

chanismen der Zelle beteiligt sind. So habe zum ersten Mal gezeigt werden können, daß Arsen, auch in Kombination mit Strahlung, die Glutathiontransferase omega 1-1 (hGSTO1-1) induziert. Dieses Enzym ist im Glutathionstoffwechsel zur Entgiftung der Zelle wichtig. Glutathion ist ein wichtiges Antioxidationsmittel zum Beispiel für reaktive Sauerstoffspezies, die bei vielen toxischen Reaktionen entstehen. hGSTO1-1 spiele aber auch in der Detoxifizierung von Arsen eine besondere Rolle, da bei der Umwandlung von Arsenverbindungen toxische Zwischenprodukte entstehen.

Weiterhin zeige sich ein Einfluß auf den Energiestoffwechsel der Zelle sowohl durch die Kombination beider Expositionen als auch durch Arsen und Gamma-Strahlung allein. So sei die Untereinheit alpha des Elektronentransfer-Flavoproteins (hETFa) induziert worden, eines Enzyms der Atmungskette. Eine Abnahme an Protein nach kombinierter Exposition, aber auch nach der Einzelexposition, sei für die Serin/Threonin-Proteinphosphatase PP1-alpha (hPP1A) gefunden worden.

Dieser Typ von Phosphatasen reguliere wichtige zelluläre Vorgänge wie Zellteilung und Meiose, den Glycogenstoffwechsel, sowie die Aktivierung von Rezeptoren und Ionenkanälen, erklären Hornhardt und Kolleginnen. Insbesondere hPP1 spiele bei dem programmierten, von der Zelle selbst eingeleiteten Zelltod, der Apoptose, eine Rolle. Diesen Weg gehe die Zelle, wenn ihr Signale von außen dazu gegeben werden oder auch, wenn durch Eigenkontrolle irreparable Zellschäden festgestellt werden. Eine kombinierte Exposition von Arsen und Gamma-Strahlung reguliere auch die Ubichinol-Cytochrom C-Reduktase (hUQC RC1) herunter. Dieses mitochondriale Enzym ist ebenfalls an der Zellatmung zur

Energiegewinnung beteiligt. Vor allem Gamma-Strahlung allein beeinflusse weitere Proteine, die in Proteinabbau und Proteinprozessierung eine Rolle spielen. Damit könne eine Wirkung auf wichtige Stoffwechselregulationen stattfinden.

Die kombinierte Wirkung von Arsen und Gamma-Strahlung wurde in den TK6-Zellen nicht nur auf Proteinebene, sondern auch mit anderen Endpunkten untersucht. Dazu wurden genotoxische Effekte wie DNS-Strangbrüche mit dem alkalischen Comet-Assay und die Mikrokern-Induktion, ein Nachweis für Schäden auf chromosomaler Ebene, erfaßt. So wurden durch die gemeinsame Wirkung von Arsen und höheren Strahlendosen mehr Mikrokern induziert, als allein durch die Addition der Einzelwirkungen zu erwarten war, berichten die Autoren. Ebenso hätten nach kombinierter Exposition kovalente DNS-Protein-Bindungen nachgewiesen werden können. Ein wesentliches Ergebnis sei, daß das Apoptoseverhalten auch von der verwendeten Arsenverbindung abhing. Gerade das Apoptoseverhalten in Kombination mit Gamma-Strahlung sei von Arsenit und dem in der Krebstherapie verwendeten Arsentrioxid unterschiedlich beeinflusst worden. Arsentrioxid führe in Kombination zu einer sehr stark erhöhten und bei der Therapie durchaus auch erwünschten Apoptoserate.

**Zusammenfassung:** In menschlichen Zellen konnte auf Proteinebene die Wirkung von Strahlung und Arsen und vor allem das Zusammenwirken beider Noxen nachgewiesen werden, fassen Hornhardt und Kolleginnen zusammen. Tatsächlich würden dadurch Proteine, die in wichtige Stoffwechsel- und Regulationswege involviert sind, in ihrer Menge verändert und können auf diese Weise zu Störungen in der Zelle beitragen. Es sei denkbar, daß dadurch

kokarzinogene Effekte auftreten können. Diese Hypothese werde auch durch Experimente zur kombinierten Wirkung mit anderen biologischen Endpunkten untermauert, bei denen Schäden an der DNS, die Induktion von Mikrokernen und ein verändertes

Apoptoseverhalten nachgewiesen wurden.

Sabine Hornhardt, Soile Tapio, Maria Gomolka: Zusammenwirken von Strahlung und Arsen; UMID 3/2006, S.13-16. [www.umweltbundesamt.de/umid/index.htm](http://www.umweltbundesamt.de/umid/index.htm) ●

## Strahlenfolgen

# Elektronen mit geringer Energie wirken mehr

## Biochemiker erforschen, auf welche Weise Elektronen mit geringer Energie Zellen zerstören.

Bei der Strahlentherapie wird energiereiche Strahlung örtlich begrenzt auf jenen Bereich im Körper gerichtet, in dem sich der Tumor befindet. Durch Schädigungen der Erbsubstanz (DNA) sollen die bösartigen Tumor-Zellen absterben. Leider wirken die eingesetzten Strahlen aber nicht nur auf die DNA der Tumorzellen. Auch das umliegende, gesunde Gewebe wird durch die Bestrahlung geschädigt. In den vergangenen Jahrzehnten beschäftigten sich deshalb zwar zahllose Forschungsprojekte mit dem Thema Strahlenschäden und Strahlentherapie. Welche molekularen Prozesse diese Schäden jedoch auslösen, war bislang weitgehend unbekannt. „Die Rolle von sogenannten sekundären Elektronen, die bei der Bestrahlung auftreten, war kaum erforscht“, erklärte Professor Dr. Eugen Illenberger vom Institut für Chemie und Biochemie der Freien Universität Berlin im Dezember 2006 in einer Presseinformation der Kommunikations- und Informationsstelle der Freien Universität Berlin. Den Elektronen mit geringer Energie komme eine Schlüsselrolle zu.

Mittlerweile arbeitet die Forschungsgruppe des Arbeitsbereichs Physikalische und

Theoretische Chemie seit rund fünf Jahren an der Aufklärung jener molekularen Prozesse, die durch Strahlung in der DNA ausgelöst wird. Der Aufbau der DNA und ihrer chemischen Verbindungen spielen bei der Forschung von Illenberger und Kollegen eine wichtige Rolle. Denn die DNA wird nach den Erkenntnissen der Wissenschaftler nicht direkt durch das auftretende Strahlungsquant geschädigt. Aufgrund der elementaren Erhaltungssätze der Physik könne ein solches Teilchen nicht direkt das molekulare Netzwerk einer DNA aufbrechen oder verändern. Die zerstörerische Kraft beruhe also nicht das Strahlungsquant selbst, sondern die sogenannten sekundären Partikel. Diese Partikel entstehen beim Aufprall des Strahlungsquants auf das molekulare Netzwerk der Zelle. Wie ein großes Geschloß löse die Strahlung dabei aus dem Netzwerk der Zelle einen regelrechten „Elektronenschauer“ heraus, erklärt Illenberger.

Verglichen mit den hochenergetischen Strahlungsquanten besitzen die sekundären Elektronen wesentlich weniger Energie. Sie reicht in den Bereich von 20 bis 30 Elektronenvolt. Damit können die sekundären Partikel nicht ohne

weiteres chemische Bindungen aufbrechen, noch nicht einmal durch eine direkte Kollision. Dafür sind die Elektronen viel zu klein; ihre Masse beträgt weniger als ein Tausendstel der Masse eines Atoms oder eines Moleküls. Wegen ihrer geringen Masse und Energie ging man bisher davon aus, daß niederenergetische Elektronen keine besondere Rolle bei der DNA-Schädigung spielen. Dabei gleiche das Ganze der Geschichte von David gegen Goliath, erklärt Ilko Bald, der im Rahmen seiner Doktorarbeit an dem Projekt beteiligt ist. Zusammen mit Janina Kopyra und Constanze König erforscht er die Reaktionen einzelner DNA-Bestandteile, wie zum Beispiel Zucker, auf niederenergetische Elektronen. „Unsere Ergebnisse klin-

gen zunächst paradox: Die DNA wird erst dann beschädigt, wenn niederenergetische Elektronen in der Zelle noch weiter heruntergebremst werden und nur noch einen Bruchteil der Energie einer chemischen Bindung besitzen.“ Erst dann können die Elektronen ihre spezifische Wirkung auf die Basen in der DNA entfalten. Die Basen innerhalb des DNA-Gerüsts funktionieren nämlich wie Antennen. Sie können die Sekundärelektronen aufnehmen und dadurch die DNA verändern. Ihre Antennen sprechen jedoch nur auf Elektronen eines bestimmten Intervalls im niederenergetischen Bereich an. „Im Wissenschaftsjargon heißt das: DNA-Basen besitzen niederenergetische Resonanzen mit repulsivem (abstoßendem) Charakter“, erklärt

Illenberger. Erst wenn die DNA-Base ein solches Elektron aufnimmt, ändert sich das energetische Verhältnis, die Basenpaare halten nicht mehr zusammen, sondern stoßen sich ab, die chemische Verbindung zerbricht und mit ihr die DNA – die Verbindungen des Doppelstrangs werden dann zu Sollbruchstellen.

Am Institut für physikalische und theoretische Chemie versucht man nun gezielt, mit Strahlenbiologen und Medizinern in Kontakt zu treten. „Unsere Erkenntnisse können zum Beispiel bei der Entwicklung effektiverer Medikamente, die die Strahlentherapie gegen Krebs unterstützen, genutzt werden“, meint Illenberger. Aber auch andere Einsatzgebiete seien denkbar: Die Tatsache, daß bei der Feinabstimmung der Elek-

tronenergie in Molekülen chemische Bindungen an ganz bestimmten Stellen gebrochen werden können, ist eine neu entdeckte Eigenschaft, die auch für technische Anwendungen besonders interessant ist, etwa bei der Mikrostrukturierung von Oberflächen, einem Verfahren das in der Informationstechnologie sehr wichtig ist.

Julia Kimmerle: Weniger ist mehr, Presseinformation 020/2006 v. 19.12.2006, Freie Universität Berlin, Kommunikations- und Informationsstelle. Prof. Dr. Eugen Illenberger, Institut für Chemie und Biochemie der Freien Universität Berlin, E-Mail: [iln@chemie.fu-berlin.de](mailto:iln@chemie.fu-berlin.de)

Siehe hierzu auch den Beitrag auf der Seite 3 des Elektrosmog-Reports in dieser Ausgabe. ●

## Atom Müll-Lager

# „Möglichst dicht an der Zonengrenze“

## 30 Jahre Widerstand gegen Gorlebener Atomanlagen

Ende Februar 1977 bestimmte der damalige niedersächsische Ministerpräsident Ernst Albrecht (CDU) überraschend den Salzstock Gorleben zum Zentrum des sogenannten Nuklearen Entsorgungsparks. Unter dem Motto „Jetzt schlägt's 30!“ und mit einem bunten Programm feierten nun Atomkraftgegner am 24. und 25. Februar 2007 30 Jahre Widerstand gegen die Gorlebener Atomanlagen. Dieser beeindruckend lange Zeitraum läßt auch für die Zukunft wohl nur die Prognose zu, daß die kontinuierlichen kreativen Proteste nicht klein zu kriegen sind. Viele in den vergangenen 30 Jahren errungene Erfolge zählt Francis Althoff, Sprecher der Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Danenberg, auf: So mußten ursprüngliche Planungen wie die

Errichtung einer Brennelementefabrik und einer Wiederaufarbeitungsanlage aufgegeben werden. 13 Jahre lang wurde die Einlagerung des ersten Castorbehälters in das oberirdische Zwischenlager verhindert. Seit dem Jahr 2000 ruhen die Arbeiten an der Endlagerbaustelle im Salzstock.

Vor 10 Jahren hatte der damals bereits emeritierte Geologie-Experte und in Celle ansässige Professor Dr. Gerd Lüttig, zuvor Inhaber eines Lehrstuhls an der Universität Erlangen, in einem Gespräch mit Karl-Friedrich Kassel für die Elbe-Jeetz-Zeitung berichtet, wie es 1977 zur Benennung des Salzstocks Gorleben als mögliches nukleares Endlager kam und daß der damalige niedersächsische Ministerpräsident seine Ent-

scheidung ausschließlich aus politischen Gründen gefällt hatte. Das Interview wurde am 1. März 1997 in der Elbe-Jeetz-Zeitung gedruckt. Strahlentelex zitiert:

ELBE-JEETZEL-ZEITUNG: *Herr Professor Dr. Lüttig, Sie waren vor 20 Jahren, als ein Standort für das Nukleare Entsorgungszentrum (NEZ) gesucht wurde, zuständig für die Vorauswahl der norddeutschen Salzstöcke. Wie kam es dazu?*

**Professor Dr. Gerd Lüttig:** Ich habe damals im Auftrag der KEWA, das war die von den Elektrizitätsversorgungsunternehmen geschaffene Firma, die die Endlagerung betreiben sollte, den Auftrag bekommen, alle in Nordwestdeutschland befindlichen Salzstöcke, das sind etwa 280, zu untersuchen auf ihre Eignung und eine gewisse Klassifizierung dieser Salzstöcke vorzunehmen. In diese Auswahl kamen drei Salzstöcke, die relativ gut bekannt waren. Gorleben gehörte nicht dazu. Das war zweite Wahl.

ELBE-JEETZEL-ZEITUNG: *Dennoch fiel die Entscheidung anders aus. Wie kam das?*

**Professor Dr. Gerd Lüttig:** Man muß dazu bemerken, daß der damalige niedersächsische Ministerpräsident Dr. Albrecht eine Kommission eingesetzt hatte unter Führung des Bruders des ehemaligen Bundespräsidenten, Carl-Friedrich von Weizsäcker. Da war ich Mitglied, und wir kamen alle vierzehn Tage mit Dr. Albrecht zusammen. Eines Morgens verkündete er, er habe den Salzstock von Gorleben als den am besten geeigneten ausgewählt, und da käme die Sache nun hin. Auf meine Anmerkung: „Aber Herr Dr. Albrecht, den habe ich doch gar nicht auf meiner Liste, der kommt doch erst in der zweiten Reihe“, bemerkte er: „Das ist jetzt noch nicht eine geologische Frage, das ist eine politische Frage. Ich möchte einen Salzstock haben, der möglichst dicht an der Zonengrenze liegt.“

ELBE-JEETZEL-ZEITUNG: *Wissen Sie, warum es unbedingt ein Salzstock an der Grenze sein sollte?*

**Professor Dr. Gerd Lüttig:** Man wollte die Leute in der Ostzone ärgern. Sehen Sie, wir bekamen von denen nur