

Nachwuchsförderung im Strahlenschutz

## Radioaktivität von Topasen



**Verfasser:** Nico Fessner (*Edith-Stein-Schule*)

Thomas Tran (*Edith-Stein-Schule*)

Wolfgang Jekl (*Edith-Stein-Schule*)

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seitenzahl</b>
<b>I. Einführung</b>	3
<b>II. Topas</b>	4
1. Geschichte und Verwendung	4
2. Entstehung	4
3. Topasfärbung	5
<b>III. Grundlagen</b>	6
1. Beschreibung des Gammaskpektrometers	6
2. Qualität der $\gamma$ -Spektren	7
a) Zählrohrbeute	7
b) Untergrundrauschen	9
3. Charakteristische Energiewerte für Nuklide	10
4. Übergangswahrscheinlichkeit	10
5. Ergebnisauswertung	10
<b>IV. Durchführung</b>	11
1. Beschaffung der Präparate	11
2. Ausführung des Experiments	13
3. Eigener Bestrahlungsversuch	14
<b>V. Erörterung der Spektren</b>	16
1. Qualitative Analyse	16
a) Na-22	16
b) Sc-46	16
c) Cr-51	17
d) Mn-54	18
e) Co-60	18
f) Cs-134	19
g) Ta-182	20
2. Quantitative Analyse	20
3. Zusammenfassung	21
<b>VI. Bewertung</b>	22
1. Bundesgesetzblatt zu den Freigrenzen	22
2. Folgen für Besitzer	23
3. Persönliche Einschätzung	23
<b>VII. Spektren der radioaktiven Topase</b>	26
<b>VIII. Literaturverzeichnis</b>	30

# Einführung

Wir hatten erfahren, dass radioaktive Edelsteine im Internet frei erhältlich seien. Wir dachten uns, dass diese für den Träger des Schmuckstücks schädlich sein müssten, weil Edelsteine zum Beispiel in Form von Ketten nah am Körper getragen werden.

Mineral	Naturfarbe	Bestrahlungsfarbe	Bestrahlungsart	Verbreitung
Beryll	blassgelb blassrosa	goldgelb, grün, dunkelblau* [R]	?	selten (-)
Diamant	gelblich, bräunlich	blau, braun, gelb, rot, grün [R], schwarz [R]	Gamma, Neutronen, Protonen	mäßig (+)
Quarz	farblos	rauchbraun, schwarz	Gamma	häufig (+++)
Saphir	farblos, rosa blassgrün	gelb*, orange*, grün	?	selten (-)
Spodumen	rosa	gelb*, grün*	Gamma, Röntgen	selten (-)
Topas	farblos	blau [R], braun [R], gelb, orange, grün	Beta, Gamma, Neutronen	häufig (+++)
Turmalin	rosa, blassgelb, blassgrün	rot, gelbbraun, grün	Gamma	mäßig (+)
Zirkon	farblos	blau, braun	?	selten (-)

\* = Farbe instabil [R] = Radioaktivität möglich

Wir entschieden uns, dies am Beispiel von blauen Topasen zu überprüfen. Blauer Topas kommt in der Natur nur sehr selten vor, weshalb diese Steine häufig künstlich gefärbt werden, um die große Nachfrage zu befriedigen. Es gibt drei verschiedene Arten von blauen Topasen, denen man ihre Farbe durch künstliche Bestrahlung gegeben hat. Allerdings sollen zwei dieser Arten, Sky Blue und Swiss Blue, kaum radioaktiv sein, weil sie im Gegensatz zu der dritten Art, London Blue, nur kurz radioaktiver Strahlung ausgesetzt seien. Dadurch können sie schnell abklingen. Bei London Blue ist jedoch starke Bestrahlung nötig, was ein Problem aufwirft, da gerade diese Art wegen ihrer intensiven Farbe die populärste ist. Normalerweise sollten Händler die bestrahlten Steine vor dem Verkauf so lange abklingen lassen, bis keine Reststrahlung mehr vorhanden ist. Wir vermuteten, dass sich möglicherweise nicht alle Händler so korrekt verhalten. Deshalb hatten wir vor, einige preiswerte Edelsteine bei e-bay zu kaufen, denn das Angebot von blauen Topasen ist dort sehr hoch (siehe oben).

Bei der Suche nach jemandem, bei dem wir unsere Nachforschungen in die Tat umsetzen konnten, stießen wir an der TU Darmstadt auf Herrn Dr. Wannowius, der uns ein Gammaskpektrometer für Messzwecke anbieten konnte. Gleichzeitig wies er uns auf die Nachwuchsförderung des Strahlenschutzverbandes hin. Wir freuten uns über die Chance auf finanzielle Unterstützung und die technische Möglichkeit, die Topase genaustens untersuchen zu können. Also schrieben wir einen Antrag, der uns glück-

licherweise bewilligt wurde. Dadurch konnten wir Topase bestellen und sie auf mögliche Radionuklide untersuchen. Über eine statistische Auswertung der Messungen wollten wir die Gefahr für den Besitzer bewerten.

## II. Topas

### 1. Geschichte und Verwendung

Der Name Topas kommt wahrscheinlich von der im Altertum genannten Insel Topazos, auf der man als erstes glaubte, Topas abzubauen. Eigentlich baute man dort aber Olivin ab, das man lange Zeit mit dem Topas verwechselte. Eine andere Variante der Namensgebung sagt, der Name Topas kommt von dem Sanskrit-Wort Tapas, das „Feuer“ oder „Leuchten“ bedeutet.

Dem Topas werden beruhigende Wirkungen zugesagt. Außerdem wurde er in der arabischen und indischen Medizin benutzt. In der arabischen Medizin wurde er verwendet, um Appetitlosigkeit zu vertreiben, in der indischen wurde er dazu benutzt, die Fruchtbarkeit bei Frauen zu erhöhen.

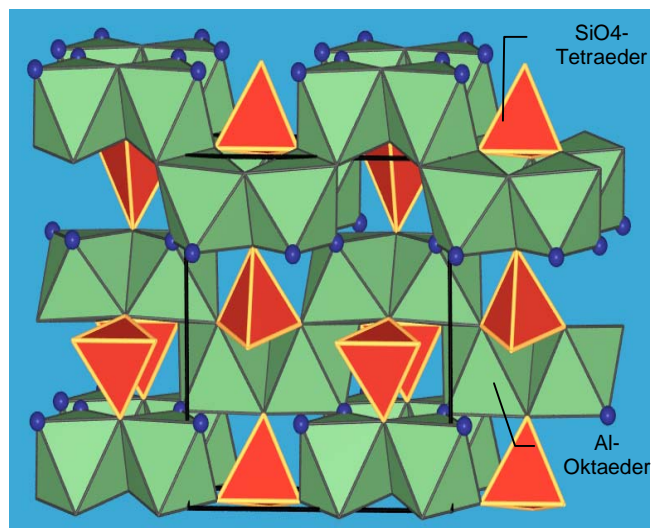
Der Topas ist seit 2000 Jahren bekannt. Der berühmteste Topas ist derjenige, der in der portugiesischen Krone verarbeitet wurde. Er hat ein Gewicht von 1680 ct und wurde lange Zeit für einen Diamanten gehalten.

Allerdings wurde der Topas im 20. Jahrhundert von dem viel billigeren Citrin abgelöst. Dieser hat sogar seinen Namen übernommen: Goldtopas. Schon in der Antike hat man den Topas als Schmuckstein verwendet. In der heutigen Zeit wird er immer häufiger getragen und hat an Beliebtheit zugenommen.

### 2. Entstehung

Ein Topas entsteht wie viele andere Edelsteine auch aus Magma. Dieses sickert in Gesteinszwischenräume, wo es auf ungefähr 500°C abkühlt. Die Temperatur ist der entscheidende Faktor. Ist die Temperatur höher, so entstehen härtere Mineralien (z.B. Zirkon und Diamant), ist die Temperatur niedriger, entstehen weichere Mineralien (z.B. Smaragd und Aquamarin).

Der Topas gehört zu der Gruppe der Silikate. Seine chemische Formel ist  $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH},\text{F})_2$  und seine Dichte beträgt 3,5 – 3,6  $\text{g/cm}^3$ . Obwohl er die Mohshärte 8 besitzt, ist er leicht spaltbar, wodurch es schwer ist, den Topas zu bearbeiten. Das resultiert aus der Struktur des Topases. Er besteht aus Oktaedern, die durch  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder verbunden sind. Ein Aluminiumatom ist an den Seiten von 4 Sauerstoffatomen umgeben. Ober- und unterhalb des Aluminiumatoms befindet sich ein Fluorid- bzw. Hydroxidion. Die Oktaeder sind zu Zick-Zack-Ketten



**Abb. II.1** Struktur des Topas

verknüpft, wodurch der Topas seine kristalline Struktur erhält. Die Ketten sind durch die Silikattetraeder verbunden. Durch die schwachen Bindungen von Al-O, Al-OH und Al-F innerhalb der Oktaeder ist der Topas entlang der Oktaeder mühelos zu spalten, da diese nicht durch SiO<sub>4</sub>-Tetraeder unterbrochen sind.

Die wichtigste heutige Fundstätte ist Brasilien. Außerdem wird Topas auch in Afghanistan, Algerien, Birma, Japan, Madagaskar, Mexiko, Myanmar, Namibia, Nigeria, Norwegen, Pakistan, Schweden, Sri Lanka, Tschechien, der Ukraine und den Vereinigten Staaten abgebaut.

### 3. Topasfärbung

Es gibt Topase in den unterschiedlichsten Farben, die in der Natur durch farbgebende Spurenelemente wie Chrom oder Eisen entstehen. Diese wurden in den Topas gebrannt und sind in ihm eingeschlossen. Die Farbe der Steine kann aber auch durch ionisierende Strahlung, die durch in der Erde natürlich vorkommende Radionuklide ausgestrahlt wird, verändert werden.

Heutzutage gibt es unterschiedliche Arten, Topase technisch zu färben. Eine Möglichkeit ist das Ummanteln von Topasen. Hierbei werden farblose Topase entweder mit Hilfe der physikalischen Gasabscheidung oder aber durch Diffusion gefärbt. Beim Gasabscheidungsverfahren wird der farbgebende Stoff bis zum Siedepunkt erhitzt. Sobald er vollständig verdampft ist, wird er gasförmig in die Nähe des Topases gebracht. Auf diesem kondensiert er dann, was zu der Farbgebung führt. Für das Diffusionsverfahren werden die farbgebenden Stoffe in Form von Puder um den Topas angeordnet. Anschließend wird dieses Gemenge in einem Ofen erhitzt. Dabei verbinden sich die beiden Stoffe im molekularen Bereich, wodurch die Farbe entsteht. Bei beiden Verfahren, dem Diffundieren und der Gasabscheidung, wird allerdings nur auf der obersten Schicht des Topases die Farbe verändert. Man kann ihn deshalb anschließend nicht mehr bearbeiten, da man die Farbe sonst wieder abkratzen würde. Aus diesem Grund gibt es noch eine dritte Bearbeitungsform, die bei natürlichen Topasen angewendet wird: das Bestrahlen.

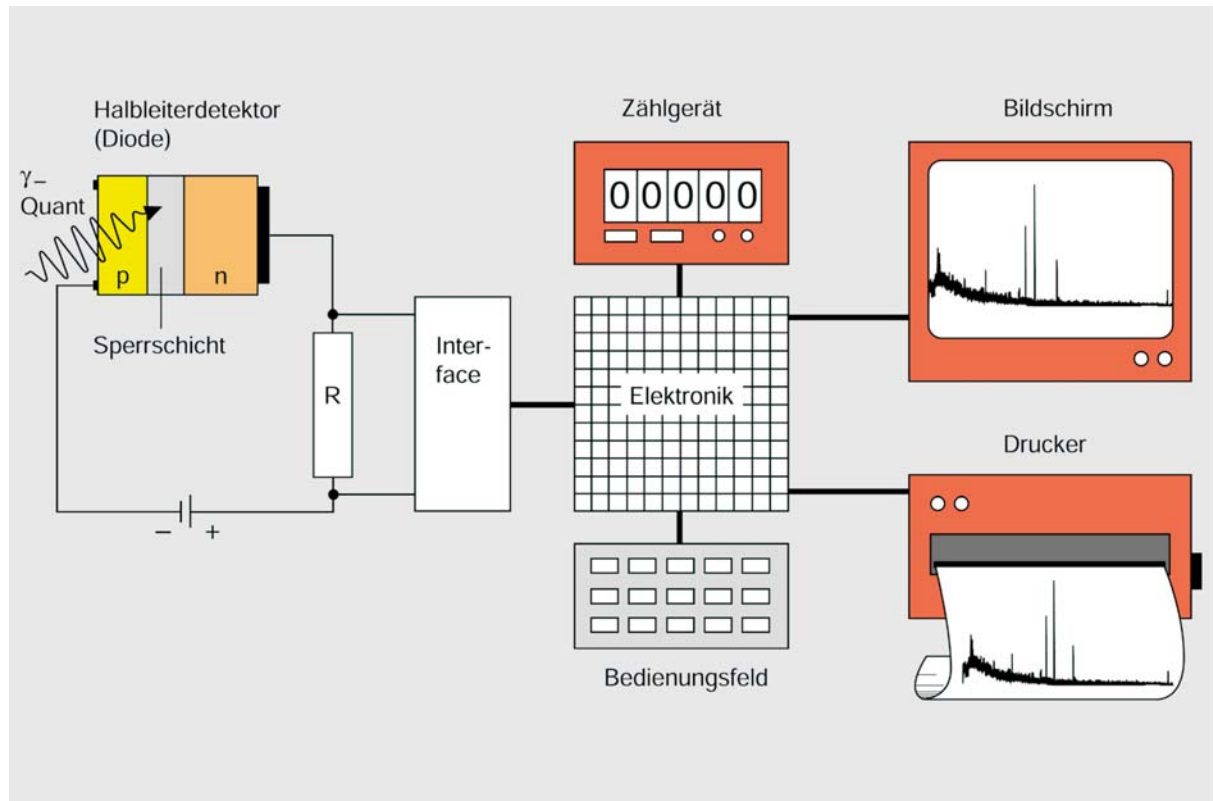
Bei der Bestrahlung werden energiereiche Elektronen oder Neutronen auf den Topas geschossen. Dadurch erhält er zuerst eine braune Farbe. Anschließend müssen die Topase dann erhitzt werden, um eine blaue Farbe zu erhalten. Dabei unterscheidet man zwischen drei unterschiedlichen Farbtönen: Sky Blue, Swiss Blue und London Blue. Sky Blue ist ein sehr helles Blau, das fast schon ins Graue geht. Swiss Blue ist ein helles Blau. London Blue ist ein sehr dunkles und kräftiges Blau mit einem leichten Grüntich. Die Länge der Bestrahlung und die Herkunft des Topases bestimmt die genaue Farbe. Nachdem die Topase erhitzt worden sind, müssen sie abklingen, bis sie nicht mehr radioaktiv sind. Kleinere Händler können sich die Wartezeit und die Messungen allerdings nicht leisten und verkaufen möglicherweise die noch strahlenden Topase zu früh an Kunden.



**Abb. II.2** Beispiele für Topase in den Farben London Blue, Swiss Blue und Sky Blue

### III. Grundlagen

#### 1. Beschreibung des Gammaspektrometers



**Abb. III.1** Aufbau des Gammaspektrometers

Mit einem Gammaspektrometer lassen sich Radionuklide in einer Probe bestimmen. Dies erreicht man mit den charakteristischen Energiewerten. Diese werden durch die Energie der  $\gamma$ -Quanten gemessen.

Dazu benötigt man eine Diode, die aus einer positiv geladenen p-Schicht, die aus Germanium mit darin eindiffundiertem Lithium besteht, und einer negativ geladenen n-Schicht, die aus Bor oder Aluminium besteht, zusammengesetzt ist. Um die Diffusion von Lithium zu verhindern, wird der Messkopf mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Die n-Schicht besitzt sehr viele Elektronen, die sie der p-Schicht abgibt, weil sich auf deren Valenzband zu wenige Elektronen befinden, um die Löcher zu füllen. Beide Schichten sind an den Stromkreislauf angeschlossen, weshalb dauerhaft ein Elektronenübergang stattfinden kann, ohne dass sich etwas an der Ausgangssituation ändert.

In der Mitte der Schichten befindet sich eine Sperrschicht. Dadurch, dass die Anzahl der Elektronen und Löcher immer gleich bleibt, befinden sich in dieser Sperrschicht keine elektrischen Leitungsträger. Tritt ein  $\gamma$ -Quant in die Sperrschicht ein, gibt es bestenfalls seine gesamte Energie an ein Elektron ab. Der dadurch entstehende Spannungsimpuls kann gemessen werden. Da die Energie dieses Spannungsimpulses proportional zur Energie des  $\gamma$ -Quants ist, kann seine Energie bestimmt werden. Das Resultat der Messung wird durch einen Bildschirm bzw. Drucker wiedergegeben.

Der Messkopf ist auf mehrere Arten gegen Strahlung geschützt, damit er nicht durch äußere Einflüsse gestört wird. Als erstes schützt ihn eine Bleischicht vor Strahlung der natürlichen Zerfallsreihen. Dahinter befindet sich eine Eisenschicht, die die Messvorrichtung vor Röntgenstrahlen schützt. Um das Messgerät vor Neutronen zu schützen, benutzt man Cadmium, welches einen sehr hohen Einfangsquerschnitt besitzt. Als letzte Schutzschicht befindet sich Plexiglas um die Halbleiterdiode, die für  $\beta$ -Strahlung undurchlässig ist. Aus diesem Grund erkennt man das Gammaskpektrometer nur als großen Bleikasten mit einem Computer.



**Abb. III.2** Gammaskpektrometer in der TU-Darmstadt

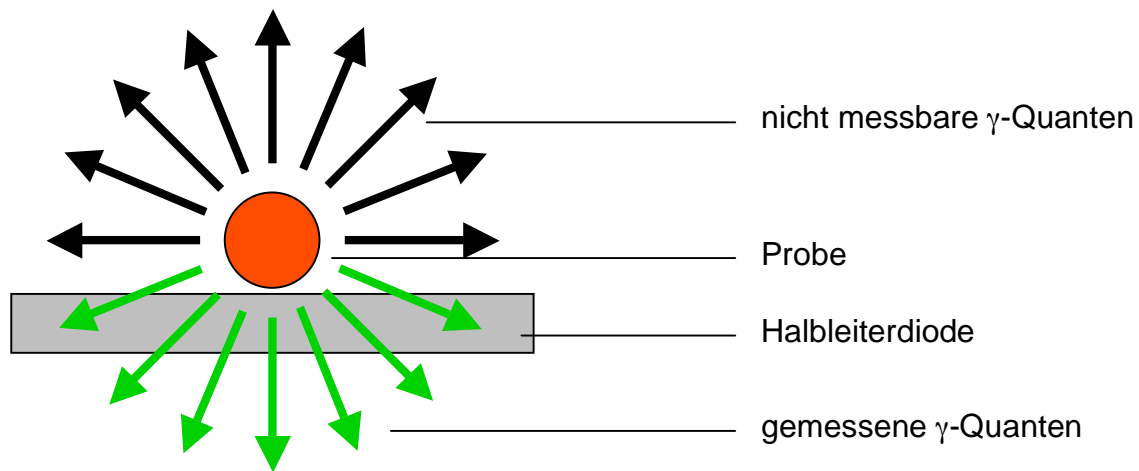
## 2. Qualität der $\gamma$ -Spektren

Bei der Qualität der  $\gamma$ -Spektren muss man auf zwei wichtige Punkte achten: die tatsächliche gemessene Strahlung und die immer vorhandenen Störfaktoren.

### a) Zählhausbeute

Bei der Zählhausbeute müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Wir nehmen an, dass  $\gamma$ -Quanten in alle Richtungen gesendet werden. Da das Präparat auf dem flachen Ge(Li)-Detektor liegt, ist es unmöglich, alle  $\gamma$ -Quanten, und somit alle Zerfallsereignisse, zu messen. Es handelt sich bei der folgenden Darstellung um einen theoretischen Aufbau. Durch einen Schutz des Detektors ist der Abstand

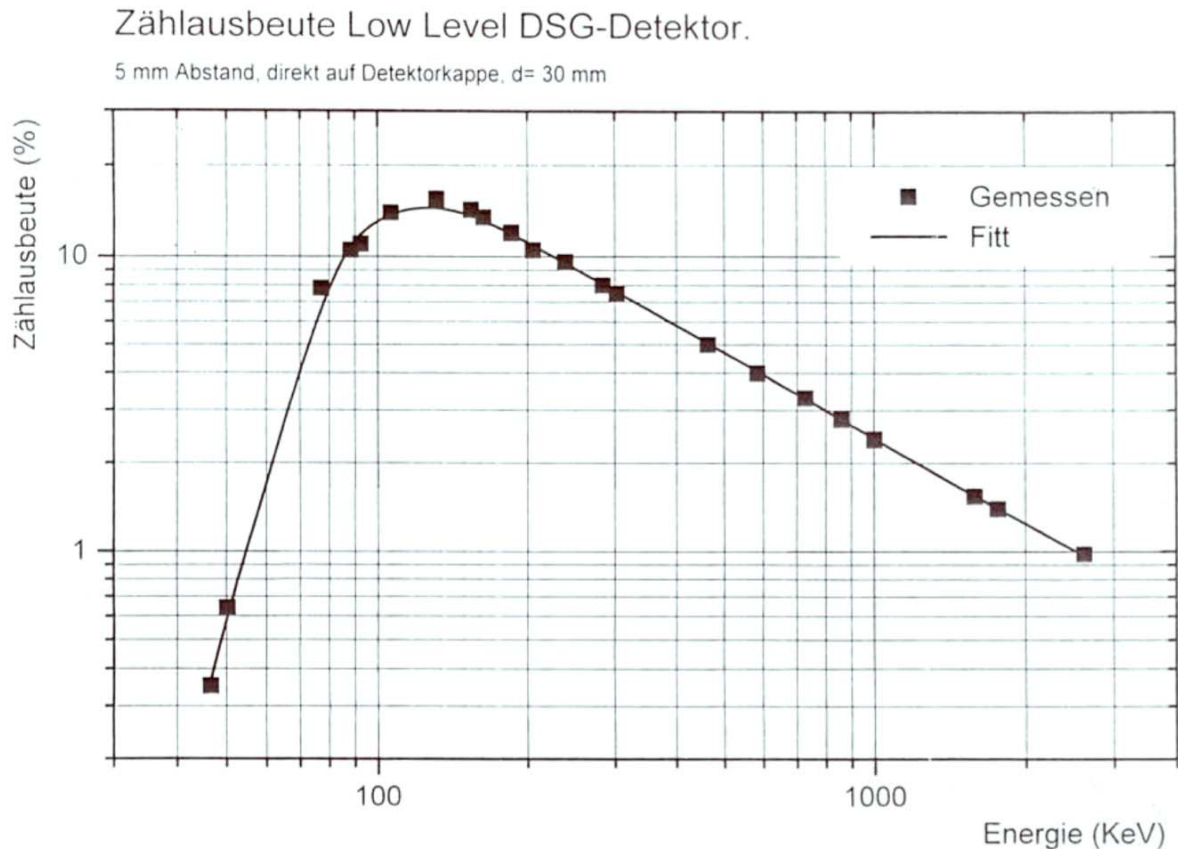
zwischen der Probe und dem Präparat größer, wodurch die Zählzählbeute ebenfalls verringert wird.



**Abb. III.3** Zählzählbeute eines Präparats

Auch durch die Selbstabsorption des Präparates, welche bei zunehmender Masse ebenfalls größer wird, wird die Zählzählbeute geringer, da einige der  $\gamma$ -Quanten schon von der Probe selbst absorbiert werden.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wird für Präparate, wie z.B. einem Topas, folgendes Diagramm für die Zählzählbeute benutzt.



**Abb. III.4** Zählzählbeute

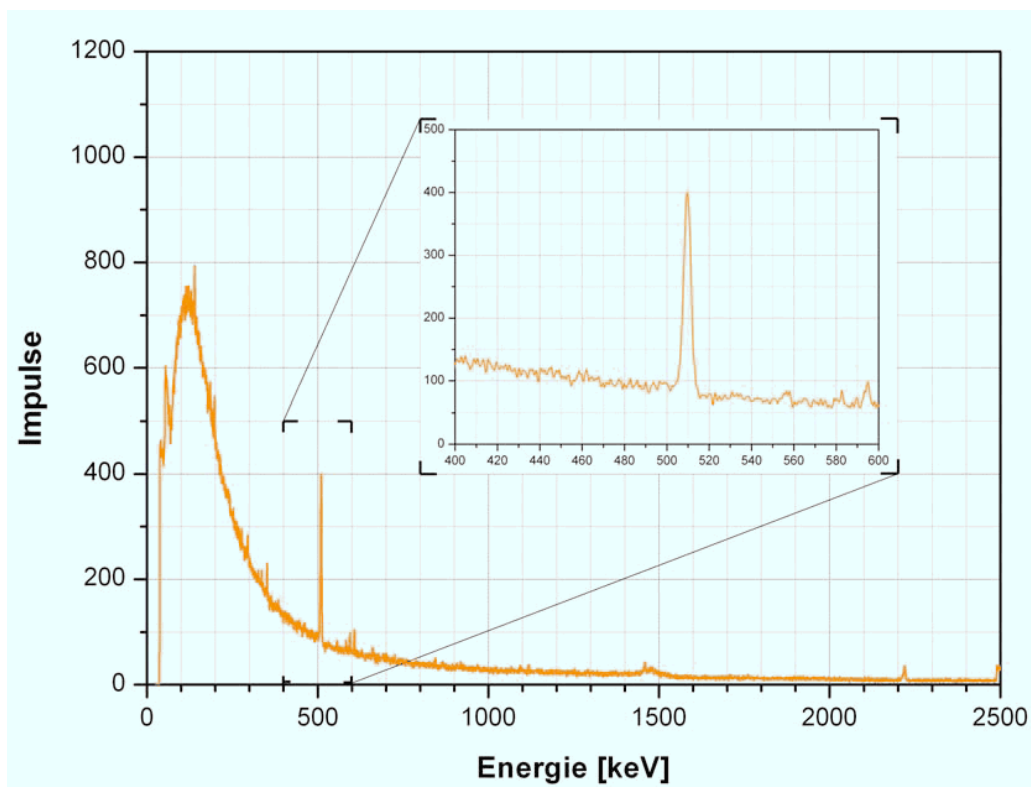


## b) Untergrundrauschen

Bei einer Messung, bei der kein Präparat im Detektor war, stellt man fest, dass auch in diesem Spektrum einige Peaks zu sehen sind. Diese sind das sogenannte Untergrundrauschen. Das Spektrum (siehe unten) zeigt den sogenannten Vernichtungspeak. Bei der Paarvernichtung des entstehenden Positrons mit einem Elektron entstehen zwei Photonen mit jeweils 511 keV Energie. Das Untergrundrauschen wird vor allem vom Compton-Effekt verursacht. Der Compton-Effekt ist die Streuung eines Quants mit einem freien oder fast freien Elektron aus der Elektronenhülle eines Atoms. Ein Teil der Energie und des Impulses des Quants wird auf das Elektron übertragen, der Rest bleibt bei dem gestreuten Quant. Dieses Quant kann wieder mit einem Elektron gestreut werden. Das geht so lange, bis es letztendlich die restliche Energie komplett mittels des Photoeffekts an ein Elektron abgegeben hat. Beim Photoeffekt überträgt das Röntgen- oder  $\gamma$ -Quant seine Energie an ein Elektron des Atoms. Das Elektron erhält hierbei eine Bewegungsenergie. Diese entspricht der Energie des Quants, vermindert um die Bindungsenergie des Elektrons. Das Resultat ist ein kontinuierliches Energiespektrum, was zu einem Teil das Untergrundrauschen ausmacht.

Der gut erkennbare Peak bei 511 keV ist auf Vernichtungsstrahlung zurückzuführen. Diese Strahlung entsteht aus Quanten mit der Energie über 1022 keV. Ab diesem Wert ist das Quant in der Lage, im elektrischen Feld eines Atomkerns ein Elektron und ein Positron zu erzeugen, welche sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen. Trifft das Positron auf ein Elektron, kommt es zu deren Vernichtung unter Aussendung von zwei entgegengesetzten  $\gamma$ -Quanten mit der Energie von 511 keV.

Eine weitere Komponente dieses Rauschsignals ist die sogenannte Bremsstrahlung. Bei dieser wird ein Elektron, welches beim Compton- oder Photoeffekt angeregt wurde, an einem Atomkern abgebremst. Dabei entsteht ein  $\gamma$ -Quant niedriger Energie.



**Abb. III.5** Untergrundrauschen des Gammaskopplers in Darmstadt

### 3. Charakteristische Energiewerte für Nuklide

Jedem Nuklid werden ein oder mehrere bestimmte Energiewerte zugeordnet. Bei einem Nuklid, bei dem nur ein Energiewert auftritt, wird die Strahlung monoenergetisch genannt. Diese Energiewerte treten in Form von  $\gamma$ -Quanten auf, die als Peaks auf den Spektren zu sehen sind. Tritt der charakteristische Energiewert bzw. die charakteristischen Energiewerte auf, ist das Nuklid, zu dem dieser Energiewert bzw. Energiewerte gehören, mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit im Präparat enthalten. Es kann das Problem auftreten, dass ein  $\gamma$ -Quant mehreren Nukliden zugeordnet werden kann. Aus diesem Grund gibt es die Übergangswahrscheinlichkeit.

### 4. Übergangswahrscheinlichkeit

Die Übergangswahrscheinlichkeit ist sehr wichtig für den Fall, dass einem Peak zwei oder mehrere Nuklide zugeordnet werden könnten. Bedingt durch die Tatsache, dass nicht bei allen Zerfällen  $\gamma$ -Quanten ausgesendet werden, gibt es eine unterschiedliche Gewichtung bei der Zuordnung der Nuklide mit den  $\gamma$ -Quanten. Infolgedessen gibt es für jeden Energiewert eines Nuklids eine so genannte Übergangswahrscheinlichkeit, die die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines speziellen  $\gamma$ -Quants bei einem speziellen Nuklid angibt. Mit Hilfe der Übergangswahrscheinlichkeit können somit Nuklide besser auseinandergehalten werden, falls ein  $\gamma$ -Quant mehreren zugeordnet werden kann.

### 5. Ergebnisauswertung

Zur qualitativen Auswertung der Messungen unserer Topase benutzten wir zwei verschiedene Programme. Zum einen *MAESTRO*, das die  $\gamma$ -Spektren analysierte. Um herauszufinden, welche Nuklide in der strahlenden Probe vorhanden sind, vergleicht die Software die Energien der vorhandenen Peaks mit den charakteristischen Energiewerten der Nuklide. Außerdem beachtet es dabei die Übergangswahrscheinlichkeit. Allerdings muss man vorher eine sogenannte *Library* erstellen. In diese trägt man die spezifischen Energiewerte und die Übergangswahrscheinlichkeit solcher Nuklide ein, die sehr wahrscheinlich in der Probe auftreten könnten. Nur die eingegebenen Werte werden von *MAESTRO* beachtet. Zur Erstellung unserer Library verwendeten wir Werte aus dem Programm *Nuclides 2000*.

Mit Hilfe des Programms *REPGAMMA* bestimmt man die Strahlungsintensität der vorhandenen radioaktiven Nuklide. Um dieses benutzen zu können, muss man sowohl die Messzeit als auch die Energie und Intensität der Peaks speichern. *REPGAMMA* öffnet die Datei und wertet sie unter Berücksichtigung des Gewichts des Topases aus. Als Resultat dieser Rechnung erhält man die Radioaktivität in Becquerel.

## IV. Durchführung

### 1. Beschaffung der Präparate

Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, mindestens einen radioaktiven Topas zu kaufen, haben wir darauf geachtet, dass wir ein möglichst breites Spektrum an Topasen erwerben. Deshalb haben wir die Auswahl der Topase getroffen, indem wir auf unterschiedliche Herkunft, Beschaffenheit (Aussehen und Bearbeitung) und Händler geachtet haben. So haben wir zwar die meisten Topase aus Thailand bestellt, weil von dort die weit überwiegende Zahl der Angebote kamen, allerdings sind die Steine alle von unterschiedlicher Beschaffenheit. Ihre Fundstelle liegt meistens in Brasilien. Wir haben aber auch einige, die in Afrika oder Australien abgebaut wurden. Zusätzlich liegen uns verschieden bearbeitete Topase vor. Die meisten wurden laut Verkäufer bestrahlt oder erhitzt, um künstlich ihre spezifische Blaufarbe zu erhalten. Wir bevorzugten Topase, die Strahlung ausgesetzt worden sind, um ihre Radioaktivität messen zu können, denn vermutlich haben nicht alle Händler die Möglichkeit, die Reststrahlung vor dem Verkauf abklingen zu lassen. Außer den potentiell radioaktiven Topasen haben wir aber auch andere gekauft, um einen Vergleich zu schaffen und herauszufinden, ob die Händler immer korrekte Angaben machen. Schließlich haben wir in unserer Studie zur Kontrolle Topase von unterschiedlicher Farbe (Sky Blue, Swiss Blue und London Blue) berücksichtigt, um Hinweise auf die Art der verwendeten Bestrahlungsmethode zu erhalten.

Wir haben alle Topase bei e-bay bestellt, weil wir uns die Frage gestellt haben, ob radioaktive Topase für jedermann unkontrolliert zugänglich im Internet verkauft werden. Das Internetauktionshaus e-bay haben wir aufgrund seiner hohen Popularität und preiswerten Angebote gewählt. Dadurch ist gewährleistet, dass jeder dort Topase bestellen kann.

**Tabelle 1.** Für unsere Studie beschaffte und ausgewertete Topase

Bild	Nummer	Farbe	Gewicht (ct)	Origin	Verkaufsland	Treatment	Radioaktiv?
	1	London Blue	7,14	Africa	Chantaburi, Thailand	unheated	<b>Ja</b>
	2	London Blue	10,60	Brazil	Thailand	irradiation	Nein
	3	London Blue	14,26	Brazil	Chantaburi, Thailand	irradiation	Nein
	4	London Blue	2,46	Australia	Brisbane, Australien	?	<b>Ja</b>
	5	Blue	27,45	Brazil	Chantaburi, Thailand	?	Nein
	6	Swiss Blue	25,20	Brazil	Chantaburi, Thailand	radiation	Nein
	7	Swiss Blue	32,42	Brazil	Chantaburi, Thailand	radiation	Nein
	8	Swiss Blue	23,01	Brazil	Chantaburi, Thailand	irradiation	Nein
	9	Sky Blue	39,40	Brazil	Chantaburi, Thailand	radiation	Nein
	10	Sky Blue	22,40	Brazil	Chantaburi, Thailand	radiation	Nein
	11	Sky Blue	4,27	Brazil	Bangkok, Thailand	natural ?	Nein
	12	London Blue	6,42	Africa	?	irradiation	<b>Ja</b>

## 2. Ausführung des Experiments

Nachdem wir die Topase geschickt bekommen hatten, maßen wir jeden einzelnen Topas mit Hilfe des Gammaspektrometers. Dazu mussten wir zuerst den etwa 1,8 Tonnen schweren Deckel von der Bleiummantelung des Gammasspektrometers schieben. Danach mussten sechs mehrere Kilogramm schwere Eisen-, Blei- und Cadmiumplatten weggehoben werden. Als letztes wird eine mehrere Zentimeter dicke Plexiglasabdeckung vom Messkopf entfernt. Anschließend stellten wir den Topas, den wir messen wollten, in einem Plastikbecher auf den Messkopf. Dann mussten wir die Abdeckungen wieder zurücklegen.



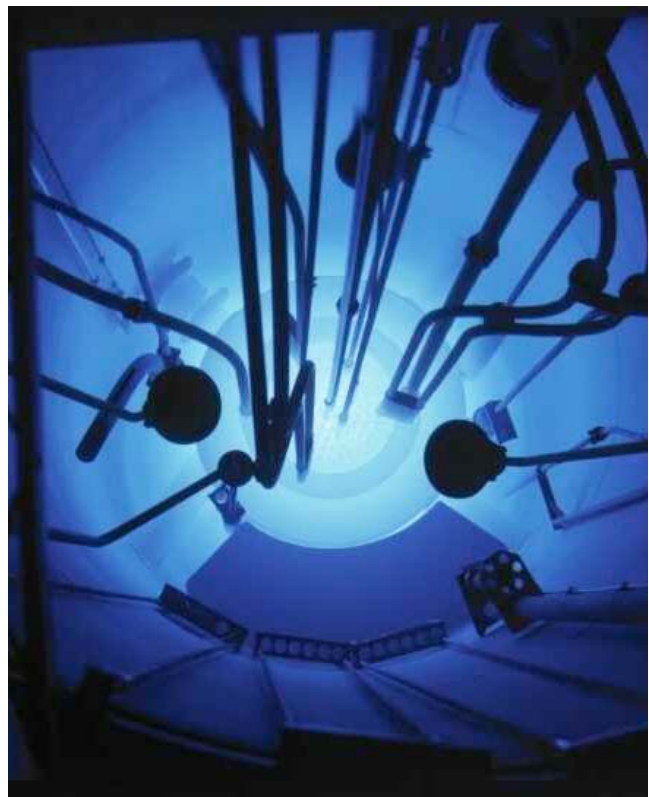
**Abb. IV.1** Abdeckungen und Inneres des Gammasspektrometers

Um herauszufinden, ob die einzelnen Topase radioaktiv sind, maßen wir sie zuerst nur kurze Zeit. Sobald sich der Edelstein als radioaktiv herausstellte, ließen wir ihn mehrere Tage vom Halbleiterdetektor messen. Die Messwerte wurden uns vom Programm *Maestro* graphisch dargestellt. Die häufig gemessenen Energien, die uns als Peaks dargestellt wurden, mussten von uns den einzelnen Nukliden zugeordnet werden. Wir übertrugen für *Maestro* sämtliche mögliche Nuklide in eine *Library*. Das ist eine Liste, in die wir die Nuklide mit ihren spezifischen Energien, Übergangswahrscheinlichkeiten und Halbwertszeiten aus dem Programm *Nuclides 2000* übertragen hatten. Allerdings wählten wir nicht alle Nuklide sämtlicher Elemente aus, sondern wir suchten gezielt, indem wir einen ungefähr gemessenen Energiebereich und eine mögliche Halbwertszeit eingegeben haben, die auf keinen Fall kürzer als die Versandszeit sein durfte, da das Nuklid dann schon abgeklungen und von uns nicht mehr messbar gewesen wäre. Dadurch haben wir einige mögliche Nuklide erhalten. Nachdem wir die Nuklide bestimmt hatten, gaben wir sie zusammen mit ihren charakteristischen Energiewerten und deren Übergangswahrscheinlichkeit in ein Textdokument ein. Dieses speicherten wir und ließen es von dem Programm *REPGAMMA* nach Eingabe des Gewichts und der Größe des gewählten Topases mit seiner Hilfe Reportdateien auswerten. Diese erstellten wir mit dem Programm *Maestro*, indem wir die zu untersuchenden Peaks markierten und speicherten. *REPGAMMA* lieferte uns dann die relative Radioaktivität des Topases.

Zusätzlich zu unseren drei radioaktiven Topasen kam uns die Idee, selbst zu versuchen, einen Topas durch Bestrahlen und anschließendes Erhitzen zu färben.

### 3. Eigener Bestrahlungsversuch

Wie oben bereits erwähnt sind wir auf den Gedanken gekommen, einen nicht-radioaktiven Topas bestrahlen zu lassen. Dies bot sich vor allem an, weil wir aus einem Kauf zwei Topase mit identischen Eigenschaften und gleichem Aussehen besaßen (siehe Kap. IV. Durchführung/1. Beschaffung der Präparate, Tabelle Nr.9). Denn so konnten wir einen Topas bestrahlen lassen und dessen Zwilling als Vergleich behalten. Wir erhofften uns durch unseren eigenen Bestrahlungsversuch einen braunen Topas zu erhalten. Danach wollten wir dessen Radioaktivität messen, um die gefundenen Nuklide in dem bestrahlten Topas mit den gefundenen Nukliden in den von uns bestellten Topasen zu vergleichen. Nach diesem Vergleich wollten wir herausfinden, ob es möglich ist, dem Topas durch anschließendes Erhitzen die Farbe London Blue zu geben.



**Abb. IV.2** Forschungsreaktor in Mainz von außen und innen

Die Möglichkeit, einen Topas bestrahlen zu lassen, bot sich uns an der Universität Mainz. Dort gibt es einen Reaktor, der für Forschungszwecke verwendet werden kann. Wir stellten einen Antrag, unseren Topas mit Neutronen bestrahlen zu lassen. Nach Bewilligung des Antrags schickten wir den Topas zur Universität Mainz. Dort wurde er acht Stunden lang mit Neutronen bestrahlt. Anschließend war er allerdings viel zu stark radioaktiv, um transportiert zu werden. Deshalb mussten wir mehrere Wochen warten, bis wir ihn abholen durften, um ihn messen zu können.

Wir stellten fest, dass der Topas sich wie erwartet braun gefärbt hatte. Die Messungen ergaben, dass die Nuklide die gleichen waren, wie die in manchen anderen radioaktiven Topasen gefundenen.

Danach wollten wir versuchen, durch Erhitzen eine Blaufärbung zu erreichen. Nach langer Suche fanden wir eine Quelle, die angab, wie man eine starke Blaufärbung eines braunen, bestrahlten Topases erreichen könne. Man solle dazu den Topas bei

200°C mehrere Stunden erhitzen. Dafür bekamen wir einen Ofen, der bis zu 1000°C heizen konnte, an der TU-Darmstadt von Herrn Dr. Wannowius zur Verfügung gestellt.

Nachdem der bestrahlte Topas in Mainz abgeholt worden war, maßen wir ihn zuerst im Gammaskpektrometer. Als uns klar wurde, wie stark radioaktiv er geworden war, ließen wir ihn zur Sicherheit noch eine Zeit lang abklingen. Anschließend erhitzen wir den Topas dann, um seine endgültige Farbe herbeizuführen.

Da unsere Quelle (siehe Kap. VIII. Literaturverzeichnis) erklärt, man solle den Topas bei 200°C mehrere Stunden lang erhitzen (*“Heat treatment of the topaz for several hours at around 200° C is therefore performed in order to achieve strong blue colors.”*), erhitzen wir den Topas etwa 25 Stunden bei 200°C. Es zeigte sich aber keine Veränderung. Also beschlossen wir, den Topas stufenweise so lange bei höheren Temperaturen im Ofen zu lassen, bis er einen Blauton annimmt. Als selbst bei 400°C nur ein Verblässen der braunen Farbe zu bemerken war, erhöhten wir die Temperatur sogar auf 600°C, bei der laut Noomie Lewinson die blaue Farbe eigentlich verschwinden soll. Da bei den angegebenen 200°C überhaupt nichts passiert war, sahen wir die Quelle nicht als zuverlässig an und experimentierten deswegen eigenständig.

Das Endprodukt unseres Versuches ist anders als erwartet, aber dennoch zufrieden stellend. Statt des wie von uns erhofften London Blue Topases erhielten wir einen Topas, der eher den blassen Blauton von Sky Blue aufweist. Trotzdem zeigt er auch wichtige Charakteristiken von London Blue, denn er besitzt die ausschlaggebende Dunkelheit und vor allem den spezifischen Grünstich (Abb. IV.3, rechts).

Aus unserem Versuch ziehen wir den Schluss, dass Bestrahlung und anschließendes Erhitzen allein nicht jedem farblosen Topas die gewünschte Farbe einbringt. Er muss wahrscheinlich entsprechend seiner Herkunft und seiner ganz besonderen Beschaffenheit bearbeitet werden. Demnach hätten wir unseren Topas vielleicht gar nicht zu der Farbe London Blue verhelfen können, sondern nur zu blasseren Farben, was wir im Endeffekt auch erreicht haben. Andererseits wäre es auch möglich, dass man die Farbe eines Topases, der bereits behandelt wurde, nur schwer oder überhaupt nicht ändern kann. Eine andere Erklärung wäre, dass die Strahlung des Kernreaktors in Mainz für die Herstellung von Topasen mit der Farbe London Blue nicht gut geeignet ist.



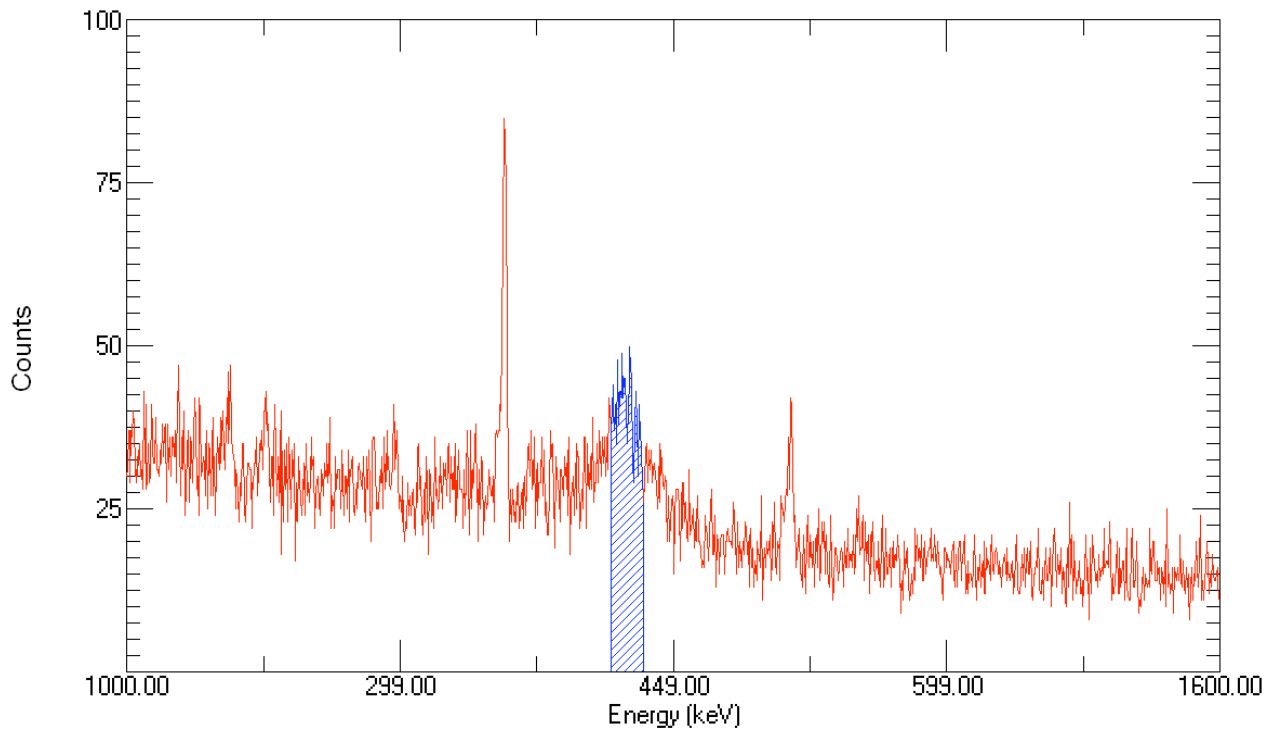
**Abb. IV.3** Topas 9b) vor und nach der Bestrahlung sowie nach dem Erhitzen

## V. Erörterung der Spektren

### 1. Qualitative Analyse

#### a) Na-22

Wir haben das Nuklid Na-22 nur in Topas Nr. 4 gefunden. Dort war auch nur eine kleine Menge, was den Schluss zulässt, dass nur ein Spurenelement aktiviert wurde. Man sieht den Peak bei 1274,54 keV deshalb nur mit einer sehr geringen Impulsrate.

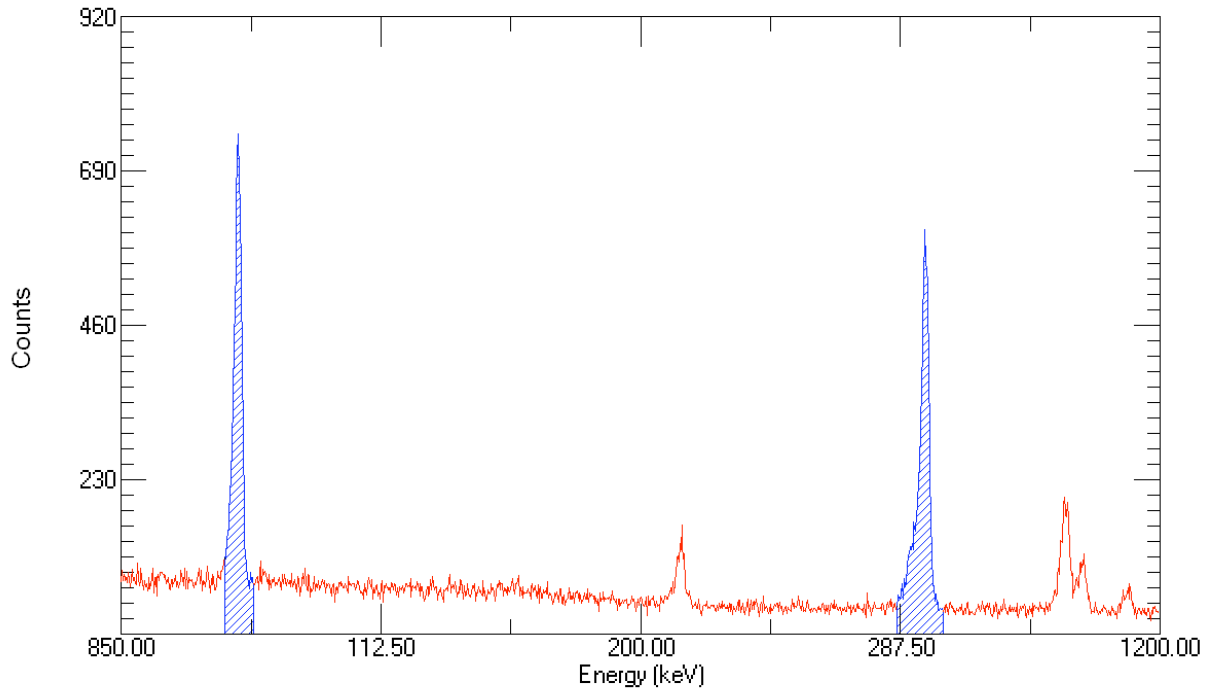


**Abb. V.1** Na-22-Peak des Topases Nr. 4 bei 1274,54 keV

#### b) Sc-46

Wir haben Sc-46 in den Topasen Nr. 1, 4 und 12 gemessen. In Topas Nr. 4 ist nur eine sehr geringe Menge vorhanden, weshalb die Aktivität des Topases dadurch kaum beeinflusst wird. In Topas Nr. 12 ist aber eine größere Menge Sc-46, in Nr. 1 sogar noch mehr. Aus diesem Grund haben wir nur die Sc-46-Peaks von Stein Nr. 1 bei 889,4 keV und 1120,6 keV in dem unten zu sehenden Bild dargestellt.

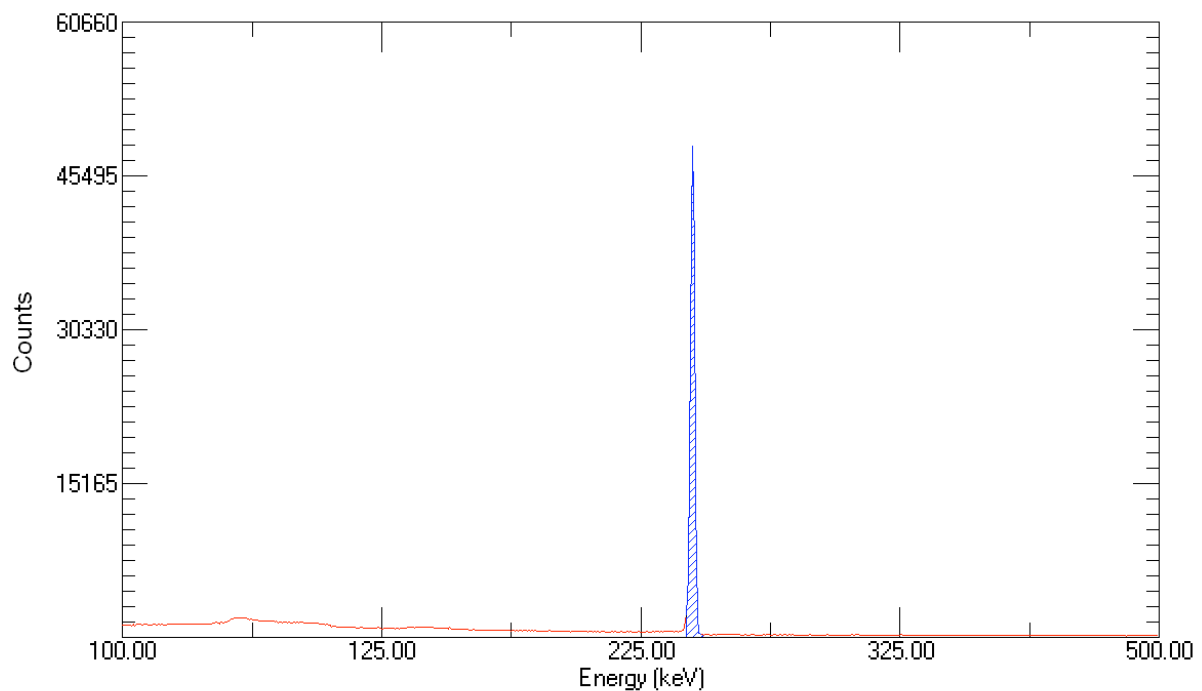




**Abb. V.2 1** Sc-46-Peaks des Topases Nr. 1 bei 889,4 keV und 1120,6 keV

### c) Cr-51

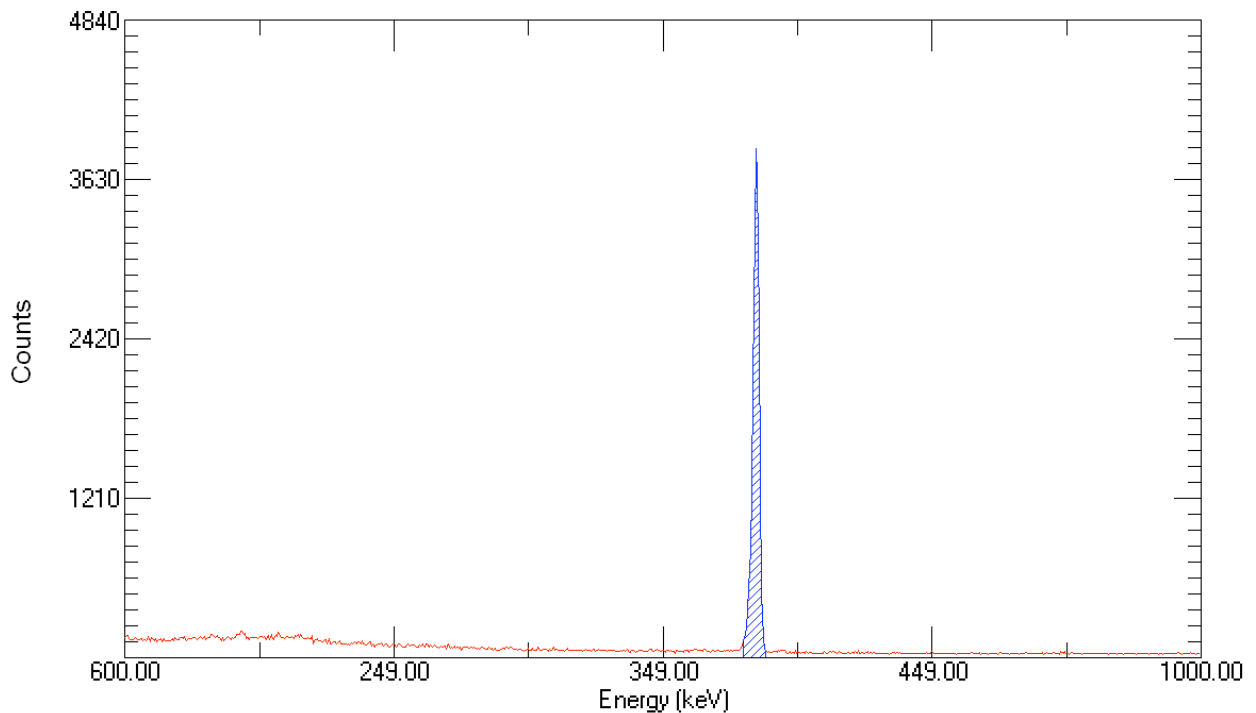
Wir haben festgestellt, dass Cr-51 nur in den Topasen Nr. 4 und 9b) vorhanden ist. In Nr. 4 existiert nur eine verschwindend geringe Menge an Cr-51. In Nr. 9b) dagegen wurde eine riesige Menge an Cr-51 erzeugt.



**Abb. V.3** Cr-51-Peak des Topases Nr. 9b) bei 320,08 keV

#### d) Mn-54

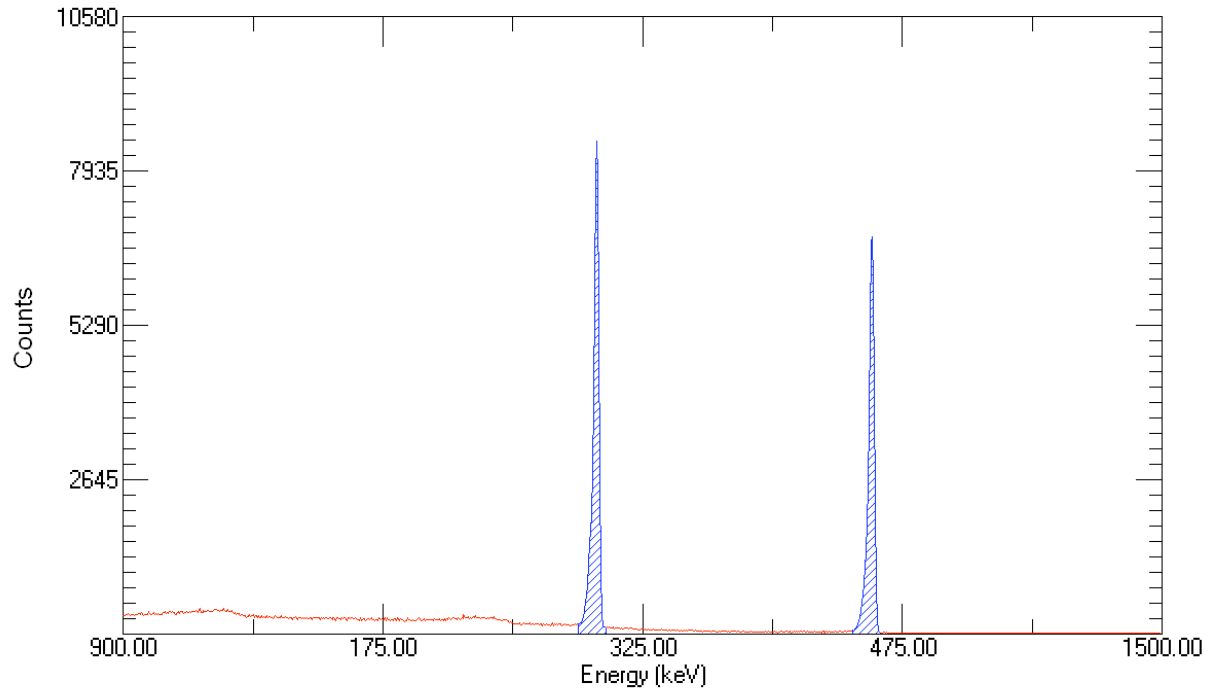
In den Topasen Nr. 1, 4 und 12 ist Mn-54 vorhanden. In Topas Nr. 12 kann man Mn-54 kaum erkennen, in Nr. 1 und 4 ist aber eine umso deutlichere Menge zu finden.



**Abb. V.4** Mn-54-Peak des Topases 4 bei 834,84 keV

#### e) Co-60

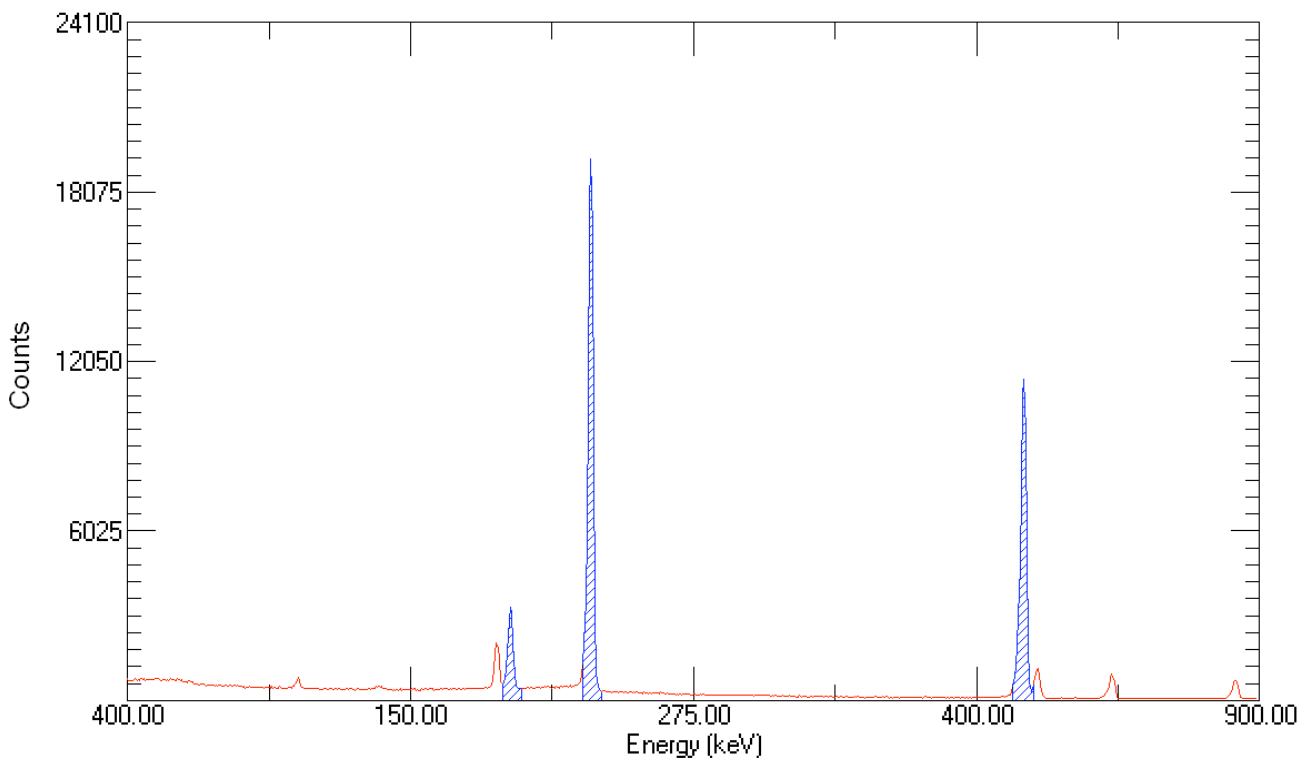
Wir haben Co-60 in den Topasen Nr. 4 und 9b) nachgewiesen. In Nr. 4 hat sich Co-60 allerdings nicht auf die Strahlung ausgewirkt, wobei es bei Nr. 9b) deutlich zu erkennen ist.



**Abb. V.5** Co-60-Peaks des Topases Nr. 9b) bei 1173,2 keV und 1332,5 keV

#### f) Cs-134

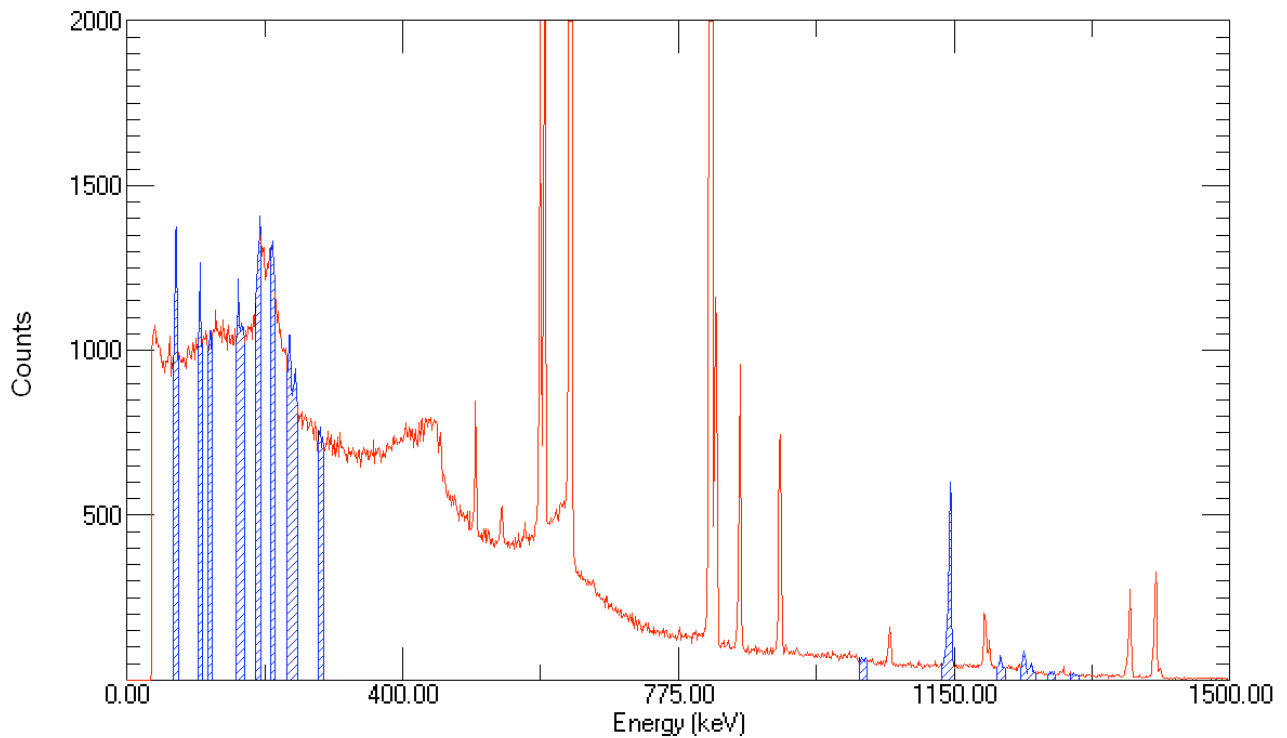
Cs-134 wurde von uns in den Topasen Nr. 1 und 4 entdeckt. Da in Topas Nr. 1 eine größere Menge verteilt auf 3 Peaks vorhanden ist, haben wir dessen Peaks statt jene von Nr. 4 dargestellt, denn dort erkennt man nur eine sehr geringe Menge.



**Abb. V.6** Cs-134-Peaks von Topas Nr. 1 bei 569,35 keV, 604,64 keV und 795,84 keV

## g) Ta-182

Wir haben Ta-182 in allen von uns bestellten Topasen nachgewiesen. Es wurden zwar überall nur wenige Impulse, dafür aber eine Vielzahl an Peaks mit verschiedenen Energien gemessen, aber es ist vorhanden im Gegensatz zu dem von uns bestrahlten, in dem es nicht vorhanden ist. Deswegen schließen wir daraus, dass wir Nr. 9b) einer anderen Strahlung ausgesetzt haben, als er von den Leuten behandelt wurde, die den Topasen ihre Farbe und damit ihre Radioaktivität gegeben haben.



**Abb. V.7** Ta-182-Peaks des Topases Nr. 1 sowohl zwischen 60 keV und 270 keV als auch zwischen 990 keV und 1300 keV

## 2. Quantitative Analyse

Nach der qualitativen Analyse der Topase wollen wir hier nun die relative Aktivität der Radionuklide, also wie stark die Radioaktivität der Steine ist, erläutern. An der nachstehend abgebildeten Tabelle sieht man, dass sich der Topas Nr. 9b) durch seine Gesamtradioaktivität deutlich von den anderen abhebt. Der Topas Nr. 1 folgt ihm mit einem 1/220 der Gesamtradioaktivität, allerdings ist diese immerhin noch fast 11-mal so hoch wie die des darauf folgenden Steins. Man muss dabei aber beachten, dass der von uns bestrahlte Topas kaum Zeit hatte abzuklingen, weil wir ihn nur etwa 2 Wochen, nachdem er mit Neutronen beschossen wurde, gemessen haben.

**Tabelle 2.** Quantitative Auswertung der radioaktiven Topase

Topas	Gesamtradioaktivität (Bq/kg)	Radionuklid	Aktivität des Nuklids (Bq/kg)	Fehlerspanne (Bq/kg)
1	50.075,8464	Ta - 182	1.059,5016	± 254,6804
		Cs - 134	44.106,8555	± 519,2368
		Mn - 54	2.645,4844	± 49,9679
		Sc - 46	2.264,0049	± 80,9044
4	2.743,7896	Mn - 54	2.743,7583	± 18,5550
		Cr - 51	0,0161	± 8,5100
		Sc - 46	0,0031	± 0,0029
		Ta - 182	0,0089	± 0,0083
		Cs - 134	0,0000	± 0,0000
		Co - 60	0,0000	± 0,0000
		Na - 22	0,0032	± 0,0033
9b)	10.871.995,2041	Cr - 51	10.861.203,0000	± 22.323,0352
		Co - 60	10.792,2041	± 77,5682
12	4.666,9600	Mn - 54	261,0286	± 100,0349
		Sc - 46	1.045,2336	± 141,8259
		Ta - 182	3.360,6978	± 302,8193

### 3. Zusammenfassung

Wenn man die Ergebnisse unserer Untersuchungen im Ganzen betrachtet, stellt man Folgendes fest:

Es waren tatsächlich einzelne der gekauften Topase radioaktiv, allerdings nur wenige von denen, die als London Blue verkauft wurden. Die Topase mit den Farben Swiss- und Sky-Blue waren alle strahlungsfrei. Wir denken daher, dass man für dieses helle Blau zwar auch Strahlung verwenden muss, diese aber entweder nicht dieselbe wie bei London Blue ist oder dass diese deutlich kürzer benutzt wird, weil sie nicht langfristig radioaktiv macht. Im Gegensatz dazu waren alle dunkleren London-Blue-Topase radioaktiv, denn diese müssen wohl länger einer starken Bestrahlung ausgesetzt werden, um ihren intensiven Farbton zu erhalten.

Allerdings stellten wir fest, dass nicht alle vom Verkäufer als London-Blue beschriebene Topase dies auch wirklich waren. Wir nehmen an, dass dies der Fall ist, weil sich Edelsteine dieses Typs besser verkaufen lassen als Topase mit anderen Farben. Außerdem kann man für Topase mit dem Farbton London Blue mehr Geld verlangen, da das Verfahren zur Färbung aufwendiger ist. Wir kommen zu dieser Schlussfolgerung, weil alle Topase, die wir bestellt haben und aus Brasilien stammen, nicht London-Blue und aus diesem Grund auch nicht radioaktiv sind. Vergleicht man sie mit den von uns gekauften Topasen, welche in Afrika oder Australien abgebaut und behandelt wurden, zeigt sich, dass diese tatsächlich vom Typ London-Blue sind. Daher sind sie radioaktiv gewesen. Für diese Schlussfolgerung haben wir jedoch nur eine stark eingeschränkte Anzahl von Proben und Messwerten.

## VI. Bewertung

### 1. Bundesgesetzblatt zu den Freigrenzen

Wir haben uns im Bundesgesetzblatt zu den erlaubten Freigrenzen der spezifischen Radioaktivität der Nuklide informiert und Folgendes erfahren:

**Tabelle 3.** Freigrenzen der Radioaktivität der gefundenen Nuklide und Auswertung der Legalität der radioaktiven Topase

Nuklid	Freigrenze (Bq/kg)	Halbwertszeit	Topas	spezifische Aktivität (Bq/kg)	Erlaubt?
Na-22	10.000	2,6 Jahre	1	n.v.	ja
			4	ca. 0,0032	ja
			9b)	n.v.	ja
			12	n.v.	ja
Sc-46	10.000	83,82 Tage	1	ca. 2.264	ja
			4	ca. 0,0031	ja
			9b)	n.v.	ja
			12	ca. 1.045	ja
Cr-51	100.000	27,7 Tage	1	n.v.	ja
			4	ca. 0,0161	ja
			9b)	ca. 10.861.203	nein
			12	n.v.	ja
Mn-54	10.000	312 Tage	1	ca. 2.645	ja
			4	ca. 2.744	ja
			9b)	n.v.	ja
			12	ca. 261	ja
Co-60	10.000	5,27 Jahre	1	n.v.	ja
			4	n.v.	ja
			9b)	ca. 10.792	nein
			12	n.v.	ja
Cs-134	10.000	2,06 Jahre	1	ca. 44.107	nein
			4	n.v.	ja
			9b)	n.v.	ja
			12	n.v.	ja
Ta-182	10.000	115 Tage	1	ca. 1.060	ja
			4	ca. 0,0089	ja
			9b)	n.v.	ja
			12	ca. 3.361	ja

*n.v. = nicht vorhanden*

Demnach ist der Handel mit den Topasen Nr. 4 und 12 in Deutschland gesetzlich erlaubt. Topas Nr. 1 und 9b) überschreiten die Richtlinien zum Zeitpunkt der Messung allerdings deutlich, sodass ihr Transport und die Arbeit mit ihnen weitestgehend nicht mehr erlaubt waren. Aus diesem Grund mussten wir den von uns bestrahlten Topas zur Sicherheit persönlich in einem Bleibehälter abholen. Allerdings sind die oben angegebenen Werte des Topases Nr. 9b) auch kurz nach der Bestrahlung ent-

standen und deshalb natürlich viel höher als bei den anderen, die nach der Bestellung im Internet erst noch mit einer Transportzeit von 1-2 Wochen verschickt werden mussten. Umso überraschter sind wir, dass auch solch ein Topas noch dermaßen stark radioaktiv war.

## 2. Folgen für Besitzer

Die Strahlung, die die Topase abgeben, ist hauptsächlich  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Diese sind besonders gefährlich für den Menschen, da sie viel weiter in organisches Gewebe eindringt als  $\alpha$ -Strahlung, die noch nicht einmal durch die Haut dringen kann. Durch die ionisierende Wirkung der Strahlung können Elektronen in den Atomhüllen herausgeschlagen werden, wodurch positiv geladene Ionen entstehen. Die Elektronen ionisieren solange andere Atome bzw. Moleküle, bis sie eine zu niedrige Energie erreicht haben. Sobald dieser Zustand erreicht ist, werden sie aber von Atomen bzw. Molekülen absorbiert. Dadurch entstehen zusätzlich zu den positiv geladenen Ionen auch negativ geladene.

Durch diese Ionisationsvorgänge kann die DNA eines Menschen geschädigt werden. Dabei werden die in den Zellkernen vorhandenen Chromosomenstränge geteilt, wodurch DNA-Abschnitte an falsche Stellen gelangen können. Das wiederum würde eine Mutationen im Erbgut bedeuten, die sich als negative Erbschäden auf folgende Generationen auswirkt.

Auch Wassermoleküle, die den Hauptbestandteil einer menschlichen Zelle ausmachen, werden durch die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung ionisiert. Die entstehenden Ionen sind aber so instabil, dass sie zu Radikalen zerfallen. Diese Radikale bestehen zwar auch aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen, haben aber ein freies Elektron. Das kommt daher, dass ein Elektronenpaar ein Elektron durch den Compton-Effekt verloren hat (siehe Kap. III. Grundlagen/2. Qualität der  $\gamma$ -Spektren, b) Untergrundrauschen). Das entstehende  $\text{H}_2\text{O}^\bullet$ -Radikal ist deshalb sehr reaktionsfreudig und verändert so die chemische Struktur der Zellen.

Hauptsächlich aus diesen Gründen ist es möglich, dass kurze Zeit später die Strahlenkrankheit auftritt. Diese zeichnet sich besonders durch die folgenden Symptome aus: weniger Blutkörperchen, Hautrötung, Erbrechen, Durchfall und Haarausfall. Außerdem wird durch die Strahlung eine Schwächung des Immunsystems hervorgerufen, wodurch das Infektionsrisiko zunimmt. Das alles kann auch bei dauerhafter, dafür aber schwächeren Strahlenbelastung auftreten. Zusätzlich zu den oben genannten Folgen erhöht sich bei jeder Art von ionisierender Strahlung, die Wahrscheinlichkeit an Krebs zu erkranken.

Durch das Tragen eines Topases in Form von Schmuck nah am Körper wird die Gefahr zusätzlich erhöht, da eine Vielzahl von Strahlen sofort in das Gewebe eindringt, ähnlich wie für die Zählrohrbeute des Präparats auf der Halbleiterdiode in Abb. III.3 beschrieben. Dadurch treffen lokal viele  $\gamma$ -Quants mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auf Körperzellen. Durch die dadurch entstehende Ionisation können die oben beschriebenen Folgen auftreten.

## 3. Persönliche Einschätzung

Natürlich raten wir davon ab, radioaktive Topase ungesichert in der Nähe aufzubewahren oder gar am Körper zu tragen.

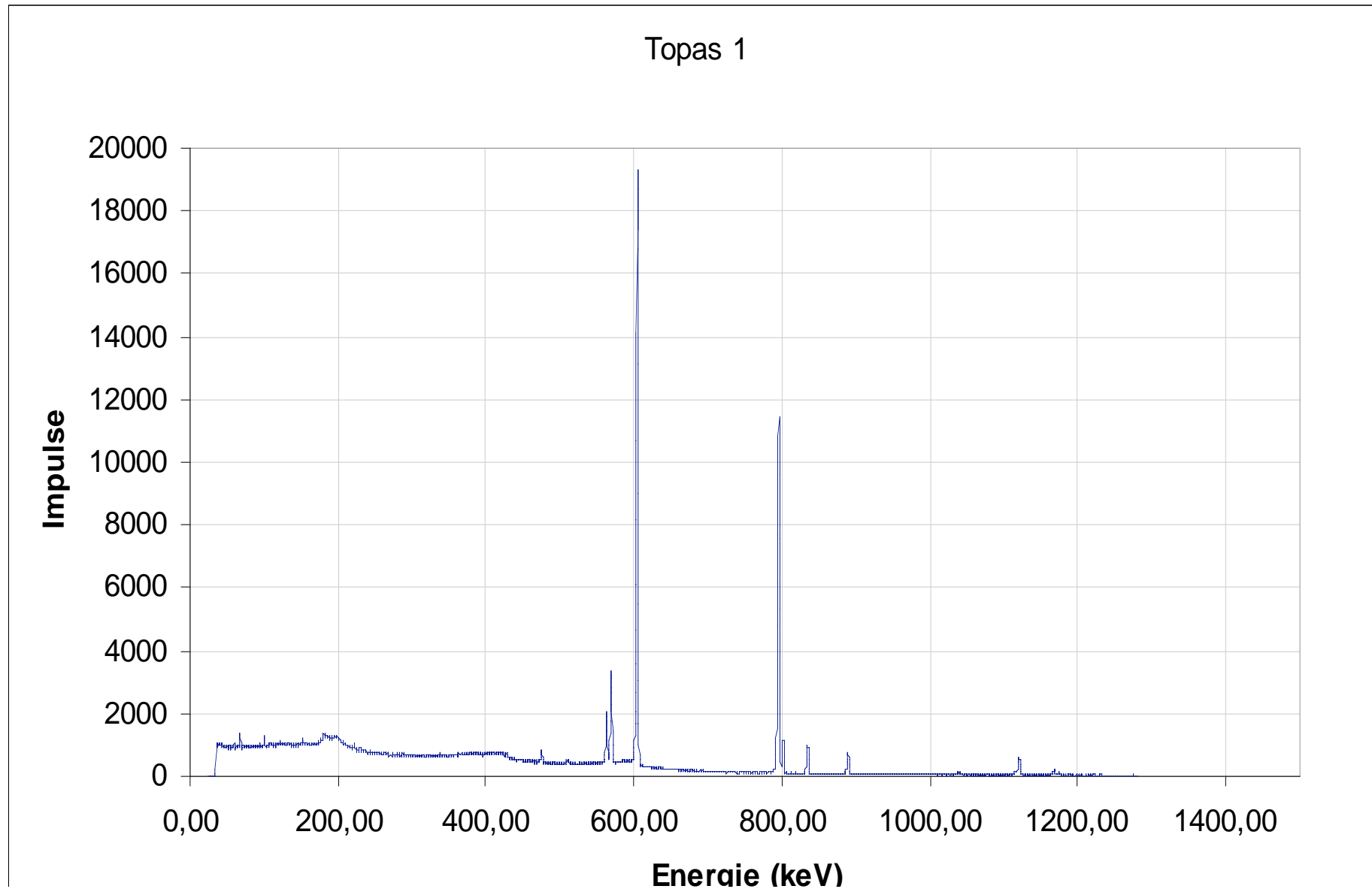
Da man radioaktive Strahlung aber nicht fühlen oder empfinden kann und man nie sicher weiß, ob und wie stark der gekaufte Stein Strahlung aussendet, empfehlen

wir, alle gekauften Steine in fachgerechten Instituten überprüfen zu lassen. Als Beispiel dafür können wir das Umweltinstitut München e.V. nennen, das anbietet, sich Gegenstände schicken zu lassen und diese auf Strahlung zu überprüfen. Vor allem bei Einkäufen aus dem Internet, bei denen man den Händler weder kennt noch ihm vertrauen kann, weil unvollständige oder sogar falsche Informationen mit enthalten sein können, muss man besonders vorsichtig sein und sollte sie zur Sicherheit überprüfen lassen. Das ist absolut notwendig, wenn man sich nicht unnötiger Strahlung aussetzen möchte, die wie oben beschreiben schwere Schäden verursachen kann.

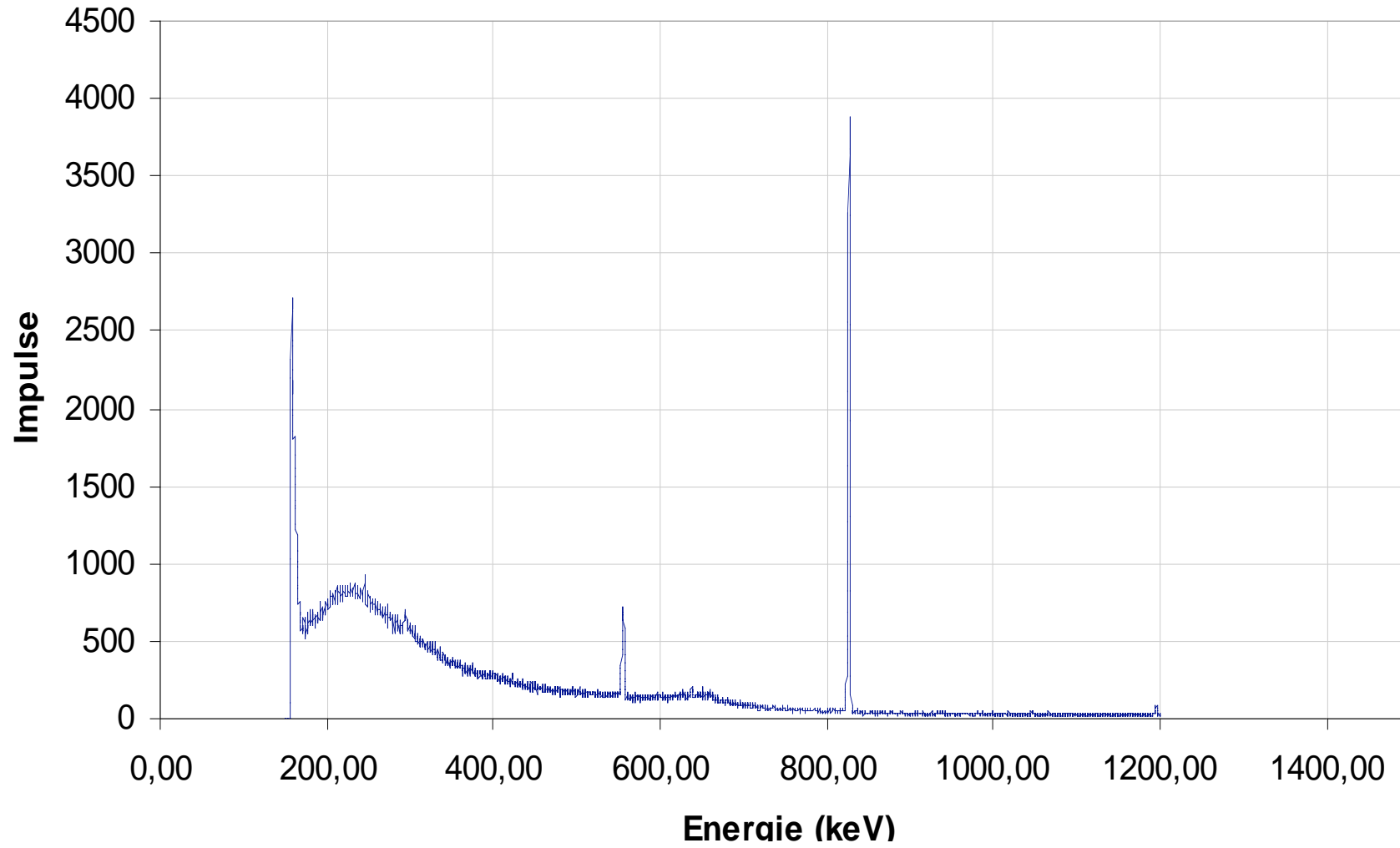
Direkt auf unsere ersteigerten Topase bezogen, schlagen wir vor, Topas 1 sofort sicher zu lagern (zum Beispiel in einem Bleikasten) und diesen für ausreichend lange Zeit abklingen lassen, bis die Reststrahlung nach den gesetzlichen Bestimmungen nicht mehr gefährlich ist. Da Topas 1 hauptsächlich durch das Nuklid Cs-134 strahlt und noch um den Faktor 4 über der gesetzlichen Freigrenze liegt, Cs-134 aber eine Halbwertszeit von 2,06 Jahren besitzt, heißt das, dass man den Stein noch mindestens 4 Jahre abklingen lassen müsste! Aber auch die Topase 4 und 12, die nur wenig strahlen und deswegen noch gesetzlich erlaubt sind, sollte man nicht unterschätzen und diese für das Wohl der eigenen Gesundheit noch einige Wochen bis Monate lang abklingen lassen. Denn jeder Körper reagiert verschieden stark auf Strahlung und nur so kann man diese Topase risikoarm tragen.



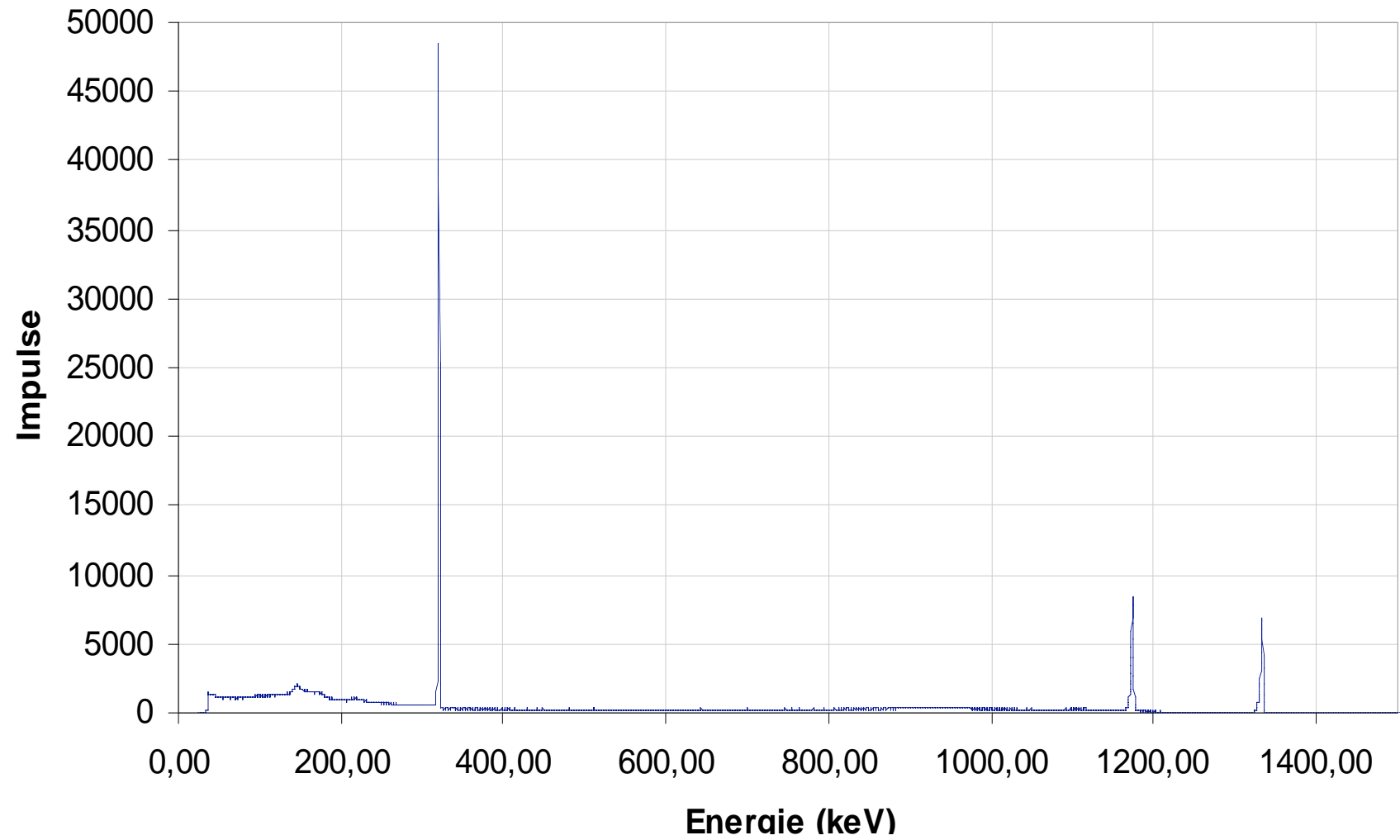
## VII. Spektren der radioaktiven Topase



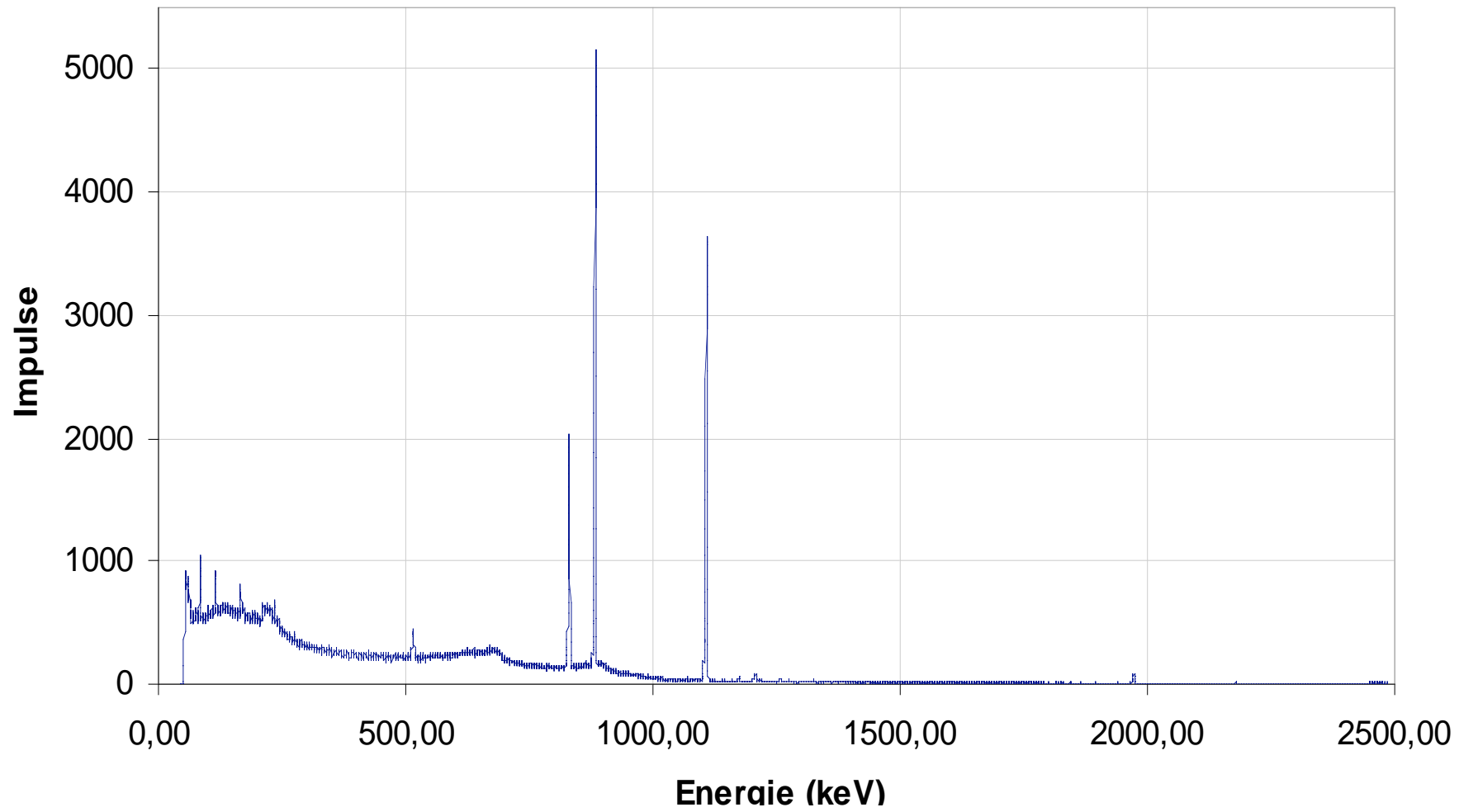
# Topas 4



### Topas 9b)



# Topas 12



## VIII. Literaturverzeichnis

### Bildquellen:

Abb. II.1: [http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif\\_bilder/Silicate/topaz.png](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif_bilder/Silicate/topaz.png)

Abb. II.2: <http://www.edelsteine.at/edelsteinbehandlungen/>

Abb. III.1: VOLKMER, MARTIN: Radioaktivität und Strahlenschutz, o.O. 2004, S. 28

Abb. III.4: TU Darmstadt

Abb. III.4: Nachwuchsförderung im Strahlenschutz - Verhältnisbestimmung von Uran 235 zu Uran 238 in Uranglas mit Hilfe eines  $\gamma$ -Spektrometers - Lars Henschke

Abb. IV.2: <http://www.kernchemie.uni-mainz.de/230.php>

### Literaturquellen:

[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/silicate\\_2\\_5.html](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/silicate_2_5.html)

*Quelle zur Entstehung/Aufbau der Topase*

<http://www.wissen-im-netz.info/mineral/lex/abc/t/topas.htm>

*Quelle zur Entstehung/Aufbau der Topase*

<http://www.naturalgems.de/topas.html>

*Quelle zur Geschichte, Verwendung, Vorkommen und den technischen Daten der Topase*

<http://www.carat-online.at/edelsteine/topase/>

*Quelle zur Topasfärbung*

<http://www.eurogem.biz/de/Edelsteinlexikon/Topas/>

*Quelle zur Geschichte, Verwendung und Vorkommen der Topase*

<http://www.steinelaedchen.de/topas.html>

*Quelle zur Geschichte, Verwendung, Vorkommen und den technischen Daten der Topase*

<http://www.carat-online.at/edelsteine-entstehung-vorkommen/>

*Quelle zur Entstehung der Topase*

<http://umweltinstitut.org/fragen--antworten/radioaktivitat/radioaktivitat-35.html>

*Quelle zur Topasfärbung*

<http://www.edelsteine.at/edelsteinbehandlungen/>

*Quelle zur Topasfärbung*

<http://www.topas-edelsteine.de/>

*Quelle zur Geschichte, Verwendung, Vorkommen, Topasfärbung und technischen Daten der Topase*

[http://www.onmeda.de/lexika/strahlenmedizin/strahlenbelastung\\_edelsteine.html](http://www.onmeda.de/lexika/strahlenmedizin/strahlenbelastung_edelsteine.html)

*Quelle zur Topasfärbung*

[http://www.beyars.com/edelstein-knigge/lexikon\\_520.html](http://www.beyars.com/edelstein-knigge/lexikon_520.html)

*Quelle zur Topasfärbung*

<http://www.cigem.ca/pdf/noomie.pdf>

*Quelle zur Topasfärbung*

<http://www.scinexx.de/dossier-detail-89-8.html>

*Quelle zur Strahlenschäden am Menschen*

**Allen Quellen wurden am 24.8.2009 das letzte Mal Informationen entnommen bzw. auf Aktualität geprüft.**

## **IX. Danksagung**

Wir bedanken uns bei dem Fachverband für Strahlenschutz e.V. für die großzügige finanzielle Förderung unseres Projekts, die uns die Beschaffung geeigneter Proben für die Messungen ermöglichte.

Ganz besonders bedanken wir uns bei unserem Betreuer Herrn Dr. K. Wannowius von der Technischen Universität Darmstadt, der uns nicht nur die Messapparatur zur Verfügung stellte und uns in die Theorie einführte, sondern uns auch tatkräftig bei den Messungen unterstützte.

Nico Fessner  
Thomas Tran  
Wolfgang Jekl