

# Wie nützlich und wie schädlich sind Strahlen ?

von Eike Roth (email: Eike.Roth@energie-fakten.de)

## **Hier die Fakten** (vereinfachte Kurzfassung)

### **Strahlenarten**

Strahlen sind elektromagnetische Wellen oder Teilchenstrahlen. Elektromagnetische Wellen (auch „Quantenstrahlen“ genannt) unterscheiden sich in ihrer Energie, Teilchenstrahlen in der Art der Teilchen und in deren Energie. Strahlen mit genug Energie, um Elektronen aus dem Verband eines Atoms oder Moleküls herauszuschlagen, heißen „ionisierende Strahlen“.

### **Künstliche und natürliche Strahlen**

Alle bekannten Strahlenarten kommen sowohl in der Natur als auch künstlich, d. h. als Produkt menschlicher Tätigkeiten, vor. Es sind nicht die Strahlen, die sich in „künstliche“ und „natürliche“ unterscheiden, sondern nur die Quellen, die diese Strahlen aussenden, können natürlicher Art, oder vom Menschen geschaffen sein.

### **Nützliche Effekte von Strahlen**

Mit dem Zähmen des Feuers hat der Mensch gelernt, sich Wärme- und Lichtstrahlen nutzbar zu machen. Es war dies die erste künstliche Anwendung von Strahlen. Heute gibt es für die verschiedenen Strahlenarten einschließlich ionisierender Strahlen eine Vielzahl von nützlichen Anwendungen. Strahlen sind nicht nur allgegenwärtig in unserem Leben, sondern sie sind auch unverzichtbar.

### **Die Dosis macht das Gift**

Dieses von Paracelsus für chemische Stoffe gefundene Prinzip gilt auch für Strahlen.

### **Biologische Wirkungen ionisierender Strahlen**

Biologisch bedeutsam sind vor allem Schäden an den Desoxyribonukleinsäure (DNS)-Molekülen, den Trägern der Erbinformation in den Zellen, da sie zu Krebs oder zu Missbildungen in der Nachkommenschaft führen können. DNS-Schäden werden in sehr großer Zahl durch Produkte des körpereigenen Stoffwechsels verursacht. Die Zahl ist so groß, dass wir ohne äußerst effektiv arbeitende Reparatursysteme nicht überleben könnten. In sehr viel selteneren Fällen - bei kleinen Dosen um mehr als eine Million mal seltener – werden DNS-Schäden auch durch ionisierende Strahlen ausgelöst. Das Verhältnis erklärt, warum bei kleinen zusätzlichen Strahlendosen keine Zunahme von Krebserkrankungen beobachtet wird. Häufig ist die Krebshäufigkeit sogar eher reduziert. Dies wird von vielen Experten durch Stimulierung der Reparatursysteme erklärt.

### **Biologische Wirkungen nicht ionisierender Strahlen**

Wissenschaftlich heftig umstritten sind sogenannte „nicht thermische“ Wirkungen langwelliger elektromagnetischer Wellen. Immer wieder berichtete Zusammenhänge mit erhöhten Krebsraten konnten bisher nicht bestätigt werden.

## Hier die Fakten (fachspezifische Langfassung):

### 1. Strahlenarten

Strahlen sind elektromagnetische Wellen oder Teilchenstrahlen. Elektromagnetische Wellen (auch „Quantenstrahlen“ genannt) unterscheiden sich in ihrer Energie: Langwellige Strahlen haben wenig, kurzwellige haben viel Energie. Quantenstrahlen reichen von langwelligen (und damit energiearmen) Radiowellen (LW, MW; KW, UKW, Handy-Strahlen) über Radarstrahlen und Lichtwellen (Infrarotlicht, sichtbares Licht und UV-Licht) bis zu Röntgenstrahlen und energiereichen (und damit kurzwelligen) Gammastrahlen.

Teilchenstrahlen bestehen aus verschiedenen schweren Teilchen (meist Elektronen oder Alpha-Teilchen, aber auch Neutronen, Protonen und viele andere Teilchen). Die Energie der Teilchenstrahlen ergibt sich aus der Masse der Teilchen und aus ihrer Geschwindigkeit (kinetische Energie): Schwere Teilchen und hohe Geschwindigkeit bedeuten hohe Energie, leichte Teilchen und niedrige Geschwindigkeit bedeuten niedrige Energie.

Ist die Energie der Strahlen größer als die Bindeenergie der Elektronen im Atom- oder Molekülverband, können sie Elektronen herausschlagen, das Atom oder Molekül also ionisieren. Entsprechend der Energie unterscheidet man daher zwischen „ionisierender“ und „nicht ionisierender“ Strahlung. Während Teilchenstrahlen infolge ihrer Masse üblicherweise immer ionisierend sind, sind langwellige elektromagnetische Wellen hierfür zu energiearm. Röntgen- und Gammastrahlen zählen ebenfalls zu den ionisierenden Strahlen.

### 2. Künstliche und natürliche Strahlen

Strahlen werden von sehr unterschiedlichen Quellen ausgesendet. Einige wichtige sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Strahlenart	Quelle
Radio- wellen	elektromagnetische Schwingkreise (Radiosender), Radiosterne
Infrarot- strahlen	Sonne, Feuer, warme oder heiße Gegenstände
Licht- strahlen	Sonne, Feuer, sehr heiße Gegenstände
UV- Strahlen	Sonne, UV-Lampen
Röntgen- strahlen	Röntgenröhren, Röntgensterne, Fernsehgeräte
Gamma- strahlen	natürliche und künstliche radioaktive Stoffe, Kernreaktoren
Alpha- strahlen	natürliche und künstliche radioaktive Stoffe
Beta- strahlen	natürliche und künstliche radioaktive Stoffe, Beschleuniger
Neutronen strahlen	Kernreaktoren, Spontanspaltungen von Natur- Uran, Höhenstrahlung

Wie ersichtlich, gibt es für alle Strahlen sowohl in der Natur vorkommende als auch vom Menschen geschaffene Quellen. Es sind nicht die Strahlen, die sich in „künstliche“ und „natürliche“ unterscheiden, sondern nur die Quellen.

### 3. Nützliche Effekte von Strahlen

Strahlen können vielfach und auf sehr unterschiedliche Weise Nutzen bewirken. Von Licht- und Wärmestrahlen kennen wir das von Alters her. Sich das Feuer nutzbar zu machen, war die erste künstliche Anwendung von Strahlen. Quantenstrahlen in Form von Radiowellen haben weit voneinander entfernt wohnende Menschen zu Nachbarn werden lassen. Die neueste Anwendungsform davon ist das Handy, das heute kaum noch jemand missen möchte. Röntgenstrahlen haben der Medizin ungeahnte Möglichkeiten zum Helfen gebracht und Millionen Menschenleben gerettet, in der Technik sind sie zu einem unentbehrbaren Instrument der Qualitätssicherung geworden. Auch für Alpha-, Beta- und Gammastrahlen gibt es in Technik und Medizin zahlreiche nutzbare Anwendungen. Neutronenstrahlen werden unter anderem in der Medizin und für Materialtestzwecke angewendet und in Kernreaktoren tragen sie zur Befriedigung unserer Energiebedürfnisse bei. Im modernen Leben sind Strahlen einfach nicht mehr wegzudenken.

### 4. Die Dosis macht das Gift

Auch das kennen wir von Wärmestrahlen und vom Licht schon lange: Kleine Dosen sind hilfreich und angenehm, große Dosen führen zu Verbrennungen oder Augenschäden. Auch bei UV-Strahlen ist es weitverbreitetes Wissen, dass kleine Mengen zu gesunder Sonnenbräune führen und große Mengen Hautkrebs verursachen. Aber das Prinzip gilt genereller: Selbst ionisierende Strahlen, die in größeren Dosen bekanntlich zu Krebs und bei sehr großen Dosen zur akuten Strahlenkrankheit

führen, haben in kleinen Dosen auch positive Wirkungen durch die Anregung von Reparatur- und Abwehrsystemen der Zellen und des Körpers (siehe Ziff. 5).

## 5. Biologische Wirkungen ionisierender Strahlen

### 5.1 Primäre Wirkungen

Auch in Lebewesen ist die primäre Wirkung ionisierender Strahlen die Ionisation von Atomen und Molekülen. Ob und wie viele solche Effekte in einem bestimmten Material zustande kommen, hängt nur von der Art der Strahlen, ihrer Energie und der Menge (Dosis) ab, nicht von der Quelle, die die Strahlung ausgesandt hat. Bei gleicher Strahlenart mit gleicher Energie und Dosis sind die Wirkungen von natürlich und künstlich verursachter Strahlung identisch.

### 5.2 Die Desoxyribonukleinsäure (DNS)-Moleküle, Träger des Bauplanes des Lebens; Schäden und Reparaturen

Die elementaren Bausteine des Lebens sind die Zellen. In ihnen erhält die Ionisation von Atomen und Molekülen ihre biologische Bedeutung. Von besonderem Interesse sind dabei die DNS-Moleküle, kompliziert aufgebaute Riesenmoleküle, in denen alle Funktionen zum Ablauf des Lebens (Erbinformation) gespeichert sind. Die Mannigfaltigkeit der durch die chemische Zusammensetzung und die räumliche Anordnung festgelegten Detailinformationen ist unvorstellbar groß. Dieser Speicher ist ein wahres Wunderwerk der Natur. Aber offensichtlich ist die Natur hier sehr nahe an die Grenzen ihrer Möglichkeiten herangegangen: Die DNS-Moleküle sind

so groß und kompliziert geworden, dass sie bereits durch kleinste Störungen, wie sie z. B. durch die Temperaturbewegung der Moleküle oder durch die Stoffwechselfvorgänge in der Zelle unvermeidbar sind, beschädigt werden können. Außerdem muss bei jeder Zellteilung die volle Information kopiert und an die Tochterzellen weitergegeben werden. Auch hierbei können sehr viele Fehler auftreten. Die DNS-Moleküle sind also kein robustes System. Schäden und Fehler sind so häufig (siehe weiter unten), dass mit ihnen das Leben nicht aufrecht erhalten werden könnte. Zur Kompensation für diese Schadensanfälligkeit hat die Natur sehr effektive Reparatursysteme entwickelt, die entstandene Schäden äußerst erfolgreich reparieren können. Nur durch diese - im Einzelnen noch nicht genau verstandenen - Reparatursysteme sind wir überhaupt lebensfähig. Auf unsere Zellen bezogen ist unser Leben alles andere als ein ruhiger Gleichgewichtszustand. Im Gegenteil, in den Zellen herrscht statt dessen ein dauernder heftiger Wettstreit zwischen Entstehung und Reparatur von Schäden. Solange die Reparatur den Wettstreit einigermaßen gewinnt, bleiben wir gesund, anderenfalls kann Krebs entstehen, oder auch, wenn es sich um Keimzellen handelt, Missbildungen in der Nachkommenschaft.

Im letzten Absatz war vereinfachend nur von „Reparatur“ die Rede. Ergänzt wird die Reparatur durch vor- und nachgelagerte Systeme: Vorgelagert sind Abwehrsysteme, die Gefahren für die DNS-Moleküle rechtzeitig erkennen und einen besseren Schutz vor Schäden organisieren. Nachgelagert sind Eliminierungssysteme, die bei Misslingen der Reparatur

geschädigte Zellen nachträglich identifizieren und für den Körper schadlos eliminieren. Diese drei Systeme zusammen sorgen für die notwendige Stabilität der gespeicherten Informationen und damit für unsere Überlebensfähigkeit. Dabei können Schwächen eines Systems durch verbessertes Funktionieren eines anderen Systems ausgeglichen werden. Erst wenn alle drei Systeme (Abwehr, Reparatur und Eliminierung) versagen, kommt es zu einer bleibenden Entartung einer Zelle, aus der dann im weiteren Verlauf Krebs entstehen kann (aber nicht muss, weil das Immunsystem des Körpers eine weitere Abwehrebene bildet; auch dauerhaft geschädigte Keimzellen führen infolge zusätzlicher Schutzsysteme keineswegs zwangsweise zu Missbildungen oder anderen Schäden in der Nachkommenschaft).

### 5.3 „Normale“ DNS-Schäden

Die wichtigste Ursache für DNS-Schäden sind chemische Angriffe durch Produkte des zelleigenen Stoffwechsels (sogenannte „oxidative Radikale“). Mit deutlichem Abstand folgen thermische Instabilitäten der DNS-Moleküle und Reproduktionsfehler bei der Zellteilung. Weitere Ursachen sind seltener.

In den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zellen, findet der Stoffwechsel zur Energieversorgung des Körpers statt. Hier wird die aufgenommene Nahrung in für den Körper nutzbare Energie umgewandelt. Dabei werden viele Radikale ("aggressive Atomformen") durch Leckagen aus den Mitochondrien in die Zellen freigesetzt, wo sie die DNS-Moleküle – jedenfalls prinzipiell – schädigen können. Man schätzt, dass in einer normalen

Körperzelle täglich etwa  $10^9$  (eine Milliarde) Radikale freigesetzt werden. Die Zelle reagiert mit der Aktivierung von Abwehrsystemen (insbesondere Ausschüttung von sogenannten „Radikalfängern“, die Radikale unschädlich machen können). Diese erreichen, dass die  $10^9$  freigesetzten Radikale „nur“ etwa  $10^6$  (eine Million) DNS-Schäden verursachen (siehe Abb.). Diese Schäden werden dann ihrerseits durch die Reparatursysteme der Zelle sehr erfolgreich repariert. Nur in etwa 0,01 Prozent der Fälle misslingt die Reparatur. Es verbleiben also etwa 100 nicht oder falsch reparierte DNS-Schäden pro Zelle und Tag. Die nachfolgenden Eliminierungssysteme können diese geschädigten Zellen erkennen und mit einer Erfolgsquote von etwa 99 % für den Gesamtkörper schadlos beseitigen. Dabei spielt die „Apoptosis“, ein programmierter Tod veränderter Zellen, eine besondere Rolle.

Abwehr-, Reparatur- und Eliminierungssysteme zusammen bewirken also, dass die sehr vielen Radikale (täglich  $10^9$ ) nur zu einem einzigen verbleibenden Zellschaden (einer Mutation) pro Zelle und Tag führen. Dieser eine bleibende Schaden pro Tag summiert sich über 70 Jahre Lebensdauer auf etwa 30 000 Mutationen in jeder Zelle eines jeden Menschen diesen Alters auf. Mutationen sind also – trotz aller Reparatursysteme – etwas sehr Häufiges und werden vom Körper weitgehend „vertragen“. Dennoch, bei ca. 30 % aller Menschen führen diese Mutationen zur Entwicklung eines makroskopisch feststellbaren Krebses. Die Zunahme der Zahl der Mutationen mit dem Alter erklärt die Altersabhängigkeit der Krebserkrankungen, wobei auch die Effektivität der Reparatursysteme mit dem Alter abnehmen dürfte.

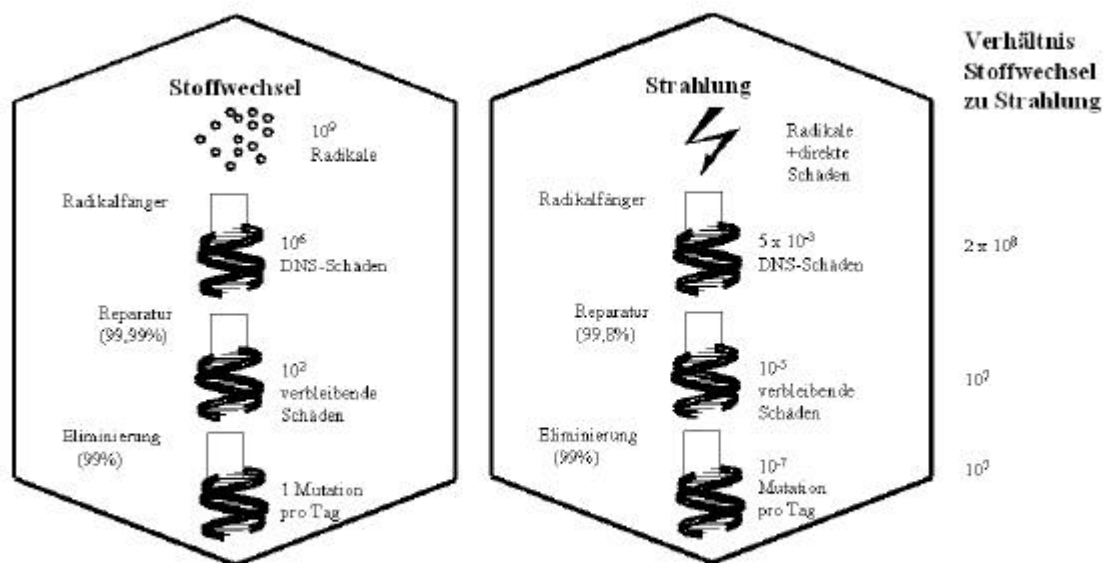


Abbildung: Vergleich von DNS-Schäden durch Stoffwechsel und durch Strahlung  
Angaben pro Zelle und Tag

## 5.4 Strahlenschäden

Diesen „normalen“ DNS-Schäden sind Schäden durch ionisierende Strahlen gegenüberzustellen. Bei einer Dosis von 1 mSv pro Jahr (das entspricht der mittleren natürlichen Ganzkörper-Strahlenexposition für jeden Erdenbürger, mit Schwankungen um mehr als den Faktor 10) wird jede Zelle etwa *ein bis zwei mal im Jahr* von der Strahlung getroffen. Dabei werden hauptsächlich ebenfalls Radikale gebildet. Diese Radikale können – wenn sie denn den Radikalfängern entkommen – wie die Radikale aus dem Stoffwechsel DNS-Moleküle chemisch angreifen. Die Strahlung kann aber auch unmittelbar DNS-Schäden durch direkten Energieeintrag auf diese Moleküle erzeugen. Auf beiden Wegen zusammen entsteht im Mittel etwa ein DNS-Schaden pro Strahlentreffer auf eine Zelle. Auf den Tag umgerechnet verursacht eine Strahlung im Bereich der natürlichen Exposition daher in jeder Zelle etwa  $5 \times 10^{-3}$  (0,005) DNS-Schäden (siehe Abb.). Vom Stoffwechsel waren es  $10^6$  Schäden pro Zelle und Tag, also etwa hundert Millionen mal so viele.

Bei den durch die Strahlung verursachten Schäden sind allerdings anteilmäßig mehr Doppelstrangbrüche (gleichzeitige Schäden an beiden Informationssträngen der DNS-Moleküle) dabei (bedingt durch den direkten Energieeintrag, die über Radikale verursachten Schäden sind grundsätzlich in beiden Fällen die gleichen). Doppelstrangbrüche sind aber schwerer zu reparieren. Die Erfolgsquote der Reparatur von strahlenverursachten DNS-Schäden liegt daher etwa um den Faktor 20 unter der Erfolgsquote der Reparatur von stoff-

wechselbedingten Schäden. Im Bereich der natürlichen Strahlenexposition misslingt die Reparatur also in etwa  $10^{-5}$  (0,000 01) Fällen pro Tag. Die nachgeschaltete Stufe der Eliminierung ist wieder für beide Schadensursachen gleich. Die Strahlung verursacht also insgesamt ca.  $10^{-7}$  (0,000 000 1) bleibende Mutationen pro Zelle und Tag, etwa zehn Millionen mal weniger als der Stoffwechsel.

## 5.5 Strahlung und Krebs

Das Verhältnis der Mutationsraten macht klar, warum *im Bereich kleiner Dosen* keine Zunahme der Krebshäufigkeit mit zunehmender Strahlung gefunden wird. Die manchmal beobachtete Abnahme wird von einigen Experten darauf zurückgeführt, dass die kleinen Dosen die Abwehr-, Reparatur- und Eliminierungssysteme stimulieren (der Fachausdruck hierfür heißt „Adaptive Response“) und diese dann effektiver arbeiten und insgesamt weniger Mutationen und damit weniger Krebs zulassen. Es ist also nicht so, dass die Strahlung keine Schäden verursachen würde. Sie tut das durchaus (schädliche Wirkung), aber gleichzeitig reduziert sie die Zahl der anderweitig verursachten Schäden (nützliche Wirkung). Angesichts der stark unterschiedlichen Schädigungsraten kann im Bereich kleiner Dosen die nützliche Wirkung sehr wohl größer sein als die schädliche Wirkung. Daraus ergibt sich dann eine insgesamt reduzierte Krebshäufigkeit. Erst wenn bei höheren Dosen die Reparatursysteme überfordert werden, nimmt die Gesamtzahl der Krebserkrankungen wieder zu. Der Effekt der möglichen Krebsreduktion bei kleinen Dosen wird als „Hormesis“

bezeichnet. Seine Existenz ist trotz vielfacher Beobachtungen wissenschaftlich umstritten, passt aber in das generelle Bild, wie sich das Leben auf ständige Herausforderungen einstellt. Strahlung ist eine ständig vorhandene Herausforderung, ja, sie war bei Entstehung des Lebens und Entwicklung höherer Formen sogar größer als sie heute ist. Möglicherweise ist das Leben daher auf höhere Strahlenpegel optimiert.

### **5.6 Strahlung und Erbschäden**

Bleibend geschädigte Körperzellen können zu Krebs führen, bleibend geschädigte Keimzellen zu Erbkrankheiten und anderen Schäden in der Nachkommenschaft. Aber auch hier ist das kein Muss, sondern ein Können, da die Natur auch hier noch nachgelagerte Systeme zum Ausmerzen solcher Fehler vorgesehen hat. Durch Strahlung bedingte erhöhte Missbildungsraten unter menschlichen Nachkommen sind denn auch – entgegen der weitverbreiteten Meinung – bisher in keinem einzigen Fall festgestellt worden, auch nicht bei hohen Dosen: Unter den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki nicht, in Tschernobyl nicht und auch nicht in irgend einer anderen Bevölkerungsgruppe, die einer erhöhten (künstlich oder natürlich verursachten) Strahlung ausgesetzt war.

„Nicht festgestellt“ heißt nicht, dass es solche Schäden nicht gibt, aber auf jeden Fall sind sie so selten, dass man sie nicht gefunden hat. Es gilt heute als gesichert, dass das Krebsrisiko von Strahlen höher einzuschätzen ist als das Risiko von Erbschäden.

### **6. Biologische Wirkungen nicht ionisierender Strahlen**

Unstrittig ist die thermische Wirkung langwelliger elektromagnetischer Wellen: Sie erwärmen ein bestrahltes Gewebe. Im Mikrowellenherd oder bei einer Infrarotlampe wird das gezielt ausgenutzt. Heftig umstritten ist, ob es darüber hinaus noch andere Wirkungen, insbesondere eine Zunahme von Krebserkrankungen gibt. Immer wieder auftretende Berichte über solche Wirkungszusammenhänge konnten bisher einer wissenschaftlichen Überprüfung nicht standhalten. Für jede Studie, die meint, einen solchen Zusammenhang festgestellt zu haben, gibt es mindestens zwei Studien, die keinen Zusammenhang zeigen. Das Einzige, das in dieser Situation gesichert gesagt werden kann, ist, dass es allenfalls einen sehr schwachen Zusammenhang geben kann. Wäre er ausgeprägt, gäbe es über seine Existenz längst keinen Streit mehr.