

Interner Bericht
DESY D3-74/18
Dezember 1974

DESY

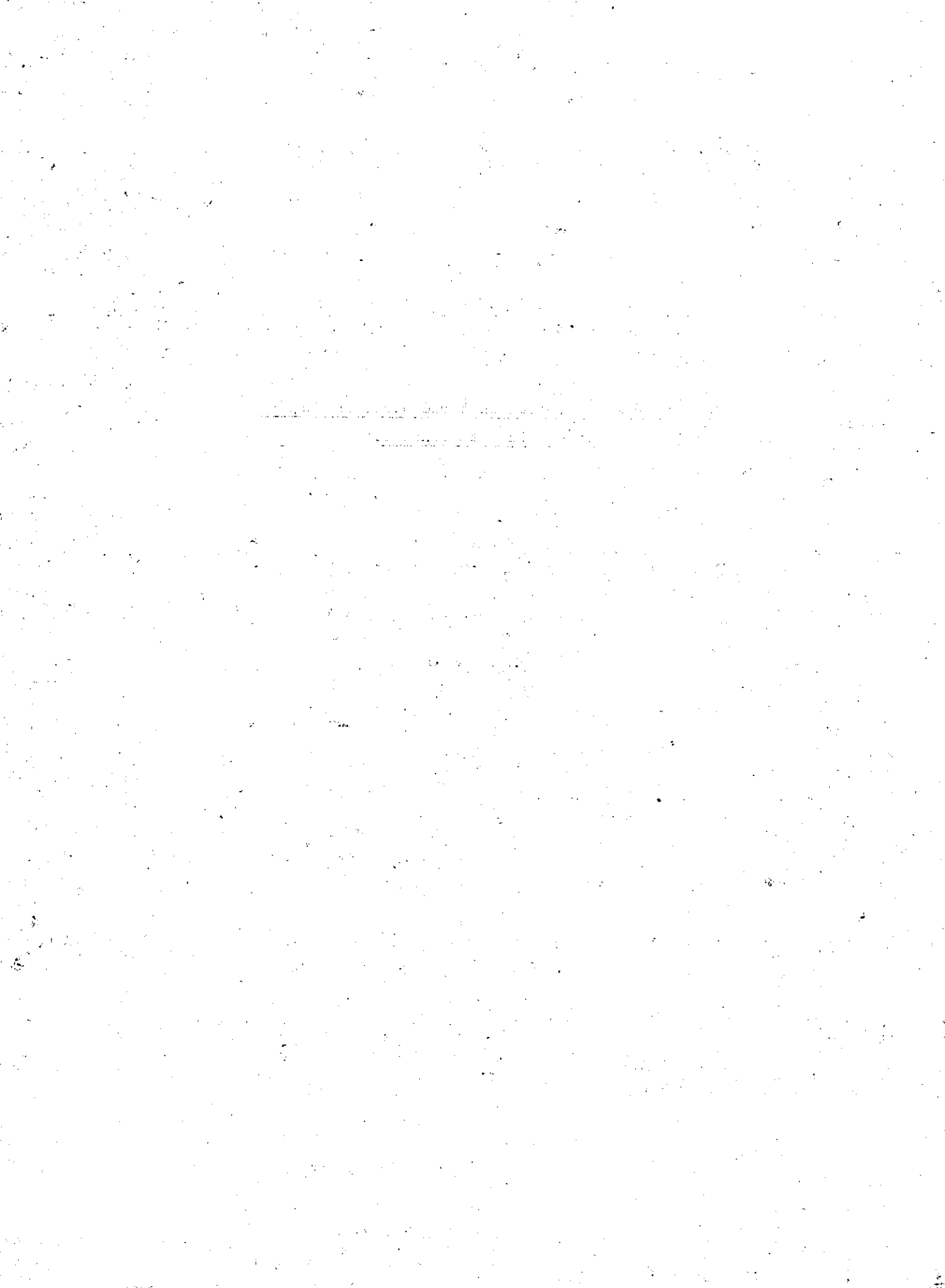
23. 11. 1974

Messung der Konzentrationen radioaktiver Nuklide
in der Luft am Linac II

DESY-Bibliothek
23. 11. 1974

von

K. P. Klimek



Messung der Konzentrationen radioaktiver
Nuklide in der Luft am Linac II.

VON

H. P. Kliewel

Zusammenfassung

Mit Hilfe einer empfindlichen Durchfluß-Ionisationskammer wurde die Radioaktivität in der Luft des Beschleunigerraumes vom Linac II und in den angrenzenden Räumen gemessen. Verschiedene Nuklide wurden identifiziert, ihre Aktivitätskonzentrationen sind angegeben. Aus den Meßergebnissen werden Hinweise zur Einhaltung der MZK und zur Belüftung der Linac-Räume gegeben.



1. Einleitung

Während des Beschleunigerbetriebes wird die Luft in den Beschleuniger-
räumen aktiviert. Beim Betreten der Räume nach Betriebsabschaltung
besteht daher die Möglichkeit der Bestrahlung von außen und der Inkor-
poration. Ferner sind beim Ausblasen der Luft die maximal zulässigen
Aktivitätskonzentrationen in der Abluft zu beachten. Die Möglichkeit
der Zumischung aktivierter Luft ist auch für benachbarte Räume des
Beschleunigers gegeben, z.B. durch Diffusion radioaktiver Luft durch
Ritzen und Öffnungen (Kabelschächte usw.).

Um den Grad der Aktivierung der Beschleunigerluft sowie die Ausbreitung
der gasförmigen Radionuklide kennenzulernen, wurden die in diesem
Bericht zusammengestellten und diskutierten Messungen durchgeführt. Als
Meßort wurde Linac II gewählt, weil dieser Beschleuniger die höchste
Strahlleistung bei DESY hat.

Mißt man Radionuklide in der Luft, so ist zu beachten, in welcher Form
sie vorhanden sind. Sie können an Aerosole gebunden bzw. an Schwebeteil-
chen angelagert oder als gasförmige Nuklide der Luft beigemischt sein.

Die Messung radioaktiver Aerosole und Schwebeteilchen ist relativ ein-
fach, da diese Teilchen durch Luftfilterung angereichert werden können.

Am DESY wurde diese Komponente mehrere Jahre kontinuierlich gemessen.
Es zeigte sich, daß ihre Konzentration klein ist gegenüber der gasförmigen
Radionuklide. ¹⁾

Für Gase unter Normalbedingungen gibt es keine geeigneten Anreicherungs-
verfahren, so daß beim Nachweis von β -Strahlen die anzuwendende Meßtechnik
von der nachzuweisenden Konzentration und Energie der emittierten β -Teil-
chen bestimmt wird. Die Gesamtaktivität der Abluft wird beim DESY im Ver-
messungsgeschoß des Synchrotrons und am Linac II in den Lüfterhäuschen
kontinuierlich gemessen. Die Meßergebnisse können jedoch nicht ohne
weiteres auf die Innenluftaktivität im Linac II extrapoliert werden.
Durch die Anschaffung einer Durchfluß-Ionisationskammer wurde es möglich,
die Innenluftaktivität direkt zu messen. Durch Zerfallskurvenanalyse
konnten die wichtigsten β -Nuklide identifiziert und ihre Konzentrationen
bestimmt werden. Schwierigkeiten bereitete die Identifikation des Nuklides
mit der größten Halbwertszeit oberhalb des Untergrundes. Ferner war es
nicht möglich, Radionuklide mit Halbwertszeiten unter 1 min zu identifi-
zieren.

2. Meßaufbau und Meßprinzip

In der Abb. 1 ist der apparative Aufbau zur Messung der Luftaktivität als Blockschaltbild dargestellt. Die zu untersuchende Luft wird von der Pumpe angesaugt und durchspült die Ionisationskammer. Der Luftdurchsatz wird mit einem Schwebekörper-Durchflußmesser gemessen. Die in der angesaugten Luft enthaltenen Radionuklide erzeugen beim Zerfall in der I-Kammer einen Ionisationsstrom, der im Vorverstärker in eine Wechselspannung umgewandelt wird. Die Meßempfindlichkeit des Vorverstärkers ermöglicht Ströme von 10^{-15} A zu messen. Der Meßaufbau erlaubt die kontinuierliche Messung der in der Luft enthaltenen Radioaktivität sowie nach Absperren der Ventile A und B die Messung der Zerfallskurve der eingeschlossenen Radionuklide. Die Luftmessungen wurden während des Linac II-Betriebs durchgeführt. Um so nah wie möglich an den Ort der Aktivierung heranzukommen, mußten Ansaugwege bis max. 50 m in Kauf genommen werden. Für die Ansaugwege wurden PVC-Schläuche mit 10 mm lichte Weite benutzt. Die unterschiedlichen Schlauchlängen verursachten durch Reibungsverluste in der Ionisationskammer Druckänderungen, die unterschiedliche Luftdurchsatzvolumina zur Folge hatten. Die Auswirkungen der Druckänderungen auf die Meßergebnisse wurden durch Verengung des Ventils A (s. Abb. 1) bei konstanter Pumpleistung experimentell untersucht. Bei einem Luftdurchsatz zwischen $0,93 \text{ m}^3/\text{h}$ und $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt der Meßfehler $< 20 \%$. Während der Aktivitätsmessungen im Linac II traten keine größeren Durchsatzänderungen als $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$ auf, so daß der dadurch entstandene Meßfehler bei der Auswertung der Meßergebnisse nicht berücksichtigt wurde. Die Ansaugzeit, bedingt durch die langen Ansaugwege, betrug $\leq 16 \text{ sec}$.

Zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration in pCi/cm^3 muß die Meßempfindlichkeit der Ionisationskammer bekannt sein. Sie wird wie folgt rechnerisch abgeschätzt:

Im Ionengleichgewicht entspricht den neugebildeten Ionen in der I-Kammer die Summe aus den rekombinierten und den durch das elektrische Feld abgesaugten Ionen. Die zu erwartende Ionenkonzentration ist so klein, daß der Rekombinationsanteil nicht berücksichtigt zu werden braucht. Dadurch vereinfacht sich der Ausdruck der allgemeinen Gleichung für die I-Kammer auf den simplen physikalischen Zusammenhang Strom = pro Zeiteinheit erzeugte Ionen. Idealisiert man das I-Kammervolumen (500 cm^3) zur Kugelform mit $r = 6 \text{ cm}$, so können β -Teilchen der Energie $\leq 65 \text{ keV}$ ihre gesamte Energie durch Stoßionisation abgeben. Als mittlere

Ionisierungsarbeit in der Luft werden 53,7 eV/Ionenpaar angenommen. Die zur Kalkulation benötigte mittlere β -Energie (\bar{E}) eines Spektrums wird berechnet nach Lit. 2:

$$\bar{E} = 0,55 \times E_{\max} \times \frac{49}{50} \left(1 + \frac{E_{\max}}{4}\right)$$

Im wesentlichen sind 3 Fälle zu betrachten:

- Reichweite der β -Teilchen in Luft mit $E \ll 6$ cm. Hierbei sind die Randeffekte zu vernachlässigen.
- Reichweite der β -Teilchen mit $\bar{E} \gg 6$ cm. Hierbei ist die Kalkulation genügend genau, wenn man den Energieverlust entlang des Weges \bar{r} betrachtet, ohne die Randeffekte zu berücksichtigen ³⁾.
- Reichweite der β -Teilchen mit $\bar{E} \sim 6$ cm erfordern besondere Rechnungen, bei denen das Teilspektrum berücksichtigt wird.

Im folgenden werden für einige Nuklide die kalkulierten Eichfaktoren angegeben:

Tab. 1

Nuklide	$\left. \begin{matrix} E_{\max} \\ \bar{E} \end{matrix} \right\} (\text{MeV})$	Reichweite der β in Luft cm	Geschätzter mittl. Energieverlust auf 6 cm keV	Eichfaktor $\frac{10^{-15} \text{A}}{(\text{nCi/cm}^3)}$
H^3	$\left. \begin{matrix} 0,018 \\ 0,006 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 0,75 \\ 0,07 \end{matrix} \right\}$		0,55
C^{14}	$\left. \begin{matrix} 0,16 \\ 0,055 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 28,6 \\ 4,3 \end{matrix} \right\}$	25	2,2
$\text{N}^{15}, \text{Ar}^{41}$	$\left. \begin{matrix} 1,2 \\ 0,5 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 557 \\ 178 \end{matrix} \right\}$	15	1,14
O^{15}	$\left. \begin{matrix} 1,7 \\ 0,78 \end{matrix} \right\}$	$\left. \begin{matrix} 208 \\ 319 \end{matrix} \right\}$	15	1,14

Für α -Strahler ist die Empfindlichkeit wegen der größeren Ionisierungsfähigkeit der Teilchen wesentlich größer. Zur Aktivitätsbestimmung von α -Strahlern, wie sie im Untergrund vorkommen, ist der Eichfaktor für jedes Radionuklid einzeln zu ermitteln. Hier wird nur Po^{210} zusammen mit Po^{216} betrachtet, das wegen seiner kurzen Halbwertszeit (0,16 sec) mit der benutzten Meßmethode nicht von Po^{210} zu trennen ist. Teilchen mit einer Energie $E \lesssim 6,7$ MeV geben ihre gesamte Energie an die Luft in

der I-Kammer durch Stoßionisation ab. Randeffekte werden auch hierbei nicht berücksichtigt. Beim Zerfall von Rn^{220} und Po^{216} wird die Energie von insgesamt ~ 13 MeV abgegeben. Das entspricht einem Ionisationsstrom von $6,4 \times 10^{-14}$ A und ergibt den Eichfaktor $1,2 \times 10^{-12} \frac{\text{A}}{(\text{pCi/cm}^3)}$.

3. Untergrundmessungen und Test der Meßapparatur

Die hohe Meßempfindlichkeit und die Analysen der gemessenen Zerfallskurven erforderten ein gründliches Studium des nicht zu eliminierenden Untergrunds, dessen Herkunft aus den 3 natürlichen radioaktiven Familien stammt (Abb. 3). Dabei spielt das gasförmige Radon eine besondere Rolle. Die Nuklide Rn^{220} (Hwz 54 sec) und Rn^{222} (Hwz 3,8 d) diffundieren aus dem Boden. Die Exhalationsrate hängt dabei stark von den geologischen und meteorologischen Bedingungen ab. Sie lagern sich nur zum Teil an Schweb- und Aerosolteilchen an, wogegen ihre Folgeprodukte als Schwermetalle nur in Teilchenform existieren können. Infolge der vertikalen Mischprozesse ist die bodennahe Luft am reichhaltigsten an Emanationen, so daß hier zwischen Rn und den Folgeprodukten kein radioaktives Gleichgewicht erwartet werden kann. Die Wahrscheinlichkeit, daß Rn^{219} während seiner Lebensdauer mit Hwz = 3,9 sec aus dem Erdboden in die Luft gelangt, ist sehr gering. Das gleiche wird häufig für Rn^{220} angenommen^{4,5)}.

Durch einen Laborversuch konnte die Anwesenheit von Rn^{220} in der Luft anschaulich dargestellt werden. Die angesaugte Luft wurde im Durchflußbetrieb kontinuierlich von der I-Kammer ausgemessen (ca. 5×10^{-15} A) und in ein Behältnis gepumpt, so daß sie vom Emanationsnachlieferer Ra^{224} getrennt war. Dann wurde durch Absperrern der Ventile die Zerfallskurve der eingeschlossenen Luft aufgenommen (s. Abb. 4), sie ergibt eine Halbwertszeit von 50 sec. Nach ca. 20 min, in der das Rn^{220} praktisch vollständig in Pb^{212} zerfallen war, wurde die Luft aus dem Behältnis durch die I-Kammer zurückgepumpt. Der gemessene Ionisationsstrom betrug jetzt $< 1 \times 10^{-15}$ A. Dies entspricht dem Untergrund der Meßapparatur.

Im Durchschnitt wurde als Untergrund $6,5 \times 10^{-15}$ A gemessen. Davon sind ca. 5×10^{-15} A dem Rn^{220} und Po^{216} zuzuschreiben. Das ergibt eine Aktivitätskonzentration von $4 \times 10^{-3} \frac{\text{pCi}}{\text{cm}^3}$. Der Wert ist stark von den Witterungsbedingungen abhängig.

Als Beispiel für die untere Nachweisgrenze unserer Meßmethode für langlebige Substanzen sei erwähnt, daß in dem benutzten abgeschlossenen Meßsystem eine Komponente mit einer Halbwertszeit von ca. 10 h gefunden wurde; allerdings liegt der Strom von $0,5 \times 10^{-15}$ A unterhalb der sicheren Nachweisgrenze. Es handelt sich wahrscheinlich um das Folgeprodukt Pb 212 mit der Konzentration $\sim 4 \times 10^{-3}$ pCi/cm³. Würden die Nuklide Rn²²⁰ und Pb²¹² im Gleichgewicht stehen, so würde sich auf Grund der bekannten Beziehungen $dN/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = 0$ ein Konzentrationsverhältnis $N(\text{Pb}^{212})/N(\text{Rn}^{220}) = 700$ ergeben. Das gemessene Verhältnis von ca. 100 ist wahrscheinlich durch vertikale Mischprozesse zu erklären, durch die die langlebigeren Komponente eine stärkere Verdünnung erfährt.

Das Rn²²² mit der Halbwertszeit 3,8 d kann im Untergrund mit dieser Apparatur nicht gefunden werden, nach Lit. 4 beträgt die Aktivitätskonzentration etwa $1,4 \times 10^{-4}$ pCi/cm³.

Um systematische Fehler der Apparatur beim kontinuierlichen und diskontinuierlichen Meßprinzip festzustellen, wurde sie mit Stickstoff getestet. Die Meßempfindlichkeit mit N₂ weicht nur unwesentlich von der mit Luft gefüllten I-Kammer ab. Die Apparatur zeigte keine Unregelmäßigkeiten, die die Meßergebnisse entscheidend beeinflussten. Der gemessene Dunkelstrom der mit N₂ durchspülten und verschlossenen I-Kammer beträgt im Durchschnitt $< 1 \times 10^{-15}$ A. In diesem Test war nach dem Abschalten der Vakuumpumpe kein Anstieg des Ionisationsstromes zu beobachten, wie er bei den Luftmessungen charakteristisch auftrat (s. Abb. 4).

Weitere Untersuchungen bestätigten die Annahme, daß ein Teil der in der I-Kammer durch radioaktiven Zerfall gebildeten Ionen beim kontinuierlichen Meßprinzip von dem Abluftstrom mitgerissen werden und dadurch dem Nachweis verloren gehen. Wird der kontinuierliche Meßvorgang unterbrochen, z.B. zur Aufnahme der Zerfallskurve, so kommt es zu einem Mehrangebot von Ionen, die den Anstieg des Meßstromes bewirken. Dadurch entsteht beim kontinuierlichen Betrieb ein Meßfehler, der proportional der Ionenkonzentration und dem Durchsatzvolumen ist.

Die Tatsache, daß freie Ionen durch die angesaugte Luft mitgerissen werden, machte sich bei den Messungen am Linac störend bemerkbar. Ein nicht vermuteter hoher Anteil freier Ionen in der Linacluft gelangte beim Ansaugvorgang in die I-Kammer und täuschte eine Aktivitätskonzentration vor. Das wurde jedoch erst nach Abschluß der Messungen bemerkt. Um den Einfluß dieser Ionen beim Analysieren der gemessenen Zerfallskurven hinsichtlich kurzer Halbwertszeiten zu bestimmen, wurde ein Laborversuch durchgeführt. Mit einem β -Präparat wurde die angesaugte Laborluft vorionisiert. Diese Ionen verhielten sich in der I-Kammer wie ein Radionuklid mit der Halbwertszeit 13 sec (Abb. 5). Diese Ionensammelzeit beträgt ein Vielfaches der einfachen Ionenlaufzeit 0,16 sec, die sich aus der Geometrie und der anliegenden Kammerspannung errechnet ⁶⁾. Der Grund hierfür ist in der hohen Turbulenz begründet, die durch den Ansaugvorgang verursacht wird. Durch diese Umstände war es nicht möglich, Radionuklide mit der Halbwertszeit < 1 min zu identifizieren.

4. Meßergebnisse

Die Nuklide, die den größten radioaktiven Anteil in der Luft ausmachen, können durch folgende Überlegungen vorausbestimmt werden. Ausgehend von den Bestandteilen der Luft (Tab. 2) und den wichtigsten Reaktionsprozessen während des Beschleunigerbetriebes, sollen hier nur die am stärksten beteiligten Prozesse betrachtet werden (Tab. 3).

Tab. 2 Hauptbestandteile der Luft

N_2	=	78,1 vol. %
O_2	=	20,95 vol. %
Ar	=	0,9 vol. %
CO_2	=	0,03 vol. %

Tab. 3. Mögliche Reaktionsprodukte in der Luft

Target Reaktion	N ¹⁴	O ¹⁶	Ar ⁴⁰	C ¹²
(γ, n) ($n, 2n$)	N ¹³ 9,96 min β^+ 1,2 MeV	O ¹⁵ 2 min β^+ 1,74 MeV	A ³⁹ 269 a β^- 0,6 MeV	C ¹¹ 20,3 min β^+ 0,97 MeV
(γ, p)	C ¹³ stabil	N ¹⁵ stabil	Cl ³⁹ 56 min β^- 1,9 MeV	B ¹¹ stabil
($\gamma, 2n$)	N ¹² 11 ms β^+ 16,4 MeV	O ¹⁴ 71 sec β^+ 1,8 MeV	Ar ³⁸ stabil	C ¹⁰ 19,3 sec β^+ 1,9 MeV
(γ, np)	C ¹² stabil	N ¹⁴ stabil	Cl ³⁸ 57,3 min β^- 4,9 MeV	B ¹⁰ stabil
(n, γ)	N ¹⁵ stabil	O ¹⁷ stabil	Ar ⁴¹ 1,8 h 1,20 MeV	C ¹³ stabil

In der Abb. 6 ist eine typische Zerfallskurve abgebildet. Die Kurve stammt von einer Luftprobe aus dem MeBraun Linac II nach längerer Betriebszeit (30 mA, Pulsbreite 1,6 μ s, 280 MeV), wobei der Strahl im MeBraun vernichtet wurde. Die Lüfter 4A und 5A (s. Abb. 2) waren dabei nicht in Betrieb. Eine fast identische Kurve erhalten wir bei Vernichtung von 50 mA mit Belüftung bei gleicher Strahlenergie und Pulsbreite. Die Reduzierblenden waren geöffnet.

Die Zerfallskurvenanalyse wurde nach dem Subtraktionsverfahren durchgeführt. Das ist in diesem Fall möglich, da der Zerfall der künstlichen Radionuklide ohne Zwischenprodukte in stabile Kerne erfolgt. Im Gegensatz dazu wird bei den natürlichen Zerfallsreihen durch Bildung radioaktiver Folgeprodukte die physikalische Halbwertszeit künstlich verlängert, so daß das Subtraktionsverfahren nicht uneingeschränkt angewandt werden kann.

Tab. 4 Analyseergebnis der Abb. 6

Relativer Anteil	Analysierte Halbwertszeit	Radionuklid	Phys. Halbwertszeit	Aktivitätskonzentration pCi/cm ³
2 x 10 ⁻¹⁵ A	120 min	Ar ⁴¹	110 min	1,7
10 x 10 ⁻¹⁵ A	10 min	N ¹³	9,96min	8,5
15 x 10 ⁻¹⁵ A	2 min	O ¹⁵	2,03min	13,5
550 x 10 ⁻¹⁵ A	25 sec	Ioneneinfluß +Untergrund +kurzlebige Radionuklide		

Σ ohne kurzlebige Nuklide 23,7 pCi/cm³

Die Analyse bestätigt zum Teil die in Tab. 3 vorausgesagten Radionuklide. Der in Tab. 4 als Ar⁴¹ ausgewiesene Anteil ließ sich keinem anderen theoretisch möglichen Radionuklid zuordnen. Als langlebiger Untergrund ist er zu hoch. Auch andere in Tab. 3 nicht dargestellten Wechselwirkungen mit der Luft ergeben kein Radionuklid, das sich zur Halbwertszeit 120 min zuordnen läßt, so daß nur Ar⁴¹ glaubwürdig zu den gefundenen Aktivitätskonzentrationen klassifiziert werden kann.

Das Konzentrationsverhältnis O¹⁵/N¹³ läßt sich folgendermaßen abschätzen:

$$\frac{A_o}{A_N} = \frac{a_o \int \sigma_o dE \cdot (1 - e^{-\lambda_o t})}{a_N \int \sigma_N dE \cdot (1 - e^{-\lambda_N t})}$$

A = Aktivitätskonzentration

a = relativer Anteil in der Luft

σ = Wirkungsquerschnitt für die (γ,n)-Reaktion

t = Bestrahlungszeit

Der Wirkungsquerschnitt für N₂ ist in der Literatur nicht angegeben⁷⁾. Doch aus dem Summen-Wirkungsquerschnitt (γ,n + γ,pn) läßt sich realistisch abschätzen, daß er nicht erheblich vom Wirkungsquerschnitt des Sauerstoffs abweicht. Für t ≤ 2 min ist das Verhältnis 1. Das Maximum A_o/A_N ~ 1,3 liegt im Bereich 0,5 min.

Vergleicht man das in der Analyse gefundene Konzentrationsverhältnis $^{15}\text{O}/^{13}\text{N} = 1,6$ (Tab. 4) mit dem theoretischen Wert und berücksichtigt, daß die Luft im Linac durch den Einfluß der Belüftung und den Konvektionsströmungen ständig in Bewegung ist, so erscheint das Verhältnis plausibel.

Die gleichen Überlegungen ergeben für die C^{11} -Konzentration und für eine Bestrahlungszeit $t \leq 100$ min einen Wert, der unter der Nachweis-schwelle der Meßapparatur liegt.

Der größte aus der Kurve Abb. 6 analysierte Anteil hat eine effektive Halbwertszeit von 25 sec und setzt sich aus kurzlebigen künstlich gebildeten Radionukliden, dem kurzlebigen Untergrund und der hohen Ionenkonzentration in der angesaugten Luft zusammen. Diese Ionen hätten leicht durch einen Ionenabscheider beseitigt werden können, doch, wie schon erwähnt, wurde erst nach Abschluß der Messungen die hohe Ionenkonzentration in der Linac-Luft erkannt.

Wir haben versucht, mit der in den Lüfterhäuschen installierten und mit GM-Zählrohren bestückten ortsfesten Luftüberwachungsanlage diese Ergebnisse zu verifizieren. Normalerweise ist die Konzentration in der ausgeblasenen Luft für eine Identifikation der Nuklide zu gering. Um eine hohe Aktivitätskonzentration zu erreichen, lief daher der Linac $1\frac{1}{4}$ h ohne Be- und Entlüftung mit 200 mA. Davon wurden 110 mA an den Meßblenden und der Rest im Meßraum vernichtet. Nach der Strahlabschaltung wurde der Linac ca. 0,5 min entlüftet, so daß die Linac Luft das Lüfterhaus 4A gut durchspülte. Anschließend wurde das Lüfterhaus abgedichtet und mit dem Zählrohr die Zerfallskurve aufgenommen (Abb. 7). Die analysierten Meßergebnisse sind in Tab. 5 aufgeführt.

Tab. 5

Nuklid	Analysierte Halbwertszeit	Phys. Halbwertszeit	Aktivitätskonzentration berechnet nach Lit. 8
Ar^{41}	110 min	110 min	0,6 pCi/cm ³
N^{13}	9,8 min	9,9 min	4,6 pCi/cm ³
O^{15}	2,1 min	2,03 min	7,4 pCi/cm ³
Unidentifizierte kurzlebige Radionuklide	eff. 72 sec		12,6 pCi/cm ³
			24,6 pCi/cm ³

Der kurzlebige Anteil mit der effektiven Halbwertszeit von 72 sec ist erwartungsgemäß weniger ausgeprägt als die Messungen mit der I-Kammer.

Das Verhältnis O^{15}/N^{13} ist ebenfalls 1,6 geblieben, obwohl bei diesem Versuch die Be- und Entlüftung während der Betriebszeit abgeschaltet war, so daß ein Verhältnis < 1 erwartet wurde. Daraus kann man schließen, daß die Luft, die das Lüfterhaus durchspülte, unmittelbar zuvor aktiviert wurde, der während des 1 1/4-stündigen Versuchs gebildete Hauptanteil der Radioaktivität jedoch in Luftblasen eingeschlossen blieb, die von der Entlüftungsanlage nicht beeinflußt werden.

Die Aktivitätskonzentrationen der Tab. 4 und 5 können nicht unmittelbar verglichen werden, da die Bedingungen, unter denen die Messungen durchgeführt wurden, zu unterschiedlich waren.

In der Tabelle 6 und 7 sind die Messungen zusammengefaßt, die gleichzeitig mit der ortsfesten Anlage und der Ionisationskammer durchgeführt wurden und einen direkten Vergleich erlauben. Die Tabellenwerte der Lüfterhausmessung sind nach Lit. 8 berechnet. Die Werte der I-Kammermessung wurden mit dem Konversionsfaktor für O^{15} (Kap. 2) ermittelt.

Tab. 6

Linac II: e^- Betrieb

Energie = 280 MeV, I = 23 mA, Pulsbreite 1,6 μ sec, 50 Hz

Reduzierblenden geschlossen

Meßort	Aktivitätskonzentration	Bemerkung
Lüfterhaus 3A	0,3 pCi/cm ³	GM-Zählrohr Typ 18550
4A	0,7 pCi/cm ³	- " -
5A	0,9 pCi/cm ³	- " -
Positronen horn	5,4 pCi/cm ³	I-Kammer
Sektor 10/11	6,3 pCi/cm ³	- " -
Reduzier- blenden	6,3 pCi/cm ³	- " -
Meßraum	6,8 pCi/cm ³	- " -

Tab. 7

Linac II: e⁺ Betrieb

Energie = 290 MeV, I = 0,65 mA, Pulsbreite 1,3 μsec, 50 Hz

Reduzierblenden offen, Strahl in Richtung Synchrotron

Meßort	Aktivitätskonzentration	Bemerkung
Lüfterhaus 3A	0,54 pCi/cm ³	GM-Zählrohre 18550
Lüfterhaus 4A	0,54 pCi/cm ³	- " -
Lüfterhaus 5A	0,34 pCi/cm ³	- " -
Positronenkonverter	9 pCi/cm ³	I-Kammer
Sektor 10/11	16 pCi/cm ³	"
Reduzierblenden	0,9 pCi/cm ³	"

Beim Vergleich der Aktivitätskonzentration müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

1. Die Meßorte zwischen der ortsfesten Anlage und der I-Kammer lagen teilweise weiträumig auseinander. Dadurch entstehen Fehler beim Bewerten der kurzlebigen Komponente, die durch Laufzeitunterschiede zwischen Entstehungsort der Radioaktivität und dem Meßort verursacht werden. Hinzu kommt, daß die I-Kammer-Meßpunkte ca. 50 cm über Strahlrohrniveau lagen, die Abluft der Lüfterhäuser jedoch vom Linac-Fußbodenniveau gesaugt wird.
2. Bevor die Abluft die Überwachungssonde der stationären Meßanlage passiert, erfährt sie eine Konzentrationsverdünnung durch Frischluftzumischung (max 45%).
3. Der oben vermutete schlechte Wirkungsgrad der Belüftung. Infolgedessen ergibt sich eine merkliche Konzentrationsverdünnung der Luft auf dem Wege vom Entstehungsort zum Abluftschacht. Unter Berücksichtigung dieses Effektes führen die beiden völlig verschiedenen Meßmethoden zu Resultaten, die im Rahmen der zu erwartenden Schwankungen miteinander vergleichbar sind.

Extrapoliert man die I-Kammer-Meßwerte der Tab. 4 und 6 auf einen Strahlstrom von 300 mA (Pulsbreite 1,6 us, 50 Hz), so erreicht man Aktivitätskonzentrationen zwischen 100 und 150 pCi/cm³.

Extrapoliert man die Werte der Tab. 7 für den Positronenbetrieb auf 1 mA, so erreicht man Werte von 25 pCi/cm³.

Die übrigen Messungen und Meßergebnisse sollen nur zusammengefaßt qualitativ wiedergegeben werden. Die Aktivitätskonzentrationen weichen nicht wesentlich von den in Tab. 4-7 eingetragenen Werten ab.

Beim e⁻-Betrieb wird vor dem Sektor 5 nur ein geringer Teil künstlicher Radionuklide in der Luft gebildet. Zwischen Sektor 5 und den Meßblenden bzw. dem beamstopper im Geradeausweg oder Meßraum sind die Verhältnisse unterschiedlich und hängen oftmals vom Geschick des Operateurs ab; so kann bei gleichen Linacparametern, aber verschiedenen Operateuren die Aktivierungsverteilung völlig anders aussehen. Die Reduzierblenden und beamstopper sind die stärksten Aktivierungsquellen.

Beim e⁺-Betrieb ist, wie zu erwarten, der Konverter die wichtigste Aktivierungsquelle. Vor Sektor 5 sind die Verhältnisse wie beim e⁻-Betrieb. Der ins Synchrotron geleitete Positronenstrahl trägt kaum zur Bildung künstlicher Radionuklide in der Luft bei.

An dieser Stelle sei erwähnt, daß bereits früher Maßnahmen zur Verminderung der Aktivitätskonzentration in der Linac-Luft beschlossen wurden. Dazu gehört die Beseitigung der Luftstrecke im Meßraum zwischen dem letzten Magnet und dem beamstopper, wodurch die Aktivitätskonzentration in der Abluft des Lüfters 5A verringert werden soll. Diese Maßnahme war z.Zt. der obigen Messungen noch nicht ausgeführt, so daß über die Wirksamkeit keine Angaben gemacht werden können. Um die Strahlenquelle im Bereich der Reduzierblenden zu beeinflussen, wurde durch eine 10 cm dicke Pb-Wand hinter den Reduzierblenden der der Streustrahlung angebotene Luftstrom verkleinert. Diese Maßnahme reduzierte die Aktivitätskonzentration der Abluft des Lüfters 4A um mindestens 50%. Die vorhandene Möglichkeit der Frischluftzumischung zur Abluft durch Öffnen einer Jalousie im Lüfterhaus reduzierte die Aktivitätskonzentration der Abluft im Lüfter 3A und 4A um ca. 35% und bei 5A um ca. 45%.

Von der baulichen Anordnung der Lüfter könnte man vermuten, daß die Ablüfter 2A und 3A wesentlich mehr zum Abtransport der Radioaktivität beitragen als Lüfter 4A. Durch unterschiedliche Messungen wurde jedoch festgestellt, daß der Lüfter 4A am meisten beiträgt. Die Effektivität des Lüfters 5A wird durch den Verbindungstunnel zum Speicherring und einen in unmittelbarer Nähe befindlichen Kabelschacht, der durch den Abschirmwall nach außen führt, stark geschwächt. Verschiedene Widersprüche bezüglich der Verteilung der Aktivitätskonzentration in der Luft längs des Beschleunigers könnten dadurch erklärt werden, daß sich zwischen den Zulüftern (5-7, Abb. 2) und den Ablüftern (2A-5A) Strömungskanäle ausbilden. In diesen Strömungskanälen strömt im wesentlichen "Frischluft", die von den "Luftblasen" höherer Aktivitätskonzentration nur einen Teil abschabt. Das bedeutet, daß diese Aktivitätsblasen von der Belüftung relativ wenig beeinflusst werden. Das würde auch die recht lange Zeitspanne von 5-7 h erklären, die vergeht zwischen Abschaltung des Linacs und dem Abtransport der Aktivität durch die Abluft (s. Abb. 8).

5. Folgerungen

Bei der Betrachtung der zulässigen MZK (max. zulässige Konzentration) muß zwischen der Luft, die aus Kontrollbereichen herausgelangt, und zwischen der Luft innerhalb des Kontrollbereiches unterschieden werden. Grundlage dafür sind die § 31 und 34 der 1. SSV0 (Strahlenschutzverordnung).

§ 31 setzt die Grenzen der MZK in Verbindung mit der Anlage 2 der 1. SSV0. § 34 besagt, daß Luft, die aus Kontrollgebieten herausgelangt, nur 1/10 der in Anlage 2 festgelegten MZK haben darf.

Da die von Elektronenbeschleunigern in Luft erzeugten Nuklide in Anlage 2 nicht enthalten sind, wurde in Lit. 8 die für DESY zutreffende MZK ausführlich diskutiert und mit 40 nCi/cm^3 für die Aufenthaltsdauer von 40 h pro Woche bestimmt. Da diese Aufenthaltsdauer in der Praxis unrealistisch ist, wurde für den Augenblick des Betretens der Beschleunigerräume 120 nCi/cm^3 festgelegt. Für die ausgeblasene Luft wurde eine MZK von 40 nCi/cm^3 festgelegt.

Wie in Abschnitt 4 dargestellt, können beim e^- -Betrieb und hohen Strahlströmen Konzentrationen von 100 bis 150 pCi/cm^3 auftreten, bei e^+ -Betrieb ca. 25 pCi/cm^3 . Die seit langem geübte Praxis, nach dem Abschalten den Beschleunigerraum des Linac II erst nach einer Wartezeit von 10 min zu betreten, ist also bei hohen Strahlströmen notwendig. Aus Tab. 4 und 5 geht hervor, daß sich die Konzentration in den ersten 10 min um den Faktor 4 verringert.

Die Aktivitätskonzentration in der Abluft kann durch die im Kap. 4 aufgezeigten und praktizierten Maßnahmen relativ niedrig gehalten werden. Extrapoliert man die Meßwerte der Lüfterhäuser (Tab. 6) ebenfalls auf 300 mA, so erhält man keine Werte über 40 pCi/cm^3 . Dies stimmt mit unseren früheren Feststellungen (Lit. 1, 9) überein, in den Jahren 1971 bis 73 lag im Jahresdurchschnitt die Aktivitätskonzentration an den Lüfterhäuschen weit unterhalb 40 pCi/cm^3 , Überschreitungen dieses Wertes traten nur sehr kurzfristig (einige Prozent der Betriebszeit) auf.

Schaltet man die Ablüfter 2A-5A während des Linac-Betriebes aus, dann wäre eine erhöhte Aktivitätskonzentration in der Innenluft zu erwarten. Die gemessene Erhöhung, gemittelt über alle Meßstellen, betrug jedoch nur 20%. Der Vergleich einzelner Meßstellen erschien nicht sinnvoll, da im Gegensatz zum erwarteten Ergebnis bei zwei Meßstellen die Konzentration bei abgeschalteten Ablüftern sogar geringer wurde. Auch Temperaturmessungen an 5 Meßstellen im Beschleunigerraum ergaben unter den Betriebsparametern 200 mA, 2,2 μsec , 50 Hz, 340 MeV in 1,5 h Betriebszeit ohne Ablüfter 2A-5A keine Temperaturänderung gegenüber dem Betrieb mit Ablüftern.

Das Abschalten der Zulüfter (5-7) bei eingeschalteten Ablüftern und gleichen Betriebsparametern wie oben brachte ebenfalls keine meßbaren Änderungen bezüglich der Aktivitätskonzentration und der Temperatur. Schaltete man Zulüfter und Ablüfter aus, so wichen die Messungen bei gleichen Betriebsparametern über 4 h Betriebszeit nur unwesentlich von den obigen Werten ab.

Daraus ergibt sich, daß die Lüftung im Linac II sehr ineffektiv arbeitet und keinen wesentlichen Einfluß auf die Aktivitätskonzentration und die Temperatur hat.

6. Untersuchung der Luft in der Modulatorhalle und im Kontrollraum

Während des Beschleunigerbetriebs sind in der Modulatorhalle und im Kontrollraum durch den Geruchsinn oftmals Stickoxyde und Ozon wahrnehmbar. Das läßt vermuten, daß auch gasförmige Radionuklide in diese Räume dringen.

Mehrere Messungen wurden durchgeführt, als der Linac unter folgenden Bedingungen Positronen produzierte:

$I = 0,6 \text{ mA}$, $E = 300 \text{ MeV}$, $2 \mu\text{sec}$, $12,5 \text{ Hz}$. In der Modulatorhalle konnten in der Luft $\text{max.} \sim 3 \text{ pCi/cm}^3$ und im Kontrollraum $\text{max.} \sim 2 \text{ pCi/cm}^3$ gemessen werden. Beim Elektronenbetrieb sind höhere Konzentrationen denkbar.

Durch umfangreiche Messungen konnte festgestellt werden, wie der Ausbreitungsmechanismus der gasförmigen Aktivität funktioniert. Die Belüftung des Linac geschieht über 3 Zulüfter (s. Abb. 2, 5-7) und 4 Ablüfter (2A-5A). Die Zulüfter saugen die Luft aus der Modulatorhalle an und blasen sie in den Linac, wodurch in der Modulatorhalle ein Unterdruck entsteht. Durch den Unterdruck begünstigt, kann durch sämtliche Ritzen und Verbindungskanäle die radioaktive Luft vom Linac in die Modulatorhalle strömen. Der Kontrollraum ist durch Kabelschächte mit der Modulatorhalle verbunden, so daß die Modulatorluft auch in den Kontrollraum gelangt. Die einfachste Abhilfe, um den größten Teil der radioaktiven Luft aus dem Kontrollraum und der Modulatorhalle fernzuhalten, ist das Abschalten der Zulüfter (5-7). Möchte man auf die Zulüfter nicht verzichten, so kann der Ausbreitungsmechanismus dadurch unterbunden werden, daß durch ausreichende Öffnungen nach draußen für einen Druckausgleich in der Modulatorhalle gesorgt wird.

Literatur:

1. K.P. Klimek
Zusammenstellung der Meßwerte über die Emission radioaktiver Stoffe
in Luft und Wasser von 1964 bis 1972,
DESY D 5-73/13 (1973)
2. W. Jacobi
Strahlenschutzpraxis, Thienig Verlag 1962
3. J. Martin et al.
Tables of Energy-Losses and Ranges of Electrons and Positrons,
NASA-SP-3012 (1964)
4. H. Israel, A. Krebs
Kernstrahlung in der Geophysik, Springer Verlag 1962
5. K. Haberger
Radionuklide im Wasser, Thienig Verlag 1969
6. H. Dinter und E. Tesch
Calculations of the Current of an Ionization Chamber
Nucl. Meth. 120 (1974) 113
7. B. Bülow and B. Forkman
Photonuclear Cross Sections
Nuclear Physics Report UFP 7208 (1972), Lund
8. K.P. Klimek
Die Anlagen zur Überwachung der Radioaktivität in Luft und Wasser
an DESY.
DESY D 5-72/11 (1972)
9. Orts- und Personendosen 1973, DESY D 5/16

Bildunterschriften

- Abb. 1 Blockschaltbild des Aufbaus zur Messung der Luftaktivität
- Abb. 2 Grundrißschema Linac II
Eingetragen sind die Hauptmeßpunkte und die Anordnung der Be- und Entlüftung.
- Abb. 3 Natürliche radioaktive Familien
Die gasförmigen Komponenten sind durch stark umrandete Felder gekennzeichnet. Diese Komponenten können aus dem Erdreich in die Atmosphäre diffundieren. (s. Kap. 3)
- Abb. 4 Mit der Apparatur (Abb. 1) gemessener radioaktiver Untergrund in der Laborluft.
Die kontinuierliche Messung ergibt für die Nuklide $\text{Pn}^{220} + \text{Po}^{216}$ eine Aktivität von ca. $4 \times 10^{-3} \text{ pCi/cm}^3$. Die Halbwertszeit der Zerfallskurve beträgt ca. 50 sec. (s. Kap. 3)
- Abb. 5 Laborversuch
Dieser Laborversuch sollte den Einfluß freier Ionen, die beim Ansaugen der Luft mit der Apparatur Abb. 1 in die Ionisationskammer gelangen, verdeutlichen. Der Versuch zeigte, daß sich die freien Ionen meßtechnisch wie ein Radionuklid mit der Halbwertszeit ca. 13 sec. verhalten. (s. Kap. 3)
- Abb. 6 Analyse einer typischen Zerfallskurve der Beschleuniger-Innenluft, die mit der Apparatur Abb. 1 gemessen wurde (s. Kap. 4).
- Abb. 7 Typische Zerfallskurve der Linac II-Abluft, die mit dem Meßplatz 4 A der ortsfesten Strahlungs-Überwachungsanlage gemessen wurde. Die analysierten Radionuklide sind charakteristisch als effektive Halbwertszeiten im Kurvenverlauf angedeutet (s. Kap. 4).
- Abb. 8 Abtransport der Aktivität aus dem Linac nach Abschaltung des Beschleunigers mit normaler Be- und Entlüftung (s. Kap. 4).

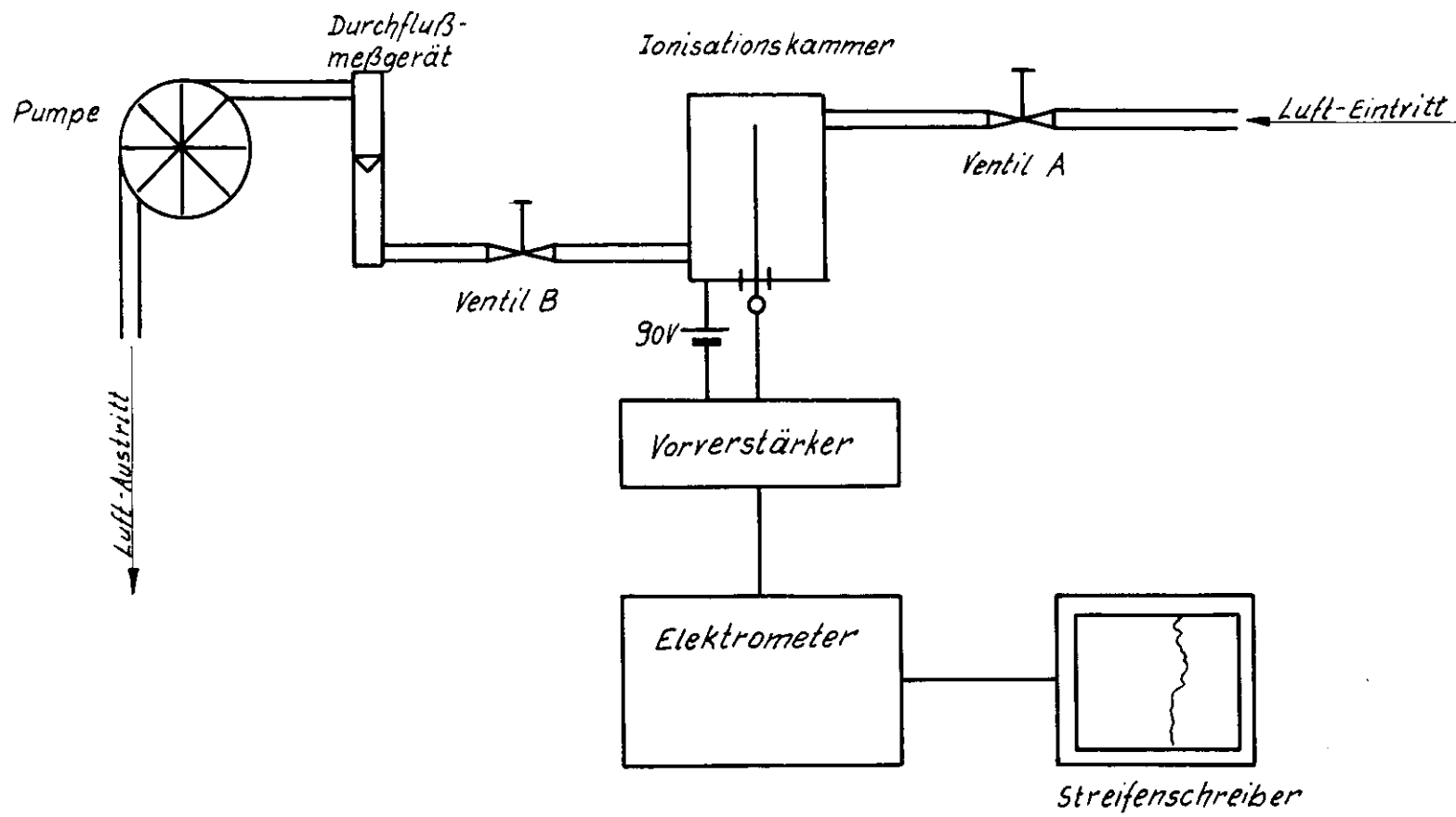


Abb. 1

Abb.3 Natürliche radioaktive Familien

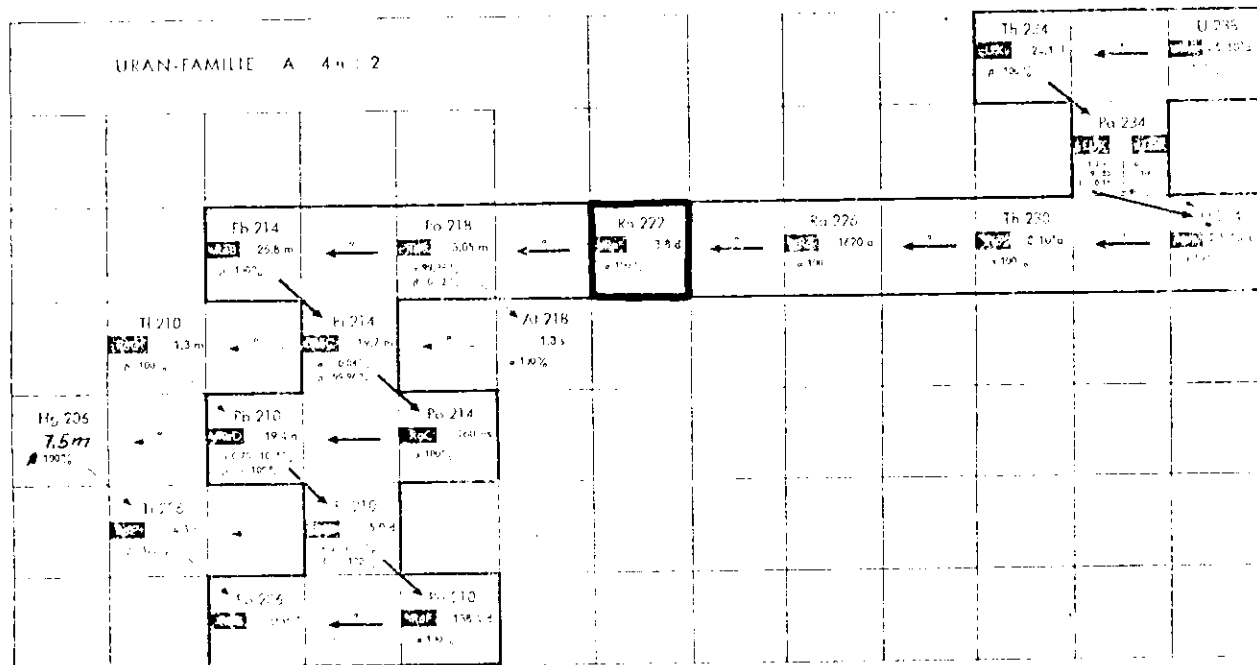
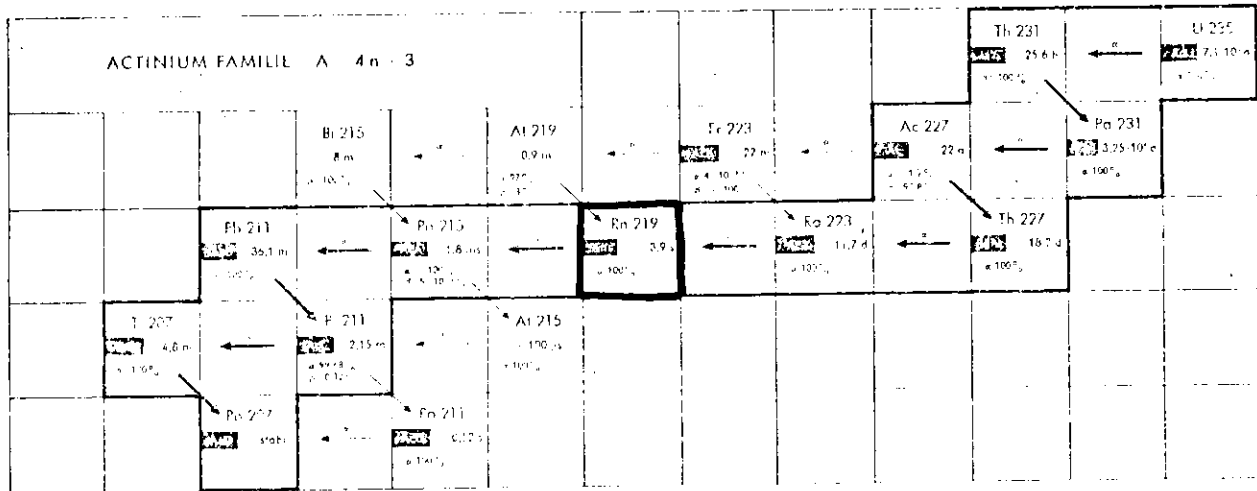
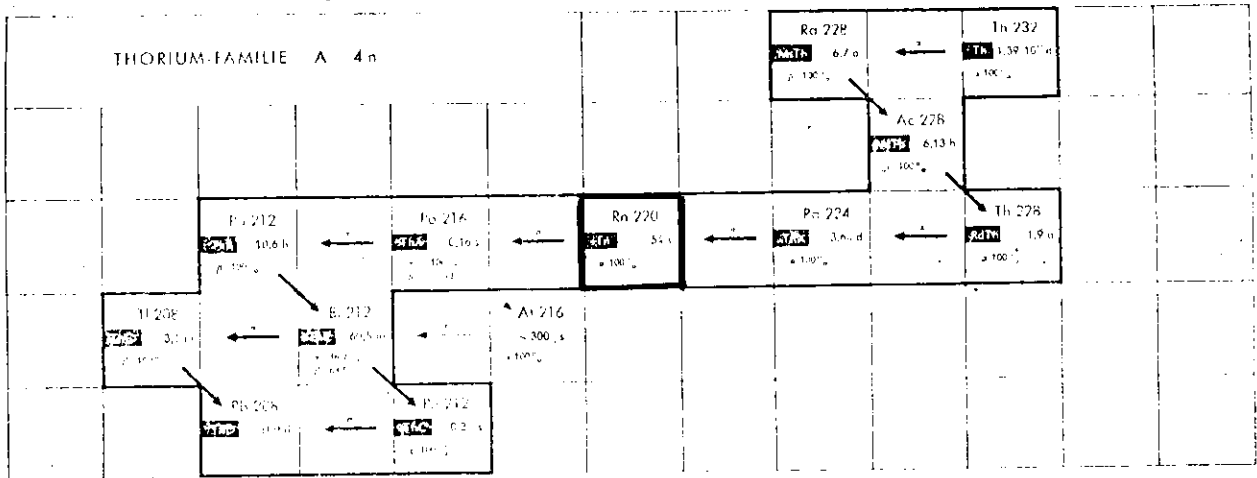
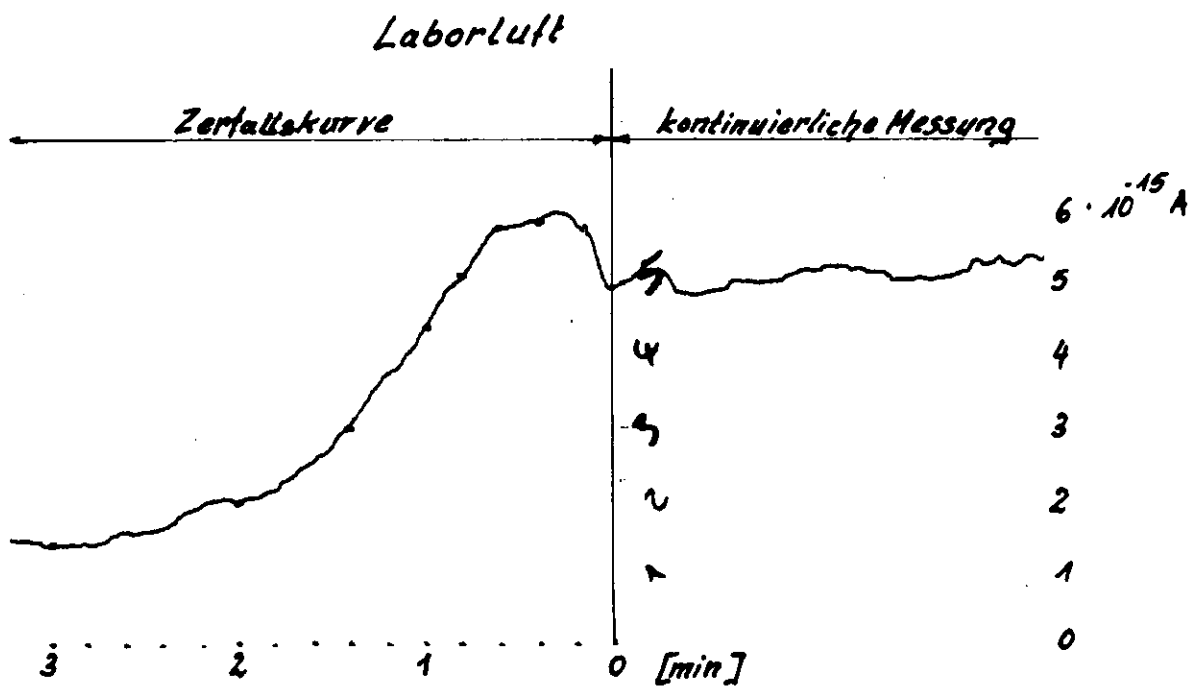
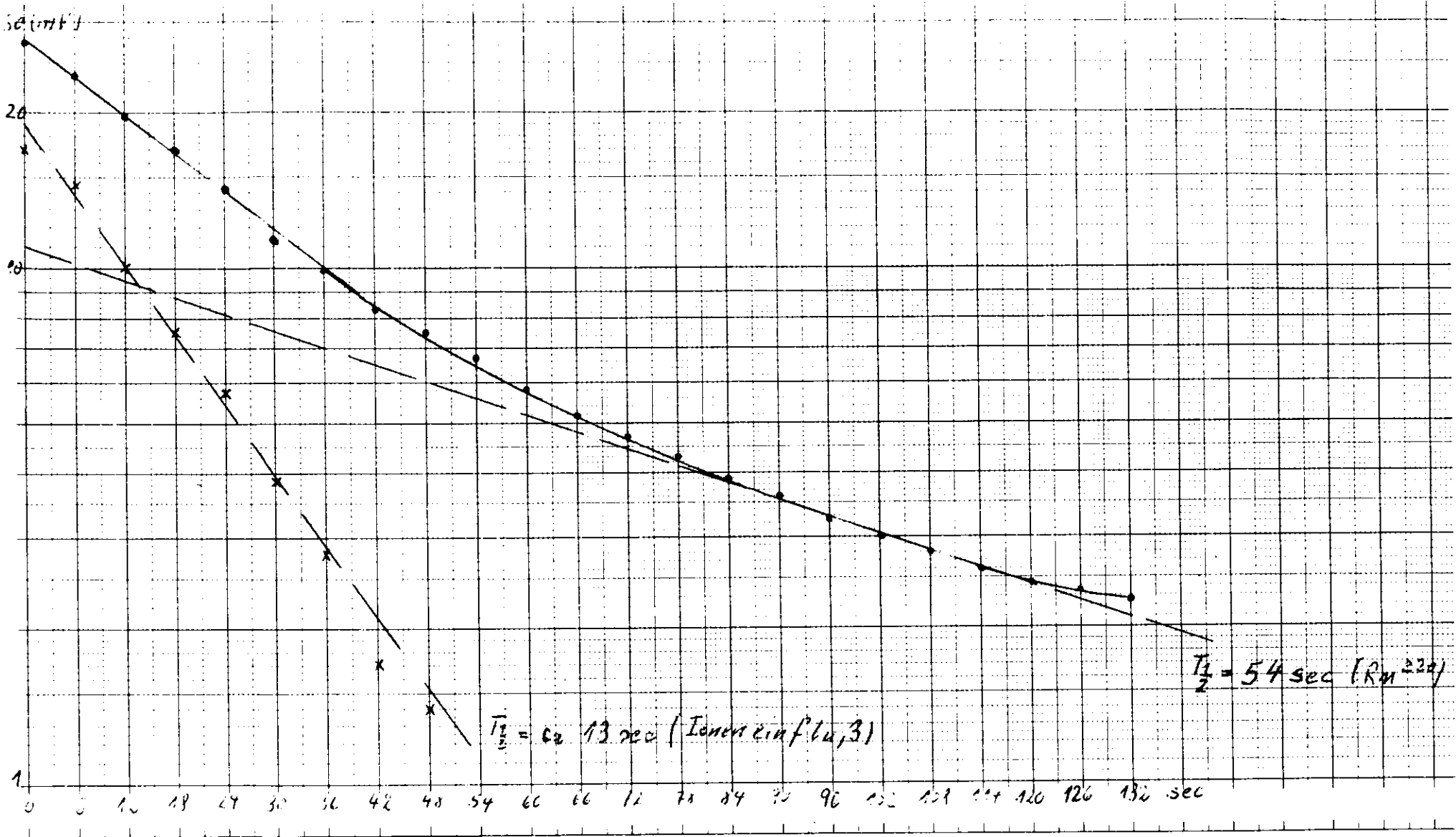


Abb. 4





Mit Sr^{90} vorionisierte Laborluft

Abb. 5

Zerfallskurvenanalyse einer Luftprobe aus dem Meßraum

analys. halbwert	keine	physik. halbwert
ca. 120 min	^{40}K	11.9 h
10 min	^{137}I	99.2 min
2 min	^{132}I	2.05 min
25 sec	kurze Radionuklide	

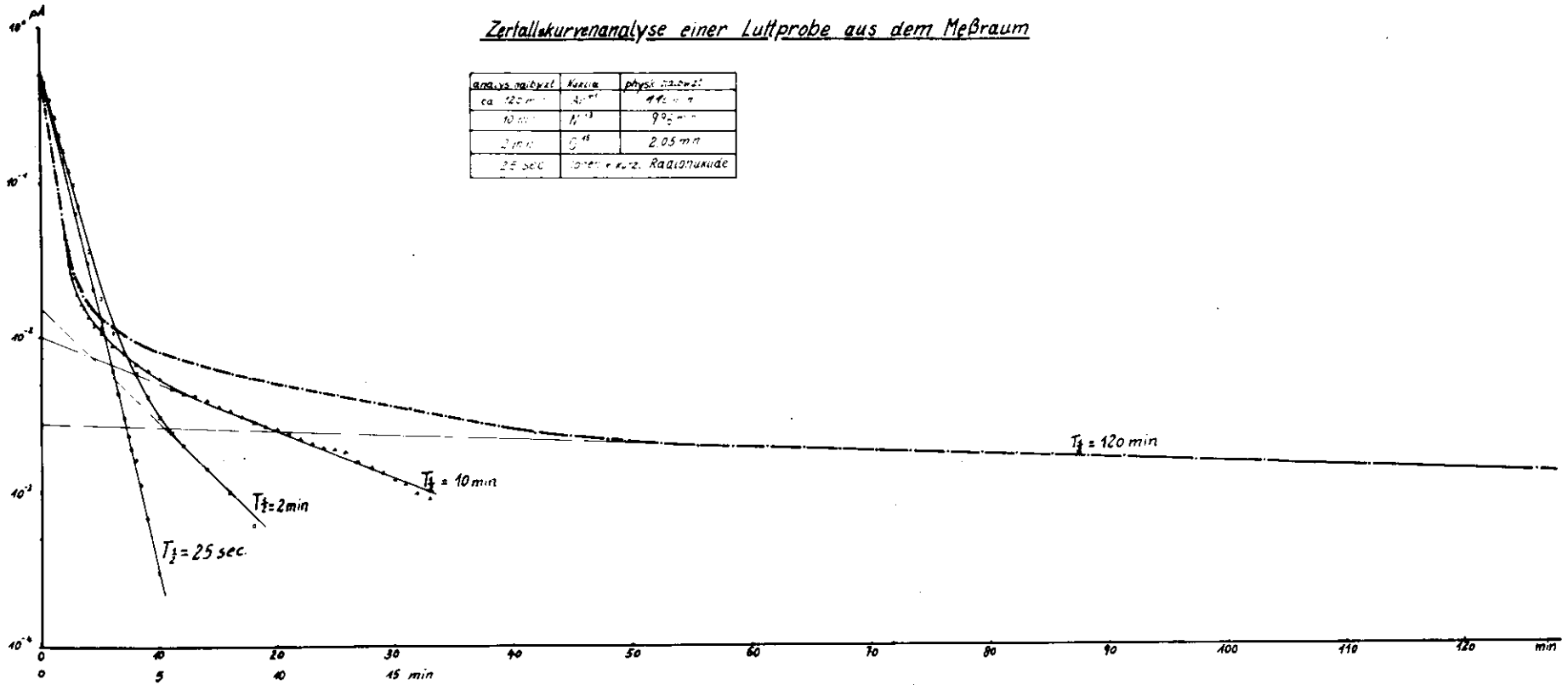


Abb. 6

Abb. 7

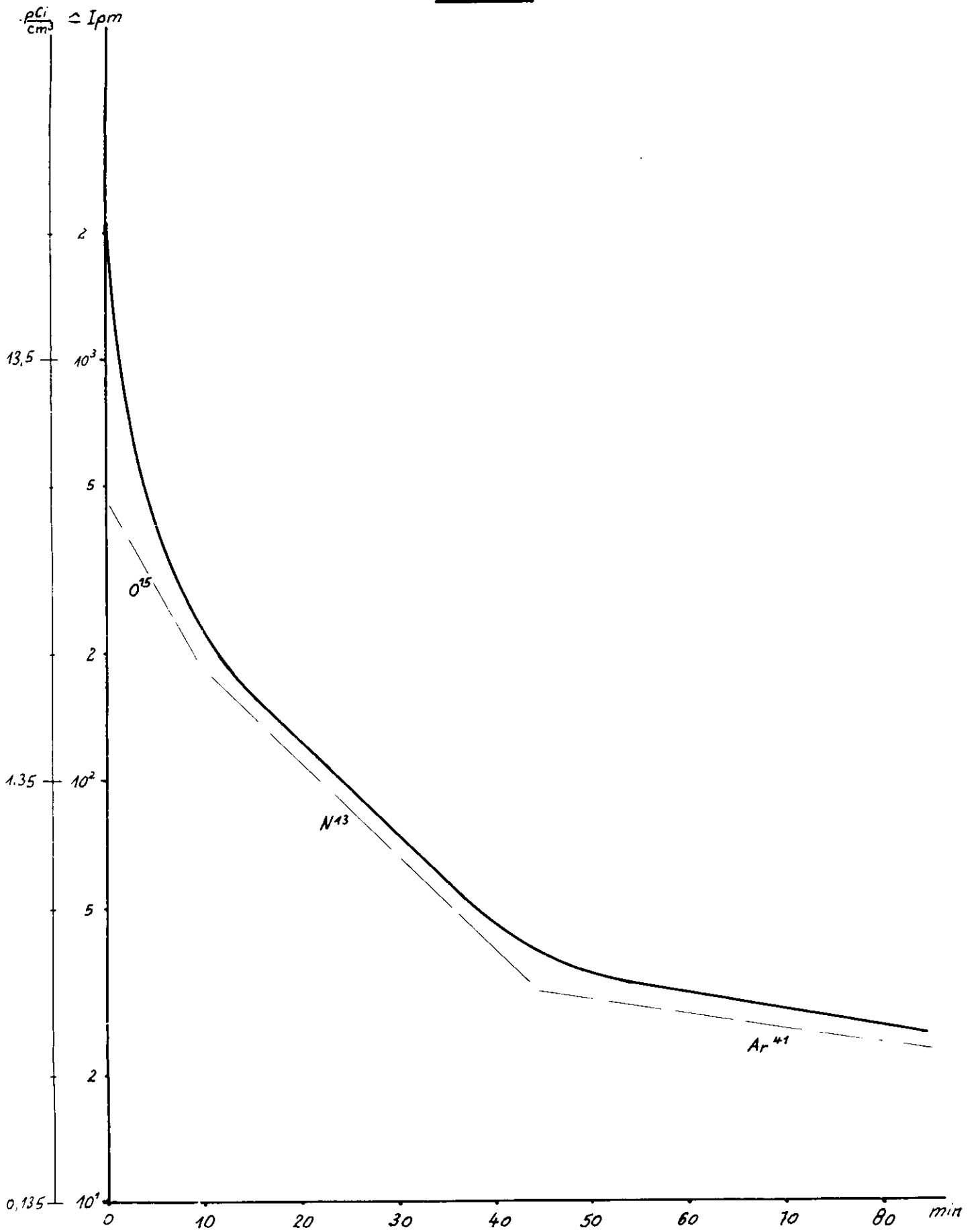


Abb. 8

Linac II: e⁻-Betrieb, 60 mA, 50 Hz, 1,6 μsec Pulsbreite
Al-Target im Meßraum

