H. BRUNNER

FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ E. V.

Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)

FS - 1

NICHT - IONISIERENDE STRAHLUNG

Dosimetrie, biologische Wirkung, Strahlenschutz (Ultraschall, Mikrowellen, Laser)

Dr. H. Kresse

E. Kaufmann

1973

FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ E. V.

Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)

F S - 1

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

Dosimetrie, biologische Wirkung, Strahlenschutz
(Ultraschall, Mikrowellen, Laser)

Texte zum Informationskurs des FS vom 20. März 1973 in Bern

Dr. H. Kresse	:	Wirkungen und Nebenwirkungen medizinischen Ultraschalles.
E. Kaufmann	:	Gefährdung durch Mikrowellen.
E. Kaufmann	:	Gefährdung durch Laser.

Zusammengestellt vom Fachverband für Strahlenschutz.
Nur zur Gratisabgabe an die Mitglieder bestimmt.
Andere Interessenten wenden sich bitte an die Verfasser für Sonderdrucke der einzelnen Beiträge.

Auflage 300 Ex. Oktober 1973

Sekretariat: H. Brunner, Abt. SU, EIR, CH-5303 Würenlingen, Tel. 056/98 17 41
Bankkonto: Kreis und Stadtsparkasse Jülich, Nr. 320 37; Postscheckkonto der Sparkasse: Köln 103 33
Schweiz. Bankverein, CH-5430 Wettingen, Nr. 765 252, Postscheckkonto 50-14988

V O R W O R T

An der Versammlung des Fachverbandes für Strahlenschutz des Jahres 1972 wurde beschlossen, für die Mitglieder einen Informationskurs über "Dosimetrie, biologische Wirkung und Strahlenschutz bei nicht-ionisierenden Strahlen" durchzuführen. Das Gebiet wurde in den letzten Jahren durch die Einführung von verschiedenen Typen nicht-ionisierender Strahlen, wie Ultraschall, Mikrowellen und Laser, in der Technik, in der Medizin und sogar im Haushalt sehr aktuell. Die von Prof. H. Pauly (Universität Erlangen-Nürnberg) im Rahmen der Jahrestagung 1972 der Deutschen Gesellschaft für medizinische Physik organisierte Tagung in Erlangen über ein ähnliches Thema zeigte eindeutig die grosse Bedeutung der Forschung auf dem Gebiete der Wirkung der nicht-ionisierenden Strahlen und die Notwendigkeit einer Koordinierung der Anstrengungen für die Aufstellung von Richtlinien. Der Gedanke lag deswegen nahe, unseren Mitgliedern ebenfalls einen Ueberblick über die bisher erzielten Ergebnisse zu vermitteln. Wir sind den Referenten Dr. H. Kresse, (Siemens AG Erlangen, BRD) und Ing.E. Kaufmann (SUVA, Schweiz. Unfallversicherungsanstalt, Luzern), sowie Herrn Prof. H. Pauly für die Einführungsworte und die Leitung der Diskussion, und der SUVA für die Ueberlassung ihrer Texte sehr zu Dank verpflichtet.

der Präsident des FS :

Dr. G. Poretti

Sonderdruck aus der Fachzeitschrift »ATOMKERNENERGIE« · Bd. 21 (1973) · Lfg. 4 · S. 269 – 273
Verlag Karl Thiemig, 8 München 90, Pilgersheimer Straße 38

Wirkungen und Nebenwirkungen medizinischen Ultraschalles[1]

Von H. Kresse[2]

Siemens AG, Bereich Medizinische Technik, Erlangen

Zusammenfassung

Aus den dargestellten Überlegungen und zitierten bzw. untersuchten Quellen kann die Gefährlichkeit medizinischen Ultraschalles bei adäquater Anwendung nicht überzeugend abgeleitet werden. Es sprechen im Gegenteil die Ergebnisse der Versuche, wenn man sie nach der Folgerichtigkeit des experimentellen Ansatzes gewichtet, dafür, daß die üblichen Geräte für Therapie und Diagnose im Sicherheitsbereich arbeiten. Es könnte sein, daß man bei der Weiterentwicklung medizinischer Ultraschallgeräte zur Erreichung spezieller Ziele heute ungewöhnliche Intensitätsbereiche anwenden möchte. Somit erscheint es notwendig, die Breite der tolerablen Ultraschalldosis in Abhängigkeit von Geräte- und Anwendungsparametern zu finden und Sicherheitsabstände festzulegen.

Abstract

Effects and side effects of ultrasonic in medicine

One cannot unequivocally conclude from the reflections, sources and experimental results which are presented here that ultrasonics, when properly applied in medicine, are injurious. The results of the experiments, on the contrary, (when considered in light of their logical consistency and applicability) would indicate that the existing therapeutic and diagnostic ultrasonic instruments perform within the margin of safety. The development of ultrasonics for medical equipment is, as we know, far from completed. It is possible that even higher doses may be needed for special tasks in the future. It is therefore necessary to determine the tolerance range of ultrasonic doses, then fixing an approved safety margin (according to the parameters of the given instrument and application).

EURATOM / INIS DESCRIPTORS

ULTRASONICS	SAFETY STANDARDS
THERAPY	REVIEW
DIAGNOSTIC TECHNIQUES	THRESHOLD DOSE
SIDE EFFECTS	TISSUES
FREQUENCY	CHROMOSOMAL ABERRATIONS
MAN	

1. Einleitung

Die Entwicklung der medizinischen Ultraschallanwendung ist seit einigen Jahren gekennzeichnet durch das Auffinden und den Ausbau vorzugsweise diagnostischer Methoden. Weil die Differenzierung weicher Gewebebezirke relativ gut gelingt, sind auch Internisten und Gynäkologen zunehmend interessiert. Selbstverständlich wird dadurch die Frage nach einer möglichen Schädigung durch Ultraschall erneut aufgeworfen.

2. Physikalischer Mechanismus des Ultraschalles

Es ist an dieser Stelle wohl zweckmäßig, sich an das Phänomen Ultraschall möglichst anschaulich zu erinnern (Fig. 1). Schallwellen breiten sich in Räumen aus, in denen Materie schwingungsfähig angeordnet ist, d. h. die Masseteilchen m elastische Bindungen a, b und c besitzen, die mehr oder weniger gedämpfte Schwingungen zulassen und ihre 3dimensionale Verkopplung auch räumlich übertragen. Die Bewegung

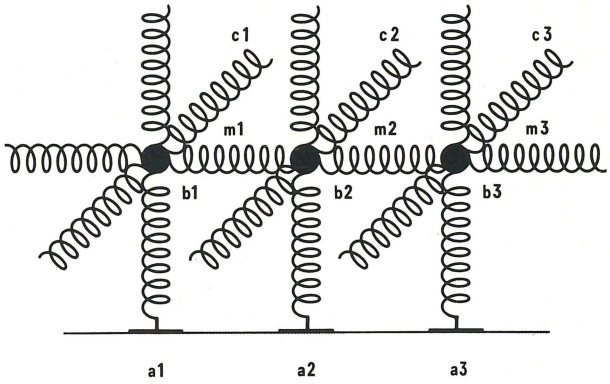
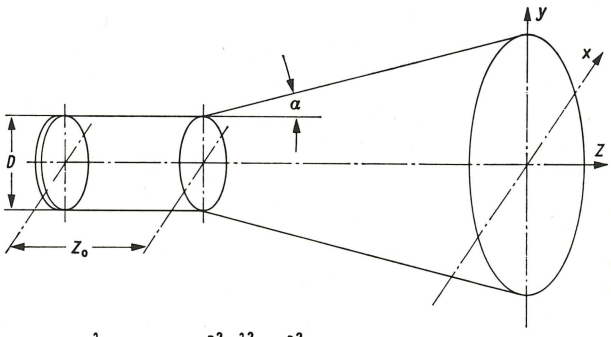


Fig. 1: Ausbreitung von Schallwellen

Fig. 1: Wave propagation

eines schwingenden Teilchens kann einer Sinusfunktion entsprechen oder einer Überlagerung mehrerer. Der Ultraschallbereich beginnt bei 16 kHz. Die den Schall kennzeichnende Periodizität beeinflußt das räumlich-zeitliche Verhalten der Masseteilchen des übertragenden Mediums, d. h. ihre Geschwindigkeit und ihre Auslenkung. Sie ändern sich mit der vorgegebenen Frequenz, die aber auch jenen Größen aufgeprägt ist, die sich für ein kleines schallerfülltes Volumenelement definieren lassen: Dichte und Druck. Im Körpergewebe findet die Auslenkung der schwingenden Teilchen vorzugsweise in der Richtung der Schallausbreitung statt, d. h. es treten im allgemeinen Longitudinalschwingungen auf. Das hängt damit zusammen, daß in dieser Richtung eine intensivere elastische Teilchenverkoppelung wirksam ist, während die elastischen Querbindungen dagegen vernachlässigt werden können.

Infolge der kleinen Wellenlänge des Ultraschalles können Schallstrahler mit einem großen Verhältnis von Durchmesser D zu Wellenlänge λ gebaut werden (Fig. 2). Sie erhalten dadurch eine gute Richtwirkung, die sowohl bei therapeutischen als auch bei diagnostischen Anwendungen im Sinne gezielter Maßnahmen ausgenutzt wird.



$$\sin \alpha = 1{,}22 \frac{\lambda}{D} \qquad Z_0 = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda}$$

Fig. 2: Abstrahlungscharakteristik eines Schallsenders

Fig. 2: Radiation characteristics of a wave emitter

[1] Vortrag, gehalten auf der Gemeinsamen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biophysik e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e.V., in Erlangen, 4. bis 6. Oktober 1972.

[2] Herrn Prof. Dr. O. Hug, München und Neuherberg, zum 60. Geburtstag gewidmet.

3. Medizinischer Ultraschall als Begriff

Im Rahmen dieses Beitrages soll unter medizinischem Ultraschall nur jene hochfrequente Akustik verstanden werden, die unmittelbar am Patienten Anwendung findet. Bei der Diskussion der Wirkungen ist es wichtig, daß die Frequenzen, Intensitäten und zeitlichen Intensitätsverläufe der heute üblichen und eingeführten Verfahren zugrunde gelegt werden (Tab. 1).

Tab. 1: Medizinischer Ultraschall

	Therapie	Diagnose	
Frequenz	800 kHz	1...5 MHz...10 MHz	
Art	Dauerschall	Dauerschall	Impulsschall
mittlere Intensität		30 mW/cm²	10 mW/cm²
maximale Intensität	3 W/cm²		10 W/cm²
Tastverhältnis			1:1000

Therapiegeräte strahlen Dauerschall mit einer Frequenz von ungefähr 800 kHz ab. Die maximale Leistungsdichte beträgt 3 W/cm². Diagnostikeinrichtungen wenden sowohl Impulsschall als auch Dauerschall an. Beim Impulsschall bemüht man sich zur Erhöhung der Genauigkeit der Echolotung um möglichst kurze Impulse, d. h. kleine Tastverhältnisse. Impulsfolgefrequenzen von etwa 100 bis 1000 Hz und Impulsdauern von einer bis 100 µs sind üblich. Das Tastverhältnis eines schnellen B-Gerätes beträgt z. B. eine µs pro ms = 1 : 1000. Bei einer Impulsintensität von 10 W/cm² folgt daraus die mittlere Leistungsdichte 10 mW/cm². Diagnostische Dauerschallgeräte, z. B. Dopplergeräte, geben Intensitäten bis zu etwa 30 mW/cm² ab. Die Ultraschallfrequenzen für Diagnostik liegen häufig bei 1 bis 5 MHz, am Auge manchmal über 10 MHz. Die Anwendungszeiträume sind bei fast allen Gerätearten kürzer als 30 min. Neueste Entwicklungen für die fetale Überwachung mit Ultraschall-Dopplereffekt wirken länger auf den Patienten ein (Stunden bis Tage).

4. Wirkungen des Ultraschalles auf den Menschen

Eine Ultraschallwelle breitet sich im menschlichen Körper, wenn man von Knochengebieten absieht, mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 1500 m/s aus. Das Fortschreiten der Wellenfronten bildet sich in bestimmten Oszillationszuständen der Substanzpartikel ab. Wird in ein Volumenelement mit der Frequenz von 800 kHz die Intensität 2 W/cm² eingestrahlt, so wird der mechanische Elementarprozeß durch die Werte beschrieben, die in Tab. 2 angeführt sind:

Tab. 2: Schallfeldgrößen im Menschen

Frequenz	800 kHz
Intensität	2 W/cm²
Wellenlänge	1,9 mm
maximaler Schalldruck	2,6 bar
Druckgradient	5,5 bar/mm
maximale Partikelgeschwindigkeit	15,8 cm/s
maximale Auslenkung	$3 \cdot 10^{-8}$ m
maximale Beschleunigung	$0{,}8 \cdot 10^{6}$ m/s² $\approx 10^{5}$ g

Die durch die Zahlen belegte Dynamik spielt sich innerhalb des Menschen in Gebieten ab, die, im Vergleich zur Wellenlänge, mehr oder weniger strukturiert sind und deren Partikel sowohl elastische als auch nichtelastische Bindungen besitzen und zudem meist in visköse Zwischenschichten eingelagert sind. Aus der Sicht der Physik sind demzufolge grundsätzlich

interne Kraftwirkungen,
Auslenkungen,
Resonanzerscheinungen und
Reibungsvorgänge

zu erwarten. Bei der Bearbeitung der Grundlagen der Ultraschalltherapie konnten die Reibungsvorgänge und die sich daraus ergebende Wärmewirkung von einer großen Anzahl von Untersuchern objektiviert werden. Der Nachweis, ob eine von der Wärmeerzeugung unabhängige Mikromassage und eine rein mechanisch beeinflußte Permeabilitätsänderung interner Membranen Auswirkungen zeigt, die im Bereich medizinischen Ultraschalles von der Wärmewirkung eindeutig isoliert werden können, ließ sich bisher nicht erbringen. Bezüglich der Permeabilitätsänderung widersprechen sich z. B. Arbeiten von *Hinsberg, Florstedt, Baumgartl* und *Hagen, Rust, Lebowsky.*

Schwan unterscheidet zwischen zwei Prozessen der Wärmeerzeugung. Die Einteilung geht von den morphologischen Gegebenheiten aus und kommt dadurch einer Diskussion unter medizinischen Gesichtspunkten entgegen. Es wird von Volumenwärme und Strukturwärme gesprochen. Volumenwärme entsteht in Gebieten, deren Strukturierung klein gegen die Wellenlänge ist. Ihre Entstehung wird auf Molekularprozesse, nichtelastische Bindungen und visköse Reibung zurückgeführt. Die Wärmeerzeugung wird in diesem Falle gut durch den Absorptionskoeffizienten wiedergegeben (Tab. 3).

Tab. 3: Absorption von Blut- und Blutkomponenten (nach Schwan)

Frequenz MHz	Temperatur °C	Substanz	Protein g / 100 cm³	gemessene Absorption dB/cm	relative Absorption dB/cm³
1,2	20	Plasma	5,5	0,08	0,014
		rote Zellen	32,0	0,40	0,013
		Hämoglobin	7,0	0,09	0,013
		Albumin	12,5	0,16	0,013
2,4	20	Plasma	5,5	0,16	0,030
		rote Zellen	32,0	0,94	0,029
		Hämoglobin	7,0	0,17	0,024
		Albumin	12,5	0,34	0,027

Der Mechanismus der Strukturwärmeerzeugung ist unübersichtlicher. Der Entstehungsort hat Strukturen, die der Wellenlänge größenordnungsmäßig entsprechen. Die Strukturwärmeerzeugung wird nach *Schwan* durch Streuung, Mehrfachreflexion und die u. U. mögliche Entstehung stark gedämpfter Scherwellen beeinflußt.

Wir möchten die Strukturwärme so interpretieren, daß sie sich zusammensetzt aus einem Wärmeanteil, der durch die Dämpfung der Schwingung ausgedehnter Strukturelemente entsteht, und einem zweiten, dem der Mechanismus der Volumenwärme zugrunde liegt, allerdings mit der bemerkenswerten Nebenbedingung, daß Streuung und Mehrfachreflexion und möglicherweise auch Scherwellen zu einer mehrfachen Anregung dieses Mechanismus führen. Es ist ersichtlich, daß die räumliche Strukturwärme-Verteilung

weniger gleichmäßig ist als die Volumenwärme-Verteilung. Die sich in vivo ausbildenden Temperaturfelder werden tatsächlich, in Abhängigkeit von der Durchblutung, mehr oder weniger homogenisiert.

5. Nebenwirkungen in theoretischer Sicht

Bei der Anwendung medizinischen Ultraschalles können Nebenwirkungen entstehen, d. h. Energieanteile für Vorgänge abgezweigt werden, die nicht der beabsichtigten medizinischen Maßnahme entsprechen und/oder eine Gefährdung des Patienten darstellen.

Als wichtigste Nebenwirkung in diesem Sinne ist die Wärmewirkung zu nennen, falls sie zu Temperaturen führt, die Gewebe schädigen. In Anlehnung an die vorhin eingeführte Begriffsbestimmung für medizinischen Ultraschall muß bemerkt werden, daß die Diskussion thermischer Schädigungsmöglichkeiten nur für die leistungsstärksten Anwendungsbereiche von Therapiegeräten sinnvoll ist.

Nebenwirkungen sind weiterhin denkbar durch Druckkräfte, die das Schallfeld aufbaut, und angeregte Resonanzschwingungen mit Amplitudenüberhöhungen. Die realen Möglichkeiten entsprechender Brüche und Rupturen wurden von einigen Untersuchern unseres Erachtens überschätzt.

Geht man z. B. von den gezeigten Therapiewerten bei 2 W/cm² Intensität aus, so ergibt sich aufgrund des genannten Druckgradienten über einem Teilchen vom Durchmesser 10 µm, also z. B. über einem roten Blutkörperchen, die Druckdifferenz 0,055 bar, das entspricht ungefähr 50 cm Wassersäule. Die das Teilchen beanspruchenden Kräfte betragen danach etwa $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ cN (Tab. 4). Ich gebe zu, daß wir kein Gefühl dafür haben, ob ein Erythrozyt meint, daß diese Kraft eine Zumutung ist, aber wir wissen, daß eine Energieübertragung auf das Teilchen (und nur durch eine solche kann eine Schädigung entstehen) erst stattfindet, wenn die Kraft eine Deformation erzwingt. Kann sie das schnell genug – wir haben wegen der angenommenen Ultraschallfrequenz von 800 kHz wenig Zeit –, so ist sie nach kürzester Distanz reduziert und nach $3 \cdot 10^{-2}$ µm, d. h. nach 3% Durchmesseränderung des Partikels, zu Null geworden!

Tab. 4: Schallfeldgrößen am Partikel

Frequenz	800 kHz
Intensität	2 W/cm²
Teilchendurchmesser	10 µm
Druckabfall	0,055 bar ≈ 50 cm H_2O
Druckkraft	$0{,}5 \cdot 10^{-6}$ cN
maximal theoretische Durchmesseränderung	$3 \cdot 10^{-2}$ µm ≙ 3%

6. Nebenwirkungen in experimenteller Sicht

Im nun folgenden Teil wird über Arbeiten berichtet, die zur Klärung der Problematik der Nebenwirkungen aus experimenteller Sicht beitragen.

Hüter hat den durch Ultraschall erzeugten Periostschmerz am Daumenballen untersucht (Fig. 3).

Das Diagramm zeigt eine Abhängigkeit der Schmerzschwelle von der Einwirkungsdauer. Es erinnert an die typische *Nernst*sche Reizkurve. *Horvath* hat beachtliche Temperatursprünge am Grenzübergang zwischen weichem Gewebe und Knochen nachgewiesen, so daß man für den Periostschmerz

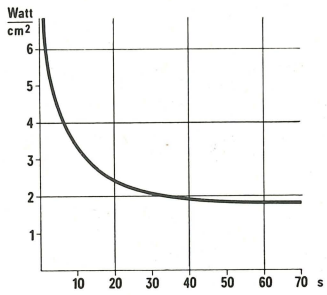


Fig. 3: Periostschmerz am Daumenballen bei 800 kHz (nach Hüter)

Fig. 3: Periosteum pain on the base of the thumb at 800 kHz (according to Hüter)

die Strukturwärme des Übergangsgebietes und die Volumenwärme des vordersten Knochenbereiches verantwortlich machen kann. Die Ordinatenangaben sind hier und bei allen auf die Intensität zu beziehenden In-vivo-Versuchen problematisch. Es gibt bekanntlich noch keinen Ansatz für eine objektive Bestimmung der Intensität im Wirkungsgebiet. Diese wird gegenüber der eingestrahlten Intensität durch Absorption und Streuung entscheidend geschwächt und durch Struktureffekte zusätzlich variiert. Es sei hier daran erinnert, daß in weichen Gewebebezirken bei therapeutischen Frequenzen nach 3 bis 7 cm nur noch die Hälfte der Intensität vorhanden ist und die Absorption linear in weichen Geweben bzw. quadratisch im Knochen mit der Frequenz ansteigt.

Macintosh und *Davey* haben versucht, die Gefährlichkeit eines fetalen Herzschlagdetektors zu überprüfen (Tab. 5).

Tab. 5: Versuchsergebnisse von Macintosh und Davey

Versuchsbedingungen	Gesamtzahl der registrierten Zellen	Prozentsatz der Zellen mit Aberrationen	Chromatide Aberrationen pro 100 Zellen	Chromosom-Aberrationen pro 100 Zellen	Gesamt-Aberrationen pro 100 Zellen
Kontrollen	330	5	4	1	5
Gefäß 1 1h	250	28	15	11	26
Gefäß 1 2h	100	31	32	18	50
Gefäß 2 2h	230	18	15	7	22

Sie setzten menschliche Chromosomen in vitro dem Ultraschallstrahl entsprechender Geräte aus, die bei einer Frequenz von 2,25 MHz maximal 17 mW abstrahlten. Der Strahl war fokussiert. Der Durchmesser des Brennflecks wird nicht genannt. Dadurch sind die Ergebnisse nicht auf eine bestimmte Leistungsdichte zu beziehen. Als Behandlungsgefäße fanden Metallzylinder Anwendung. Es wurden in Kulturmedium suspendierte Lymphozyten bis zu 2 Stunden beschallt. Chromatid- und Chromosomenaberrationen waren, wie man sieht, gegenüber Kontrollwerten deutlich erhöht. In einer zweiten Arbeit geben die Autoren an, daß sie mit 8,2 mW/cm² einen Schwellenwert gefunden haben, unterhalb dessen keine Aberrationen auftreten.

Macintosh und *Davey* stehen mit ihren Ergebnissen im Gegensatz zu ähnlichen früheren Untersuchungen von *Fischer* und Mitarbeitern und *Bernstine*, die z. T. beträchtlich höhere Intensitäten anwendeten. *Fischer* arbeitete bei 810 kHz mit 3 W/cm² und *Bernstine* bei 6 MHz mit 20–30 mW/cm².

Der Widerspruch hat eine Reihe neuer Experimente ausgelöst.

Rott und Mitarbeiter versuchten eine Objektivierung des meßtechnischen Ansatzes. Als Beschallungsgefäße wurden

Gefährdung durch Mikrowellen

von E. Kaufmann
Schweiz. Unfallversicherungsanstalt Luzern

1. Einleitung

Mikrowellen sind elektromagnetische Schwingungen sehr hoher Frequenz. Ursprünglich für Radarzwecke angewendet, fanden sie auch bald Eingang in die Medizin, wo sie zur Ergänzung der längst bekannten Kurzwellentherapie zu Bestrahlungszwecken verwendet wurden. Aehnlich verlief die Entwicklung in der Industrie, wo für das Schweissen von Kunststoffen, für Trocknungs- und Härtungsprozesse etc. immer höhere Frequenzen angewendet wurden.

Eines der Hauptanwendungsgebiete Mikrowellen erzeugender Generatoren hoher Leistung sind heute die Kochapparate. In diesen Apparaten wird die elektromagnetische Energie hoher Frequenz in Magnetrons erzeugt und durch sogenannte Wellenleiter zur Kochkavität übertragen. Die in diese Kochkavität eingebrachten Speisen erwärmen sich sehr rasch und gleichmässig durch Absorption der hochfrequenten Energie. In den USA werden zurzeit ca. 40'000 solcher Apparate pro Jahr fabriziert, bis 1976 wird mit einem Bestand von 1 800 000 Apparaten gerechnet.

2. Frequenzbereich

In Europa werden Frequenzen im Bereich von 300 - 300'000 MHz dem Mikrowellenbereich angehörend betrachtet. Dies entspricht den Wellenlängen von 1 m bis 1 mm.

In den USA wird der Mikrowellenbereich durch die Frequenzen 10 - 10'000 MHz festgelegt. Für die einzelnen Anwendungsgebiete, wie Radio und Fernsehen, militärisches und kommerzielles Radar, für Diathermie und Mikrowellenöfen, werden bestimmte Frequenzbänder zugelassen, so z.B. für Oefen

915 MHz, entsprechend einer Wellenlänge von 32,78 cm
2450 MHz, entsprechend einer Wellenlänge von 12,24 cm.

Die Frequenz von 2450 MHz wird auch für medizinische Bestrahlungszwecke verwendet.

3. Biologische Effekte

Mikrowellen-Strahlung wird vom Körpergewebe absorbiert. Diese Energieabsorption ist mit einem Anstieg der Gewebetemperatur verbunden. Augen und Testes sind gegenüber den thermischen Effekten der Mikrowellen besonders empfindlich.

Athermische Effekte sind beobachtet worden und zwar hauptsächlich Veränderungen am zentralen Nervensystem und cardiovaskulären System.

Ferner Aenderungen im elektrophoretischen Muster der Blut-Proteine und Inaktivation gewisser Enzyme.

Athermische Effekte sind hauptsächlich in der USSR beobachtet und beschrieben worden.

Die Tiefenwirkung im Körpergewebe ist umgekehrt proportional der Frequenz und ca. 1/10 der Wellenlänge. Die kritische Frequenz für Augenlinsenkatarakt ist ca. 3000 MHz.

Zurzeit bemühen sich Forscher in den USA, die athermischen und Langzeiteffekte der Mikrowellen zu untersuchen. Auch die Untersuchung genetischer Wirkungen ist in diese Arbeiten eingeschlossen.

Eine Besonderheit im Zusammenhang mit Mikrowellen darf heute nicht mehr ausser acht gelassen werden, nämlich die Beeinflussung von Herzschrittmachern durch das elektromagnetische Feld der Mikrowellen- und Radarapparate. Durch Verwendung abgeschirmter Kabel vom Schrittmacher zum Herz konnte inzwischen auch diese Beeinflussung behoben werden.

4. Grenzwerte

Ein geeignetes Mass für die Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen auf das Energie absorbierende Körpergewebe ist die Leistungsdichte auf der Oberfläche des Gewebes in Milliwatt pro Quadratcentimeter (mW cm^{-2}).

Die ersten Grenzwert-Festlegungen sind auf eine Konferenz in den USA zurückzuführen. Damals wurde ein Pegel von 10 mW cm^{-2} für alle Frequenzen des Mikrowellenbereiches gewählt. Dabei handelt es sich um einen maximal zulässigen Expositionspegel, der nicht überschritten werden darf. Andere Einflussfaktoren, wie Expositionszeit, Umgebungstemperatur, die Frequenz der Mikrowellenenergie, gleichzeitige Bestrahlung mit verschiedenen Frequenzen, unterschiedliche Empfindlichkeit der verschiedenen Körperorgane, zu einer Abkühlung des Körpers führende Luftströmungen, alles

Einflüsse, die die biologischen Effekte eventuelle beeinflussen können, wurden damals bewusst nicht berücksichtigt.

Im Jahre 1960 hat Bell Telephone Laboratories den Zeitfaktor eingeführt und folgende Kriterien festgelegt:

1. Eine Leistungsdichte von mehr als 10 mW cm^{-2} ist potentiell gefährlich.
   In Zonen dieses Bereiches dürfen sich keine Personen aufhalten.

2. Zonen mit Leistungsdichten von 1 - 10 mW cm^{-2} sind nur für zufälligen und gelegentlichen Aufenthalt als sicher zu betrachten.

3. Leistungsdichten unter 1 mW cm^{-2} sind auch für unbeschränkte Aufenthaltsdauer sicher.

Diese Kriterien basieren auf der Tatsache, dass Augenlinsenkatarakte bei Leistungsdichten von 100 mW cm^{-2} auftreten können.

Ein Versuch, den Zeitfaktor einzuführen, wurde 1965 durch die US Army und Air Force unternommen, indem die erlaubte Expositionszeit mit der Leistungsdichte in folgende Beziehung gebracht wurde:

$$T_p = \frac{6000}{W^2}$$

T_p = zulässige Expositionsdauer in Minuten während einer Stunde

W = Leistungsdichte in mW cm^{-2}

Bei einer Leistungsdichte von 10 mW cm^{-2} ergibt dies 60 Minuten, bei 100 mW cm^{-2} 0,6 Minuten.

Die zurzeit in den USA gültigen Grenzwerte sind 1966 vom "The United States of America Standards Institute (USASI)" festgelegt worden.

Diese Vorschriften basieren auf einer Leistungsdichte von 10 mW cm^{-2} für Expositionszeiten grösser als 0,1 Stunde und einer Energiedichte von 1 mWh cm^{-2} für Expositionszeiten kleiner als 0,1 Stunde. Das Energiedichtekonzept ist ein zeitbewertetes Expositionskriterium, mit welchem die zulässige Expositionszeit in Stunden pro 0,1 Stunde durch Division von 1 mWh cm^{-2} durch die auftretende Leistungsdichte bestimmt werden kann. So ergibt eine

Leistungsdichte von 60 mW cm^{-2} folgende zulässige Expositionszeit (ET):

$$ET = \frac{1 \text{ mWh cm}^{-2}}{60 \text{ mW cm}^{-2}} = \frac{1}{60} \text{ h}$$

oder 1 Minute pro 0,1 Stunde.

Diese Norm gilt für normale Umgebungstemperatur. Bei grosser Hitze sind die Grenzwerte zu reduzieren, bei grosser Kälte können sie erhöht werden.

In Westeuropa sind ähnliche Grenzwerte gebräuchlich, währenddem die Oststaaten und insbesondere Russland viel strengere Massstäbe an die Beurteilung der Gefährlichkeit der Mikrowellenbestrahlung anlegt.

In den USSR gelten für den Mikrowellenbereich von 300 - 300'000 MHz

10	µW cm^{-2}	für 1 Arbeitstag
100	" "	für 2 Stunden pro Tag
1000	" "	für 15 Minuten pro Tag.

Die USSR hat zudem als erstes Land Grenzwerte für niederfrequente elektromagnetische Strahlung festgelegt, bei deren Einhaltung kein Einfluss auf den menschlichen Körper ausgeübt wird.

Diese Grenzwerte sind in Feldstärke ausgedrückt:

Mittelwellen	(100 kHz - 3 MHz)	20 Volt m^{-1}
Kurzwellen	(3 MHz - 30 MHz)	5 Volt m^{-1}
Ultrakurzwellen	(30 MHz - 300 MHz)	5 Volt m^{-1}

In der nachstehenden Tabelle 1 sind die verschiedenen Grenzwerte, wie sie in verschiedenen Ländern gebräuchlich sind, zusammengestellt. Es wird offensichtlich, dass zwischen der ersten Kolonne, geltend für USA und der letzten Kolonne, geltend für USSR, ein Unterschied um den Faktor 1000 besteht. Dieser Unterschied basiert auf der Berücksichtigung der athermischen Effekte durch die USSR.

5. Messtechnik und Messinstrumente

Zu Messungen im Mikrowellenfeld können

thermische Detektoren und
elektrische Detektoren

verwendet werden.

Für Leistungsdichtemessung werden thermische Detektoren bevorzugt, wobei 3 verschiedene Arten von Detektoren zu unterscheiden sind:

a) Thermistoren

Der elektrische Widerstand eines Thermistors sinkt, wenn dessen Temperatur steigt.

b) Baretter

mit einem positiven Temperaturkoeffizienten.

Thermistor und Baretter werden in das elektromagnetische Feld des Mikrowellenapparates eingekoppelt und der Gleichstromwiderstand gemessen. Beide Systeme sind unter der Bezeichnung Bolometer bekannt.

c) Thermoelement

Ein Thermoelement produziert eine elektromotorische Kraft, d.h. eine elektrische Spannung, wenn es erwärmt wird. Es wird mit einer Antenne in das Mikrowellenfeld eingekoppelt.

Das von der Sektion Physik der SUVA verwendete Messinstrument beruht auf diesem Prinzip. Es dürfte das heute geeignetste Messinstrument für die Messung der Leistungsdichte in Leckfeldern von Mikrowellenapparaten sein. Es hat eine Empfindlichkeit von 0,01 mW cm^{-2}, eine Genauigkeit von $\pm$ 25 % und eine sehr gute Stabilität.

Seine Ausführung ist in Bild 1 dargestellt, und das Prinzip der Messonde mit den gekreuzten Dipolantennen und Thermoelementen kann dem Bild 2 entnommen werden.

Datum: 20. Februar 1973

Bild 1

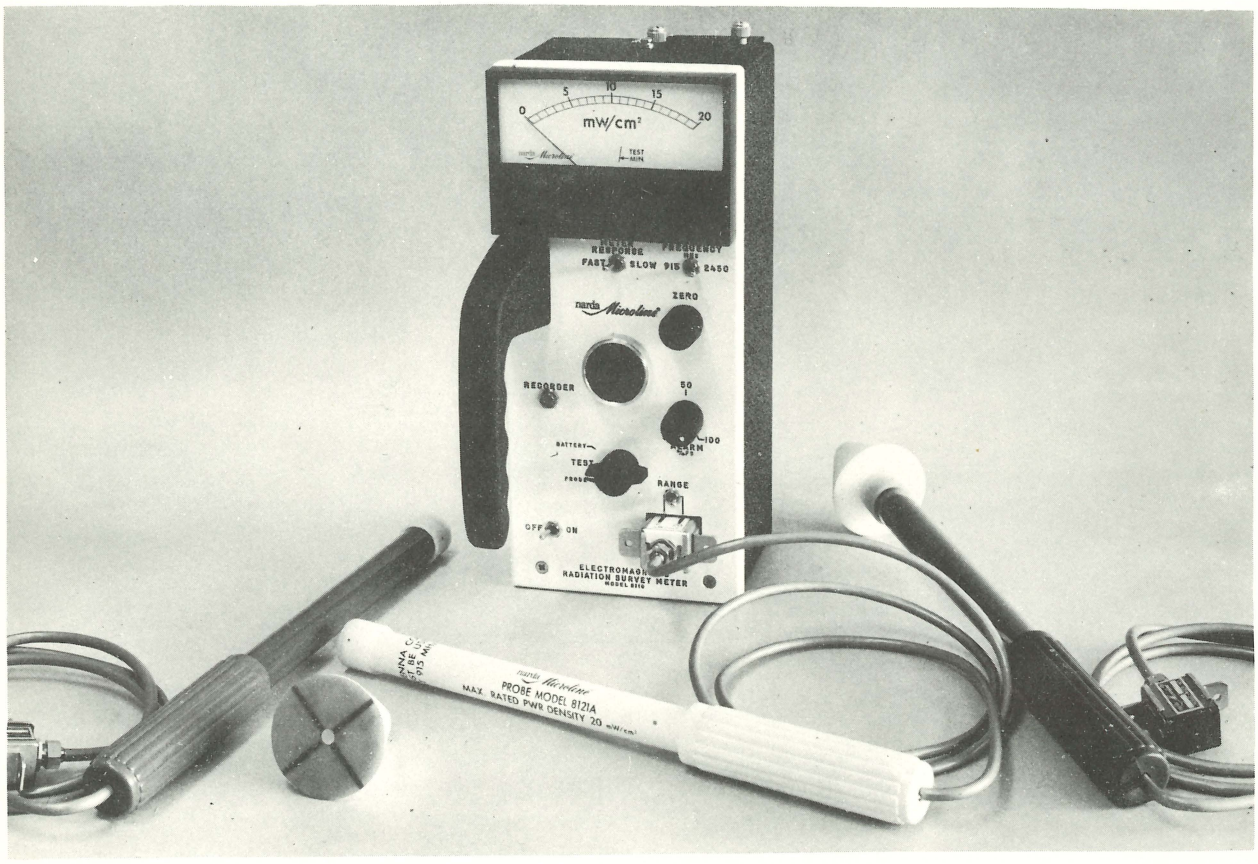

0
5
10
15
20
mW/cm²
TEST
RESPONSE
FREQUENCY
FAST
SLOW
915
2450
ZERO
narda Microlinea
RECORDER
50
100
BATTERY
TEST
RANGE
OFF
ON
ELECTROMAGN
RADIATION SURVEY METER
PROBE MODEL 8121A
MAX RATED PWR DENSITY 20 mW/cm²

Bild 2

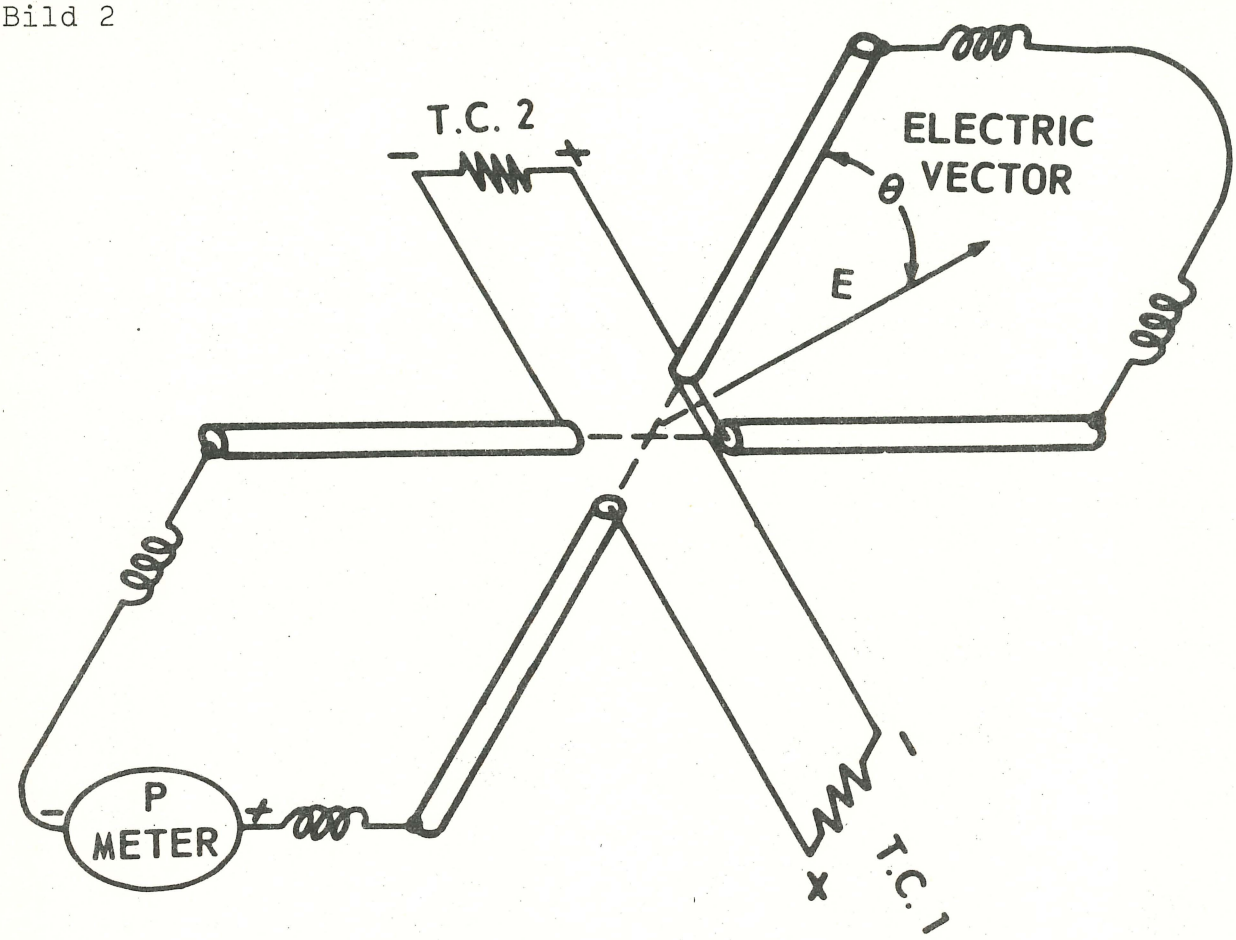


Tabelle 1

Empfohlene maximal zulässige Energiedichten für hochfrequente elektromagnetische Energie

Land	USA	GB	F	S	ČSSR	PL	USSR
Frequenz (MHz)	10-10000	30-30000	-	alle	> 300	300-300000	300-300000
max. zulässige Leistungsdichte ($mW\ cm^{-2}$)	10	10	10	1	0,025	0,01	0,01
Spezifikationen ($mW\ cm^{-2}$)	10-100 mit Zeitbegrenzung		10-100 mit Zeitbegrenzung			0,1 (2 h/d) 1,0 (20 min/d)	0,1 (2 h/d) 1,0 (15 min/d)
allgemein zugängliche Zonen ($mW\ cm^{-2}$)	1	1	1	1			

Gefährdung durch Laser

von E. Kaufmann
Schweiz. Unfallversicherungsanstalt Luzern

1. Allgemeines

Laser finden heute bereits ausgedehnte Verwendung in verschiedenen Gebieten der Technik und der Medizin, z.B. als Richtstrahl auf Baustellen (Tunnelbau), zum Bohren feinster Löcher in Uhrensteine, in der Holographie, zur Behandlung von Netzhautablösungen der Augen usw.

Einige zurzeit gebräuchliche Laser sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

T a b e l l e 1

Gas-Laser	
Helium-Neon-Laser	0,6328 µm
Argon-Ionen-Laser	0,3511-0,3795; 0,4579-0,5287 µm
Kohlendioxid-Laser	10,59 µm
Helium-Cadmium-Laser	
Neon-Stickstoff-Laser	
Festkörper-Laser	
Rubin-Laser	0,6943 µm
Neodym gedopter YAG-Laser	1,06 µm
Neodym gedopter Glas-Laser	1,06 µm
Flüssigkeits-Laser	
Europium	0,6128 µm
Samarium	
Terbium	
Halbleiter-Laser	
Galliumarsenid-Laser	0,89 µm
Chemische Laser	
H_2-Cl_2-Laser	
UF_6-H_2-Laser	
UF_6-CH_4-Laser	

Viele dieser Laser emittieren Licht im sichtbaren Bereich, z.B. der He-Ne-Laser und der Rubin-Laser. Neodym gedopte Laser und CO_2-Laser emittieren Infrarotstrahlung, der Argon-Ionen-Laser Ultraviolettstrahlung.

2. Die Gefährdung der Netzhaut des Auges durch Laserstrahlen

Laserstrahlen werden vom optischen System des menschlichen Auges in gleicher Weise gebündelt wie gewöhnliche Lichtstrahlen. Der Querschnitt eines vor dem Auge auftretenden Laserstrahls erscheint auf der Netzhaut des Auges sehr stark verkleinert. Die Energie des Strahls jedoch schwächt sich bis zum Auftreffen auf der Netzhaut nur wenig ab, so dass die Energie je Flächeneinheit im Brennfleck auf der Netzhaut viel grösser ist als die Energie je Flächeneinheit im Strahl vor dem Auge. Gerade diese Bündelung der Strahlenenergie macht die Laserstrahlen für die Netzhaut des Auges besonders gefährlich.

3. Die Intensität des Laserstrahls vor dem Auge

Wenn die Kenndaten des Lasers bekannt sind, kann die Energiedichte des Laserstrahls beim Auftreffen auf das Auge berechnet werden. Die Intensität des Laserstrahls vor dem Auge ist:

$$I_A = P \frac{4}{\pi (D_L + \rho R)^2} e^{-\mu R} \quad (\text{Watt cm}^{-2} \text{ oder Joule cm}^{-2})$$

worin:

P = Leistung oder Energie des Laserstrahls am Resonatorausgang in Watt oder Joule

D_L = Durchmesser des Laserstrahls am Resonatorausgang

ρ = Strahlweite oder Strahldivergenz des Laserstrahls

R = Distanz des Auges vom Resonatorausgang

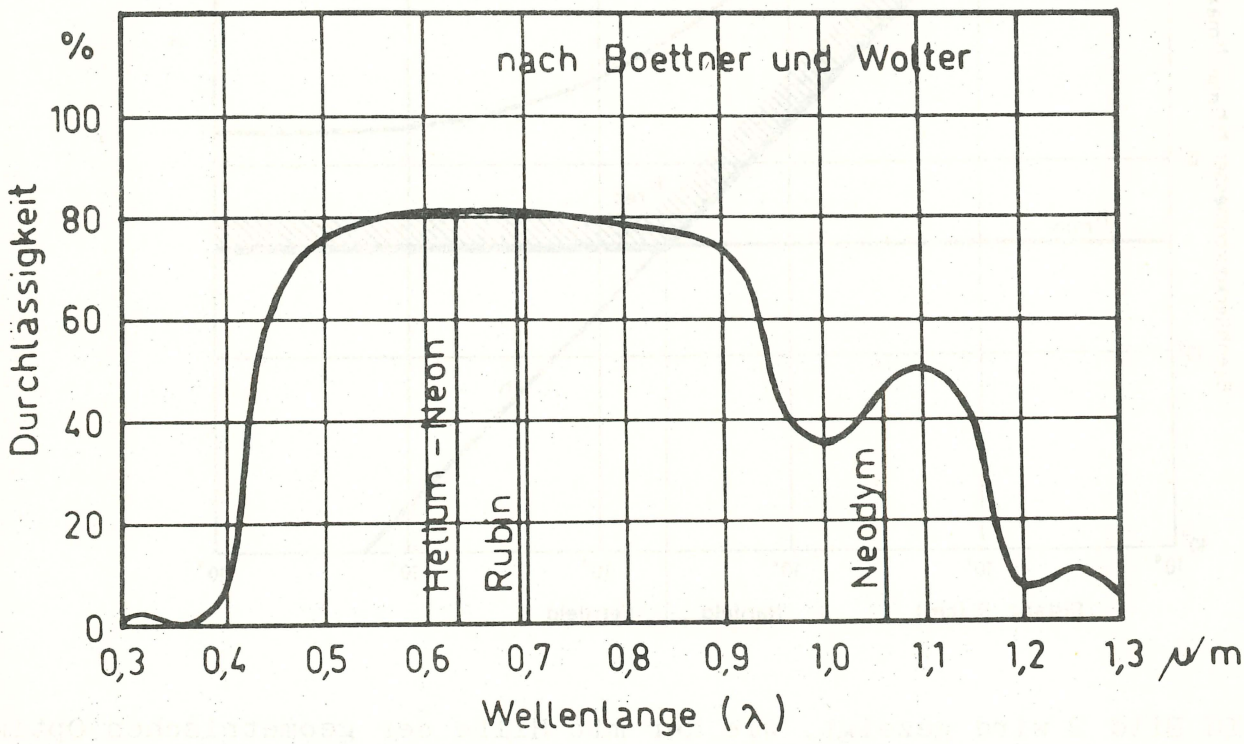
μ = atmosphärischer Schwächungskoeffizient

4. Die Intensität des Laserstrahls auf der Netzhaut des Auges

Der Anteil des Laserstrahls, der in das Auge eintreten kann, ist abhängig von der Pupillengrösse. Die weit geöffneten Pupillen eines Stollenarbeiters lassen mehr Strahlen eintreten als die verengten Pupillen einer Person, die sich in einem hell erleuchteten Laboratorium aufhält.

Zudem erleidet die Strahlung auf dem Weg durch die Hornhaut, die Linse und den Glaskörper des Auges eine Schwächung, die je nach Wellenlänge der Laserstrahlung verschieden gross ist. Boettner und Wolter haben die Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlen gemessen.

Bild 1



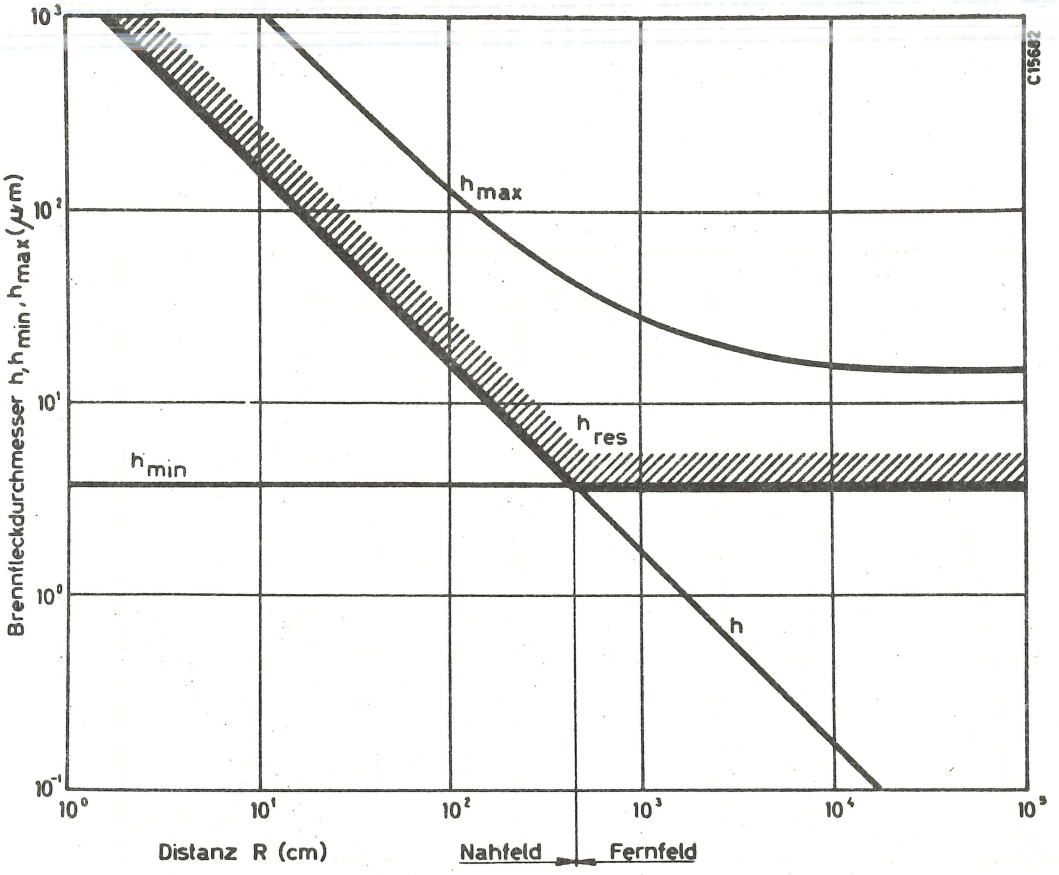
Ca. 81 % der Strahlung des Helium-Neon- und des Rubin-Lasers werden somit bis zur Retina (Netzhaut) vordringen, beim Neodym-Laser beträgt dieser Anteil 46 %.

Im Gegensatz zu diesen beiden abschwächenden Einflüssen wirkt die optische Bündelung des Laserstrahls in einem Brennfleck auf der Netzhaut in weit grösserem Masse verstärkend. Die Kenntnis der Grösse des minimalen Brennfleckdurchmessers ist für die Beurteilung der Gefahr einer Schädigung der Netzhaut von ausschlaggebender Bedeutung, weil sehr grosse Energiedichten, bezogen auf die Flächeneinheit, entstehen, wie sie bis jetzt von keiner anderen Energiequelle erreicht werden.

Die Brennfleckgrösse lässt sich annähernd bestimmen, wenn folgende 3 Einflussfaktoren berücksichtigt werden:

- geometrische Optik
- Fraunhofer Diffraktion (Beugung)
- Strahlweite (Divergenz)

Bild 2



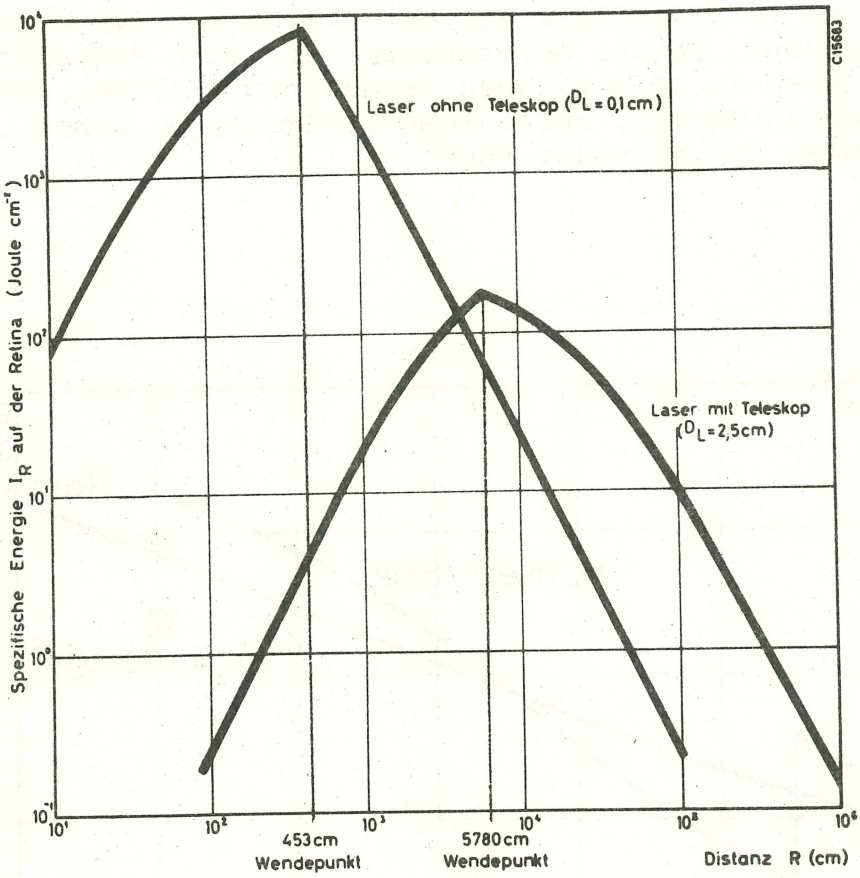
In Bild 2 wird gezeigt, wie der mit Hilfe der geometrischen Optik berechnete Brennfleckdurchmesser (h) in Abhängigkeit von der Distanz (R) verläuft, ferner, welche Begrenzung aus der Fraunhofer Diffraktion (Beugung) resultiert (h_{min}) und wie der maximale Brennfleckdurchmesser (h_{max}), gegeben durch die Strahlweite (Divergenz ρ) verläuft.

Aus diesen drei Beziehungen lässt sich der Verlauf des resultierenden Brennfleckdurchmessers (h_{res}) ermitteln. Dieser kann niemals kleiner werden als der durch die Beugung beeinflusste Durchmesser (h_{min}), aber auch nicht grösser als der wegen der Strahldivergenz begrenzte Wert (h_{max}).

Der Verlauf des resultierenden Brennfleckdurchmessers (h_{res}) in Abhängigkeit von der Distanz weist einen Knick auf, dessen zugehörige Distanz als kritischer Abstand zwischen Auge und Lasergerät betrachtet werden kann.

An diesem Punkt erreicht der Brennfleck die minimale Grösse; die Energiedichte wird am grössten.

Bild 3



Mit zunehmender Distanz bleibt wohl der Brennfleck gleich gross, die Strahlenenergie und damit die spezifische Energie nehmen aber rasch ab. Bei abnehmender Distanz nimmt die Strahlenenergie nicht in dem Masse zu wie der Brennfleck grösser wird, die spezifische Energie nimmt daher ebenfalls ab.

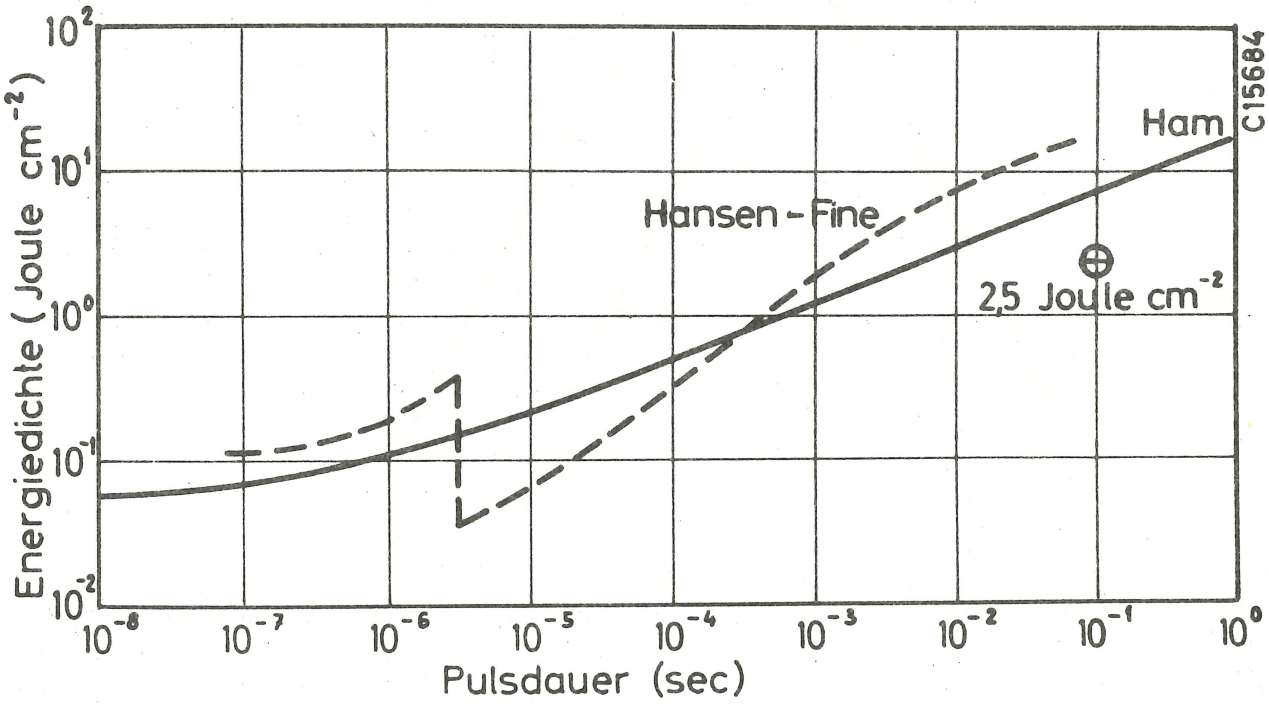
In einem Blockschema zusammengestellt, ist die auf der Retina auftretende Energiedichte:

$$\text{Energiedichte } I_R = \frac{\boxed{\text{Intensität des Laserstrahls vor dem Auge}} \times \boxed{\text{Pupillengrösse}} \times \boxed{\text{Lichtdurchlässigkeit der optischen Medien } t(\lambda)}}{\boxed{\text{Fläche des resultierenden Brennflecks auf der Netzhaut}}}$$

Die Fläche oder der Durchmesser des resultierenden Brennflecks auf der Retina wird aber auch noch durch andere Vorgänge beeinflusst. Die Akkomodation des Auges auf die Entfernung des Beobachtungsobjektes und die chromatische Aberration (Farbkorrektion) auf die Wellenlänge des Lasers, können sowohl zu einer Vergrösserung, unter Umständen aber auch zu einer Verkleinerung des Brennflecks führen.

Die Energieabsorption im Brennfleck auf der Retina bewirkt eine Erwärmung dieses Gewebes. Sowohl Berechnungen als auch Messungen an Kaninchenaugen haben zu gefährlichen Grenzwerten geführt, die niemals erreicht werden dürfen, weil diese Erwärmung zu irreversiblen Schädigungen der Netzhaut führt.

Bild 4



5. Gefährdung der Haut und der Augenlinsen durch Laserstrahlen

Bei der Bestrahlung der Haut oder der Augenlinsen fehlt die starke Bündelung des Strahles, wie sie bei der Gefährdung der Retina von so grosser Bedeutung ist.

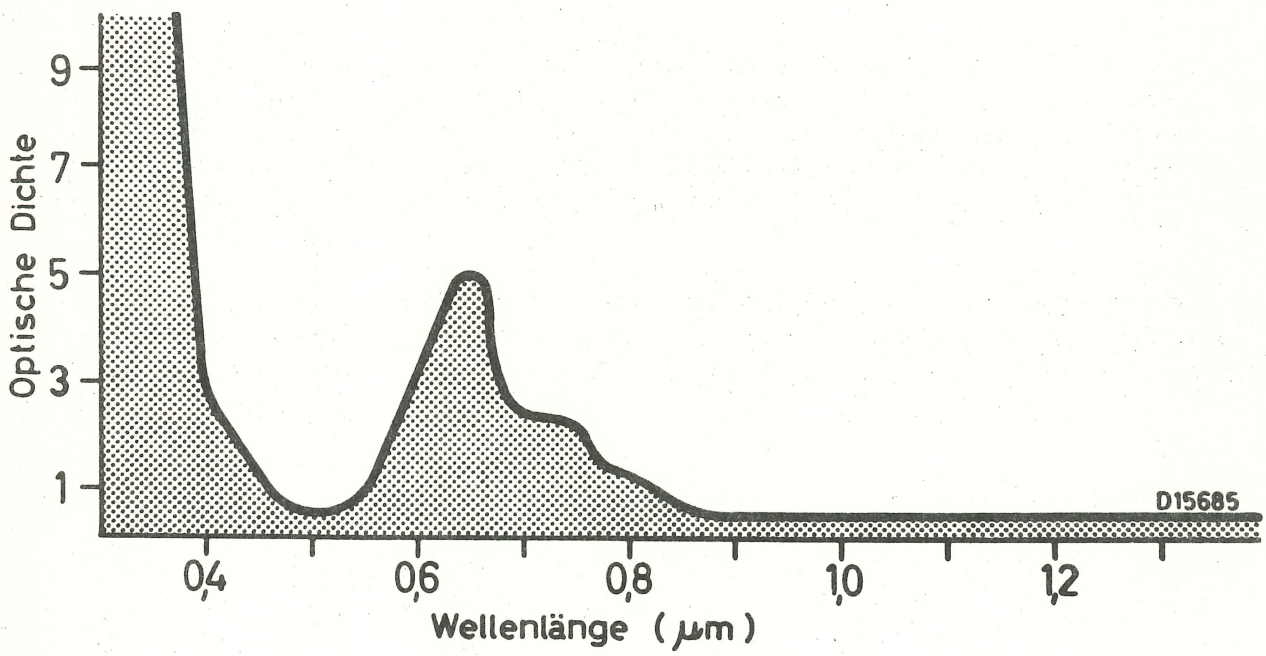
Laserstrahlen werden in der äusseren Schicht der Haut absorbiert, genügend hohe Energieabsorption führt zu Verbrennungen. Die Augenlinse ist für Laserstrahlen des sichtbaren Wellenlängenbereiches durchlässig. Eine Absorption der Strahlenenergie kann daher nur bei Wellenlängen ausserhalb des sichtbaren Bereiches erwartet werden, beispielsweise jenen der Neodym- oder CO_2-Laser. Eine zu hohe Energieabsorption führt zu Trübung der Augenlinse.

6. Schutz der Augen gegen unzulässige Bestrahlung

Der Schutz der Augen gegen unzulässige Bestrahlung ist durch das Tragen einer geeigneten Schutzbrille gewährleistet. Die Laserschutzbrille soll die Strahlen des zur Verwendung gelangenden Lasers sehr stark abschwächen und doch möglichst viel sichtbare Strahlung durchlassen, damit der Arbeitsplatz noch gut überblickt werden kann.

Für Laser, deren Strahlung im sichtbaren Bereich der Wellenlänge 0,4 - 0,7 µm liegt, ist dies keine leicht zu erfüllende Aufgabe. Wesentlich ist auch, dass das Schutzfilter durch den Strahl nicht zerstört wird.

Bild 5



In Abbildung 5 ist der Verlauf der optischen Dichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes einer Glendale-Laserschutzbrille für Helium-Neon-Laser dargestellt. Die Strahlung des He-Ne-Lasers wird durch das 3 mm dicke Plastikfilter um den Faktor 100'000 geschwächt, während ein beträchtlicher Teil des kürzerwelligen sichtbaren Lichtes - im vorliegenden Beispiel 19,5 % - nahezu ungeschwächt durchgelassen wird.

7. Allgemeine Schutzmassnahmen bei der Verwendung von Lasern

Lasergeräte sind elektrische Apparate, sie haben den einschlägigen Vorschriften über elektrische Apparate zu entsprechen. Der Strahl ist nach Möglichkeit abzuschirmen. In Laboratorien sollen Wände, Decke und Fussboden aus schlecht reflektierendem Material bestehen. Polierte Flächen, z.B. Türfallen, Fenstergriffe, Laborapparate oder Armbanduhren, können gefährliche Reflexionen erzeugen. Brennbare Flüssigkeiten sollen nicht in der Nähe von Laserstrahlen aufbewahrt werden. Laser im UV- oder IR-Bereich können besonders gefährlich sein, weil der Strahl unsichtbar bleibt.

Datum: 25. Februar 1973