

Aus dem Institut für Nuklearmedizin
(Direktor: Prof. Dr. med. E. Henze)
im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

**Ein neuer Ansatz zur Verifizierung angelieferter Radioaktivität zur
Radiojodtherapie.
Ein Beitrag zur Reduktion der Strahlenexposition des Personals.**

Inauguraldissertation
zur
Erlangung der Würde eines Doktors der Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Thea Imme

aus Kiel

Kiel 2010

1. Berichtstatter: Prof. Dr. Henze _____
2. Berichtstatter: Priv.-Doz. Dr. Galalae _____
Tag der mündlichen Prüfung: 30.08.2010 _____
Zum Druck genehmigt, Kiel, 30.08.2010 _____
den 30.08.2010 _____
gez. _____

INHALTSVERZEICHNIS:

1.	EINLEITUNG	4
1.1.	Einführung in die Problematik	4
1.2.	Biologische Strahlenwirkung	5
1.3.	Dosisbegriffe und Dosisseinheiten	6
1.4.	Strahlenschutzgrundsätze und Grenzwerte ionisierender Strahlung.....	8
1.5.	Schlussfolgerung und Fragestellung	9
2.	MATERIAL UND METHODE	10
2.1.	MATERIAL	10
2.1.1.	Jod-131-Therapiekapseln und Transportbleiabschirmungen	10
2.1.2.	Strahlenmessgeräte	12
a)	Aktivimeter.....	12
b)	Bohrlochmessplatz	13
c)	Uptake-Messsonde	14
2.2.	METHODE	15
2.2.1.	Ortsdosisleistung	15
2.2.2.	an den Geräten.....	18
2.2.3.	Regressionsgerade	21
2.2.3.1	mathematische Nomenklatur und die Messunsicherheit der Steigung k.....	22
2.2.4.	Verfahrensfehler	24
2.2.4.1.	Messunsicherheit bei der Impulsrate (Ordinate)	25
2.2.4.2.	Messunsicherheit beim Aktivitätsmessgerät (Abszisse).....	27
2.2.4.3.	Finalfehler	28
3.	ERGEBNISSE.....	28
3.1.	Ortsdosisleistung	28
3.2.	Verfahrensfehler	29
3.2.1.	Regressionsgerade und Messunsicherheit der Steigung $k = \mu(k)$	29
3.2.2.	Behälterfehler	30
3.2.3.	Finalfehler = $\mu_{rel}(A)$	32
3.2.3.1.	Evaluierung der Messergebnisse	32
4.	DISKUSSION	34
4.1.	Material und Methode	34
4.2.	Ergebnisse	37
4.2.1.	Ortsdosisleistung	37
4.2.2.	Verfahrensfehler	37
4.2.2.1.	Messunsicherheit der Steigung k , $\mu(k)$, und des rel. Fehlers von k , $\mu_{rel}(k)$	37
4.2.2.2.	Behälterfehler	38
4.2.2.3.	Finalfehler.....	38
4.2.2.4.	Evaluierung.....	38
5.	SCHLUSSFOLGERUNG	42
6.	ZUSAMMENFASSUNG	43
7.	SUMMARY	45
8.	LITERATURVERZEICHNIS	46
9.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	48
10.	DANKSAGUNG.....	50
11.	LEBENS LAUF	51
12.	ANHÄNGE	52

TITEL

Ein neuer Ansatz zur Verifizierung angelieferter Radioaktivität zur
Radiojodtherapie.

Ein Beitrag zur Reduktion der Strahlenexposition des Personals.

1. EINLEITUNG

1.1. Einführung in die Problematik

Die Radiojodtherapie ist seit ihrer ersten Anwendung im Jahre 1942 zu einer risikoarmen und bewährten Behandlungsmethode der Schilddrüse bei Hyperthyreose sowie bei benignen und malignen Schilddrüsenerkrankungen geworden. Es handelt sich um eine medizinische Strahlenbehandlung mit einem radioaktiven Jodisotop, dem Iod-131. Da Schilddrüsenparenchym eine selektive Affinität zu Jod besitzt, wird das Nuklid des Jods oral in Form einer Kapsel appliziert und es reichert sich nach einer gewissen Zeit im Schilddrüsengewebe und in jodspeichernden Metastasen an. Iod-131 ist ein Betastrahler mit nachfolgender Gammastrahlung. Die Reichweite der Betastrahlung im Gewebe beträgt nur wenige Millimeter, sodass bei der Radiojodtherapie sehr gezielt unter weitgehender Schonung des umgebenden gesunden Gewebes eine intensive lokale Bestrahlung des Schilddrüsenparenchyms mit einer hohen Energiedosis erfolgt.

Die erforderliche Menge des radioaktiven Jods wird abhängig von der gewünschten Herddosis aus der Höhe der maximalen thyroidalen Iod-131-Aufnahme, der effektiven Halbwertszeit und dem Volumen des zu bestrahlenden Schilddrüsenparenchyms für jeden Patienten mittels eines Radiojodtests individuell ermittelt. Auch während und nach einer Behandlung mit radioaktivem Jod muss die Strahlung kontrolliert werden (Grigsby, Siegel, Baker, Eichling, 2000).

Während die Radiojodtherapie für den Patienten eine bewährte und risikoarme Behandlungsmethode darstellt, birgt der Umgang der gesetzlich vorgeschriebenen Messungen der Therapiekapseln für das Klinikpersonal gewisse Gefahren, schließlich beträgt die Ortsdosisleistung pro GBq in 10 cm Entfernung 46,4 $\mu\text{Sv/s}$. Ein Abstand von 10 cm entspricht bei der Messung der Entfernung zwischen Hand und Therapiekapsel bei der Verwendung einer üblichen 20 cm langen Pinzette.

Um die Ortsdosisleistung für einen Strahlenexponierten so gering wie möglich zu halten, gelten für diesen im Umgang mit radioaktiven Stoffen die drei heiligen „A“s (Schröder, 2004): Aufenthaltsdauer, Abstand, Abschirmung. Während die Aufenthaltsdauer so gering wie möglich gehalten werden sollte, muss der Abstand möglichst groß sein. Es gilt hierfür die Gesetzmäßigkeit, dass die Dosisleistung umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ist (Kiefer, 2003). Des Weiteren spielt auch die Abschirmung eine entscheidende Rolle für den Schutz des Strahlenexponierten.

In Deutschland ist vor jeder Radiojodtherapie eine individuelle Aktivitätsermittlung der zu applizierenden Iod-131-Kapsel gesetzlich vorgeschrieben. Da das hierfür erforderliche Herausnehmen der Therapiekapseln aus den Transportbleiabschirmungen mit einer Ortsdosisleistung von $46,4 \mu\text{Sv}$ pro GBq in einer Sekunde ohne Abschirmung in 10 cm Entfernung eine extrem hohe Strahlenexposition für das Personal bedeutet, stellt sich die Frage, ob es eine Möglichkeit gibt, für die Aktivitätsermittlung eine Messmethode zu entwickeln, bei der die radioaktiven Kapseln in ihren Bleiabschirmungen belassen werden können.

Nimmt man an, dass die Expositionszeit der Hände bei einer Aktivitätsmessung 10 Sekunden dauert, so ergibt sich in einer Klinik mit einer durchschnittlichen Radiojodtherapie mit fünf Patienten pro Woche (durchschnittlich 250 Patienten pro Jahr) und einer durchschnittlichen Therapieaktivität von 2000 MBq pro Patient für eine Person, die diese Therapiekapseln messen muss, eine Äquivalentdosis der Hände von 232 mSv pro Jahr. Laut Gesetz sind jedoch höchstens $150 \mu\text{Sv}$ pro Jahr erlaubt (www.umwelt-online.de).

1.2. Biologische Strahlenwirkung

Der Begriff Strahlung bedeutet allgemein die räumliche Ausbreitung von Energie (Schröder, 2005). Strahlung kann erhebliche Auswirkungen auf biologische Systeme, insbesondere auf Zellen und Zellkerne, haben. Die Wirkung einer energiereichen Strahlung ist von der Dosis, der Art und der Intensität abhängig sowie von der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Strahlenenergie im Körper (Elsner, 2003). Eine Strahlenwirkung ist definiert als die biologische Veränderung durch die Aufnahme von Energie durch ionisierende Strahlung (Schröder, 2005). Grundsätzlich kann eine Strahlenwirkung an einem biologisch wichtigen Zielmo-

lekül direkt oder indirekt erfolgen. Die direkte Strahlenwirkung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Absorption der Energie im betroffenen Molekül selbst erfolgt und zu einer Schädigung führt. Bei der indirekten Strahlenwirkung werden Zwischenstufen durchlaufen. Zunächst entstehen Radikale, welche eine Kaskade auslösen und sekundär eine Schädigung nach sich ziehen. Die Energieabsorption und der Auslöser der biologischen Wirkung erfolgt in verschiedenen Molekülen. Der zeitliche Verlauf der Strahlenwirkung ist gekennzeichnet durch vier Stadien:

1. physikalisches Stadium
2. physikalisch-chemisches Stadium
3. chemisches Stadium
4. biologisches Stadium

(Schröder, 2005)

In dem biologischen Stadium der Strahlenwirkung, das noch Jahre nach der Strahlenexposition auftreten kann, kommt es zur Absorption eines Teils der Strahlungsenergie im Gewebe. Die daraus resultierende Ionisation führt zur Radikalbildung und somit zu molekularen Veränderungen. Diese Veränderungen haben eine Funktionsstörung der Zelle zur Folge, die in ihrer physiologischen Auswirkungen hat oder zu einer Mutation führen kann. Aus genetischer Sicht betrachtet, bedeutet eine Mutation die Gefahr einer Erbkrankheit, somatisch gesehen führt sie im schlimmsten Fall zum Krebs. Sowohl eine Änderung der physiologischen Funktion der Zelle als auch eine Krebserkrankung können den Zelltod bis hin zum Tod des Organismus bewirken (www.strahlenschutzverband.at).

Spätestens nach dieser Betrachtung sollte sich jeder über die Bedeutung von Strahlung auf den Organismus und die möglichen fatalen gesundheitlichen Folgen bewusst sein und auf eine größtmögliche Vermeidung einer Exposition ionisierender Strahlung achten.

1.3. Dosisbegriffe und Doseinheiten

Ionendosis (J) gibt die in der Luft gebildeten Ionenpaare pro Masseinheit an, wenn Röntgen- oder Gamma-Strahlen absorbiert werden. Sie ist der Quotient aus der elektrischen Ladung, die durch ionisierende

Strahlung in einem Volumenelement Gas erzeugt wird, und der Masse dieses Volumenelementes:

$J = Q/m = \text{gebildete Ladungsmenge} / \text{Masse des Volumenelements}$

SI-Einheit: 1 C/kg C = Coulomb

Energiedosis (D) ist die absorbierte Energie.
 Einheit Energie: Joule (J)
 Einheit Masse : kg
 $D = E/m = \text{absorbierte Energie/Masse des Volumenelements}$
 SI-Einheit: 1 Gray (Gy)

Kerma stellt die gesamte übertragene Energie innerhalb eines Volumens dar. Hierbei werden auch Sekundärelektronen betrachtet, die das Volumen verlassen.

Körperdosis ist der Sammelbegriff für Organdosis H_T und effektive Dosis E.

Äquivalentdosis (H) ist das Produkt aus der Energiedosis und dem Bewertungsfaktor.
 SI-Einheit: 1 Sievert (Sv)

Personendosis ist gleichbedeutend mit der Äquivalentdosis für Weichteilgewebe. Sie wird zum Beispiel mit einer Filmplakette oder Stabdosisimeter an einer repräsentativen Stelle der Körperoberfläche gemessen und dient als Maß für die Exposition einer einzelnen Person durch externe Strahlung.

Ortsdosis bedeutet die Äquivalentdosis an einem Punkt eines Strahlenfeldes.

Dosisleistung bezieht sich auf die Strahlenwirkung pro bestimmter Zeiteinheit.

effektive Dosis (E) ist die Summe aller Einzeläquivalentdosen der Organe (H_T) multipliziert mit den jeweiligen organspezifischen Wichtungsfaktoren w_T .

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Hierbei wurde berücksichtigt, dass verschiedene Gewebe unterschiedlich strahlenempfindlich sind. Die Wichtungsfaktoren sind in Anlage 3 der Röntgenverordnung (RöV) bzw. in Anlage VI Teil C Nr. 2 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegt.

(Elsner, 2003)

Aktivität bedeutet die Anzahl der Kernzerfälle eines Radionuklids pro Sekunde.

SI-Einheit: Becquerel (Bq)

1.4. Strahlenschutzgrundsätze und Grenzwerte ionisierender Strahlung

Die Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe wird in Deutschland geregelt durch die „Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz“, kurz Strahlenschutzverordnung (StrlSchV).

Die Grundsätze des Strahlenschutzes sind in §§ 4-6 (StrlSchV) manifestiert:

- **Rechtfertigung und Notwendigkeit**
 - liegt eine notwendige oder zweckmäßige Indikation vor?
 - sind alle Alternativen ausgeschöpft?

- **Optimierung**
 - die Strahlenexpositionen müssen so gering wie möglich gehalten werden, auch geringste Dosen können Schäden bewirken

➤ Grenzwerte

- die Strahlenexposition aus Quellen nuklearmedizinischer Diagnostik beziehungsweise Therapie soll für den Einzelnen bestimmte Dosisgrenzen nicht überschreiten
- der Dosisgrenzwert für Einzelpersonen aus der Bevölkerung beträgt eine effektive Dosis von 1 mSv/a
- der Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen umfasst eine effektive Dosis von 100 mSv über einen Zeitraum von fünf aufeinander folgenden Jahren, wobei 50 mSv für ein einziges Jahr nicht überschritten werden darf
- zudem gibt es Grenzwerte für die Dosis einzelner Organe (§ 55 Abs. 2, StrlSchV)

(Schicha, 2003).

Die Umgebung einer Strahlenquelle wird in drei Bereiche unterteilt. Man unterscheidet zwischen dem Überwachungsbereich, dem Kontrollbereich und dem Sperrbereich (§ 36, StrlSchV). Während der Grenzwert der effektiven Dosis im Überwachungsbereich mehr als 1 mSv pro Kalenderjahr beträgt, liegt die effektive Dosis im Kontrollbereich bei mehr als 6 mSv pro Kalenderjahr. Der Sperrbereich ist durch die sehr hohe effektive Dosis von mehr als 3 mSv pro Stunde gekennzeichnet. Zugangsberechtigt sind in allen drei Bereichen jeweils nur die Personen, die in der StrlSchV benannt sind (Kiefer, 2003; Schröder, 2005).

1.5. Schlussfolgerung und Fragestellung

Im Zuge der Radiojodtherapie bildet die orale Darreichungsform in Form einer Kapsel eine Alternative zu der intravenösen Applikation des Iod-131. Da bei der bisherigen Durchführung der Aktivitätsmessung eine erhebliche Strahlenexposition für das Personal entsteht, ist es das Ziel der vorliegenden Untersuchung, eine Senkung der Strahlenexposition zu erzielen. Hierfür wurde eine alternative Messmethode der Therapieaktivität entwickelt, bei der die radioaktiven Therapiekapseln in den Transportbleiabschirmungen belassen werden können, die Therapieaktivität jedoch trotzdem hinreichend genau bestimmt werden kann.

2. MATERIAL UND METHODE

2.1. MATERIAL

2.1.1. Jod-131-Therapiekapseln und Transportbleiabschirmungen

Gemessen wurden Iod-131-Therapiekapseln der Firma „Tyco healthcare“ in zwei Größen der Transportbleiabschirmungen. Größe I ist für Therapiekapseln mit einer Aktivität zwischen 370 und 1665 MBq und Größe II zwischen 1665 und 7400 MBq. Jede Kapsel wurde in fünf Abschirmbehältern gemessen.

Jede Abschirmung wurde an Ober- und Unterteil markiert und benannt. Größe I erhielt ein „K“, Größe II ein „G“. Bei den fünf Behältern wurde jeweils eine Abschirmung als Standard deklariert („GS“ und „KS“), die übrigen vier wurden durchnummeriert („G1“, „G2“, „G3“, „G4“, „K1“, „K2“, „K3“, „K4“). Mit den Abschirmbehältern „GS“ und „KS“ wurden die Messungen an allen elf Messtagen durchgeführt. Die übrigen, durchnummerierten Transportbleiabschirmungen dienten der Evaluierung der neuen Messmethode. Die Messungen hierfür fanden an 3 Messtagen statt, einmal zu Beginn, einmal in der Mitte und einmal am Ende der Messreihe. Dabei handelte es sich um den Messtag 1, 5 und 11.

Das Modell der Transportbleiabschirmungen in Größe II hat einen Durchmesser von 6,9 cm und ist 8,9 cm hoch. Das Unterteil nimmt davon 2,6 cm und das Oberteil 6,3 cm ein. Im Durchschnitt wiegt diese Bleiabschirmung 2248,75 g. In Größe I beträgt der Durchmesser 4,3 cm und die Höhe 7,6 cm, wovon das Unterteil 2,5 cm und das Oberteil 5,1 cm einnimmt. Das Durchschnittsgewicht beträgt bei diesem Typ 624,0 g. Über den blauen Kunststoffüberzug der Transportbleiabschirmungen läuft auch der Verschlussmechanismus zwischen Ober- und Unterteil des Modells. Es ist ein Gewinde eingearbeitet. Die Therapiekapsel befindet sich in einem Plastikröhrchen im Inneren von Ober- und Unterteil, welches ebenfalls mit einem Schnapp-Mechanismus zu entnehmen wäre, jedoch nicht eigens mit einem Gewinde versehen ist.

Die Bleikontur der Transportabschirmungen wurde im Vergleich zum Vorgängermodell reduziert und hat durch die Kunststoffverblendung ihren Röhrenschnitt bekommen.

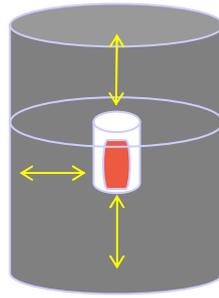


Abbildung 1: Skizze der Kapsel innerhalb der Abschirmung

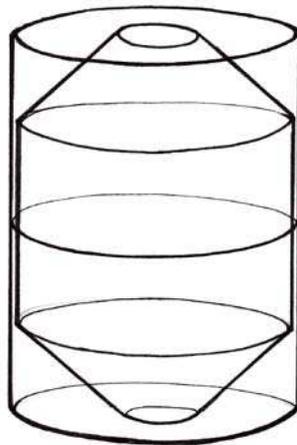


Abbildung 2: Skizze der Transportbleiabschirmung

Bleibehälter	Aktivitätsbereich [MBq]
Typ I $\varnothing = 43 \text{ mm}$ $h = 76 \text{ mm}$	370 - 1665
Typ II $\varnothing = 69 \text{ mm}$ $h = 89 \text{ mm}$	1665 - 7400

Abbildung 3: Daten der Transportbleiabschirmung

2.1.2. Strahlungsmessgeräte

Für die Messungen waren drei Messgeräte notwendig: ein Aktivimeter (Modell Curiementor 2 der Firma PTW, Freiburg, Deutschland), ein Bohrlochmessplatz (Modell Multi-Logger LB 5310 der Firma Berthold, Berthold Technologies, 75323 Bad Wildbach, Deutschland) und eine Uptake-Messsonde (Modell Atomlab 950 der Firma Biodex Medical Systems, Baltimore, USA). Demnach wurde jede Kapsel entsprechend ihrer Aktivität in fünf verschiedenen Transportbleiabschirmungen der Größe I oder II an drei Geräten gemessen.

a) Aktivimeter

Aktivimeter dienen zur vereinfachten, direkten Messung der Aktivität, zum Beispiel vor der Patientenapplikation. In der Regel wird hierfür eine Schachtionisationskammer eingesetzt. Sie besteht aus einem zylindrischen, gasgefüllten Behälter, in welchem die koaxial angeordnete Anode in Form eines Hohlzylinders ausgebildet und die Kathode wie Zwiebelschalen darum herum angeordnet ist. Zwischen Anode und Kathode befindet sich Gas (Schröder, 2005).

Sobald Gammastrahlung in die Ionisationskammer eintritt, kommt es zu einer Wechselwirkung mit dem Gas. Es wird ionisiert. Da zwischen Anode und Kathode Hochspannung besteht, erreichen die aus der Elektronenhülle herausgelösten Elektronen die Sammelanode und es fließt ein elektrischer Strom. Die gemessene Stromstärke ist zu der Ionendosisleistung proportional.

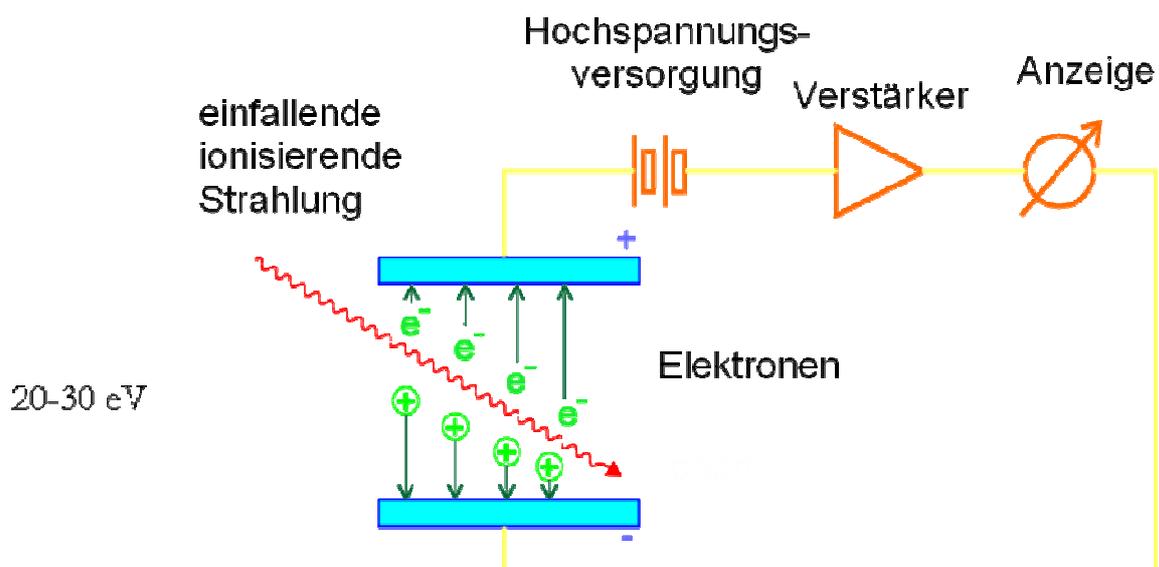


Abbildung 4: Prinzip einer Ionisationskammer

b) Bohrlochmessplatz

Für die Messung der Aktivitätskonzentration in einer Probe, wie zum Beispiel Blut oder Serum, empfiehlt sich der Bohrlochmessplatz. Es handelt sich hierbei um ein Messsystem mit einem Natrium-Jodid-Detektor, der von einer dicken Bleiabschirmung umgeben ist. In dem Natrium-Jodid-Kristall ist koaxial eine zylindrische Bohrung eingebracht, in die die Probe gestellt wird. Somit wird sie nahezu vollständig vom Detektormaterial umgeben und kann folglich mit hoher Empfindlichkeit gemessen werden (Schröder, 2005).

In der nuklearmedizinischen Messtechnik werden überwiegend NaI-Detektoren eingesetzt, da sie eine hohe Nachweiswahrscheinlichkeit für Gammastrahlung besitzen. Fällt ein Gamma-Quant in den Kristall ein, reagiert es mit den Atomen des Natrium-Jodids (NaI) durch Comptoneffekt, Photoeffekt und Paarbildung. Es entstehen hochenergetische Elektronen, die sich lawinenartig zu niederenergetischen Elektronen vermehren. Diese regen das im NaI-Kristall eingelagerte, als Aktivator dienende Thallium an und es entstehen Lichtblitze. Die Größe dieser Lichtblitze ist proportional zu der absorbierten Strahlenenergie. Das Licht wird von einem unter dem NaI-Kristall befindlichen Photo-Sekundär-Elektronen-Vervielfacher (PSEV oder auch Multiplier) gemessen und die in dem PSEV durch das Lumineszenzlicht ausgelösten Photoelektronen in einer Kaskade von elektromagnetischem Feld und Sekundäremission an Dynoden auf ein Vielfaches vergrößert. Daraus resultiert letztendlich ein Stromimpuls, der zu der Stärke des Lichtblitzes proportional ist (Kiefer, 2003).

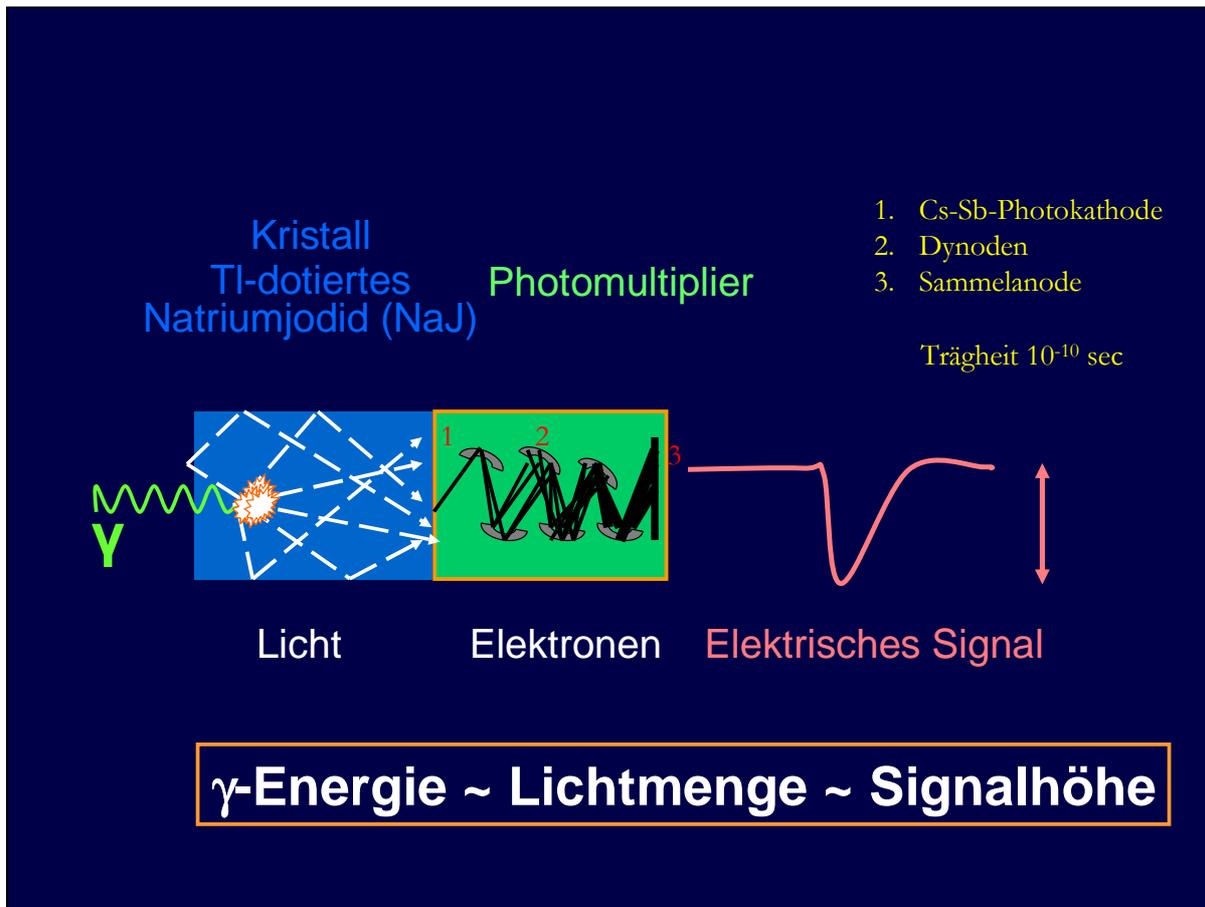


Abbildung 5: Prinzip der Erzeugung eines Stromimpuls'

c) Uptake-Messsonde

Die Messung an einer Uptake-Messsonde dient bei der Radiojodtherapie zur Bestimmung des Anteils des zuvor applizierten radioaktiven Iod-131, das nach einer definierten Zeit in der Schilddrüse des Patienten gespeichert ist (www.awmf-online.de).

Der Detektor dieses Gerätes ist wie bei dem Bohrlochlochmessplatz ein Natrium-Jodid-Kristall. Bei allen Messungen muss der Abstand zwischen Patienten und Detektor, der mindestens 25 cm betragen muss, identisch sein. Ein fixierbarer Abstandshalter, ebenso wie eine ausreichende Abschirmung des Gerätes und die Ausstattung mit einem Kollimator, der über dem Hals des Patienten eine die gesamte Schilddrüse überdeckende Fläche erfassen sollte, sind grundlegende Voraussetzungen.

Für unsere Messungen wurde keine zusätzliche Bleiabschirmung im Gerät montiert, wie es bei der Patientenuntersuchung üblich ist, um bei diesen die effektive intratherapeutische Herddosisbestimmung durchführen zu können.

2.2. METHODE

2.2.1. Ortsdosisleistung

In Deutschland ist vor jeder Radiojodtherapie eine individuelle Aktivitätsermittlung der zu applizierenden Iod-131-Kapsel gesetzlich vorgeschrieben. Das hierfür erforderliche Herausnehmen der Therapiekapseln aus den Transportbleiabschirmungen bedeutet eine extrem hohe Strahlenexposition für das Personal.

Eine Ortsdosis bedeutet die frei in der Luft gemessene Dosis Strahlung mit der Bedeutung einer Äquivalentdosis für ein kleines Volumenelement weichen Gewebes frei in Luft. Die Ortsdosisleistung ist die Ortsdosis pro bestimmte Zeiteinheit.

Die Ortsdosisleistung für die vorliegende Studie wurde an dem Standard der Transportbleiabschirmungen („GS“, „KS“) aufgenommen. Dies geschah einmal direkt an der Oberfläche der Bleibehälter und zu einem anderen Zeitpunkt in einem Abstand von 10cm. Der direkte Kontakt mit den Behältern entspricht dem direkten Tragen der Abschirmbehälter, der Abstand von 10 cm wäre der Abstand zwischen Hand und Behälter bei der Verwendung einer üblichen 20 cm langen Pinzette.



Abbildung 6: Prinzip der Messung der Ortsdosisleistung an der Seite eines Vorgängermodells der Transportbleiabschirmungen

Gemessen wurde beide Male an drei definierte Stellen: an dem Oberteil, an dem Unterteil und seitlich in der Mitte. Für diese Messungen war das TLD-Fingerring-Dosimeter Typ X (GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, 85764 Neuherberg, Deutschland) das Mittel der Wahl. Bei der direkten Messung wurden die Ringe auf die Oberfläche der Transportbleiabschirmungen mit Klebeband befestigt. Die genauen Positionen wurden vorher zentrisch an den drei genannten Stellen markiert. Bei der Messung mit Abstand wurden die Ringe auf Höhe der Markierungen in 10 m Abstand an den Halterungen montiert.

Die Feststellung der Ortsdosisleistung in 10 cm Entfernung ohne Abschirmung der radioaktiven Kapsel wurde in gleicher Art und Weise bereits zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführt. Das Ergebnis wurde übernommen.



Abbildung 7: Prinzip der Messung der Ortsdosisleistung in 10 cm Entfernung ohne Abschirmung der radioaktiven Kapsel

Behält man das Aktivitätszerfall-Gesetz $A = A_0 \cdot (0,5)^{t/t_{1/2}}$ im Auge und setzt t_0 als Start und somit gleich 0 und t_1 als Versuchsdauer, gemessen in Sekunden, kommt man rechnerisch über die integrierte Aktivität (IA) schließlich zur Ortsdosisleistung (ODL):

$$IA = A_0 \int_0^{t_1} 0,5^{\frac{t}{t_{1/2}}} dt = \left(\frac{-A_0 \cdot t_{1/2}}{\ln_2} \right) \cdot 0,5^{\frac{t}{t_{1/2}}} =$$

$$\left(\frac{-A_0 \cdot t_{1/2}}{\ln_2} \right) \cdot \left(-0,5^{\frac{t_1}{t_{1/2}}} + 0,5^{\frac{0}{t_{1/2}}} \right) = \left(\frac{A_0 \cdot t_{1/2}}{\ln_2} \right) \cdot \left(1 - 0,5^{\frac{t_1}{t_{1/2}}} \right)$$

$$\text{ODL} \left[\frac{\mu\text{Sv}/h}{\text{MBq}} \right] = \frac{\text{EFD}[\text{mSv}] \cdot 1000}{IA[\text{MBq}]}$$

wobei IA = integrierte Aktivität [MBq]

EFD = Ergebnis der TLD-Fingerring-Dosimeter Typ X [mSv]

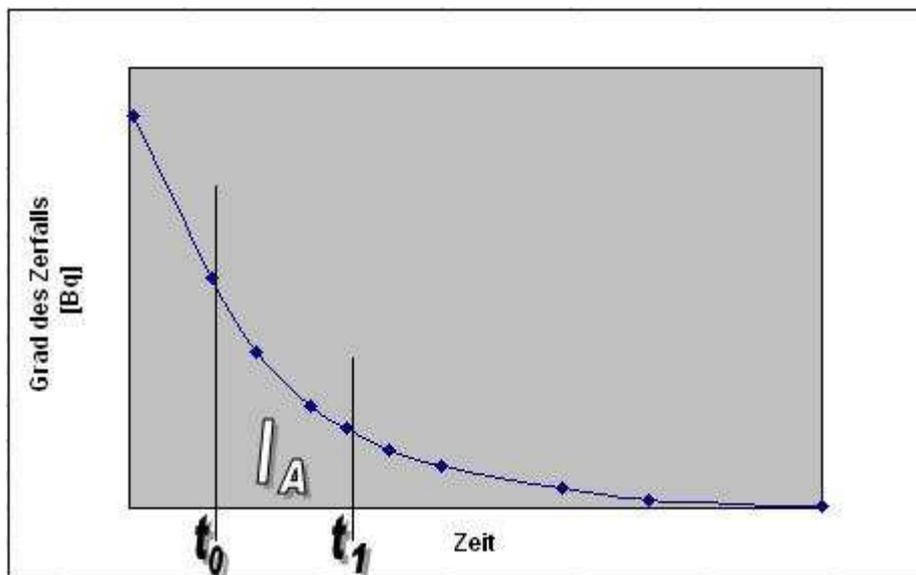


Abbildung 8: Prinzip der integrierten Aktivität

Die Strahlenexposition bei der Messung der bloßen Therapiekapseln im Aktivimeter lässt sich mit Hilfe der Gammadosisleistungskonstante für Iod-131 berechnen.

2.2.2. an den Geräten

Zur Durchführung der Studie wurden bei der Firma „Tyco healthcare“ zwei Therapiekapseln mit einer Aktivität von 2000 MBq und 6000 MBq bestellt. Am ersten Messtag stand für die Größe I der Bleibehälter eine Iod-131-Kapsel mit der Startaktivität von 1973 MBq und für die Größe II eine andere mit 5662 MBq zur Verfügung. Diese beiden Kapseln wurden entsprechend ihres erwarteten Aktivitätszerfalls an zuvor bestimmten Tagen den Messungen unterzogen. Für die Bestimmung der Aktivität gilt

$$A = A_0 \cdot 0,5^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

wobei A = momentane bzw. zu bestimmende Aktivität

A_0 = Aktivität zur Startzeit

t = Zeitunterschied zwischen Startzeit und zu bestimmenden Zeitpunkt

$t_{1/2}$ = Halbwertszeit, bei Iod-131: $t_{1/2} = 8,02$ d (Schicha, 2003)

Setzt man nun die gewünschte Aktivität A in die Formel ein, kann man den Tag der Messung als t errechnen. Ausgehend von den 6000 MBq Startaktivität sollte in dieser Studie etwa alle 500 MBq eine Messung erfolgen und somit wurde für die Größe I ein Aktivitätsspektrum von 1973 MBq bis 323 MBq und für die Größe II von 5662 MBq bis 928 MBq abgedeckt. Insgesamt wurden somit an 11 Tagen Messungen vorgenommen.

Die drei eingesetzten Strahlenmessgeräte wurden zuvor an jedem Messtag mittels eines Caesium-137-Prüfstrahlers kalibriert.

nach n Tagen	Aktivität groß	Aktivität klein
0	6000,0	2000,0
1	5505,0	1835,0
2	5050,8	1683,6
3	4634,1	1544,7
5	3901,0	1300,3
6	3579,2	1193,1
8	3012,9	1004,3
10	2536,3	845,4
13	1958,9	653,0
16	1513,0	504,3
21	983,7	327,9

Abbildung 9: Aktivitätszuordnung der jeweiligen Tage

An diesen 11 Tagen wurde die Therapiekapsel mit der Startaktivität von 5662 MBq in der Transportbleiabschirmung „GS“, und die Therapiekapsel mit der Startaktivität von 1973 MBq in der Transportbleiabschirmung „KS“ gemessen.

Sowohl bei dem Bohrloch-Messplatz als auch bei der Uptake-Messsonde wurde auf dem NaI-Detektor zentrisch die Umrandung der Abschirmbehälter markiert, womit eine definierte Messanordnung sichergestellt werden konnte.



Abbildung 10: GröÙe I der Transportbleiabschirmung bei der Messung am Bohrlochmessplatz



Abbildung 11: GröÙe I der Transportbleiabschirmung bei der Messung an der Uptake-Messsonde

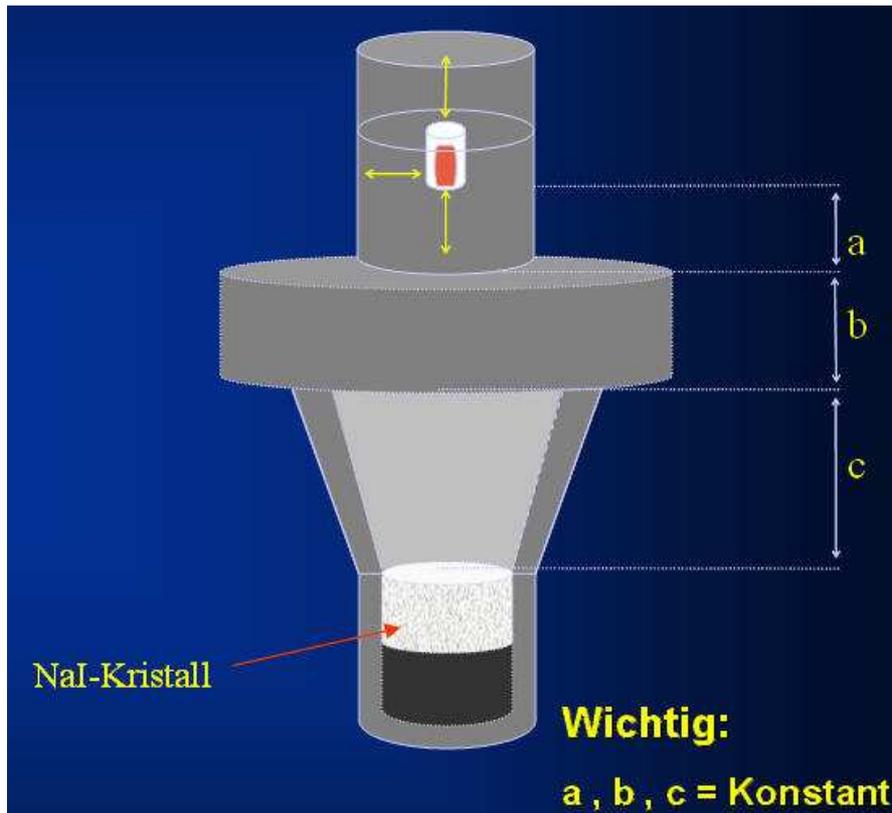


Abbildung 12: Platzierung der Transportbleiabschirmung am Bsp. des Bohrlochdetektors

Die Aktivität der bloßen Kapseln wurde vor Beginn der Messungen am Bohrlochmessplatz und an der Uptake-Messsonde im Aktivimeter festgestellt.

Die Aktivität x_i der Kapseln konnte dementsprechend an jedem Messtag ermittelt werden und mit den an den Geräten jeweils gemessenen Impulsraten y_i der Kapseln in den geschlossenen Transportbleiabschirmungen korreliert werden. Die kurz vor jeder Messung ermittelte Untergrundstrahlung wurde von den Impulsraten subtrahiert und das Ergebnis für jeden einzelnen Abschirmbehälter notiert.

2.2.3. Regressionsgerade

Für beide Transportbleiabschirmungen gibt es 2 Tabellen mit je 11 Messergebnissen, eine Tabelle für den Bohrlochmessplatz und eine für die Uptake-Messsonde. Die Messergebnisse y_i wurden pro Gerät und pro Transportbleiabschirmung in die Tabellen übernommen und graphisch dargestellt. Im Graphen wurde anhand der Messergebnisse eine Regressionsgerade bestimmt. Da vermutet wird, dass die Akti-

vität der Kapseln mit den dazugehörigen Messergebnissen in einem linearen Zusammenhang steht, lässt sich die Regressionsgerade mit der Formel

$$y_i = k \cdot x_i + d$$

beschreiben, wobei y = Messergebnis / Impulsrate

x = Aktivität der Kapsel

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ Nummer / Anzahl der Messung

k = Steigung der Regressionsgeraden

d = y-Achsenabschnitt bei $x = 0$

Im betrachteten Fall ist $d = 0$, da bei einer Aktivität von Null keine Impulsrate gemessen wird. Die Hintergrundstrahlung wurde direkt vor jeder Messung ermittelt und vom jeweiligen Ergebnis subtrahiert.

Die lineare Regression besteht in der Bestimmung der Ausgleichs- oder Regressionsgeraden, indem die Kurvenparameter nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate bestimmt werden (Korrelation, Ausgleichsrechnung, 2007). Der Ausgleich ist derart, dass die Summe der Quadrate der Abstände senkrecht zur Ausgleichsgeraden zu einem Minimum wird. Dieses Maß ist sehr oft die Summe der Abweichungsquadrate der Ordinatenwerte, das bedeutet der Ausgleich nach der Koordinate y allein (Krystek, 2003).

Die genannten Tabellen, ihre Werte und Graphen sind im Anhang zu finden.

2.2.3.1 mathematische Nomenklatur und die Messunsicherheit der Steigung k

Die Anzahl der Datenpunkte wird mit n gekennzeichnet (1, 2, 3, ..., n).

Die Mittelwerte nach den beiden Koordinaten berechnet man nach

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Die entsprechenden Summen lassen sich darstellen zu

$$S_{xx} \equiv \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad S_{yy} \equiv \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2,$$

$$S_{xy} \equiv \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Der Ausgleich einer Geraden nach y , auch der „übliche“ Ausgleich oder Regressionsgerade genannt, wird beschrieben durch

$$k_y = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

der Ausgleich nach x , nach

$$k_x = \frac{S_{xy}}{S_{yy}}$$

sowie ein gleichzeitiger Ausgleich nach beiden Koordinaten, nach

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}}$$

(M. Matus, 2005).

k ist der Kalibrierfaktor und stellt in dieser Arbeit gleichzeitig die Steigung der Regressionsgeraden dar.

Die drei letztgenannten Formeln sind von der Form

$$k = k(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n).$$

Somit repräsentiert k eine Funktion von $2n$ Eingangsgrößen und kann für die Berechnung der Unsicherheit betrachtet werden.

Auch die Berechnung der Messunsicherheit $u(k)$ der Steigung aus den gegebenen Standardunsicherheiten $u(x_i)$ und $u(y_i)$ der Eingangsgrößen x und y kann durch die Messmethoden des GUM durchgeführt werden.

Diese Aufgabe kann durch ein Computerprogramm zur Messunsicherheitsberechnung gelöst werden.

(M. Matus, 2005)

Die Standardunsicherheit von k wird berechnet durch

$$\mu(k) = \sqrt{\sum \frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \sum \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}}$$

Der relative Fehler des Kalibrierfaktors wird ermittelt durch

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k}$$

2.2.4. Verfahrensfehler

Die Ergebnisse dieser alternativen Messmethode sind mit möglichen Fehlern belastet. Die Güte von Messergebnissen wird durch die Messunsicherheit charakterisiert. Nur durch ihre Kenntnis können Messergebnisse verglichen und akzeptiert werden und Entscheidungen getroffen werden, die auf der Grundlage der Messergebnisse basieren. Messergebnisse können demnach nur dann als vollständig und akzeptabel anerkannt werden, wenn die Messunsicherheit mit berücksichtigt wurde (Sommer, Siebert, 2004).

Heute wird selbst in Fachkreisen bei linearen Ausgleichungen die empirische Standardabweichung, welche eigentlich ein Maß für die Güte der Anpassung ist, als alleinige Komponente der Messunsicherheit betrachtet (M. Matus, 2005). Die Ausgleichsgeraden nach x und nach y gleichen einseitig, entweder nach x oder nach y , aus (Ko-

laczia, 2005). Messunsicherheiten können sich bei dieser Arbeit jedoch sowohl auf der Abszisse (Aktivität), als auch auf der Ordinate (Impulsrate) niederschlagen. Durch diese Tatsache ist es angebracht, sowohl nach x als auch nach y auszugleichen (Kolaczia, 2005). Die Funktionen sind leider nicht von so einfacher Natur wie im linearen Fall. Auch sind sie in der Literatur kaum zu finden (M. Matus, 2006). Die einseitige Bevorzugung beim Ausgleich nach nur einer Koordinate ist nur dann gerechtfertigt, wenn die andere Koordinate als frei von Messunsicherheiten angesehen werden kann (Krystec, 2003) und das ist bei dieser neuen Messmethode nicht der Fall. Die Definition und die Berechnung der Messunsicherheit wird heute international nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“, kurz GUM, durchgeführt (M. Matus, 2005). Die Problematik der Messunsicherheit liegt darin, dass die unvollständige Kenntnis des Wertes einer Messgröße nicht ausschließlich daraus resultiert, dass bei einer Messung streuende Messwerte beobachtet werden, sondern zusätzliche Einflüsse auftreten, zu denen keine aktuell beobachteten Messwerte vorliegen, die aber dennoch bei der Ermittlung der Messgröße berücksichtigt werden müssen (M. Matus, 2005).

2.2.4.1. Messunsicherheit bei der Impulsrate (Ordinate)

Der relative Gesamtfehler für die Messung der Impulse besteht aus 4 Komponenten:

- die Positionierung der Transportbleiabschirmung auf dem Messgerät
- der Spielraum zwischen Radioaktivität und dem Impulsmesser
- der Messfehler des entsprechenden Gerätes
- der relative Fehler, der durch die Verwendung verschiedener Behälter resultiert

Da die Umrandung der Transportbleiabschirmungen vor den Messungen zentrisch auf die Messgeräte übertragen wurde und die Abschirmbehälter exakt in diese Umrandungen positioniert wurden, kann man diese Komponente des relativen Gesamtfehlers der Impulse ausschließen.

Auch der Spielraum zwischen Radioaktivität und dem Impulsmesser ist zu vernachlässigen, da die beiden radioaktiven Kapseln vor der ersten Messung an einem ihrer

beiden Enden markiert wurden und für jede Messung in derselben Richtung in die Abschirmbehälter geführt wurden. Somit hatte die radioaktive Zone der Therapiekapsel stets den gleichen Abstand zum Behälterboden.

Letztendlich besteht der relative Gesamtfehler für die Messung der Impulse aus dem Messfehler des entsprechenden Gerätes und dem Behälterfehler.

Der Messgerätefehler setzt sich aus einem statistischen Messfehler und der Messanordnung zusammen und wird mit einem Aktivitätsnormal ermittelt.

Durch zahlreiche Messungen mit einem Aktivitätsnormal wurde der statistische Fehler unter 5% festgestellt, aber für die Berechnungen wurde der für das Messgerät angegebene Wert gewählt. Dieser beträgt laut Herstellerangabe 5%.

Die Messungen wurden mit fünf verschiedenen Transportbleiabschirmungen durchgeführt. Die exakte Dicke des Bleis und auch die unterschiedliche Beschaffenheit der verschiedenen Abschirmungen führen zu einem relativen Fehler, der Behälterfehler genannt wird. Dieser lässt sich mit dem Aktivitätsnormal aus der Standardabweichung der gemessenen Impulsraten in den fünf Bleibehältern ermitteln.

$$\mu_{rel}(CPM)_{Behälter} = \frac{S_{(CPM)}}{CPM} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta(CPM))^2}{n-1}}}{(CPM)}$$

Zum Berechnen des Behälterfehlers wird der Mittelwert der Aktivitäten von den Therapiekapseln zum Zeitpunkt der Messungen der fünf Bleibehälter genommen.

Der relative Gesamtfehler für die Messungen der Impulse mit den Geräten ist demnach laut Fehlerfortpflanzungsgesetz :

$$\mu_{rel}(CPM)_{ges} = \sqrt{\mu_{rel}^2(Gerät) + \mu_{rel}^2(CPM)_{Behälter}}$$

2.2.4.2. Messunsicherheit beim Aktivitätsmessgerät (Abszisse)

Auch können Fehler beim Aktivitätsmessgerät vorliegen und zu Schwankungen auf der x-Achse führen.

Dazu zählt zunächst ein statistischer Fehler. Die andere Komponente lässt sich mit dem Aktivitätsnormal berechnen.

$$\mu_{\text{Aktivimeter}} = \sqrt{\mu_{\text{Gerät}}^2 + \mu_{\text{Gerätstatistisch}}^2}$$

Falls Aktivitätsnormale nicht verfügbar sind, kann vom Hersteller eine Berechnungsmethode für Radionuklidfaktoren benutzt werden. Berechnete Radionuklidfaktoren sind deutlich als solche zu kennzeichnen (DIN EN 61303, 1995).

Die Messung der Instrumentengenauigkeit erfolgt mit dem primären Prüfverfahren (DIN EN 61303, 1995).

A_m bezeichnet bei der primären Ermittlung der Instrumentengenauigkeit den mittleren gemessenen Aktivitätswert, A_0 die Aktivität des Normals. S_m ist die Standardabweichung der Messungen, S_0 die vom Hersteller angegebene Standardabweichung für das Aktivitätsnormal. Die relative Messunsicherheit des Aktivimeters, $\mu(A)$, ist die quadratische Summe von S_0/A_0 und S_m/A_m :

$$\mu(A)^2 = \left(\frac{S_0}{A_0} \right)^2 + \left(\frac{S_m}{A_m} \right)^2$$

(DIN EN 61303, 1995).

Der relative Fehler des Aktivitätsnormals ist mit 1,5% angegeben.

Laut Herstellerangabe beträgt die Messunsicherheit des Gerätes 5%. Dieser Wert wird für die Berechnungen übernommen.

2.2.4.3. Finalfehler

Der Fehler der alternativen Messmethode lässt sich somit wie folgt durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz zusammenfassen:

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CMP)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)}$$

3. ERGEBNISSE

3.1. Ortsdosisleistung

Im ungünstigsten Fall beträgt die Ortsdosisleistung für die Größe I der Transportbleiabschirmungen direkt an der Oberfläche 3,967 $\mu\text{Sv/h}$ pro MBq und in 10cm Abstand 0,276 $\mu\text{Sv/h}$ pro MBq. In beiden Fällen wurde dieser höchste Wert auf der Unterseite des Behälters gemessen. Für die Größe II sind es direkt an der Oberfläche pro MBq 0,448 $\mu\text{Sv/h}$ und in 10cm Abstand 0,0779 $\mu\text{Sv/h}$. Bei dieser Größe herrschte die höchste Exposition an der Seite des Behälters. An den übrigen Messstellen wurden jeweils geringere Werte festgestellt.

Ohne Abschirmung in 10 cm Entfernung beträgt die Ortsdosisleistung in einer Stunde 167,04 μSv pro MBq. Im Vergleich zum höchsten Wert der Ortsdosisleistungbestimmung der Transportbleiabschirmung Größe I bedeutet das das 605-fache und im Vergleich zu der Größe II das 2144-fache.

Stellt man die maximale Äquivalentdosis auf der Oberfläche der Bleibehälter, was einem direkten Tragen der Transportbleiabschirmung entspricht, mit der berechneten Äquivalentdosis ohne Abschirmung in 10 cm Entfernung, was dem herkömmlichen Arbeiten mit den Therapiekapseln bei der Messung mit Hilfe einer 20 cm langen Pinzette nahe kommt, gegenüber, resultiert eine Verminderung der Strahlenexposition von mehr als dem 42-fachen für die Größe I und von mehr als dem 372-fachen für die Größe II der Abschirmbehälter.

Die Strahlenexposition der bloßen Therapiekapsel im Aktivimeter lässt sich mit Hilfe der Gammadosisleistungskonstante für Iod-131 von 59,34 [$\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{GBq}$] (Büll, 1994) für einen mittleren Abstand von 10 cm auf 5,934 ($\mu\text{Sv/h}$) pro MBq berechnen.

	I-131-Therapiekapsel [($\mu\text{Sv/h}$) / MBq]	Transportbleiabschirmung Größe I [($\mu\text{Sv/h}$) / MBq]	Transportbleiabschirmung Größe II [($\mu\text{Sv/h}$) / MBq]
direkt		3,967	0,448
in 10 cm Abstand	167,04	0,276	0,0779

Abbildung 13: Vergleich der Ortsdosisleistungen

3.2. Verfahrensfehler

3.2.1. Regressionsgerade und Messunsicherheit der Steigung $k = \mu(k)$

Die Regressionsgerade lässt sich durch die Formel $y = k \cdot x$ darstellen. k beschreibt hierbei die Steigung der Geraden und stellt gleichzeitig den Kalibrierfaktor dar. Die beiden Grenzgeraden beinhalten neben der Steigung die Berücksichtigung der Messunsicherheit des Kalibrierfaktors, $\mu(k)$.

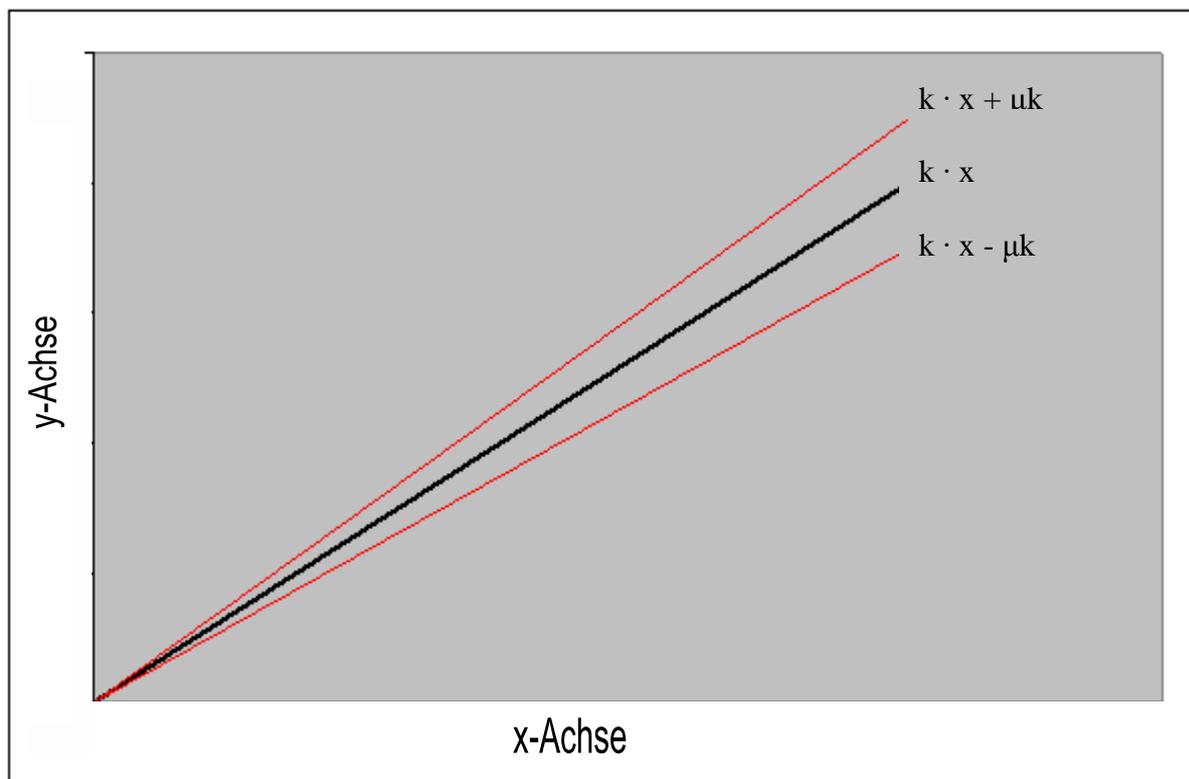


Abbildung 14: Prinzip einer Regressionsgeraden $y = k \cdot x$ sowie der Grenzgeraden $y = k \cdot x \pm \mu k$

Abschirmbehälter am Bohrlochmessplatz	K	$\mu(k)$	$\mu_{rel}(k)$ [%]
GS	1,9817	0,10754	5,4
KS	8,5441	0,46704	5,5

Abbildung 15: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$ und $\mu_{rel}(k)$ am Bohrlochmessplatz

Abschirmbehälter an der Uptake-Messsonde	k	$\mu(k)$	$\mu_{rel}(k)$ [%]
GS	12,7707	0,69463	5,4
KS	57,95757	3,15549	5,4

Abbildung 16: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$ und $\mu_{rel}(k)$ an der Uptake-Messsonde

3.2.2. Behälterfehler

Der Behälterfehler ist der relative Fehler, der aus der Verwendung der fünf unterschiedlichen Bleibehälter resultiert.

Aktivität [GBq]	Counts der Transportbleiabschirmung					Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1	2	3	4			
6001,40	11804,0	11901,0	12026,0	12739,0	11880,0	12070,0	382,40	3,2%
3979,00	7855,0	7792,0	7764,0	8269,0	7780,0	7892,0	213,56	2,7%
1002,80	1936,0	2031,0	2051,0	2057,0	1963,0	2007,6	54,74	2,7%

Abbildung 17: Behälterfehler Bohrlochloch Größe II

Aktivität [GBq]	Counts der Transportbleiabschirmung					Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1	2	3	4			
2176,20	18758,0	18236,0	17825,0	17916,0	18173,0	18181,6	365,03	2,0%
1416,00	12246,0	11886,0	11423,0	11423,0	11791,0	11753,8	346,40	2,9%
352,20	3086,0	2972,0	2865,0	2795,0	2803,0	2904,2	123,85	4,3%

Abbildung 18: Behälterfehler Bohrloch Größe I

Aktivität [GBq]	Counts der Transportbleiabschirmung					Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1	2	3	4			
5999,60	76715,0	78315,0	76435,0	79333,0	75523,0	77264,2	1533,39	2,0%
3977,40	49739,0	49768,0	51151,0	51717,0	48855,0	50246,0	1162,25	2,3%
1002,80	12684,0	12599,0	12705,0	13275,0	12574,0	12767,4	289,08	2,3%

Abbildung 19: Behälterfehler Uptake-Messsonde Größe II

Aktivität [GBq]	Counts der Transportbleiabschirmung					Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1	2	3	4			
2173,00	126393,0	122390,0	121098,0	118026,00	120759,0	121733,2	3051,27	2,5%
1414,50	82885,0	79415,0	79119,0	75707,00	79554,0	79336,0	2542,93	3,2%
352,00	20761,0	20273,0	20199,0	19550,00	20168,0	20190,2	431,01	2,1%

Abbildung 20: Behälterfehler Uptake-Messsonde Größe I

Der größte Fehler U dieser Messreihe wird als maximaler Behälterfehler einer Transportbleiabschirmungsgröße an einem Gerät gesehen.

Der abgeschätzte maximale Fehler, der aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter resultiert, beträgt demnach am Bohrlochmessplatz für die Größe II der Transportbleiabschirmungen 3,2% und für die Größe I 4,3%.

An der Uptake-Messsonde ist dieser maximale Fehler für die Größe II 2,3% und für die Größe I 3,2%.

Abschirmbehälter am Bohrlochmessplatz	maximaler Behälterfehler [%]
Gr.II	3,2
Gr.I	4,3

Abbildung 21: maximaler Behälterfehler am Bohrlochmessplatz

Abschirmbehälter an der Uptake-Messsonde	maximaler Behälterfehler [%]
Gr.II	2,3
Gr.I	3,2

Abbildung 22: maximaler Behälterfehler an der Uptake-Messsonde

3.2.3. Finalfehler = $\mu_{rel}(A)$

Der Finalfehler der neu entwickelten Messmethode der Therapie kapseln wird beschrieben durch

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CMP)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)}$$

Er beträgt für die Größe II der Transportbleiabschirmung am Bohrlochmessplatz 5,43%, für die Größe I 5,47%.

Durch die Messergebnisse der Größe II der Transportbleiabschirmungen an der Uptake-Messsonde ergeben sich 5,44% als Finalfehler. Für die Größe I beläuft er sich ebenfalls auf 5,44%.

Abschirmbehälter am Bohrlochmessplatz	Finalfehler $\mu_{rel}(A)$ [%]
GS	5,43
KS	5,47

Abbildung 23: Finalfehler der neuen Messmethode am Bohrlochmessplatz

Abschirmbehälter an der Uptake-Messsonde	Finalfehler $\mu_{rel}(A)$ [%]
GS	5,44
KS	5,44

Abbildung 24: Finalfehler der neuen Messmethode an der Uptake-Messsonde

3.2.3.1. Evaluierung der Messergebnisse

Um die neue Messmethode der radioaktiven Therapie kapseln zu evaluieren, wurden die Messungen an drei Tagen während der laufenden Messreihe in vier weiteren Transportbleiabschirmungen durchgeführt. Die Messergebnisse wurden in gleicher Art und Weise in Tabellen und Graphen dargestellt und den Berechnungen unterzogen. Sie sind im Anhang zu finden.

Abschirmbehälter am Bohrlochmess- platz	k	$\mu(k)$	$\mu_{rel}(k)$ [%]	Finalfehler $\mu_{rel}(A)$ [%]
G1	1,9703	0,15927	8,1	8,08
G2	1,9904	0,16159	8,1	8,12
G3	2,1350	0,17161	8,0	8,04
G4	1,9849	0,15963	8,0	8,04
Mittelwert	2,0202	0,16303	8,05	8,07

Abbildung 25: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe II am Bohrlochmessplatz

Abschirmbehälter am Bohrlochmess- platz	k	$\mu(k)$	$\mu_{rel}(k)$ [%]	Finalfehler $\mu_{rel}(A)$ [%]
K1	8,3551	0,67244	8,0	8,05
K2	8,1845	0,66085	8,1	8,07
K3	8,2778	0,66656	8,1	8,05
K4	8,4324	0,67436	8,0	8,00
Mittelwert	8,3125	0,66855	8,05	8,0425

Abbildung 26: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe I am Bohrlochmessplatz

Abschirmbehälter an der Uptake- Messsonde	k	$\mu(k)$	$\mu_{rel}(k)$ [%]	Finalfehler $\mu_{rel}(A)$ [%]
G1	13,0992	1,05914	8,1	8,09
G2	12,7660	1,02043	8,0	7,99
G3	13,2074	1,06583	8,1	8,07
G4	12,5898	1,01761	8,1	8,08
Mittelwert	12,9156	1,04075	8,075	8,0575

Abbildung 27: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe II an der Uptake-Messsonde

Abschirmbehälter an der Uptake- Messsonde	k	$\mu(k)$	$\mu_{rel}(k)$ [%]	Finalfehler $\mu_{rel}(A)$ [%]
K1	55,8833	4,51487	8,1	8,08
K2	55,2921	4,46209	8,1	8,07
K3	53,9242	4,37210	8,1	8,11
K4	55,2422	4,44705	8,1	8,05
Mittelwert	55,0855	4,44903	8,1	8,0775

Abbildung 28: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe I an der Uptake-Messsonde

4. DISKUSSION

4.1. Material und Methode

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Messmethode zu entwickeln, bei der eine hinreichend genaue, unkomplizierte Bestimmung der Therapieaktivität in der geschlossenen Transportbleiabschirmung ermöglicht und somit die Strahlenexposition des Personals bei den gesetzlich vorgeschriebenen Aktivitätsmesskontrollen der Jod-131-Kapseln für die Radiojodtherapie aber auch der hierfür erforderliche Zeitaufwand auf ein Minimum reduziert wird.

Entscheidet man sich für die neue Durchführung der Aktivitätsmessung, stellt man die ungeöffnete Transportbleiabschirmung, in der die Therapiekapsel sicher gefasst ist, auf die Markierung des kalibrierten Gerätes und führt die Messung durch. Mit dem Messergebnis kann nun anhand einer Graphik mit einer Regressionsgeraden abgelesen werden, um wie viel Aktivität es sich bei der verschlossenen Therapiekapsel handelt.

Durch die neue Art der Messung wird das Personal keiner Exposition durch β -Strahlung ausgesetzt, auch die Gamma-Strahlenexposition kann auf diese Art auf ein Minimum reduziert werden. Ein weiterer Vorteil ist in der schnellen und auch einfachen Durchführung der Messung zu sehen. Die Gefahr einer möglichen Kontamination der Umgebung oder gar von Personen während der Umfüllung der Therapiekap-

sel, wie es bei der bisherigen Messmethode möglich war, ist durch das neue Vorgehen der Messung zusätzlich ausgeschlossen.

Die Entwicklung dieser neuen Messmethode fordert einige Voraussetzungen.

An jedem Gerät muss eine definierte Messanordnung sichergestellt sein, die bei jeder Messung exakt eingehalten wird. Eine weitere Grundvoraussetzung ist darin zu sehen, dass nur originale Transportbleiabschirmungen derselben Firma mit genormter Beschaffenheit und definierter Bleidicken Verwendung finden. Durch die konstante Halbwertsdicke des Bleis sowie des konstanten Abstandes zwischen Therapiekapsel und Messgerät und somit strikter Einhaltung der Messgeometrie ist der Gesamtabsorptionskoeffizient für die Messanordnung konstant.

Des Weiteren ist während der Messung darauf zu achten, dass keine zusätzliche Strahlungsquelle Einfluss auf das Ergebnis haben kann. Eine Kontamination der Geräte oder der Umgebung ist vorher auszuschließen. Die Untergrundstrahlung ist direkt vor jeder einzelnen Messung zu überprüfen und zu notieren. Ebenso ist die Beschaffenheit des Messgerätes zu kontrollieren. Dieses wird zuvor mittels eines Cäsium-137-Strahlers kalibriert.

Berücksichtigt man diese Voraussetzungen, sind bemerkenswerte Vorteile gegenüber der bisherigen Vorgehensweise bei der Überprüfung der Therapieaktivität festzustellen. Hierbei musste man üblicherweise die radioaktive Kapsel aus dem Bleibehälter entnehmen um die Aktivitätsmessung an einem Gerät durchführen zu können. Erst nach der vollendeten Messung wird die Therapiekapsel wieder in die Abschirmung gebracht. Selbst wenn sich das durchführende Personal bei der Messung beilte und sich hinter einem Schutzschild befand, bedeutete diese konventionelle Messung der Therapieaktivität eine hohe Gamma-Strahlenexposition sowie eine hohe β -Strahlenexposition der Hände, sowie eine Gamma-Strahlenexposition des Oberkörpers.

Mögliche Fehlerquellen in dieser Studie können darauf zurückgeführt werden, dass die Messungen während des täglichen Klinikbetriebes durchgeführt wurden und Patienten, die als potentielle Strahlungsquellen in Betracht kommen könnten, durch das Gebäude liefen. Waren diese Personen sichtbar oder die Untergrundstrahlung auffällig, wurde die Messung abgebrochen und wiederholt.

Die konstante Messanordnung bildet die Grundvoraussetzung der gelungenen Messung. Um dies zu gewährleisten, wurden auf den NaI-Detektoren die Umriss der

Transportbleiabschirmungen zentrisch registriert. Schon ein minimales Abweichen der Positionierung der Bleibehälter von der markierten Stelle hatte Auswirkungen auf das Messergebnis zur Folge. Für die Zukunft wäre eine fassende Halterung wünschenswert, sodass der Abschirmungsbehälter stets äußerst genau platziert werden und nicht verrutschen könnte.

Die definierte Messgeometrie mit konstantem Gesamtabsorptionskoeffizienten bildet wie bereits beschrieben die Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Messergebnis. Dies wird zum einen durch die Positionierung der Transportbleiabschirmung auf dem Messgerät bestimmt, zum anderen aber auch durch die Lage der Kapsel im Inneren des Abschirmbehälters. Das kleine Plastikröhrchen innerhalb der Transportbleiabschirmung, das als Fassung der radioaktiven Therapiekapsel dient, ist größer als die Kapsel selber. Dieser Platzüberschuss ermöglicht der Kapsel ein gewisses Spiel innerhalb des Röhrchens, mit der Folge, dass die Kapsel verschiedene Neigungen einnehmen kann. Dieser Tatsache könnte man zukünftig mit kleineren, der Kapsel formgetreuer angepassten Plastikröhrchen entgegenwirken. Das radioaktive Iod-131 befindet sich an einem Ende der Therapiekapseln. Je nachdem, wo man das Messgerät oder das Dosimeter zur Erfassung der Strahlung platziert, können zusätzlich dadurch unterschiedliche Abstände zwischen der Radioaktivität und Messsonde entstehen und zu verschiedenen Ergebnissen führen. Um diesem Einfluss entgegen zu wirken, wurden die bei dieser Arbeit eingesetzten Kapseln vor Beginn der Studie an einem Ende markiert und konnten somit zu jeder Messung in derselben Richtung in die Plastikröhrchen der Transportbleiabschirmungen eingeführt werden. Folglich befand sich der radioaktive Part der Therapiekapseln bei jeder Messung in derselben Position.

Die normierte Beschaffenheit der Transportbleiabschirmungen mit definierten Bleidicken ist ein weiterer Ansatz für die Messung der Aktivität innerhalb eines Abschirmbehälters. Eine sichere Halbwertsdicke des Bleis der Transportabschirmbehälter ist ein weiterer Faktor, der den Gesamtabsorptionskoeffizienten für die Messanordnung konstant hält. Variationen in den Abschirmungsdicken hätten einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis und würden dieses verfälschen. Möchte man die neue Messmethode anwenden, ist die Nutzung genormter Bleibehälter derselben Firma bei strikter Einhaltung der Messgeometrie unumgänglich.

4.2. Ergebnisse

4.2.1. Ortsdosisleistung

Die Verminderung der maximalen Äquivalentdosis auf der Oberfläche der Bleibehälter im Vergleich zu der Äquivalentdosis ohne Abschirmung mit 10 cm Abstand zu der radioaktiven Therapiekapsel um das 42-fache für die Größe I und um das 372-fache für die Größe II der Transportbleiabschirmungen verdeutlicht den Schutz des Personals vor Strahlenexposition durch die neue Messmethode und betont die Effektivität dieser Methode. Eine Messung innerhalb der originalen Bleiabschirmung ist einer Messung der Therapiekapseln außerhalb der Abschirmbehälter unbedingt vorzuziehen.

I-131-Therapiekapsel ohne Abschirmung in 10 cm Entfernung [($\mu\text{Sv/s}$) / MBq]	Oberfläche Transportbleiabschirmung Größe I [($\mu\text{Sv/s}$) / MBq]	Oberfläche Transportbleiabschirmung Größe II [($\mu\text{Sv/s}$) / MBq]
167,04	3,967	0,448

Abbildung 29: Vergleich der Ortsdosisleistung

4.2.2. Verfahrensfehler

4.2.2.1. Messunsicherheit der Steigung k , $\mu(k)$, und des rel. Fehlers von k , $\mu_{\text{rel}}(k)$

Die Messunsicherheit von k ist bei den Messungen am Bohrlochmessplatz sowohl mit der großen, als auch mit der kleinen Transportbleiabschirmung, GS und KS, gering. Dadurch wird ersichtlich, dass die 11 Messergebnisse keine großen Schwankungen ergeben haben.

Der relative Fehler von k bei den durchgeführten Messreihen am Bohrlochmessplatz ist mit 5,4% von GS beziehungsweise 5,5% von KS niedrig. Dies unterstreicht die guten Messergebnisse.

Die Resultate an der Uptake-Messsonde sehen ähnlich gut aus. Auch hier sind die Messunsicherheiten von k sowohl von GS, als auch von KS gering. Der relative Fehler mit jeweils 5,4% verdeutlicht auch hier die präzisen Messergebnisse für die beiden Größen.

4.2.2.2. Behälterfehler

Der maximale Behälterfehler für die Größe II der Transportbleiabschirmungen am Bohrlochmessplatz beträgt 3,2%, an der Uptake-Messsonde 2,3%.

Für die Größe I beträgt der maximale Behälterfehler am Bohrlochmessplatz 4,3% und an der Uptake-Messsonde 3,2%.

Die Größe II der Abschirmbehälter zeigt an beiden Messgeräten bessere Ergebnisse als die Größe I. Setzt man sich aber die 5%-Fehlererlaubnis, liegen diese Ergebnisse alle im Maß, zumal der durchschnittliche Behälterfehler deutlich unter dem maximalen liegen würde. Möchte man aber den maximalen Behälterfehler auf unter 3% Fehlerquelle verringern, müssten die Messungen einer weiteren Evaluierung unterzogen werden. Bei den Messungen muss strikt auf eine konstante Messanordnung und das gleiche Vorgehen geachtet werden, bereits kleinste Unterschiede können zu bemerkenswerten Unterschieden führen.

4.2.2.3. Finalfehler

Der Finalfehler der neu entwickelten Messmethode der Jod-131-Therapiekapseln beträgt für GS am Bohrlochmessplatz 5,43% und an der Uptake-Messsonde 5,44%.

Für KS beträgt der Finalfehler am Bohrlochmessplatz 5,47% und an der Uptake-Messsonde 5,44%.

Bedenkt man, dass die Unsicherheit der einzelnen Messgeräte mit jeweils 5% von den Herstellern angegeben ist und die neu entwickelte Messmethode durch die Berücksichtigung mehrerer Fehlermöglichkeiten dem Fehlerfortpflanzungsgesetz unterworfen ist, sind die Ergebnisse der Finalfehler hervorragend.

4.2.2.4. Evaluierung

Die Evaluierung der Messmethode erfolgte in vier weiteren Transportbleiabschirmungen beider Größen an nur drei Tagen während der durchgeführten Messreihe.

Die Ergebnisse sind etwas höher.

Der relative Fehler von k für die Größe II der Transportbleiabschirmungen am Bohrlochmessplatz beträgt im Durchschnitt 8,05%. Bei GS beträgt er 5,4%. Dieser Unterschied von 2,65% resultiert aus der unterschiedlichen Anzahl von Messergebnissen.

Je mehr Messergebnisse zur Verfügung stehen, desto genauer kann eine Regressionsgerade mit einer Steigung k ermittelt werden, sofern die Messergebnisse so präzise wie in den vorliegenden Messreihen sind. Je mehr präzise Messergebnisse man hat, desto geringer ist die Messunsicherheit und desto kleiner ist der relative Fehler von k . Vorausgesetzt, die gesamte Messanordnung und Durchführung bliebe die selbe, würden sich bei einer Wiederholung der Evaluierung an mehreren Tagen die Steigung k , die Messunsicherheit sowie der relative Fehler von k sich dem Ergebnis von GS angleichen.

Die vier zusätzlichen Behälter wurden durchnummeriert (G1-G4). Die Unterschiede von k , $\mu(k)$ und $\mu_{\text{rel}}(k)$ zwischen den einzelnen Behältern sind nicht erwähnenswert. Der relative Fehler beträgt zwischen 8,0% und 8,1%. Dies verdeutlicht, dass es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den einzelnen Abschirmbehälter gibt und sie von derselben Beschaffenheit sind.

Für die Größe I der Transportbleiabschirmung am Bohrlochmessplatz sieht es ähnlich aus. Der relative Fehler beträgt hier im Durchschnitt 8,05%. Der Grund des Unterschieds von 2,55% im Vergleich zum relativen Fehler von KS mit 5,5% ist der gleiche wie bei der Größe II. Auch hier würde eine erweiterte Messreihe bei der Evaluierung ein präziseres Ergebnis dafür bringen.

Genau wie bei der Größe II haben K1 bis K4 einen relativen Fehler zwischen 8,0% und 8,1%. Diese Ergebnisse betonen die stabilen Messergebnisse ebenfalls.

Auch an der Uptake-Messsonde sind die Ergebnisse der Evaluierung ähnlich.

Für die Größe II der Transportbleiabschirmungen beträgt der relative Fehler an diesem Messgerät im Durchschnitt 8,075%. Der Unterschied von 2,675% zu dem relativen Fehler von GS findet seine Begründung ebenfalls in der verkürzten Messreihe mit nur drei Messergebnissen. Auch hier würde eine größere Messreihe zu einem Angleichen an die 5,4% des relativen Fehlers von GS führen.

G2 weist einen relativen Fehler von 8,0% auf, G1, G3 und G4 8,1%, wodurch der Durchschnitt auf 8,075% resultiert und die stabilen Messergebnisse unterstreicht.

Der durchschnittliche relative Fehler der Größe I an der Uptake-Messsonde von 8,1% hat einen Unterschied von 2,7% zu dem von KS, auch hier liegt der Grund dafür an der verkürzten Messreihe sowie die Behebung an dem Erweitern derselben.

Der Wert des relativen Fehlers von k beträgt von K1 bis K4 jeweils 8,1% und betont ein weiteres Mal die präzisen Messergebnisse und dieselbe Beschaffenheit der einzelnen Transportbleiabschirmungen.

Auch die Evaluierung des Finalfehlers erfolgte durch die vier weiteren Transportbleiabschirmungen beider Größen an den drei Tagen.

Die Ergebnisse sind auch hier höher.

Der durchschnittliche Finalfehler von G1 bis G4 am Bohrlochmessplatz liegt bei 8,07%. Der im Vergleich zu den 5,43% von GS erhöhte Wert um 2,64% ist Folge der verkürzten Messreihe von nur drei Messergebnissen. Genau wie bei der Evaluierung der Messunsicherheit und des relativen Fehlers der Steigung würde sich auch dieses Ergebnis durch eine längere Messreihe dem Ergebnis des Standarts mit elf Messergebnissen anpassen.

Die vier Finalfehler der Größe II am Bohrlochmessplatz befinden sich alle zwischen 8,04% und 8,12%. Dies verdeutlicht die guten Ergebnisse dieser Studie.

Für K1 bis K4 ergibt sich am Bohrlochmessplatz ein durchschnittlicher Finalfehler von 8,0425%. Der Unterschied von 2,5725% zu dem Finalfehler von KS sowie dessen Behebung ist genauso begründet wie bei der Größe II bereits genannt.

Auch hier liegen die vier Finalfehler mit Werten zwischen 8,00% und 8,07% sehr nah beieinander und unterstreichen die guten Ergebnisse.

Die Ergebnisse des Finalfehlers an der Uptake-Messsonde sehen genauso gut aus.

Der durchschnittliche Finalfehler von G1 bis G4 an der Uptake-Messsonde beträgt 8,0575% und der Unterschied von 2,6175% zu dem von GS resultiert aus demselben Grund und ist auf die gleiche Weise zu korrigieren wie am Bohrlochmessplatz.

Mit Ergebnissen zwischen 7,99% und 8,09% sind die Finalfehler von G1 bis G4 ebenfalls sehr nah beieinander und Beweis der guten Ergebnisse.

Dies wird auch beim Betrachten der Ergebnisse von der Größe I an der Uptake-Messsonde ersichtlich. Hier liegt der durchschnittliche Finalfehler von K1 bis K4 bei 8,0775% und wiederholt mit einer Differenz von 2,6375% zu dem Ergebnis von KS die Ursache und die Möglichkeit der Behebung wie am Bohrlochmessplatz.

Die einzelnen Ergebnisse zwischen 8,05% und 8,11% sind genauso ähnlich wie bei den anderen Messreihen und verdeutlichen auf ein Neues die guten Ergebnisse dieser Arbeit.

Die Evaluierung der neu entwickelten Messmethode erfolgte durch Wiederholungen der Messungen mit vier weiteren Transportbleiabschirmungen an nur drei Tagen und Vergleichen der Messergebnisse. Diese bewiesen, dass es keine nennenswerten Schwankungen zwischen den einzelnen Transportbleiabschirmungen gibt.

Eine erweiterte Messreihe einer neuen Evaluierung würde die Ergebnisse an die guten Ergebnisse der Messreihe der Standards angleichen.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Die maximale Äquivalentdosis auf der Oberfläche einer Transportbleiabschirmung beträgt bei der Größe I $3,967 \mu\text{Sv/s}$ pro MBq, bei der Größe II $0,448 \mu\text{Sv/s}$ pro MBq. Die Ortsdosisleistung der I-131-Therapiekapsel ohne Abschirmung in 10 cm Abstand beträgt $167,04 \mu\text{Sv/h}$ pro MBq. Dies bedeutet eine Verringerung der Strahlenexposition um das 42-fache für die Größe I und eine Verringerung um das 372-fache für die Größe II der Transportbleiabschirmungen.

Betrachtet man diese Werte, wird unmittelbar ersichtlich, dass die Messung der Aktivität der I-131-Therapiekapseln aus Strahlenschutzaspekten unbedingt innerhalb eines Abschirmbehälters erfolgen sollte.

Die Messergebnisse der neu entwickelten Methode sind mit möglichen Fehlern und Messunsicherheiten belastet, die sich sowohl auf der Abszisse als auch auf der Ordinate niederschlagen können. Die Messunsicherheit der einzelnen Messgeräte, die in dieser Arbeit Verwendung fanden, einmal das Aktivimeter, mit dem die Aktivität der Therapiekapsel ermittelt wurde, sowie der Bohrlochmessplatz und die Uptake-Messsonde, mit denen die alternative Messmethode entwickelt wurde, ist mit jeweils 5% angegeben. Durch zahlreiche Berechnungen der einzelnen Komponente der Messunsicherheiten kommt man zu einem Finalfehler der Messmethode, der am Bohrlochmessplatz für die Größe II 5,43% und für die Größe I 5,47% beträgt. An der Uptake-Messsonde beläuft sich dieser Finalfehler für die Größe I und auch für die Größe II auf jeweils 5,44%. Berücksichtigt man, dass ein einzelnes Gerät bereits mit bis zu 5% Messunsicherheit belastet ist, sind die Finalfehler mit den leicht erhöhten Ergebnissen trotz Verwendung mehrerer Messgeräte ein durchaus positives Ergebnis dieser Arbeit.

Durch die neu entwickelte Messmethode der radioaktiven Jod-131-Therapiekapseln für die Radiojodtherapie innerhalb der Transportbleiabschirmungen wird die Strahlenexposition des Personals auf ein Minimum reduziert und trotzdem eine hinreichend genaue Aktivitätsermittlung ermöglicht.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Um eine neue Messmethode entwickeln zu können, bei der die radioaktiven I-131-Kapseln für die Radiojodtherapie in einer Transportbleiabschirmung verbleiben können und somit die Strahlenexposition des Personals auf ein Minimum reduziert werden kann, wurden zwei I-131-Therapiekapseln entlang ihres Aktivitätszerfalls in den Transportbleiabschirmungen an zwei Aktivitätsmessgeräten gemessen. Bei den Kapseln handelte es sich zum einen um eine Kapsel mit einer Startaktivität von 1973 MBq, zum anderen um eine Kapsel mit einer Startaktivität von 5662 MBq. Die beiden Kapseln wurden jeweils an einem Ende markiert, damit sie zu jeder Messung in derselben Richtung in die Abschirmbehälter zu platzieren waren. Bei den Transportbleiabschirmungen existieren zwei Größen: Größe I für kleinere Aktivitäten (370 bis 1665 MBq) und Größe II für größere Aktivitäten (1665 bis 7400 MBq). Zur Verfügung standen fünf Bleibehälter pro Größe. Jeweils einer war der Standard-Topf, mit dem die Messungen durchgeführt wurden. Mit den übrigen vier erfolgte die Evaluierung an drei Messtagen. Jeder Behälter wurde an Ober- und Unterteil beschriftet. Gemessen wurden die Kapseln an zwei Messgeräten. Hierbei handelte es sich um ein Bohrlochmessplatz und eine Uptake-Messsonde. Entsprechend ihrem erwarteten Aktivitätszerfall wurde jede der beiden Iod-131-Kapseln etwa alle 500 MBq in Transportbleiabschirmungen an den beiden Geräten gemessen, sodass elf Messungen erforderlich waren, bei denen für die kleinere Größe ein Spektrum zwischen 1973 und 323 MBq und für die größere Größe ein Spektrum zwischen 5662 und 928 MBq erfasst wurde. Die Messergebnisse wurden in Tabellen und Graphen festgehalten. Diese Graphen zeigen für jeden Bleibehälter an jedem Gerät eine Regressionsgerade, die sich aus der Korrelation der gemessenen Impulsrate und der Aktivität der Therapiekapsel ermitteln lässt. Die Ergebnisse sind mit möglichen Fehlern belastet, die sich sowohl auf der Ordinate, als auch auf der Abszisse niederschlagen können. Ermittelt man diese Messunsicherheiten und evaluiert man die Messmethode, beweisen die Ergebnisse, dass durch diese neu entwickelte Messmethode die Strahlenexposition auf ein Minimum reduziert werden kann und trotzdem die Aktivität der Therapiekapseln innerhalb der verschlossenen Transportbleiabschirmung hinreichend genau bestimmt werden kann.

Durch den Vergleich der gemessenen Äquivalentdosis auf der Oberfläche der Transportbleiabschirmung, welche dem direkten Tragen entspricht, und der berechneten Äquivalentdosis in 10 cm Abstand ohne Abschirmung, welche dem herkömmlichen Arbeiten bei der Messung der Therapiekapseln bei Verwendung einer 20 cm langen Pinzette nahe kommt, fällt auf, dass die Dosisleistung ohne Abschirmung mehr als das 42-fache für Typ I beziehungsweise das 372-fache für Typ II der Bleibehälter entspricht. Da die Strahlenexposition durch den Umgang mit I-131-Therapiekapseln insbesondere bei hohen Aktivitäten sehr hoch ist und jegliche Art der Strahlenexposition vermieden werden muss, ist aus Strahlenschutzaspekten die gesetzlich vorgeschriebene Messung der Aktivität der I-131-Therapiekapseln in der Transportbleiabschirmung der herkömmlichen Alternative unbedingt vorzuziehen. Grundvoraussetzung der neuen Messmethode, bei der die in der Transportbleiabschirmung verbleibende Therapiekapsel in die Halterung eines der Messgeräte platziert wird und man mittels des Messergebnisses anhand einer Tabelle beziehungsweise Regressionsgeraden die Aktivität der abgeschirmten Therapiekapsel einfach ablesen kann, ist die Beschaffenheit der Bleibehälter mit definierten Bleidicken derselben Firma. Durch die konstante Halbwertsdicke des Bleis und genormter Halterungen für beide Größen der Transportbleiabschirmungen an den Messgeräten, die einen stets gleich bleibenden Abstand zwischen Therapiekapsel und Detektor gewährleisten, wird der Gesamtabsorptionskoeffizient für die Messanordnung konstant gehalten. Die strikte Einhaltung der Messgeometrie ist notwendige Voraussetzung für die neue Messmethode.

7. SUMMARY

In order to find a new method of measurement which allows the radioactive capsules of the radio-iodine therapy stay in the lead shield for transport and thus minimize the level of contamination for the staff, two different I-131-capsules were measured in one model of a lead container by Tyco Healthcare each during their decay of radioactivity. The evaluation took place during three days with four more models of the same type. The containers are available in two different sizes: size I for activities between 370 and 1665 MBq and size II for 1665 up to 7400 MBq.

The capsules were measured with two instruments: the Bohrlochmessplatz and the Uptake-Messsonde. The results were recorded in tables and visualized in graphs. These graphs show straight lines of regression for every container on every instrument. The straight line of regression shows the correlation between the result of the measurement and the capsules' activity.

There is the risk of measurement errors for every single result both in the axis of abscissas and the axis of ordinates. However the evaluation of the measuring results show that this newly developed method of measuring makes it possible to reduce the amount of contamination to a minimum without any loss of the adequate activity of the capsules within the lead transport containers.

If you compare the equivalent dose on the surface of the lead container (which corresponds with the radiation while carrying the container) with the equivalent dose in 10 cm distance (which corresponds with the radiation during the use of a pair of tweezers) it becomes obvious that the dose of contamination without shielding is more than 42 times higher for size I and more than 372 times for size II. Following the legal requirements of radiation protection you have to keep the level of contamination as low as possible. Accordingly you have to favour the measures of the radioactive capsules inside the containers. The essential requirement of the new method of measurement, which implies the fixation of the transport shield with the capsule inside in the holder of the measuring device and the possibility to read the results of the measuring i.e. the straight line of decay from a table, is the use of standardized holding devices as well as identical conditions of measuring and identical quality of the lead containers from the same company.

8. LITERATURVERZEICHNIS

1. Bartsch, Taschenbuch mathematischer Formeln, Fachbuchverlag Leipzig, 17. Auflage, 1997
2. Büll, Schicha, Nuklearmedizin, Thieme, 1994
3. Danzer, GUIDELINES FOR CALIBRATION IN ANALYTICAL CHEMISTRY Part 1, Pure & Appl. Chem., Vol. 70, No. 4, 1998
4. Danzer, GUIDELINES FOR CALIBRATION IN ANALYTICAL CHEMISTRY Part 2, Pure & Appl. Chem., Vol. 76, No. 6, 2004
5. DIN EN 61303, Medizinisch elektrische Geräte AKTIVIMETER, Deskriptoren: Nuklearmedizin, Aktivimeter, Prüfverfahren, Kenndaten, 1995, S. 3, 4
6. Eberle, Wagner, Versuchstechnik, Vorlesungsunterlagen Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, 2007
7. Elsner, m. Hafner-Grab, Knoch, Nagel, ect., Leitfaden Nuklearmedizin, Steinkopff Darmstadt, 2. Aufl., 2003, S. 63, 72-78, 280
8. Grigsby, Siegel, Baker, Eichling, Radiation Exposure From Outpatient Radioactive Iodine (^{131}I) Therapy for Thyroid Carcinoma, JAMA Vol. 283 No.17, 2000, S. 2272
9. Herrmann, Baumann, Dörr, Klinische Strahlenbiologie kurz und bündig, Urban & Fischer, 4. Auflage, 2006
10. Kiefer, Kiefer, Allgemeine Radiologie Strahlenanwendung, Strahlenwirkung, Strahlenschutz, Parey Buchverlag, 2003, S. 60, 131-132, 135
11. Kolaczia, Das Problem der linearen Ausgleichung im R^2 , Technisches Messen 73, 2006, S. 630
12. Korrelation und Ausgleichsrechnung, Versuchstechnik, 2007, S. 5.3
13. Krystek, Ausgleichsgeraden in der Ebene, Technisches Messen 71, 2004, S.

14. Schicha, Schober, m. Dietlein, Eschner, Kopka, Weckesser, Wellner, Nuklearmedizin Basiswissen und klinische Anwendung, Schattauer, 5. Auflage, 2003, S. 12, 92, 93
15. Schröder, Schröder, Strahlenschutzkurs für Mediziner, Thieme, 2005, S. 4, 69 f., 70, 94, 100, 101
16. Strahlenschutzverordnung, 2001, § 4-6, 36, 55
17. Matus, M., Koeffizienten und Ausgleichsrechnung: Die Messunsicherheit nach GUM, Technisches Messen 72, 2005, S. 585-587
18. Matus, M., Koeffizienten und Ausgleichsrechnung: Die Messunsicherheit nach GUM Teil 2: Der quadratische Fall, Technisches Messen 73, 2006, S. 444
19. Rückmann, Einführung in die Fehlerrechnung und grafische Auswertung, Universität Bremen Fachbereich 1 Physik/Elektrotechnik, 2001eurolab, Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen, eurolab-Deutschland, Technischer Bericht 2/2006, 2006
20. Sommer, Siebert, Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM, Technisches Messen 71, 2004, S. 53
21. www.awmf-online.de
22. www.strahlenschutzverband.at
23. www.umwelt-online.de

9. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Skizze der Kapsel innerhalb der Abschirmung.....	11
Abbildung 2: Skizze der Transportbleiabschirmung.....	11
Abbildung 3: Daten der Transportbleiabschirmung.....	11
Abbildung 4: Prinzip einer Ionisationskammer.....	12
Abbildung 5: Prinzip der Erzeugung eines Stromimpuls'.....	14
Abbildung 6: Prinzip der Messung der Ortsdosisleistung an der Seite eines Vorgängermodells der Transportbleiabschirmungen.....	15
Abbildung 7: Prinzip der Messung der Ortsdosisleistung in 10 cm Entfernung ohne Abschirmung der radioaktiven Kapsel.....	16
Abbildung 8: Prinzip der integrierten Aktivität.....	17
Abbildung 9: Aktivitätszuordnung der jeweiligen Tage.....	19
Abbildung 10: Größe I der Transportbleiabschirmung bei der Messung am Bohrlochmessplatz.....	20
Abbildung 11: Größe I der Transportbleiabschirmung bei der Messung an der Uptake- Messsonde.....	20
Abbildung 12: Platzierung der Transportbleiabschirmung am Bsp. des Bohrlochdetektors...21	
Abbildung 13: Vergleich der Ortsdosisleistungen.....	29
Abbildung 14: Prinzip einer Regressionsgeraden $y = k \cdot x$ sowie der Grenzgeraden $y = k \cdot x$ +/- μk	29
Abbildung 15: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$ und $\mu_{rel}(k)$ am Bohrlochmessplatz.....	30
Abbildung 16: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$ und $\mu_{rel}(k)$ an der Uptake-Messsonde.....	30
Abbildung 17: Behälterfehler Bohrlochloch Größe II.....	30
Abbildung 18: Behälterfehler Bohrloch Größe I.....	30
Abbildung 19: Behälterfehler Uptake-Messsonde Größe II.....	30
Abbildung 20: Behälterfehler Uptake-Messsonde Größe I.....	31
Abbildung 21: maximaler Behälterfehler am Bohrlochmessplatz.....	31
Abbildung 22: maximaler Behälterfehler an der Uptake-Messsonde.....	31
Abbildung 23: Finalfehler der neuen Messmethode am Bohrlochmessplatz.....	32
Abbildung 24: Finalfehler der neuen Messmethode an der Uptake-Messsonde.....	32
Abbildung 25: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe II am Bohrlochmessplatz.....	33
Abbildung 26: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe I am Bohrlochmessplatz.....	33
Abbildung 27: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe II an der Uptake-Messsonde.....	33
Abbildung 28: Zusammenfassung von k , $\mu(k)$, $\mu_{rel}(k)$ und Finalfehler der Größe I an der Uptake-Messsonde.....	34
Abbildung 29: Vergleich der Ortsdosisleistung.....	37
Abbildung 30: Messergebnisse von KS am Bohrlochmessplatz.....	52
Abbildung 31: Messergebnisse von K1 am Bohrlochmessplatz.....	53
Abbildung 32: Messergebnisse von K2 am Bohrlochmessplatz.....	54
Abbildung 33: Messergebnisse von K3 am Bohrlochmessplatz.....	55
Abbildung 34: Messergebnisse von K4 am Bohrlochmessplatz.....	56
Abbildung 35: Messergebnisse von GS am Bohrlochmessplatz.....	57
Abbildung 36: Messergebnisse von G1 am Bohrlochmessplatz.....	58
Abbildung 37: Messergebnisse von G2 am Bohrlochmessplatz.....	59
Abbildung 38: Messergebnisse von G3 am Bohrlochmessplatz.....	60
Abbildung 39: Messergebnisse von G4 am Bohrlochmessplatz.....	61
Abbildung 40: Messergebnisse von KS an der Uptake-Messsonde.....	62
Abbildung 41: Messergebnisse von K1 an der Uptake-Messsonde.....	63
Abbildung 42: Messergebnisse von K2 an der Uptake-Messsonde.....	64
Abbildung 43: Messergebnisse von K3 an der Uptake-Messsonde.....	65
Abbildung 44: Messergebnisse von K4 an der Uptake-Messsonde.....	66
Abbildung 45: Messergebnisse von GS an der Uptake-Messsonde.....	67

Abbildung 46: Messergebnisse von G1 an der Uptake-Messsonde.....	68
Abbildung 47: Messergebnisse von G2 an der Uptake-Messsonde.....	69
Abbildung 48: Messergebnisse von G3 an der Uptake-Messsonde.....	70
Abbildung 49: Messergebnisse von G4 an der Uptake-Messsonde.....	71

10. DANKSAGUNG

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. E. Henze, Leiter der Klinik für Nuklearmedizin im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel, für die Überlassung des Dissertationsthemas und die Bereitstellung des Arbeitsplatzes.

Mein größter Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. M. Zuhayra, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Klinik für Nuklearmedizin im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel, ohne dessen unermessliche Hilfe jedweder Art und unermüdlicher Geduld in jeder Hinsicht diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Ich danke Herrn Dr. Z. Soti, ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter der Klinik für Nuklearmedizin im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel, für die nette und kompetente Hilfe, die er mir bei mathematischen Fragestellungen entgegengebracht hat.

Herrn Andreas Gruber danke ich für die Lösung meiner EDV-Probleme und für die Hilfe bei der graphischen Darstellung der Ergebnisse.

Nicht zuletzt gilt ein ganz besonders lieber Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich zu jeder Zeit unterstützt und immer an mich geglaubt haben.

11.LEBENS LAUF

Name: Thea Imme

Geburtsdatum: 02. August 1982

Geburtsort: Kiel

Nationalität: deutsch

Eltern: Christian Imme, freischaffender Zeichner und Graphiker
Petra Imme, geborene Rudert, Ärztin für Allgemeinmedizin

Geschwister: Anna Imme, Diplom-Pädagogin
Leo Imme, Student der Sportwissenschaften

Familienstand: ledig

Schule: 1989 – 1993 Grund- und Hauptschule Rammsee
1993 – 2002 Kieler Gelehrtenschule
2002 Abitur

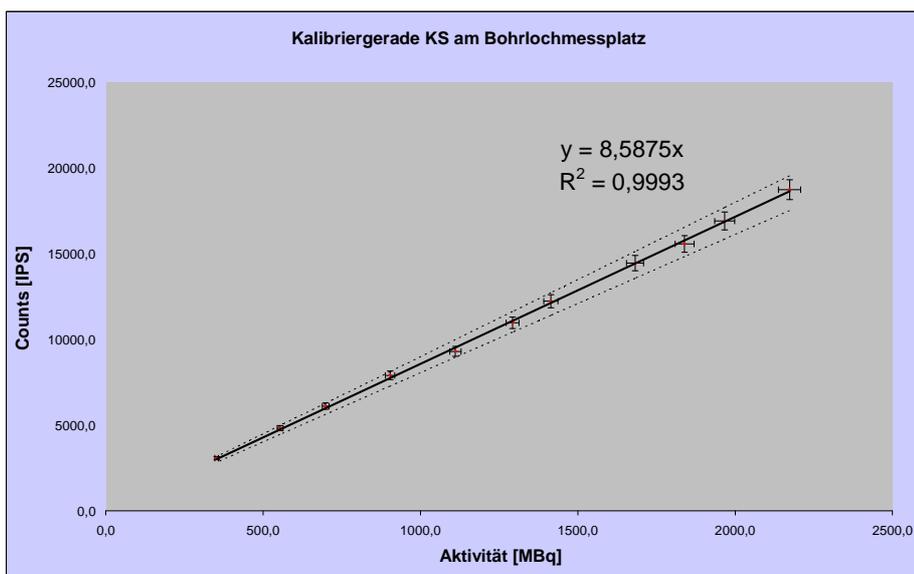
Universität: 2002 – 2008 Zahnmedizinstudium an der Christian-Albrechts-
Universität zu Kiel

Dissertation: 2006 – 2010 Ein neuer Ansatz zur Verifizierung angelieferter
Radioaktivität zur Radiojodtherapie.
Ein Beitrag zur Reduktion der Strahlenexposition
des Personals.
Klinik für Nuklearmedizin der Universität Kiel
Direktor: Prof. Dr. med. E. Henze

12. ANHÄNGE

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2172,7	18758,0
1966,8	16931,0
1839,3	15589,0
1682,1	14476,0
1414,3	12246,0
1292,7	10987,5
1111,1	9315,0
903,7	7922,0
699,0	6118,0
554,0	4830,0
352,5	3086,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
19578,71624	17549,22014
17722,85519	15885,73445
16574,59577	14856,50163
15157,8223	13586,58847
12744,47865	11423,40787
11648,69442	10441,21076
10012,58177	8974,694739
8143,494124	7299,353505
6298,904497	5645,970872
4992,465633	4474,955217
3176,844307	2847,538081



Aktivität [GBq]	Counts						Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1,0	2,0	3,0	4,0				
2176,20	18758,0	18236,0	17825,0	17916,0	18173,0	18181,6	365,03	2,0%	
1416,00	12246,0	11886,0	11423,0	11423,0	11791,0	11753,8	346,40	2,9%	
352,20	3086,0	2972,0	2865,0	2795,0	2803,0	2904,2	123,85	4,3%	

Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter

4,30%

μ(x _i)	μ(y _i)	μ²(x _i)	μ²(y _i)	x _i - x̄	y _i - ȳ	(y _i - ȳ)²	(x _i - x̄)²	(x _i - x̄)(y _i - ȳ)	[k² · (x _i - x̄)² - μ²(x)] / (S _{xx})²	[k² · (y _i - ȳ)² - μ²(y)] / (S _{yy})²
108,6360762	937,9	11801,8	879656,41	901,0	7825,4	61237027	811890,7	7051083	5,235E-02	5,522E-02
98,3384928	846,55	9670,46	716646,9	695,1	5998,4	35980912	483161,4	4169483	2,553E-02	2,643E-02
91,96716609	779,45	8457,96	607542,3	567,7	4656,4	21682146	322251	2643311	1,489E-02	1,350E-02
84,10594023	723,8	7073,81	523886,44	410,4	3543,4	12555748	168466,8	1454382	6,511E-03	6,743E-03
70,71506301	612,3	5000,62	374911,29	142,6	1313,4	1725043	20343,18	187331	5,558E-04	6,630E-04
64,63490446	549,375	4177,67	301812,89	21,0	54,9	3015,008	442,1068	1154,54	1,009E-05	9,328E-07
55,5566352	465,75	3086,54	216923,06	-160,5	-1617,6	2616600	25772,79	259687	4,346E-04	5,819E-04
45,18566165	396,1	2041,74	156895,21	-368,0	-3010,6	9063658	135393,5	1107773	1,510E-03	1,458E-03
34,95061985	305,9	1221,55	93574,81	-572,7	-4814,6	23180286	327938,7	2757121	2,189E-03	2,224E-03
27,70160566	241,5	767,379	58322,25	-717,6	-6102,6	37241616	515006,7	4379461	2,159E-03	2,227E-03
17,62729976	154,3	310,722	23808,49	-919,1	-7846,6	61568989	844792,2	7212004	1,434E-03	1,503E-03
Summe									0,10756725	1,106E-01

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1271,7$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 10932,6$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3655458,945$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 266855039,4$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 3,1E+07$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 7,4837E-14$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign}(S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{xy}}{S_{xx}}} = 8,54411$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 0,46704$$

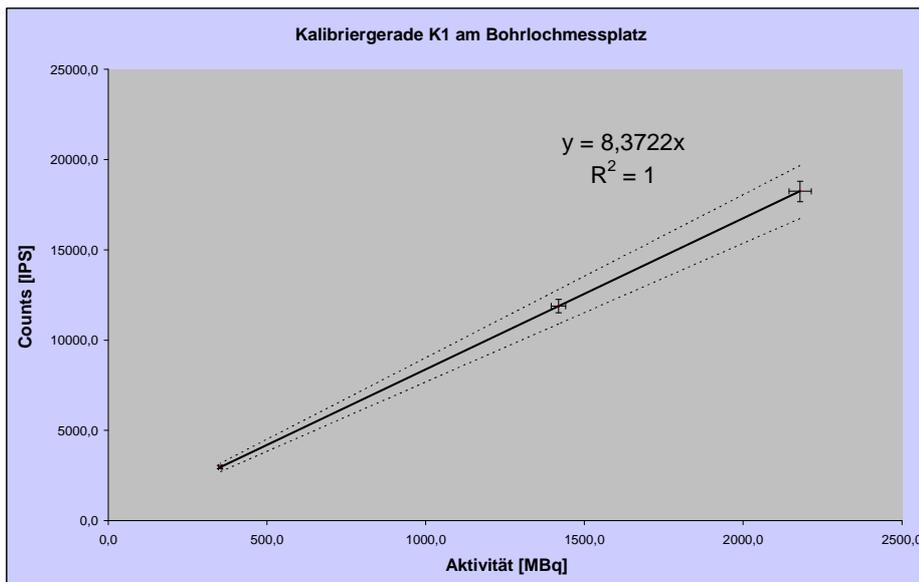
$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 5,5\% \quad 0,003$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 5,47\%$$

Abbildung 30: Messergebnisse von KS am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2179,4	18236,0
1418,5	11886,0
352,4	2972,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
19674,43604	16743,43296
12805,24883	10897,58431
3181,091216	2707,187511



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
2176,20	18758,0	18236,0	17825,0	17916,0	18173,0	18181,6	365,03	2,0%
1416,00	12246,0	11886,0	11423,0	11423,0	11791,0	11753,8	346,40	2,9%
352,20	3086,0	2972,0	2865,0	2795,0	2803,0	2904,2	123,85	4,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								4,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,9691172	911,8	11874,3	831379,2	862,6	7204,7	51907222	744148,4	6215036	2,174E-01	2,179E-01
70,92333716	594,3	5030,12	353192,5	101,7	854,7	730455,11	10347,93	86940,8	1,281E-03	1,302E-03
17,61883801	148,6	310,423	22081,96	-964,4	-8059,3	64952854	930000,2	7772141	7,102E-03	7,241E-03
Summe								0,225767253	2,264E-01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1316,7$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 11031,3$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1684496,601$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 117590530,7$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,4E+07$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 3,52419E-13$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 8,35509$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}} + \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}}} = 0,67244$$

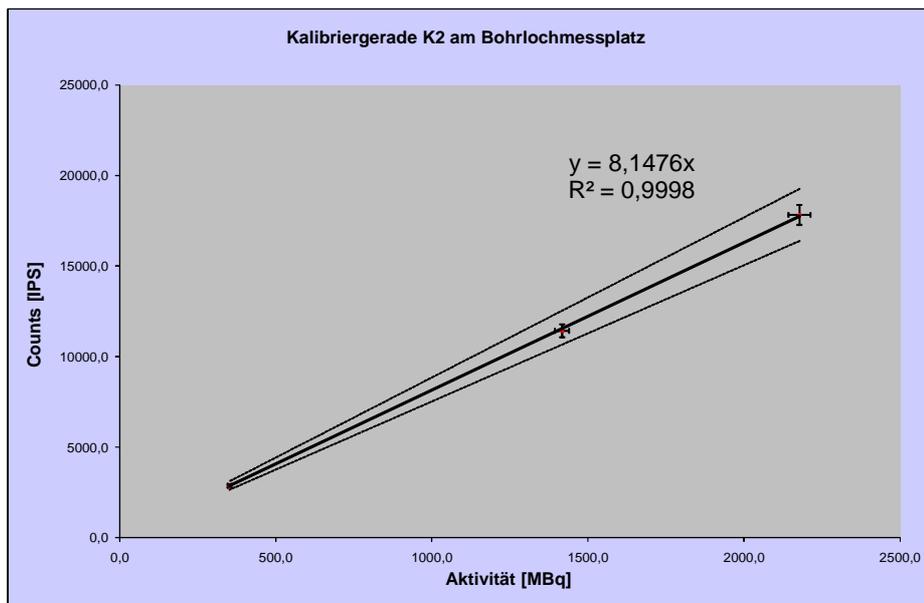
$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,0\% \quad 0,0065$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,05\%$$

Abbildung 31: Messergebnisse von K1 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2177,7	17825,0
1417,4	11423,0
352,1	2865,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
19263,23394	16384,98912
12537,61498	10664,28855
3114,418447	2649,072973



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
2176,20	18758,0	18236,0	17825,0	17916,0	18173,0	18181,6	365,03	2,0%
1416,00	12246,0	11886,0	11423,0	11423,0	11791,0	11753,8	346,40	2,9%
352,20	3086,0	2972,0	2865,0	2795,0	2803,0	2904,2	123,85	4,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								4,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,8841275	891,25	11855,8	794326,56	862,0	7120,7	5E+07	743000,3	6137834	2,086E-01	2,125E-01
70,86802105	571,15	5022,28	326212,32	101,7	718,7	516482	10333,23	73054,26	1,229E-03	8,890E-04
17,60403972	143,25	309,902	20520,563	-963,6	-7839,3	6E+07	928577,2	7554194	6,815E-03	6,654E-03
Summe									0,21665578	2,201E-01

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1315,7$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 10704,3$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1681910,732$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 112675522,7$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,4E+07$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 3,53504E-13$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign}(S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 8,184899$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 0,66085$$

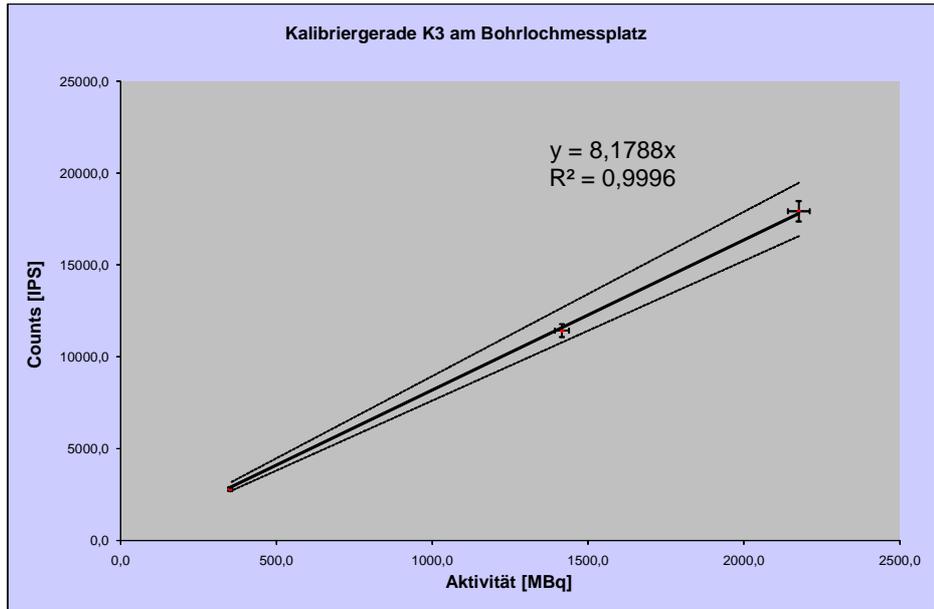
$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{8,07\%}}$$

Abbildung 32: Messergebnisse von K2 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2176,1	17916,0
1416,3	11423,0
351,8	2795,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
19463,95207	16562,94369
12668,25382	10780,11156
3146,869917	2677,844102



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
2176,20	18758,0	18236,0	17825,0	17916,0	18173,0	18181,6	365,03	2,0%
1416,00	12246,0	11886,0	11423,0	11423,0	11791,0	11753,8	346,40	2,9%
352,20	3086,0	2972,0	2865,0	2795,0	2803,0	2904,2	123,85	4,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								4,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(x_i - \bar{x})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,8057344	895,8	11838,7	802457,64	861,4	7204,7	5E+07	741930,8	6205769	2,134E-01	2,155E-01
70,81699831	571,15	5015,05	326212,32	101,6	711,7	506469	10318,36	72290,6	1,257E-03	8,548E-04
17,59136537	139,75	309,456	19530,063	-962,9	-7916,3	6E+07	927240,6	7622901	6,971E-03	6,332E-03
Summe									0,22160205	2,227E-01

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1314,8$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 10711,3$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign}(S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 8,2778$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}} + \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}}} = 0,66656$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1679489,758$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 115082024,7$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,4E+07$$

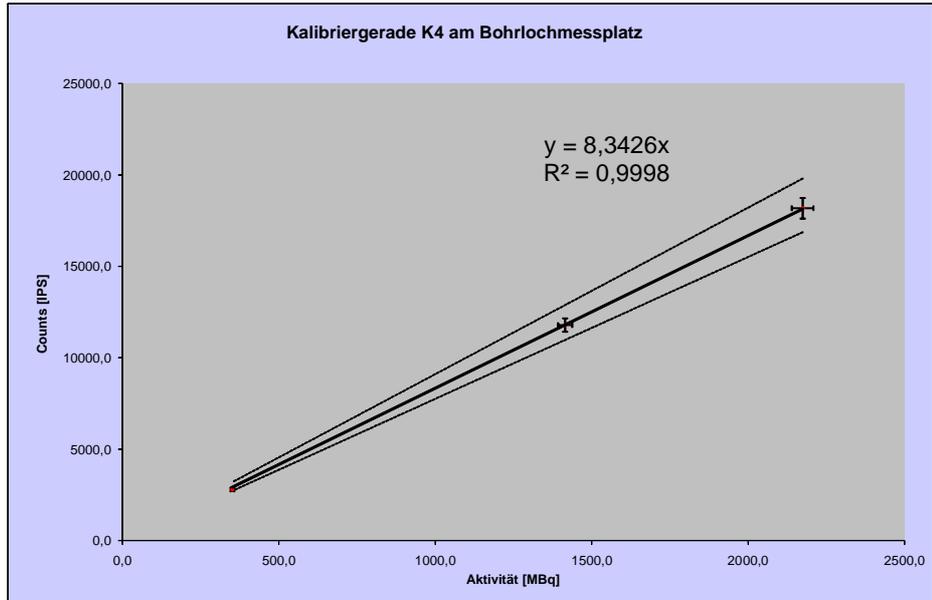
$$\frac{1}{S_{xx}} = 3,54524E-13$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,05\%$$

Abbildung 33: Messergebnisse von K3 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2174,5	18173,0
1415,3	11791,0
351,6	2803,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
19802,98476	16870,11498
12888,9157	10980,03621
3201,491489	2727,342882



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
2176,20	18758,0	18236,0	17825,0	17916,0	18173,0	18181,6	365,03	2,0%
1416,00	12246,0	11886,0	11423,0	11423,0	11791,0	11753,8	346,40	2,9%
352,20	3086,0	2972,0	2865,0	2795,0	2803,0	2904,2	123,85	4,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								4,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,7273977	908,65	11821,6	825644,82	860,7	7250,7	5E+07	740874,9	6240945	2,214E-01	2,170E-01
70,7660123	589,55	5007,83	347569,2	101,5	868,7	754582	10304,93	88181,1	1,305E-03	1,311E-03
17,57764512	140,15	308,974	19642,023	-962,3	-8119,3	7E+07	925933	7812862	7,232E-03	6,474E-03
Summe								0,229945975	2,248E-01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1313,8$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 8,43235$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 10922,3$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{\sum k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{\sum k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 0,67436$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1677112,877$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,0\% \quad 0,0064$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 119250322,7$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,4E+07$$

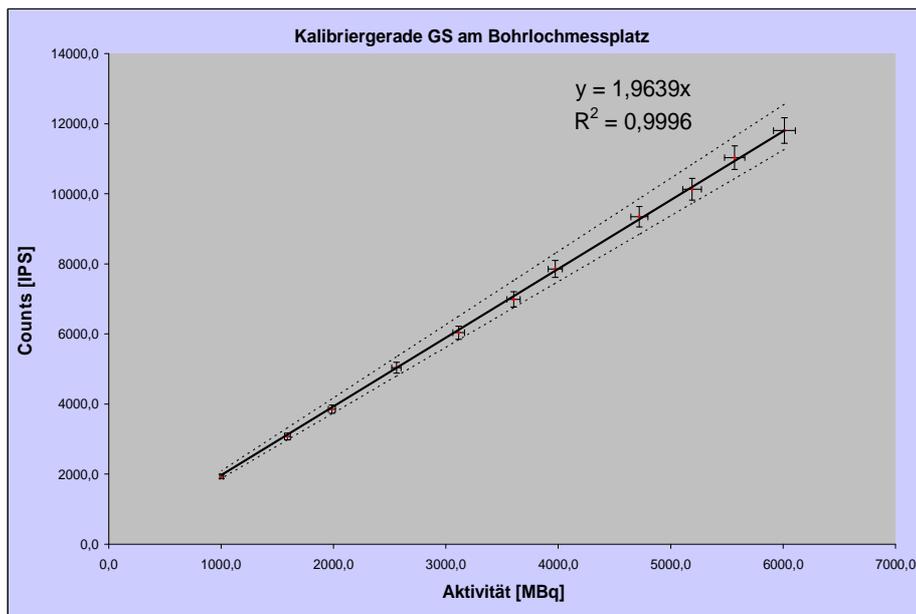
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 3,55529E-13$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,00\%$$

Abbildung 34: Messergebnisse von K4 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
6010,8	11804,0
5568,7	11032,0
5190,3	10131,0
4720,7	9345,0
3972,9	7855,0
3602,9	6986,5
3114,0	6034,0
2560,2	5037,0
1986,2	3850,0
1591,0	3073,0
1004,2	1936,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
12558,06993	11265,23428
11634,40227	10436,65691
10843,92724	9727,560173
9862,682377	8847,333087
8300,514815	7445,98848
7527,366551	6752,434743
6505,965853	5836,185811
5348,813984	4798,161102
4149,706903	3722,500409
3323,91428	2981,721976
2098,066439	1882,073447



Aktivität [GBq]	Counts						Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1,0	2,0	3,0	4,0				
6001,40	11804,0	11901,0	12026,0	12739,0	11880,0	12070,0	382,40	3,2%	
3979,00	7855,0	7792,0	7764,0	8269,0	7780,0	7892,0	213,56	2,7%	
1002,80	1936,0	2031,0	2051,0	2057,0	1963,0	2007,6	54,74	2,7%	
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%	

μ(x _i)	μ(y _i)	μ²(x _i)	μ²(y _i)	x _i - x̄	y _i - ȳ	(y _i - ȳ)²	(x _i - x̄)²	(x̄ - x̄)(ȳ - ȳ)	[k² · (x _i - x̄)² · μ²(x)] / (S _{xx})²	[k² · (y _i - ȳ)² · μ²(y)] / (S _{yy})²
300,5390225	590,2	90323,7	348336,0	2436,1	4796,4	23005540	5934432	1,2E+07	2,628E-03	2,548E-03
278,4338602	551,6	77525,4	304262,6	1994,0	4024,4	16195869	3975900	8024534	1,511E-03	1,567E-03
259,5162563	506,55	67348,7	256592,9	1615,6	3123,4	9755684,3	2610208	5046223	8,620E-04	7,958E-04
236,0331594	467,25	55711,7	218322,6	1146,0	2337,4	5463481,3	1313205	2678558	3,587E-04	3,792E-04
198,6474532	392,75	39460,8	154252,6	398,2	847,4	718102,17	158593,2	337470	3,069E-05	3,522E-05
180,1445125	349,325	32452	122028,0	28,2	-21,1	444,82645	794,0469	-594,32	1,263E-07	1,726E-08
155,7004085	301,7	24242,6	91022,9	-460,7	-973,6	947879,26	212247,5	448536	2,523E-05	2,743E-05
128,0075151	251,85	16385,9	63428,4	-1014,6	-1970,6	3883228,5	1029334	1999285	8,270E-05	7,831E-05
99,31055197	192,5	9862,59	37056,3	-1588,5	-3157,6	9970380,3	2523333	5015834	1,220E-04	1,175E-04
79,54772941	153,65	6327,84	23608,3	-1983,8	-3934,6	15481006	3935291	7805272	1,221E-04	1,162E-04
50,21080789	96,8	2521,13	9370,2	-2570,5	-5071,6	25721034	6607446	1,3E+07	8,168E-05	7,662E-05
Summe									0,005824837	5,741E-03

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3574,7$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 7007,6$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 28300784,49$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 411142649,4$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 5,6E+07$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 4,24854E-15$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign}(S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 1,98171$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)}{S_{yy}^2}} = 0,10754$$

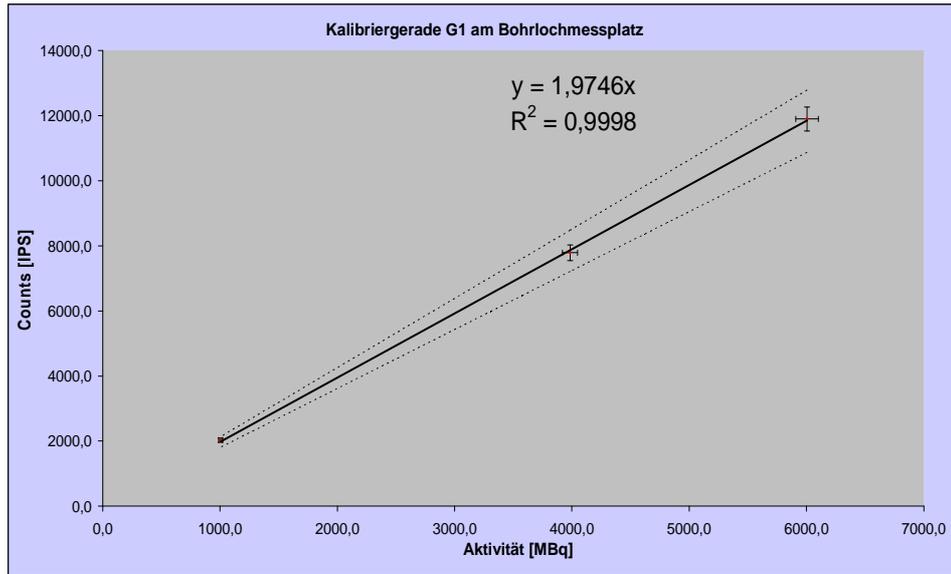
$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 5,4\% \quad 0,0029$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 5,43\%$$

Abbildung 35: Messergebnisse von GS am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
6005,7	11901,0
3984,7	7792,0
1003,7	2031,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
12789,89762	10876,86861
8485,771876	7216,52577
2137,56733	1817,844027



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
6001,40	11804,0	11901,0	12026,0	12739,0	11880,0	12070,0	382,40	3,2%
3979,00	7855,0	7792,0	7764,0	8269,0	7780,0	7892,0	213,56	2,7%
1002,80	1936,0	2031,0	2051,0	2057,0	1963,0	2007,6	54,74	2,7%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
300,2865959	595,05	90172	354084,5	2341,0	4659,7	2000000	5480405	1E+07	1,196E-02	1,235E-02
199,2325214	389,6	39693,6	151788,2	319,9	550,7	303234	102365	176183	9,837E-05	7,393E-05
50,18670487	101,55	2518,71	10312,4	-2661,0	-5210,3	3000000	7080769	1E+07	4,318E-04	4,497E-04
Summe								0,012493676	1,287E-02	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3664,7$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 1,9703$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 7241,3$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{\sum k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}} + \frac{\sum k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}}} = 0,15927$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12663538,25$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,006533791$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 49163300,67$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 2,5E+07$$

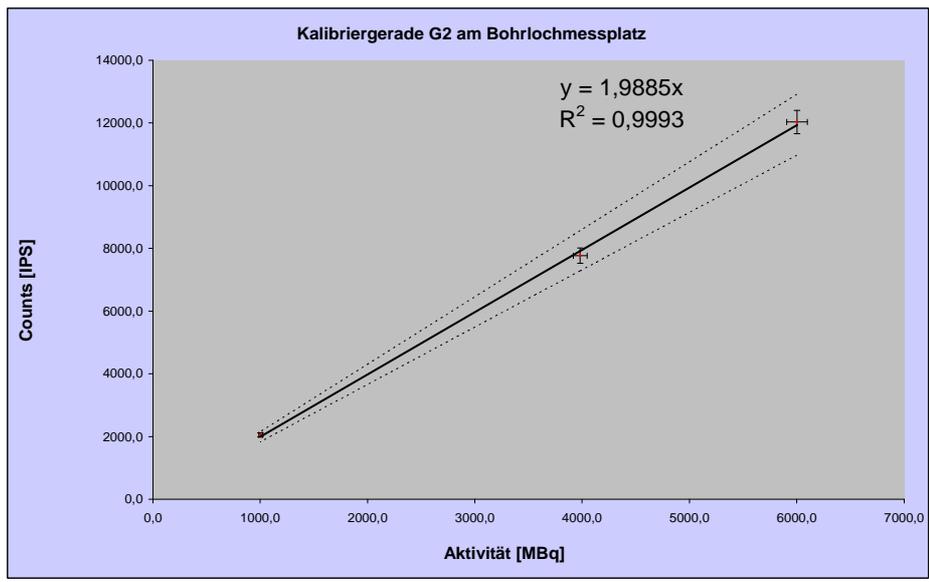
$$\frac{1}{S_{xx}} = 6,23577E-15$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,08\%$$

Abbildung 36: Messergebnisse von G1 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
6001,4	12026,0
3981,5	7764,0
1002,9	2051,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
12915,27254	10975,71781
8568,440664	7281,672647
2158,26207	1834,144449



Aktivität [GBq]	Counts						Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1,0	2,0	3,0	4,0				
6001,40	11804,0	11901,0	12026,0	12739,0	11880,0	12070,0	382,40	3,2%	
3979,00	7855,0	7792,0	7764,0	8269,0	7780,0	7892,0	213,56	2,7%	
1002,80	1936,0	2031,0	2051,0	2057,0	1963,0	2007,6	54,74	2,7%	
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%	

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
300,070399	601,3	90042,2	361561,69	2339,5	4745,7	22521352	5473077	1,1E+07	1,221E-02	1,285E-02
199,0771315	388,2	39631,7	150699,24	319,6	483,7	233933,4	102141,2	154578	1,003E-04	5,564E-05
50,14455242	102,55	2514,48	10516,503	-2659,1	-5229,3	27345927	7070580	1,4E+07	4,405E-04	4,539E-04
Summe								0,01274996	1,336E-02	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3661,9$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 7280,3$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12645797,6$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 50101212,67$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 2,5E+07$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,25328E-15$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign}(S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 1,99045$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 0,16159$$

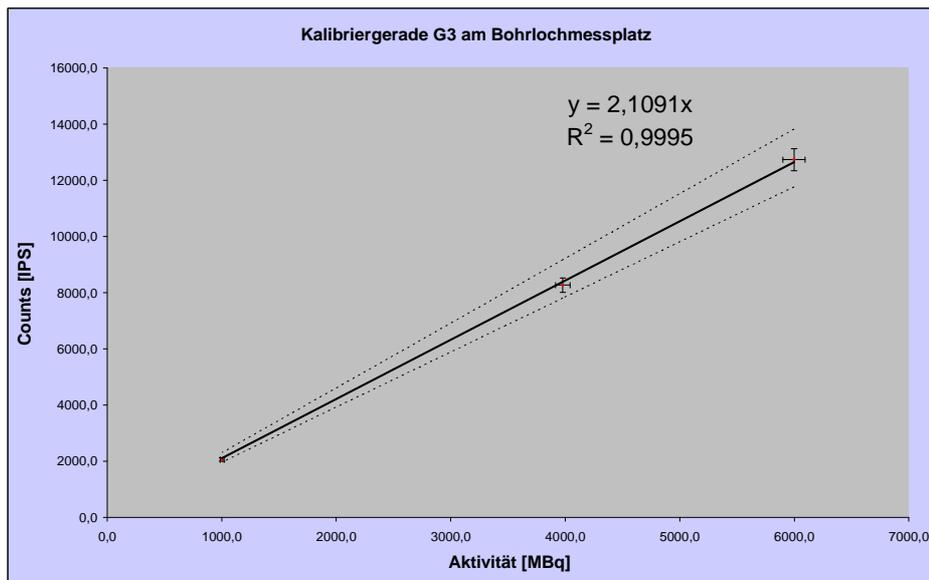
$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0066$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \mathbf{8,12\%}$$

Abbildung 37: Messergebnisse von G2 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
5997,1	12739,0
3978,7	8269,0
1002,2	2057,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
13832,97961	11774,66274
9177,279429	7811,720483
2311,758196	1967,773673



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
6001,40	11804,0	11901,0	12026,0	12739,0	11880,0	12070,0	382,40	3,2%
3979,00	7855,0	7792,0	7764,0	8269,0	7780,0	7892,0	213,56	2,7%
1002,80	1936,0	2031,0	2051,0	2057,0	1963,0	2007,6	54,74	2,7%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
299,8543578	636,95	89912,6	405705,3	2337,8	5050,7	25509234	5465105	1,2E+07	1,405E-02	1,424E-02
198,9338022	413,45	39574,7	170940,9	319,3	580,7	337173,8	101981,4	185433	1,154E-04	7,930E-05
50,11145747	102,85	2511,16	10578,123	-2657,1	-5631,3	31711915	7060189	1,5E+07	5,068E-04	4,615E-04
Summe									0,014669694	1,478E-02

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3659,3$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 2,13501$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 7688,3$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)}{S_{xx}} + \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)}{S_{yy}}} = 0,17161$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12627275,35$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,0\% \quad 0,006460785$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 57558322,67$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 2,7E+07$$

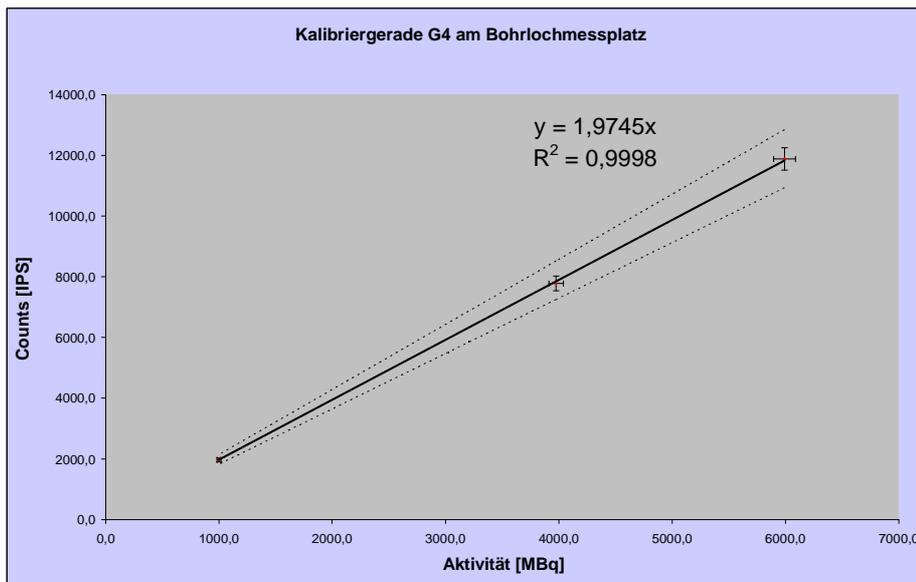
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,27163E-15$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,04\%$$

Abbildung 38: Messergebnisse von G3 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
5992,1	11880,0
3975,8	7780,0
1001,4	1963,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
12849,8773	10936,84463
8526,078585	7256,753867
2147,462804	1827,758078



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
6001,40	11804,0	11901,0	12026,0	12739,0	11880,0	12070,0	382,40	3,2%
3979,00	7855,0	7792,0	7764,0	8269,0	7780,0	7892,0	213,56	2,7%
1002,80	1936,0	2031,0	2051,0	2057,0	1963,0	2007,6	54,74	2,7%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
299,6025063	594	89761,7	352836	2335,6	4672,3	21830699	5455185	1,1E+07	1,214E-02	1,230E-02
198,7905762	389	39517,7	151321	319,4	572,3	327565,44	102013,3	182801	9,994E-05	7,917E-05
50,06936821	98,15	2506,94	9633,4225	-2655,0	-5244,7	27506528	7049179	1,4E+07	4,381E-04	4,232E-04
								Summe	0,01267689	1,281E-02

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3656,4$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 7207,7$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12606377,33$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 49664792,67$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 2,5E+07$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,29244E-15$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1 \quad k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 1,98486$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 0,15963$$

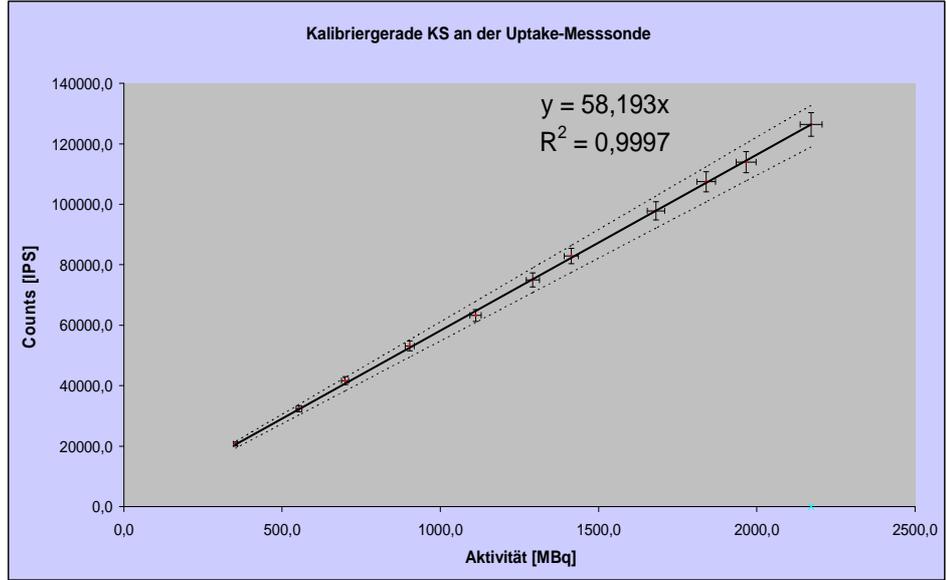
$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,0\% \quad 0,0065$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{8,04\%}}$$

Abbildung 39: Messergebnisse von G4 am Bohrlochmessplatz

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2171,8	126393,0
1965,9	113939,0
1840,3	107434,0
1681,5	97840,0
1413,8	82885,0
1292,2	74958,0
1111,3	63243,0
903,4	53123,0
699,3	41643,0
553,8	32379,0
352,6	20761,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
132725,8987	119019,6375
120144,8477	107737,7992
112468,6449	100854,2981
102762,4239	92150,41351
86401,16577	77478,74026
78972,29893	70817,03334
67916,9536	60903,34501
55208,80102	49507,53056
42734,17685	38321,12864
33844,37873	30349,35704
21550,33961	19324,89163



Aktivität [GBq]	Counts							
	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
2173,00	126393,0	122390,0	121098,0	118026,00	120759,0	121733,2	3051,27	2,5%
1414,50	82885,0	79415,0	79119,0	75707,00	79554,0	79336,0	2542,93	3,2%
352,00	20761,0	20273,0	20199,0	19550,00	20168,0	20190,2	431,01	2,1%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,5904442	6319,65	11791,88	39937976,1	900,4	52338,6	2739332856	810631	4,7E+07	2,406E+00	2,440E+00
98,29718624	5696,95	9662,337	32455239,3	694,5	39884,6	1590784218	482310	2,8E+07	1,173E+00	1,152E+00
92,01685749	5371,7	8467,102	28855160,9	568,9	33379,6	1114200124	323623	1,9E+07	6,897E-01	7,172E-01
84,07565796	4892	7068,716	23931664	410,1	23785,6	565756497,2	168145	9753413	2,992E-01	3,020E-01
70,68960212	4144,25	4997,02	17174808,1	142,3	8830,6	77980138,59	20258,9	1256897	2,548E-02	2,988E-02
64,61163273	3747,9	4174,663	14046754,4	20,8	903,6	816558,6777	431,569	18772,4	4,535E-04	2,559E-04
55,56663946	3162,15	3087,651	9999192,62	-160,1	-10811,4	116885583,7	25640,2	1731176	1,993E-02	2,607E-02
45,1693926	2656,15	2040,274	7055132,82	-368,1	-20931,4	438121983,7	135476	7704219	6,957E-02	6,895E-02
34,96320832	2082,15	1222,426	4335348,62	-572,2	-32411,4	1050496493	327406	1,9E+07	1,007E-01	1,016E-01
27,68996975	1618,95	766,7344	2620999,1	-717,7	-41675,4	1736835934	515034	3E+07	9,939E-02	1,015E-01
17,63153215	1038,05	310,8709	1077547,8	-918,8	-53293,4	2840182608	844244	4,9E+07	6,606E-02	6,827E-02
Summe									4,949319324	5,008E+00

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1271,5$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign}(S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 57,9576$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 74054,4$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i) + \sum_{i=1}^n k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{xx}^2 + S_{yy}^2}} = 3,15549$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 3653200,507$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 5,4\% \quad 0,003$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 12271392995$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 2,12E+08$$

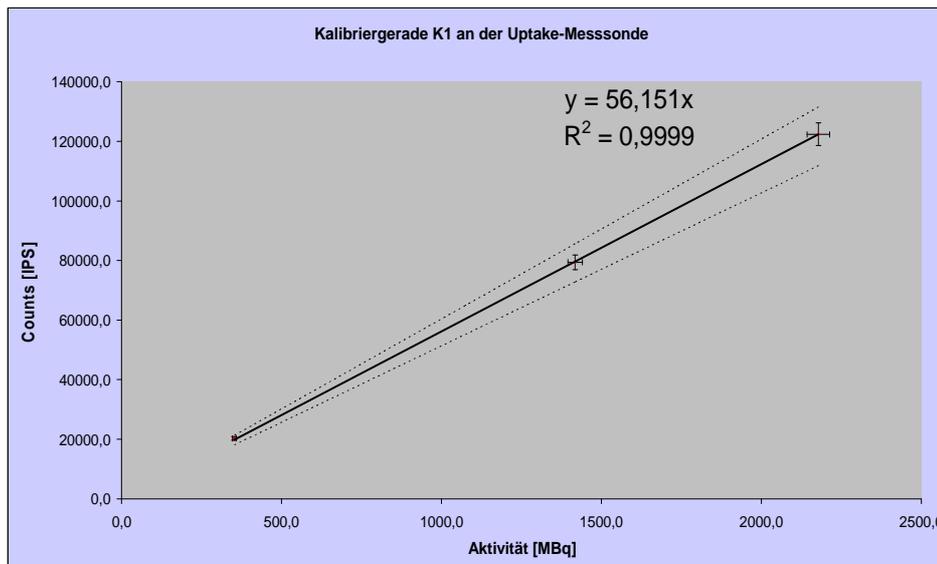
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 7,49295E-14$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 5,44\%$$

Abbildung 40: Messergebnisse von KS an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2178,7	122390,0
1418,0	79415,0
352,2	20273,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
131591,2019	111917,8365
85641,94415	72838,16064
21275,24734	18094,52015



Aktivität [GBq]	Counts						Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1,0	2,0	3,0	4,0				
2173,00	126393,0	122390,0	121098,0	118026,00	120759,0	121733,2	3051,27	2,5%	
1414,50	82885,0	79415,0	79119,0	75707,00	79554,0	79336,0	2542,93	3,2%	
352,00	20761,0	20273,0	20199,0	19550,00	20168,0	20190,2	431,01	2,1%	
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter									
								3,20%	

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,936421	6119,5	11867,14	37448280	862,4	48364,0	2339076496	743763	4,2E+07	9,726E+00	9,896E+00
70,89780128	3970,75	5026,498	15766856	101,6	5389,0	29041321	10331,62	5,722E-02	5,173E-02	5,173E-02
17,61249436	1013,65	310,2	1027486,3	-964,1	-53753,0	2889385009	929414,7	5,2E+07	3,177E-01	3,354E-01
Summe								10,1004382	1,028E+01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1316,3$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 55,8833$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 74026,0$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{\sum k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{\sum k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 4,51487$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1683509,346$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 5257502826$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 94078898$$

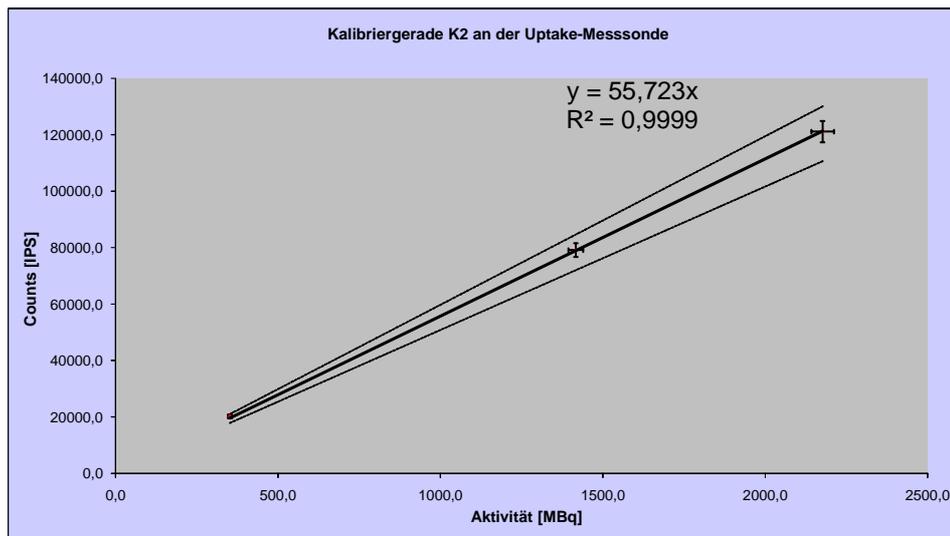
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 3,52833E-13$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{8,08\%}}$$

Abbildung 41: Messergebnisse von K1 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2176,9	121098,0
1416,9	79119,0
352,0	20199,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
130078,7915	110651,7511
84662,72124	72018,4916
21031,98793	17890,89724



Aktivität [GBq]	Counts							
	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
2173,00	126393,0	122390,0	121098,0	118026,00	120759,0	121733,2	3051,27	2,5%
1414,50	82885,0	79415,0	79119,0	75707,00	79554,0	79336,0	2542,93	3,2%
352,00	20761,0	20273,0	20199,0	19550,00	20168,0	20190,2	431,01	2,1%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,8449239	6054,9	11847,22	36661814	861,7	47626,0	2268235876	742453,19	4,1E+07	9,520E+00	9,630E+00
70,84250508	3955,95	5018,661	15649540	101,6	5647,0	31888609	10324,36	573785	5,608E-02	5,779E-02
17,59875763	1009,95	309,7163	1019999	-963,3	-53273,0	2838012529	927881,56	5,1E+07	3,110E-01	3,352E-01
Summe								9,887460999	1,002E+01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1315,2$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 55,2921$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 73472,0$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (\bar{x} - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(x) + k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)}{S_{xx}^2 + S_{yy}^2}} = 4,46209$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1680659,112$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 5138137014$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 92927147$$

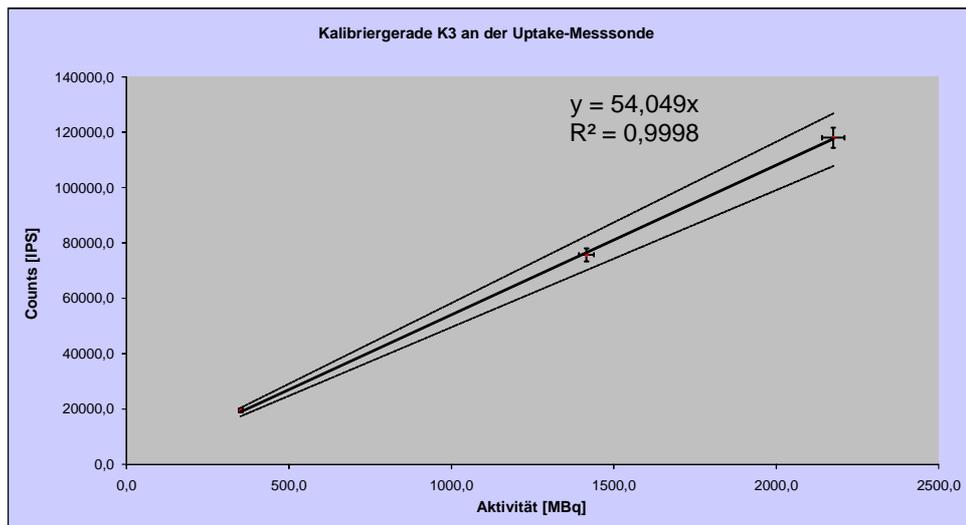
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 3,54031E-13$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,07\%$$

Abbildung 42: Messergebnisse von K2 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2175,5	118026,0
1415,8	75707,0
351,7	19550,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
126821,4069	107798,756
82537,67493	70157,38826
20504,08205	17428,56031



Aktivität [GBq]	S	Counts				Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
		1,0	2,0	3,0	4,0			
2173,00	126393,0	122390,0	121098,0	118026,00	120759,0	121733,2	3051,27	2,5%
1414,50	82885,0	79415,0	79119,0	75707,00	79554,0	79336,0	2542,93	3,2%
352,00	20761,0	20273,0	20199,0	19550,00	20168,0	20190,2	431,01	2,1%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,7730872	5901,3	11831,58	34825342	861,1	46931,7	2202581336	741534,4	4E+07	9,056E+00	9,363E+00
70,79150071	3785,35	5011,437	14328875	101,5	4612,7	21276693,78	10300,66	468150	5,328E-02	3,722E-02
17,58608708	977,5	309,2705	955506,25	-962,6	-51544,3	2656818299	926629,7	5E+07	2,958E-01	3,099E-01
Summe								9,404679593	9,711E+00	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1314,3$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign}(S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 53,9242$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 71094,3$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)}{S_{xx}} + \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)}{S_{yy}}} = 4,37210$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1678464,794$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0066$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 4880676329$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 90499535$$

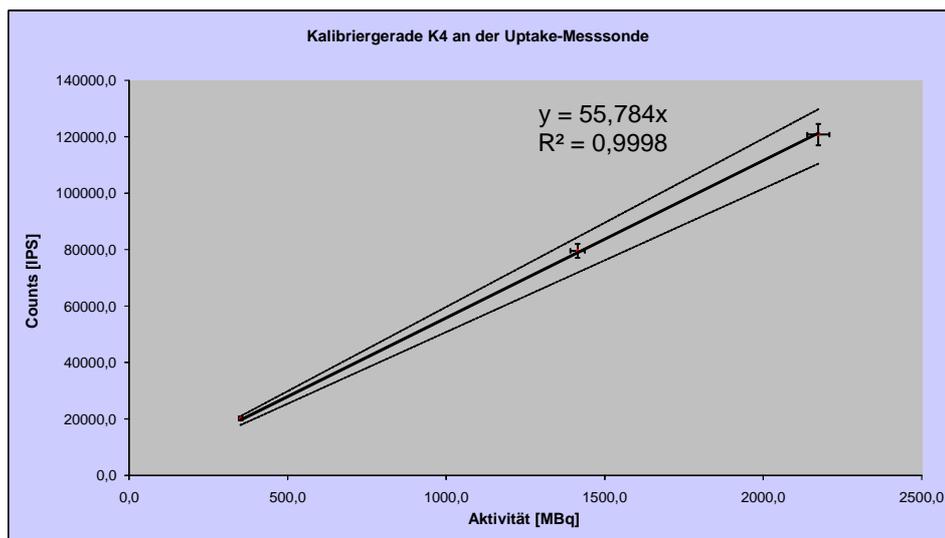
$$\frac{1}{S_{xx}} = 3,54957E-13$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{8,11\%}}$$

Abbildung 43: Messergebnisse von K3 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
2173,8	120759,0
1414,8	79554,0
351,4	20168,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
129750,4634	110416,7641
84449,0265	71865,54865
20976,38358	17850,76012



Aktivität [GBq]	Counts						Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1,0	2,0	3,0	4,0				
2173,00	126393,0	122390,0	121098,0	118026,0	120759,0	121733,2	3051,27	2,5%	
1414,50	82885,0	79415,0	79119,0	75707,0	79554,0	79336,0	2542,93	3,2%	
352,00	20761,0	20273,0	20199,0	19550,0	20168,0	20190,2	431,01	2,1%	
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								3,20%	

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{x})(\bar{y} - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
108,6882505	6037,95	11813,14	36456840	860,4	47265,3	2234011735	740342	40668559	9,503E+00	9,502E+00
70,74053307	3977,7	5004,223	15822097	101,5	6060,3	36727640,11	10297,5	614982,4	5,599E-02	6,780E-02
17,5713163	1008,4	308,7512	1016870,6	-961,9	-53325,7	2843626725	925266	51294368	3,104E-01	3,374E-01
Summe								9,868947841	9,907E+00	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1313,3$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign}(S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 55,24222$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 73493,7$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 4,44705$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1675905,409$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 5114366101$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 92577909$$

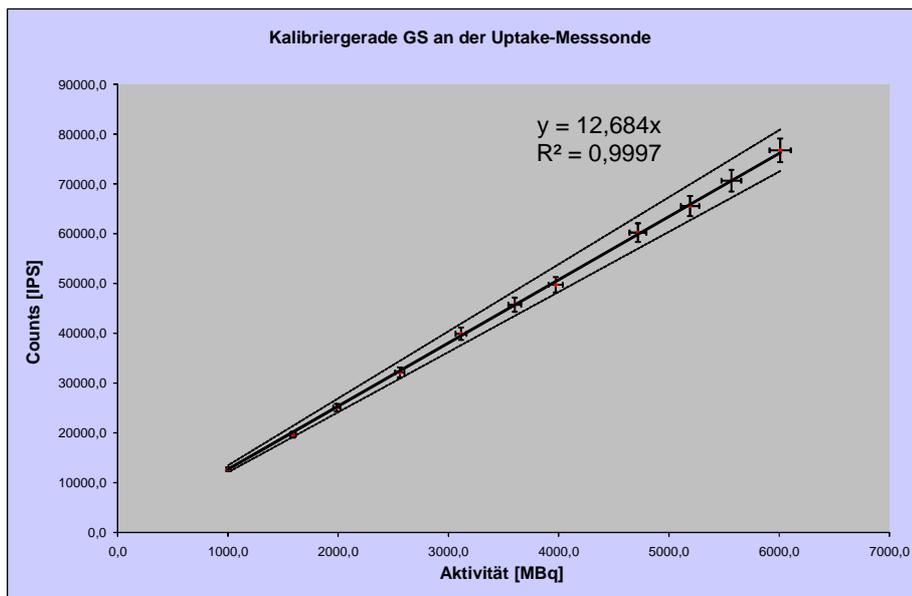
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 3,56042E-13$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 8,05\%$$

Abbildung 44: Messergebnisse von K4 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
6009,0	76715,0
5566,3	70634,0
5191,9	65539,0
4719,0	60209,0
3971,8	49739,0
3601,6	45724,0
3115,1	39905,0
2559,2	32119,0
1986,9	25083,0
1590,5	19675,0
1004,5	12684,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
80913,00528	72564,95497
74952,71678	67219,60826
69910,54524	62697,65348
63542,51737	56986,63516
53481,11637	47963,30067
48496,72752	43493,16696
41946,32714	37618,59209
34460,91971	30905,47778
26754,66906	23994,30535
21416,33987	19206,74844
13526,18525	12130,64599



Aktivität [GBq]	Counts							
	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
5999,60	76715,0	78315,0	76435,0	79333,0	75523,0	77264,2	1533,39	2,0%
3977,40	49739,0	49768,0	51151,0	51717,0	48855,0	50246,0	1162,25	2,3%
1002,80	12684,0	12599,0	12705,0	13275,0	12574,0	12767,4	289,08	2,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								2,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 - \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 - \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
300,4488458	3835,75	90269,5	14712978	2434,8	31439,9	1E+09	5928320	7,7E+07	1,091E-01	1,115E-01
278,3169055	3531,7	77460,3	12472905	1992,2	25358,9	6E+08	3968762	5,1E+07	6,268E-02	6,149E-02
259,5941475	3276,95	67389,1	10738401	1617,7	20263,9	4E+08	2617018	3,3E+07	3,596E-02	3,380E-02
235,9481759	3010,45	55671,5	9062809	1144,8	14933,9	2E+08	1310569	1,7E+07	1,488E-02	1,549E-02
198,5878491	2486,95	39437,1	6184920	397,6	4463,9	2E+07	158081,1	1774824	1,271E-03	9,448E-04
180,0796517	2286,2	32428,7	5226710	27,4	448,9	201519	752,4166	12313,7	4,975E-06	8,074E-06
155,7564885	1995,25	24260,1	3981023	-459,0	-5370,1	3E+07	210711,3	2465049	1,042E-03	8,801E-04
127,9614262	1605,95	16374,1	2579075	-1014,9	-13156,1	2E+08	1030092	1,3E+07	3,439E-03	3,422E-03
99,34632152	1254,15	9869,69	1572892	-1587,2	-20192,1	4E+08	2519319	3,2E+07	5,070E-03	4,916E-03
79,52386112	983,75	6324,04	967764,1	-1983,7	-25600,1	7E+08	3935009	5,1E+07	5,074E-03	4,862E-03
50,22587816	634,2	2522,64	402209,6	-2569,6	-32591,1	1E+09	6603077	8,4E+07	3,396E-03	3,275E-03
Summe									0,241935345	2,406E-01

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3574,2$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 12,7707$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 45275,1$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 0,69463$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 28281710,28$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 5,4\% \quad 0,003$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 4612502811$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 3,6E+08$$

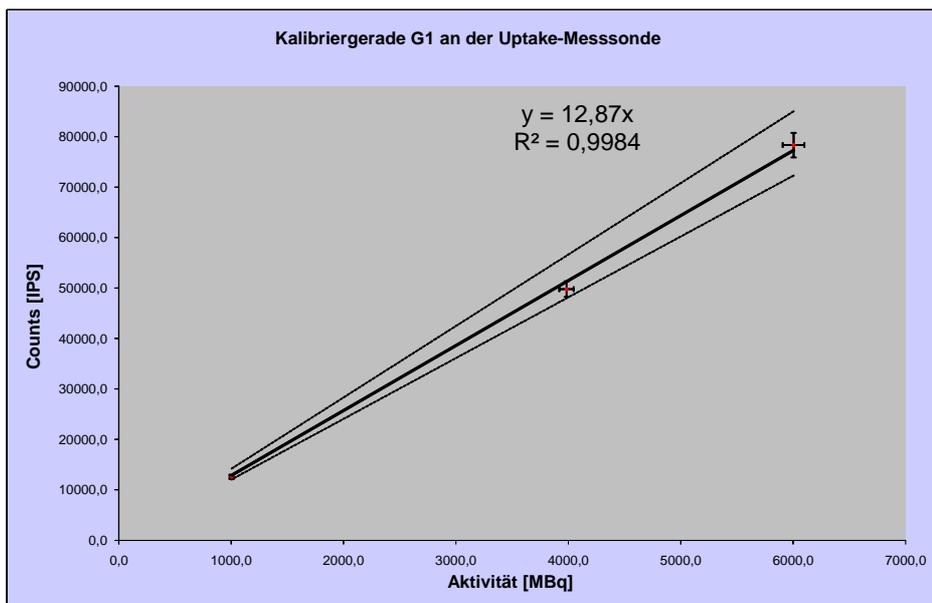
$$\frac{1}{S_{xx}} = 1,25023E-15$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{5,44\%}}$$

Abbildung 45: Messergebnisse von GS an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
6003,9	78315,0
3983,5	49768,0
1003,4	12599,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
85005,90146	72287,83799
56399,25429	47961,14254
14206,12876	12080,69459



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
5999,60	76715,0	78315,0	76435,0	79333,0	75523,0	77264,2	1533,39	2,0%
3977,40	49739,0	49768,0	51151,0	51717,0	48855,0	50246,0	1162,25	2,3%
1002,80	12684,0	12599,0	12705,0	13275,0	12574,0	12767,4	289,08	2,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								2,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 - \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 - \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
300,196495	3915,75	90117,9	15333098	2340,3	31421,0	1E+09	5477210	7,4E+07	5,288E-01	5,508E-01
199,1727417	2488,4	39669,8	6192134,6	319,9	2874,0	8E+06	102316,2	919304	4,348E-03	1,861E-03
50,16863519	629,95	2516,89	396837	-2660,2	-34295,0	1E+09	7076734	9,1E+07	1,908E-02	1,698E-02
Summe								0,552179332	5,696E-01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3663,6$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{xy}}{S_{xx}}} = 13,0992$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 46894,0$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 1,05914$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12656260,42$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 2171686142$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,7E+08$$

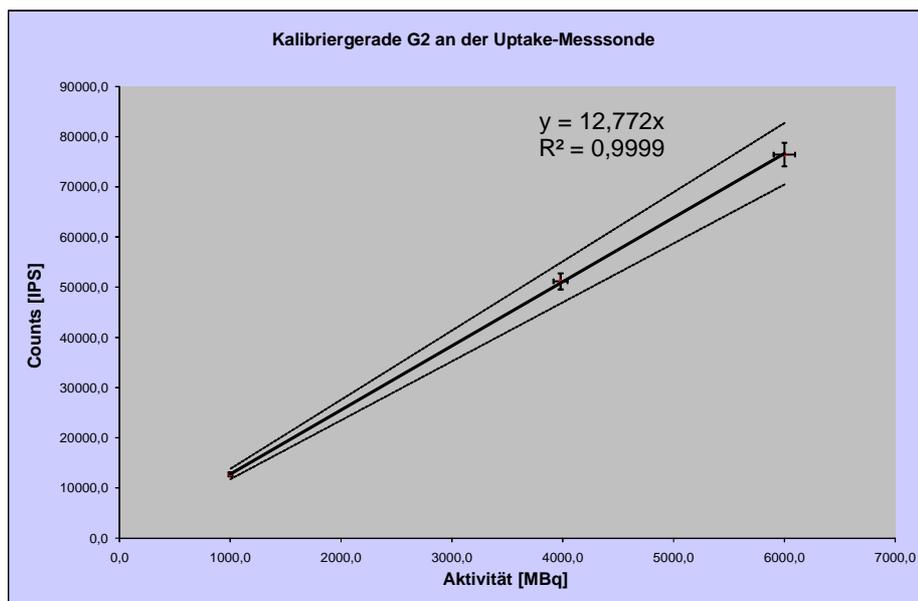
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,24294E-15$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \mathbf{8,09\%}$$

Abbildung 46: Messergebnisse von G1 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
5999,6	76435,0
3980,3	51151,0
1002,6	12705,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
82712,61514	70468,27351
54874,42351	46751,10173
13822,04669	11775,90341



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
5999,60	76715,0	78315,0	76435,0	79333,0	75523,0	77264,2	1533,39	2,0%
3977,40	49739,0	49768,0	51151,0	51717,0	48855,0	50246,0	1162,25	2,3%
1002,80	12684,0	12599,0	12705,0	13275,0	12574,0	12767,4	289,08	2,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								2,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{y})(x_i - \bar{x})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
299,980363	3821,75	89988,2	14605773	2338,8	29671,3	9E+08	5469793	6,9E+07	5,022E-01	4,940E-01
199,0173984	2557,55	39607,9	6541062	319,5	4387,3	2E+07	102079,9	1401751	4,125E-03	4,837E-03
50,12950655	635,25	2512,97	403542,56	-2658,3	-34058,7	1E+09	7066337	9,1E+07	1,812E-02	1,798E-02
Summe								0,524457559	5,168E-01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3660,8$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \cdot \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 12,7659$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 46763,7$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \frac{k^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 1,02043$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12638210$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,0\% \quad 0,0064$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 2059629491$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,6E+08$$

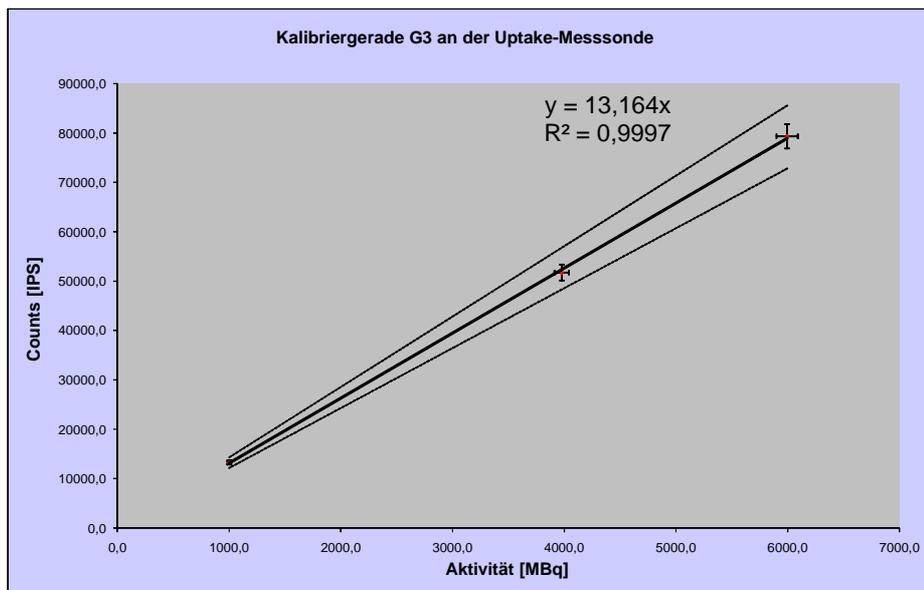
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,26079E-15$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = 7,99\%$$

Abbildung 47: Messergebnisse von G2 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
5995,3	79333,0
3977,2	51717,0
1001,9	13275,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
85572,3075	72792,44497
56768,23553	48290,13944
14299,92786	12164,29406



Counts								
Aktivität [GBq]	S	1,0	2,0	3,0	4,0	Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
5999,60	76715,0	78315,0	76435,0	79333,0	75523,0	77264,2	1533,39	2,0%
3977,40	49739,0	49768,0	51151,0	51717,0	48855,0	50246,0	1162,25	2,3%
1002,80	12684,0	12599,0	12705,0	13275,0	12574,0	12767,4	289,08	2,3%
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								2,30%

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
299,7643866	3966,65	89858,7	15734312	2337,2	31224,7	1E+09	5462291	7,3E+07	5,376E-01	5,522E-01
198,8621763	2585,85	39546,2	6686620,2	319,1	3608,7	1E+07	101831,4	1151563	4,411E-03	3,134E-03
50,09341489	663,75	2509,35	440564,06	-2656,3	-34833,3	1E+09	7055743	9,3E+07	1,939E-02	1,924E-02
Summe								0,561407111	5,746E-01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3658,1$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 13,2074$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 48108,3$$

$$\mu(k) = \sqrt{\frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}} + \frac{k^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}}} = 1,06583$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12619865,94$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 2201363395$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,7E+08$$

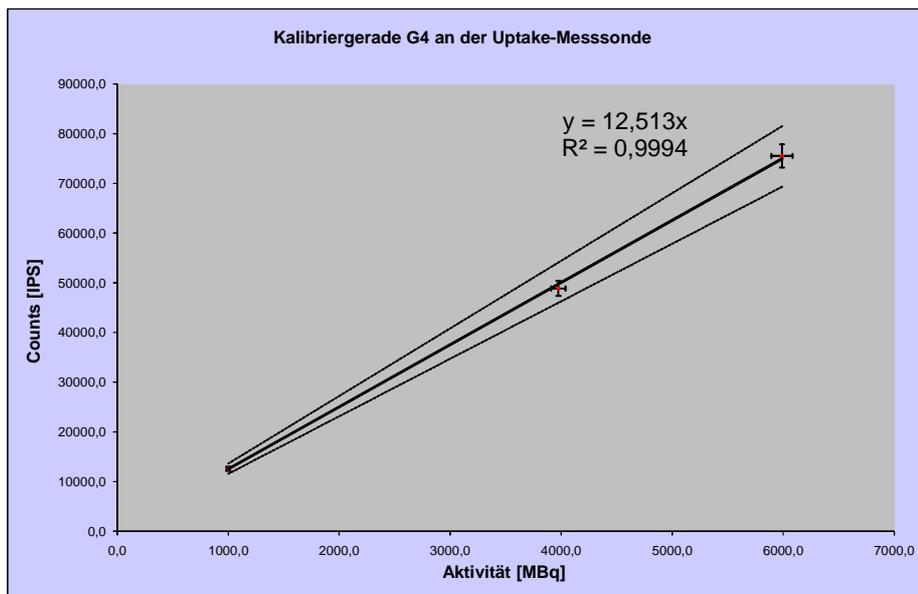
$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,279E-15$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{8,07\%}}$$

Abbildung 48: Messergebnisse von G3 an der Uptake-Messsonde

X _i [MBq]	Y _i [IPS]
5989,9	75523,0
3974,6	48855,0
1001,1	12574,0

Grenzgerade 1	Grenzgerade 2
81507,00654	69316,30335
54084,31825	45995,12568
13622,21337	11584,78902



Aktivität [GBq]	Counts						Mittelwert (ODL)-U	STABW	U
	S	1,0	2,0	3,0	4,0				
5999,60	76715,0	78315,0	76435,0	79333,0	75523,0	77264,2	1533,39	2,0%	
3977,40	49739,0	49768,0	51151,0	51717,0	48855,0	50246,0	1162,25	2,3%	
1002,80	12684,0	12599,0	12705,0	13275,0	12574,0	12767,4	289,08	2,3%	
Abgeschätzter maximaler Fehler aus der Verwendung unterschiedlicher Bleibehälter								2,30%	

$\mu(x_i)$	$\mu(y_i)$	$\mu^2(x_i)$	$\mu^2(y_i)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(\bar{x} - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$[k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x)] / (S_{xx})^2$	$[k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y)] / (S_{yy})^2$
299,4946347	3776,15	89697	14259309	2334,7	29872,3	9E+08	5450793	7E+07	4,884E-01	5,059E-01
198,7309291	2442,75	39494	5967027,6	319,4	3204,3	1E+07	102028,6	1023526	4,025E-03	2,436E-03
50,05434491	628,7	2505,44	395263,69	-2654,1	-33076,7	1E+09	7044313	8,8E+07	1,763E-02	1,719E-02
Summe								0,510005559	5,255E-01	

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3655,2$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 45650,7$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 12597134,57$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 1996689929$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(y_i - \bar{y}) = 1,6E+08$$

$$\frac{1}{S_{xx}^2} = 6,30168E-15$$

$$\text{sign}(S_{xy}) = 1$$

$$k = \text{sign} \cdot (S_{xy}) \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} = 12,5898$$

$$\mu(k) = \sqrt{\sum \frac{k^2 \cdot (x_i - \bar{x})^2 \cdot \mu^2(x_i)}{S_{xx}^2} + \sum \frac{k^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2 \cdot \mu^2(y_i)}{S_{yy}^2}} = 1,01761$$

$$\mu_{rel}(k) = \frac{\mu(k)}{k} = 8,1\% \quad 0,0065$$

$$\mu_{rel}(A) = \sqrt{\mu_{rel}^2(CPM)_{ges} + \mu_{rel}^2(k)} = \underline{\underline{8,08\%}}$$

Abbildung 49: Messergebnisse von G4 an der Uptake-Messsonde