

# Radioaktive Abfälle: Lagerzeiten deutlich verkürzen

Langlebige Transurane wandeln sich unter Neutronen-Beschuss um

von **Holger Podlech**

In Deutschland leitete der folgen- schwere Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi das Ende der Kernenergie ein. Doch global gesehen ist in den nächsten Jahrzehnten mit einem massiven Ausbau zu rechnen. Der radioaktive Abfall wird weiter anwachsen. Eine vielversprechende Möglichkeit, die extrem langen Halbwertszeiten von einigen Millionen Jahren auf wenige Hundert Jahre zu verkürzen, ist die Transmutation: Durch die Bestrahlung mit schnellen Neutronen können die entstehenden Transurane in Elemente mit einer kürzeren Halbwertszeit umgewandelt werden. Physiker des Instituts für Angewandte Physik der Goethe-Universität beteiligten sich führend an der Konstruktion eines wirtschaftlich arbeitenden Beschleunigers für die Erzeugung der benötigten Neutronen.

Allein in China sind derzeit 28 neue Reaktoren im Bau. Die weltweit etwa 440 Kernkraftwerke lassen den Berg an abgebrannten Brennelementen jährlich um 8000 Tonnen anwachsen. Der Abfall besteht im Wesentlichen aus Spaltprodukten und Transuranen wie Plutonium, Neptunium, Americium und Curium. Letztere zählen zur Gruppe der Aktinoide. Während die Spaltprodukte meist innerhalb von wenigen Tagen bis einigen Jahrzehnten zerfallen, geht von den Aktinoiden das größte Gefahrenpotenzial aus. Sie sind chemisch und radiologisch hochtoxisch. Unbehandelte abgebrannte Brennelemente müssen dementsprechend für Millionen von Jahren endgelagert werden. Allerdings gibt es



Holger Podlech mit seinem Messaufbau zum Test der supraleitenden CH-Struktur in der Experimentierhalle des Fachbereichs Physik. In der oberen Bildmitte ist der Kryostat zu erkennen, in dem die Kavität mithilfe flüssigen Heliums auf  $-269$  Grad abgekühlt wird.

weltweit kein einziges genehmigtes Endlager, noch ist die gesellschaftliche Akzeptanz dafür gegeben.

## Moderne Alchimie mit Neutronen

Eine Lösung der Endlagerproblematik, die gleichzeitig zu einer nachhaltigeren Nutzung der Kernenergie führt, könnte die Transmutation sein. Physiker machen sich dabei zunutze, dass die Stabilität der Atomkerne auf einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Neutronen und Protonen beruht. Bestrahlt man die extrem langsam zerfallenden Aktinoide mit schnellen Neutronen, werden sie entweder durch Spaltung oder Neutroneneinfang in wesentlich kurzlebigeren Isotope umgewandelt. Neutronen sind gewissermaßen der Schlüssel zur modernen Alchimie, die in diesem Fall nicht Metalle in Gold, sondern hochtoxische in weniger toxische Isotope verwandelt. Studien zeigen, dass die erforderliche Lagerzeit der Abfälle dank Transmutation von mehreren Millionen auf einige Hundert Jahre reduziert werden kann. Dann ist ein Radiotoxizitätsniveau erreicht, welches dem des natürlich vorkommenden Uranerzes gleicht. Die Lagerzeit wird damit um einen Faktor 10000 reduziert, was die Zeitskala von geologischen zu historischen Dimensionen verschiebt. ■

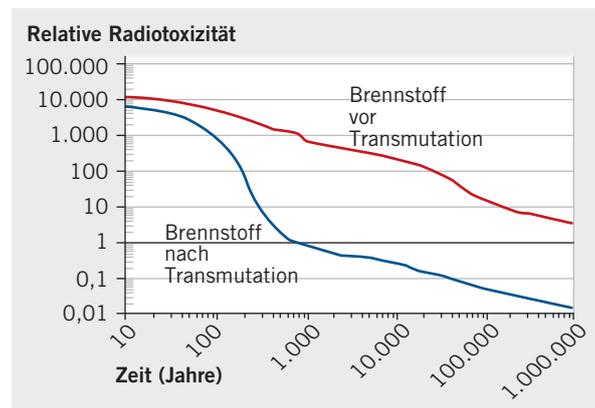
Da die Aktinoide nur einen sehr kleinen Anteil an der Gesamtmen-

ge des Abfalls ausmachen, werden sie zunächst mit chemischen Verfahren abgetrennt. Das gewonnene Plutonium kann mit Uran zu Mischoxid-Brennelementen verarbeitet werden und der weiteren Energiegewinnung dienen. Anschließend werden die schwereren Aktinoide mit Neutronen bestrahlt. Diese erzeugt man mithilfe energiereicher Protonen, die auf ein Target aus flüssigem Metall (Blei-Wismuth) geschossen werden. Es entstehen pro Kollision 20 bis 30 schnelle Neutronen durch eine Spallationsreaktion.

## Beschleuniger + Reaktor = »Mülleimer«

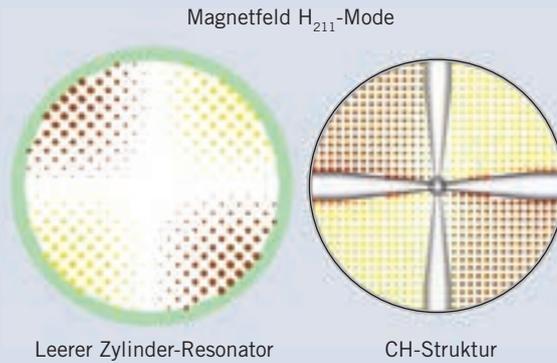
Um den Targetbereich, in dem die Neutronen entstehen, sind die Abfälle wabenförmig in Brennstäben angeordnet. Bei der Spaltung der Aktinoide entstehen zusätzliche

■ Radiotoxizität von unbestrahlten und bestrahlten Reaktorabfällen als Funktion der Zeit bezogen auf natürliches Uranerz.

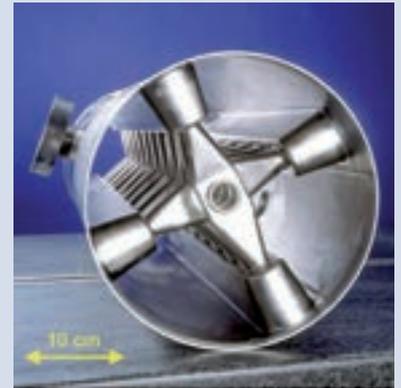


## Protonen effektiv beschleunigen: Die CH-Struktur

Die CH-Struktur ist eine Hochfrequenzkavität, in der durch eine eingekoppelte elektromagnetische Welle hochfrequente elektrische Ströme auf den Innenwänden des metallischen Hohlraums angeregt werden. Der Name leitet sich von der Geometrie aus gekreuzten Stützen und der verwendeten Mode ab (Crossbar-H-Moden-Struktur, CH). **3** Aufgrund dieser Geometrie und einer speziellen Strahldynamik ist es möglich, Strukturen mit vielen Beschleunigungszellen ( $n > 10$ ) und entsprechend hoher Spannung zu entwickeln.<sup>161</sup>



**3** Die zu den H-Moden-Kavitäten gehörende CH-Struktur verwendet eine Eigenschwingung des zylindrischen Hohlraums, die sogenannte  $H_{211}$ -Mode. Durch Einbringen der inneren Resonanzstruktur entstehen die Felder zur Beschleunigung. Gezeigt sind jeweils die charakteristischen Magnetfelder.



**4** Blick in das Innere der supraleitenden CH-Struktur. Die Kavität ist aus dem Element Niob gefertigt und wird zum Betrieb mit flüssigem Helium auf  $-269$  Grad abgekühlt

Neutronen, die ebenfalls für die Transmutation zur Verfügung stehen. Prinzipiell stellt dieses System einen Reaktor dar. Im Vergleich zu konventionellen Reaktoren läuft aber keine selbst unterhaltende Kettenreaktion ab. Wird der externe Neutronenfluss gestoppt, kommt die Reaktion zum Erliegen, weil pro gespaltenem Aktinoid im Mittel weniger als ein Neutron für weitere Spaltungen zur Verfügung steht. Man spricht von einem unterkritischen Reaktor, in dem es niemals zu einer unkontrollierten Leistungsexkursion kommen kann.

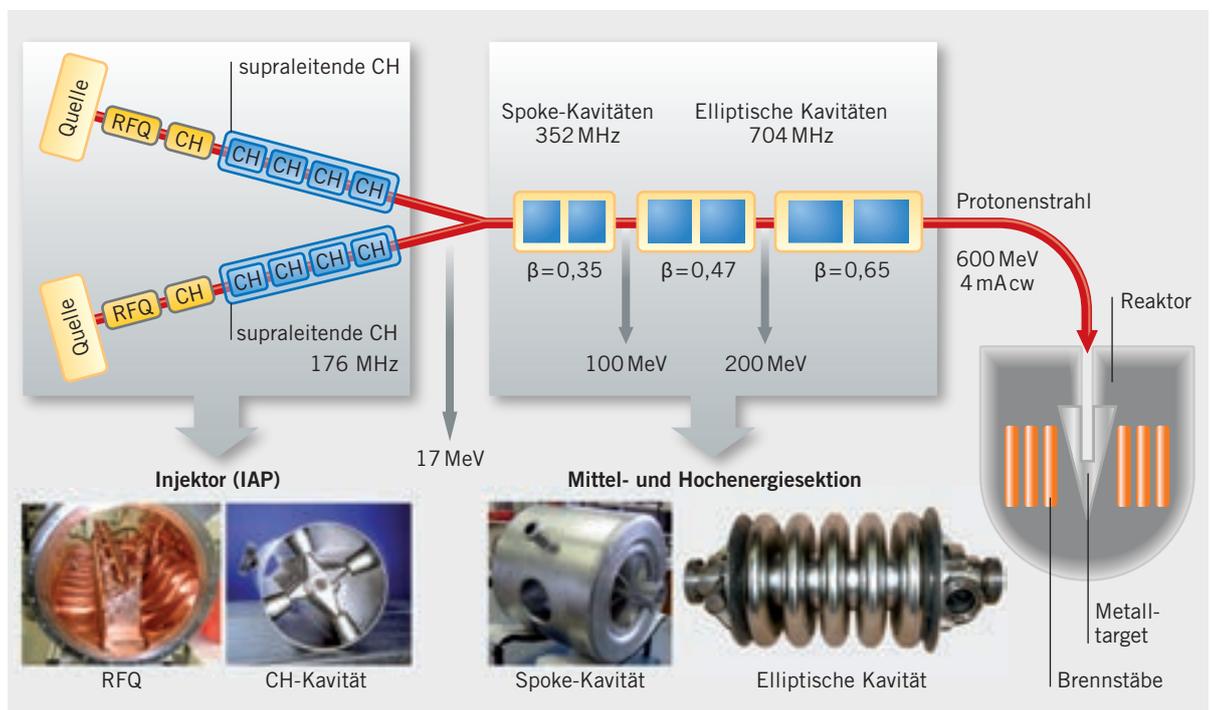
Neben dem Reaktor braucht man für die Transmutationsanlage einen Protonenbeschleuniger, der die Protonen für die Neutronenproduktion liefert. Dieser Kunstgriff ist notwendig, weil man die elektrisch neutralen Neutronen nicht direkt durch Beschleunigung in elektromagnetischen Feldern erzeugen kann. Deshalb schießt man schnelle Protonen auf ein Target. Dort übertragen sie ihre Energie auf die gleich schweren Neutronen und lösen sie heraus. Auf diese Weise erhält man die benötigten schnellen Neutronen für die Transmutati-

on. Der verwendete Beschleuniger muss einen Protonen-Strom von einigen Milli-Ampere auf Energien von mehreren Hundert Megaelektronenvolt (MeV) beschleunigen. Das entspricht einer Leistung von mehreren Mega-Watt im Strahl. Im Reaktor kann die thermische Leistung aufgrund der Spaltungen bis zu einem Faktor 30 höher sein.

### Eine europäische Machbarkeitsstudie

Wie ein geeigneter Reaktor samt Beschleuniger für die Transmutation beschaffen sein muss,

**2** Schematischer Aufbau der Transmutationsanlage MYRRHA, die im belgischen Mol gebaut werden soll. Ein Protonenbeschleuniger liefert einen Protonenstrahl in einen subkritischen Reaktor. Die dort entstehenden Neutronen wandeln radioaktive Abfälle durch Spaltung und Neutroneneinfang zu kurzlebigen Isotopen um. Der 250 Meter lange Linearbeschleuniger beschleunigt die Protonen mit 600 Millionen Volt und besteht zum größten Teil aus supraleitenden Kavitäten.



ist in den letzten Jahren im Rahmen der Europäischen Studie EUROTRANS<sup>1/</sup> (European Transmutation) untersucht worden. Wichtig ist, dass der Beschleuniger einen kontinuierlichen Strahl liefert (Dauerstrich-Betrieb), damit die Transmutation im Reaktor aufrechterhalten werden kann. Treten unerwünschte Strahlunterbrechungen von mehr als drei Sekunden auf, kann es zu thermischen Schocks und damit zu Materialermüdung im Reaktorkern kommen. Daher gelten für den Beschleuniger besonders hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit.

In der EUROTRANS-Studie wurde das Konzept für einen derartigen Beschleuniger erarbeitet.<sup>2/</sup> Es handelt sich um einen supraleitenden Linearbeschleuniger mit einer Gesamtlänge von 250 Meter und einer Beschleunigungsspannung von 600 Millionen Volt.  Seit März 2011 laufen die dreijährigen Vorbereitungen für den Bau einer Demonstrationsanlage zur Transmutation im belgischen Mol. Dieses MYRRHA (Multi Purpose Hybrid Reactor for High Tech Applications)

genannte Projekt mit Baukosten von einer Milliarde Euro soll die großtechnische Machbarkeit der Transmutation zeigen. Eine zukünftige industrielle Transmutationsanlage (EFIT, European Facility for Industrial Transmutation) hätte etwa die zehnfache Leistung und könnte den Abfall von bis zu zehn Kernkraftwerken gleichzeitig entsorgen.

### Beschleunigertechnik made in Frankfurt

Das Institut für Angewandte Physik (IAP) der Goethe-Universität ist als weltweit führendes Labor für Niederenergie-Beschleuniger verantwortlich für die Entwicklung des 17 MeV Injektors von MYRRHA.<sup>13/ 14/</sup>

 Der Injektor besteht aus einer Protonenquelle, einem Radiofrequenz-Quadrupol (RFQ), der als Vorbeschleuniger dient, sowie sechs Driftrohrenbeschleuniger, mit einer eigens in Frankfurt entwickelten »CH-Struktur« [siehe »Protonen effektiv beschleunigen: Die CH-Struktur«].

Um die Zuverlässigkeit des Beschleunigers zu steigern, kommen aus Gründen der Redundanz zwei identische Injektoren zum Einsatz.

Beide liefern permanent einen Teilchenstrahl, aber nur einer von beiden injiziert ihn in den Hauptbeschleuniger. Die Zuverlässigkeit ist auch von der Zahl der verwendeten Komponenten abhängig. Um die Komplexität des Injektors zu reduzieren, mussten neuartige, äußerst effiziente supraleitende Beschleunigerstrukturen (Kavitäten) entwickelt werden, in denen möglichst verlustfrei eine hohe Beschleunigungsspannung erreicht wird. Diese Bedingungen erfüllt die in den letzten zehn Jahren am Frankfurter IAP erfolgreich entwickelte CH-Struktur.

### Supraleitung senkt die Kosten

Die CH-Struktur kann sowohl normal- oder supraleitend realisiert werden. Die supraleitende Variante wird aus dem Element Niob gefertigt. Bei Abkühlung auf 4 Kelvin (-269 Grad Celsius) mithilfe flüssigen Heliums verliert die Struktur ihren elektrischen Widerstand fast vollständig. Die Hochfrequenzleistung zum Aufbau der elektromagnetischen Felder sinkt damit um fünf Größenordnungen.



## 5 Fragen an den Nachwuchsforscher

**Privatdozent Dr. Holger Podlech**, 43, MainCampus »educator«-Stipendiat (2009–2011), Institut für Angewandte Physik.  
h.podlech@iap.uni-frankfurt.de  
<http://linac-world.de>

### 1. Wann begannen Sie sich für Ihr Fachgebiet zu interessieren? Gab es prägende Ereignisse oder Vorbilder?

1994 hatte ich an der Universität Heidelberg eine Vorlesung über Beschleunigerphysik gehört. Da wir nur drei Hörer waren, war die Vorlesung entsprechend intensiv. Schließlich begann ich 1996 meine Diplomarbeit am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg über die Entwicklung eines Nachbeschleunigers für radioaktive Ionen am CERN.

### 2. Welche Stationen Ihrer wissenschaftlichen Laufbahn waren für Sie die wichtigsten?

Natürlich war der Abschluss der Dissertation 1999 wichtig. Prägender war aber der zweijährige Post Doc Aufenthalt am National Superconducting Cyclotron Laboratory der Michigan State University, bei dem ich die Wissenschaftskultur in

amerikanischen Laboren kennen lernen konnte. Von 2002 bis 2008 war ich Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Angewandte Physik der Goethe Universität. Das wissenschaftliche Highlight während dieser Zeit war die Entwicklung und der erfolgreiche Test der ersten supraleitenden CH-Struktur, die auch das zentrale Thema meiner Habilitation war.

### 3. In welchen Augenblicken fühlen Sie sich als Wissenschaftler am glücklichsten?

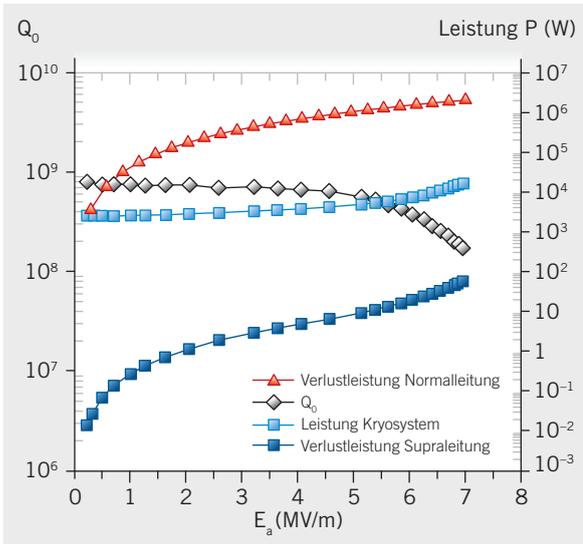
Glücklich macht mich ein geglücktes Experiment, vor allem, wenn es im Vorfeld technische Herausforderungen bei der Realisierung gab. Die Mitarbeit an der Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme. Da für mich Forschung und Lehre zusammengehören, liebe ich es, mein Wissen Studenten und manchmal auch einem breiteren Publikum zu vermitteln.

### 4. Wer oder was hilft, wenn bei der Arbeit Schwierigkeiten auftreten?

Bei hartnäckigen wissenschaftlichen Problemen hilft manchmal nur Ruhe. Dann schließe ich mich in ein Büro ein. Ansonsten suche ich Rat und Tat bei den zahlreichen Mitgliedern in meiner Arbeitsgruppe.

### 5. Was tun Sie, wenn Sie eine Pause von der Wissenschaft brauchen?

Ich gehe regelmäßig laufen und ich gehe gerne in die Berge. Im Winter zum Snowboard Fahren und im Sommer zum Bergsteigen. Wenn ich mal eine längere Auszeit brauche, mache ich eine Expedition. So habe ich 2010 den höchsten Berg Südamerikas, den Aconcagua, bestiegen. Drei Wochen Beschäftigung mit dem Berg, sonst nichts. Es gibt kein besseres Abschalten für mich.



■ Gemessene Güte  $Q_0$  als Funktion der Beschleunigungsfeldstärke  $E_a$  für die supraleitende CH-Struktur (graue Kurve). Die dunkelblaue Kurve gibt die Hochfrequenzleistung an, die zum Aufbau der elektromagnetischen Felder notwendig ist. Da diese Leistung mithilfe eines Kryosystems mit geringem Wirkungsgrad aus dem Heliumbad entfernt werden muss, ist die Netzleistung entsprechend höher (hellblau). Allerdings ist die bei der Supraleitung notwendige Leistung um einen Faktor 100 kleiner als beim normalleitenden Betrieb (rot).

Dies führt einerseits zu drastisch geringeren Betriebskosten und andererseits zu wesentlich höheren mittleren Feldstärken, insbesonde-

re bei Dauerstrich-Beschleunigern wie MYRRHA. Allerdings wird die Hochfrequenzleistung in das Heliumbad abgegeben und muss mit einem kleinen Wirkungsgrad (0,4 %) entfernt werden. Dadurch wird der Vorteil der Supraleitung gegenüber der Normalleitung kleiner, beträgt aber immer noch zwei Größenordnungen bezogen auf die Netzleistung. ■

Der wichtigste Test einer supraleitenden Kavität ist die Messung der Güte  $Q_0$  gegen das Beschleunigungsfeld  $E_a$ . Die Güte gibt an, wie viele Schwingungsperioden vergehen, bis die in den Feldern

gespeicherte Energie dissipiert ist. Aufgrund der kleinen Verluste sind die Güten entsprechend hoch und liegen zwischen  $10^8$  und  $10^9$ .

Tests der CH-Struktur ergaben Beschleunigungsfelder von bis zu 7 Millionen Volt/meter<sup>51</sup>, was nahezu einem Faktor 2 gegenüber den MYRRHA-Designvorgaben entspricht. ■

Dank der europaweiten Vorarbeiten ist die Transmutation inzwischen in greifbare Nähe gerückt. 2010 gab die EU grünes Licht für den Bau von MYRRHA. Der Baubeginn soll 2014 und die Inbetriebnahme 2023 erfolgen. ◆

Literatur

<sup>11/</sup> EUROTRANS Euratom FP6 contract FI6W. CT.2005-516520.

<sup>12/</sup> H. Podlech et al. *The EURO-TRANS Project* AIP proceedings 1265 (2010), pp. 355–362, ISBN 978-0-7354-0814-2.

<sup>13/</sup> C. Zhang et al. *Reliability and Current-Adaptability Studies of a 352 MHz 17 MeV, Continuous-Wave Injector for an Accelerator-Driven System* Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 080101 (2010).

<sup>14/</sup> F. Dziuba et al. *Development of Superconducting Crossbar-H-Mode Cavities for Proton and Ion Acceleration* Physical Review ST Accel. and Beams 13, 041302 (2010).

<sup>15/</sup> H. Podlech *Entwicklung von normal- und supraleitenden CH-Strukturen zur effizienten Beschleunigung von Ionen und Protonen* Habilitationsschrift, Universität Frankfurt, 2008.

<sup>16/</sup> H. Podlech et al. *Superconducting CH-Structure* Physical Review ST Accel. and Beams 10, 080101 (2007).

# Der Schallwahrnehmung auf der Spur

Was schreckhafte Wüstenrennmäuse zur Tinnitus-Forschung beitragen können

von **Manuela Nowotny**

Das Innenohr des Menschen liegt tief in einer unzugänglichen Höhle des Felsenbeins im Schädel verborgen. Vieles, was wir heute über die Schallwahrnehmung wissen, ist deshalb an menschlichen Leichen oder an Säugetieren und Insekten erforscht worden. Im Arbeitskreis »Neurobiologie und Biosensorik« untersuchen wir grundlegende Mechanismen der Schallverarbeitung an Heuschrecken, deren Ohren praktischerweise in den Vorderbeinen liegen. An einem zweiten Versuchstier, der Mongolischen Wüstenrennmaus, gehen wir der Entstehung des Tinnitus auf den Grund. Ziel ist es, langfristig neue Therapien für den Menschen zu entwickeln.

Die Entwicklung eines Tinnitus ist typischerweise mit einer Schädigung im Innenohr verbunden, meist hervorgerufen durch einen

Hörsturz, ein Knalltrauma, laute Musik oder auch durch Medikamente. Bisher war die Untersuchung von Tinnitus an Tieren schwierig, da keine objektiven Kriterien existierten, um das Ohrgeräusch bei ihnen festzustellen. Man muss darum indirekte Hinweise für die Existenz eines Tinnitus finden. Bis vor einigen Jahren war dies verbunden mit zeitaufwendigen Versuchsreihen, die auf das Erlernen von bestimmten Verhaltensweisen abzielten. Beispielsweise wurden die Versuchstiere trainiert, an einer Wasserflasche zu lecken, wenn sie einen Ton hörten.

Vor nunmehr fünf Jahren wurde zum ersten Mal über eine neue Untersuchungsmethode zur Tinnitusfeststellung berichtet, die auf einer Reflexreaktion beruht und die damit einfacher und zeiteffizienter durchzuführen ist. Dafür

wird das Versuchstier in einen schallisolierten Kasten gesetzt und durch das Vorspielen von kurzen und vor allem lauten Geräuschen erschreckt. Ähnlich wie bei einem unvermuteten Gewehrschuss führt dieser akustische Reiz zu einem Zusammenzucken. Bei unseren Versuchstieren, den Mongolischen Wüstenrennmäusen, äußert sich das Erschrecken in einer Kontraktion der Gesichts-, Nacken- und Skelettmuskulatur. ■ Da die Tiere auf einer bewegungssensitiven Platte sitzen, kann man die Intensität der Schreckreaktion messen. Abgeschwächt wird die Schreckreaktion, wenn dem lauten Ton ein kurzer leiser Ton vorangeht, der die Aufmerksamkeit des Versuchstiers weckt. Dies entspricht der Situation, in der vor dem Gewehrschuss ein verdächtiges Knacken im Gebüsch zu hören ist. Den gleichen Effekt