

# Strahlenschutz PRAXIS

ORGAN DES FACHVERBANDES FÜR STRAHLENSCHUTZ E.V.

Zeitschrift für den sicheren Umgang mit ionisierender und nichtionisierender Strahlung



Die große Woge -  
ihre Folgen werden uns,  
wie gerade auch in diesem  
Heft, noch lange beschäftigen

**Die große Woge von  
Kanagawa**  
Ca. 1830  
**Katsushika Hokusai**  
Japanischer Farbholzschnitt,  
25 x 37 cm  
© The Trustees of the British  
Museum  
(Mehr dazu auf S. 20)

**S. 8** Mobiles Messen im  
Normal- und im Ereignisfall

**S. 29** Strahlenspuren aus  
der Luft

**S. 34** Störfall Fukushima:  
Luft radioaktivität

**S. 43** Senkung der Exposi-  
tion des Röntgenpersonals

**S. 50** Entsorgung eines  
bestrahlten Flüssigmetall-  
targets, Teil 2

**S. 56** Messungen von Rn  
in der Bodenluft

**S. 61** Strahlungsinduzierte  
Leuchtphänomene

**S. 76** Äquivalent- und  
Organdosen: Kann mir das  
mal einer erklären?

**S. 94** Berufsbilder im  
Strahlenschutz XV

**S. 103** Der FS und Fukushima  
- Ein Rück- und Ausblick

# Strahlungsinduzierte Leuchtphänomene

## AUTOR

Robert Josef Schwankner

## KOAUTOREN

Daniel Panic  
 Jochen Schraufstetter  
 Florian Welz

## HISTORISCHE EINSTIMMUNG

„Bologna, den 20. abends ... Ich ritt nach Paderno, wo der sogenannte Bologneser Schwerspat gefunden wird, woraus man die kleinen Kuchen bereitet, welche kalziniert im Dunkeln leuchten, wenn sie vorher dem Lichte ausgesetzt gewesen, und die man hier kurz und gut Fosfori nennt.“

**J. W. v. Goethe: Italienische Reise.  
 Auch ich in Arkadien!  
 (Eintrag vom 20. Oktober 1786)**

## ZUSAMMENFASSUNG

Die breite Verfügbarkeit von Low-Light-Kameras lädt dazu ein, damit eine Reihe von physiko-chemischen Phänomenen qualitativ wie quantitativ zu studieren. Der Bogen spannt sich dabei von mechanisch, X- und entladungsstimulierter Lumineszenz zu korpuskular induzierter Radiolumineszenz. Radiumdotierte Luminophore stehen für das Studium von Radiation Damaging sowie raum-zeitliche Homogenitätsuntersuchungen ihres schwachen VIS-Signals zur Verfügung.

## SUMMARY

### Radiation Stimulated Light Phenomena

Broad availability of low-light cameras invites to revisit a series of physicochemical phenomena, both in a qualitative and quantitative way. The range spans from mechanical, X-, electrical discharge stimulated luminescence to particle induced radioluminescence. Radium-doped luminophores are available for investigation of radiation damaging, as well as homogeneity analysis of faint VIS decay signatures in time and space.

## Ein historisch-didaktischer Beitrag zur Erforschung von stimulierten Lumineszenz- und Radiolumineszenzerscheinungen mit Low-Light-Kameras

Die Verfügbarkeit von Low-Light-Kameras auf der Basis von „Electron Multiplied Charge-Coupled-Device“ (EMCCD) für die mit dem zeitraubend akkommodierten Auge gerade noch sichtbaren Lichtstärken eröffnet die Möglichkeit, eine Reihe von Leuchtphänomenen sowohl quantifizierend als auch didaktisch als S/W-Bilder aufzubereiten. Der Bogen spannt sich dabei von mechanisch, X- und entladungsstimulierter Lumineszenz zu korpuskular induzierter Radiolumineszenz. Radiumdotierte Luminophore stehen für das Studium von Radiation Damaging sowie raum-zeitliche Homogenitätsuntersuchungen ihres schwachen VIS-Signals zur Verfügung.

### Low-light-Kameras

Soweit nicht anders erwähnt, kommt im Folgenden die EMCCD-Technologie mit aktiver (Peltier-)Kühlung zum Einsatz. In der hier angewandten Frame-Interline-Technik findet eine Übergabe der mit hoher Quanteneffizienz (VIS: 20–50 %) ausgelösten Elektronen an ein abgedunkeltes Transportregister statt, sodass schon während des Transports ein neues Bild aufgezeichnet werden kann. Dem Speicherregister ist ein seriellles Ausleseregister nachgeschaltet. Die erste Hälfte desselben ist baugleich mit einem CCD-Chip, die zweite Hälfte besteht aus 400 Ladungsvervielfacherstufen, womit eine Verstärkung bis zum Faktor 2.000 erreichbar ist. Der hier beispielhaft verwendete Kameratyp (Andor Luca S DL-658M) wurde speziell für

Low-Light-Anwendungen mit maximaler Unterdrückung aller Rauschquellen entwickelt (z. B. Chip-Kühlung auf  $T = 250$  K). Die Ausgangsdaten werden digital an das Rechnersystem übergeben. Der Sensorbereich des Chips (EMCCD-Chip TC247SPDB-0, TI) verfügt über 500 Zeilen mit 680 Pixeln, wobei je 20 Pixel als Dunkelreferenz reserviert sind. Der experimentelle Einsatz des vorgenannten Aufzeichnungssystems wurde zunächst an Tribolumineszenzstudien von Kandiszucker [1, 2] in Haushaltsmixern erprobt (Abb. 1). Wohlbefriedigend sind auch Resultate zur Demonstration des Čerenkov-Effekts unter Verwendung von Betapräparaten moderater Quellstärken.

Wie Abbildung 2 ausweist, ist bereits ein entsprechender Leuchteffekt vor

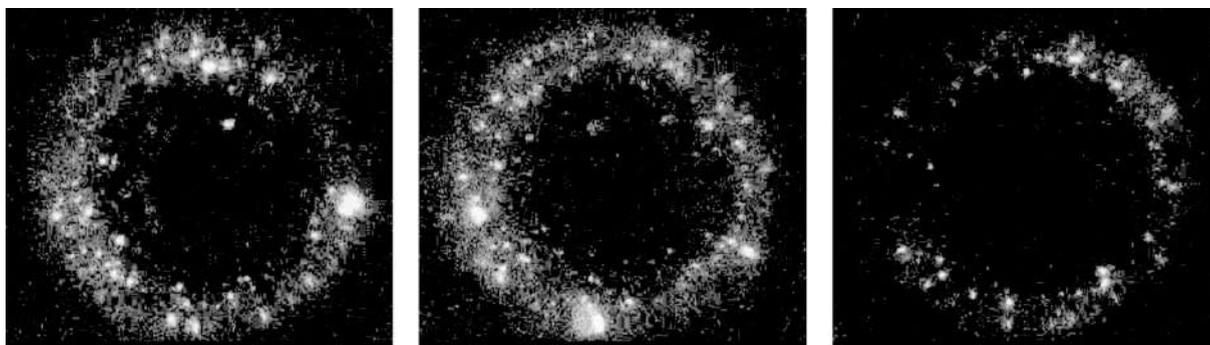


Abb. 1: Tribolumineszenz von braunen Kandiszuckerstücken (Südzucker) im Haushaltsmixer (Tefal, SEB GmbH, Offenbach/Main, MUH 70 H Series, Motorstufe 2, U = 18.000 rpm, Luca-S-Belichtungszeit = 0,032 s, EM-Level = 255)

dem Eintauchen (rund 0,5 cm über der Wasseroberfläche) dokumentiert und dann im untergetauchten Zustand rundum gut sichtbar. Auch durch Annäherung der Quelle an die Wandung des leeren Becherglases ist der lozierte Čerenkov-Effekt so ausgezeichnet aufzeichnenbar. Im Folgen-

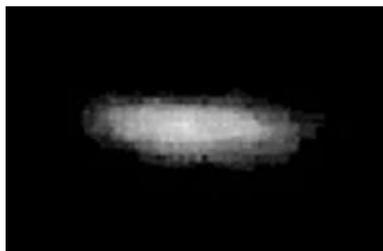


Abb. 2: Čerenkov-Effekt unter Verwendung einer  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -Strontiumquelle moderater Quellstärke (400 MBq; Luca-S-Belichtungszeit = 0,416 s, EM-Level 255); von oben nach unten: Quelle positioniert über Deionat-Oberfläche, eingetaucht in Deionat, aufgepresst auf der Innenwand eines leeren Becherglases (Jenaer Glas)

den soll weiteren bedeutsamen Leuchteffekten mit dieser Technik nachgegangen werden.

### Inspektion von stimulierten Uranyllumineszenzen

Die intensive, UV-stimulierte Uranyllumineszenz war nicht nur Untersuchungsgegenstand von Antoine Henri Becquerel (1852–1908), sondern insbesondere auch seines Vaters Alexandre Edmond (1820–1891). Sie begründet, in Ergänzung der Farbkraft seiner (nicht-stöchiometrischen) Oxidstufen, die breite Anwendung von  $Z = {}^{92}\text{Uran}$  in Form der Uranspezies Uranylkatation in Glasmatrices.

### Wechselwirkungen von $\text{Hg}^*$ und $\text{UO}_2^{2+}$

Ein herausragendes Objekt zur Demonstration von Reibungselektrizität und ihren Folgeerscheinungen findet sich im Fundus der höheren Lehranstalten des frühen 20. Jahrhunderts. Die „Schüttelröhre“, mit integriertem Reibungskörper aus Uranglas (Abb. 3 a), stimuliert bei Gasentladungsdruck die Uranyllumineszenz ebenso über den Pfad UV-Emission angeregter Quecksilberatome wie via reibungsevozierter stiller elektrischer Entladung. Die Demonstration eines solchen Objektes in großen Auditorien erfordert langwierige Akkommodation des Auges, weshalb Low-Light-Kamera-Videoclips an dessen Stelle treten können (Abb. 3 b, c).

### X-Stimulation

Die nicht triviale, verschränkte reizvolle Entdeckungsgeschichte der Rönt-

genstrahlung und Radioaktivität ist gekennzeichnet durch das seinerzeit noch ungenügende Verständnis von Kathoden- und Uranyllumineszenz. Nach den Entdeckungen W. C. Röntgens im Dezember 1895 und den ersten Berichten von A. H. Becquerel zu seinen autoradiografischen Beobachtungen (vermeintliche Hyperphosphoreszenz) im Frühjahr 1896 gibt bereits am zweiten April A. Hutchinson vom mineralogischen Museum Cambridge (Abb. 4) erste erfolgreiche X-Stimulation von sekundären Uranmineralen, Uranglas und Uranylverbindungen bekannt. Das resultierende schwache VIS-Signal lässt sich bei Uranglasknöpfen (Abb. 5 a) und dem Uranglimmer Autunit (Abb. 5 b) mit Low-Light-Kameratechnik komfortabel verifizieren.

In der Folge der Verbreitung der Röntgen'schen Entdeckung wurde die X-Stimulation von uranhaltigen Anorganika alsbald auch in den Merck'schen Kanon der „Präparate für Röntgenversuche“ aufgenommen (Abb. 6).

### Radioluminophore – revisited

Erste Beschreibungen von Phosphoren gehen zurück auf Japan während der Sung-Dynastie (976–998 n. Chr.). Hier kamen mit Schwefel geglühte zermahlene Austernschalen zum Einsatz, die für nachleuchtende Gemälde verwendet wurden. Ihre berichtete Blaulumineszenz rührt wohl vom Wismutgehalt des Muschelkalks her [4].

Der erste Europäer, der einen Lumineszenzpräparat, ist der Bologneser

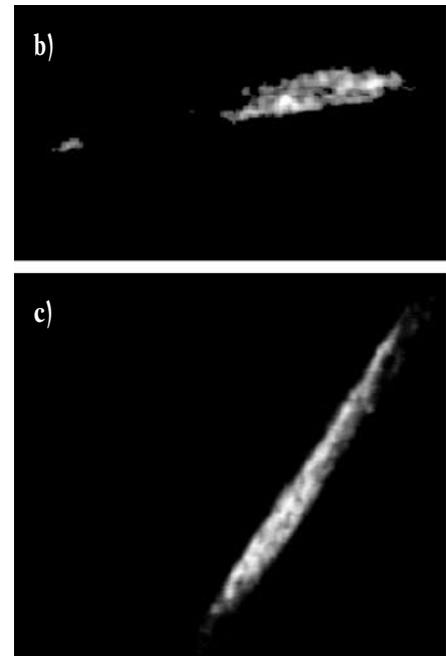


Abb. 3: a) Schüttelröhre mit integriertem Uranglasreibungskörper, derselbe radiometrisch und per UVA-Beleuchtung loziert (Lehrmittelkatalog ohne Zeitangabe, Drucklegung Berlin 1901-05); b) oben und c) unten: Schüttelröhre in Gebrauch: stimulierte Uranyl-lumineszenz (Luca-S-Belichtungszeit = 0,1 s, EM-Level = 100) [3]

Schuhmacher Vincentius Cascariolo. Er glühte um 1600 Schwerspat mit Kohle und erfand mit dem resultierenden Bariumsulfid den „Bologneser Leuchtstein“, auch „Bononischer Phosphor“ genannt.

#### Von der Sidot'schen Blende zum Radioluminophor

Den ersten Zinksulfid-Phosphor stellte 1866 der Franzose T. Sidot durch Sublimation von kupferhaltiger Zinkblende dar [5].

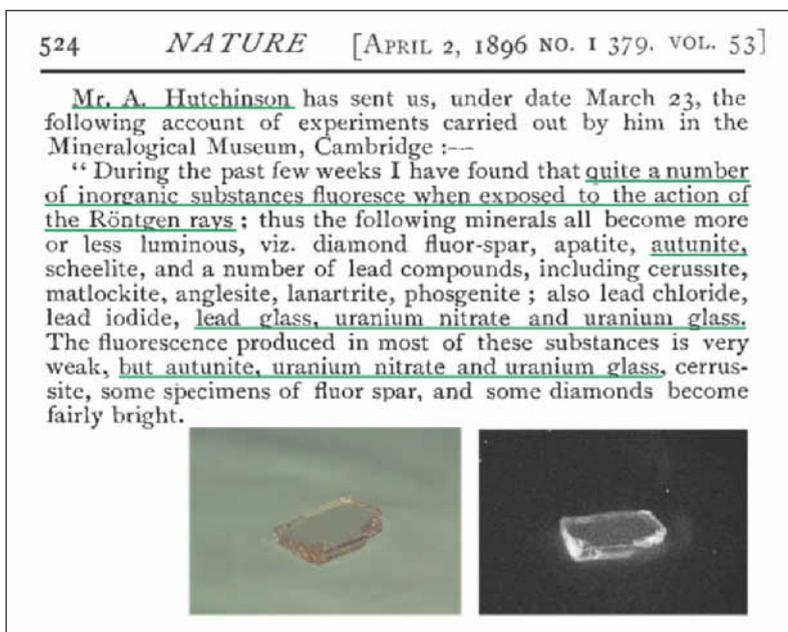


Abb. 4: Erster dokumentierter Hinweis auf X-Stimulation von Uranylumineszenz (vgl. dazu insbesondere Abb. 5, 6); das in dieser Veröffentlichung prominent erwähnte Bleiglas erweist sich in der Tat auch als schwach röntgenlumineszent (W-Anode, UA = 200 kV, IA = 20 mA; Luca-S-Belichtungszeit = 0,077 s, EM-Level = 228).



Abb. 5a: X-Stimulation von Uranylumineszenz in Uranglasproben (Jaco, Standard Glas Colours, Jablonex, I. Musterkarte mit 140 Glasknöpfen aus Gablonzer Stangenglas; verwendet 1918/38). Von links nach rechts: Normal-, UVA-Licht, X-Exposition (W-Anode, UA = 200 kV, IA = 20 mA; Luca-S-Belichtungszeit = 0,077 s, EM-Level = 228)

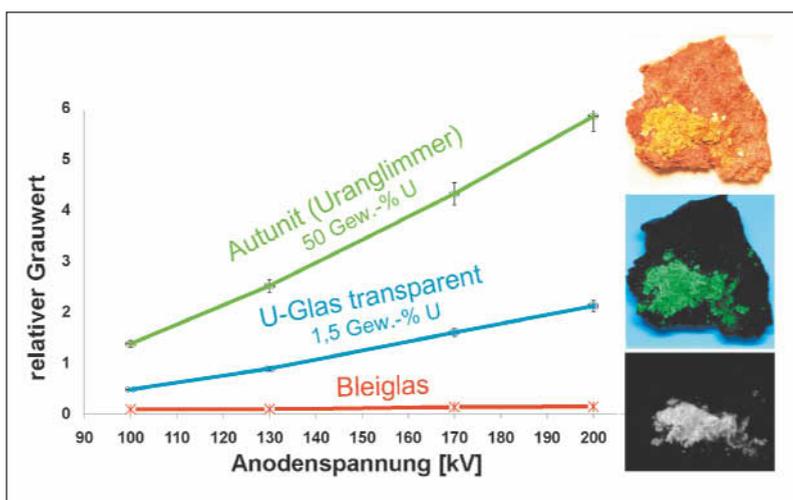


Abb. 5b: X-Stimulation von Blei-, Uranglas- und Autunit ( $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )-Probe. Rechts von oben nach unten: Normal-, UVA-Licht, X-Exposition des Belegstücks Uranglimmer (W-Anode, UA = 100 kV, IA = 20 mA; Luca-S-Belichtungszeit = 0,04 s, EM-Level = 190)

Schrittweise klärte sich, dass der hochreine II/VI-Halbleiter Zinksulfid nur zur UV-Fluoreszenz geeignet ist, während seine Dotierung ( $\sim 10^{-4}$  mit Cu bzw. Ag) die Phosphoreszenzfähigkeit eröffnet (Abb. 7). Friedrich Giesel (1852–1927 [7]), Extraktionschemiker der Buchler'schen Chininfabrik, stellte Zinksulfid für die Beschichtung der Braun'schen Röhre dar, wobei die gelobte hohe Qualität ihm reproduzierbar nur unter Verwendung einer Kupferschale als Präpariergefäß (!!) möglich war. Ein permanentes Leuchten von  $\text{ZnS}(\text{Cu})$  wurde von ihm u. a. durch Beimengung von Radiumsulfat erreicht, so begann ab 1905 Arthur Junghans mit Versuchen, Zifferblätter (Abb. 8) und Zeiger von Taschenuhren mit selbstleuchtender Farbe auszustat-

ten. Ab 1909 erschienen „nachtleuchtende Uhren“ im Handel [7]. Der erste Weltkrieg bedeutete einen zusätzlichen Schub für die in Gang kommende kommerzielle Radium-Leuchtfarbenproduktion bzgl. Skalen und Armaturenbeleuchtungen, wenngleich schon früh beklagt wurde: „Eine Wiedergewinnung des Ra ist dabei leider ganz ausgeschlossen, da die winzigen Mengen, welche sich auf Leuchtuhren u. ä. finden, niemals an eine Zentrale zurückströmen und ihre Verarbeitung auch kaum nutzbringend sein dürfte.“ [8]. Leider, zunächst zu lange unbemerkt, wurde hier die Grundlage gelegt für die bedenkenlose Inkorporation von Radium- und Thoriumisotopen in Gewerbe und Industrie, was zu zahlreichen Opfern unter

den Zifferblattmalerinnen führte, deren Folgen bis zu den restriktiven Vorschriften im Umgang mit offenen Alphaaktivitäten auf uns wirken (Abb. 9) [9, 10].

Die anfänglich großen Hoffnungen (Abb. 10), die in eine breite Anwendung von Radioluminophoren gesetzt wurden, fanden jedoch unter ökonomischen Betrachtungen ein rasches Ende. So stellt G. Berndt 1920 den Aufwand zur Realisierung einer vorgegebenen Beleuchtungsstärke wie folgt dar: „Zur Erzielung von 1 HK (Hefnerkerze) braucht man  $10^4$  g Leuchtfarbe mit 0,1 mg Ra/g Zinksulfid, also 1 g Ra zum Preise von 600.000 M. (Friedenspreis)“.

Unter Berücksichtigung einer moderaten Alterung der Leuchtfarbe belaufen sich so die jährlichen Unkosten auf mindestens 100.000 M./HK.

„Bedenkt man nun, dass eine gute Metallfadenlampe 1 Watt/HK braucht, so würden die jährlichen Stromkosten ... 3,50 M./HK betragen. Nun ist die mittlere Brenndauer einer Lampe etwa 500 Stunden, sodass man im Jahre 17,5 Lampen zu 2,50 = 43,75 braucht; zusammen würden also die jährlichen Beleuchtungskosten 50 M./HK betragen. Es kann somit die Radiumbeleuchtung nur da in Frage kommen, wo ihre Vorteile so groß sind, dass diesen gegenüber die Kosten keine Rolle spielen ...“ [8].

Weiterhin führt der Autor dazu aus: „Soviel bekannt, ist dieses Verfahren nur an einer Stelle einmal ausgeführt



Abb. 6: Merck-Liste Darmstadt um 1900 (Firmenarchiv E. Merck AG); X-Exposition (W-Anode, UA = 80 kV, IA = 20 mA); von oben nach unten: Uranylnitrat Hexahydrat in einer geöffneten Petrischale (Ø = 80 mm) in Normal-, UVA-Licht, Luca-S-Belichtungszeit = 0,018 s, EM-Level = 1)

worden: Die Radium-Heil-Gesellschaft hat die Wände des Kellerraumes, in welchem die Säcke mit der Joachimsthaler Pechblende liegen, mit Zinksulfid austreichen lassen, das unter der Wirkung der von dieser abgegebenen Em(ana)tion und ihrer Zerfallsprodukte für das dunkel adaptierte Auge genügend leuchtet, um die Umrisse von Personen und Gegenständen erkennen zu können.“

### Zeitliche und räumliche Stochastik des radioaktiven Zerfalls – Vom Spinthariskop zu Leuchtziffern

Die nahezu zeitgleich im Frühjahr 1903 von Julius Elster (1854–1920), Hans Geitel (1855–1923), Friedrich Giesel (1852–1927 [7]) und Sir William Crookes (1832–1919) assemblierten ersten Szintillationsdetektoren für Alphastrahlung unter Verwendung von Mikroskopen mäßiger Vergrößerung (u. a. Entwicklung des Spinthariskops/

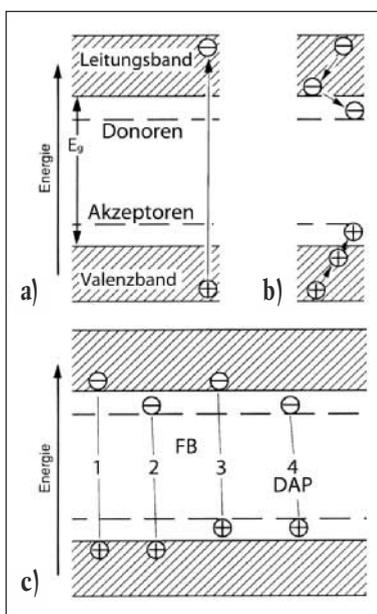


Abb. 7: Zum Mechanismus der radiogen bzw. korpuskular stimulierten Festkörperlumineszenz von ZnS(Cu)  $E_g = 3,7 \text{ eV}$ : a) Bildung von Elektron-Loch-Paaren; b) Relaxation und Fixierung angeregter Elektronen (Löcher) zum unteren (oberen) Ende des Leitungsbandes (Valenzbandes); c) häufige radiative Rekombinationsprozesse: Free-to-bound (FB) und Donor-Akzeptor-Paarübergang [6]

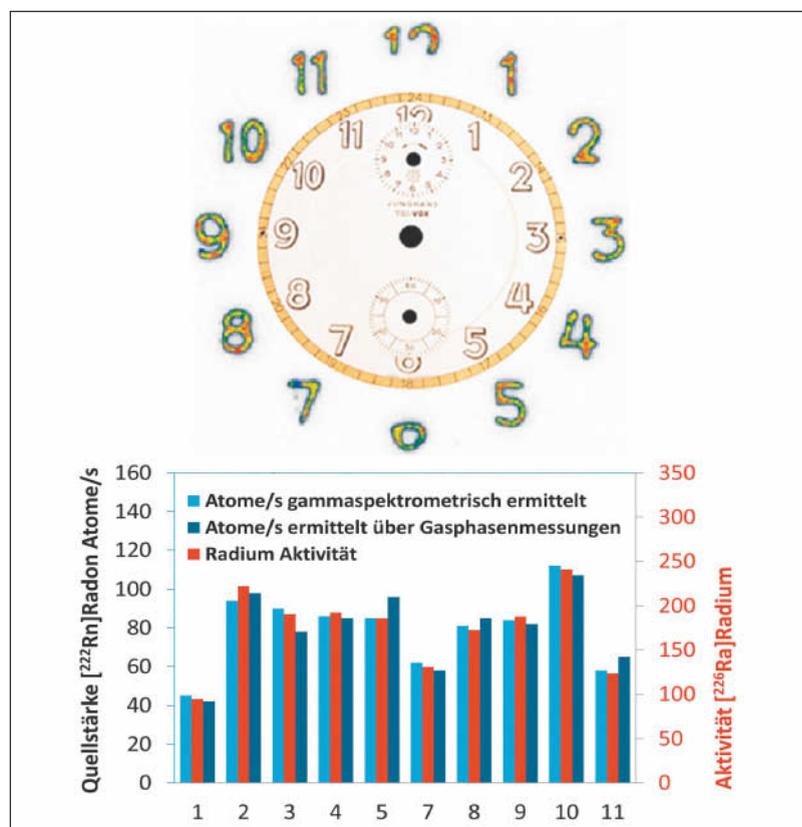


Abb. 8: Digitale Autoradiografie (MWPC/MICAD) eines radiolumineszenten Weckerziffernblattes [3] sowie radiometrischer Charakterisierung ausgewählter Einzelziffern

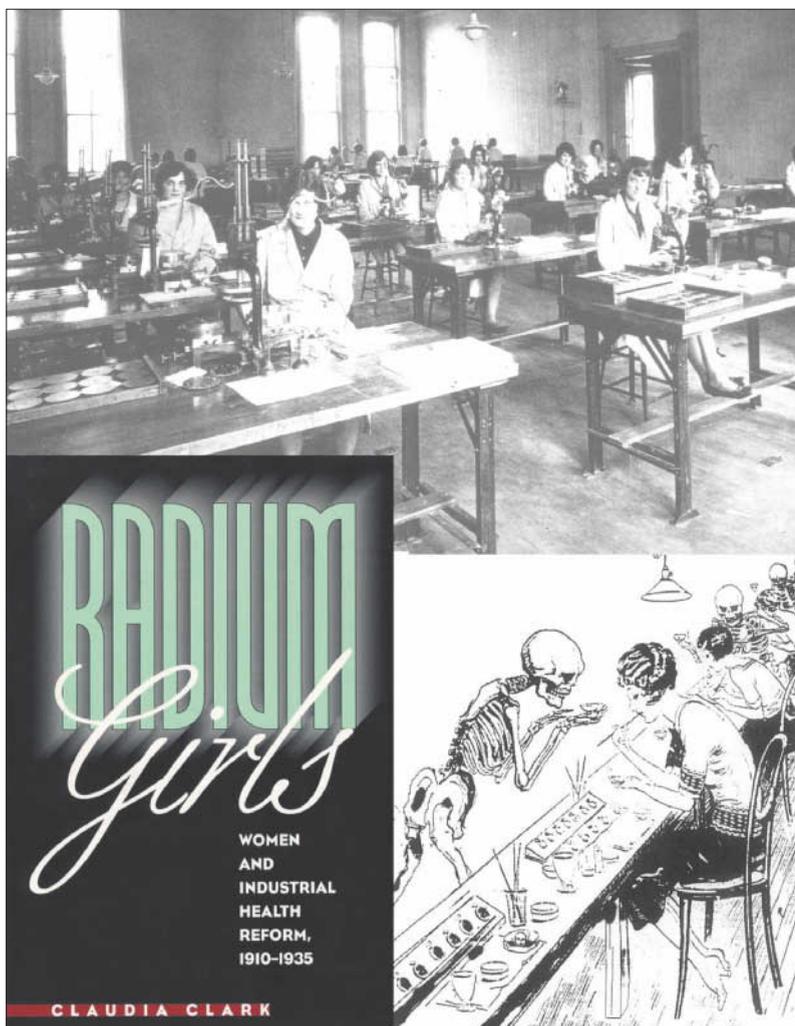


Abb. 9: Radiuminkorporation als frühes Problem gewerblicher Strahlenhygiene [8-10]



Abb. 10: Radioluminophore fanden ab den 1920er-Jahren breite Verwendung [8, 12].

Szintilloskops [11]) begründeten zahlreiche Forschungsaktivitäten, die sich mit diesen distinkten Lichtblitzen auseinandersetzten. Die Dauer Letzterer wurde durch räumliches „Auseinanderziehen“ wie folgt von R. W. Wood abgeschätzt [13]: „The rim of a wooden disk mounted on the shaft of a small electric motor was coated with zinc sulfide, and a speck of radium supported above it on a needle-point. The bombarded surface was viewed in a dark room with a small lense. The flashes remain sharp even when the motor was running at a pretty good rate but on further increasing the speed they became less distinct being drawn out into short streaks. It was pretty definitely determined the duration of the flash was somewhere between 1/15.000 and 1/20.000 of a second.“ The Svedberg (1884–1971) kategorisiert dabei 1912 derartige Phänomene wie folgt: „Vom atomistischen Standpunkt aus gesehen, können alle Erscheinungen, die auf den Wirkungen von Atomen und Molekülen beruhen, in multimolekulare und paucimolekulare eingeteilt werden. Zur ersten Klasse gehören solche Erscheinungen, bei denen eine große Menge von Atomen und Molekülen wirksam sind; die Erscheinungen der zweiten Klasse sind dadurch gekennzeichnet, dass bei ihnen die Tätigkeit von nur wenigen Atomen und Molekülen zum Vorschein kommt ... Diejenigen Erscheinungen, welche wir als paucimolekulare interpretieren, sind insofern für die Atomistik von ganz besonderem Interesse, weil sie uns einen direkten Einblick in den inneren Bau der Materie gewähren“ [14]. Hierbei zählt Svedberg neben den jüngst entdeckten Phänomenen der Radioaktivität und Radiometrie insbesondere die Brown'sche Molekularbewegung (1827) zu den Paucimolekularen. Betrachtet man so mit E. Rutherford (1871–1937) und H. Geiger (1882–1945) den Ausschnitt eines in der Fläche radiumdotierten ZnS(Cu)-Leuchtschirms (1910

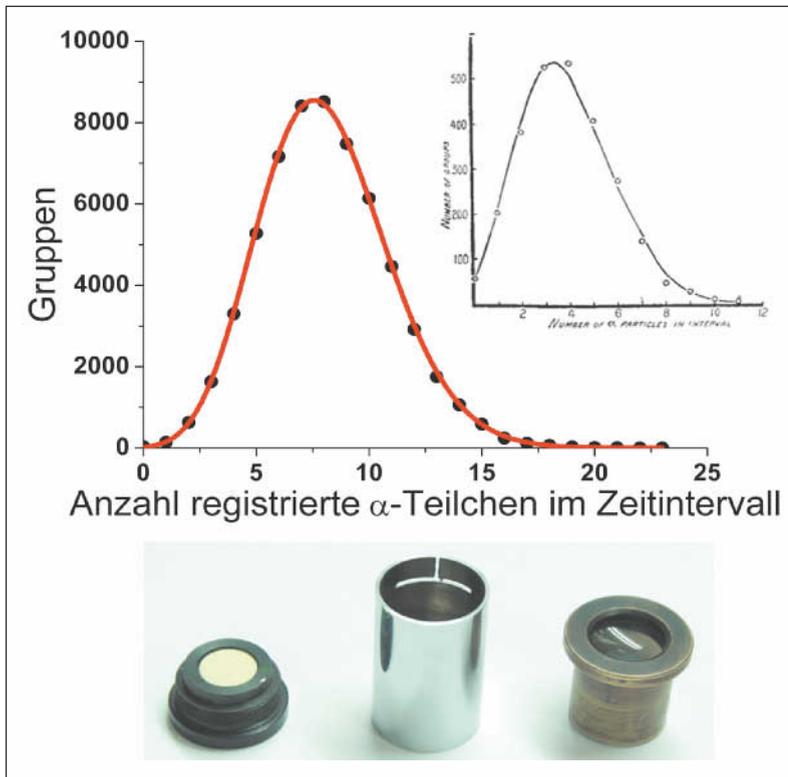


Abb. 11: Analyse der zeitlichen Stochastik des radioaktiven Zerfalls studiert am in der Fläche  $^{226}\text{Ra}$ -dotierten Leuchtschirm (links:  $\varnothing = 9 \text{ mm}$ ;  $A = 1,3 \text{ kBq}$ ;  $\text{OFDL} = 0,15 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ) eines Spinthariskops (150.000 Einzelbilder, Luca-S-Belichtungszeit =  $0,0176 \text{ s}$ , EM-Level = 175); „Gruppe“ indiziert die Häufigkeit einer fixierten Anzahl von Szintillationen im gewählten Zeitintervall doppelte Belichtungszeit.

[15]), so stellt man in gegebenen kurzen Zeitintervallen (Minutenbruchteilen) große Fluktuationen in der Szintillationsaktivität fest.

„These variations are especially noticeable when only a few scintillations appear in a minute. For example during a considerable interval it may happen

that no  $\alpha$  particle appears; then follows a group of  $\alpha$  particles in rapid succession; then an occasional  $\alpha$  particle, and so on ... The scintillations were recorded on an chronograph tape by closing an electric circuit by hand at the instant of each scintillation. Time-marks are intervals of one half-

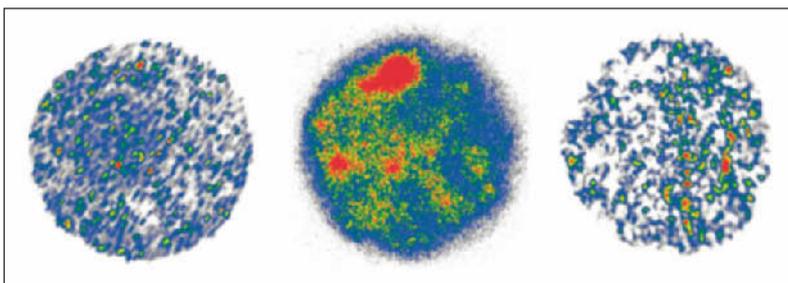


Abb. 12: Dokumentation von Radiation Damaging im Leuchtschirm eines jahrzehntelang genutzten Spinthariskops (vgl. Abb. 11): von links nach rechts: integrierte VIS-Aktivität des Leuchtschirms  $t = 44 \text{ min}$  (150.000 Bilder, Luca-S-Belichtungszeit =  $0,0176 \text{ s}$ , EM-Level = 175),  $^{226}\text{Ra}$ -Aktivitätsverteilung (Phosphor-Imaging PMI, Bio-Rad) und UVA-stimulierte Phosphoreszenz des Leuchtschirms; die Bereiche erhöhter Radiumflächenaktivität korrespondieren offensichtlich nicht mit erhöhter VIS- bzw. Phosphoreszenzaktivität des ZnS(Cu)-Schirms: lokale Zerstörung der Lumineszenzfähigkeit der Leuchtmasse (vgl. Text).

minute and were also automatically recorded on the same tape ... It was found possible to count 2,000 scintillations a day ...“ Wie in Abbildung 11 wiedergegeben, führt die quantitative zeitaufgelöste Low-Light-Analyse eines Spinthariskopschirms zur Bestätigung der Poisson-Verteilung, wie von Rutherford et al. [15] angegeben. Inspiziert man dabei unter Anwendung bildgebender Verfahren (Abb. 12) in flächenhafter Gegenüberstellung Radiumdotierung, integrierte szintillatorische VIS-Aktivität und UV-stimulierbare Phosphoreszenz, so fallen Korrelationen ins Auge: Die Bereiche relativ hoher Radiumflächenaktivitäten zeigen nur bedingt erhöhte szintillatorische Aktivität und treten auch nicht nach UV-Anregung phosphoreszenzaktiv hervor. Da das verwendete ZnS(Cu)-Spinthariskop vor über 50 Jahren gefertigt wurde, geht man wohl nicht fehl in der Annahme, hierin einen Beleg für Alphadesintegration des Festkörper-Luminophors zu sehen [4, 16].

Experimentell reizvoll ist es zudem, per Direktaufzeichnung der szintillatorischen Aktivität [17] bzw. via gespeicherter Zeitserie mithilfe des Auswählens von Untersuchungsregionen (Referenzflächen gleichen Inhalts) die Flächenhomogenität derselben zu studieren. In Abb. 13 promeniert hier die Kreuzungsregion des Leuchtfarbenauftrags einer Junghans-Weckerziffer „4“ im integrierten VIS- und im Flächenaktivitätssignal der Radiumdotierung [3].

### Licht im Auslösezählrohr

So sehr seit 1903 die Sidotblende als Festkörperdetektor für Korpuskularstrahlung erfolgreich herangezogen wurde, war jedoch die visuelle Auszählung der Signale anstrengend, ermüdend und mit dem Beobachter als integralem Bestandteil des Experimentes mit subjektivem Fehler behaftet. Es nimmt so nicht Wunder, dass einer der „hauptleidtragenden“ Mitarbeiter der

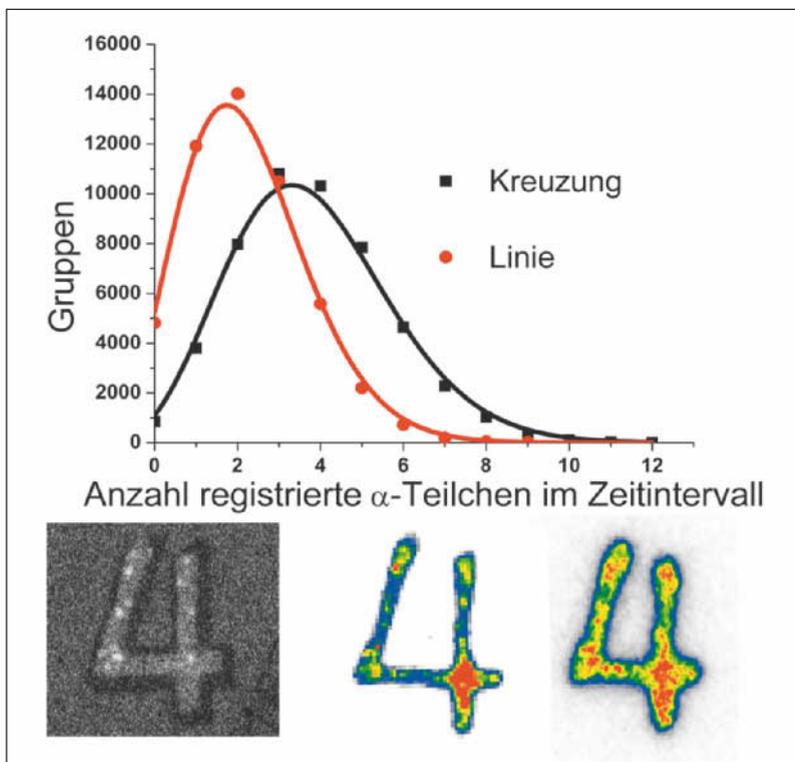


Abb. 13: Analyse der raum-zeitlichen Stochastik einer Radioluminophor-Ziffer „4“ (vgl. Abb. 8; Luca-S-Belichtungszeit = 0,032 s, EM-Level = 125) mit zwei markierten flächengleichen ROIs: Kreuzungs- und Stichauftrag der Leuchtmasse (oben); von links nach rechts: Einzelbild, integrierte VIS-Aktivität der Leuchtziffer  $t = 53$  min (100.000 Einzelbilder) und Radiumaktivität (Phosphor-Imaging PMI, Bio-Rad, Expositionszeit 120 min); „Gruppe“ indiziert die Häufigkeit einer fixierten Anzahl von Szintillationen im gewählten Zeitintervall doppelte Belichtungszeit.

Rutherford'schen Schule, Hans Geiger (1882–1945), nach objektiven, elektrischen Zählmethoden sann: Geiger'scher

Spitzenzähler (1913), Geiger-Müller-Zählrohr (1928, Abb. 14), welches nach dem 2. Weltkrieg weite Verbreitung mit



Abb. 14: Elektrische Zählmethoden erlebten mit dem Auslösezählrohr eine weite Verbreitung (1958 [18, 19]) vom Selbstbau- zum Volks-Geigerzähler.

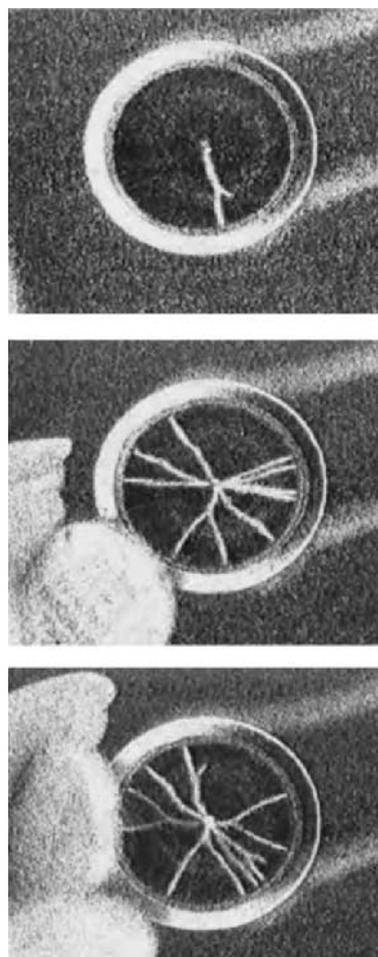


Abb. 15a: VIS-Signal, aufgezeichnet durch Glimmerfenster eines Geiger-Müller-Zählrohrs mit angenähertem  $^{204}\text{Tl}$ -Präparat ( $A = 3 \times 10^5$  Bq, Aufnahmen: Gerolf Lieckfeld, München)

dem Selbstbau- [18] und nicht zuletzt dem Volks-Geigerzähler fand [19]. Das Rekombinationsleuchten eines derartigen Auslösezählrohrs ist durch dessen Glimmerfenster (ggf. nach vorheriger schonender Entfernung des Graphitbelags) der Beobachtung zugänglich. Abb. 15a dokumentiert durch Betastrahlung ausgelöstes „Rekombinationsgewitter“. Die Zählrate sowie die Gasentladungslumineszenz zeigen, bei simultaner Aufzeichnung, weitgehend übereinstimmendes (Sättigungs-)Verhalten (Abb. 15b).

### Schlussbemerkung und Dank

Wir hoffen aufgezeigt zu haben, dass die Anwendung von Low-Light-Kameras einerseits erfolgreich bei an-

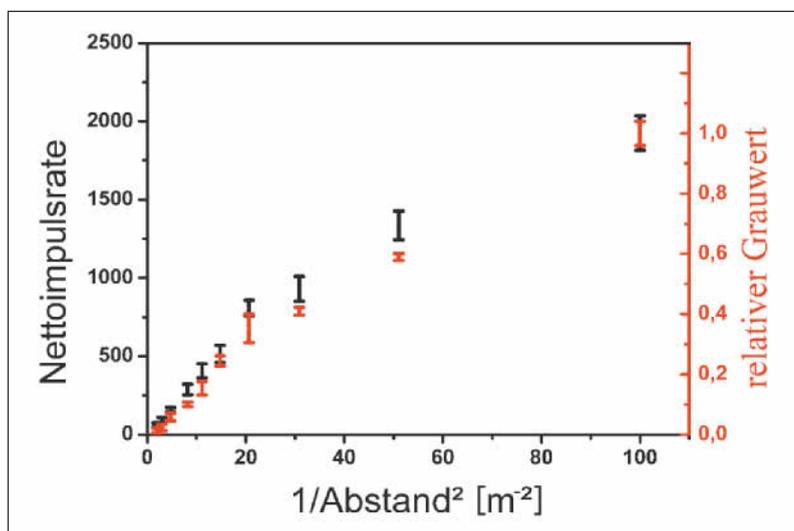


Abb. 15b: Abstandsabhängigkeit (10–72 cm) der Nettoimpulsrate (Mittelwert aus  $5 \times 2$  min) und Lumineszenzintensität (Luca-S-Belichtungszeit = 0,1 s, EM-Level = 125) eines Auslösezählrohrs (Frieske & Hoepfner FHZ 15) unter Verwendung eines  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -Präparats ( $A = 200$  kBq)

wendungsbezogenen Untersuchungen schwacher Lichtphänomene eingesetzt werden kann und andererseits gute Dienste bei der didaktischen und wissenschaftshistorischen Behandlung von stimulierten Lumineszenzphänomenen leistet. Zur Dokumentation der weiteren Entwicklung sei auf die fortgesetzten, abrufbaren Filmsequenzen von „RadiolabMunich“ auf der Onlineplattform YouTube hingewiesen. Der Dank der Autoren gilt für Hilfe in Rat und Tat: J. Dorner, C. J. Green, D. Laubert, K. Heinzel, G. Patzer und A. Saupe. ■

#### STICHWORTE

Low-light-cameras, solid-state Scintillators, tribo-X-, discharge-, particle-stimulated luminescence

#### LITERATUR

- [1] Tschugaeff, L.: Über Tribolumineszenz. Chem. Berichte 34, 1901, S. 1820–1825.
- [2] Curie, Maurice: Luminescence des corps solides. Paris 1934.
- [3] Patzer, G.: Radiolumineszenz. Diplomarbeit HM Fachgebiet: Radiometrie, München 2010.
- [4] Rupp, H.: Die Leuchtmassen und ihre Verwendung. Berlin 1937.
- [5] Sidot, T.: Recherches sur la cristallisation de quelques sulfures métalliques. Comptes Rendus, 62, 1866, S. 999–1001.

- [6] Schwankner, R. J.; Eiswirth, M.; Venghaus, H.: Luminescent Processes Elucidated by Simple Experiments on ZnS. In: Journal of Chemical Education, 58, 1981, S. 806–809.
- [7] Fricke, R. G. A.: Friedrich Oskar Giesel, Pionier der Radioaktivitätsforschung, Opfer seiner Wissenschaft. Wolfenbüttel 2001.
- [8] Berndt, G.: Radioaktive Leuchtfarben. Braunschweig 1920.
- [9] Clark, C.: Radium Girls – Women and Industrial Health Reform 1910–1935. Chapel Hill/London 1997.
- [10] Mays, C. W.: Alpha-Particle-Induced Cancer in Humans. In: Health Physics 55, 4/1988, S. 637–652.
- [11] Schwankner, R. J., et al.: Desintegration von Einzelatomen im Blick: Das Spintaroskop. In: StrahlenschutzPRAXIS 3/2003, S. 43–49.
- [12] Braunbeck, J.: Der strahlende Doppeladler. Nukleares aus Österreich-Ungarn. Graz 1996.
- [13] Wood, R. W.: The Scintillations produced by Radium. In: Philosophical Magazine Series 6, 10, 58, 1905, S. 427–430.
- [14] Svedberg, T.: Die Existenz der Moleküle. Leipzig 1912.
- [15] Rutherford, E.; Geiger, H.; Bateman, H.: The probability variations in the distribution of  $\alpha$  particles. In: Philosophical Magazine Series 6, 20, 118, 1910, S. 698–707.
- [16] Riehl, N.: Über die Stabilität des Lenardschen Leuchtzentrums bei Zinksulfid. In: Annalen der Physik, 416, 1935, S. 536–542.

- [17] Schwankner, R. J.: Zur Radiometrie und Radiochemie natürlicher Radioelemente. In: Glöckner, W.; Jansen, W.; Weissenhorn, R. G. (Hrsg.): Handbuch der Experimentellen Chemie Bd. 3/II. Köln/Hallbergmoos 2011, S. 321–357.
- [18] Richter, H.: Atomstrahlen, Geigerzähler. Stuttgart 1958.
- [19] Abele, J.: Wachhund des Atomzeitalters. Geigerzähler in der Geschichte des Strahlenschutzes. München 2002.

#### AUTOR



#### Robert Josef Schwankner

Prof. Dr. Robert Josef Schwankner, Dipl.-Chem., Hochschule München (HM), Fachgebiet Umweltchemie – Radioökologie, war nach der Diplomarbeit in Neutronenaktivierungsanalytik (FRM) und Dissertation in Katalyse- und Oberflächenchemie bei Gerhard Ertl (Chemie-Nobelpreis 2007) zunächst als Konservator Leiter der Abteilung Chemie des Deutschen Museums und Referent für Strahlenschutz im Bayerischen Umweltministerium. Seit 1977 beschäftigt er sich mit fachwissenschaftlichen und auch didaktischen Arbeiten auf dem Grenzgebiet von angewandter Chemie, Radioaktivität und Geschichte der Naturwissenschaften.

#### KOAUTOREN

##### Daniel Panic

Studium der Versorgungs- und Gebäudetechnik an der HM, BSc. 2010, seitdem Geschäftsführer PSP-Elektroanlagen, München

##### Jochen Schraufstetter

Studium der Physikalischen Technik an der HM, 2010 Diplom, Laborbetriebsleiter Radionuklidlaborbereiche HM

##### Florian Welz

Studium der Physikalischen Technik an der HM, 2010 Diplom, seitdem Bereich Entwicklung, Saphymo GmbH, FFM

#### ANSCHRIFT FÜR ALLE AUTOREN

Prof. Dr. R. J. Schwankner  
Hochschule München – Radiometrisches Seminar  
Karlstraße 6  
D-80333 München  
Tel./Fax: ++49/89/12 65 26 08  
E-Mail: robertjosefchwankner@web.de, schraufs@hm.edu