

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 26

Artikel: Physikalische Grundlagen der Erzeugung und des Nachweises von Licht
Autor: Weber, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915780>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Physikalische Grundlagen der Erzeugung und des Nachweises von Licht

Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des SEV vom 25. August 1972 in Bern,

von H. Weber

621.383.52.029.73 : 621.373.826

1. Einleitung

Das Licht in seiner Eigenschaft als elektromagnetische Welle gewinnt auch in der Technik und speziell Elektronik zunehmend an Bedeutung. Das hat zwei Gründe.

Einmal strebt die Elektronik grundsätzlich zu höheren Frequenzen, denn höhere Frequenz bedeutet grössere Informationskapazität der Übertragungsstrecken und schnellerer Ablauf von Schaltvorgängen. Die Nachrichtenübertragung begann im Langwellenbereich mit Frequenzen von 100 kHz und ist heute technisch im Bereich von 100 ... 1000 MHz angekommen. Im Laboratorium existieren bereits Übertragungsstrecken, die das Licht als Nachrichtenträger ausnutzen, also bei Frequenzen im Bereich von 10^{14} Hz arbeiten. Die Dünnschichtoptik, die in den letzten Jahren entwickelt wurde, gestattet es, Licht genauso zu verarbeiten wie elektromagnetische Wellen im cm-Wellenlängenbereich. Es gibt Hohlleiter, Koppelglieder, RC-Glieder, Schwingkreise usw. In naher Zukunft wird diese Technik das Laboratorium verlassen und von grosser Bedeutung für Nachrichtenübertragung, -verarbeitung und Datenspeicherung werden. Von diesen Dingen soll im folgenden nicht weiter gesprochen werden, da es sich weitgehend um Zukunftsmusik handelt und die technische Realisierung noch aussteht.

In den letzten zehn Jahren hat nun geradezu eine Revolution auf dem Gebiet der Lichtquellen stattgefunden. Bis dahin waren alle Lichtquellen nichts anderes als verbesserte Kerzen, weswegen man sie auch thermische Lichtquellen nennt. Zwei neuartige Lichtquellen wurden dann entdeckt und zu hoher Güte entwickelt:

- a) Die lichtemittierenden Dioden, kurz mit LED abgekürzt;
- b) Der LASER.

Im folgenden werden diese beiden Lichtquellen diskutiert, wobei das Schwergewicht auf den LED-Systemen liegen soll, denn diese haben in der Optoelektronik einen grossen Anwendungsbereich gefunden. Um die Funktion dieser Lichtquellen zu verstehen, muss kurz ein wenig an einige physikalische Grundlagen erinnert werden.

2. Die Natur des Lichts

Physikalisch betrachtet besteht kein Unterschied zwischen Radiowellen, Licht, Röntgenstrahlen oder Höhenstrahlung. In allen Fällen handelt es sich um elektromagnetische Wellen, die durch Wellenlänge oder Frequenz charakterisiert werden und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Licht, also der Frequenzbereich, für den das Auge empfindlich ist, stellt einen winzigen Ausschnitt im riesigen Spektrum der elektromagnetischen Wellen dar (Fig. 1). Die Frage nach der Natur des Lichts ist gar nicht so einfach zu beantworten und die Physiker haben seit *Newton* die unterschiedlichsten Antworten darauf gegeben. Heute kann die Frage beantwortet werden, d.h. es gibt einen komplizierten mathematischen Formalismus, der uns für jedes denkbare Experiment mit Licht das Ergebnis einwandfrei vorhersagen kann. Diese Feststellung ist natürlich nicht endgültig. Schon morgen kann ein Physiker mit Glück und Ge-

schiek ein Experiment ausführen, welches die zurzeit gültige Theorie umstösst.

Diese grundlegenden Dinge sollen nicht weiter diskutiert werden, sondern an zwei Gedankenexperimenten soll versucht werden, der Natur der elektromagnetischen Strahlung näher zu kommen.

Beim ersten Versuch möge elektromagnetische Strahlung im Radiowellenbereich auf eine Antenne fallen, die an einem Oszillographen angeschlossen ist. Dann wird in der Antenne eine elektrische Spannung induziert, deren zeitlicher Verlauf auf dem Oszillographenschirm zu sehen ist. Im einfachsten Fall sieht man einen sinusförmigen Verlauf der Spannung mit einer Frequenz ω , die der Frequenz der elektromagnetischen Strahlung entspricht (Fig. 2a). Bei einer genaueren Analyse ergibt sich, dass das elektromagnetische Strahlungsfeld durch eine zeitlich und örtlich sinusförmige elektrische Feldstärke F beschrieben werden kann

$$F = F^0 \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (1)$$

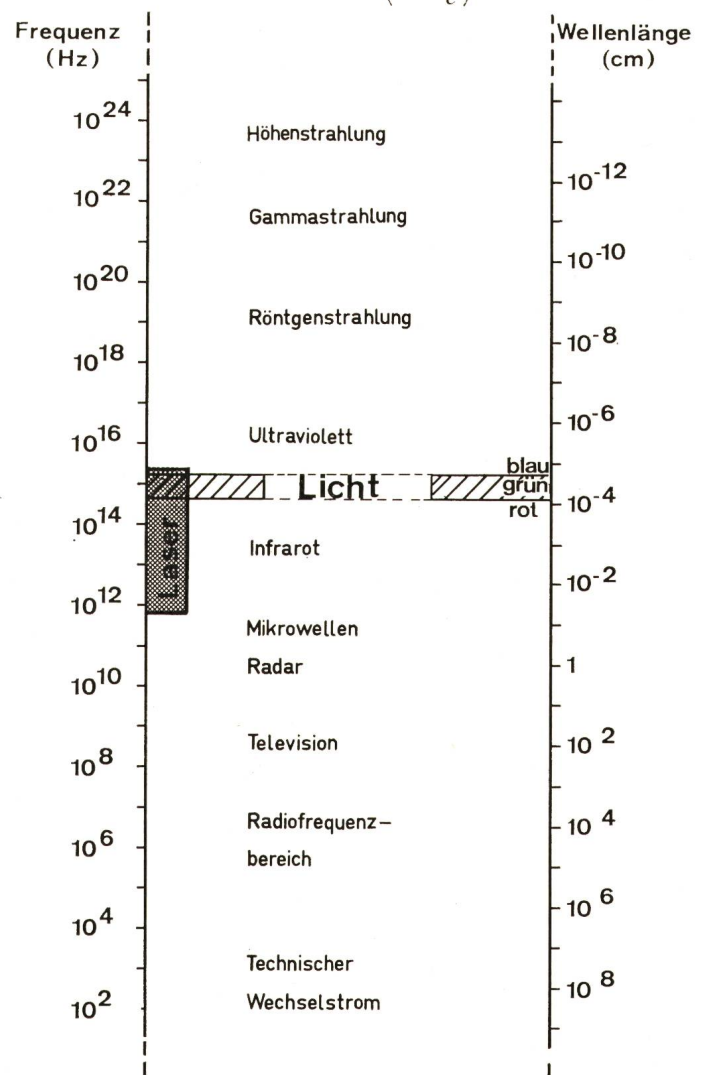


Fig. 1
Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

F^0 Vektor der Feldstärkeamplitude

ω Frequenz

t, x Zeit, Ort

c Lichtgeschwindigkeit

Die elektrische Feldstärke wirkt auf die freien Elektronen der Metallantenne, zwingt die Elektronen zum Mitschwingen im Takte der Frequenz ω und hat letztlich eine Spannung $U(t)$ zur Folge.

Dieser experimentelle Befund entspricht genau den Erwartungen. Das elektromagnetische Strahlungsfeld ist im einfachsten Fall eine in Zeit und Ort sich sinusförmig ausbreitende elektrische Feldstärke, die, wie durch weitere Versuche gezeigt werden kann, stets von einem entsprechenden magnetischen Feld begleitet ist.

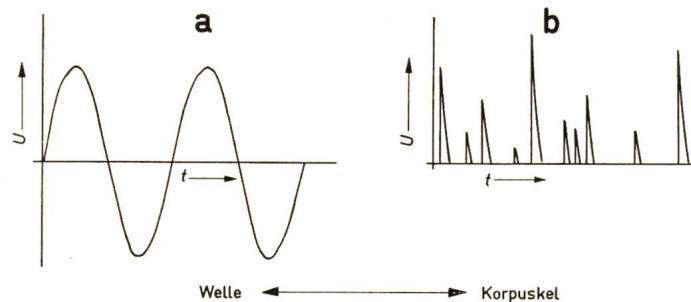


Fig. 2
Zeitlicher Verlauf der durch eine elektromagnetische Welle erzeugten Spannung

- a Hochfrequenzwelle, die auf eine Antenne wirkt
b Lichtwelle, die auf eine Photodiode wirkt

Dieser Versuch soll nun mit Licht wiederholt werden, wobei als Detektor diesmal eine Photodiode (oder Multiplier) verwendet wird. Auf die prinzipielle Funktion dieser Detektoren wird später noch eingegangen. Das Licht hat in der Photodiode einen elektrischen Strom zur Folge, der am Arbeitswiderstand eine entsprechende Spannung erzeugt. Auf dem Oszillographen ist diesmal jedoch ein völlig anderer zeitlicher Verlauf der Spannung zu sehen. Man registriert eine statistische Folge von kurzen Impulsen, die nichts von einer Wellennatur des Lichts erkennen lassen (Fig. 2b). Im Gegenteil, aus diesem Experiment und aus vielen anderen schliesst man, dass das Licht ein Strom von kleinen Teilchen ist. Diese Teilchen transportieren Energie und man nennt sie Photonen oder Lichtquanten. In zahlreichen sorgfältigen Messungen ist die Energie der Lichtquanten bestimmt worden. Sie ist mit der Frequenz des Lichts verknüpft und ergibt sich zu

$$E = \hbar \omega \quad (2)$$

$$\hbar = 1,034 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2 = \text{Plancksches Wirkungsquant}$$

Aus diesen beiden Experimenten könnte man folgern, dass Licht und Radiowellen etwas Unterschiedliches sind. Aber es lassen sich viele Experimente durchführen, die zeigen, dass Licht auch Welleneigenschaften hat. Jeder, der schon einmal einen farbigen Ölfleck auf einer nassen Strasse beobachtet hat, weiss, dass diese Farben durch die Welleneigenschaften des Lichts erklärt werden können, also durch die Tatsache, dass die Überlagerung verschiedener Lichtwellen sowohl zur Verstärkung als auch zur Auslöschung der Lichtintensität führen kann.

Aus anderen Versuchen muss man wiederum schliessen, dass auch die Radiowellen diesen merkwürdigen statistischen Charakter zeigen können.

Die Naturwissenschaftler haben jahrhundertlang experimentiert und sind zu dem Schluss gekommen:

«Elektromagnetische Strahlung hat Teilchen- und Welleneigenschaften.»

Die elektromagnetische Strahlung ist also weder eine Welle noch ein Teilchenstrom, sondern etwas Drittes, was sich völlig unserer Anschauung entzieht, aber vollständig und widerspruchsfrei durch die Theorie beschrieben werden kann. Es gibt Experimente, bei denen verhält sich das Strahlungsfeld fast wie eine Welle, es gibt andere, bei denen es sich fast wie ein Teilchenstrom verhält. Im folgenden sollen diese beiden Bilder für das Strahlungsfeld nebeneinander benutzt werden, denn sie sind anschaulich und verständlich.

Zum Abschluss soll noch kurz diskutiert werden, warum der Teilchencharakter des Strahlungsfeldes beim Licht so deutlich hervortritt und im Radiowellenbereich praktisch verschwindet. Ein Zahlenbeispiel möge diesen Sachverhalt erklären. Hierzu wird ein Strahlungsfeld mit einer Leistung von 10^{-6} W betrachtet. Im Radiowellenbereich bei einer Frequenz von $\omega = 10^9$ Hz ist nach Gl (2) die Energie der Photonen klein und in jeder Halbwelle der Sinusschwingung sind einige 10^{10} Photonen enthalten. Die Photonen folgen derart dicht aufeinander, und ihre Energie ist so gering, dass sie mit normalen Messgeräten gar nicht registriert werden können. Im Lichtwellenbereich dagegen bei einer Frequenz von $\omega = 10^{15}$ Hz ist die Energie der Photonen hinreichend gross, so dass sie einzeln detektiert werden können. Bei derselben Leistung von 10^{-6} W enthält jede Halbwelle nur noch einige 10^{-3} Photonen, d.h. im Mittel muss man 10^3 Halbwellen abwarten, bevor ein Photon auftritt. Daher der statistische Charakter des Photodiodensignals. Um die Welleneigenschaften des Lichts nachzuweisen muss über viele Photonen gemittelt werden, d.h. man muss hohe Intensitäten zur Verfügung haben oder über grosse Zeiten mitteln.

3. Erzeugung von Licht

3.1 Eigenschaften der Atome und thermisches Licht

Normales Licht wird auch thermisches Licht genannt, wobei diese Bezeichnung bereits auf die Entstehung des Lichtes hinweist. In allen konventionellen Lichtquellen wie Glühlampe, Gasentladungslampe oder auch Kerze wird das Licht dadurch erzeugt, dass Materie auf einige 1000°K erhitzt wird. Bei der Glühlampe ist es der erhitzte Wolframdraht, der leuchtet, bei der Gasentladungslampe das heisse Füllgas und bei der Kerze sind es die heissen Verbrennungsgase.

Um zu verstehen, warum erhitzte Materie Licht abgibt, muss man sich ein wenig näher mit den Eigenschaften der

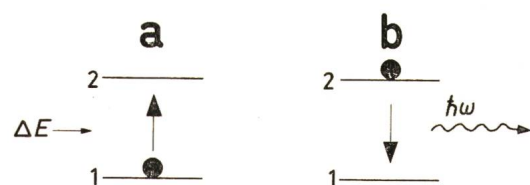


Fig. 3

Zwei der vielen diskreten Energieniveaus eines Atoms

Durch Zuführung von Anregungsenergie kann das Elektron in den oberen Energiezustand (a) übergehen und anschliessend durch spontane Emission seine Energie als Lichtquant $\hbar\omega$ abgeben (b)

Atome oder Moleküle beschäftigen, aus denen die Materie aufgebaut ist. Für das prinzipielle Verständnis der Lichtemission ist es nicht unbedingt notwendig, die quantenmechanischen Eigenschaften des Atoms zu berücksichtigen, sondern es reicht, das einfachere Bohrsche Atommodell zu diskutieren.

Danach besteht ein Atom aus einem positiven Kern, um den sich das negativ geladene Elektron auf bestimmten Kreis- oder Ellipsenbahnen bewegt. Jeder Bahn ist ein bestimmter Energiewert E_n des Atoms zuzuordnen. Normalerweise befindet sich das Elektron auf der niedrigsten Bahn, der auch der niedrigste Energiewert E_1 entspricht. Wird dem Atom Energie zugeführt, z. B. durch Stoss mit anderen Atomen oder Elektronen, so kann das Elektron auf eine höhere Bahn und damit auch in einen höheren Energiezustand springen. Dieses Ver-

halten ist in Fig. 3 für zwei Energiezustände E_1 , E_2 symbolisch dargestellt. Dem Atom wird der Energiebetrag $\Delta E = E_2 - E_1$ zugeführt, und das Elektron springt von dem niedrigsten Energiewert E_1 (dem Energiegrundzustand des Atoms) auf einen höheren Energiewert E_2 . Dieser Energiezustand ist jedoch kein stabiler Zustand des Atoms, sondern nach einer mittleren Verweilzeit springt das Elektron in den Grundzustand E_1 zurück. Die Energie ΔE , die dabei wieder frei wird, strahlt das Atom als elektromagnetische Strahlung aus, und zwar wird gerade ein Photon emittiert, dessen Frequenz dadurch bestimmt ist, dass die Energie des Photons der Energiedifferenz ΔE entsprechen muss:

$$\hbar \omega = E_2 - E_1 = \Delta E \quad (3)$$

Die Emission des Photons erfolgt ohne äussere Einwirkung auf das Atom zu einem nicht vorhersagbaren Zeitpunkt, weshalb diese Art der Emission auch spontane Emission genannt wird. Richtung, Phasenlage und Polarisationszustand des Photons sind ebenfalls nicht vorhersagbar und völlig unbestimmt. Bei einer üblichen Lichtquelle treten etwa 10^{19} spontane Emissionsakte in der Sekunde auf, und die Photonen werden daher gleichmässig in alle Raumrichtungen emittiert. Da jedoch ihre Phasenlagen und Polarisationsrichtungen völlig statistisch verteilt sind, besteht das Strahlungsfeld der thermischen Lichtquellen aus sehr vielen, wirt durcheinanderlaufenden Wellenzügen, weswegen dieses Licht auch inkohärentes Licht genannt wird. Zwei Arten von inkohärenten Lichtquellen lassen sich unterscheiden.

Bei der ersten Art, den Spektrallampen, handelt es sich um Gasentladungslampen mit geringem Gasdruck. D.h. der mittlere Abstand der Atome ist gross, so dass sie sich gegenseitig nicht stören. Daher sind ihre Energieniveaus relativ scharf und die Lichtemission besteht aus einer Anzahl von diskreten Spektrallinien, deren Frequenzen durch die Energieniveaus, d.h. durch Bedingung in Gl. (3) festgelegt sind (Fig. 4a).

Bei der zweiten Art thermischer Lichtquellen handelt es sich um Hochdruckgasentladungslampen oder um Festkörper hoher Temperatur. Hier ist der Abstand der Atome gering, und es findet eine starke gegenseitige Beeinflussung statt. Die Energieniveaus verschieben und verbreitern sich. Das hat zur Folge, dass sich auch die Spektrallinien verbreitern (Fig. 4b). Bei genügend hohen Dichten und Temperaturen besteht dann die Emission dieser Lichtquellen aus einem kontinuierlichen, breiten Spektrum, welches im thermischen Gleichgewicht durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben wird. Man bezeichnet solche Lichtquellen auch als «Schwarze Strahler». Lichtquellen, deren Emission annähernd dem Planckschen Strahlungsgesetz folgt, sind z. B. die Sonne oder die Glühlampe (Fig. 4c)¹⁾.

Im Hinblick auf technische Anwendungen im sichtbaren Spektralbereich besitzen die bisher diskutierten Lichtquellen erhebliche Nachteile.

Die schwarzen Strahler emittieren ein sehr breites Spektrum, von dem bei Temperaturen um 1800 °K der grösste Teil im infraroten Bereich liegt und nur nutzlose Wärme produziert. Erhöht man die Temperatur auf 2800 °K, so verschiebt sich zwar das Maximum zum sichtbaren Bereich des Spektrums (Fig. 5), gleichzeitig sinkt jedoch die Lebensdauer der Glühlampe von 10000 h (bei 1800 °K) auf 500 h (bei 2800 °K).

¹⁾ Man bezeichnet Glühlampen bzw. Wolfram-Lampen auch als graue Strahler, da ihre Intensitätsverteilung von dem hypothetischen schwarzen Strahler, der exakt nach dem Planckschen Strahlungsgesetz emittiert, abweicht.

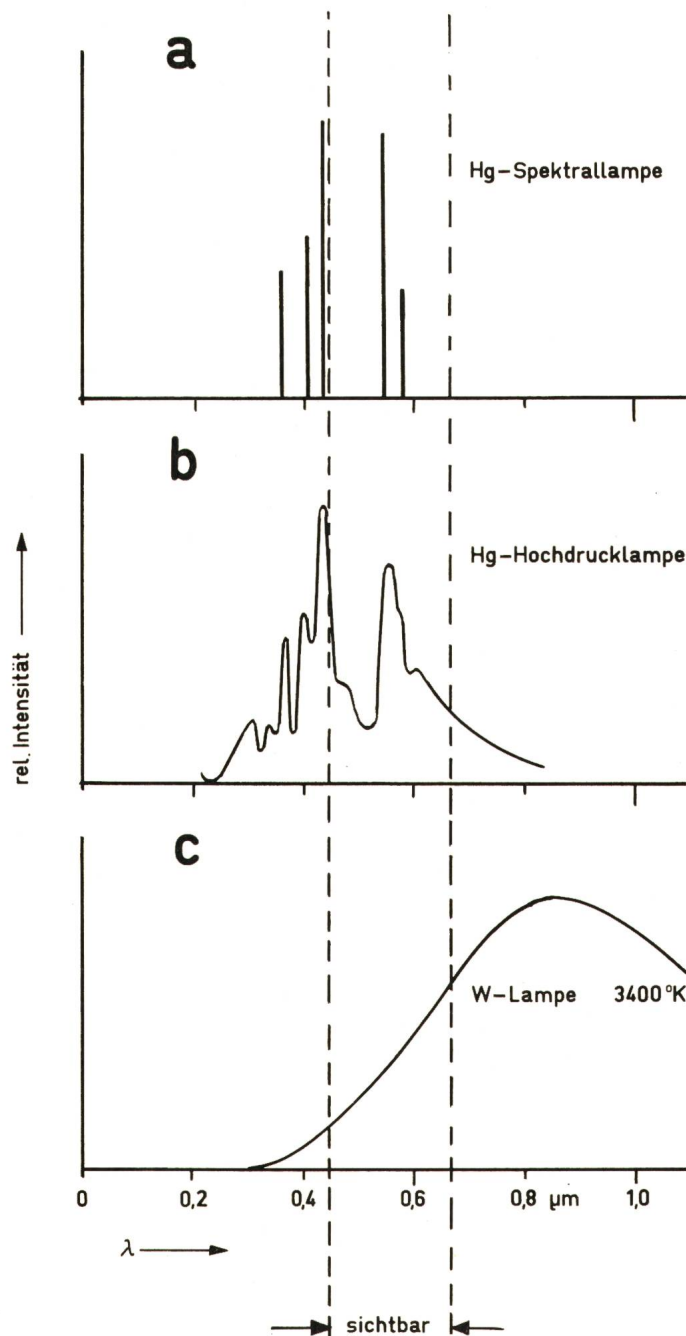


Fig. 4
Spektrale Intensitätsverteilungen

a Quecksilber-Spektrallampe, b Quecksilber-Hochdrucklampe,
c Wolframlampe von 3400 °K

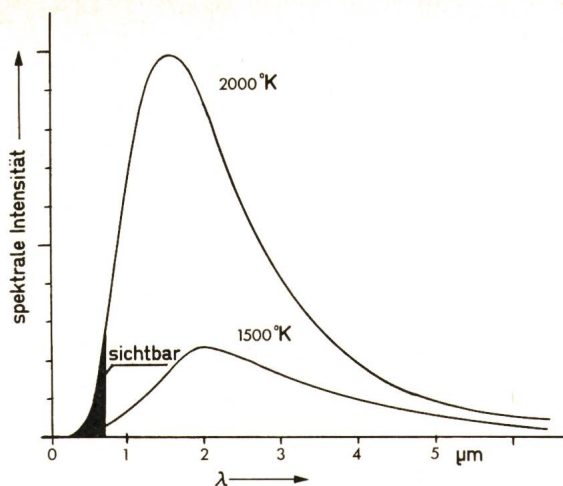


Fig. 5

Die spektrale Intensitätsverteilung des idealen Schwarzen Körpers nach dem Planckschen Strahlungsgesetz für Temperaturen von 1500 °K und 2000 °K
 λ Wellenlänge

Die Spektrallampen dagegen liefern eine genügend schmalbandige, d.h. einfarbige Lichtemission und besitzen den Vorteil, dass durch geeignete Wahl der Gase jede gewünschte Farbe im sichtbaren Teil des Spektrums erzeugt werden kann. Jedoch ist der Wirkungsgrad der Spektrallampen gering. Ausserdem sind diese Lichtquellen teuer und ihre Abmessungen gross, so dass sie z.B. als farbige Signallampen für Anzeigetafeln oder gar für logische Schaltungen der Optoelektronik nicht in Frage kommen.

3.2 Lichtemittierende Dioden

Diese Lichtquellen vereinigen viele Vorteile in sich. Ihre Abmessungen sind gering, sie emittieren hinreichend schmalbandiges Licht, durch die Wahl geeigneter Substanzen ist es möglich, verschiedene Wellenbereiche im sichtbaren Teil des Spektrums anzuregen, und die Anregung erfolgt auf einfache Art durch elektrischen Strom.

Im folgenden soll kurz die prinzipielle Funktion dieser Dioden skizziert werden, wobei notgedrungen ein wenig über die Grundlagen der Halbleiterphysik gesprochen werden muss.

Wenn Atome sich zu einem Kristall vereinigen, so bleiben ihre scharfen Energieniveaus nicht erhalten, sondern durch die gegenseitige Beeinflussung verschieben sich die Energieniveaus und spalten auf, und zwar in genau so viele Unterniveaus wie Atome im Kristall enthalten sind. Das bedeutet, dass ein ursprünglich scharfes Energieniveau eines Atoms im Kristallverband in einige 10^{23} Niveaus aufspaltet, die sich natürlich einzeln nicht lokalisieren lassen, sondern ein breites Band bilden (Fig. 6). Abstand und Breite der Bänder hängt vom speziellen Kristall ab. Man bezeichnet das unterste, mit Elektronen voll besetzte Band als Valenzband, da diese Elektronen für die Bindung verantwortlich sind. Das darüber befindliche Band, welches bei tiefen Temperaturen keine Elektronen enthält, ist das Leitungsband (Fig. 7).

Man teilt die Festkörper je nach Bandstruktur in drei Gruppen:

- a) Metalle: Die Bänder überlappen sich;
- b) Halbleiter: Bandabstand < 3 eV;
- c) Isolatoren: Bandabstand > 3 eV

wobei die letztere Einteilung etwas willkürlich ist.

Im folgenden sollen die Halbleiter (Fig. 8) näher betrachtet werden, und zwar gleich ein spezieller Typ, nämlich GaAs, welches von grosser Bedeutung für die Lumineszenzdioden und für die Halbleiterlaser ist. GaAs ist eine III/V-Verbindung, d.h. eine Verbindung eines Elementes der 3. Gruppe im periodischen System (Ga) mit einem Element der 5. Gruppe (As). Der Bandabstand beträgt $\Delta E = 1,45$ eV.

Bei tiefen Temperaturen befinden sich alle Elektronen im Valenzband, wo sie an die entsprechenden positiven Ionen gebunden sind. In diesem Zustand kann kein Strom fließen, die Leitfähigkeit des Kristalls ist gleich Null. Durch Energiezufuhr kann nun ein Elektron in das Leitungsband befördert werden, wobei mindestens die Energie des Bandabstandes aufgebracht werden muss. Diese Energiezufuhr kann in Form von thermischer Energie, also durch Erwärmung des Kristalls oder aber auch durch Lichteinstrahlung oder Beschuss mit Elektronen erfolgen.

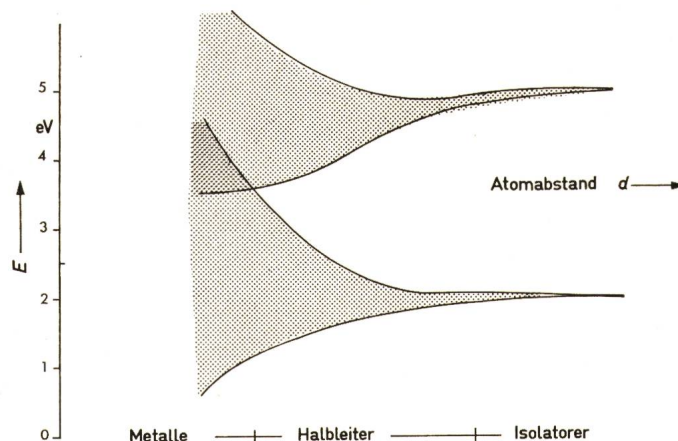


Fig. 6

Beim Zusammentritt der Atome zum Kristall spalten die scharfen Energieniveaus zu Bändern auf
 Je nach Bandabstand entsteht ein Metall, Halbleiter oder Isolator.
 E Energie

Befinden sich einige Elektronen im Leitungsband, so kann ein Stromtransport stattfinden, denn im nur teilweise besetzten Leitungsband können sich die Elektronen frei bewegen. Jedoch auch im Valenzband, welches jetzt nicht mehr vollständig besetzt ist, tritt ein Ladungstransport auf. Das fehlende Elektron hinterlässt eine positive Ladung, ein «Loch», in welches ein benachbartes Elektron springen kann. Durch sukzessives Springen der Elektronen bewegt sich scheinbar dieses Loch in

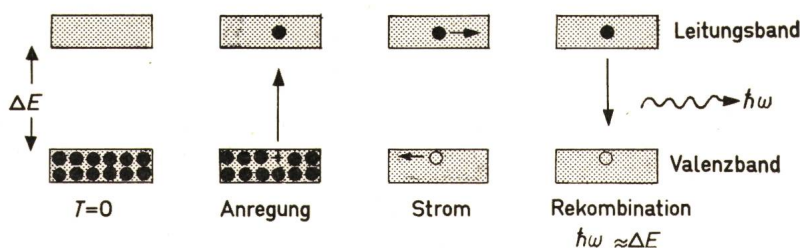


Fig. 7

Die verschiedenen Besetzungszustände von Leitungs- und Valenzband



Fig. 8
Das Bändermodell des dotierten Halbleiters

die entgegengesetzte Richtung, so als ob eine positive Ladung durch den Kristall läuft.

Man kann das System mit einem zweistöckigen Parkhaus vergleichen. Ist die untere Etage voll mit Autos besetzt, so ist eine Bewegung der Autos nicht möglich. Erst wenn ein Auto in das obere Stockwerk gebracht wird, können sowohl unten als auch oben die Autos bewegt werden.

Das Elektron kann nun aus dem Leitungsband wieder in das Valenzband in ein passendes Loch zurückspringen. Man sagt: es findet eine Elektron-Loch-Rekombination statt. Die dabei freiwerdende Energie kann als Lichtquant emittiert werden, wobei die Frequenz des Lichts dem Bandabstand entspricht. Beim GaAs mit einem Bandabstand von 1,45 eV wird bei der Rekombination nach Gl. (2) Licht der Frequenz $\omega = 2,2 \cdot 10^{15}$ Hz bzw. der Wellenlänge $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ emittiert. Bei der Rekombination Elektron-Loch muss jedoch kein Lichtquant emittiert werden, sondern die Energie kann auch als Wärme an den Kristall angegeben werden. Das Verhältnis von Zahl der emittierten Lichtquanten q zur Zahl n der rekombinierten Elektronen-Lochpaare wird als interner Quantenwirkungsgrad η_{int} bezeichnet:

$$\eta_{\text{int}} = q/n \quad (4)$$

Die Rekombination Elektron-Loch und damit verbundene Emission von Licht ist der grundlegende Mechanismus der Lumineszenzdioden, der sich im Prinzip nicht von der spontanen Emission der Atome unterscheidet. Nur besteht beim Festkörper die Möglichkeit, durch geeignete Wahl der Substanzen und durch Dotierung mit Fremdatomen diesen Prozess der Lichtemission in weiten Grenzen zu beeinflussen.

Der Anregungsmechanismus bei den lichtemittierenden Dioden erfolgt nicht nach der oben angegebenen Methode, die

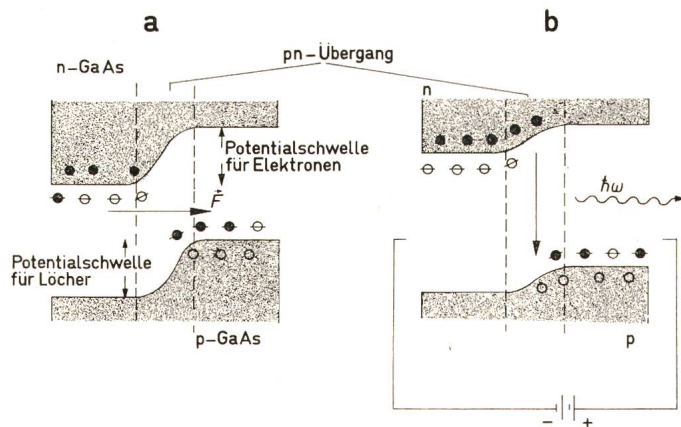


Fig. 9
Die lichtemittierende Diode am Beispiel der GaAs-Diode
a ohne angelegte Spannung
b mit angelegter Spannung (in Vorwärtsrichtung)

zwar prinzipiell funktioniert, aber viel zu aufwendig und von geringem Wirkungsgrad ist, sondern einfach durch einen elektrischen Strom.

Um diese sehr wirkungsvolle und einfache Methode zu verstehen, muss kurz ein wenig das Verfahren der Dotierung besprochen werden.

Man kann z.B. beim GaAs einen geringen Teil der As-Atome (5. Gruppe des periodischen Systems) durch Se-Atome (6. Gruppe) ersetzen. Von den sechs Valenzen des Selen sind nur fünf durch Bindung an die Nachbaratome gebunden, während das sechste Valenzelektron als überschüssiges Elektron nur schwach gebunden ist und leicht an das Leitungsband abgegeben wird. Damit ist der Kristall leitend geworden, und man bezeichnet ihn als n-leitend, weil die negativen Elektronen für den Stromtransport verantwortlich sind. Die Fremdatome, die Elektronen abgeben, werden Donatoren genannt.

Ebenso kann beim GaAs ein geringer Bruchteil der Ga-Atome (3. Gruppe) durch Zn-Atome (2. Gruppe) ersetzt werden. Da Zink nur zweiwertig ist, fehlt an der betreffenden Stelle ein Elektron zur Absättigung der Valenzen mit den drei freien Valenzen der Nachbarn. Ein fehlendes Elektron ist aber gleichwertig mit einem Loch. Bei dieser Dotierung wird der Kristall löcher-leitend oder p-leitend (positiv geladene Löcher), und diese Fremdatome werden Akzeptoren genannt.

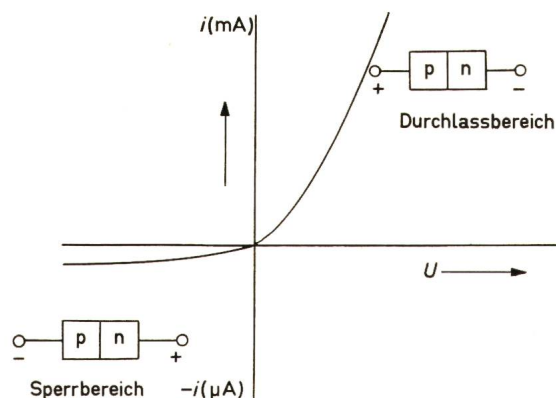


Fig. 10
Kennlinien des pn-Überganges
Man beachte den unterschiedlichen Strommaßstab

Wird nun p-leitendes Material mit n-leitendem Material in Kontakt gebracht, so entsteht ein p-n-Übergang. Die entstehende Bandstruktur ist in Fig. 9 skizziert. Das Auftreten dieser Potentialschwellen kann man sich wie folgt verständlich machen: Zunächst diffundieren Elektronen im Leitungsband von der n-Seite in die p-Seite. Die lokalisierten, positiv geladenen Donatoren bleiben auf der n-Seite zurück und bilden einen positiv geladenen Bereich, der weitere Elektronen an der Diffusion hindert; es ist für die Elektronen ein Potentialwall entstanden und damit ein elektrisches Feld F , welches die weitere Diffusion der Elektronen verhindert. Entsprechendes gilt für die Löcher der p-Seite. Diese beiden Potentialwälle verhindern die Diffusion von Elektronen und Löchern, eine Rekombination beider kann nicht stattfinden. Es ist die bekannte Halbleiterdiode mit der in Fig. 10 dargestellten Kennlinie entstanden. Wird eine Spannung derart an die Diode gelegt, dass der Potentialwall erhöht wird (Pluspol am n-Gebiet), so kann kein Strom fließen, die Diode sperrt. Dass tatsächlich ein sehr geringer Strom fließt, liegt an den nicht vermeidbaren Verun-

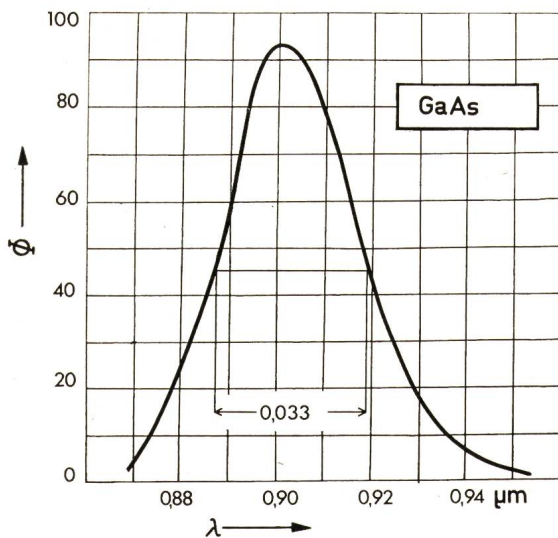


Fig. 11
Das Emissionsspektrum einer kommerziellen GaAs-Diode
 λ Wellenlänge
 Φ spektrale Intensität

reinigungen, die stets im Kristall enthalten sind und dazu führen, dass im n-Gebiet auch eine geringe Konzentration an Löchern und im p-Gebiet eine geringe Konzentration an Elektronen vorhanden ist (Minoritätsträger).

Wird dagegen die Spannung in Durchlassrichtung angelegt (Pluspol am p-Gebiet), so werden beide Potentialbarrieren erniedrigt (Fig. 9b). Jetzt können Löcher und Elektronen in den p-n-Übergang hineindiffundieren, es fließt ein grosser Strom. Im p-n-Bereich kann jetzt Rekombination der Ladungsträger stattfinden und die Diode emittiert Licht. Nach diesem Prinzip arbeiten die Lumineszenzdioden.

Interessant ist, dass der Wirkungsgrad eines solchen Systems im Prinzip grösser als eins werden kann. Definiert man als äusseren Wirkungsgrad das Verhältnis von herauskommender Lichtleistung zu hineingesteckter elektrischer Leistung:

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{Lichtleistung}}{\text{elektrische Leistung}}$$

so ergibt sich dieser zu

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{q h \omega}{i U} \quad (5)$$

wobei i der Diodenstrom, U die angelegte Spannung und q die Zahl der erzeugten Lichtquanten pro Zeiteinheit sind. Der Strom ist gleich der Zahl n der Ladungsträger pro Zeiteinheit multipliziert mit der Elementarladung e , $i = ne$. Die Quantenenergie $h\omega$ ist etwa gleich dem Bandabstand ΔE ; wird die Energie in eV ausgedrückt, so gilt $h\omega = \Delta E \cdot e$ und für den Wirkungsgrad folgt zusammen mit dem internen Wirkungsgrad η_{int} nach Gl. (4):

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \frac{\Delta E}{U} \quad (6)$$

Bei Dioden mit einem internen Quantenwirkungsgrad von nahezu eins kann der externe Wirkungsgrad grösser als eins werden, falls die angelegte Spannung U kleiner als der Bandabstand ΔE ist. Natürlich muss auch hier der Energieerhaltungssatz gelten. Die Differenzenergie wird in diesem Fall von den Gitterschwingungen geliefert. Die thermische Bewegung der Gitterbausteine und der Elektronen hilft diesen, den Potentialwall zu überwinden und zu rekombinieren. Dafür kühlt

sich der Kristall natürlich ab. Die Diode arbeitet also ähnlich wie ein Wärmepumpe.

Dieses einfache Beispiel zeigt, dass der Wirkungsgrad von Dioden sehr hoch sein kann. Tatsächlich erfolgt auch die Umwandlung von injizierten Ladungsträgern in Lichtquanten mit einem sehr hohen Wirkungsgrad, jedoch bleibt ein grosser Anteil des emittierten Lichts durch Reabsorption in der Diode stecken, so dass die praktisch erreichten Wirkungsgrade im Prozentbereich liegen.

Die Wellenlänge des emittierten Lichts ist durch den Bandabstand gegeben, der wiederum vom speziellen Material abhängt. Ein typisches Beispiel zeigt Fig. 11; es handelt sich um das Spektrum einer kommerziellen GaAs-Diode. Der prinzipielle Aufbau einer solchen Diode zeigt Fig. 12. Man beachte die geringen Abmessungen der Diode. Für die praktische Verwendung wird das System in ein Gehäuse gesetzt. Um zu verhindern, dass an der Grenzfläche GaAs-Luft ein grosser Anteil der Strahlung wieder in die Diode reflektiert wird, ist es zweckmässig, die Austrittsstelle mit einer Antireflexionsschicht zu versehen.

Ein besonders interessantes System ist die Kombination von GaAs mit GaP. GaAs besitzt einen Bandabstand von 1,45 eV, GaP einen etwas grösseren Abstand von 2,26 eV. Das Gemisch beider, also die Legierung $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, besitzt einen Bandabstand, der vom Mischungsverhältnis x abhängt und kontinuierlich variiert werden kann. Fig. 13 zeigt diese Abhängigkeit. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Dioden zeigen Tabelle I und II. Das Spektrum reicht von 0,33 μm bis in das ferne Infrarot, wo man z.B. mit Blei/Selen/Tellur-Verbindungen bis zu Wellenlängen von 16,5 μm kommt. Wellenlängen kürzer als 0,55 μm können zurzeit nur durch Anregung mit

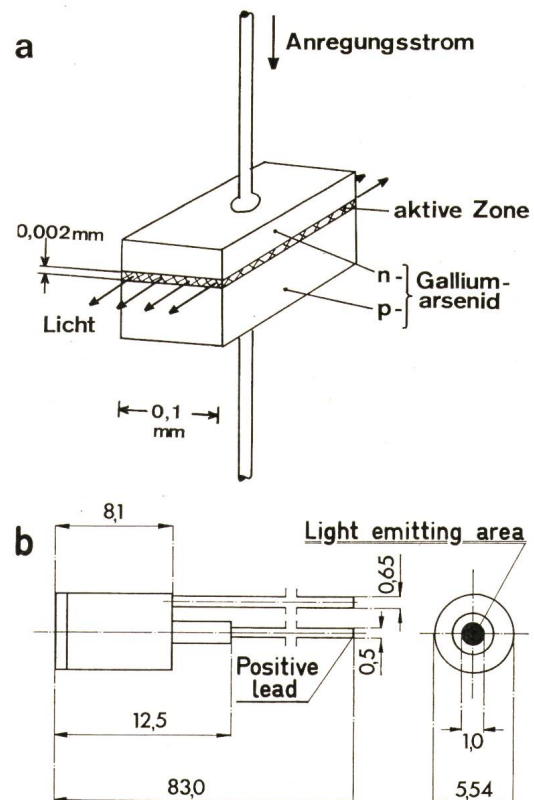


Fig. 12
Die Gallium-Arsenid-Diode [2]
a prinzipieller Aufbau
b typische Abmessungen

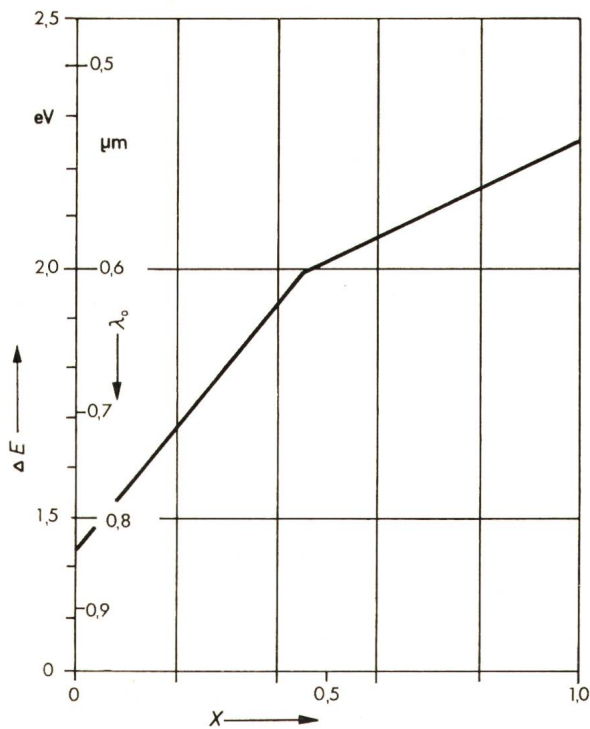


Fig. 13
Der Bandabstand ΔE beim Mischkristall $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ als Funktion des Mischungsverhältnisses x [3]
Zusätzlich ist die Grenzwellenlänge λ_0 eingetragen

Elektronenstrahlen erzeugt werden, ein Verfahren, welches nur geringe technische Bedeutung besitzt. Fig. 14 gibt eine Übersicht über den spektralen Bereich der Dioden und die verschiedenen Anregungsverfahren.

Lumineszenzdioden (LED) 1

Tabelle I

Material	Wellenlänge μm	Farbe	Anregung
ZnS	0,33	UV	Elektronenstrahl
ZnO	0,38	violett	
CdS	0,49	blau	
GaP:N*	0,55	grün	Strom
$\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{P}$	0,57	gelb-grün	
SiC*	0,59	gelb	
$\text{GaAs}_{0,5}\text{P}_{0,5}$ *	0,61	rot-gelb	
$\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$ *	0,66	rot	
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$	0,675	rot	
GaP:Zn, O*	0,69	rot	
GaAs:Zn, Se	0,9	infrarot	

* kommerziell erhältlich

Lumineszenzdioden (LED) 2

Tabelle II

Material	Wellenlänge μm	Anregung
GaSb	1,5	Strom, Elektronenstrahl
InAs	3,1	Strom, Elektronenstrahl, Laser
$\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$	4,1	Laser
InSb	5,4	Strom, Elektronenstrahl, Laser
$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$	6,5...16,5	Strom, Laser
$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$	6,5...16,5	Strom, Laser

Laserdioden

Tabelle III

Material	Betriebs-temperatur $^{\circ}\text{K}$	Wellenlänge μm	Anregungsart
ZnS	4,2	0,32	Elektronenstrahl
ZnO	4,2	0,37	Elektronenstrahl
$\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$	4,2	0,49...0,69	Elektronenstrahl
$\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$	300	0,73...0,9	Strom
GaAs	4,2	0,85	Elektronenstrahl
	300	0,9	Strom
GaSb	4,2	1,5	Strom, optisch
InAs	77	3,15	Strom
$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$	77	3,7...4,1	Strom, optisch
$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$	12	6,5...31,8	Strom, optisch

3.3 Laserdioden

Neben der in Abschnitt 3.1 diskutierten spontanen Emission (oder spontanen Rekombination) kann auch induzierte Emission auftreten. Fällt ein Lichtquant auf ein Elektron in einem oberen Energiezustand, so kann das Elektron durch das Lichtquant zur Emission gezwungen werden (Fig. 15a). Voraussetzung hierbei ist, dass die Quantenenergie etwa gleich dem Energieabstand der beiden Niveaus ist. Bei der induzierten Emission stimmen einfallendes und zusätzlich emittiertes Lichtquant in Frequenz, Polarisationsrichtung und Phase überein. D.h. das einfallende Lichtquant ist echt verstärkt worden. Da jedoch auch der gegenläufige Effekt auftritt, nämlich die Absorption eines Lichtquants durch ein Elektron im unteren Energiezustand (Fig. 15b), tritt nur dann eine echte Verstärkung auf, wenn mehr Elektronen im oberen als im unteren Energiezustand sind. Zusammen mit einer geeigneten Rückkopplung (Spiegel) führt dieser Lichtverstärker zum selbst-erregten Oszillator, dem Laser.

Bei der Diode tritt dann Selbsterregung auf, wenn genügend Elektronen-Lochpaare erzeugt worden sind (Einsatzstrom), so dass die Lichtverstärkung in der Diode die Verluste durch Reabsorption (interne Verluste) und Reflexion (an den Dioden-endsflächen) überwiegt. Es setzt Selbsterregung ein, und die Diode arbeitet als Laser-Oszillator mit allen Vorteilen dieses Systems. Das Licht ist monochromatisch, kohärent und bei geeigneter Anordnung auch gut gebündelt. Auf Einzelheiten soll hier nicht weiter eingegangen werden, dazu wird auf die Literatur verwiesen [1; 2]. In Tabelle III sind einige Laserdioden zusammengestellt.

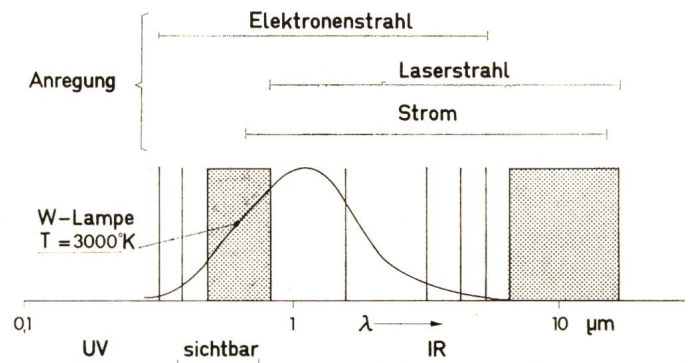


Fig. 14
Der Emissionsbereich von lichtemittierenden Dioden für die drei wichtigsten Anregungsmethoden: Elektronenstrahl, Laserstrahl und Strom [9]

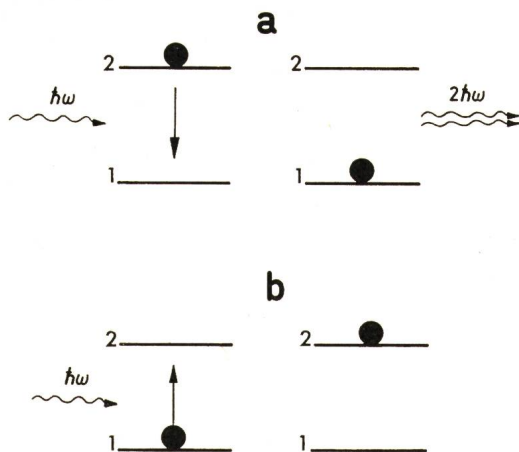


Fig. 15
Verstärkung von Licht durch induzierte Emission (a) und Schwächung durch Absorption (b)

4. Nachweis von Licht

Die Methoden der Lichterzeugung können auch zum Lichtnachweis verwendet werden, wenn der Vorgang umgekehrt abläuft. In einem p-n-Übergang wird Licht durch einen elektrischen Strom erzeugt. Das bedeutet umgekehrt, dass Licht, welches auf einen p-n-Übergang fällt, einen elektrischen Strom zur Folge hat.

In Fig. 16 sind die beiden physikalischen Grundprinzipien der Lichtdetektion dargestellt. Man unterscheidet den äusseren und den inneren Photoeffekt.

Beim äusseren Photoeffekt setzt ein einfallendes Photon ein Elektron frei und dieses kann dann durch ein äusseres Feld beschleunigt werden, es fliesst ein Strom. Damit ein Elektron von dem obersten besetzten Band nach aussen gelangen kann, muss die Energie des Lichtquants hinreichend gross sein. Daher wird es mit abnehmender Energie der Lichtquanten, also mit zunehmender Wellenlänge, immer schwieriger, diese nachzuweisen. Der äussere Photoeffekt wird bei Multipliern und Photozellen ausgenutzt [10]; sie sind sehr empfindliche und sehr schnelle Detektoren. Nachteilig sind die grossen Abmessungen, die eine Verwendung dieser Detektoren in der Mikroelektronik unmöglich machen. Daher soll auf diese Systeme nicht näher eingegangen werden.

Beim inneren Photoeffekt wird in einem Halbleiterkristall oder auch Isolator durch das einfallende Lichtquant ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben, was eine Erhöhung der Leitfähigkeit zur Folge hat. Bei Anlegen einer äusseren Spannung tritt also eine Erhöhung des Stromes gegenüber dem unbelichteten Halbleiter auf. Man spricht von Photowiderständen. Im unbelichteten Zustand besitzt ein solcher einen Dunkelwiderstand von $10^5 \dots 10^9 \Omega$, der im belichteten Zustand um rund 9 Zehnerpotenzen fallen kann, also praktisch metallische Leitfähigkeit erreicht. Ein Nachteil der Photowiderstände ist ihre grosse Trägheit. Die Zeitkonstanten liegen im Bereich von einigen $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{ s}$. Eine Zusammenstellung von Photowiderständen zeigt Tabelle IV. Genau wie beim äusseren Photoeffekt kann auch hier das Elektron nur dann in das Leitungsband gelangen, wenn die Energie des Lichtquants grösser ist als der Bandabstand. Damit ist die Grenzwellenlänge λ_0 festgelegt, also die grösste Wellenlänge, auf die der Photowiderstand noch anspricht. Bei sehr kleinem Bandabstand reicht die Empfindlichkeit der Photowiderstände weit in den infraroten Bereich des Spektrums. Diese Systeme müssen dann gekühlt werden, weil sonst bei Normaltemperatur bereits die thermische Energie ausreicht, um Elektronen in das Valenzband zu heben.

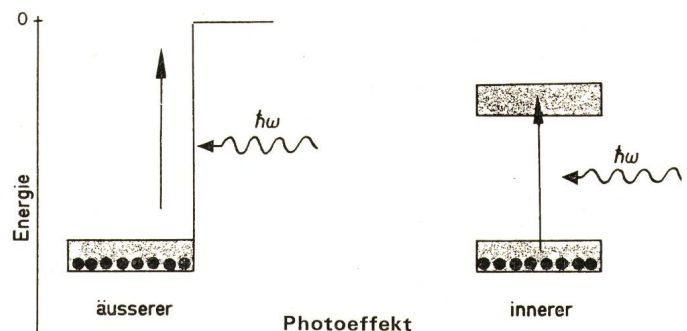


Fig. 16
Der äussere und innere Photoeffekt im Bändermodell

Man kann auch einen p-n-Übergang als Lichtdetektor verwenden und kommt damit zu den Photoelementen. Der Aufbau dieses Photoelements soll für das Silizium-Photoelement erläutert werden.

Es besteht aus einer Scheibe n-Silizium (As als Donator) auf die eine lichtdurchlässige Schicht p-Silizium (Ga als Akzeptor) angebracht ist. Wie bereits beim GaAs diskutiert wurde, bildet sich am p-n-Übergang ein Potentialwall aus mit einem elektrischen Feld, welches von der n- zur p-Schicht gerichtet ist und die Diffusion der Elektronen bzw. Löcher verhindert. Werden nun durch die eingestrahnten Lichtquanten im p-n-Übergang zusätzliche Elektronen erzeugt, so werden sie durch dieses elektrische Feld in die n-Schicht gezogen (Fig. 17). Diese Änderung der Ladungsverteilung erzeugt eine elektromotorische Kraft. Verbindet man die beiden Schichten durch einen äusseren Stromkreis, so fliessen die vom Licht ausgelösten Elektronen als Photostrom durch diesen Kreis. Die maximale Quantenausbeute liegt bei 0,5, d.h. von zwei einfallenden Photonen wird jeweils 1 Elektron-Loch-Paar erzeugt. Infolge dieses hohen Wirkungsgrades werden solche Photoelemente als Sonnenbatterien zur Spannungsversorgung elektrischer Geräte kleinen Stromverbrauchs benutzt. Sie können eine Leistung von wenigen mW/cm^2 abgeben.

Photowiderstände

Tabelle IV

Material	Dotierung	Grenzwellenlänge μm	Betriebstemperatur $^{\circ}\text{K}$
<i>Eigenhalbleiter</i>			
PbS	—	4	77
PbSe	—	5...7	300...190
PbTe	—	6	77
InSb	—	6	190
<i>Störstellenhalbleiter</i>			
Ge	Au	8,5	60
Ge	Cd	25	20
Ge	Cu	30	5
Ge	Zn	45	5
<i>Isolatoren</i>			
CdS	—	0,55	300
CdSe	—	0,82	300

Ähnlich arbeiten Selen-Photoelemente. Da deren spektrale Empfindlichkeitsverteilung (Fig. 18) weitgehend der des Auges entspricht, werden sie besonders zum Bau von Photometern für photographische Belichtungsmesser verwendet.

Photoelemente können auch als Photowiderstände verwendet werden, indem von aussen an das Element eine Spannung in Sperrichtung angelegt wird; man bezeichnet es dann als Photodiode.

Im unbelichteten Zustand ergibt sich die normale Kennlinie des p-n-Übergangs, und in Sperrichtung fliesst ein geringer Dunkelstrom. Bei Belichtung des p-n-Übergangs werden Ladungsträger erzeugt und entsprechend steigt der Strom in Sperrichtung an. In Fig. 19 ist der prinzipielle Verlauf eines solchen Kennlinienfeldes skizziert.

Im folgenden sollen noch kurz zwei weitere Photodetektoren diskutiert werden.

Der Phototransistor ist das Analogon zum Transistor. Der normale Transistor ist eine n-p-n-Kombination mit den drei Anschlüssen Emitter, Basis, Kollektor. Der Emitter-Strom i_e , der bei Anlegen einer Spannung zwischen Emitter und Kollektor fliesst, kann durch den Basisstrom i_B gesteuert werden. Statt in die Basis Ladungsträger zu injizieren, können solche auch durch Einstrahlung von Lichtquanten erzeugt werden. Es ergibt sich dann das in Fig. 20 skizzierte Kennlinienfeld. Es unterscheidet sich von dem der Photodiode im wesentlichen nur durch den höheren Strom. Vereinfacht kann man sagen:

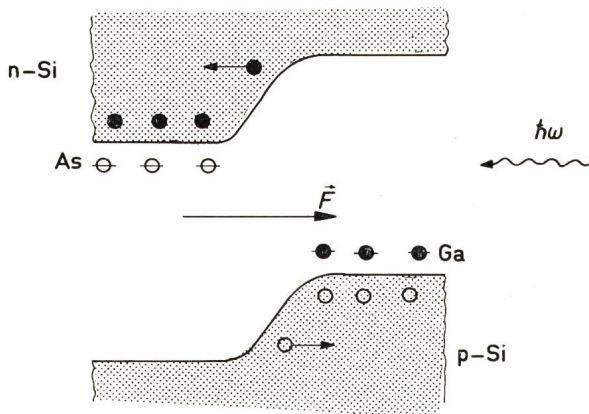


Fig. 17
Das Photoelement (Photodiode) im Bändermodell

Der Phototransistor ist die Kombination einer Photodiode mit einem Verstärker.

Von Bedeutung ist noch der Photothyristor. Bei den vorangehenden Elementen handelte es sich stets um analoge Detek-

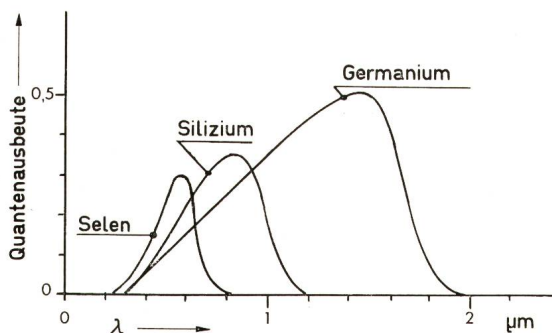


Fig. 18
Die Quantenausbeute als Funktion der Wellenlänge
für verschiedene Photoelemente
 λ Wellenlänge

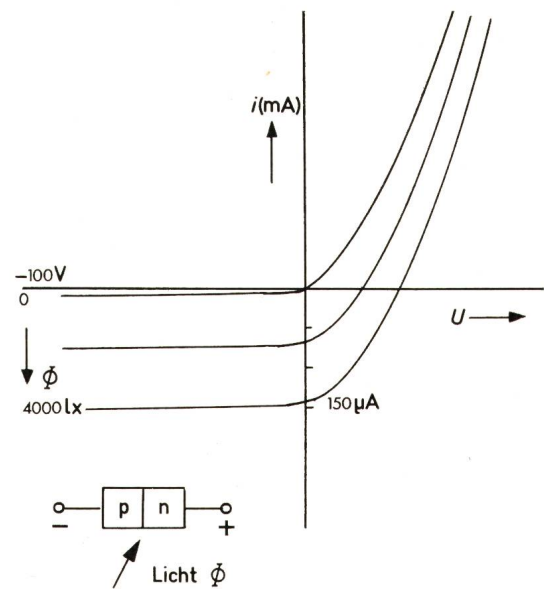


Fig. 19
Kennlinienfeld der Photodiode
 U Spannung an der Diode
 i Strom durch die Diode

toren, d.h. der elektrische Strom ist proportional dem Lichtstrom. Der Thyristor dagegen ist ein digitales Schaltelement. Es handelt sich um eine p-n-p-n-Kombination. Die Strom-Spannungskennlinie ist in Fig. 20 skizziert. Zunächst arbeitet

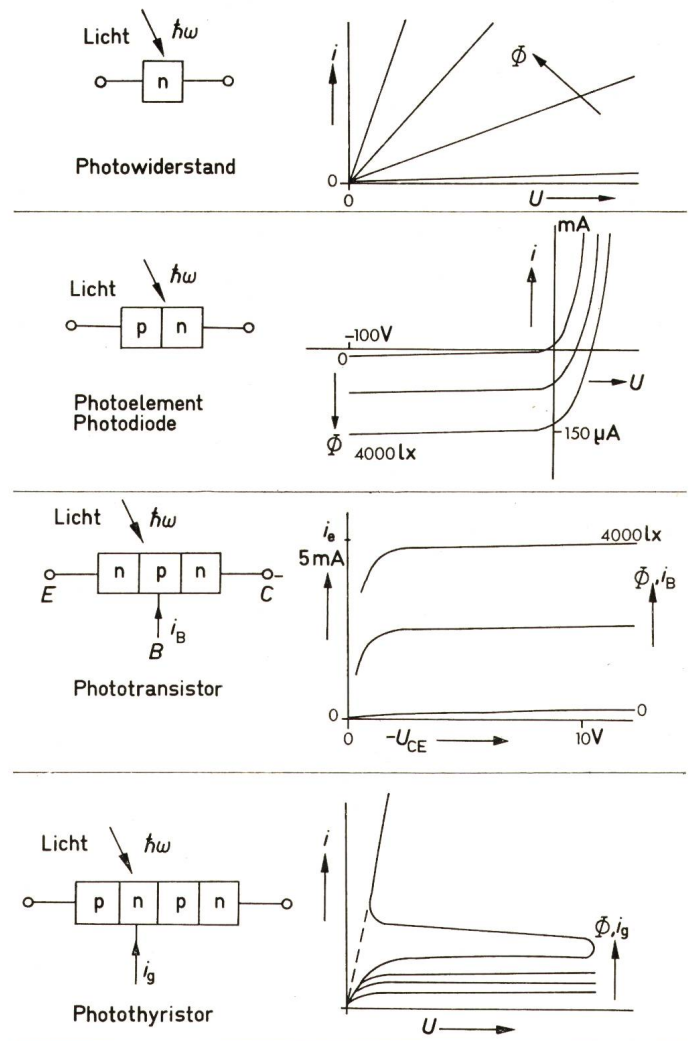


Fig. 20
Die verschiedenen Empfänger mit ihren charakteristischen Kennlinien

der Thyristor im Sperrbereich, d.h. der fließende Strom ist gering. Werden jetzt im ersten n-Bereich (Tor oder Gate) Ladungsträger erzeugt, z.B. durch einen injizierten Strom i_g oder durch Einstrahlung von Licht Φ , so steigt der Sperrstrom leicht an. Oberhalb eines kritischen Stromes bzw. einer kritischen Beleuchtungsstärke schaltet der Thyristor plötzlich durch und wird leitend, er arbeitet jetzt im Durchlassbereich. Wichtig ist, dass der Thyristor leitend bleibt, auch wenn der Lichtstrom abgeschaltet wird. Erst durch Ausschalten der Spannung U kann der Thyristor wieder in den Ausgangszustand gebracht werden. Für dieses Schaltelement gibt es z.B. als logisches Element zahlreiche Einsatzmöglichkeiten [7].

5. Zusammenfassung

Über die physikalischen Prinzipien der Erzeugung und der Detektion von Licht wurde ein kurzer Überblick gegeben, ohne auf technische Details einzugehen. Hierzu wird auf die Literaturangaben verwiesen. Das Schwergewicht der Übersicht lag auf den optoelektronischen Elementen, also den lichtemittierenden Dioden und den entsprechenden Photodetektoren. Infolge der geringen Abmessungen der einfachen Betriebsart und der grossen mechanischen Belastbarkeit finden diese Elemente

heute einen grossen Anwendungsbereich in der Elektronik und besonders auch in der Verfahrenstechnik zum Schalten, Steuern und Überwachen von Produktionsvorgängen [6].

Literatur

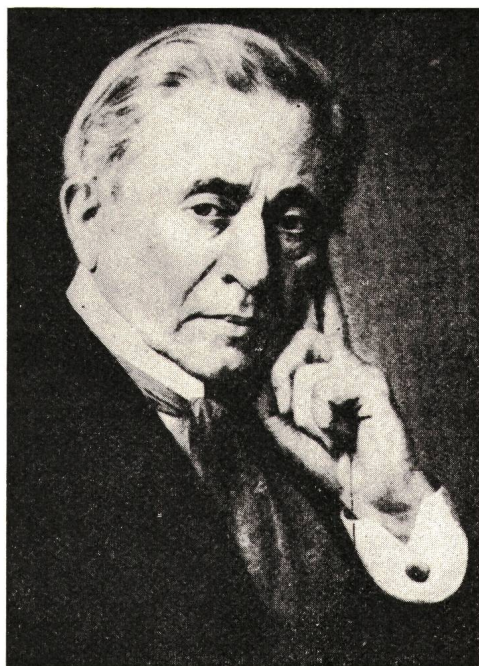
- [1] H. Weber und G. Herziger: Laser: Grundlagen und Anwendungen. Weinheim/Bergstrasse, Physik-Verlag, 1972.
- [2] H. Weber: Erzeugung und Eigenschaften des Laserlichts. Bull. SEV 63(1972)4, S. 159...167.
- [3] C. J. Nuese, H. Kressel und I. Ladany: The future for LEDs. IEEE Spectrum 9(1972)5, p. 28...38.
- [4] J. Fertin: L'optoélectronique des semiconducteurs. Onde Electrique 52(1972)5, p. 205...209.
- [5] H. Teichmann: Halbleiter. B.I. Hochschultaschenbücher Nr. 21. Mannheim, Bibliographisches Institut, 1961.
- [6] H. Carter und M. Donker: Photoelektrische Bauelemente. Theorie und Praxis. Philips technische Bibliothek. Eindhoven, N.V. Gloeilampenfabrieken, 1964.
- [7] A. Griffin und R. S. Ramshaw: The thyristor and its applications. London, Chapman and Hall, 1965.
- [8] H. Salow u. a.: Der Transistor. Physikalische und technische Grundlagen. Berlin, Springer Verlag und München, Bergmann-Verlag, 1963.
- [9] F. F. Morehead: Light emitting semiconductors. Scientific American 216(1967)5, S. 109...122.
- [10] J. M. Schonkeren: Photomultipliers. Philips Application Book. Eindhoven, Kater and Thompson, 1970.
- [11] H. K. Henisch: Electroluminescence. London, Pergamon Press, 1962.
- [12] H. F. Ivey: Electroluminescence. Scientific American 197(1957)2, p. 40...47.

Adresse des Autors:

Dr. H. Weber, Institut für angewandte Physik der Universität Bern, Sidlerstrasse 5, 3000 Bern.

JOSEPH HENRY

1797–1878



Bibliothek ETHZ

In Albany im Staate New York kam am 17. Dezember 1797 Joseph Henry als Sohn eines aus Schottland stammenden Tagelöhners zur Welt. Seine ersten Jugendjahre verlebte er bei der Grossmutter in Galway; erst nach dem frühen Tod des Vaters kehrte er zur Mutter zurück.

Ein Naturkundebuch, das zufällig in seine Hände kam, begeisterte ihn so sehr, dass er sich weiterzubilden begann. Er gab seine Tätigkeit bei einem kleinen Laientheater auf, nahm Privatstunden und erwarb sich die Zulassung an die Akademie in Albany. Neben dem Studium verdiente er und erhielt später eine Assistentenstelle. Nach kurzer Beschäftigung für einen Strassenbau wurde er als Professor für Mathematik und Naturwissenschaften nach Albany berufen. Die Elektrizität zog ihn in ihren Bann. Den aus einem mit Wachs isolierten Eisenkern bestehenden, mit einer losen Drahtumwicklung versehenen Elektromagneten von William Sturgeon verbesserte er, indem er mit Seide umspinnenen Draht in mehreren Lagen verwendete. Einen Versuchsmagneten versah er mit mehreren Wicklungen mit verschiedenen Windungszahlen, deren Enden alle herausgeführt waren. Daran klärt er das Verhalten bei verschiedenen Schaltungen und Spannungen ab. Der stärkste Magnet war imstande, 3500 Pfund zu tragen; das war 1830.

Im folgenden Jahr wand er in einem Hörsaal einen eine Meile langen Draht auf. Mit dieser Riesenspule und einem Elektromagneten gelang es ihm, eine Glocke auf einige Entfernung zum Läuten zu bringen. Damit hatte er die gegenseitige Induktivität entdeckt! Leider unterliess er es, seine Beobachtungen sofort zu veröffentlichen und daher gilt Faraday, der am 24. November 1831 über seine Versuche berichtet hatte, als Entdecker der gegenseitigen Induktion. Henry fällt aber das Verdienst der Entdeckung der Selbstinduktion zu, weshalb ihm zu Ehren die Einheit der Induktion den Namen «Henry» erhielt.

Henry, der zu seiner Zeit als einer der besten Experimentatoren galt, wurde 1832 als Professor an das New Jersey College (jetzt Princeton University) berufen, wo er seine Versuche erfolgreich weiterführte. Er erfand unter anderem das Relais und die induktionsfreie Wicklung und erkannte, dass man durch entsprechende Bemessung der Wicklungen die Spannung entweder hinauf- oder herabsetzen kann, etwas, das später beim Transformator ausgenutzt wurde.

1846 erhielt er den Auftrag, einen Arbeitsplan für die vom Engländer Smithson gestiftete «Smithsonian Institution für die Mehrung und Verbreitung des Wissens» aufzustellen. Dann wurde er deren Sekretär. Das Experimentieren musste er von da an aufgeben. Dafür verdankt man ihm zahlreiche Anregungen auf andern Gebieten. Unter anderem organisierte er die telegraphischen Wetterberichte, entwarf die ersten Wetterkarten und die Grundlagen für die wissenschaftliche Wettervorhersage.

Henry war Mitglied der Akademie der Wissenschaften, die er von 1868 bis zu seinem Tode präsidierte. 1830 heiratete er eine Base, die ihm 6 Kinder schenkte. Drei, darunter der Sohn, waren ihm im Tode vorangegangen, als er am 13. Mai 1878 in Washington an einer Nierenentzündung starb.

H. Wüger