhängig. Im ICRP-Detriment-Modell gehen in die Schadenshöhe als Parameter der Letalitätsfaktor, der relative Verlust an Lebenserwartung und die Einschränkung an Lebensqualität ein. Alle diese Parameter sind einer zeitlichen Entwicklung unterworfen, die sowohl durch eine Veränderung der Krebsentwicklung in der Bevölkerung als auch vom Fortschritt in der medizinischen Diagnostik und Therapie bestimmt wird.

Die Schadenshöhe und damit das Detriment wird als wesentlicher Parameter durch den Letalitätsfaktor bestimmt. Dieser gibt für jede betrachtete Krebsart das Verhältnis von Mortalität zu Inzidenz an. Im betrachteten Zeitraum von 1980 bis 2012 ging die Letalität in Deutschland für die Gesamtheit aller Krebsarten um 45% zurück, während der Rückgang in den USA im gleichen Zeitraum nur 24% betrug.

Das Gesamt-Detriment verringerte sich im betrachteten Zeitraum in Deutschland um 20%. Unter Ausschluss von Hautkrebs betrug der Rückgang 12%. Die Entwicklung des Detriments in den USA folgt einem ähnlichen Muster. Dort beträgt der Rückgang im gleichen Zeitraum 31% und unter Ausschluss von Hautkrebs 12%.

Neben dem ICRP-Detriment-Modell im Strahlenschutz gibt es in anderen Bereichen, vor allem in bestimmten Gebieten der Medizin, Soziologie und Ökonomie, weitere Methoden, die einen quantitativen Vergleich verschiedener Erkrankungen bzw. Schadenswirkungen ermöglichen. Zur Bewertung von Gesundheitsauswirkungen bzw. Krankheitsbelastungen durch Umwelt-, Ernährungs- oder Arbeitseinflüsse kommen dabei unterschiedliche Kennzahlen wie beispielsweise die Health-Adjusted Life Expectancy (HALE), die Quality Adjusted Life Years (QALY) oder die Disability Adjusted Life Years (DALY) zum Einsatz. Ebenso wie das Detriment der ICRP beschreiben auch diese

Kenngößen ein gewichtetes, durch einen bestimmten Einflussfaktor verursachtes Risiko. Auch sie berücksichtigen sowohl Mortalitäts- als auch Inzidenzparameter. Obwohl sich die Art der Gewichtung unterscheidet, geht auch der Verlust an Lebenserwartung in die Definition der Kenngößen ein. Allerdings unterliegen sie einem geringeren Differenzierungsgrad hinsichtlich der Angabe einzelner Krebsarten. Im Gegensatz zum Detriment lassen sich damit also einzelne Krebsarten nicht hinsichtlich ihres Schweregrads unterscheiden bzw. vergleichen.

## 1 Einleitung

Strahlenwirkungen durch ionisierende Strahlen lassen sich in zwei Klassen unterteilen, die sich sowohl in Bezug auf ihre zeitliche Ausprägung, als auch im Hinblick auf die Art der Strahlendosisabhängigkeit unterscheiden. Deterministische Schäden sind akute Schäden, die in Abhängigkeit von der Dosis relativ früh nach der Strahlenexposition auftreten können und deren Schweregrad von der Strahlendosis abhängt. Diese Art von Schäden weist eine Schwellendosis auf, unterhalb derer ein Effekt nicht auftritt. Stochastische Schäden hingegen weisen keine Schwellendosis auf und können schon bei sehr geringen Dosen auftreten. Sie sind die Folge zufallsgesteuerter Prozesse und treten als Folge von Veränderungen der genetischen Information einer Zelle auf. Führt eine DNA-Schädigung zu einer Mutation in den Keimzellen, so kann es auch zu Schädigungen der Nachkommenschaft kommen. Das in diesem Bericht behandelte "Detriment" beschreibt den gesamten Gesundheitsschaden einer exponierten Personengruppe und deren Nachkommen in Bezug auf stochastische Strahlenschäden.

In der Veröffentlichung 26 der ICRP aus dem Jahr 1977 wurde der Begriff "Detriment" erstmals als Maß des Gesamtschadens eingeführt [1]. Dabei handelt es sich um eine gewichtete Größe, die die Schwere der Strahlenwirkung für einzelne Organe beschreibt. Die Empfehlung der ICRP 103 aus dem Jahr 2007 bringt den Begriff Detriment, abhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit für einen stochastischen Effekt und vom Gewebe aber auch von nicht-strahlungsabhängigen Parametern, auf den Stand der verfügbaren wissenschaftlichen Kenntnisse zur Physik, Biologie und Epidemiologie der Strahlenwirkung [2].

Der Einfluss der ionisierenden Strahlung unterscheidet sich, unabhängig von der Höhe der Energiedosis auf die Gewebe, von einem Organ zum anderen. Deshalb ist es erforderlich, eine gewebespezifische Gewichtung hinsichtlich der Schwere des Schadens vorzunehmen. Die ICRP definiert hierfür die Effektive Dosis als die Summe der mit den Gewebe-Wichtungsfaktoren multiplizierten Organdosen (künftig gemäß DIN 6814-3 "Organ-Äquivalentdosis" genannt). Die Organdosen werden gewebespezifisch und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten bei einer Bestrahlung mit gleicher Energiedosis bestimmt. Die Gewebe-Wichtungsfaktoren entsprechen dem Anteil des Strahlenrisikos, der sich aus einer

Bestrahlung eines Gewebes oder Organs am Gesamtrisiko ergibt. Der Begriff "Detriment" dient als Grundlage für die Bestimmung dieser Faktoren.

In die Definition des Detriments gehen neben den strahlungsabhängigen Größen auch verschiedene Parameter ein, die nicht von der Strahlung, sondern vielmehr von der Schwere der (Krebs-)Erkrankung oder vom medizinischen Fortschritt in der Krebsdiagnostik und -therapie abhängig sind. Zu diesen gehören z.B. der zu erwartende Verlust an Lebenszeit und der Verlust an Lebensqualität. Anders als die strahlungsabhängigen Größen haben sich diese Parameter im Laufe der Zeit geändert.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts sollen zunächst die grundlegenden Konzepte, die zur Definition des Detriments geführt haben, sowie deren historische Entwicklungen dargestellt werden. Danach werden die zu erwartenden Änderungen der strahlungsunabhängigen Parameter innerhalb von mehreren Jahrzehnten in verschiedenen Beobachtungsregionen untersucht. Schließlich soll das Detriment als Funktion der verschiedenen Eingangsgrößen sowie in seiner zeitlichen Entwicklung beschrieben und diskutiert werden.

## 2 Projektziel

Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP definiert in ihren Empfehlungen ICRP 103 [2] ein Maß für das strahleninduzierte Zusatzrisiko für stochastische Strahlenwirkungen, das so genannte "Detriment" (Schadensmaß). Hierbei handelt es sich um eine mehrfach gewichtete Größe, in die neben den Risikokoeffizienten auch Wichtungsfaktoren eingehen, die unabhängig von der Strahlung sind. Im Rahmen des Vorhabens werden die zugrundeliegenden Konzepte unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung strahlungsunabhängiger Gesundheitsparameter kritisch untersucht und bewertet. Zusätzlich wird geprüft, ob es relevante alternative Konzepte gibt. Ziel ist es, die Voraussetzung zu schaffen, das Konzept an den aktuellen wissenschaftlichen Stand anzupassen.

Ziel des abgeschlossenen Arbeitspakets 1 (AP1) ist die Herausarbeitung der grundlegenden Konzepte, die zur Definition des Detriments geführt haben, sowie deren historische Entwicklung. Insbesondere wird das Detriment als Funktion der verschiedenen Eingangsgrößen beschrieben und diskutiert. Es wird beschrieben, welche Motive bestanden und weiterhin bestehen, ein Schadensmaß zu definieren, in das sowohl fatale ("tödliche") als auch nicht-fatale ("nicht-tödliche") Anteile des stochastischen Risikos eingehen. Es wird das von der ICRP entwickelte Modell des Detriments und seine Parameter sowie dessen historische Entwicklung eingehend beschrieben. Ziel des Arbeitspakets 2 (AP2) ist festzustellen, wie sich insbesondere die von Strahlung unabhängigen Eingangsgrößen seit der Festlegung in der ICRP-Veröffentlichung 103 [2] verändert haben und inwiefern die dort getroffenen Annahmen auf die Situation in Deutschland zutreffen. Die Auswirkung eventueller Veränderungen und Unterschiede auf das Detriment werden bestimmt und diskutiert.

Es wird eine ausführliche Datenrecherche durchgeführt bezüglich der Gesundheitsdaten, die in das Detriment Eingang finden. Insbesondere werden Daten zur zeitlichen Entwicklung von Krebsraten für verschiedene Krebsarten bzw. Organe herangezogen. Datenquellen sind u.a. das Statistische Bundesamt, das Robert-Koch-Institut (RKI) in Berlin, das Saarländische Krebsregister sowie das National Cancer Institute und das Research Data Center der USA. Aus den Mortalitäts- und Inzidenzdaten werden jahres-



weise im Zeitraum von etwa 1980 bis 2012 und für 12 einzelne Krebsarten die Letalitätsfaktoren, sowie der absolute und der mittlere Verlust an Lebenserwartung berechnet. Aus diesen Parametern wird das Detriment nach ICRP 103 [2] bestimmt<sup>1</sup>. Es werden die zeitliche Entwicklung des Detriments sowie beispielhaft einige ausgewählte Krebserkrankungen innerhalb der Beobachtungszeit (1980-2012) und auch die Abhängigkeit des Detriments vom Letalitätsfaktor auf der Basis des aktuellen Stands der Detriment-Berechnung untersucht. Schließlich wird untersucht, ob es andere Modelle außerhalb des Strahlenschutz-Bereichs gibt, welche auch eine Schadensgewichtung beschreiben und deshalb mit möglichen Modifikationen für das ICRP-Modell relevant sein können. Hier ist das Ziel, die Gegenüberstellung von Risikovergleichen bzw. Grenzwertvergleichen im Strahlenschutz relativ zu anderen Bereichen, beispielsweise des Umweltschutzes, zu ermöglichen.

---

<sup>1</sup> Die Berechnungen für einzelne Jahre werden als Anhang beigefügt. Innerhalb des Textes werden diese exemplarisch für das Jahr 2012 in Deutschland dargestellt.

---

### **3 AP1: Aufbereitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik**

#### **3.1 Grundlagen**

##### **Stochastische Strahlenwirkungen**

Die Energiedeposition im Gewebe durch ionisierende Strahlung ist ein stochastischer Prozess (Zufallsprozess). Auch sehr niedrige Energiedosen können bereits bestimmte DNA-Schädigungen zur Folge haben. Werden diese Schädigungen nicht korrekt repariert, kann sich, wenn die Teilungsfähigkeit der Zelle nicht beeinträchtigt ist, daraus Krebs entwickeln. Eine entsprechende Veränderung der genetischen Informationen an den Keimdrüsen kann zu Erbschäden führen. Die Gesamtheit dieser Schädigungen bezeichnet man als "Stochastische Strahlenwirkung", da ihr Auftreten eine durch zufallsbedingte Prozesse bestimmte Größe ist.<sup>1</sup> Die in einer Zelle bzw. in einem Zellkern deponierte Energie ist in der Regel unabhängig von der Dosis, während die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zelle bzw. ein Zellkern getroffen wird, mit der Dosis zunimmt. Der Strahlenschaden im Eintrittsfall selbst, d.h. die Krebserkrankung und deren Verlauf, sind dosisunabhängig. Deswegen weisen stochastische Strahlenwirkungen, anders als die deterministische Strahlenschäden, keine Schwellendosen auf, unterhalb derer die Strahlung völlig unwirksam bliebe.

Die im Folgenden behandelten, gewebespezifischen Folgeschäden werden mit dem Index  $T$  (von englisch tissue) bezeichnet. Für die beschriebenen Organe wird damit jeweils eine Krebsart betrachtet, weshalb der Index  $T$  gleichbedeutend auch als Index für die verschiedenen Krebsarten verwendet wird.

---

<sup>1</sup> Obwohl in ICRP 103 auch ein Detriment für Erbschäden angegeben wird, unterliegt es doch qualitativ anderen Begründungen als das Detriment für Krebserkrankungen. Im vorliegenden Bericht wird demnach nur das Detriment-Modell für stochastische Wirkungen berücksichtigt, die zu Krebserkrankungen führen. Für Erbschäden werden keine Berechnungen durchgeführt.

## Risiko und Risikoeffizient $R_I$

Eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes ist es, durch Vorgabe wissenschaftlich begründeter Dosisgrenzwerte deterministische Wirkungen auszuschließen und das Risiko für stochastische Strahlenschäden in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Im Strahlenschutz versteht man im Allgemeinen unter "Strahlenrisiko" die quantitative Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit für einen durch Strahlenexposition verursachten stochastischen Effekt (Krebserkrankung oder Erbschaden). Diese Eintrittswahrscheinlichkeit ist neben der Dosis von einer Vielzahl von weiteren Variablen abhängig, vor allem aber vom Geschlecht, vom Alter bei Exposition und vom erreichten Alter ("hazard" function). Die Risikoerhöhung pro Dosisinkrement (bzw. die Steigung der Risikofunktion) in einer Dosis-Wirkungsbeziehung wird als Risikoeffizient  $R_I$  bezeichnet. Auch der Risikoeffizient kann vom Geschlecht, vom Alter und von weiteren Parametern abhängig sein. Im Allgemeinen ist auch er dosisabhängig. Nur bei Zugrundelegung der LNT-Hypothese (Linear, No-Threshold) ist der Risikoeffizient unabhängig von der Dosis.

Die Risikoeffizienten für strahleninduzierte stochastische Wirkungen werden im Wesentlichen durch Auswertung epidemiologischer Studien im Bereich oberhalb einiger 10 mSv ermittelt. Um auf Aussagen im für den Strahlenschutz wichtigen Bereich von einigen mSv oder einigen 10 mSv zu kommen, ist man daher auf Extrapolationen vom hohen in den niedrigen Dosisbereich angewiesen. Diese Extrapolation geschieht unter Einbeziehung strahlenbiologischer Ergebnisse, mechanistischer Studien und biophysikalischer Modelle, auf deren Grundlage Wirkungsmechanismen aufgedeckt werden und in die Beschreibung der (qualitativen) Form einer Dosis-Wirkungsbeziehung im Bereich kleiner Dosen einfließen. Die Steigungen der so extrapolierten Dosis-Wirkungsbeziehungen ergeben die u. U. dosisabhängigen Risikoeffizienten im kleinen Dosisbereich. Das Verfahren einer solchen Extrapolation, d.h. das Zugrundelegen der LNT-Hypothese oder die Annahme von nichtlinearen Zusammenhängen, das Anwenden eines Dosis- und Dosisleistungseffektivitätsfaktors (DDREF) usw., ist jedoch nach wie vor in der Diskussion [3]. Diese Diskussionen sind jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts.

In den großen epidemiologischen Studien werden in der Regel Dosis-Wirkungsbeziehungen und Risikokoeffizienten für die wichtigsten Krebslokalisationen jeweils getrennt für Frauen und Männer verschiedener Altersklassen ermittelt. Wird über alle Alter und beide Geschlechter gemittelt, ergibt sich daraus das mittlere zusätzliche Lebenszeitrisiko pro Dosis(-inkrement). Die Tatsache, dass es sich hierbei um auf Extrapolationen beruhenden Schätzungen für eine "nominelle" über Alter und Geschlecht gemittelte Bevölkerung handelt, drückt die ICRP durch den Begriff "nominal risk coefficient" aus [2].

Das Strahlenrisiko ist einer Vielzahl von Einflussgrößen unterworfen. Zu der bereits genannten Alters- und Geschlechtsabhängigkeit kommen die unterschiedlichen Beiträge der verschiedenen Strahlenarten hinzu, sowie die unterschiedlichen Beiträge der Organe zum Gesamtrisiko des Organismus. Individuelle Einflüsse auf das Risiko können über bestimmte Bevölkerungsgruppen oder über die Gesamtbevölkerung gemittelt werden. Analog kann über Altersgruppen oder über das gesamte Leben gemittelt werden, es kann über Organgruppen oder über den Gesamtorganismus gemittelt werden usw.

### **Detriment (Schadensmaß)**

Bei inhomogenen Bestrahlungsbedingungen werden verschiedene Organe unterschiedlich exponiert, aber auch bei homogener Exposition tragen sie unterschiedlich zu einem Gesamtrisiko bei. Jedem Organ bzw. jedem Gewebeverband kann somit ein eigener Risikokoeffizient zugeordnet werden. Es ist dabei sowohl eine Frage der Praktikabilität als auch der wissenschaftlichen Datenlage, bis zu welchem Grad Organ- bzw. Gewebeeinheiten differenziert angegeben werden oder zu welchen Organ- bzw. Gewebegruppen sie zusammengefasst werden sollen.

Besteht für zwei Krebsarten die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit, d. h. das gleiche Risiko, so kann ihnen dennoch eine unterschiedliche Bedeutung oder Relevanz zugeordnet werden. Eine solche Unterschiedlichkeit kann sich beispielsweise aus verschiedener Letalität, Verlust an Lebenserwartung für eine an der Krebsart gestorbenen Person oder Verlust an Lebensqualität ergeben. Ein Risikomaß, das die Relevanz eines Ereignisses einbezieht, ist das so genannte "Detriment" [2]. Hierbei handelt es sich um

das Produkt aus der Eintrittswahrscheinlichkeit für ein strahleninduziertes stochastisches Ereignis und der Schadenshöhe bzw. um ein mit der Schadenshöhe gewichtetes Risiko. Während die Eintrittswahrscheinlichkeit von den Bedingungen der Strahlenexposition (z. B. von der Dosis) abhängt, ist die Schadenshöhe davon unabhängig.

Die Angabe eines auf diese Weise zusammengesetzten Detriments (Schadensmaß) ermöglicht demnach den quantitativen Vergleich verschiedener (strahleninduzierter) Krebsarten hinsichtlich ihres Schweregrads.

$$\begin{array}{l}
 \text{Für jede Krebsart :} \quad \underbrace{\text{Risiko-} \times \text{Organ-}}_{\substack{\text{koeffizient} \quad \text{dosis} \\ \text{abhängig von} \\ \text{Strahlenexposition}}} \times \underbrace{\text{Schadenshöhe}}_{\substack{\text{Verlust an} \\ \text{Lebenserwartung,} \\ \text{Lebensqualität} \\ \text{unabhängig von Strahlung}}}
 \end{array}$$

**Eintrittswahrscheinlichkeit:**

Die Eintrittswahrscheinlichkeit, also das ungewichtete Strahlenrisiko pro Dosis entspricht dem Risikoeffizienten  $R_{I,T}$  in Bezug auf eine Krebsart. Diese Koeffizienten repräsentieren die quantitativen Angaben über die Risikoerhöhung pro Dosis, an der betrachteten Krebsart im Laufe des Lebens zu erkranken (Inzidenzrisiko). Sie sind von der Strahlungsart abhängig und wurden unter Annahme der LNT-Hypothese ermittelt. Sie sind über Geschlecht und Expositionsalter gemittelt.

Zusätzlich wird allerdings angenommen, dass bei niedrigen Dosen und kleinen Dosisleistungen das tatsächliche Risiko um einen gewissen Faktor überschätzt wird, wenn man die Risikowerte von hohen Dosen und großen Dosisleistungen zu niedrigen Dosen und kleinen Dosisleistungen linear extrapoliert. Um dieser vermuteten Überschätzung Rechnung zu tragen, hat die ICRP einen sogenannten "Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor" (DDREF) eingeführt. Risikowerte, die auf der Basis der LNT-Hypothese und der Dosisleistungs-Unabhängigkeit aus epidemiologischen Studien ermittelt wurden, werden durch diesen DDREF dividiert. In ihrer Empfehlung ICRP 103 [2]

bestätigt die ICRP ihre früher entwickelte Argumentation und behält einen DDREF-Wert von 2 für solide Tumoren für Expositionen mit Photonen und Elektronen (Niedrig-LET-Strahlung) bei. Die Deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) empfiehlt demgegenüber die Abschaffung oder Reduzierung des DDREF [3].

Soll ein Risikoeffizient  $R_{I,T}$  in Bezug auf Inzidenzdaten (Index  $I$ ) für eine bestimmte Krebsart  $T$  angegeben werden, so setzt sich dieser Parameter als nominelles Risiko für tödliche  $R_{F,T}$  (fatal mit Index  $F$ ) und nicht tödliche  $R_{NF,T}$  (non-fatal mit Index  $NF$ ) Krebserkrankungen zusammen [4].

$$R_{I,T} = R_{F,T} + R_{NF,T} \quad (3.1)$$

### Schadenshöhe:

In der "Schadenshöhe" werden die weitgehend strahlungsunabhängigen Parameter zusammengefasst.

- *Der relative Verlust an Lebenserwartung* (in ICRP 103 [2] als  $L$  bezeichnet) ist wie folgt definiert:

$$L = \frac{l_T}{\bar{l}} \quad (3.2)$$

$l_T$  bezeichnet den absoluten Verlust an Lebenserwartung (in Jahren) in Bezug auf eine Krebserkrankung  $T$ . Der gemittelte Wert über alle Krebserkrankungen, also der mittlere Verlust an Lebenserwartung, wird als  $\bar{l}$  bezeichnet.  $L$  ist somit der relative Verlust an Lebenserwartung für jede Krebsart und ist bezogen auf den mittleren Verlust an Lebenserwartung durch die Gesamtheit aller Krebsarten.

- *Der Letalitätsfaktor  $k_T$*  ist als die Wahrscheinlichkeit für einen tödlichen Verlauf der Krebserkrankung  $T$  definiert:

$$k_T = \frac{R_{F,T}}{R_{I,T}} \quad (3.3)$$

Der Letalitätsfaktor als eine Wahrscheinlichkeitsgröße liegt im Bereich von 0 bis 1. Ist dieser bei einer Krebsart gleich 0, würde dies bedeuten, dass keine Person, die an dieser Krebsart neu erkrankt, daran stirbt. Ist  $k_T$  bei einer Krebsart dagegen gleich 1, heißt das, dass alle unter dieser Krebsart Neuerkrankten daran sterben.

- Auch Personen, die nicht an einer Krebserkrankung gestorben sind, erfahren negative Effekte in Form von *Verlust an Lebensqualität*. Aus diesem Grund beinhalten die Empfehlungen von ICRP 60 [1] und ICRP 103 [2] neben der Letalität einen strahlungsunabhängigen Eingangsparameter für das Detriment, der u.a. den Verlust an Lebensqualität berücksichtigt. Diese Einschränkungen im Leben sind in der Regel bei allen Patienten einer Krebserkrankung gleich, unabhängig davon, ob der Krebs strahlungsinduziert ist oder nicht. Die medizinische Entwicklung, vor allen im Bereich der therapeutischen Systeme in der Medizin, spielt bei der Änderung dieses Parameters eine bedeutende Rolle. Dieser Parameter wird als die Einschränkung der Lebensqualität  $q_T$  durch eine Krebserkrankung im Organ  $T$  bezeichnet.

Die Art und Weise, wie die Schadenshöhe in das Detriment eingeht und die "Schadensparameter" Letalität, Verlust an Lebenserwartung und Lebensqualität Berücksichtigung finden, ist nicht in allen Detriment-Modellen der ICRP eindeutig. (vgl. Abschnitt 3.2)

## 3.2 Historische Entwicklung des Schadensmaßes "Detriment"

### Detriment-Modell nach ICRP 26

In der Veröffentlichung der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP 26 im Jahr 1977 [1] wurde der Begriff "Detriment" zum ersten Mal von der ICRP eingeführt, um Risiken stochastischer Strahlenwirkungen zu bestimmen und zu quantifizieren. Das Detriment ist hier definiert als Maß des Gesamtschadens, den eine strahlenexponierte Gruppe und ihre Nachkommen erleiden können. Die Berechnung des Detriments basierte dabei ausschließlich auf den Mortalitätszahlen aus den Studien der Atombomben-Überlebenden in Japan (Life Span Studies, LSS). Das Detriment wurde als Schadenserwartung einer strahlenexponierten Beobachtungsgruppe bezeichnet.

Für eine beobachtete Gruppe aus  $N$  Personen wurde die Schadenserwartung wie folgt berechnet:

$$D_{ICRP26} = N \cdot \sum_T P_T \cdot g_T \quad (3.4)$$

Dabei ist  $P_T$  die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Schadens im Organ oder Gewebe  $T$ . Der Wichtungsfaktor  $g_T$  beschreibt den Schweregrad des Schadens. Er kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen.

### Detriment-Modell nach ICRP 60

Die Überlegung, dass auch nicht-tödlich verlaufende Krebserkrankungen mit Einschränkungen verbunden sind, führte die ICRP in ihrer Empfehlung 60 im Jahr 1990 [4] zur Überarbeitung der Definition des Detriments. Die Methode zur Berechnung des Detriments wurde modifiziert, so dass neben den Schätzwerten von Sterbefällen durch Krebs auch andere schädigende Strahlenwirkungen berücksichtigt wurden. Dazu gehörten das Krebssterberisiko in allen relevanten Organen, sowie die besondere Berücksichtigung der Latenzzeit (Zeitintervall zwischen Einwirken der Strahlung und ersten Symptomen), welche zu verschiedenen Werten für den zu erwartenden Verlust



an Lebenserwartung durch Sterbefälle an Krebs in den verschiedenen Organen führt. Ebenso wurde die Morbidität, die sich aus der Induktion von nicht tödlich verlaufenden Krebsfällen ergibt, und schließlich das Risiko für schwere vererbare Krankheiten in allen von der bestrahlten Person abstammenden zukünftigen Generationen berücksichtigt.

Das Detriment eines Organs  $T$  wurde folgendermaßen als Summe der Risiken der tödlichen und nicht-tödlichen Krebserkrankungen definiert:

$$D_{ICRP60} = [R_{F,T} + q_T \cdot R_{NF,T}] \cdot L \quad (3.5)$$

Hier wurden zum ersten Mal die strahlungsunabhängigen Parameter, welche die Schadenshöhe beschreiben, der "relative Verlust an Lebenserwartung"  $L$  und der "Verlust an Lebensqualität"  $q_T$ , in der Definition des Detriments berücksichtigt.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung von ICRP 60 [4] waren nur wenige Krebsinzidenzraten bekannt. Aus diesem Grund wurde die Abschätzung des Detriments auf der Grundlage von Mortalitätsdaten, allerdings unter Berücksichtigung von nicht-tödlichen Krebserkrankungen definiert.

Stellt man die Gl. (3.1) nach  $R_{NF,T}$  um, so bekommt man für damals nicht zur Verfügung stehende Daten für die nicht-tödlichen Krebserkrankungen  $R_{NF,T}$  einen Zusammenhang in Abhängigkeit der Mortalitätsdaten:

$$R_{NF,T} = R_{I,T} - R_{F,T}$$

$$R_{NF,T} = \frac{R_{F,T}}{k_T} - R_{F,T}$$

$$R_{NF,T} = R_{F,T} \cdot \frac{(1 - k_T)}{k_T} \quad (3.6)$$

Der Verlust an Lebensqualität wurde in ICRP 60 [4] als ein Wichtungsfaktor der nicht-tödlichen Risiken gleich dem Letalitätsfaktor  $k_T$  gesetzt:

$$q_T = k_T \quad (3.7)$$

Setzt man die Terme (3.2), (3.6) und (3.7) in die Gl. (3.5) ein, so erhält die Gleichung eine neue Form (3.8), mit der das Detriment auf Basis der Mortalitätsdaten berechnet werden kann:

$$D_{ICRP60} = \underbrace{R_{F,T}}_{\text{Eintrittswahrscheinlichkeit}} \cdot \underbrace{[(2 - k_T)] \cdot \frac{l_T}{\bar{l}}}_{\text{Schadenshöhe}} \quad (3.8)$$

### 3.3 Detriment-Modell nach ICRP 103

Im Jahr 2007 wurde die Empfehlung 103 der ICRP veröffentlicht [2]. Diese bringt die Definition und Berechnung des Detriments auf den aktuellen Stand. Ausgangsgrößen für die Berechnung des Detriments in dieser Empfehlung sind nicht mehr die Mortalitätsdaten, sondern die Inzidenzdaten.

$$D_{ICRP103} = R_{I,T} \cdot [k_T + (1 - k_T) \cdot q_T] \cdot L \quad (3.9)$$

$\underbrace{R_{I,T}}_{\text{Eintrittswahrscheinlichkeit}} \cdot \underbrace{[k_T + (1 - k_T) \cdot q_T]}_{\text{Schadenshöhe}} \cdot L$

Die Eintrittswahrscheinlichkeit, also das ungewichtete Strahlenrisiko, bezieht sich nun auf das Inzidenzrisiko  $R_{I,T}$  pro Dosis in Bezug auf ein Organ bzw. auf eine Krebsart  $T$ . Darüber hinaus hat die ICRP in der Publikation 103 neue Risikokoeffizienten veröffentlicht (Tab. 1). Die Schadenshöhe  $d(k)$  entspricht dem Faktor:

$$d(k_T) = [k_T + (1 - k_T) \cdot q_T] \cdot L \quad (3.10)$$

Das Detriment nach dem Modell von ICRP103 [2] kann somit auch wie folgend dargestellt werden:

$$D_{ICRP103} = R_{I,T} \cdot d(k_T)$$

Der Parameter für die Einschränkung der Lebensqualität  $q_T$  durch eine Krebserkrankung im Organ  $T$  wird nicht mehr wie in ICRP 60 als konstanter Faktor (vgl. Gl. (3.7)), sondern als eine Funktion des Letalitätsfaktors  $k_T$  definiert und lässt sich anhand folgender Formel berechnen:

$$q_T = F(k_T) = q_{min} + k_T \cdot (1 - q_{min})$$

So werden die Krebserkrankungen, die keine Sterblichkeit zur Folge haben (bei denen wäre  $k_T = 0$ ), mit einem minimalen Lebensqualitätsfaktor  $q_{min}$  gewichtet. Somit ist ein quantitativer Vergleich verschiedener (strahleninduzierter) Krebsarten hinsichtlich ihres Schweregrads möglich. Eine vollständig nicht-tödliche Krebsart wird also hinsichtlich ihres Schadensbeitrags weniger stark gewichtet als eine vollständig tödlich verlaufende Krebsart.

ICRP 103 stellt drei Werte für  $q_{min}$  in drei Kategorien vor: Für die Hautkrebserkrankungen  $q_{min} = 0$ , für die Schilddrüse  $q_{min} = 0,2$  und für den Rest aller Krebserkrankungen  $q_{min} = 0,1$ .

Auf der Grundlage dieses von der ICRP entworfenen Konzepts des Schadensmaßes (vgl. Gl. (3.9)) wird für jedes Organ bzw. für jede Krebsart ein Detriment im Sinne einer gewichteten Schadenswahrscheinlichkeit pro Dosis, d.h. ein schadensgewichteter nomineller Risikoeffizient festgelegt. So entsteht ein Satz von Risikoeffizienten, der die jeweiligen organspezifischen Risikobeiträge mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadenshöhen untereinander quantitativ vergleichbar macht. Die Summe aller organspezifischen Detriments (totales Detriment) pro Dosisinkrement ergibt den "totalen schadensgewichteten nominellen Risikoeffizienten". Die ICRP in ihrer Empfehlung ICRP 103 hat beispielsweise für die Gesamtbevölkerung und für die Gesamtheit aller stochastischen Wirkungen für den totalen nominellen Risikoeffizienten den Wert 5,7 % pro Sv (vgl. Tab.1) angegeben [2].

Die einzelnen Parameter zur Berechnung des Detriments nach dem Modell von ICRP 103 sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Krebserkrankung $T$	$R_{I,T}$ [pro 10.000 Pers pro Sv].	$k_T$	$q(k_T)$	$L = \frac{l_T}{\bar{l}}$	$D_{ICRP103}$	$\bar{D}_{ICRP103}$	Gewebe- wichtung- faktoren $w_T$
Speiseröhren	15	0,93	0,94	0,87	13,1	0,023	0,04
Magen	79	0,83	0,85	0,88	67,7	0,118	0,12
Dickdarm	65	0,48	0,53	0,97	47,9	0,083	0,12
Leber	30	0,95	0,96	0,88	26,6	0,046	0,12
Lunge	114	0,89	0,90	0,80	90,3	0,157	0,12
Knochenoberfläche	7	0,45	0,51	1,00	5,1	0,009	0,01
Haut	1000	0,002	0,002	1,00	4,0	0,007	0,01
Brust	112	0,29	0,36	1,29	79,8	0,139	0,12
Eierstock	11	0,57	0,61	1,12	9,9	0,017	-
Blase	43	0,29	0,36	0,71	16,7	0,029	0,04
Schilddrüsen	33	0,07	0,26	1,29	12,7	0,022	0,04
Knochenmark	33	0,67	0,70	1,63	61,5	0,107	0,12
Keimdrüsen <sup>1</sup>	20	0,80	0,82	1,32	25,4	0,044	0,08
Rest	144	0,49	0,54	1,03	113,5	0,198	0,14
<b>Gesamt Detriment</b>					<b>574</b>	<b>1,000</b>	<b>1,00</b>

Tabelle 1: Die von der ICRP103 verwendete Parameter zur Berechnung des Detriments und Bestimmung der Gewebe-Wichtungsfaktoren für die Gesamtbevölkerung nach Tab. A.4.1. [2]

#### Anmerkungen:

- Der jeder Krebserkrankung bzw. jedem Organ zugeordnete relative Detriment-Wert,  $\bar{D}_{ICRP103}$ , bildet sich aus der Division des gerechneten  $D_{ICRP103}$ -Werts durch das Gesamt-Detriment.
- Aus dem berechneten Detriment für jedes Organ werden schließlich eine Reihe von organ- bzw. gewebespezifischen Werten des relativen Detriments abgeleitet. Diese relativen Werte des Schadensmaßes bilden die Grundlage für die Bestimmung der Gewebe-Wichtungsfaktoren, d.h. die relativen Werte des

<sup>1</sup> Obwohl in ICRP 103 auch ein Detriment für Erbschäden angegeben wird, unterliegt es doch qualitativ anderen Begründungen als das Detriment für Krebserkrankungen. Im vorliegenden Bericht wird demnach nur das Detriment-Modell für Krebserkrankungen untersucht. Für Erbschäden werden keine eigenen Berechnungen durchgeführt, sondern die Werte aus ICRP 103 unverändert übernommen.

Detriments werden gerundet und in ein einfaches Wichtungssystem eingruppiert. Die ICRP hat dieses Wichtungssystem so gewählt, dass es nur vier verschiedene Wichtungsgruppen gibt. Die Rundung der einzelnen Faktoren erfolgt unter einer Normierung der Summe aller Faktoren auf 1. Anschließend wird der Beitrag jedes Faktors als Gewebe-Wichtungsfaktor dem Organ wieder zugeordnet.

In Rahmen dieses Projekts wird das Risikomodell nach ICRP 103 diskutiert. Es wird demnach stets auf dieses Modell Bezug genommen und unter der Bezeichnung  $D$  das neu gerechnete Detriment nach ICRP 103,  $D_{ICRP103}$ , verstanden.

- Es findet sich in ICRP 103 keine klare Angabe bezüglich der Zuordnung des Hautkrebses. Diese Krebsart wird in vielen Krebsregistern in der Regel in zwei (bzw. drei) Kategorien gruppiert. Aufgrund des sehr unterschiedlichen Krankheitsverlaufs werden häufig Melanom und sonstige Hautkrebsarten unterschieden. Melanom ist im Vergleich zu den sonstigen Hautkrebsarten eine zwar seltene, jedoch mit hoher Mortalitätsrate vorkommende Hautkrebsart. Dies führt dazu, dass die unter Melanom leidenden Patienten einen relativ großen Teil an Lebenserwartung verlieren. Auch die Lebensqualität ist eingeschränkter als bei Patienten mit sonstigen Hautkrebsarten. Für sonstige Hautkrebsarten gilt das Gegenteil. Dem scheinen allerdings die diesbezüglichen Angaben der ICRP in Bezug auf eine einzelne Kategorie "Hautkrebs" zu widersprechen: Hautkrebs wird mit sehr geringem Letalitätsfaktor, jedoch mit hohem Verlust an Lebenserwartung verbunden.

## **4 AP2: Untersuchung der eingehenden Annahmen und alternativer Konzepte**

Wie bereits erläutert gehen in die Definition des Detriments gemäß des Modells von ICRP 103 verschiedene Parameter ein, die nicht von der Strahlung sondern vielmehr von der Schwere des Schadens oder von medizinischen Fortschritten in der Krebsdiagnostik und -therapie abhängig sind. Zu diesen gehören der zu erwartende Verlust an Lebenszeit, die Letalität und der Verlust an Lebensqualität. In Rahmen dieses Berichts werden diese strahlungsunabhängigen Parameter und deren Änderung untersucht. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Krebsarten wird hier als konstant (und wie in ICRP 103 [2] veröffentlicht) angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass sich nur die Schadenshöhe innerhalb der Beobachtungszeit geändert hat. Um die zeitliche und eventuell regionale Entwicklung des Schadenmaßes seit ICRP 103 und davor zu untersuchen, werden diese Parameter bzw. das Detriment für jede Krebsart zeitlich angepasst und aktuell gerechnet. Dies verlangte eine umfangreiche Datenrecherche nach den relevanten Gesundheitsdaten. Es werden für jedes Jahr und für alle ausgewählten Krebserkrankungen zunächst die Eingangsparameter nach Gl. (3.9) bestimmt und daraus das Detriment für die einzelnen Krebsarten in jedem Jahr berechnet. Schließlich wird ein Wert als Gesamt-Detriment pro Jahr berechnet und alle Werte über das gesamte definierte Zeitintervall verglichen.

### **4.1 Vorstellung der Beobachtungsgruppen und des Untersuchungszeitraums**

Ziel ist es, unter Annahme der Anwendbarkeit des Detriment-Modells von ICRP 103 auch für die Jahre vor 2007 (Zeitpunkt der Veröffentlichung von ICRP 103), das Schadensmaß über eine möglichst breite Zeitspanne und Bevölkerungsgruppe zu berechnen. Relevante nationale Gesundheitsdaten stehen für das Zeitintervall 1980-2012 zur Verfügung. Auch die internationale Datenrecherche wurde auf diesen Zeitraum eingeschränkt. Als internationale Bezugsgruppe wurden Daten der USA ausgewählt.

Die Datenquellen aus Deutschland waren:

- GENESIS-Datenbank des Statistischen Bundesamts: Für alle Gesundheitsinformationen bezüglich der Bevölkerungszahlen und allgemeinen Sterbezahlen in Deutschland [5].
- Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) für alle Mortalitätszahlen mit den Krebstodesursachen in Deutschland [6].
- Zentrum für Krebsdatenregister (ZfKD) beim Robert-Koch-Institut: Für alle Gesundheitsinformationen bezüglich der Inzidenzraten für das Zeitintervall von 1999-2012 in Deutschland [7].
- Epidemiologisches Krebsregister Saarland: Für alle Gesundheitsdaten bezüglich der Inzidenzraten für das Zeitintervall von 1980-1998 in Deutschland [8].

Die Datenquellen für die USA waren:

- Centers for Disease Control and Prevention (CDC): Für alle Mortalitätsdaten in dem oben genannten Zeitraum [9].
- National Cancer Institute – USA-Krebsregister SEER (SEER-Tables): Für alle Inzidenzdaten in oben genannten Zeitraum [10].

## 4.2 Berechnung der strahlungsunabhängigen Parameter

Im Folgenden werden die einzelnen Eingangsparameter erläutert. Diese werden exemplarisch für das Jahr 2012 vorgestellt. Die berechneten Detriment-Werte pro Kalenderjahr sind im Anhang dargestellt.

### Verlust an Lebenserwartung

Die Lebenserwartung und das mittlere Sterbealter zählen zu den hier betrachteten relevanten Gesundheitsparametern. Diese sind von einer Vielzahl von einwirkenden Faktoren abhängig. Zu diesen Faktoren zählen vor allem Einflussbedingungen durch bestimmte Lebens- und Ernährungsgewohnheiten. Aber auch medizinische Fortschritte, bestimmte Umwelt- und Arbeitsfaktoren und der soziale Status können als solche einwirkenden Faktoren bezeichnet werden. Die Zeitspanne, die eine Person aufgrund



eines Ereignisses (hier Krebserkrankung) im Vergleich zu anderen Mitgliedern der gleichen Bevölkerungsgruppe, die nicht diesem Ereignis ausgesetzt sind, verliert, wird als Verlust an Lebenserwartung bezeichnet. Um diesen zu ermitteln, muss zunächst das mittlere Sterbealter in dieser Beobachtungsgruppe bestimmt werden. Hierzu dienen die im Folgenden beschriebenen Begriffe.

**Altersspezifische Mortalitätsrate**  $r(A, t)$ : Mit der Angabe dieser Größe bezeichnet man die beobachtete Mortalitätsziffer  $n(A, \Delta t)$  in einem Alter von  $A$  innerhalb eines Zeitraums  $\Delta t$  bezogen auf die zugeordnete Bevölkerungsgruppe  $N(A, t)$  in einem Zeitpunkt  $t$  und bildet den Quotienten aus diesen beiden Zahlen.

$$r(A, t) = \frac{n(A, \Delta t)}{N(A, t)} \quad (4.2.1)$$

Liegen die Mortalitätsziffern und die Bezugsgruppen eingeteilt in Altersintervallen vor, so wird die altersspezifische Mortalitätsrate durch das Verhältnis von Mortalitätsziffer und Gruppengröße in der  $i$ -ten Altersklasse in folgender Weise approximiert:

$$r_i(t) = \frac{n_i(t)}{\Delta A \cdot \Delta t} \cdot \frac{\Delta A}{N_i(t)} = \frac{n_i(t)}{N_i(t) \cdot \Delta t} \quad (4.2.2)$$

Dabei ist  $N_i(t) = N(A, t) \cdot \Delta A$  die Anzahl der zum Zeitpunkt  $t$  beobachteten Personen in der  $i$ -ten Altersklasse, und  $n_i(t) = n(A, \Delta t) \cdot \Delta A \cdot \Delta t$  die Anzahl der gestorbenen innerhalb des Zeitraums  $\Delta t$  in der gleichen Altersklasse.  $\Delta t$  ist die Beobachtungsdauer, die in den Auswertungen dieses Berichts, wenn nicht anders angegeben, als 1 Jahr gewählt wird. Mit  $\Delta A$  wird die Altersgruppenbreite bezeichnet. Die altersspezifische Mortalitätsrate wird in Einheiten  $[1/(10^5 \cdot a)]$  angegeben. Damit ist die Mortalitätsrate pro 100.000 Personen pro Beobachtungsjahr gemeint. Entspricht die Beobachtungszeit auch der Lebenszeit (d.h. dem Alter), dann kann  $r_i(t)$  auch als altersspezifische Mortalitätsrate pro 100.000 Personen pro Altersjahr interpretiert werden.

**Kumulative Mortalitätsrate**  $R(t)$ : Fasst man die einzelnen Summanden  $r_i$  der altersspezifischen Rate durch Summation zu einer einzelnen Zahl zusammen, so erhält man als Gesamt-Mortalitätsgröße die kumulative Rate:

$$R(t) = \sum_{i=1}^m r_i(t) \cdot \Delta A = \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{n_i(t)}{N_i(t)} \quad (4.3)$$

Die kumulative Mortalitätsrate ist eine dimensionslose Größe und kann als eine spezielle Form einer direkten Altersstandardisierung betrachtet werden.

**Überlebenswahrscheinlichkeit  $S(A, t)$ :** Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der Geburt, bis zu einem Alter  $A$  zu überleben. Sie lässt sich berechnen, wenn die kumulative Mortalitätsrate  $R_{k,m}(t)$  aufgrund *aller* Todesursachen bekannt ist. Für die Auswertung in  $m$  diskreten Altersklassen wird die Überlebenswahrscheinlichkeit der  $i$ -ten Altersklasse durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$S_i(t) = \exp(-R(t)) = \sum_{i=1}^m \exp\left(-\frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \frac{n_i(t)}{N_i(t)}\right) \quad (4.4)$$

Die Untersuchung der Überlebensfunktion für eine Bevölkerungsgruppe liefert Informationen über den Einfluss von zum Tod führenden Ereignissen. Diese Funktion wird jahresweise pro Bevölkerungsgruppe gerechnet.

**Altersspezifisches Mortalitätsrisiko  $h(A, t)$ :** Das altersspezifische Mortalitätsrisiko ist die mit der Überlebenswahrscheinlichkeit  $S(A, t)$  gewichtete altersspezifische Mortalitätsrate  $r(A, t)$ .

$$h(A, t) = S(A, t) \cdot r(A, t) \quad (4.5)$$

Das altersspezifische Mortalitätsrisiko beschreibt das Sterberisiko für den Bruchteil der Bevölkerung, der bis zum Alter  $A$  überlebt hat. In Auswertung mit diskreten Altersklassen wird das altersspezifische Mortalitätsrisiko der  $i$ -ten Altersklasse in folgender Weise approximiert:

$$h_i(t) = S_i(t) \cdot r_i(t) \quad (4.6)$$

Deutschland 2012	Wohnbevölkerung	Mortalitätszahlen	Mortalitätsrate [1/10 <sup>5</sup> /a]	Kumulative Mortalitätsrate	Überlebenswahrscheinlichkeit	Mortalitätsrisiko [1/10 <sup>5</sup> /a]
Alter	$N_i$	$n_i$	$r_i$	$R_i$	$S_i$	$h_i$
0-4	3392242	2626	77,41	0,0039	0,9961	77,11
5-9	3482309	297	8,52	0,0004	0,9957	8,49
10-14	3808352	326	8,56	0,0004	0,9953	8,51
15-19	4038105	1020	25,25	0,0013	0,9940	25,10
20-24	4754681	1696	35,67	0,0018	0,9923	35,39
25-29	4923879	1936	39,31	0,0020	0,9903	38,93
30-34	4915126	2451	49,86	0,0025	0,9878	49,26
35-39	4612016	3349	72,61	0,0036	0,9843	71,47
40-44	5844523	7403	126,66	0,0063	0,9780	123,88
45-49	6978201	14890	213,37	0,0107	0,9677	206,48
50-54	6505934	23848	366,55	0,0183	0,9501	348,26
55-59	5563619	32785	589,27	0,0295	0,9225	543,61
60-64	4989604	44447	890,79	0,0445	0,8823	785,96
65-69	3940115	53653	1361,71	0,0681	0,8243	1122,39
70-74	4826272	99018	2051,64	0,1026	0,7439	1526,19
75-79	3623049	121509	3353,77	0,1677	0,6290	2109,67
80-84	2326832	153990	6618,01	0,3309	0,4518	2990,20
85-89	1368731	161396	11791,65	0,5896	0,2506	2954,58
90-95	528720	103659	19605,65	0,9803	0,0940	1843,19
95+	101436	39283	38726,88	1,9363	0,0136	525,12
<b>Insgesamt</b>	<b>80523746</b>	<b>869582</b>				

Tabelle 2: In Altersgruppen klassifizierte Bevölkerungszahlen, Mortalitätsziffern, Mortalitätsrate, Überlebensfunktion und Mortalitätsrisiko für aller Todesursachen bei der gesamten Bevölkerung in Deutschland im Jahr 2012. [5]

**Kumulatives Mortalitätsrisiko  $H(t)$ :** Das kumulative (oder integrale) Mortalitätsrisiko ist die Wahrscheinlichkeit für eine Person bei ihrer Geburt zum Zeitpunkt  $t$  aufgrund eines betrachteten Ereignisses zu sterben (Lebenszeitrisiko). Für die Auswertungen mit  $m$  diskreten Altersklassen wird das kumulative Mortalitätsrisiko als gewichtete Summe über alle Altersklassen  $m = 1, \dots, m$  approximiert:

$$H(t) = \sum_{i=1}^m h_i(t) \cdot \Delta A = \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{n_i(t)}{N_i(t)} \cdot S_i(t) \quad (4.7)$$

Für jedes Jahr und jede Bevölkerungsgruppe werden die bisher beschriebenen Größen tabellarisch dargestellt. Als Beispiel dient die statistische Situation im Jahr 2012 für die gesamte Bundesrepublik Deutschland (Tab.2).

**Krebsrisikoalter  $A_R$ :** Betrachtet man die Mortalität nach verschiedenen Todesursachen, im vorliegenden Bericht vor allem die Krebserkrankungen, so werden unterschiedliche Verläufe des Krebsmortalitätsrisikos bzw. der Mortalitätsrate erkennbar sein. Das mittlere Sterbealter aufgrund einer Krebserkrankung  $T$  wird als Krebsrisikoalter bezeichnet und durch folgenden Ausdruck definiert:

$$A_R = \frac{\int_0^{\infty} h_T(A, t) \cdot A \, dA}{\int_0^{\infty} h_T(A, t) \, dA} \quad (4.8)$$

Dabei repräsentieren  $A$  das Lebensalter und  $h_T(A, t)$  das altersspezifische Mortalitätsrisiko, aufgrund einer Krebserkrankung  $T$  zu sterben. Die diskrete Schreibweise dieses Ausdrucks beschreibt die numerische Definition des Mittelwerts einer beliebigen Funktion.

$$A_R = \frac{\sum_{i=0}^m h_{i,T}(t) \cdot A_i \cdot \Delta A}{\sum_{i=0}^m h_{i,T}(t) \cdot \Delta A} = \frac{\frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \sum_{i=0}^m h_{i,T}(A) \cdot A_i}{\frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \sum_{i=0}^m h_{i,T}(A)} = \frac{\sum_{i=0}^m h_{i,T}(A) \cdot A_i}{\sum_{i=0}^m h_{i,T}(A)} \quad (4.9)$$

$A_i$  ist als mittleres Lebensalter der  $i$ -ten Altersklasse zu verstehen. Der numerisch berechnete Mittelwert der Funktion des Mortalitätsrisikos  $h(A)$  bei der Untersuchung einer bestimmten Todesursache liefert demnach das zugeordnete Risikoalter.

Um die einzelnen Größen und deren Zusammenhang zu veranschaulichen, werden die berechneten Parameter in einem Diagramm (Abb.1) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der Geburt, ein bestimmtes Alter zu erreichen, mit Zunahme des Alters abnimmt. Die Mortalitätsrate steigt dagegen mit zunehmendem Alter an. Die Mortalitätsrisikofunktion  $h(A)$  ist das Produkt aus den beiden anderen Größen und bezeichnet das Gesamtrisiko, d.h. die Gesamtwahrscheinlichkeit pro Jahr, aufgrund irgendeines Ereignisses zu sterben. Dieses steigt bis zu einem bestimmten Alter an und nimmt im sehr hohen Alter wieder ab.

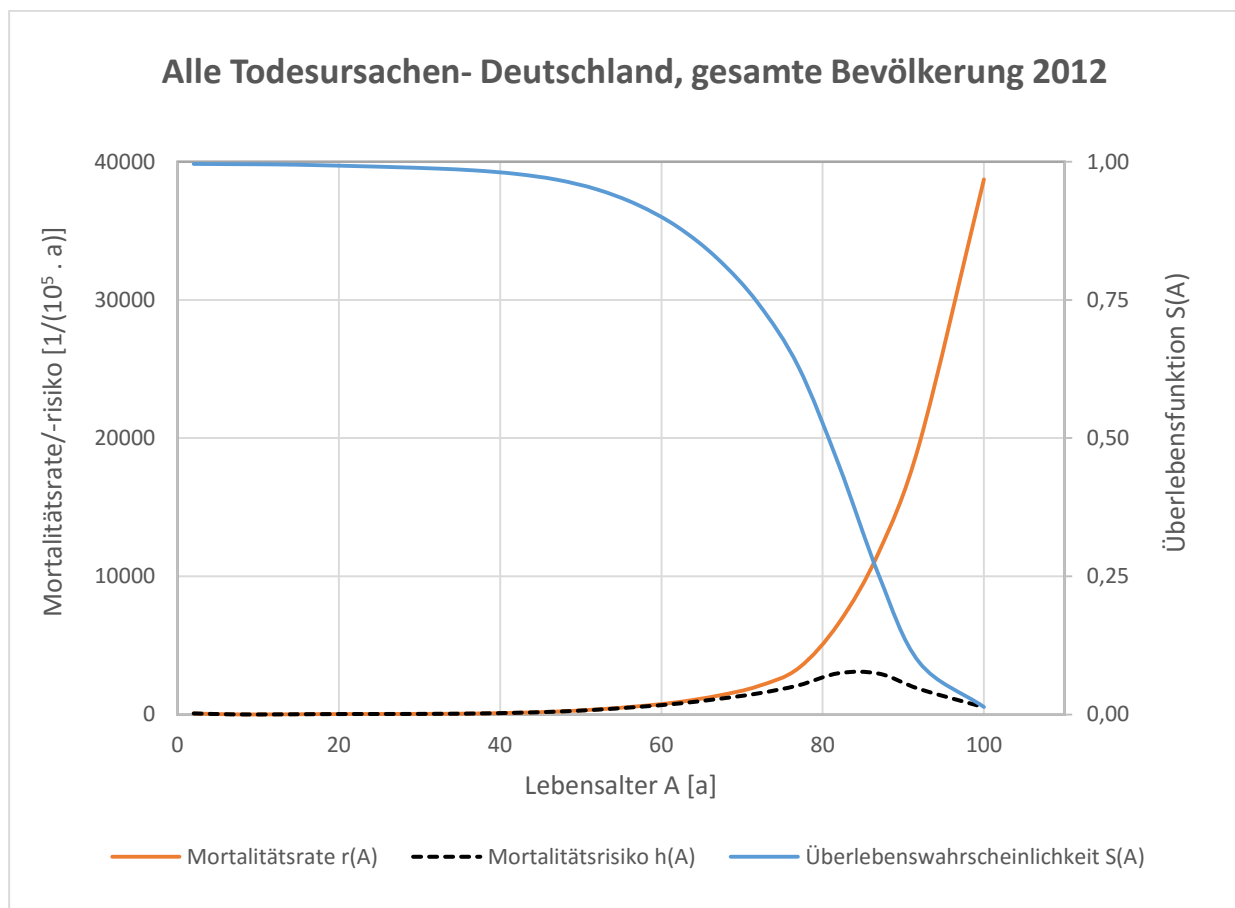


Abb. 1: Altersspezifische Mortalitätsrate und Altersspezifisches Mortalitätsrisiko für alle Todesursachen, sowie die Überlebensfunktion der gesamten Bevölkerung in Deutschland im Jahr 2012

**Altersspezifische Lebenserwartung  $t(A')$ :** Als altersspezifische Lebenserwartung wird der Erwartungswert für die verbleibende Lebenszeit für eine im Alter  $A'$  lebende Person bezeichnet. Durch Integration der Überlebensfunktion (die Berechnung der Fläche unter der Kurve) beginnend mit dem erreichten Alter  $A'$  einer bestimmten Population über alle Altersklassen, erhält man den folgenden Ausdruck:

$$\int_{A'}^{\infty} S(A) dA = t(A') \cdot S(A') \quad (4.10)$$

Die Lebenserwartung für eine Person im Alter  $A'$  lässt sich somit aus der Formel (4.10) berechnen:

$$t(A') = \frac{1}{S(A')} \cdot \int_{A'}^{\infty} S(A) dA \quad (4.11)$$

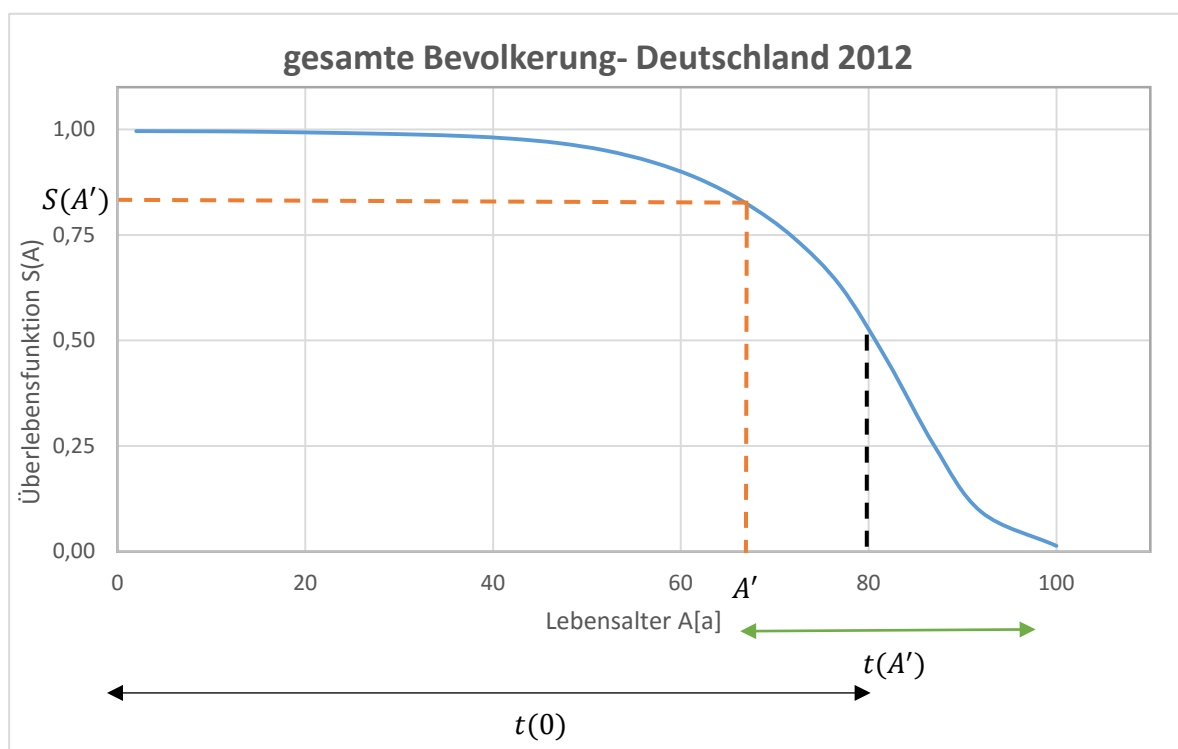


Abb. 2: Darstellung der Berechnung der Lebenserwartung und des mittleren Sterbealters anhand der Gl. (4.10) und (4.11)

---

Um die Lebenserwartung für eine neugeborene Person in einer bestimmten Bevölkerungsgruppe zu berechnen, muss der untere Integrationswert gleich 0 gesetzt werden ( $A' = 0$ ). Dementsprechend wird  $S(0)$  als der Anfangswert der Überlebensfunktion genommen. Die (verbleibende) Lebenserwartung  $t(A')$  einer Person im Alter  $A'$  ist zwar kleiner als die Lebenserwartung  $t(0)$  eines Neugeborenen, das erreichte Alter beim Tod  $A = A' + t(A')$  ist jedoch größer. Beispielsweise ist die Lebenserwartung eines neugeborenen Jungen 80 Jahre, die eines 50-jährigen Mannes nur 40 Jahre, also geringer. Das (statistische) Sterbealter ist jedoch 80 Jahre für den Jungen, jedoch 90 Jahre für den Mann, also größer.

Anmerkung: In Rahmen dieses Berichts wird die Lebenserwartung eines Neugeborenen als das *mittlere Sterbealter* innerhalb der Beobachtungsgruppe und für das betrachtete Kalenderjahr bezeichnet.

Die aus den Gl. (4.9) und (4.11) berechneten Werte (Tab.3) sind beispielhaft für Lungenkrebs in einem Diagramm dargestellt (Abb.3).

Deutschland-Lungenkrebs (2012)		Wohnbevölkerung	Krebsmortalitätszahlen	Krebsmortalitätsrate [1/10 <sup>5</sup> /a]	Überlebenswahrsch.	Krebsmortalitätsrisiko [1/10 <sup>5</sup> /a]		Krebs-Risikoalter
Alter	$A_i$	$N_i$	$n_{i,T}$	$r_{i,T}$	$S_i$	$h_{i,T}$	$h_{i,T} \cdot A_i$	$A_{R,T}$
0-4	2	3392242	6	0,18	0,9961	0,18	0,35	<b>70,6</b>
5-9	7	3482309	2	0,06	0,9957	0,06	0,40	
10-14	12	3808352	1	0,03	0,9953	0,03	0,31	
15-19	17	4038105	3	0,07	0,9940	0,07	1,26	
20-24	22	4754681	6	0,13	0,9923	0,13	2,75	
25-29	27	4923879	13	0,26	0,9903	0,26	7,06	
30-34	32	4915126	26	0,53	0,9878	0,52	16,72	
35-39	37	4612016	62	1,34	0,9843	1,32	48,96	
40-44	42	5844523	292	5,00	0,9780	4,89	205,23	
45-49	47	6978201	1073	15,38	0,9677	14,88	699,33	
50-54	52	6505934	2378	36,55	0,9501	34,73	1805,82	
55-59	57	5563619	3929	70,62	0,9225	65,15	3713,40	
60-64	62	4989604	5278	105,78	0,8823	93,33	5786,60	
65-69	67	3940115	6208	157,56	0,8243	129,87	8701,16	
70-74	72	4826272	8690	180,06	0,7439	133,94	9643,82	
75-79	77	3623049	7172	197,95	0,6290	124,52	9588,24	
80-84	82	2326832	5528	237,58	0,4518	107,34	8802,19	
85-89	87	1368731	2833	206,98	0,2506	51,86	4512,00	
90-95	92	528720	710	134,29	0,0940	12,62	1161,48	
95+	97	101436	223	219,84	0,0136	2,98	289,16	
Insgesamt		80523746	44433	55,18		778,68	54986,22	

Tabelle 3: In Altersgruppen klassifizierte Bevölkerungszahlen, Krebsmortalitätsziffern, Krebsmortalitätsrate, Krebsmortalitätsrisiko und Risikoalter für Lungenkrebs sowie die Überlebensfunktion bei der gesamten Bevölkerung in Deutschland im Jahr 2012. Die Überlebensfunktion bezieht sich auf die Gesamtheit aller Todesursachen. [6]



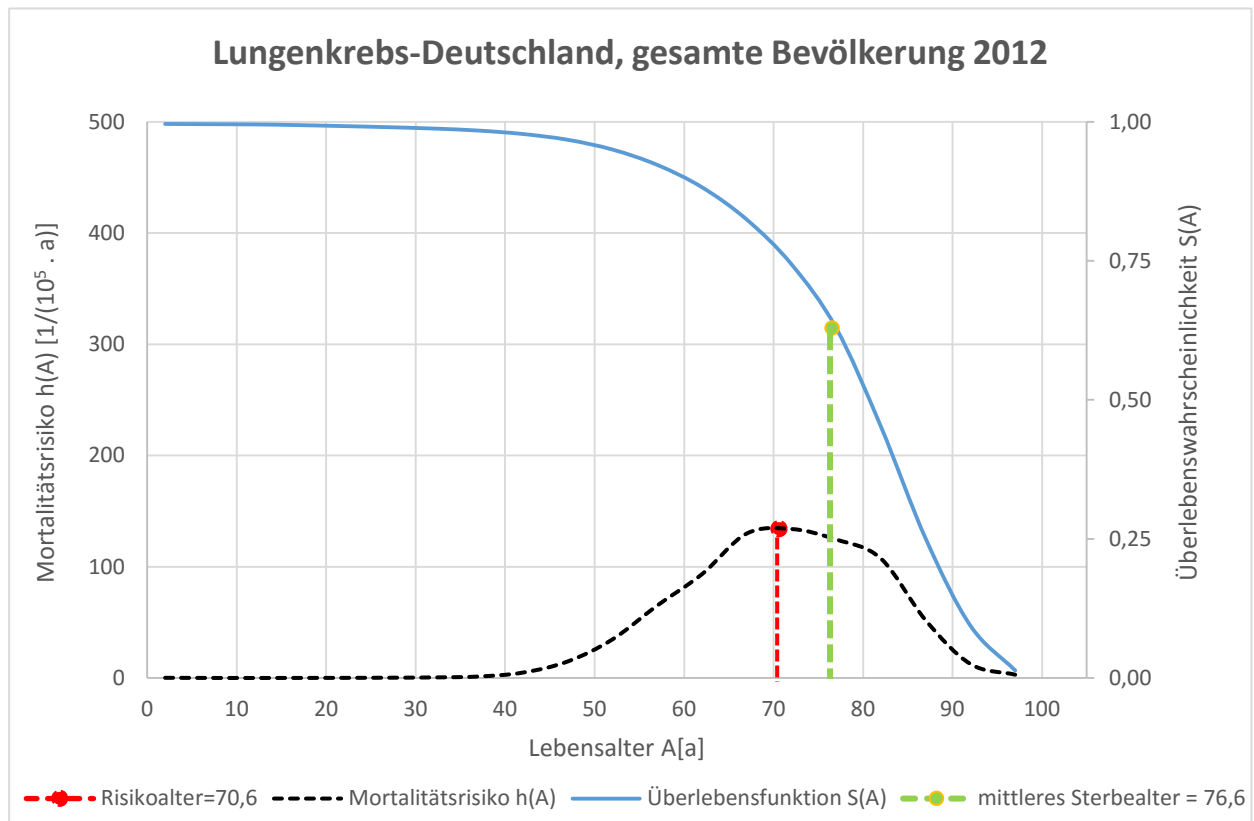


Abb.3: Darstellung des berechneten Risikoalters bei Lungenkrebs (Gl. 4.9, vgl. Tab. 3) sowie des mittleren Sterbealter (Gl. 4.11 bei  $\dot{A} = 0$ ) für die gesamte Bevölkerung im Jahr 2012 in Deutschland

**Verlust an Lebenserwartung  $l_T$**  : Stirbt eine Person aufgrund einer bestimmten Krebs-erkrankung im *Risikoalter*  $A_R$ , so verliert sie dadurch eine Lebenszeit  $l_T$ . Diese wird durch folgenden Ausdruck bestimmt:

$$l_T = \frac{1}{S(A_R)} \cdot \int_{A_R}^{\infty} S(A) dA \quad (4.12)$$

Der mittlere Verlust an Lebenserwartung lässt sich z.B. für Lungenkrebs im Jahr 2012 in Deutschland wie folgend berechnen:

$$l_{Lunge} = \frac{1}{S(70,6)} \cdot \int_{70,6}^{\infty} S(A) dA = 11,66 \text{ Jahre}$$

**Relativer Verlust an Lebenserwartung  $L_T$ :** Der relative Verlust an Lebenserwartung ist das Verhältnis des absoluten Werts des Verlusts an Lebenserwartung  $l_T$  für jede Krebsart zum mittleren Wert des Verlusts an Lebenserwartung  $\bar{l}$  über die Gesamtheit aller Krebsarten bei einer bestimmten Beobachtungsgruppe innerhalb der gleichen Beobachtungszeit (Gl. (3.2)).

Um diesen Parameter für jede Krebsart zu bestimmen, wird die Gesamtheit der verschiedenen Krebsarten in der Bevölkerungsgruppe betrachtet. Diese wird exemplarisch für das Jahr 2012 in Deutschland in Tab. 4 dargestellt.

Für Lungenkrebs beispielsweise beträgt der absolute Verlust an Lebenserwartung 11,66 Jahre. Der mittlere Verlust an Lebenserwartung durch alle betrachteten Krebsarten beträgt 11,22 Jahre (Tab. 4). Damit ergibt sich für den relativen Verlust an Lebenserwartung für Lungenkrebs:

$$L_{Lunge} = 1,04$$

Die Größe des absoluten Werts des Verlusts an Lebenserwartung und damit auch der relative Verlust an Lebenserwartung sind stark vom Sterbealter abhängig. Vergleicht man als Beispiel die Werte aus der Tab. 4 beim Knochenkrebs und Lungenkrebs, so wird deutlich, dass eine Erkrankung an Knochenkrebs mehr Verlust an Lebenserwartungszeit bedeutet als im Vergleich dazu eine Erkrankung an Lungenkrebs. Der Grund dafür ist, dass das Risikoalter dieser Krebserkrankungen unterschiedlich ist, nämlich 58,9 Jahre beim Knochenkrebs gegen 70,6 Jahre beim Lungenkrebs. Das Erkrankungsalter und auch das Sterbealter für Knochenkrebs liegt im jüngeren Altersbereich als für Lungenkrebs.

Es wurden für einzelne Krebsarten die  $l_T$ -Werte mit der Gl. (4.12) berechnet, aus diesen der Mittelwert gebildet und schließlich der relative Verlust an Lebenserwartung für jede Krebserkrankung ermittelt. Diese Rechnung wurde pro Kalenderjahr in dem betrachteten Zeitraum von 1980 bis-2012 durchgeführt (s. Anhang).

Krebserkrankung $T$	Verlust an Lebenserwartung $l_T$ [Jahre]	relativer Verlust an Lebenserwartung $L_T = l_T / \bar{l}$
	gesamte Bevölkerung	gesamte Bevölkerung
Speiseröhre	12,86	1,14
Magen	9,76	0,87
Dickdarm	7,87	0,70
Leber	10,14	0,90
Lunge	11,66	1,04
Knochen	20,91	1,86
Haut(insgesamt) <sup>1</sup>	10,26	0,91
Brust	10,94	0,98
Eierstock	10,57	0,94
Blase	6,53	0,58
Schilddrüsen	9,56	0,85
Knochenmark	9,52	0,85
Keimdrüsen	14,85	1,32
Rest	11,60	1,03
<b>der mittlere Verlust an Lebens- erwartung für die Gesamtheit aller Krebserkrankungen</b>  $\bar{l}$ [Jahre]	11,22	

Tabelle 4: Berechnete Werte für den Verlust an Lebenserwartung  $l_T$  (Gl. 4.12), relativer Verlust an Lebenserwartung  $\frac{l_T}{\bar{l}}$  (Gl. 3.2) für die ausgewählten Krebserkrankungen sowie der mittlere Verlust an Lebenserwartung für die Gesamtheit aller Krebserkrankungen im Jahr 2012. Daten aus [6].

### Krebsletalitätsfaktor $k_T$

Der Krebsletalitätsfaktor  $k_T$  wird als der Anteil der Fälle einer Krebserkrankung  $T$  mit einem tödlichen Verlauf definiert. Im Detriment-Modell von ICRP 103 wird dieser Faktor in Bezug auf Inzidenzdaten berechnet. Unter Inzidenzdaten sind die statistischen Daten

<sup>1</sup> in Rahmen dieses Projekts wurde der Hautkrebs als die Gesamtheit aller Hautkrebsarten inklusive Melanom betrachtet.

zu Neuerkrankungen, wie Inzidenz-Fallzahlen oder Inzidenzraten zu verstehen. Dementsprechend unterscheidet sich die Form der Berechnung des Letalitätsfaktors.

- Betrachtet man die altersspezifischen Mortalitäts- bzw. Inzidenzfallzahlen innerhalb eines Zeitraums  $t$ , so wird  $k_{i,T}$  für jeder Altersgruppe  $i$  durch folgenden Ausdruck berechnet:

$$k_{i,T}(t) = \frac{n_{i,T}(t)}{I_{i,T}(t)} = \frac{\text{altersspezifische Mortalitätsfallzahlen durch Kreberkrankung } T}{\text{altersspezifische Neuerkrankungsfallzahlen durch Krebs } T}$$

Für die gesamte Beobachtungsgruppe lässt sich  $k_T$  für einen bestimmten Zeitraum  $t$  (z.B. für ein Jahr) durch Aufsummierung der Fallzahlen über alle Altersgruppen ( $i = 1, \dots, m$ ) berechnen:

$$k_T = \frac{\sum_{i=1}^m n_{i,T}}{\sum_{i=1}^m I_{i,T}}$$

- Betrachtet man die altersspezifischen Mortalitäts- bzw. Inzidenzraten, so wird  $k_{i,T}$  für jeder Altersgruppe  $i$  durch folgenden Ausdruck berechnet:

$$k_{i,T}(t) = \frac{r_{i,T}(t)}{r^*_{i,T}(t)} = \frac{\frac{n_{i,T}}{N_i}}{\frac{I_{i,T}}{N_i}} = \frac{\text{altersspezifische Mortalitätsrate durch Kreberkrankung } T}{\text{altersspezifische Neuerkrankungsrate durch Krebs } T}$$

Für die gesamte Beobachtungsgruppe lässt sich  $k_T$  für eine bestimmte Zeit (z.B. für ein Jahr) durch Aufsummierung der Fallzahlen über alle Altersgruppen ( $i = 1, \dots, m$ ) berechnen:

$$k_T = \frac{\frac{\sum_{i=1}^m n_{i,T}}{\sum_{i=1}^m N_i}}{\frac{\sum_{i=1}^m I_{i,T}}{\sum_{i=1}^m N_i}} \quad (4.13)$$

- Der altersspezifische Letalitätsfaktor kann auch als Verhältnis von Krebsmortalitätsrisiko zum Inzidenzrisiko in jeder Altersklasse betrachtet werden. So wird  $k_{i,T}$  mit Hilfe des folgenden Ausdrucks berechnet:

$$k_{i,T}(t) = \frac{h_{i,T}(t)}{h_{i,T}^*(t)} = \frac{S_i(t) \cdot r_{i,T}(t)}{S_i(t) \cdot r_{i,T}^*(t)} \quad (4.14)$$

wobei  $h_{i,T}(t)$  das Mortalitätsrisiko für eine Krebsart  $T$  in der Altersgruppe  $i$  innerhalb der Beobachtungszeit  $t$  (z.B. 1 Jahr) und  $h_{i,T}^*(t)$  das Inzidenzrisiko für die gleiche Altersgruppe  $i$  und Beobachtungszeit  $t$  bei einer Krebsart  $T$  darstellt.

Für die gesamte Beobachtungsgruppe lässt sich  $k_T$  für die Zeit  $t$  durch Aufsummierung der Risikowerte über alle Altersgruppen ( $i = 1, \dots, m$ ) berechnen:

$$k_T(t) = \frac{\sum_{i=1}^m h_{i,T}(t)}{\sum_{i=1}^m h_{i,T}^*(t)} \quad (4.15)$$

In Rahmen dieses Berichts wurden die Letalitätsfaktoren hauptsächlich mit den Gl. (4.14) und 4.15) berechnet. Aufgrund des Fehlens von altersspezifischen Angaben bei den Daten aus den USA wurde für diese Gl. (4.13) verwendet.

In Abschnitt 4.2. wurde bereits das über alle Altersgruppen aufsummierte Mortalitätsrisiko  $H_T$  exemplarisch für Lungenkrebs in Deutschland im Jahr 2012 berechnet. Um den Lungenkrebsletalitätsfaktor im gleichen Zeitraum zu erhalten, wurde zusätzlich das gesamte Inzidenzrisiko berechnet. Analog zum Mortalitätsrisiko wird das Inzidenzrisiko auch in diskreter Form als Produkt aus der Inzidenzrate und der Überlebenswahrscheinlichkeit der Beobachtungsgruppe in gleicher Zeit berechnet. Dieses Verfahren ist auch aus der Gl.(4.14) zu entnehmen. In Tab. 5 werden diese Parameter altersspezifisch gegenübergestellt:

Deutschland (2012)	Krebs- mortalitätsrate [1/10 <sup>5</sup> /a]	Überlebens- Wahrschein- lichkeit	Krebsmorta- litätsrisiko [1/10 <sup>5</sup> /a]	Inzidenzrate [1/10 <sup>5</sup> /a]	Inzidenzrisiko [1/10 <sup>5</sup> /a]
Lungenkrebs					
Alter	$r_{i,T}$	$S_i$	$h_{i,T}$	$r^*_{i,T}$	$h^*_{i,T}$
0-4	0,18	0,9961	0,18	0,00	0,00
5-9	0,06	0,9957	0,06	0,00	0,00
10-14	0,03	0,9953	0,03	0,10	0,10
15-19	0,07	0,9940	0,07	0,15	0,15
20-24	0,13	0,9923	0,13	0,45	0,45
25-29	0,26	0,9903	0,26	0,55	0,54
30-34	0,53	0,9878	0,52	0,90	0,89
35-39	1,34	0,9843	1,32	3,05	3,00
40-44	5,00	0,9780	4,89	7,35	7,19
45-49	15,38	0,9677	14,88	22,00	21,29
50-54	36,55	0,9501	34,73	53,35	50,69
55-59	70,62	0,9225	65,15	98,10	90,50
60-64	105,78	0,8823	93,33	147,15	129,83
65-69	157,56	0,8243	129,87	196,80	162,22
70-74	180,06	0,7439	133,94	215,15	160,05
75-79	197,95	0,6290	124,52	239,00	150,33
80-84	237,58	0,4518	107,34	266,30	120,31
85+	188,40	0,2110	39,76	214,05	45,16
<b>insgesamt</b>			<b>750,98</b>		<b>942,73</b>

Tabelle 5: Lungenkrebsmortalitätsrate und Lungenkrebsmortalitätsrisiko sowie Lungenkrebsinzidenzrate und Lungenkrebsinzidenzrisiko für die ganze Bevölkerung in Deutschland in Jahr 2012 [7].

Anmerkung:

Das über alle Altersgruppen aufsummierte Mortalitätsrisiko  $h_T$  im Jahr 2012 aus Tab. 5 weicht geringfügig von den in Tab. 3 berechneten Wert ab. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Altersspezifizierung nach dem 85. Lebensjahr in den zwei verwendeten Tabellen. Die statistischen Mortalitätsdaten sind bis zum 95. Lebensjahr angegeben [5 und 6], während die Inzidenzdaten lediglich bis zum 85. Lebensjahr zu entnehmen waren [7].

Der Letalitätsfaktor für Lungenkrebs im Jahr 2012 in Deutschland lässt sich mit Gl. (4.15) wie folgt berechnen:

$$k_{Lunge} = \frac{750,98}{942,73} = 0,80$$

Die Zahl 0,80 bedeutet, dass Patienten, die an Lungenkrebs erkrankt sind, mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% auch daran sterben werden. Diese Schätzung basiert auf den Risikorechnungen (vgl. Tab. 5) für Lungenkrebs bei der gesamten Bevölkerung im Jahr 2012 in Deutschland.

Es wurden für einzelne Krebsarten die  $k_T$ -Werten mit der Gl. (4.15) jährlich im Beobachtungszeitraum von 1980 bis 2012 in Deutschland berechnet (s. Anhang).

### **Verlust an Lebensqualität $q_T$ :**

Das Schadenmaß "Detriment" für Krebserkrankungen wird in ICRP 103 nicht nur mit den entsprechenden Letalitätswerten, sondern auch mit der damit einhergehenden Verringerung an Lebensqualität gewichtet (z.B. durch Schmerzen, jede Art von schädlichen Effekten durch Krebsbehandlung, etc.). Insgesamt wird die Schadenshöhe als Funktion der Letalität und der Einschränkung der Lebensqualität angegeben:

$$q_T = F(k_T) = q_{min} + k_T \cdot (1 - q_{min}) \quad (4.16)$$

Wie bereits in Abschnitt (3.3) erwähnt stellt ICRP 103 [2] drei Werte für die minimale Einschränkung der Lebensqualität  $q_{min}$  in drei verschiedenen Kategorien vor:

für Hautkrebserkrankungen:  $q_{min} = 0$

für die Schilddrüse:  $q_{min} = 0,2$

für den Rest aller Krebserkrankungen:  $q_{min} = 0,1$

Betrachtet man die Gl. (4.16) zunächst unabhängig von der Krebsart allgemein als einen mathematischen Zusammenhang zwischen  $q(k)$  und  $k$ , so lässt sich ein allgemeiner Verlauf der Funktion  $q(k)$  erstellen. Dieser wird bei drei verschiedenen konstanten Werten für  $q_{min}$  in Abb. 4 aufgetragen.

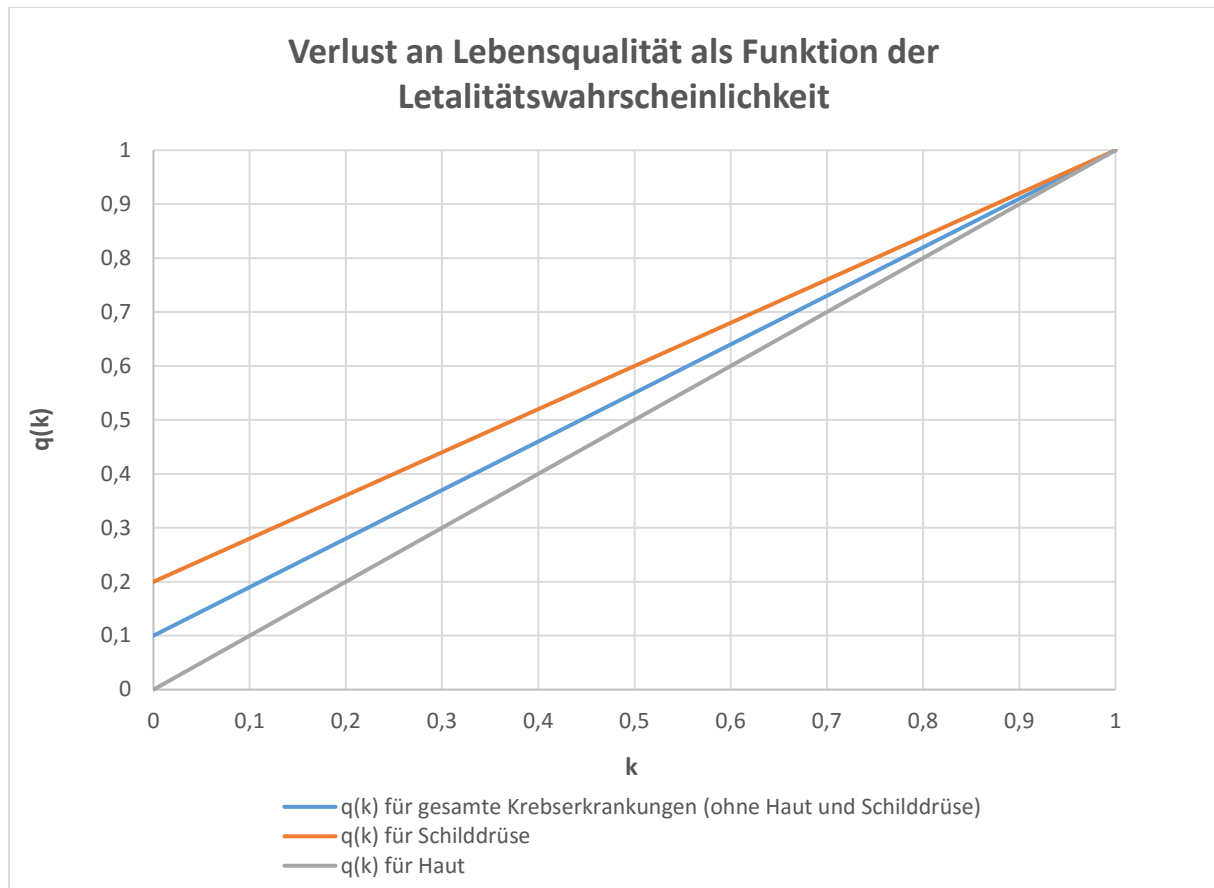


Abb. 4: Verlust an Lebensqualität  $q(k)$  in Abhängigkeit von der Mortalität  $k$  für drei Kategorien des  $q_{min}$ .

Aus Abb. 4 ist zu entnehmen, dass sich der Verlust an Lebensqualität  $q$  als Funktion des Letalitätsfaktors mit Änderung der Variablen  $k$  linear verhält.

Wird dieser Parameter beispielsweise für Lungenkrebs berechnet, so ergibt sich mit dem Letalitätsfaktor  $k_{Lunge} = 0,8$  und mit dem minimalen Wert für die Einschränkung der Lebensqualität für Lungenkrebs  $q_{min} = 0,1$  folgender Zusammenhang:



$$q_{Lunge} = 0,1 + 0,8 \cdot (1 - 0,1) = 0,82^1$$

Dieser nach dem ICRP 103-Modell berechnete Schätzwert bedeutet, dass unter Lungenkrebs leidende Patienten gegenüber gesunden Menschen 82% ihrer Lebensqualität verlieren.

Auch dieser Parameter wurde für jede einzelne Krebserkrankung jährlich im Zeitraum von 1980 bis 2012 in Deutschland berechnet (s. Anhang).

### 4.3 Abhängigkeit des Detriments von der Krebsletalität

#### Deutschland

Das Detriment nach dem Modell von ICRP103 ist überwiegend von der Krebsletalität  $k_T$  abhängig (Gl. 3.9), wobei auch der einhergehende Verlust an Lebensqualität wiederum von der Letalität abhängig ist. Aus diesem Grund wurde untersucht, wie sich aufgrund dieses Modells die Schadensentwicklung ändert, wenn sich das Detriment in Abhängigkeit von der Letalität ändert. Diese eher hypothetische Untersuchung dient dem Ziel, unter Betrachtung einzelner extremer oder auch allgemeiner Fälle den prinzipiellen Verlauf des Detriments zu diskutieren. Es wird dabei angenommen, dass die anderen Parameter, insbesondere die Risikoeffizienten und der relative Verlust an Lebenserwartung gegenüber dem Bezugsjahr 2012 unverändert blieben. Unter dieser Annahme wird das Detriment als eine Funktion betrachtet, die nur von der Letalität abhängt (Abb. 5).

Anhand dieser Modellierung lassen sich insbesondere zwei Fälle unterscheiden:

**Fall 1:** Trotz einer Krebserkrankung stirbt niemand an dieser Erkrankung ( $k = 0$ ) und Gl. (3.9) lässt sich wie folgt vereinfachen:

---

<sup>1</sup> Die Berechnung gilt wie die anderen exemplarischen Rechnungen für die gesamte Bevölkerung im Jahr 2012 in Deutschland.

$$D(0) = \sum_T R_{I,T} \cdot q_{min} \cdot L_T \tag{4.17}$$

Also ist das Detriment in diesem Fall nur von den Risikoeffizienten, dem minimalen Verlust an Lebensqualität sowie vom Verlust an Lebenserwartung abhängig. Aus Abb.5 ist für diesen Fall  $D(k = 0) = 73,8$  pro 10.000 pro Sv zu entnehmen

**Fall 2:** Alle Personen, die an Krebs erkranken, werden auch daran sterben ( $k = 1$ ).

Die Gl. (3.9) wird wie folgt vereinfacht:

$$D_T(1) = \sum_T R_{I,T} \cdot L_T \tag{4.18}$$

Hierbei ist das Detriment eine Funktion der Risikoeffizienten und des Verlusts an Lebenserwartung und das Detriment für die Gesamtheit aller Krebsarten ergibt sich zu  $D(k = 1) = 1624$  pro 10.000 pro Sv.

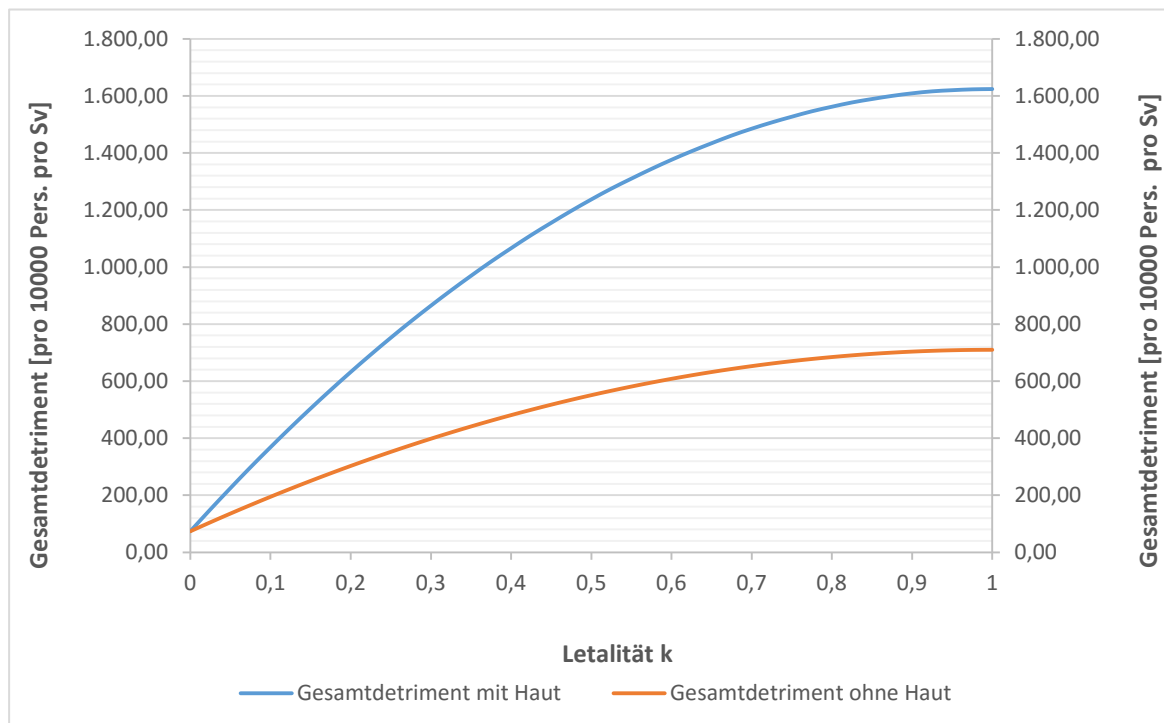


Abb. 5: Abhängigkeit des Detriments vom Letalitätsfaktor nach dem ICRP 103-Modell. Es ist das Detriment als Summe über alle Krebsarten (Gesamtdetriment mit Haut) und als Summe über alle Krebsarten mit Ausnahme von Hautkrebs (Gesamtdetriment ohne Haut) dargestellt.

Dieser große Unterschied ist auf zwei wesentliche Aspekte zurückzuführen:

- Bei einem Vergleich von Gl. (4.17) mit Gl.(4.18) ist festzustellen, dass der Verlust an Lebensqualität nur in Gl. (4.17) berücksichtigt wird, d.h.  $D(0) = q_{min} \cdot D(1)$ . Betrachtet man dies für eine einzelne Krebserkrankung mit  $q_{min} = 0,1$ , so hat das zur Folge, dass das Detriment bei  $k = 1$  um den Faktor 10 größer ist als das Detriment für bei  $k = 0$ .

Nachfolgend ist als ein Beispiel für die beiden Fälle die Berechnung für Brustkrebs angegeben:

**Fall1:** Sterblichkeit für Brustkrebs sei 0:

$$D_{Brust}(k_{Brust} = 0) = 112 \cdot 0,1 \cdot 0,98 = 10,98$$

**Fall2:** Sterblichkeit für Brustkrebs sei 1:

$$D_{Brust}(k_{Brust} = 1) = 112 \cdot 0,98 = 109,80$$

- Der zweite Aspekt ist die Berücksichtigung des Hautkrebses. Der Faktor  $q_{min}$  ist bei dieser Krebserkrankung laut ICRP 103 gleich 0 [2]. Dieses hat zur Folge, dass wie aus Tab. 4 zu entnehmen ist:  $q_{Haut} = k_{Haut}$ .

**Fall1:** Sterblichkeit für Hautkrebs sei 0:

$$D_{Haut}(k_{Haut} = 0) = 1000 \cdot 0 \cdot 0,91 = 0$$

**Fall2:** Sterblichkeit für Hautkrebs sei 1:

$$D_{Haut}(k_{Haut} = 1) = 1000 \cdot 0,91 = 910$$

In Abb. 5 ist das Detriment als Summe über alle Krebsarten aufgetragen, also insbesondere auch unter Einbeziehung des Hautkrebses. Da dieser im Gegensatz zu den anderen Krebsarten bei  $k=0$  überhaupt keinen Beitrag liefert und bei  $k=1$  einen sehr großen, kommt es im Gesamt-Letalitätsbereich zwischen  $k=0 \dots 1$  zu einem großen Unterschied des berechneten Gesamt-Detriments (Abb.5). Wenn Hautkrebs unberücksichtigt bleibt, ist der Unterschied entsprechend geringer.

Die hypothetischen Auswirkungen auf die Veränderung des Detriments durch Reduzierung der Letalität im Laufe der vergangenen Jahrzehnte können auch anhand von Abb.4

studiert werden. Unter der Annahme, dass die Letalität in einem bestimmten Zeitraum von 60% auf 40% zurückgegangen ist (Rückgang 33%), würde dies in Bezug auf das Detriment zu einem Rückgang von 1370 auf 1070 pro 10.000 pro Sv (22%) führen. Wird Hautkrebs dabei ausgeschlossen, beträgt der Rückgang ebenfalls 22%. Im Bereich großer Letalität wirkt sich ein Rückgang weniger stark auf das Detriment aus als im Bereich kleiner Letalität (Abb. 5).

#### **4.4 Berechnung des Detriments im Zeitraum von 1980 bis 2012 in zwei Beobachtungsregionen**

##### **Deutschland**

In Rahmen dieses Berichts wird davon ausgegangen, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit für die einzelnen Krebsarten und damit die Krebs-Inzidenzrate unverändert bleibt. Deshalb werden bei der Detriment-Berechnung die Werte der Risikokoeffizienten aus der ICRP 103-Veröffentlichung [2] als konstant übernommen. Auf diese Weise kann der Einfluss der Änderung von strahlungsunabhängigen Parametern auf die Schadenshöhe und die zeitliche Entwicklung des Detriments untersucht werden.

Um das Detriment für jedes Organ bzw. das gesamte Detriment berechnen zu können, werden nun alle im vorherigen Kapitel (4.2) berechneten strahlungsunabhängigen Eingangsgrößen in Gl. (3.9) eingesetzt.

$$D_{ICRP103} = R_{I,T} \cdot [k_T + (1 - k_T) \cdot q_T] \cdot L$$

In folgenden werden für jede einzelne Krebsart als Eingangsgrößen die berechneten Werte für die Letalität, für den Verlust an Lebensqualität, für den relativen Verlust an Lebenserwartung, sowie das Detriment für die ausgewählten Krebserkrankungen und das gesamte Detriment im Jahr 2012 in Deutschland in Tab. 6 angegeben.

Deutschland (2012)	$R_{I,T}$ [pro 10.000 Pers. pro Sv].	$k_T$	$q(k_T)$	$L_T = \frac{l_T}{\bar{l}}$	$D$	$\bar{D}$
Krebserkrankung $T$						
Speiseröhren	15	0,76	0,78	1,15	16,3	0,029
Magen	79	0,59	0,64	0,87	58,6	0,104
Dickdarm	65	0,41	0,47	0,70	31,3	0,055
Leber	30	0,83	0,85	0,90	26,5	0,047
Lunge	114	0,80	0,82	1,04	114,1	0,202
Knochen	7	0,62	0,66	1,86	11,4	0,020
Haut	1000	0,03	0,03	0,91	46,9	0,083
Brust	112	0,26	0,33	0,98	55,5	0,098
Eierstock	11	0,72	0,75	0,94	9,7	0,017
Blase	43	0,31	0,38	0,58	14,4	0,026
Schilddrüsen	33	0,12	0,29	0,85	10,5	0,019
Knochenmark	42	0,76	0,78	0,85	29,2	0,052
Keimdrüsen <sup>1</sup>	20	0,59	0,64	1,32	25,5	0,045
Rest <sup>2</sup>	144	0,41	0,47	1,03	114,1	0,202
<b>Gesamt-Detriment</b>					<b>563,9</b>	<b>1,000</b>

Tabelle 6: Berechnung des Detriments für jede Krebsart und des gesamten Detriments pro 10.000 Pers. pro 1 Sv nach dem Modell von ICRP 103 (Gl.3.9) für die gesamte Bevölkerung im Jahr 2012 in Deutschland

Anmerkungen:

- Die Letalitätswerte haben sich im Vergleich zu den Werten aus der Veröffentlichung von ICRP 103 verringert. Grundsätzlich könnten zwei Ursachen, unabhängig voneinander oder gekoppelt, dafür verantwortlich sein: Zum einen könnten sich (bei gleichbleibender Inzidenz) die Mortalitätsraten im Laufe der Zeit bei den ausgewählten Krebsarten durch verbesserte medizinische Versorgung oder

<sup>1</sup> und <sup>2</sup> : Für Keimdrüsen (Erbschäden) und für die restlichen Organe wurden keine eigenen Berechnungen durchgeführt. Um einen Gesamtvergleich zu ermöglichen, wurden für diese beiden Gruppen die Werte aus ICRP 103 übernommen. Es wird ferner angenommen, dass diese Parameter innerhalb der Beobachtungszeit (1980-2012) unverändert geblieben sind.

Therapiemöglichkeiten verringert haben. Zum anderen könnten sich (bei gleichbleibender Mortalität) die Inzidenzraten in dieser Zeit aufgrund einer verbesserten medizinischen Entwicklung im Bereich der Diagnostik vergrößert haben.

- Der Wert für den Letalitätsfaktor bei Hautkrebs hat eine relativ große Abweichung vom Wert aus der Veröffentlichung der ICRP 103. Es wird vermutet, dass die ICRP in dieser Veröffentlichung nur die "sonstigen Hautkrebsarten" (ohne Melanom) betrachtet hat. In Rahmen dieses Berichts ist aber Hautkrebs als Gesamtheit aller Hautkrebsarten (mit Melanom) untersucht worden. Bei dieser Untersuchung wurde der Wert  $k$  für sonstige Hautkrebsarten zu 0,006 berechnet worden.
- Der relative Verlust an Lebenserwartung zeigt unterschiedliche Entwicklungen bei einzelnen Krebsarten. Eine Verringerung dieses Parameters bei einer bestimmten Krebsart ist darauf zurückzuführen, dass sich entweder die altersspezifische Mortalitätsrate bei dieser Krebserkrankung verringert hat, dass sie sich zu höheren Altersklassen verschoben hat oder dass sich das allgemeine Sterbealter erhöht hat.
- Das Gesamt-Detriment hat sich geringfügig verringert. Gemäß ICRP 103 beträgt dieses 574 pro 10.000.pro Sv [2].

## USA

In Tab. 7 sind für jede einzelne Krebsart als Eingangsgrößen die berechneten Werte für die Letalität, für den Verlust an Lebensqualität, für den relativen Verlust an Lebenserwartung, sowie das Detriment für die ausgewählten Krebserkrankungen und das gesamte Detriment im Jahr 2012 angegeben. Die Risikoeffizienten  $R_{I,T}$  sind aus ICRP 103 [2] entnommen und damit identisch mit denen aus Tab. 6. Die Letalitätsfaktoren für die einzelnen Krebsarten sind aus den SER-Angaben [10] für die Inzidenz- und Mortalitätsraten berechnet worden.

USA 2012 Kreberkrankung $T$	$R_{I,T}$ [pro 10.000 Pers. pro Sv].	$k_T$	$q(k_T)$	$L_T = \frac{l_T}{\bar{l}}$	$D$	$\bar{D}$
Speiseröhren	15	0,94	0,95	0,92	13,8	0,021
Magen	79	0,46	0,51	0,86	50,0	0,075
Dickdarm	65	0,38	0,44	0,81	34,6	0,052
Leber	30	0,75	0,77	0,930	26,3	0,040
Lunge	114	0,83	0,84	0,78	86,2	0,130
Knochen	7	0,44	0,49	2,04	10,2	0,015
Haut	1000	0,12	0,12	0,89	194,4	0,293
Brust	112	0,16	0,25	1,00	41,4	0,062
Eierstock	11	0,62	0,66	0,90	8,6	0,013
Blase	43	0,21	0,29	0,62	11,8	0,018
Schilddrüsen	33	0,03	0,23	0,82	6,8	0,010
Knochenmark	42	0,49	0,54	0,92	29,5	0,045
Keimdrüsen <sup>1</sup>	20	0,80	0,82	1,32	25,4	0,039
Rest <sup>2</sup>	144	0,49	0,54	1,03	113,6	0,174
<b>Gesamt Detriment</b>					<b>652,7</b>	1,000

Tabelle 7: Berechnung des Detriments für jede Krebsart und des gesamten Detriments pro 10000 Pers. pro Sv nach dem Modell der ICRP103 (Gl. 3.9) für die gesamte Bevölkerung im Jahr 2012 in den USA [10]

## 4.5 Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des Detriments und des Letalitätsfaktors

### Deutschland

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert soll die zeitliche Entwicklung des Detriments innerhalb der Beobachtungszeit von 1980 bis 2012 untersucht werden. Hierbei ist insbesondere

<sup>1</sup> und <sup>2</sup>: Für Keimdrüsen (Erbschäden) und für die restlichen Organe wurden keine eigenen Berechnungen durchgeführt. Um einen Gesamtvergleich zu ermöglichen, wurden für diese beiden Gruppen die Werte aus ICRP 103 übernommen. Es wird ferner angenommen, dass diese Parameter innerhalb der Beobachtungszeit (1980-2012) unverändert geblieben sind.

zu überprüfen, ob es einen zeitlichen Trend gibt, der beispielsweise aufgrund von verbesserten Heilungschancen und Behandlungsmöglichkeiten von Krebserkrankungen zu einem reduzierten Schadensmaß geführt haben könnte. Dafür wurde das Detriment jahresweise mit Gl. (3.9) für jede Krebsart berechnet. Daraus wurde das Gesamt-Detriment pro Jahr ermittelt. Die Ergebnisse sind in einem Diagramm aufgetragen (Abb. 6).

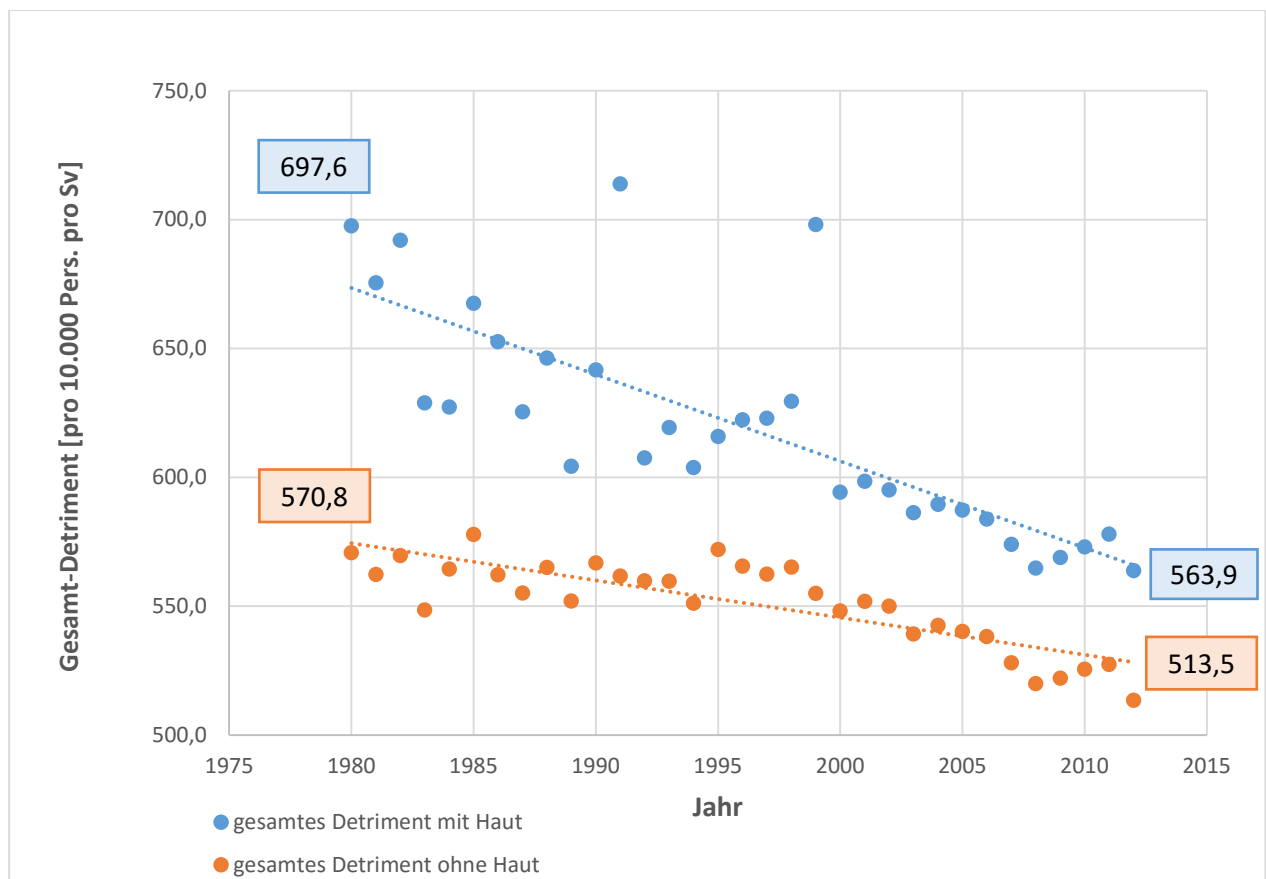


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des Gesamt-Detriments bei der gesamten Bevölkerung innerhalb der Beobachtungszeit (1980-2012) in Deutschland



---

### Anmerkungen:

- Das Gesamt-Detriment hat sich innerhalb der Beobachtungszeit (1980-2012) in Deutschland von 698 pro 10.000 pro Sv im Jahr 1980 auf 564 pro 10.000 pro Sv im Jahr 2012 verringert. (ca. um 20%).
- Unter Ausschluss von Hautkrebs betrug die Verringerung von 571 pro 10.000 pro Sv (1980) auf 514 pro 10.000 pro Sv (2012) lediglich 12%.

In diesem Bericht werden lediglich die strahlungsunabhängigen Parameter als zeitlich veränderliche Wichtungsfaktoren für das Detriment untersucht. Die festgestellte zeitliche Reduzierung des Detriments kann als eine Verringerung der Schadenshöhe interpretiert werden. Die Schadenshöhe ist überwiegend aber von der Krebsmortalität bzw. vom Letalitätsfaktor  $k$  abhängig (vgl. Gl. 3.10), wobei ebenfalls der Verlust an Lebensqualität  $q$  von der Letalität abhängig ist. Deshalb ist zu erwarten, dass eine ähnliche zeitliche Entwicklung auch beim Letalitätsfaktor für einzelne Krebsarten oder für die Gesamtheit aller Krebserkrankungen zu beobachten sein wird.

Für den vorliegenden Bericht stellte das saarländische Krebsregister die Inzidenzraten und Letalitätsraten für die Gesamtheit aller Krebserkrankungen innerhalb des Zeitraums 1980-2012 zur Verfügung [8]. Der zeitliche Verlauf des Letalitätsfaktors  $k$  ist in Abb.7 und Tab. 8 dargestellt.

Der Letalitätsfaktor hat sich innerhalb des auch für das Detriment betrachteten Zeitraums von 1980 bis 2012 ebenfalls verringert. Die Letalität nahm von 0,61 im Jahr 1980 auf 0,34 im Jahr 2012 ab. Dies entspricht einer Abnahme von ca. 45%. Bemerkenswert ist die deutlich stärkere Abnahme der Letalität im Vergleich zum Detriment im gleichen Zeitraum.

<b>Jahr</b>	<b>Inzidenzrate [pro 10<sup>5</sup> Pers]</b>	<b>Mortalitätsrate [pro 10<sup>5</sup> Pers]</b>	<b>Letalitätsfaktor <i>k</i></b>
1980	390,25	239,60	0,614
1981	393,20	237,35	0,604
1982	407,55	230,70	0,566
1983	425,25	240,35	0,565
1984	419,35	238,55	0,569
1985	436,05	237,70	0,545
1986	456,75	246,10	0,539
1987	437,55	230,15	0,526
1988	449,35	234,15	0,521
1989	458,85	223,65	0,487
1990	476,05	235,35	0,494
1991	469,6	230,60	0,491
1992	508,15	222,40	0,438
1993	480,20	228,75	0,476
1994	496,40	223,35	0,450
1995	478,30	225,90	0,472
1996	477,15	223,30	0,468
1997	469,65	212,60	0,453
1998	472,75	215,75	0,456
1999	498,85	206,05	0,413
2000	476,95	205,90	0,432
2001	492,85	203,05	0,412
2002	503,75	202,25	0,401
2003	510,85	201,65	0,395
2004	499,40	197,30	0,395
2005	491,35	195,75	0,398
2006	503,25	200,90	0,399
2007	516,20	197,60	0,383
2008	520,35	197,10	0,379
2009	519,80	188,35	0,362
2010	528,05	181,05	0,343
2011	546,35	189,95	0,348
2012	521,95	177,50	0,340

Tabelle 8: Berechnung des Letalitätsfaktors aus den Inzidenz- bzw. Mortalitätsraten für die Gesamtheit aller Krebsarten innerhalb der Zeit von 1980-2012 in Deutschland [8]

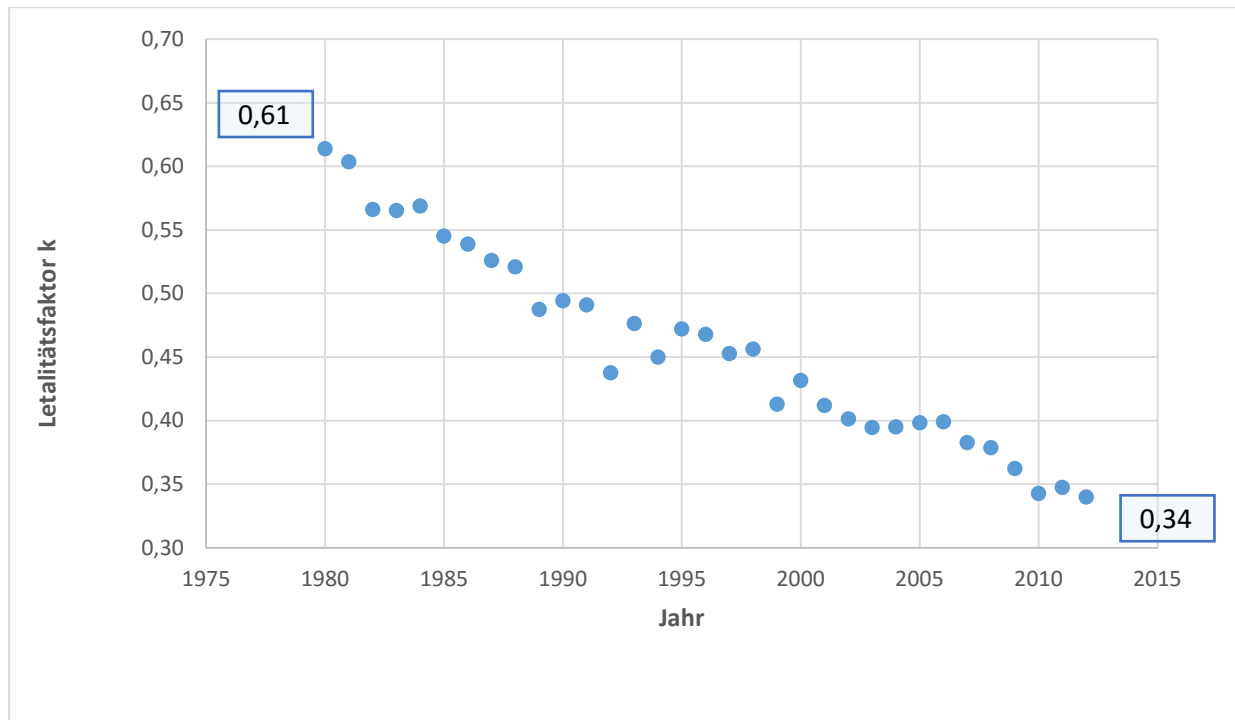


Abb. 7: Zeitliche Entwicklung des Letalitätsfaktors für die Gesamtheit aller Krebsarten bei der gesamten Bevölkerung innerhalb der Beobachtungszeit 1980-2012 in Deutschland

Wie in Abschnitt 4.4 erläutert, lässt sich das Gesamt-Detriment aus der Summation aller einzeln berechneten Detriment-Werte für jede Krebsart ermitteln. Jede einzelne Krebsart kann jedoch einen eigenen charakteristischen Zeitverlauf aufweisen, der sich von anderen oder auch vom Verlauf des Gesamt-Detriments unterscheidet. Die einer einzelnen Krebsart zugeordnete Letalität hat wie oben erläutert dabei den größten Einfluss auf die zeitliche Entwicklung. In die Berechnung des Detriments geht jedoch auch der Verlust an Lebenserwartung als Faktor ein. Dieser kann zur Folge haben, dass bei einer Krebsart der Verlust an Lebenserwartung mehr als der Letalitätsfaktor die Berechnung des Detriments beeinflusst. Diese Überlegung wird exemplarisch an zwei Krebserkrankungen, Brustkrebs und Lungenkrebs, erläutert. Es wird dargestellt, wie sich das Detriment und der Letalitätsfaktor bei diesen Krebsarten innerhalb der Beobachtungszeit von 1980 bis 2012 verändert haben.

Brustkrebs

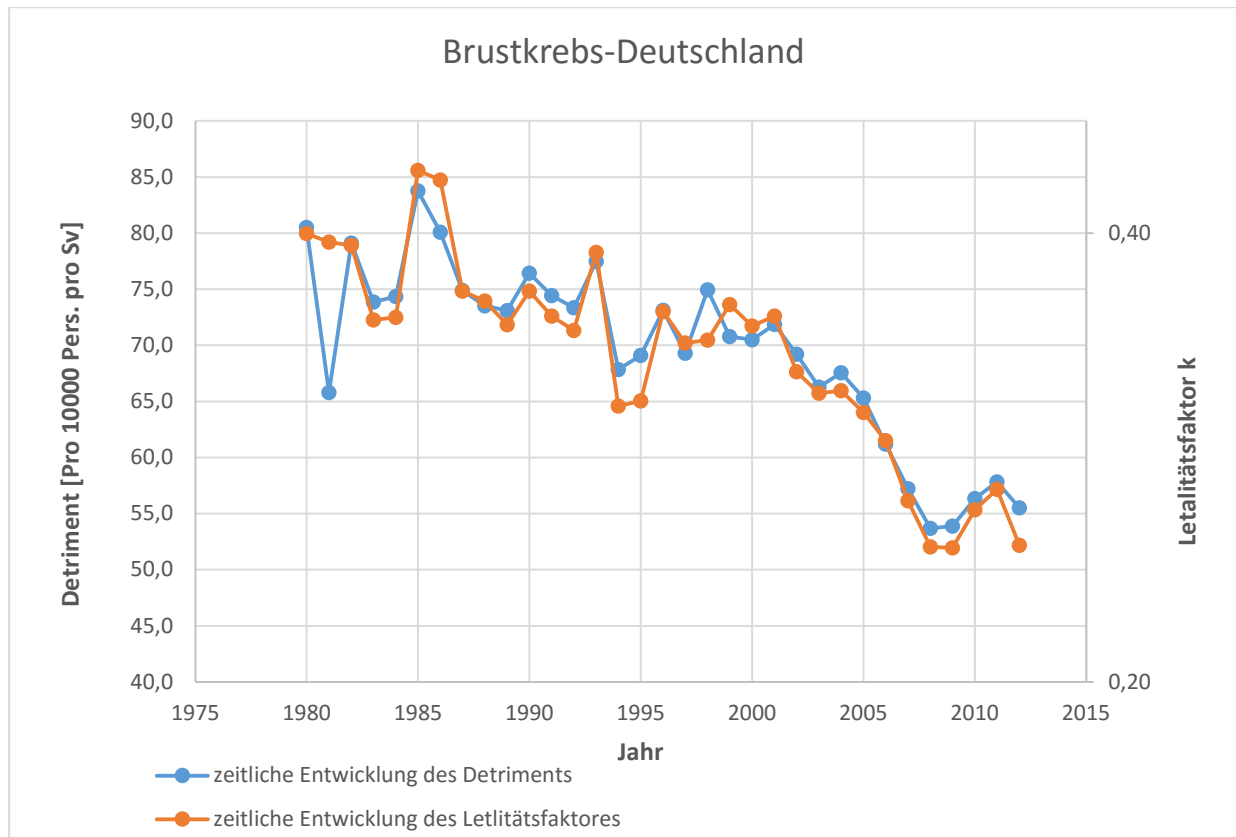


Abb. 8: Zeitliche Entwicklung der Letalität und des Detriments für Brustkrebs von 1980 bis 2012 in Deutschland

Aus Abb. 8 ist zu entnehmen, dass das Detriment und der Letalitätsfaktor für Brustkrebs einen relativ ähnlichen Verlauf haben. Das Detriment bei dieser Krebsart hat sich im Beobachtungszeitraum um 31% und der Letalitätsfaktor um 35% verringert. Die Entwicklung des Detriments wird demnach fast ausschließlich durch die Abnahme der Letalität für Brustkrebs bestimmt.

Lungenkrebs

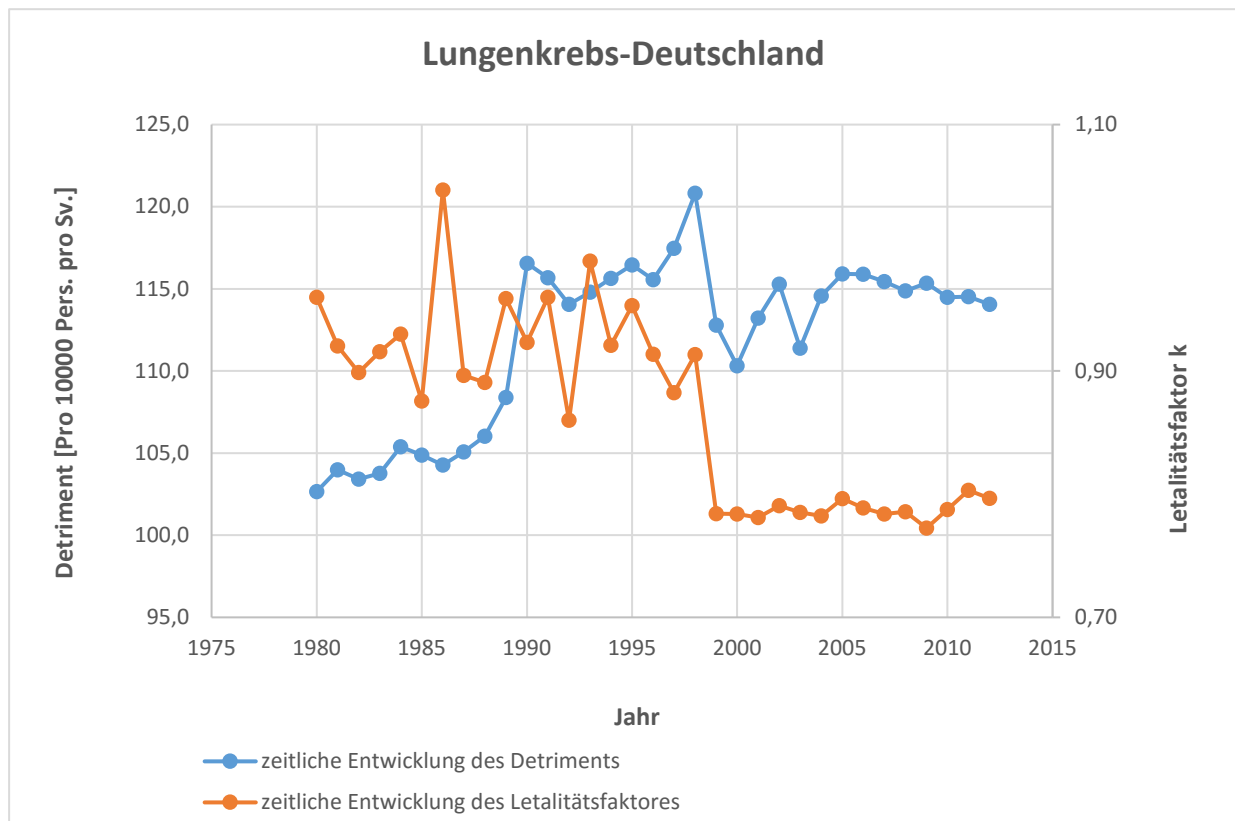


Abb. 9: Zeitliche Entwicklung der Letalität und des Detriments für Lungenkrebs von 1980-2012 in Deutschland

Der Abb. 9 kann entnommen werden, dass die beiden untersuchenden Parameter Detriment und Letalität nicht in jedem Fall den gleichen Verlauf haben müssen. Für Lungenkrebs ergibt sich im betrachteten Zeitraum ein Rückgang des Letalitätsfaktors um etwa 17%. Das Detriment jedoch hat sich dagegen im gleichen Zeitraum um 7% erhöht. In diesem Fall wirkt sich zusätzlich zur Letalität der Einfluss des Verlusts an Lebenserwartung auf den Verlauf des Detriments aus. Für Lungenkrebs, vor allem bei Frauen, führte im betrachteten Beobachtungszeitraum die Verschiebung des Sterbealters zu jüngeren Altersklassen hin zu einem größeren Verlust an Lebenserwartung. Obwohl sich die Letalität also ebenso wie bei Brustkrebs verringert hat, nimmt das Detriment für Lungenkrebs aufgrund der Vergrößerung des Verlusts an Lebenserwartung zu.

## USA

Um einen Vergleich mit der Krebsentwicklung in anderen Ländern zu ermöglichen, wurde auf Mortalitäts- und Inzidenzdaten aus den USA zurückgegriffen [10]. Die Ergebnisse des mit diesen Daten (Tab. 7) mit Gl. (3.9) berechneten Detriments sind in Abb.10 dargestellt. Die zeitliche Entwicklung des Letalitätsfaktors zeigt Abb. 11.

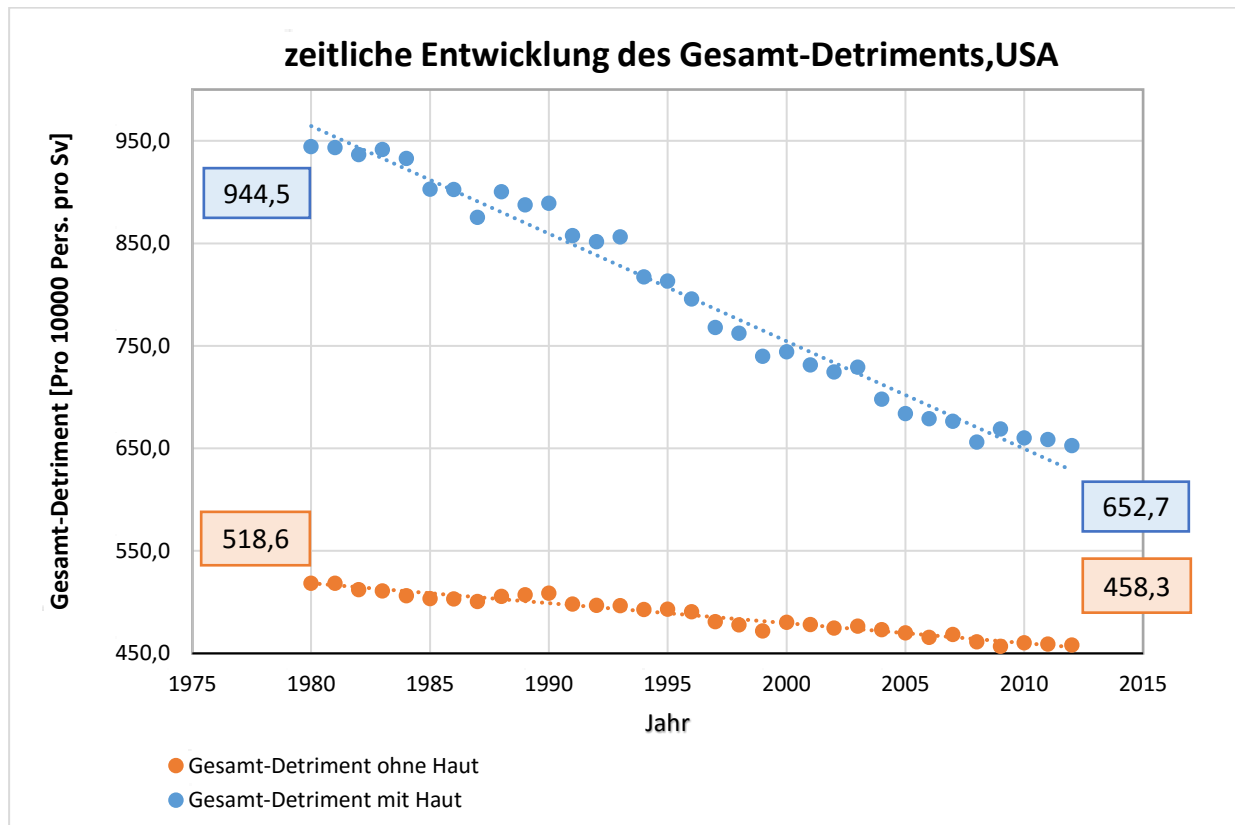


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Gesamt-Detriments der gesamten Bevölkerung von 1980-2012 in den USA

### Anmerkungen:

- Das Gesamt-Detriment für die Gesamtheit aller Krebsarten in den USA hat sich innerhalb der Beobachtungszeit von 1980 bis 2012 von 945 pro 10.000 pro Sv im Jahr 1980 auf 653 pro 10.000 pro Sv im Jahr 2012 verringert. Dies entspricht einer Abnahme von ca. 31%.
- Das Gesamt-Detriment unter Ausschluss von Hautkrebs verringerte sich im gleichen Zeitraum um ca. 12% von 519 pro 10.000 pro Sv im Jahr 1980 auf 458 pro 10.000 pro Sv im Jahr 2012.

- Die Entwicklungen des Detriments für Deutschland und für die USA folgen einem sehr ähnlichen Muster und führen zu ähnlichen quantitativen Werten.
- Der Letalitätsfaktor hat sich innerhalb der gleichen Beobachtungszeit (1980-2012) von 0,49 auf 0,38 verringert (ca. 24%).

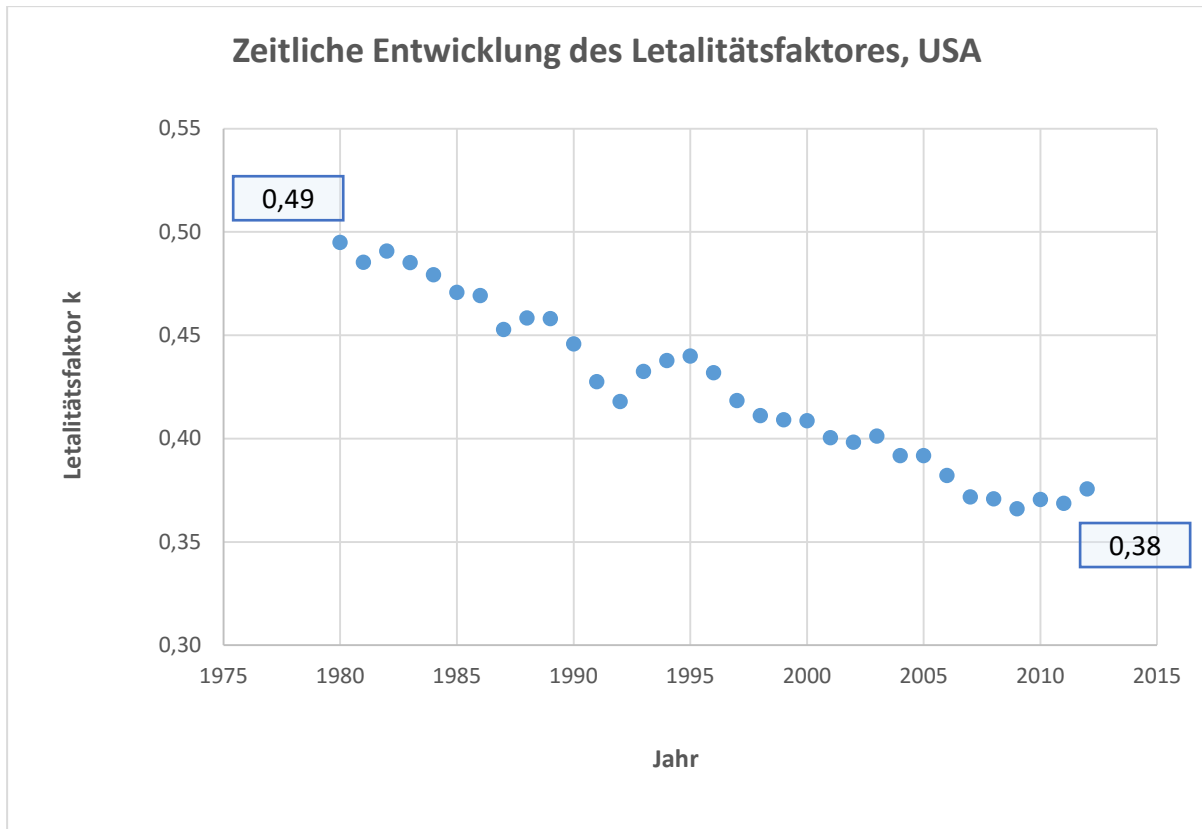


Abb. 11: Zeitliche Entwicklung des Letalitätsfaktors für die Gesamtheit aller Krebsarten bei der gesamten Bevölkerung innerhalb der Beobachtungszeit von 1980-2012 in den USA

Jahr	Inzidenzrate [pro 10 <sup>5</sup> Pers]	Mortalitätsrate [pro 10 <sup>5</sup> Pers]	Letalitätsfaktor $k$
1980	418,1	206,956	0,49
1981	425,311	206,395	0,49
1982	424,516	208,319	0,49
1983	431,132	209,208	0,49
1984	440,007	210,906	0,48
1985	448,877	211,347	0,47
1986	451,356	211,785	0,47
1987	468,032	211,913	0,45
1988	463,883	212,622	0,46
1989	467,848	214,303	0,46
1990	482,045	214,947	0,45
1991	503,081	215,064	0,43
1992	510,666	213,458	0,42
1993	493,437	213,446	0,43
1994	483,603	211,741	0,44
1995	477,141	209,886	0,44
1996	479,3	206,998	0,43
1997	486,563	203,553	0,42
1998	488,464	200,824	0,41
1999	490,689	200,722	0,41
2000	486,525	198,786	0,41
2001	490,179	196,289	0,40
2002	487,987	194,356	0,40
2003	475,696	190,888	0,40
2004	476,85	186,841	0,39
2005	472,816	185,23	0,39
2006	476,245	182,029	0,38
2007	482,176	179,259	0,37
2008	475,499	176,317	0,37
2009	473,698	173,395	0,37
2010	463,56	171,758	0,37
2011	457,585	168,711	0,37
2012	442,883	166,396	0,38

Tabelle 9: Berechnung des Letalitätsfaktors aus den Inzidenz- und Mortalitätsraten für die Gesamtheit aller Krebsarten von 1980-2012 in den USA [10]



Aus Abb. 12 ist zu entnehmen, dass für die USA im betrachteten Zeitraum das Detriment und der Letalitätsfaktor für Brustkrebs einen ähnlichen Verlauf haben. Beide Größen nehmen analog zu den bereits hinsichtlich Deutschland dargestellten Daten ab. Ein quantitativer Vergleich der Daten ist aufgrund vielfältiger sozioökonomische und anderer Unterschiede der beiden Staaten nicht unmittelbar möglich und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Der Vergleich der beiden Länder dient im Wesentlichen der Überprüfung der tendenziellen Entwicklung beider Größen.

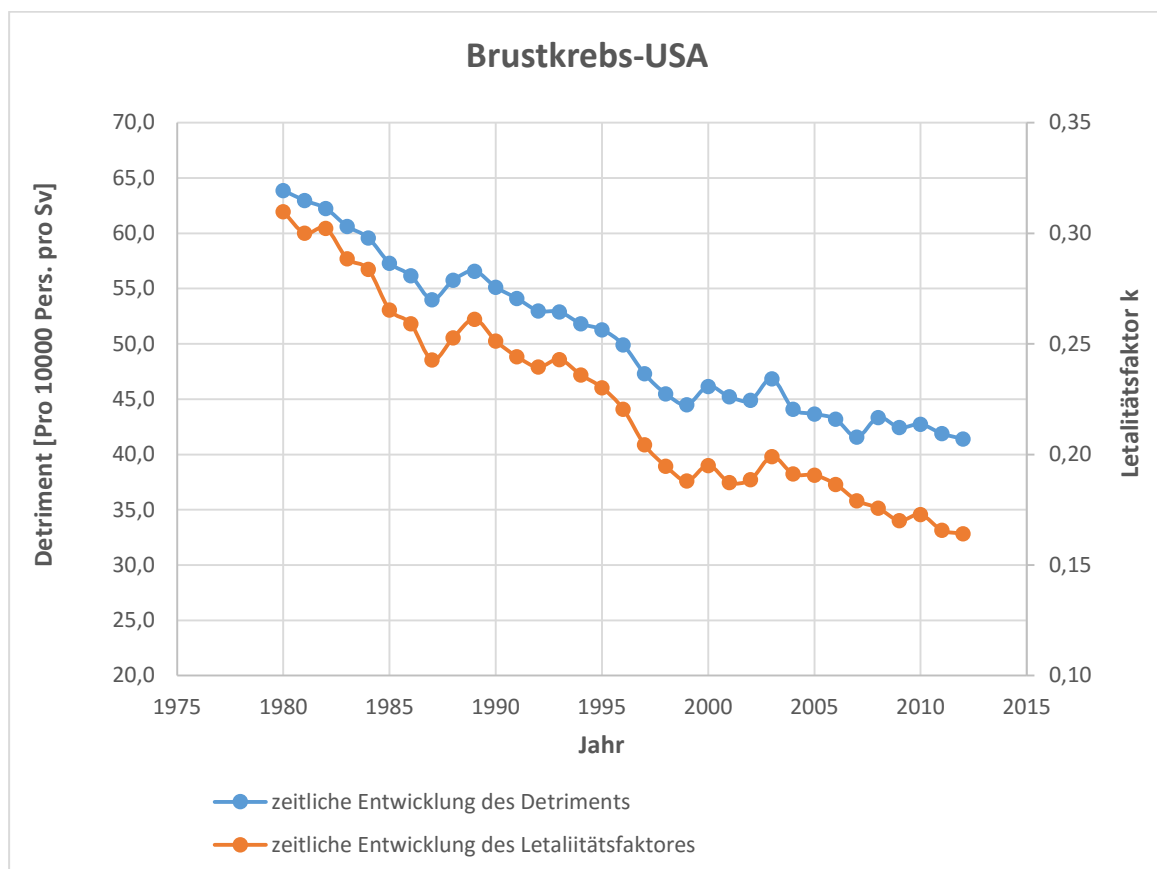


Abb. 12: Zeitliche Entwicklung der Letalität und des Detriments für Brustkrebs im Zeitraum von 1980-2012 in den USA

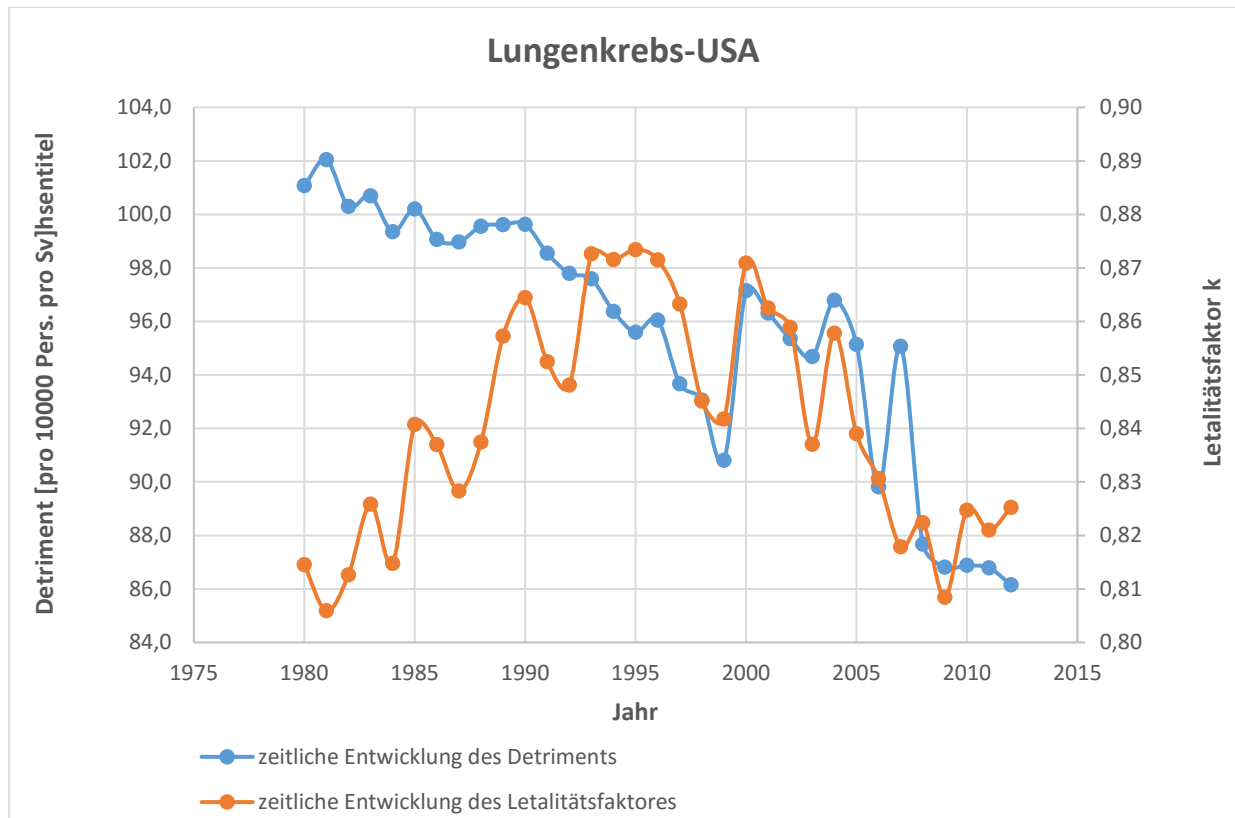


Abb. 13: Zeitliche Entwicklung der Letalität und des Detriments für Lungenkrebs im Zeitraum von 1980-2012 in den USA

Abb. 13 zeigt die Entwicklung von Detriment und Letalitätsfaktor für Lungenkrebs in den USA. Von 1980 bis 1999 zeigt das Detriment einen abfallenden Verlauf und hat sich innerhalb von 18 Jahren um etwa 11% verringert. Innerhalb der gleichen Periode zeigt die Letalität jedoch einen deutlichen Anstieg, bis 1995. Von 1995 bis 1999 gibt es hinsichtlich der Letalität einen kurzen Einbruch, nimmt aber im Folgejahr wieder deutlich zu. Im Zeitraum von 2000 bis 2010 zeigen beide Kurven einen vergleichbaren Verlauf mit abnehmender Tendenz aber deutlichen Schwankungen. Auch dieses Beispiel zeigt, dass Detriment und Letalität zwar verknüpft sind, jedoch keinen parallelen Trend in ihrer zeitlichen Entwicklung aufweisen müssen.

## 4.6 Andere Modelle zur Schadensentwicklung

In diesem Abschnitt soll diskutiert werden, ob es neben dem ICRP-Detriment-Modell für den Strahlenschutz weitere Methoden in anderen Bereichen (z.B. im Arbeitsschutz, im Gesundheitswesen, in der Ökonomie oder im Umweltschutz) gibt, die den Vergleich verschiedener Erkrankungen bzw. Schadenseffekte ermöglichen. Außerdem soll geprüft werden, ob eventuell andere Methoden relevant für mögliche Modifikationen des Detriment-Modells sein können.

In verschiedenen Bereichen kommen zur Bewertung von Gesundheitsauswirkungen bzw. Krankheitsbelastungen durch Umwelt-, Ernährungs- oder Arbeitseinflüsse unterschiedliche Kennzahlen wie beispielsweise die Health-Adjusted Life Expectancy (HALE), die Quality Adjusted Life Years (QALY) oder die Disability Adjusted Life Years (DALY) zum Einsatz [11]. Diese Methoden werden überwiegend in den Bereichen Medizin, Soziologie und Ökonomie verwendet.

### Health-adjusted life expectancy (HALE)

Die so genannte Health-Adjusted Life Expectancy (HALE) gibt die durchschnittliche Anzahl der Jahre an, die eine Person in einem bestimmten Alter erwartungsgemäß ohne Behinderungen oder Krankheit leben wird [12,13]. Diese Größe wird mithilfe von Mortalitäts- und Inzidenzkennziffern berechnet und dient der Bewertung von Einflüssen auf die Gesundheit oder auch der Gesundheit allgemein der Bevölkerung. Mit der Angabe der HALE kann die Belastung durch Krankheiten oder Verletzungen in einer Bevölkerung, sowie bestimmte Risikofaktoren quantifiziert werden. Auf dieser Grundlage kann somit die Leistungsfähigkeit der öffentlichen Gesundheit bewertet werden. HALE berücksichtigt insbesondere nichtmedizinische Interventionen, die direkt oder indirekt auf die Gesundheit der Bevölkerung wirken, wie z.B. die Verbesserungen des sozioökonomischen Status, ein wachsendes Bildungsniveau oder höheres Haushaltseinkommen, allgemeine Gesundheitsausbildung sowie Investitionen in anderen Sektoren (z. B. im Umweltschutz) [14,15,31]. Aufgrund der sehr allgemeinen Betrachtungsweise dieser Größe und begrenzter Spezifität ist ein Vergleich mit dem ICRP-Detriment-Modell nur sehr begrenzt möglich.

## Quality Adjusted Life Years (QALY)

Bei der Methode der qualitätskorrigierten Lebensjahre (Quality Adjusted Life Years, QALY) wird der Gesundheitszustand auf einer Skala bewertet, auf welcher der Tod den Nullpunkt und der Zustand vollkommener Gesundheit den Wert 1 ergibt. Grundsätzlich wird QALY einer Kosten-Nutzen-Analyse zugeordnet [15,23], was insbesondere auch an der allgemeinen Definition der QALY deutlich wird:

$$QALY = \text{Lebenszeit} \cdot \text{qualitativer Nutzwert} \quad (4.19)$$

Der qualitative Nutzwert gibt die Lebensqualität als Nutzwert zwischen 0 und 1 an. Im Grunde stellt QALY keinen Verlust von gesund verbrachten Jahren dar, sondern korrigiert die verbleibende Lebensdauer um die Lebensqualität. Dabei wird die erwartete Dauer jedes Gesundheitszustandes mit der Bewertung dieses Zustandes gewichtet. QALY ermöglicht die Vergleichbarkeit von Behandlungsmethoden und die Eignung von Behandlungsmethoden, das Leben zu verlängern. Damit ermöglicht QALY eine allgemeine Vergleichbarkeit alternativer Parameter durch Komplexitätsreduktion, nämlich eine Reduktion auf lediglich zwei relevante Faktoren [15]. Im Bereich der Medizin betrifft dies beispielsweise die Wahl einer adäquaten Behandlung. Die maßgeblichen zwei Größen stellen in diesem Fall die "Restlebenserwartung" und die "Lebensqualität" dar [15].

Die Grundidee der QALY-Methode ähnelt dem Detriment-Modell der ICRP. Auch hier findet eine quantitative Bewertung einer Krankheit einschließlich der Einschränkung der damit verbundenen Lebensqualität statt. Mit dieser quantitativen Bewertung ist ein Vergleich verschiedener Krankheiten hinsichtlich ihres Schweregrads möglich.

Der Erfolg einer Behandlung kann sowohl die Lebenserwartung als auch die Lebensqualität eines Patienten positiv beeinflussen. Die gewonnenen Lebensjahre, die QALYs, können entweder durch einen Zuwachs an Lebenserwartung oder an Lebensqualität zustande kommen oder durch beides.

---

Angenommen lediglich die Lebenserwartung durch eine bestimmte Behandlung einer Krankheit (z.B. einer Krebserkrankung) sei verbessert worden und ohne Behandlung betrage der zugeordnete Wert der Lebensqualität des Patienten 0,7 und die Lebenserwartung 10 Jahre. Durch die Behandlung der Krankheit (z.B. eine strahlentherapeutische Maßnahme) verbessert sich die Lebenserwartung des Patienten auf 13 Jahre. Also lassen sich die zusätzlichen QALYs durch die Multiplikation der 3 zusätzlichen Jahre mit der Lebensqualität von 0,7 berechnen:

$$QALY = 3 \cdot 0,7 = 2,1 \text{ Jahre}$$

Sei in einem anderen Beispiel der Fall betrachtet, dass durch die Behandlung ausschließlich die Lebensqualität des Patienten verbessert wird, jedoch die Lebenserwartung nicht beeinflusst wird.

Verbessert sich beispielweise bei einer gleichbleibenden Lebenserwartung von 10 Jahren der Wert der Lebensqualität von 0,7 (ohne Behandlung) auf 0,9 (mit Behandlung), so ergibt sich für die gewonnenen Lebensjahre QALY aus Multiplikation der Lebenserwartung und gestiegener Lebensqualität:

$$QALY = 10 \cdot 0,2 = 2,0 \text{ Jahre}$$

Die Behandlung einer Krankheit kann sowohl die Lebenserwartung als auch die Lebensqualität beeinflussen.

In einem Fallbeispiel, bei dem sich die Lebensqualität von 0,7 auf 0,9 durch Therapie verbessert hat und sich gleichzeitig die Lebenserwartung um 3 Jahre verlängert hat, können die gewonnenen QALYs wie folgt berechnet werden:

$$QALY = 10 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,9 = 4,7 \text{ Jahre}$$

## Disability Adjusted Life Years (DALY)

Das Modell des Disability Adjusted Life Years, DALY, stellt ein weiteres quantitatives Maß für die Darstellung eines gesundheitsgewichteten Schweregrads einer Erkrankung dar. Das DALY-Modell (einschränkungsgewichtete bzw. behindertenbereinigte Lebensjahre) ist ein globales Gesundheitsmaß, welches im Jahr 1993 für die Studie "The global Burden of Disease (GBD)" der WHO entwickelt wurde [19-22, 32]. Das DALY-Maß ist die erste einheitliche Erfassung von Gesundheitsbelastungen und befasst sich mit der Quantifizierung der Krankheitslast (Verlust an gesunder Lebenszeit) z.B. durch Umwelteinflüsse. DALY ist die Summe der durch frühzeitigen Tod verlorenen Lebensjahre (years of life lost, YLL) und der mit einer Krankheit bzw. Behinderung verlebten Lebensjahre (years lived in disability or disease, YLD):

$$DALY = YLL + YLD \quad (4.20)$$

YLL ist die Gesundheitsbelastung als Verlust von Lebenszeit durch das Versterben an einer Krankheit (Mortalität) und YLD repräsentiert die gewichtete mit einer Krankheit gelebte Zeit (Morbidität) [22].

Die verlorene Lebenszeit YLL durch eine bestimmte Erkrankung, die zum Tode führt, lässt sich prinzipiell aus bevölkerungsstatistischen Mortalitätsziffern bestimmen (vgl. Abschnitt 4.2. und Gl. (4.12)). Es werden jedoch auch Näherungen verwendet. Eine vereinfachte Formel zur Berechnung der YLL lautet beispielsweise [24,25]:

$$YLL = N \cdot L \quad \text{bzw.} \quad YLL = N \cdot \frac{1 - e^{-c \cdot L}}{c} \quad (4.21)$$

Die verlorene Lebenszeit YLL berechnet sich aus der Multiplikation der Anzahl der Todesfälle  $N$  mit der Lebenserwartung  $L$  zum Zeitpunkt des Todes. Der Prozess des

Älterwerdens kann mit einer Abnahme der Lebensqualität in Verbindung gebracht werden. Die WHO berücksichtigt dies durch Einführung eines Altersdiskonts von  $c=3\%$  pro Jahr [15,32].

YLD stellt die Anzahl der Inzidenzfälle  $I$  in einem Zeitraum dar, multipliziert mit der durchschnittlichen Dauer der Krankheit oder Behinderung und mit einem Krankheits-/Behinderungsfaktor ( $DW$ ). Die vereinfachte Gleichung für YLD mit  $c=3\%$  abdiskontiert lautet [24,25]:

$$YLD = \frac{I \cdot DW \cdot (1 - e^{-0,03 \cdot d})}{0,03} \quad (4.22)$$

Dabei stellt  $I$  die Anzahl der Inzidenzfälle,  $DW$  den YLD-Wichtungsfaktor (Disability Weight) und  $d$  die durchschnittliche Dauer der Erkrankung dar.

Beide DALY-Hauptkomponenten, YLL und YLD, werden mit Ausnahme des YLD-Wichtungsfaktors  $DW$  nach demselben Schema berechnet. Jedoch müssen beide DALY-Komponenten getrennt berechnet werden, da sie in der Regel auf unterschiedlichen Datenbasen beruhen. Die Berechnung von YLL basiert auf Mortalitäts- und Todesursachenstatistik und ist relativ einfach zu bestimmen. Hingegen erfolgt die Bestimmung der YLD über die Abschätzung der alters- und geschlechtsspezifischen Inzidenzen (oder Prävalenzen), sowie der Krankheitsdauern und der Heilungsraten [21, 22]. Die standardisierten YLD-Wichtungsfaktoren ( $DW$ ) berücksichtigen die Schwere der Erkrankung, welche in der Regel zwischen 0 (perfekte Gesundheit) und 1 (Zustand ist vergleichbar mit dem Tod) liegt [15,22]. Die YLD-Wichtungsfaktoren ( $DW$ ) zur Berechnung von YLD für unterschiedliche Krankheiten bzw. Behinderung werden aus Anhang 1 der Veröffentlichung von Victorian Burden of Disease Study [26] entnommen.

In Fällen einer Krebserkrankung (z.B. Lungenkrebs) gibt es häufig zwei hauptsächliche Verläufe bzw. Erkrankungsphasen. Diese grundsätzlichen Verläufe der Krebserkrankung sind im folgenden Schema dargestellt (Abb.14).

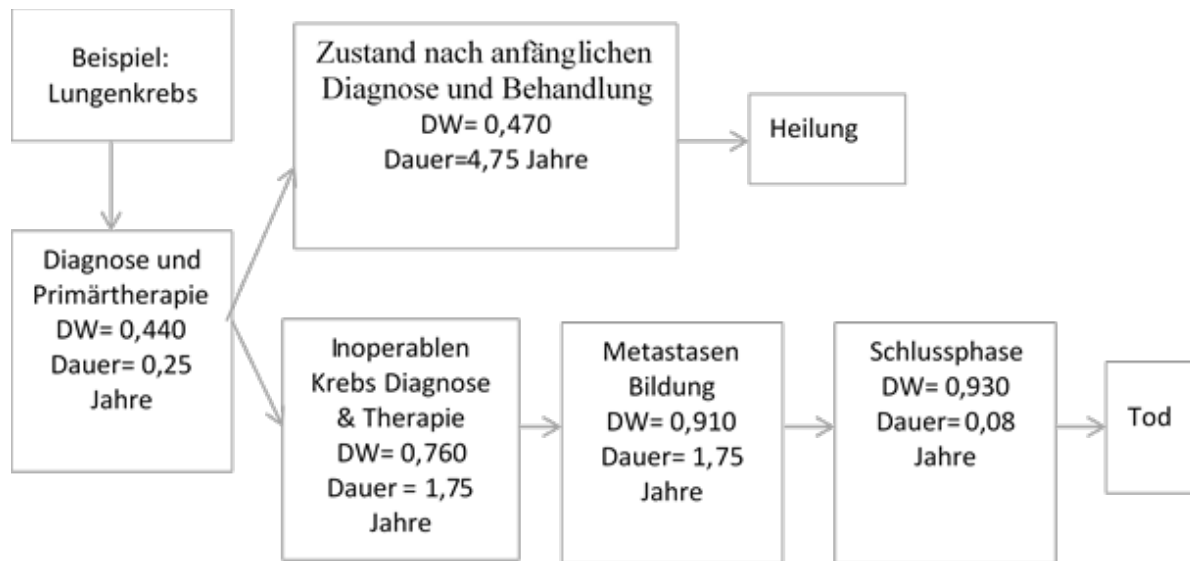


Abb. 14 Mögliche Phasen einer Krebserkrankung am Beispiel von Lungenkrebs [25]. Die Dauern der jeweiligen Phasen wurden wie in [25] beschreiben geschätzt. Die möglichen Phasen, sowie die YLD-Wichtungsfaktoren  $DW$  wurden aus [26] entnommen.

Die unterschiedlichen Phasen im Krankheitsverlauf werden bei der Berechnung der DALY berücksichtigt. Hierbei wird die Dauer der Krankheit mit dem YLD-Wichtungsfaktor  $DW$  gewichtet, indem  $DW$  für die jeweilige Phase mit der Dauer multipliziert wird. Anschließend werden die Produkte addiert [26].

Als Beispiel kann DALY für Lungenkrebs, der nicht zu einer Heilung führt, anhand der Wichtungswerte aus Abb. 14 sowie mit den Inzidenz- und Mortalitätsraten mit Hilfe der Gl. (4.20) bis (4.22) berechnet werden. Im Falle einer zum Tode führenden Lungenkrebserkrankung ergibt sich somit gemäß Abb. 14 der Gesamt-Wichtungsfaktor  $DW_g$  zu:

$$DW_g = \sum DW \cdot d = 3,11$$

Die mit Behinderung/Krankheit gelebten Lebensjahre YLD lassen sich mithilfe des  $DW_g$ , der Mortalitätsrate aus Tab. 3, dem Letalitätsfaktor aus Tab. 6 (zur Berechnung der Inzidenzrate), sowie dem 3% Abzugsdiskont summiert über die Dauer der Erkrankung bis zum Tod (3,8 Jahre in Abb. 14) nach Gl. (4.22) bestimmt werden:

$$YLD = 497 \text{ Jahre pro } 10^5 \text{ Personen}$$



Der Verlust an Lebenserwartung aufgrund einer Lungenkrebserkrankung ist nach Tab.4 11,7 Jahre. Mit Gl. (4.21) ergibt sich entsprechend eine verlorene Lebenszeit von:

$$YLL = 544 \text{ Jahre pro } 10^5 \text{ Personen}$$

Vergleiche: Die Summe aus YLL und YLD ergibt ein DALY von:

$$DALY = YLL + YLD = 1041 \text{ Jahre pro } 10^5 \text{ Personen}$$

Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tab. 10 dargestellt.

<b>Deutschland 2012</b>	<b>Inzidenzrate</b> [pro 10 <sup>5</sup> pro Jahr]	<b>Mortali- tätsrate</b> [pro 10 <sup>5</sup> pro Jahr]	<b>Gewich- tungs- faktor DW</b>	<b>YLL</b> [pro 1/10 <sup>5</sup> ]	<b>YLD</b> [pro 1/10 <sup>5</sup> ]	<b>DALY</b> [pro 1/10 <sup>5</sup> ]
<b>Lunge</b>	44,1	55,2	3,11	544	497	1041

*Tabelle 10: Berechnung von DALY anhand eines Beispiels für nicht geheilten Lungenkrebs. Die Dauer der Erkrankung beträgt 3,8 Jahre bis zum Tod.*

1 DALY entspricht einem ganzen verlorenen gesunden Lebensjahr. Die oben berechnete DALY für Lungenkrebs bedeutet, dass die Krankheit Lungenkrebs für einen Verlust von 1041 gesunden Lebensjahren unter 100.000 Personen verantwortlich ist.

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Methoden QALY und DALY können zwar zur Schätzung eines Schadensmaßes verwendet werden, jedoch unterliegen diese Methoden gewissen Einschränkungen, die z.B. die emotionale und mentale Gesundheit, Einflüsse auf Karriere bzw. Familie und nicht gesundheitsbezogene Einflüsse z.B. wirtschaftliche oder soziale Konsequenzen (Verlust des Arbeitsplatzes) betreffen. QALY kann bei chronischen Erkrankungen und Präventivmaßnahmen geringe Sensitivität aufweisen, da die Zuordnung von "Nutzwerten" für Gesundheitszustände einer gewissen Subjektivität unterworfen ist. DALY wird mit einer durchschnittlichen Lebenserwartung berechnet, welche zur Überschätzung der DALY führen kann, wenn die tatsächliche (lokale) Lebenserwartung kürzer ist.

Die als "Gesundheitsmaß" dienenden Kenngrößen QALY und DALY sind in ihrer Struktur und bzgl. ihres Anwendungszwecks dem ICRP-Detriment-Konzept zwar durchaus ähnlich. In ihrer Ausprägung und in den Einzelheiten ihrer Definition bestehen jedoch erhebliche Unterschiede. Dies drückt sich bereits in der Einheit der Kenngrößen aus: Während das Detriment ein dimensionsloser Faktor zum Risikokoeffizienten darstellt, sind QALY und DALY Zeitangaben mit der Einheit Jahre. Somit ist allein aus diesem Grund ein unmittelbarer Vergleich nicht möglich. Prinzipiell wäre es jedoch mit Modifikationen in den Modellen durchaus möglich, daraus ein gemeinsames Modell zu bilden oder ein Modell an die anderen entsprechend anzupassen.

## 5 Abschließende Betrachtung

In die Definition des Detriments der ICRP gehen nicht nur Strahlungsparameter, wie die organspezifischen Risikokoeffizienten ein, sondern auch allgemeine gesundheitsstatistische Parameter, die zwar die "Schadenshöhe" eines strahleninduzierten Effekts kennzeichnen sollen, selbst jedoch weitgehend unabhängig von einer Strahlenexposition sind. Diese Parameter sind einer zeitlichen Entwicklung unterworfen, die sowohl die allgemeine Krebsentwicklung in der Bevölkerung als auch Fortschritte in der medizinischen Diagnostik und Therapie widerspiegeln. Nimmt aufgrund dieser Einflüsse die Schadenshöhe und damit das Detriment in einer zeitlichen Entwicklung ab, so verringert sich damit ebenfalls das "Strahlenrisiko", ohne dass die Mechanismen der Strahlenwirkung selbst verändert oder davon beeinflusst sind. Die auf der Grundlage des ICRP-Detriment-Modells definierte "Strahlenwirkung" ist also abhängig von der Krebsentwicklung in der Bevölkerung und vom medizinischen Fortschritt.

Im Zusammenhang mit Überlegungen und Diskussionen zur Grenzwertfestlegung im Strahlenschutz wird eine Zuordnung bzw. Verknüpfung von "Dosis" (z.B. effektive Dosis) und "Strahlenwirkung" (z.B. Detriment) vorgenommen. Dies geschieht unter Hinzuziehung verschiedener Annahmen und Bedingungen (das genaue Verfahren hierzu ist nicht Gegenstand dieses Berichts). Wird die Festlegung eines Grenzwerts an einen bestimmten Wert einer noch zu tolerierenden Wirkung (Risiko) geknüpft, so könnte sich der Grenzwert ändern, wenn sich die zugeordnete (tatsächliche oder angenommene) Wirkung ändert. Würde sich also im Zuge einer Reduzierung der Krebsletalität damit auch das Detriment verringern, so würde einer gleichen zu tolerierenden Wirkung ein höherer Grenzwert entsprechen. Eine solche Überlegung hätte erhebliche Implikationen für die Konzeptionen des Strahlenschutzes und vor allem auch für die Kommunikation und Wahrnehmung von Strahlenrisiken in der öffentlichen Diskussion.

In ihrer Stellungnahme zum Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF) [3] empfiehlt die Deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) den DDREF an die neueren Erkenntnisse anzupassen und gegebenenfalls abzuschaffen. Aufgrund seiner Bedeutung für die Risikobewertung und die Konsequenzen für den Strahlenschutz empfiehlt die SSK darüber hinaus, im Zuge dieser Anpassung auch alle anderen Parameter, die

in das Detriment, d. h. in die Angabe des Strahlenschadens eingehen, an den aktuellen wissenschaftlichen Stand anzupassen. Dem lag die Überlegung zugrunde, dass die Abschaffung des DDREF zwar eine Erhöhung der Abschätzung der Strahlenwirkung bedeuten würde, die Anpassung der anderen Parameter jedoch eine gewisse kompensatorische Wirkung haben würde. Die Ergebnisse des vorliegenden Berichts zeigen jedoch, dass selbst bei einem starken Rückgang der Letalität von Krebserkrankungen (im Zeitraum von über 30 Jahren in Deutschland fast 50%) das Detriment lediglich um 20% abnimmt, unter Ausschluss von Hautkrebs sogar nur um etwas mehr als 10%. Der kompensatorische Effekt, den die Berücksichtigung der nicht-strahlungsabhängigen Parameter hätte, ist also bemerkenswert gering und würde den Effekt, der durch die Abschaffung des DDREF zustande käme, nicht ausgleichen.

Bei Überlegungen im Zusammenhang mit der Festlegung von Grenzwerten im Strahlenschutz spielt zunehmend der Vergleich zu anderen Gebieten im Umwelt- und Arbeitsschutz, für die Grenzwerte definiert werden, eine große Rolle. In mancherlei Hinsicht nähern sich in jüngster Zeit die vielfach sehr unterschiedlichen Konzepte einander an [29,30]. Ein wesentlicher Grund dafür ist u.a. die Etablierung von Expositions-Risikobeziehungen als Grundlage für die Akzeptanz und Toleranz von gesundheitlichen Risiken durch krebserzeugende Stoffe im Rahmen der Gefahrstoffverordnung. Jedoch unterscheiden sich die akzeptablen und die tolerablen Risiken nicht nur hinsichtlich ihrer Risikowerte, sondern auch hinsichtlich ihrer Risikodefinitionen von denen im Strahlenschutz [29,30]. Während beispielsweise die TRG 910 [30] im Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit als Maß für das Toleranzrisiko ein (ungewichtetes) Erkrankungsrisiko betrachtet, ist es im Strahlenschutz das Detriment, das als Schadensmaß herangezogen wird.

Um die unterschiedlichen Schutzkonzepte noch weiter anzunähern, bietet sich die Verwendung von Modellen und Methoden an, die es erlauben, die kanzerogenen Wirkungen durch verschiedene Einfluss- bzw. Risikofaktoren (Strahlung, Chemikalien usw.) quantitativ gegenüberzustellen und zu vergleichen. Das Detriment-Modell der ICRP wäre eine denkbare Möglichkeit, ebenso wie die in anderen Umwelt- und Arbeitsschutzbereichen eingesetzten Konzepte, wie die in diesem Bericht vorgestellten Kenngrößen HALE, QALY oder DALY.

---

## Literatur

- [1] ICRP 26: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 26. Annals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford (1977)
- [2] ICRP 103: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103. Annals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford (2007)
- [3] SSK: Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF); Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 268. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 13./14. Februar 2014
- [4] ICRP 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60. Annals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford (1990)
- [5] Statistisches Bundesamt: Statistisches Bundesamt Deutschland - Genesis-Online;  
<https://www-genesis.destatis.de>  
(abgerufen am 18.03.2016)
- [6] Statistisches Bundesamt: Gesundheit Statistik Gesundheitsberichterstattung des Bundes;  
[http://www.gbe-bund.de/gbe10/pkg\\_isgbe5.prc\\_isgbe?p\\_uid=gast&p\\_aid=0&p\\_sprache=D](http://www.gbe-bund.de/gbe10/pkg_isgbe5.prc_isgbe?p_uid=gast&p_aid=0&p_sprache=D)  
(abgerufen am 18.03.2016)
- [7] Robert-Koch-Institut: Krebs-Methoden;  
[http://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Methoden/methoden\\_node.html](http://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Methoden/methoden_node.html)  
(abgerufen am 18.03.2016)
- [8] Krebsregister Saarland: Gesundheitsberichterstattung (GBE) Saarland-Krebsregister;  
<http://www.krebsregister.saarland.de/datenbank/datenbank.html>  
(abgerufen am 18.03.2016)
- [9] Centers for Disease Control and Prevention: CDC wonder. US Dept. Health and Human Services;  
<http://wonder.cdc.gov>  
(abgerufen am 18.03.2016)
- [10] National Cancer Institute: Surveillance, Epidemiology, and End Results Program: SEER-Tables, US Dept. Health and Human Services  
<http://seer.cancer.gov/faststats>  
(abgerufen am 18.03.2016)

- 
- [11] Hennig P: Die sozioökonomische Analyse (REACH-Info 7), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA); 1. Auflage (2010)
- [12] Europäische Kommission: Öffentliche Gesundheit und Risikobewertung: Gesunde Lebensjahre Europäische Kommission  
[http://ec.europa.eu/health/indicators/healthy\\_life\\_years/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/health/indicators/healthy_life_years/index_de.htm)  
(abgerufen am 28.02.2016)
- [13] Public Health Agency of Canada: Health-Adjusted Life Expectancy (HALE) in Canada 2012  
<http://www.phac-aspc.gc.ca/cd-mc/hale-evas-eng.php>  
(abgerufen am 29.02.2016)
- [14] Kindig DA: Purchasing population health - Paying for results; University of Michigan Press; 1st edition (1997)
- [15] Schöffski O, Graf von der Schulenburg JM: Gesundheitsökonomische Evaluationen; Springer-Verlag Berlin-Heidelberg; 4. Auflage (2011)
- [16] Wolfson MC: Health-Adjusted Life Expectancy; Health Reports; Vol. 8, No. 1 (1996)
- [17] Europäische Informationszentrum für Lebensmittel: Die Bewertung der Krankheitslast – die Kennzahlen QALY und DALY;  
<http://www.eufic.org/article/de/artid/Bewertung-Krankheitslast-Kennzahlen-QALY-DALY/>  
(abgerufen am 29.02.2016)
- [18] Plass D, Pinheiro P, Mangen MJ: Health adjusted Life Years (HALY) – A Promising Measure to Estimate the Burden of Zoonotic Diseases on Human Health?; Zoonosis (2012)
- [19] Breyer F, Zweifel P, Kifmann M: Gesundheitsökonomik; Springer-Verlag; 6. Auflage (2013)
- [20] Fleßa S, Greiner W: Grundlagen der Gesundheitsökonomie, Eine Einführung in das wirtschaftliche Denken im Gesundheitswesen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 3. Auflage (2013)
- [21] Amalhaf S: Das Schadensmaß „Detriment“ im Strahlenschutz, Masterarbeit, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen (2014)
- [22] Gawrich S: Analyse der Einsatzmöglichkeiten und Validierung des globalen Gesundheitsmaßes 'Disability adjusted life years' (DALY) mit Mikrodaten am Beispiel des United States Renal Data System; Dissertation; Bochum (2002)

- 
- [23] Gold MR, Stevenson D, Fryback DG: HALYs and QALYs and DALYs: Similarities and differences in summery measures of population health; *Ann. Rev. Public Health*, 23, 115–134 (2002).
- [24] Murray CJ, Lopez AD: *The Global Burden of Disease: A comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries and risk factors in 1990 and projected to 2020*. Cambridge, MA, Harvard School of Public Health, (Global Burden of Disease and Injury Series, vol. I) (1996)
- [25] Stouthard MEA, Essink-Bot ML, Bonsel GJ: Disability weights for diseases: a modified protocol and results for a Western European region; *European Journal of Public Health*; 10, 24-30, (2000)
- [26] Vos T, Begg S: *The Victorian Burden of Disease Study: mortality*. Melbourne, Public Health and Development Division, Department of Human Services, 1999
- [27] Donev D, Zaletel-Kragelj L, Bjegovic V, Burazeri G: *Measuring the Burden of Disease: Disability Adjusted Life Year (DALY)*; Hans Jacobs Publishing Company; 715-748 (2010)
- [29] Bender HF: Review. Risk concepts for cancerogenic substances. ASU International Edition, DOI 10.17147/ASUI.2014-06-10-02 (2014)
- [30] TRGS: Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 910. Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen. Stand 28.10.2014
- [31] WHO: *Methods for Life Expectancy and Healthy Life Expectancy*. Department of Health Statistics and Information Systems, Genf (2014)
- [32] WHO: *Introduction and Methods: Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels*. Geneva, World Health Organization, (WHO Environmental Burden of Disease Series, No. 1) (2003)

