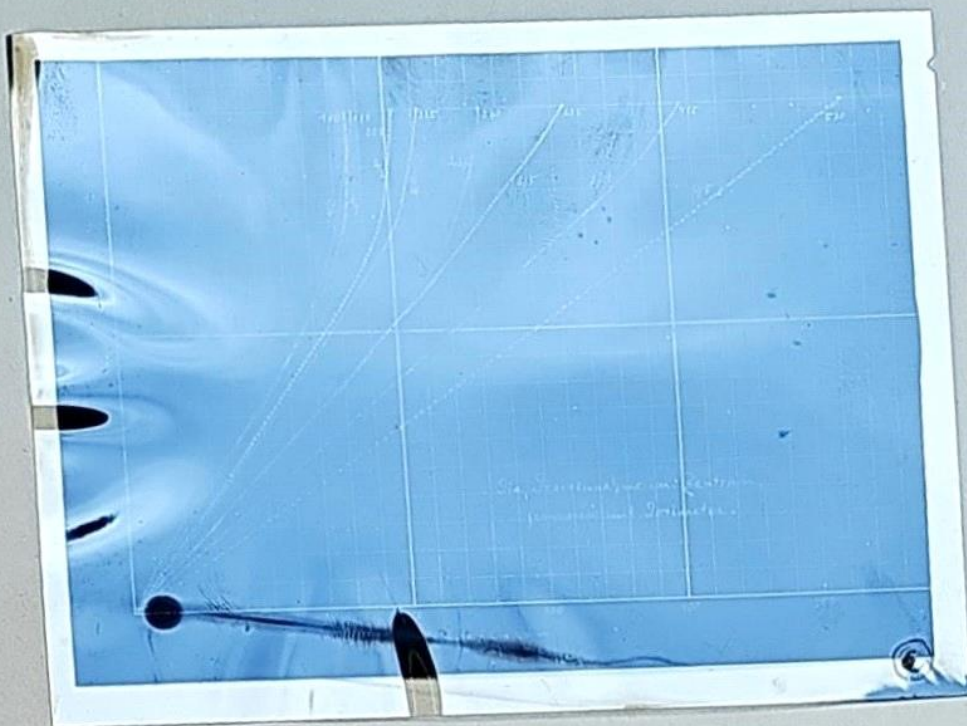




Nr. _____ Datum: _____

Name: _____

KOCH & STERZEL AG. DRESDEN A

Aus dem Röntgeninstitut
(Vorstand : Oberarzt Dr. med. habil. A. KOHLER)
bei der Chirurgischen Klinik München
(Vorstand : Professor Dr. med. FREY)

Dosismessungen bei Pendelbestrahlung
mit kleinen und sehr kleinen Feldern
an einem kreiszylindrischen Phantom

I N A U G U R A L - D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung der Doktorwürde

in der gesamten Medizin

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Ludwig-Maximilians-Universität

München

vorgelegt von

Karl Hans LAMECKER

aus München

Berlin, den 8. August 1944

Geschichtliches

Fast ebenso alt wie die Entdeckung der Röntgenstrahlen überhaupt ist auch die Kenntnis von einer biologischen Wirksamkeit dieser Strahlen. Man machte sich auch sehr bald daran, diese Eigenschaft therapeutisch auszunützen. Doch dazu war natürlich, wie bei jedem Medikament, auch eine Messung ihrer Qualität und Quantität notwendig, um daraus eine den jeweiligen Bedürfnissen angemessene Dosierung zu ermöglichen. Dieses Problem der Dosierung wäre durch Wahl des Abstands der Röhre vom Objekt, durch Wahl der Bestrahlungszeit und Bestrahlungsfeldes und durch Mehrung oder Minderung der Spannung und damit verursachter Wellenverkürzung bzw. -verlängerung und durch Wahl von Filtern wohl zu bewältigen, allein das Maß, die Menge der einem Körper zugeführten Strahlung war lange Zeit überhaupt nicht oder nur sehr ungenau zu bestimmen. Und daß die einem Körper applizierte Strahlenmenge nicht ganz in diesem verbleibt, sondern ihn z.T. wieder ganz unverbraucht verläßt, stellt eine weitere Komplikation der Aufgabe dar. Leider kennen wir bis heute noch kein praktisch brauchbares Verfahren, das es uns erlaubt, die tatsächlich einem Körper zugeführte Menge von Röntgenstrahlen, d.h. die von ihm absorbierte Strahlenmenge direkt zu messen. Wir müssen uns vorläufig mit einem indirekten Verfahren begnügen: meßbare Veränderungen an bestimmten Stoffen zu beobachten, die durch die Strahlung hervorgerufen werden.

Hierzu stehen uns nun verschiedene Methoden zur Verfügung. So stellen das Barium-Platin-Zyanür oder die von K i e n b ö c k angegebene Methode der Schwärzung von Bromsilber schon recht brauchbare Arten der Dosismessung dar. Besser noch hat sich das von F ü r s t e n - a u herausgebrachte Intensimeter gezeigt, bei dem sich von der Widerstandsänderung des Selen unter dem Einfluß

von Röntgenstrahlen auf die Intensität derselben schließen läßt. Weil aber alle diese Methoden erhebliche Fehlerquellen aufweisen, suchte man noch nach weiteren Möglichkeiten der Strahlungsintensitätsmessung.

Da die Röntgenstrahlen die Eigenschaft haben, ionisierend zu wirken, hat man versucht, mit luftgefüllten Ionisationskammern die Strahlenmenge zu bestimmen. Dieses Verfahren übertrifft die bisher genannten an Genauigkeit bei weitem. Ich brauche hier auf den Vorgang der Ionisation nicht näher einzugehen, jedenfalls hat man die Röntgenstrahlenmenge, die bei der Bestrahlung von 1 cm^3 Luft von 0° C und 760 mmHg-Druck, bei Ausnutzung der in der Luft gebildeten Elektronen, eine so starke Leitfähigkeit erzeugt, daß die bei Sättigungsstrom gemessene Elektrizitätsmenge eine elektrostatische Einheit beträgt, als Röntgeneinheit "r" gewählt und diese Einheit ist heute international anerkannt. Von den auf der Ionisation an der Luft beruhenden Meßgeräten ist besonders das von H a m m e r angegebene zu erwähnen. Es handelt sich bei dieser Methode um aufeinander folgende Ladungen und Entladungen, die in ihrer Gesamtzahl registriert werden und ein direktes proportionales Maß der aufgenommenen Strahlungsmenge darstellen. Da aber das Hammer-Dosimeter wegen seiner relativen Größe in der Praxis und auch am Phantom nicht immer anwendbar ist, hat man noch ein weiteres Verfahren entwickelt: die Meßkammern.

Die Kondensator-Meßkammern nach S i e v e r t - Z i m m e r werden vor der Bestrahlung aufgeladen und ihre Ladung gemessen. Je nach dem Grade der Bestrahlung verringert sich dann diese Ladung wieder, und dieser Ladungsverlust dient uns als Maßstab für die aufgenommene Strahlenmenge. Das Material der Kammern ist "Aerion", ein Gemisch von Bakelit und Graphit. Ihre Kapazität entspricht (maximal) 160 r. Das Laden der Kugeln und die Kontrolle der Ladung erfolgt mit einem eigenen

Apparat, dem Kondiometer. Das Röntgendosimeter sowohl wie das Kondiometer und die Meßkugeln werden von den Physikalisch-technischen Werkstätten Freiburg hergestellt. Die im folgenden beschriebenen Messungen wurden mit einem Hammer-Dosimeter und mit Meßkugeln und Kondiometer ausgeführt.

Begründung und Zweck der Versuche

In der modernen Strahlungspraxis häuften sich in den letzten Jahren die Fälle, die kleinere Bestrahlungsfelder erforderten, als dies bisher üblich war. Das lag z.T. daran, daß die frühzeitigere Erkennung von Tumoren diese in einem weniger fortgeschrittenen und ausgedehnten Zustand zur Bestrahlung gelangen ließ, z.T. aber auch daran, daß die Anwendung der Bestrahlungstherapie heute wesentlich verbreitert wurde und auf neue Gebiete, die bisher nur dem Messer des Chirurgen oder einer konservativen oder palliativen Therapie vorbehalten waren, ausgedehnt wurde. Der Kehlkopfkrebs oder das Netzhautgliom - um nur einige Fälle zu nennen - verlangen ausgesprochen kleine Felder. Es wird daher sicher nicht abwegig erscheinen, wenn in diesem Rahmen sehr kleine und, wie es die Pendelbestrahlung besonders erheischt, schmale Felder gemeinsam behandelt werden.

Aus den Untersuchungen von Kohler und Bender ("Strahlentherapie Band 65 und 76") geht klar hervor, daß das Nutzen-Schädlichkeitsverhältnis bei der Pendelbestrahlung um so günstiger sich gestaltet, je schmaler das Bestrahlungsfeld in axialer Richtung gehalten wird. Dort wird an 3 gleich großen Feldern, die sich nur in der Form unterscheiden (6/6 cm, 4/9 cm, 3/12 cm), nachgewiesen, daß sich das Maximum der Tiefendosis immer mehr zum Pendelzentrum hin konzentriert, je

schmäler das Bestrahlungsfeld ist, und erläutert, wie diese Erscheinung zustande kommt. Aus diesem Grunde ist der Wunsch verständlich, durch weitere Feldverschmälerung und -verkleinerung immer bessere Bestrahlungsergebnisse zu erzielen und das Nützlichkeits-Schädlichkeitsverhältnis weiter zu verbessern. In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch gemacht festzustellen, wie weit diese Theorie zutrifft und wo einer weiteren Feldverkleinerung und -verschmälerung die Grenze gesetzt ist. Sie wird in der zunehmenden Schwierigkeit bestehen, am Bestrahlungsobjekt von außen zentimeter- und millimetergenau die Lage eines in der Tiefe befindlichen Herdes und die des Pendelzentrums zu bestimmen, ferner in den durch Biegungs- und Torsionserscheinungen am Gerät verursachten Abweichungen des Strahlenkegels von seiner jeweils vorgeschriebenen Richtung und schließlich in der relativen Intensitätszunahme der Streuzusatzstrahlung, die die Oberflächendosis damit relativ erhöht und so den Haut-Herdquotienten mindert. Wird diese Grenze erreicht, so wird der Nutzens-Schadensfaktor wieder ungünstiger und eine weitere Feldverschmälerung und -verkleinerung widersinnig.

Versuchsanordnung

Zur Bestrahlung wurde das K o h l e r'sche P e n - d e l g e r ä t verwendet, das von einer Stabilivolt-Anlage der Siemens-Reinigerwerke betrieben wurde. Alle Einzelversuche wurden bei folgenden Betriebsdaten vorgenommen:

Spannung	190 kV
Stromstärke	15 mA
Halbwertschicht	1,25 cm Cu
Filter	0,75 cm Cu
Pendelradius	56 cm
Focus-Haut-Abstand (FHD)	50 cm
Pendelwinkel	0-180°
Pendelzeit	27 Min. für 180°.

Im Verlauf der Messungen wurde die Deckung des Röntgenstrahlkegels mit dem zur Feldeinstellung dienenden Lichtstrahlkegel geprüft, ferner auch noch mit einem von mir dazu angefertigten Meßkörper die Richtung des Einstellstrahls bei verschiedenen Pendelwinkeln, worüber ich noch in dem Kapitel Fehlerquellen berichten werde.

Die Messungen wurden an einem kreiszylindrischen Paraffinkörper von 6 cm Radius und 20 cm Länge ausgeführt. Dieses Phantom war auf einem hohlen Holzkasten so gelagert, daß seine Längsachse sich mit der Pendelachse deckte, und daß das Pendelzentrum, d.h. der Schnittpunkt von Pendelachse und Mittelstrahl, in der Mitte des Meßkörpers lag. In dieser Stellung war es durch kleine Zellstoffpolster fixiert. Die Meßpunkte waren das Pendelzentrum und die Oberfläche im Einstellstrahl. Es wurden 3 Versuchsreihen durchgeführt, die sich in der Versuchsanordnung unterschieden: In Anordnung A wurde gleichzeitig mit einem Dosimeter die Dosis im Zentrum und mit einer Kugelkammer die an der Oberfläche gemessen. In Anordnung B lag umgekehrt die Kugel im Zentrum und das Dosimeter an der Oberfläche. Außerdem wurde in 3 Fällen an beiden Meßpunkten gleichzeitig mit Kugelkammern gemessen (Anordnung C). Man erhielt so von beiden Meßpunkten jeweils 2 bzw. 3 Meßergebnisse, die sich in ihrem Verhältnis zueinander charakteristisch unterscheiden. Zur Messung der Strahlungsintensität im Zentrum befand sich am Phantom in der Längsachse eine kreisrunde 10 cm tiefe Bohrung von 2 cm Weite, in die das Dosimeter so eingeführt wurde, daß die Ionisationskammer im Pendelzentrum lag. Bei der Messung mit Kugeln (B u. C) wurde in die Bohrung des Phantoms eine Zelluloidröhre vom Kaliber der Kugeln eingebracht, die zur Aufnahme derselben diente. Der restliche Raum der Bohrung im Phantom um das Zelluloidrohr herum wurde mit Reis ausgefüllt. Bei den Messungen an der Oberfläche lagen die Meßgeräte dem Phantom einfach auf; das Dosi-

meter wurde dabei von einem Stativ gehalten, die Kugeln wurden mit einem Faden um ihren Fußteil angebunden.

Die Meßgeräte waren, wie gesagt, das Hammerdosimeter und die Kugelkammer. Das Dosimeter wurde von 5 zu 5° oder 10 zu 10° der Pendelung abgelesen. Die Kugelkammern wurden in der üblichen Weise vorher aufgeladen und gemessen, dann erfolgte die Bestrahlung und die Messung der Entladung. Je nach der zu erwartenden Strahlungsintensität wurden sie im Lauf eines Versuchs ein- oder mehrmals gemessen und wieder aufgeladen, und dies geschah so, daß die Unterbrechung möglichst nicht dann traf, wenn die Kugel sich gerade im direkten Strahlenfeld befand, da beim Wiederauflegen schon eine geringe Platzveränderung das Meßergebnis beeinträchtigen müßte. Bei zweifelhaften Ergebnissen machte ich eine Wiederholungsmessung und interpolierte dann zwischen den gefundenen Werten oder nahm den wahrscheinlicheren, wenn der andere sehr abwegig erschien.

Messungen

Meine Versuche begannen bei Feldern von 10 qcm und endeten bei 4 qcm. Im einzelnen habe ich folgende Feldgrößen und Feldformen gemessen:

20 qcm:	4/5 cm	und	2/10 cm
10 "	2/5 "	"	1/10 "
5 "	2/2,5 cm	"	1/5 "
4 qcm	2/2 cm	"	1/4 "

Davon wurden alle Felder in der Anordnung A und B gemessen, die Felder 1/4, 2/2 und 1/5 cm außerdem noch in Anordnung C. Die r-min-Zuflüsse habe ich mit Dosimeter und Kugeln ermittelt. Sie lagen bei Anwendung der Kugelkammer-Meßmethode höher als bei der Messung mit dem Dosimeter.

Da bekanntlich auf Grund der sekundären Strahlen (Streu-

strahlung und Streuzusatzstrahlung) die maximale Intensität bei stehendem Feld nicht in der Oberflächenebene selbst und noch weniger in den benachbarten Schichten darüber (proximal, in Richtung der Röhre) anzutreffen ist, sondern in den distalen Nachbarschichten der Oberflächenebene auftritt, ist der Grund für die geringeren Dosimeterwerte sicher darin zu suchen, daß sich der Mittelpunkt des aufliegenden Dosimeters mehr proximal befindet als der einer aufliegenden Kugel. Dieser Effekt muß bei einem relativ kleinen Phantomkörper von starker Oberflächenkrümmung, wie unser Meßkörper ihn darstellt, aber unauffälliger sein als bei einem massigeren Unterlagsgegenstand. Auch die Dicke des Dosimeters (18 mm) beeinträchtigt eine exakte Messung stehender sehr schmaler Felder ($1/10$ cm, $1/5$ cm, $1/4$ cm). Da die Werte der Kugeln hier in ihrem Verhältnis zueinander ein harmonischeres Bild ergeben, erscheinen sie mir im großen Ganzen wahrscheinlicher als die Dosimeterwerte. Durch Interpolieren und durch Kontrollmessungen ergaben sich schließlich folgende Werte des r-min-Zuflusses an der Oberfläche:

Tabelle I

Feldform	4/5	2/10	2/5	1/10
r-Einheiten	38	31	32	25
Feldform	2/2,5	1/5	2/2	1/4
r-Einheiten	30	26,5	27	26

Aus den Messungen ergaben sich für das Pendelzentrum folgende Werte des r-min-Zuflusses:

Tabelle II

Feldform	4/5	2/10	2/5	1/10
r-Einheiten	20	15	13,3	14
Feldform	2/2,5	1/5	2/2	1/4
r-Einheiten	13	9,3	9,3	8

Auffällig ist die Tatsache, daß die langen schmalen Felder $1/10$ und $2/10$ bei allen Messungen an der Oberfläche mit stehender Röhre einen geringeren r-min-Zufluß

ergaben als die gleich breiten, aber kürzeren Felder 2/5 und 1/5 cm. Bei der P e n d e l u n g waren dann meist wieder, wie das den natürlichen Erwartungen entsprach, bei den F e l d e r n auch die h ö h e r e n Dosen zu finden. Nur in Anordnung B zeigte Feld 2/5 und 2/10 dieselbe Erscheinung. Eine stichhaltige Erklärung für dieses Phänomen ist bisher nicht zu geben. Vermutlich ist hier ein unerkannter Fehler unterlaufen. Die Ergebnisse der Pendelungen sind aus der folgenden

Tabelle III ersichtlich:

Zentrum	Dosimeter	Kugel	Kugel	Errechnet
Oberfl.	Kugel	Dosimeter	Kugel	Errechnet
	A	B	C	R
Feldgröße u.				
Feldform 4/5	$\frac{530}{210}$	$\frac{440}{180}$		$\frac{540}{220}$
2/10	$\frac{415}{148}$	$\frac{380}{105}$		$\frac{405}{88}$
2/5	$\frac{335}{130}$	$\frac{295}{135}$		$\frac{360}{91}$
1/10	$\frac{225}{125}$	$\frac{180}{80}$		$\frac{378}{36}$
2/2,5	$\frac{270}{185}$	$\frac{305}{160}$		$\frac{351}{86}$
1/5	$\frac{170}{84}$	$\frac{160}{75}$	$\frac{175}{76}$	$\frac{252}{38}$
2/2	$\frac{205}{120}$	$\frac{155}{85}$	$\frac{200}{105}$	$\frac{252}{77}$
1/4	$\frac{175}{118}$	$\frac{164}{65}$	$\frac{215}{84}$	$\frac{216}{37}$

Fehlerquellen

Die Ergebnisse der Messungen weichen z.T. ziemlich von den Berechnungen ab. Nun ist zwar das eine Theorie, das andere Praxis, und wenn sich diese beiden ganz decken müßten, so wären ja keine Versuche und Untersuchungen

nötig, es würde ein möglichst sauberes und genaues Arbeiten schon immer genügen. Umgekehrt entschuldigt der Gegensatz von Theorie und Praxis natürlich nicht gänzlich alle Unterschiede, die sich zwischen Versuchen und Berechnungen ergeben. Vielfach sind diese durch Fehler verursacht, die teils unwillkürlich bei der Arbeit unterlaufen, die aber andernteils oft unvermeidlich und in der Unvollkommenheit der Methoden begründet sind.

Zur ersten Sorte von Fehlern gehören ungenaue Einstellungen des Geräts, unvorsichtiges Hantieren mit den sehr empfindlichen Kugelkammern und ähnliches. Ich habe mich bemüht, solche Fehler möglichst zu vermeiden, und ich glaube, daß sie nur einen sehr geringen Teil Schuld daran tragen, wenn die Ergebnisse einer Messung nicht mit den daran geknüpften Erwartungen übereinstimmen. Mehr doch möchte ich als hierfür verantwortlich die unvermeidlichen Fehler bezeichnen, die schon in der Natur der Meßgeräte und des Meßvorganges eingeschlossen sind.

Hier wäre in erster Linie der Fehlerbereich der Kugelkammern zu nennen. Es ist bekannt, daß sie oft auch ohne Bestrahlung schon etwas von ihrer jeweiligen Ladung verlieren und so das Meßergebnis beeinträchtigen können. Vielleicht die wichtigste Fehlerquelle sind weiterhin die Verbiegungen und Torsionen am Bestrahlungsgerät, die durch das Gewicht der Röhre, ihrer Haube und das Eigengewicht des Halteapparates zustandekommen. Durch diese Gewichte biegen sich die waagerechten Holme und senkrechten Tragrohre einmal erdwärts bzw. röhrenwärts, ferner aber verdrehen sich auch während der Pendelung (Kraft an einem einarmigen Hebelholme) die Tragrohre und durch die Schwerpunktlage der Röhre außerhalb der Holmebene die Holme selbst, wenn sich die Pendelung der Waagerechten zuneigt (nach 0 und 180°). Der erdwärts gerichtete Zug der Röhre wird durch einen Federzug von der Decke des Bestrahlungsraumes her, der am

Ende der Holme ansetzt, teilweise aufgehoben und damit die Biegung der Holme und Torsion der Träger verringert, aber auch noch unkontrollierbarer gemacht. Vor allem auch das ruckweise Bewegen des Geräts während der Pendelung bringt die Röhre und damit die Strahlen oft aus ihrer dem Pendelwinkel entsprechenden Richtung. Wenn man alle diese Momente zusammenfaßt und bedenkt, daß der schmale Strahlenkegel mit den eingestellten sehr kleinen Feldern als langer Zeigearm alle diese Fehler erst noch verdeutlicht, wird man verstehen, wie wichtig diese Fehlerquelle ist. Ein Versuch, mit dem Einstell-Lichtstrahl, der auf ein besonders kleines Feld ($1/1$ cm) eingestellt wurde und mit einem zu diesem Zwecke selbst hergestellten Meßkörper aus Papier, auf dem ich die der jeweiligen Winkelstellung von $10/10^\circ$ entsprechenden Felder vorgezeichnet hatte, bewies, daß der Strahlenkegel des Apparates besonders gegen Anfang und Ende der Pendelung, also bei 0° und 180° das entsprechende Feld nur wenig oder gar nicht traf. Dies ist bei größeren Feldern der Bestrahlungspraxis ohne Bedeutung, da ja die Meßpunkte trotzdem noch in der ungefähren Mitte des Feldes bleiben würden, bei den sehr kleinen und schmalen Feldern meiner Versuche aber führt es zu sehr ungenauen Resultaten. Ein Beweis für die Schwere der hierdurch verursachten Fehler ist mit dem verdoppelten Halbzeitwert erbracht.

Eine augenfällige Tatsache ist es, daß im allgemeinen sowohl die Oberflächenwerte als auch die des Zentrums in der Versuchsreihe A höher liegen als in der Reihe B. Das Dosimeter zeigte also im Zentrum mehr an als eine Kugel, während umgekehrt an der Oberfläche eine Kugel die vom Dosimeter aufgezeigten Dosen überbot. Aus der großen Regelmäßigkeit dieser Erscheinung kann man einen Zufall mit Sicherheit bereits ausschließen, auch die an sich erheblicheren Fehlergrenzen der Kugeln könnten diese Erscheinung nicht allein verursacht haben. Eine nähere Betrachtung zeigt uns auch gleich den wah-

ren Grund für dieses Verhalten der Meßgeräte. Ein metallener Körper muß notwendig mehr Strahlung absorbieren als etwa lebendes Gewebe oder das beim Versuch verwendete Paraffinphantom. Damit bewirkt er aber zugleich eine erhöhte Sekundärstrahlung. Unser Dosimeter ist ein solcher Körper. In der Versuchsanordnung A liegt es im Pendelzentrum, bleibt also während der gesamten Bestrahlungszeit im direkten Strahlenkegel. Es verursacht somit 27 Min. lang eine erhöhte Sekundärstrahlung, als dies bei einem durchweg homogenen Phantom im Zentrum der Fall wäre. Diese erhöhte Streustrahlung dürfte auch auf die Kugel an der Oberfläche gewirkt haben und wurde von ihr mit aufgenommen. So kommt der relativ hohe Oberflächenwert der Kugel zustande. Ist umgekehrt im Zentrum eine Kugel und das Dosimeter an der Oberfläche, so ist der Streueffekt der Kugel viel geringer und die spärliche verursachte Streustrahlung vermag wegen ihrer weichen Strahlenqualität z.T. nicht einmal die Metallwandung der Ionisationskammer des Dosimeters zu durchdringen. Das Dosimeter muß also in der Anordnung B weniger anzeigen, als es die Kugel in A tat. Ja, man wird die Oberflächendosis sogar noch geringer veranschlagen dürfen, als das Dosimeter sie angibt, denn das Dosimeter muß wegen seiner Größe notwendigerweise länger von dem direkten Strahl der wandernden Röhre berührt werden, als nach der Theorie die Bestrahlungszeit statthaft ist: Wenn z.B. ein 1 cm breites Feld eingestellt ist, so kommt jeder Punkt der Oberfläche nur so lange in den direkten Strahlenkegel, als dieser eben braucht, um in seiner Breite über diesen Punkt wegzuwandern. Das Dosimeter aber ist kein Punkt, sondern ein Körper von bestimmten Ausmaßen. Ein 1 cm breiter Strahlenkegel wird daher eben so lange das Dosimeter treffen, als er braucht, um in seiner Breite über die Strecke des Dosimeterdurchmessers zu wandern. Diese Strecke ist aber größer, sie ist gleich

der Dosimeterstärke. Kehren wir zu unserer ursprünglichen Betrachtung der Dosisunterschiede von A und B zurück und untersuchen wir weiter, wieso das Dosimeter im Zentrum höhere Werte anzeigt als die Kugel, so ergibt sich hierfür folgende Begründung. Wie oben erwähnt, verursacht das dichtere Medium des Dosimeters eine stärkere Sekundärstrahlung als das dünnere Medium des Phantoms und absorbiert mehr von der primären Strahlung. Und aus diesem letzteren Grund muß die Kugelkammer im Zentrum eine geringere Dosis erhalten, wenn sich das Dosimeter gleichzeitig auf der Oberfläche befindet. Denn von dem Augenblick an, wo der Strahlenkegel das Dosimeter erreicht, bis dahin, wann er es wieder verläßt, das ist also wieder der Dosimeterdurchmesser, wird die Kugel im Zentrum von diesem mehr oder weniger beschattet und erhält so eine geringere direkte Dosis als während der übrigen Bestrahlungszeit. In Anordnung A beschattet zwar auch die Kugel das Dosimeter, doch ist es ohne weiteres verständlich, daß dies dem Verhältnis der Ausmaße von Dosimeter und Kugelkammer gemäß im einen Falle um ein vielfaches geringer sein muß als im andern Fall.

Aus diesen Gründen erhellt, daß in beiden Anordnungen A und B die gemessenen Dosiswerte der Kugeln nicht den wirklichen Verhältnissen entsprechen können, und weiter aber auch, daß daran nicht die Kugeln schuld sind, sondern die Gegenwart des Dosimeterkörpers. Wir lernen also, daß bei den empfindlichen Verhältnissen meiner Versuche (sehr kleine und sehr schmale Felder) es nicht möglich ist, exakte und übereinstimmende Ergebnisse von Dosimeter und Kugeln zu erhalten, wenn beide Meßmethoden gleichzeitig während einer Bestrahlung

a n g e w e n d e t w e r d e n . Wir erkennen aber ferner, daß die Kugelkammermethode trotz ihrer diesmal unwahrscheinlichen Ergebnisse zumindest für die Messung der Oberflächendosis für sich allein angewendet für sehr kleine Felder geeigneter ist als die Messung mit dem Dosimeter. Dies letztere beweisen die Werte der Meßreihe C. Diese konnte leider aus Zeitmangel nicht mehr für alle Feldformen durchgeführt werden.

Bei der Messung der Oberflächendosis müssen auch durch die Versuchsanordnung selbst geringe Fehler verursacht werden. Da Kugeln und Dosimeter dem Phantom nur aufliegen, befindet sich der Mittelpunkt der Meßgeräte über der Ebene der Oberfläche, gibt also nicht genau den Wert des eigentlichen Meßpunktes, sondern den der benachbarten Luftschicht über der Oberfläche wieder. Dieser ist aber, wie im Kapitel Messungen bei der Besprechung der r-Min-Zuflüsse schon behandelt, geringer als der eigentliche Oberflächenwert und der für die Praxis wichtigen dicht darunter liegenden Schichten. Andererseits ist aber anzunehmen, daß dieser Fehler bei den relativ geringen Größenverhältnissen des Phantoms und bei seiner Oberflächenkrümmung gering sein wird. Auch ist anzunehmen, daß die Dosimeter- bzw. Kugeldicke diesen Fehler durch ihre zu lange Bestrahlungszeit (s.o.) ausgleichen. Der resultierende Wert wird sicher innerhalb des Fehlerbereichs der Meßgeräte liegen.

Die Kurven der im Zentrum gemessenen Dosimeterwerte haben nach der Theorie einer je nach Feldgröße und Feldform mehr oder minder steilen Geraden durch das Achsenkreuz zu entsprechen, wobei die Abszisse der r-Dosis, die Ordinate dem Pendelungswinkel entspricht. In der Praxis weisen diese Kurven auch eine weitgehende Ähnlichkeit mit der beschriebenen Form auf, soweit es sich um die Kurven großer, mittlerer und mäßig kleiner Felder handelt. Bei den letzteren jedoch bereits und besonders bei den ausgesprochen kleinen Feldern meiner Meßreihe trat eine merkwürdige Abweichung von dieser Geradlinig-

keit auf: Die Kurven stiegen in ihrem letzten Viertel oder Drittel stark an, es trat keine meßbare r-Zunahme im Zentrum mehr ein. Die Annahme, daß dieses Phänomen durch verringerten r-Min-Zufluß verursacht sein könnte, entbehrt jeder reellen Begründung. Die Erklärung kann einzig darin zu finden sein, daß der direkte Strahlenkegel auf Grund von Biegungen und Torsionen an dem Bestrahlungsgerät nicht mehr oder nur zum geringen Teil den Meßpunkt trifft. Da nun aber dieser Umstand meine Meßergebnisse wesentlich beeinflusst, habe ich außer meinen absoluten Meßergebnissen noch zusätzlich die verdoppelten Halbzeitwerte angegeben. Es handelt sich dabei einfach um das verdoppelte Resultat der ersten Pendelzeit- und Pendelstreckenhälfte, also von 0-90°. Ein Vergleich mit den errechneten Werten zeigt, daß die doppelten Halbzeitwerte sich besser mit den Berechnungen decken als die absoluten Meßergebnisse.

Tabelle IV

Der verdoppelte Halbzeitwert des Zentrums

<u>Feld</u>	<u>Gemessener Wert</u>	<u>Errechn.W.</u>	<u>H.Z.-Wert</u>
4/5	530 r	540 r	540 r
2/10	415 r	405 r	400 r
2/5	335 r	360 r	360 r
1/10	225 r	378 r	260 r
2/2,5	270 r	351 r	350 r
1/5	170 r	252 r	250 r
2/2	205 r	252 r	250 r
1/4	175 r	216 r	220 r

Kritik der Messungen

Einen wichtigen Maßstab für den Erfolg des Versuchs bilden die Herd-Hautquotienten, das Verhältnis der Zentrumsdosis zur Oberflächendosis. Von der Höhe dieser Zahl wird es schließlich abhängen, ob diese kleinen und schmalen Felder für die Praxis geeignet sind und ob sie

gegenüber größeren und breiteren irgend einen Vorteil bieten. Die Tabelle V zeigt uns die Quotienten, wie sie sich aus den Messungen ergeben. Wie man aber aus der Tabelle ersieht, liegen die Verhältnisse bei den sehr kleinen Feldern immer noch sehr günstig. Die Verhältniszahlen der Felder 2/10, 2/2,5, 2/2 cm sind die höchsten, diese Felder scheinen also die meisten Vorteile zu bieten. Daneben zeigen aber auch die nur 1 cm breiten Felder noch Werte, die ihre Anwendung in der Praxis durchaus günstig und erfolgversprechend erscheinen lassen. Immerhin macht sich bei ihnen aber die Streuzusatzstrahlung bereits stärker bemerkbar. Für Herde, die in der ungefähren Tiefe unseres Pendelzentrums liegen, wird man also den breiteren Feldern den Vorzug geben, während bei mehr zur Oberfläche gelegenen Herden die Erfolge bei Anwendung der ganz schmalen Felder sicher ebenso gut, wenn nicht vielleicht noch besser sein werden. Es bleibt dabei zu erwägen, ob bei den sehr kleinen und schmalen Feldern nicht eine Verringerung des Focus-Hautabstandes angebracht wäre.

Tabelle V

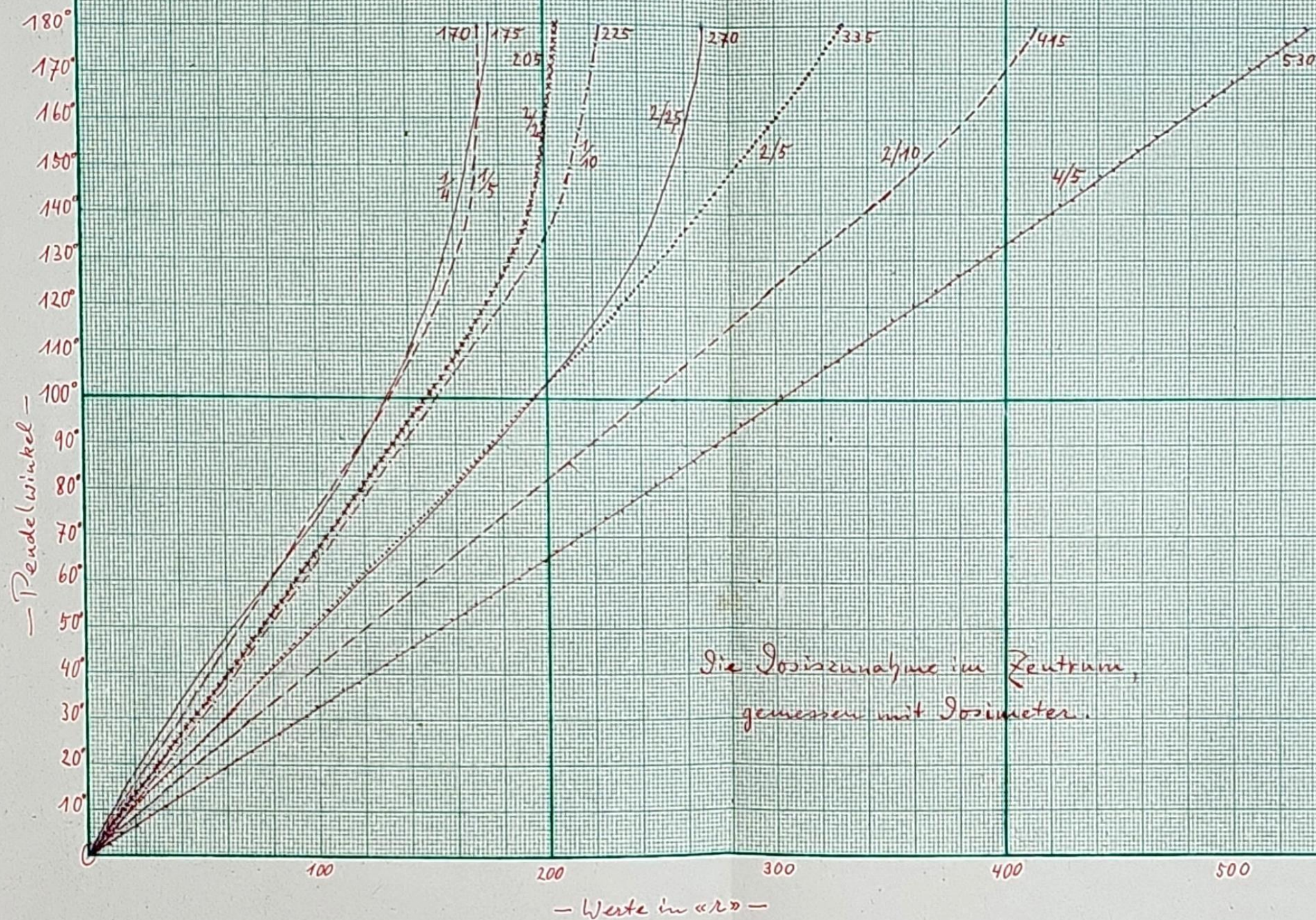
Feld:	4/5	2/10	2/5	1/10	2/2,5	1/5	2/2	1/4
Quotient:	2,5	3,0	2,5	2,0	1,7	2,1	1,8	2,1

Sehr interessant und für die Praxis von großer Bedeutung wird ein Vergleich der Felder nicht nach gleicher Größe, sondern nur nach gleicher Länge sein. In unserer Feldserie ist dies bei den Feldern 2/10 und 1/10 cm und bei 4/5, 2/5 und 1/5 cm möglich. Betrachten wir uns die entsprechenden Herdquotienten, so ergibt sich in allen Fällen, daß die breiteren Felder günstigere Verhältniszahlen aufweisen. Daraus ist deutlich zu erkennen, daß bei den gegebenen Verhältnissen hier bei den 2 cm breiten Feldern die Grenze liegt, bis zu der eine Feldverschmälerung opportunistisch ist. Mit einer weiteren Verschmälerung ist kein Vor-

teil mehr zu gewinnen.

Die Tabelle der Meßergebnisse zeigt außer ihnen noch die errechneten Werte, wie sie sich nach den Formeln du Mesnil de Rochemont unter Zugrundelegung der r-Min-Zuflüsse aus Tabelle I und II ergeben. Beginnen wir bei der Beurteilung der Messungen daher mit einem allgemeinen Vergleich der gemessenen und errechneten Werte.

Die Oberflächenwerte stimmen zu Beginn der Versuche, also bei den größeren Feldern noch recht gut mit denen der Reihe R in Tabelle III überein, d.h. sie sind in der üblichen Weise etwas höher als die Werte der Rechnung. Der Grund hierfür ist ganz einfach die Streuzusatzstrahlung, also die sekundären Strahlen, die den Meßpunkt treffen, während er nicht im direkten primären Strahlengang ist. Bei den sehr schmalen Feldern meiner Messungen jedoch werden diese Unterschiede größer. Aber auch hieran trägt die Streuzusatzstrahlung Schuld, wie Katz nachgewiesen hat. Bei der Verschmälerung des Feldes wird die direkte Bestrahlungszeit eines Punktes verringert und damit sinkt die r-Dosis. Bei breiten Feldern in der Pendel- und Rotationsbestrahlung fällt die Streuzusatzstrahlung gegenüber der starken, intensiven und langdauernden Primärstrahlung nicht so stark ins Gewicht und erhöht ihren Wert nur um ein Geringes. Bei sehr schmalen Feldern dagegen, wo die direkte Bestrahlungszeit eines Oberflächenpunktes nur kurz ist, vermag sie auf Grund ihrer andauernden Wirkung die Dosis der direkten Strahlung sogar zu übertreffen, sie summiert sich also mit ihr zu einem relativ hohen Oberflächenwert. Und damit wird aber die vorteilhafte Eigenart der Pendel- und Rotationsbestrahlung, nämlich die Niedrighaltung der Oberflächen(=Haut)dosis gerade in ihr Gegenteil verkehrt, sie läuft dem Zweck der Methode zuwider. Es muß also irgendwo eine Grenze sein, wo diese Umkehrung auftritt.



Ein Vergleich der Herd-Hautquotienten wird sie zeigen. Mit dieser Feststellung erklären sich aber die großen Unterschiede zwischen den errechneten und den gemessenen Oberflächendosen. Wenden wir uns nun nach diesem Vergleich der Messungen mit den Berechnungen einer eingehenderen Betrachtung der Meßwerte selbst zu. Das auffälligste dabei ist zweifellos die erhebliche Dissonanz der Ergebnisse bei den ganz kleinen Feldern. Mit Sinken der Feldgröße, mit Schmälerwerden der Feldform nimmt das Meßergebnis oft ganz unwahrscheinliche Werte an. Hier kann ich nur auf die recht erheblichen Fehlerquellen verweisen. Der 56 cm lange "Zeiger", den der schmale Strahlenkegel bildet, muß auch bei ganz geringen Abweichungen von seiner vorgeschriebenen Richtung wegen der Schmalheit des Feldes das Ergebnis beeinträchtigen und die Dosis am Meßpunkt verringern. Bis etwa zum Pendelwinkel von 110° sind die Abweichungen der Zentrums- werte von denen der Berechnung und von einem normalen Kurvenverlauf bei graphischer Darstellung nämlich geringer und jedenfalls geregelter. Diese Zahlen geben höhere Werte für die Pendelmitte an, und wenn sie auch nicht für den Meßpunkt genau zutreffen, wo nun einmal tatsächlich andere Werte gefunden wurden, so sind sie doch ein Ausdruck für die dem Körper applizierte Strahlenmenge. Daß bei den ganz kleinen Feldern wirklich so starke Intensitätsschwankungen an den Meßpunkten herrschen, darf als erwiesen gelten. Praktisch folgt daraus eine Einschränkung ihrer Anwendbarkeit. Denn wenn schon an dem ebenmäßigen, absolut ruhig gelagerten Phantom die Verhältnisse so liegen, wie erst dann am Patienten, an dem Herd und Pendelzentrum schon von außen viel schwerer zu bestimmen sind und der durch Atembewegungen zumindest, wenn nicht durch körperliche Unruhe einer Intensitätskonzentration am gewünschten Punkt entgegenwirkt.

Beurteilen wir noch die Kurven der Dosiszunahme im Zentrum. Aus ihrem geraden Verlauf in der ersten Hälft-

te, ev. noch im zweiten Drittel, darf man hier auf einen regelrechten Verlauf der Versuche ohne weiteres schließen. Da aber gerade die Versuche, deren Kurven im letzten Teil, gegen Ende der Pendelung so starke Abweichungen vom normalen Verlauf zeigen, die Versuche mit den sehr kleinen Feldern sind und diese meist überhaupt nicht unterbrochen wurden, - und wenn dies geschehen mußte, so habe ich mich bemüht, weder das Phantom noch seine Unterlage zu berühren, - so ist an ihren Ergebnissen kaum zu zweifeln. Die Kurven der Dosiszunahme an der Oberfläche zeigen bei allen Feldern einen ähnlichen Verlauf. Die schmalen Felder zeigen, daß sich die r-Zunahme fast ausschließlich während der direkten Bestrahlungszeit abspielt, also nur während weniger Pendelwinkelgrad.

Zusammenfassung

An sehr kleinen Feldern, die bei paarweiser gleicher Größe verschiedene Feldbreiten hatten, wurde untersucht, ob die schmälere Feldformen hinsichtlich des Herd-Hautquotienten irgend welche Vorteile bieten, wie dies bei großen und mittleren Feldern erwiesenermaßen der Fall ist. Dabei wurde gefunden, daß die Verhältnisse selbst bei den kleinsten und schmalsten Formen noch günstig liegen, daß aber der optimale Quotient nicht bei den schmalsten Feldformen liegt. Vielmehr ist er da zu finden, wo die Streuzusatzstrahlung die direkte Strahlendosis an der Oberfläche noch nicht allzu hoch überschreitet und sich mit ihr zu noch mäßigen Hautdosen addiert. In unseren Fällen lag deshalb die Verhältnisse bei den 2 cm breiten Feldern am günstigsten. Die Verminderung des Focus-Haut-Abstandes zur Verringerung der Fehlerquellen bei weiteren ähnlichen Untersuchungen wird anheimgestellt, da sich so die Werte bei den ganz schmalen Feldern vielleicht noch günstiger ge-

stalten. Eine wesentliche Fehlerquelle bildet die einpolige Achslagerung des Pendelgerätes; die dadurch bedingten Verbiegungen und Torsionen beeinträchtigen den Strahlengang bei ganz kleinen und schmalen Feldern erheblich.

Zum Schlusse meiner Arbeit habe ich noch die angenehme Pflicht, Herrn Oberarzt Dr. K o h l e r für die Überlassung dieses Themas und Fräulein Dr. B e n d e r für ihre liebenswürdige und freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Versuche meinen Dank auszusprechen. In gleicher Weise bin ich Herrn Professor Dr. J a e g e r für die Freundlichkeit der Übernahme des Referats zu Dank verpflichtet.

Schrifttum

1. R. du Mesnil de Rochemont: Strahlentherapie Bd.60 (1937) S.648.
2. U. Henschke: Fortschr.a.d.Geb.d.Rö-Str.Bd.58 (1938).
3. M. Bender u. A. Kohler: Strahlenther.Bd.65 (1939) S.468.
4. R. du Mesnil de Rochemont: " " 66 (1939) u. Bd. 63.
5. Nakaidzumi u. Miyakawa: " " 66 (1939).
6. P. Spengruber: Diss. München 1939.
7. M. Bender u. A. Kohler: Strahlenther.Bd.67 (1940).
8. F. Katz: Diss. München 1940.
9. F. Schmidt: " " 1941.

Lebenslauf

Am 21. Oktober 1919 wurde ich in München als Sohn des Buchdruckers Andreas L a m e c k e r und seiner Ehefrau Ida geb. Kabra geboren und wurde evangelisch auf die Namen Karl Hans getauft. Ich besuchte dann von meinem 6. Lebensjahr ab die Volksschule und vom 10. das Wilhelmsgymnasium in München, wo ich im Frühjahr 1938 das Abitur bestand. Anschließend machte ich mein Halbjahr Arbeitsdienst in der RAD-Abt. 6/300, und darauf kam ich zum I.R. 63 nach Landshut. Im Frühjahr 1939 kam ich als Sanitätsoffiziersanwärter auf die Militärärztliche Akademie nach Berlin und hörte in Berlin meine ersten fünf Semester Medizin. Die Ärztliche Vorprüfung legte ich im Frühjahr 1941 dort ab. Drei Semester lang unterbrach ich durch Kriegseinsatz am Westwall, in Frankreich und in Rußland mein Studium. Meine Famulaturen leistete ich am Res. Lazarett 121 in Berlin, am Krankenhaus Bogenhausen und an der II. Universitätsfrauenklinik (Prof. Weibel) in Wien und an der Kinderklinik in Prag ab. Das sechste klinische Semester studierte ich wieder in Berlin, die anderen klinischen Semester hörte ich in München. Zum Staatsexamen meldete ich mich bei der Friedrich-Wilhelms-Universität in Berlin im Sommer 1944.