EINE KURZE GESCHICHTE DER LICHT-SENSORIK

Wie vermessen wir Licht? Auch wenn der Einsatz von Luxmetern, Belichtungsmessern, Laserleistungsmeßgeräten und ähnlicher Messtechnik für uns heute selbstverständlich geworden ist, war ihre Entwicklung nicht immer leicht und von Verständnis geprägt. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über Höhen und Tiefen in der Geschichte der optischen Sensorik.

Johann Wolfgang von Goethe (1749 – 1832) war nicht nur Dichter, sondern auch ein begeisterter Naturwissenschaftler. Er interessierte sich unter anderem brennend für Pflanzen, Mineralien und Farben und favorisierte dabei eine ganzheitliche Sichtweise auf die Dinge und Phänomene. Dabei betrachtete er eine Tendenz der modernen Wissenschaft im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts mit unverhohlenem Argwohn: Um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen, wurde immer intensiver und genauerer gemessen. Goethe kommentierte diesen Trend unter anderem in seinen »Maximen und Reflexionen«: »Der Mensch an sich selbst, insofern er sich seiner gesunden Sinne bedient, ist der größte und genauste physikalische Apparat, den es geben kann; und das ist eben das größte Unheil der neuern Physik, dass man die Experimente gleichsam vom Menschen abgesondert hat und bloß in dem, was künstliche Instrumente zeigen, die Natur erkennen, ja was sie leisten kann, dadurch beschränken und beweisen will.«
Wir wissen heute jedoch, dass Naturwissenschaft und Technik ihre ungeahnten Erfolge in den folgenden zwei Jahrhunderten genau auf diese hier kritisierte Vorgehensweise gründeten. Interessanterweise kündigten sich zu jener Zeit, als Goethe die zitierten Worte schrieb, erste Vorboten einer völlig neuartigen, revolutionären Messtechnik an, die schließlich noch weit über das hinausging, was der Weise aus Weimar kannte.

ELEKTRISCHE MESSTECHNIK

1820 beobachtete der Däne Hans Christian Ørstedt (1777 – 1851), dass eine Magnetnadel durch elektrischen Strom in ihrer Ausrichtung abgelenkt wurde [1]. Die Ablenkung erwies sich als umso stärker, je größer der fließende Strom war. Noch im gleichen Jahr baute Johann Schweigger (1779 – 1857) an der Universität Halle auf der Grundlage dieses Effekts ein einfaches Strommessgerät. Dieses wurde in den folgenden Jahrzehnten soweit verbessert, dass es schließlich als sogenanntes Drehspulinstrument nicht nur in der elektrischen Messtechnik unentbehrlich wurde. Da es im Laufe des 19. Jahrhunderts gelang, die Änderungen vieler physikalische Größen wie Temperatur, Druck, Helligkeit usw. in elektrische Signale zu verwandeln, ergaben sich aus dieser »technischen Sensorik« (von lateinisch sentire, d.h. fühlen, empfinden) völlig neue Messmöglichkeiten.
Die quantitative Erfassung von Licht geschah lange Zeit nur durch visuelle Lichtmesser, in denen die Kontrastempfindlichkeit des Auges ausgenutzt wurde. Auf der Grundlage der Erkenntnisse des Franzosen Pierre Bouguer (1698 – 1758) verfasste Johann Heinrich Lambert (1728 – 1777) im Jahre 1760 ein fundamentales Buch zur Lichtmessung, die er »Photometrie« nannte [2]. Die darauf aufbauenden »Photometer« beruhtem im Prinzip fast alle auf dem Vergleich der Helligkeiten zweier Lichtquellen: der Referenzlichtquelle und der zu charakterisierenden Quelle. Die Helligkeit am Messort nimmt mit dem Quadrat des Abstands zur Lichtquelle ab. Daher lässt sich bei eingestellter gleicher Helligkeit der Bilder auf die Lichtstärke der auszumessenden Lichtquelle schließen.
Doch diese Methode hat Nachteile: Die Ergebnisse hängen vom subjektiven Eindruck des Messenden ab. Gerade bei Licht mit verschiedenen Farben oder geringen Intensitäten sind Vergleiche äußerst kritisch. Zudem war seit 1800 die unsichtbare Infrarot- und seit 1801 die Ultraviolettstrahlung bekannt. Diese entzogen sich völlig der Erfassung mit dem Auge. Deshalb konnte hier nur die elektrische Messtechnik helfen.

THERMISCHE FOTOSENSOREN

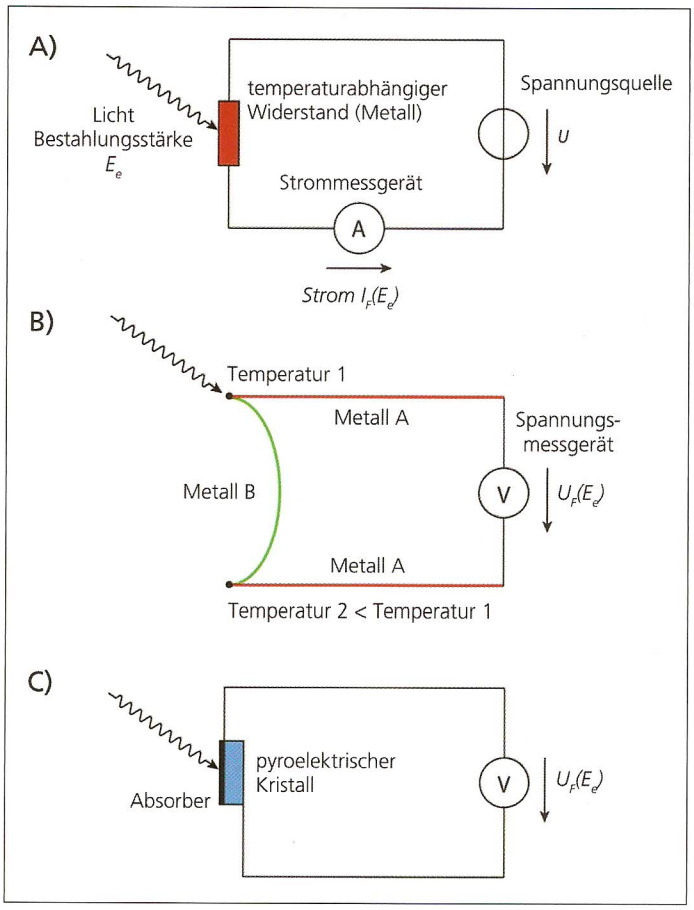
1827 fand Georg Simon Ohm (1789 – 1854) das nach ihm benannte, berühmte Gesetz, das den Zusammenhang zwischen elektrischem Strom und seiner Ursache, der Spannung, über den »Widerstand« beschreibt [3]. Dieser gibt an, wie stark der Strom beim Durchgang durch verschiedene Stoffe »gedrosselt« wird. Der Engländer Humphry Davy (1778 – 1829) hatte herausgefunden, dass der Widerstand bei Metallen zunimmt, wenn sie erhitzt werden [4]. Damit ließen sich Temperaturen messen: Je heißer der Draht, desto größer der Widerstand, desto geringer der Strom, desto geringer der Zeigerausschlag am Strommessgerät.

Mit diesem Widerstandsthermometer konnte die Temperatur zunächst nur grob gemessen werden. Doch mit verfeinerten Messschaltungen wurde seine Empfindlichkeit soweit gesteigert, dass man geringste, durch das Auftreffen von optischer Strahlung hervorgerufene Temperaturunterschiede messen konnte. Damit wurde ein elektrisches Photometer möglich (siehe Abbildung 1a). Der Amerikaner Samuel Pierpont Langley (1834 – 1906) entwickelte um 1880 ein hochempfindliches Gerät mit dünnen, geschwärzten Platinstreifen als Messwiderstand. Er nannte es Bolometer (d.h. Strahlenmesser) und vermaß mit bis dahin unerreichbarer Genauigkeit die Sonnenstrahlung und deren Absorption in der Atmosphäre [5].
In Deutschland entwickelte an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt unter anderem der Physiker Otto Lummer (1860 – 1925) das Bolometer weiter. Auf der Suche nach einem Normal für die Lichtstärke untersuchten er und seine Mitarbeiter erstmals die Strahlung eines Schwarzen Körpers so genau, dass Max Planck (1858 – 1947) 1900 daraus seine berühmte Strahlungsformel ableiten und die Quantentheorie begründen konnte [6]. Auch heute noch werden Bolometer insbesondere zur Messung von Infra-

rotstrahlung angewandt. Als zweidimensionales Array angeordnet bilden die temperaturabhängigen Widerstände Bildsensoren für Wärmebildkameras. Supraleitende Bolometer werden in der Grundlagenforschung zur Detektion energiearmer Photonen verwendet.

Doch die Temperaturabhängigkeit des Widerstands ist nicht der einzige Effekt, mit dem Licht vermessen werden kann. Schon 1821 entdeckte Thomas Seebeck (1770 – 1831) die sogenannte Thermoelektrizität [7]: Werden zwei Metalle an zwei Stellen mit unterschiedlicher Temperatur zusammengebracht, entsteht eine elektrische Spannung. Dieser Effekt lässt sich auch zur Strahlungsmessung nutzen (Abbildung 1b). Um 1830 schaltete der Italiener Leopoldo Nobili (1784 – 1835) mehrere solcher »Thermoelemente« hintereinander und konnte mit diesen »Thermosäulen« die Empfindlichkeit der Messung deutlich erhöhen. Heute setzt man solche Sensoren beispielsweise in Laserleistungsmessgeräten oder in Pyrometern zur Temperaturfernmessung ein.

Schon in der Antike war bekannt, dass manche Kristalle unter Wärmeeinwirkung »elektrisches Verhalten« zeigen und kleine Teilchen anziehen. 1824 prägte der Engländer David Brewster (1781 – 1868) dafür den Begriff Pyroelektrizität [8]. Durch Erwärmung verschieben sich die Ladungen im Innern von bestimmten Kristallen (z.B. Turmalin), sodass an deren Oberfläche eine elektrische Spannung gemessen werden kann. Auch dieser Effekt wurde zur Strahlungsmessung verwendet (Abbildung 1c). Doch eine intensivere Nutzung erfuhr er erst um die Mitte des 20. Jahrhunderts als Infrarot-Sensor. Heute nutzen wir den pyroelektrischen Effekt in Bariumtitanat zur Messung von hohen Laserleistungen oder in Wärmebildkameras aus.



1 Thermische Fotosensoren: A) Bolometer, B) Thermoelement, C) Pyroelektrischer Sensor

Es gibt noch weitere Licht-Sensoren, die auf der Wärmewirkung der Strahlung beruhen. Zum Beispiel entwickelte 1947 Marcel J. E. Golay (1902 – 1989) eine Zelle, in der ein Gas Strahlung absorbiert, sich dadurch erwärmt und ausdehnt [9]. Doch heute verwenden wir in weiten Anwendungsbereichen meist Detektoren, die auf dem inneren oder äußern Fotoeffekt beruhen. Im Folgenden soll davon die Rede sein.

DER ÄUßERE FOTOEFFEKT

1839 entdeckte der erst neunzehnjährige Alexandre Edmond Becquerel (1820 – 1891) bei der Arbeit mit galvanischen Elementen – zwei Metallplatten, die in eine leitende Flüssigkeit getaucht wurden – einen verhältnismäßig starken Effekt [10]: Wird eine der beiden Platten mit Licht bestrahlt, liefert die Anordnung eine elektrische Spannung. Diese ist umso höher, je stärker die Lichteinstrahlung ist. Der Effekt kann also zur Vermessung von Licht verwendet werden.

Becquerel untersuchte die Erscheinung genauer und fand etwas Auffälliges: Der Effekt erweis sich als stark farbabhängig. Die Spannung wurde im Wesentlichen durch den ultravioletten, violetten und blauen Anteil aus dem Spektrum des Lichts hervorgerufen. Bestrahlte man die Platten mit rotem Licht, entstand keine Spannung. Erklären konnte dies niemand. Die Phänomene bleiben rätselhaft. Eine breite Anwendung fand die auf diesen Effekt beruhende Lichtmessung vorerst nicht.

Ein halbes Jahrhundert später bemerkte Heinrich Hertz (1857 – 1894), der Entdecker der Funkwellen, die befördernde Wirkung von ultraviolettem Licht auf die Bildung von elektrischen Funken [11]. Sein Schüler Wilhelm Hallwachs (1859 – 1922) fand 1887 heraus, dass Ultraviolettstrahlung elektrisch geladene Körper entladen kann [12]. Ähnliches musste es sich bei Becquerels Experimenten abspielen. Die Ladungen verlassen offenbar die bestrahlte Metalloberfläche. Wir sprechen deshalb vom »äußeren lichtelektrischen Effekt«.

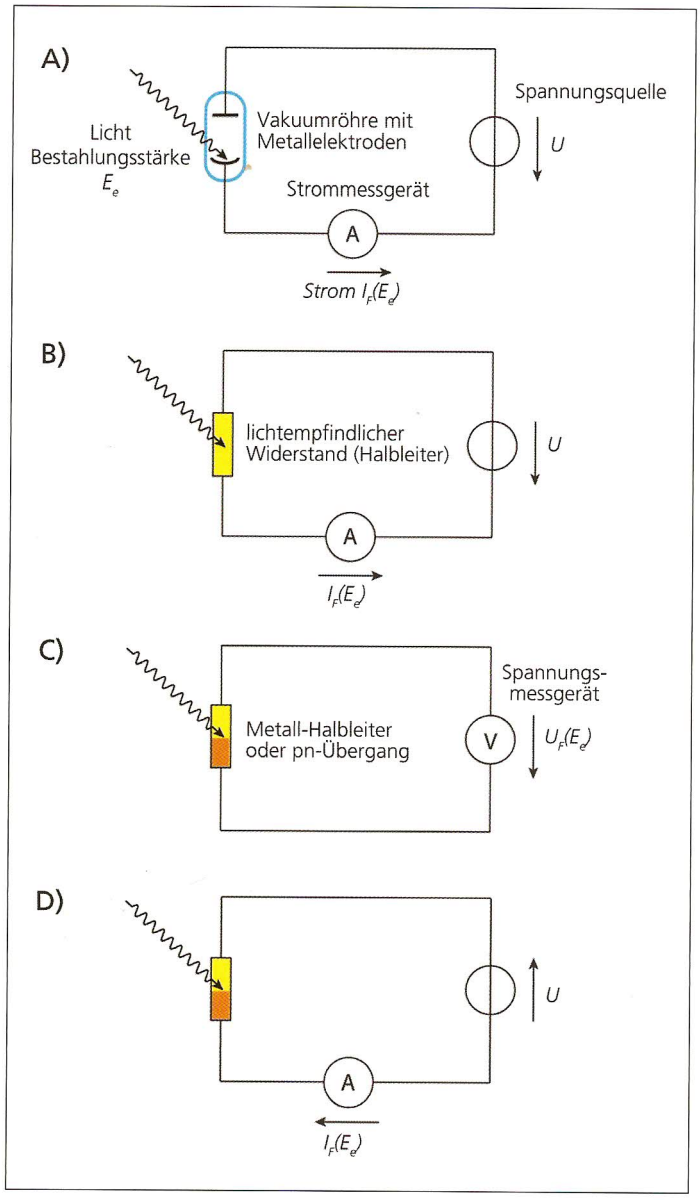
Der Russe Alexander Grigorjewitsch Stoletow (1839 – 1896) konnte als Erster zeigen, dass sich auf Grundlage dieses Effekts ein elektrischer Strom erzeugen ließ, der ein Maß für die auftreffende Intensität des UV-Lichts ist [13].

Die beiden Gymnasiallehrer Julius Elster (1854 – 1920) und Hans Geitel (1855 – 1923) führten diese Untersuchungen weiter und bauten 1892/93 die erste Fotozelle (Abbildung 2a): In einer evakuierten Glasröhre wird eine Metallelektrode mit Licht bestrahlt. Die dabei freigesetzten Ladungen werden über die andere Elektrode durch eine von außen angelegte Spannung abgesaugt, sodass ein Strom fließt. Elster und Geitel konnten durch die Verwendung von Alkalimetallen als Elektrodenmaterial sichtbares Licht vermessen [14].

Trotzdem blieb eine merkwürdige Detektionsgrenze in der Farbe erhalten: Ab einer bestimmten Wellenlänge, die jenseits einer vom Elektrodenmate-

rial abhängigen Grenze lag, funktionierte der Sensor nicht mehr. Erst Albert Einstein (1879 – 1955) konnte 1905 mit der Einführung des Modells der Lichtquanten diese Grenzwellenlänge erklären. 1921 wurde ihm für die damit geglückte Erklärung des fotoelektrischen Effekts der Physik-Nobel-Preis zugesprochen.

Die Fotozelle erwies sich für viele Jahrzehnte als verlässlicher Lichtsensor, der viele Anwendung fand. Die durch das Licht heraus geschlagenen Elektronen konnten zudem durch elektrische und magnetische Felder beschleunigt werden und durch die gewonnene Energie beim Auftreffen auf weitere Elektroden sogenannte Sekundärelektronen generieren. Damit war eine zigtausendfache Verstärkung des Signals möglich. Dies führte in den 1930er Jahren zur Entwicklung des Photomultipliers [15, 16], mit dem schließlich auch einzelne Lichtquanten nachgewiesen werden konnten. Noch heute werden solche Sensoren zur Messung extrem geringer Lichtsingale oder als Einzelphotonenzähler verwendet. Auch in Bildverstärkern werden sie eingesetzt. Jeder einzelne Bildpunkt (Pixel) wird dabei mit einem dünnen Kanal realisiert, in dem die herausgelösten Elektronen durch hohe Spannung beschleunigt werden und damit Elektronenlawinen hervorrufen können.
Vakuumröhren blieben lange Zeit die zuverlässigsten Lichtsensoren. Nahezu zeitlich parallel dazu verlief aber eine Entwicklung, die schließlich zu einem Generationswechsel in der Lichtsensorik führte. Heute arbeiten die meisten Lichtsensoren auf Grundlage des »inneren fotoelektrischen Effekts«. Doch der Weg zur breiten Anwendung erwies sich als außerordentlich schwierig.



2 Sensoren auf Grundlage fotoelektrischer Effekte: A) Fotozelle (äußerer Fotoeffekt), B) Fotowiderstand (innerer Fotoeffekt), C) Fotodiode (Element-Modus), D) Fotodiode (Sensor-Modus)

DER INNERE FOTOEFFEKT

1873 benötigte der englische Elektroingenieur Willoughby Smith (1828 – 1891) zur Vermessung von Untersee-Telegraphenleitungen extrem hohe elektrische Widerstände, die er aus dem schlecht leitenden Selen herstellte. Die Messungen irritierten die Experimentatoren jedoch, da die Widerstandswerte stark schwankten. Die Ursache war zunächst nicht klar, doch Smiths Assistent fiel auf, dass die Ergebnisse davon beeinflusst wurden, wie viel Licht auf das Selen fiel. Der bekannte Wärmeeinfluss konnte ausgeschlossen werden, da der Effekt auch bei wassergekühlten Widerständen auftrat. Schon das schwache Licht einer Kerze genügte, um eine deutliche Widerstandsänderung hervorzurufen [17].
Schon zwei Jahre später verwendete Werner Siemens (1816 – 1892) auf der Grundlage dieses Effekts einen »Fotowiderstand« (Abbildung 2b) als Sensor in einem hochempfindlichen Photometer, mit dem Lichtgrößen quantitativ erfasst werden konnten [18].

Wieder ein Jahr später, 1876, fanden die Engländer William Grylls Adams (1836 – 1915) und Richard Evans Day einen verwandten Effekt [19]. Fällt Licht auf die Grenzfläche zwischen Selen und einem Metallkontakt, wird nicht nur der Widerstand der Anordnung verändert, sondern es entsteht sogar eine elektrische Spannung, die einen Strom hervorrufen kann (Abbildung 2c). Salopp gesprochen: Aus Licht wurde Elektrizität! Die Photovoltaik und damit die erste Solarzelle waren geboren.

Nun mag vielleicht verwundern, weshalb diese beiden bei Selen gefundenen Effekte solange brauchten, bis sie in breitem Umfang in der Technik eingesetzt wurden. Erstaunlicherweise konnten die Beobachtungen nur qualitativ verifiziert werden. Quantitativ stimmte nichts überein. Selbst im gleichen Labor wurden an verschiedenen Proben extrem unterschiedliche Widerstände gemessen. Wurden die Selenproben gar in einem anderen Labor hergestellt, ergaben sich völlig andere Widerstandswerte, die sich um Größenordnungen (!) unterschieden. Die Physiker, Ingenieure und Chemiker waren zunächst ratlos. Es stellte sich schließlich heraus, dass diese extremen Unterschiede auf geringste Verunreinigungen (Konzentrationen von einem Millionstel oder weniger) zurückzuführen waren, die technologisch für Jahrzehnte nicht in den Griff zu bekommen waren. Schon wenn das Selen in einem anderen Gefäß geschmolzen wurde, gelangten durch

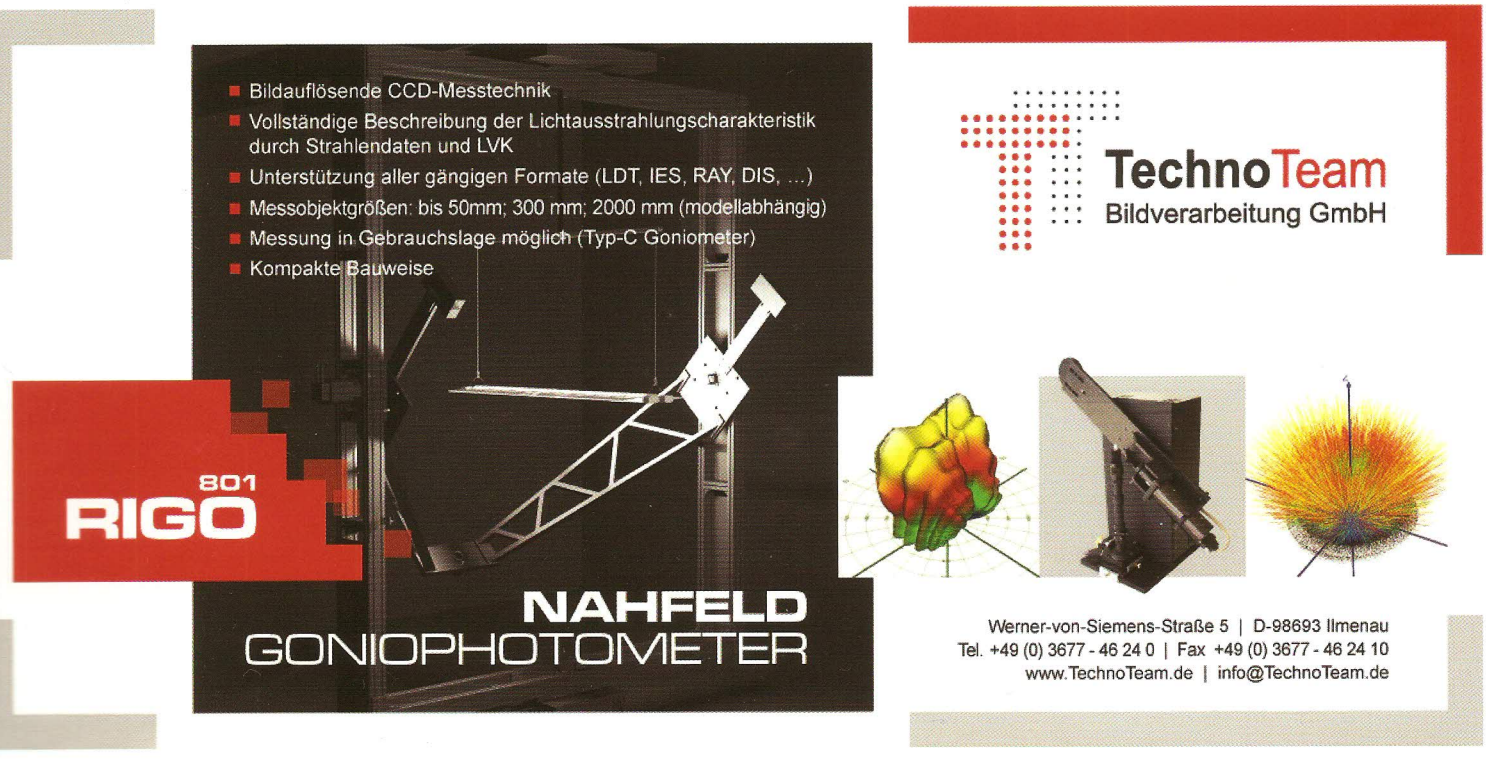
Diffusion Fremdstoffe in das Material, die deren elektrische Eigenschaften massiv veränderten.
Anders verhielt es sich bei den mittlerweile zur Verfügung stehenden Fotozellen. Das Vakuum in den Glasröhren war technologisch gut beherrschbar. Die Messergebnisse ließen sich exakt reproduzieren. Physik und Technik arbeiteten also mit diesen Gerätschaften. Die Röhrentechnik dominierte viele Jahrzehnte. Die »verschmutzten« Kristalle blieben lange Zeit die »vernachlässigten Stiefkinder« der Physik.
Bis in die Mitte der 1920er Jahre hatte man zudem überhaupt keine Ahnung, wie man die Eigenschaften der Kristalle erklären sollte. Man wusste nicht einmal, weshalb manche Stoffe den elektrischen Strom leiten und manche nicht. Die inneren Fotoeffekte, bei denen keine Ladungen ausgelöst, sondern nur die elektrischen Eigenschaften des bestrahlten Materials verändert werden, blieben Rätsel.

Erst mit der Begründung der Quantenmechanik eröffneten sich hier Lösungsmöglichkeiten: 1926 untersuchte Felix Bloch (1905 – 1983) in seiner Dissertation in Leipzig das Verhalten von Elektronen in Kristallen. Er entwickelte dabei ein Modell, in dem sich Elektronen nur in bestimmten Energiebereichen – sogenannten Bändern – aufhalten können [20]. Damit konnten in den folgenden Jahren die Effekte erklärt werden. Insbesondere Walter Schottky (1886 – 1976) lieferte wichtige Beiträge zum Verständnis, was sich an der Grenzfläche zwischen Materialien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit abspielt [21].
Mittlerweile war auch die Technologie in der Herstellung von Halbleitern (also Stoffen, die nur unter bestimmten Bedingungen den Strom leiten) weiter vorgeschritten. So konnte Schottky 1930 auf der Deutschen Physikertagung eine Selen-Solarzelle demonstrieren, die genug Elektroenergie lieferte, um einen kleinen Elektromotor anzutreiben. 1932 wurden für Fotografen die ersten kommerziell verfügbaren Belichtungsmesser auf Selen-Basis in den USA vorgestellt.

Doch Selen blieb nicht der einzige Halbleiter, der auf Licht reagiert. Mittlerweile waren auch Silicium und Germanium ins Blickfeld des Interesses gerückt. 1940 untersuchte der amerikanische Ingenieur Russell Ohl (1898 – 1987) von den berühmten Bell Labs reines Silicium und beobachtete einen photovoltaischen Effekt, der um vieles stärker war als der bei Selen gemessene [22]. Es stellte sich heraus, dass es im Silicium durch Diffusion hervorgerufene Bereiche gab, in denen Atome entweder Elektronen abgeben oder aufnehmen konnten. An der Grenzfläche zwischen diesen Bereichen, dem später sogenannten pn-Übergang, stellten sich Bedingungen ein, die denen eines Metall-Halbleiter-Kontaktes recht ähnlich waren. Im wahrsten Sinn des Wortes erblickte damit die Fotodiode das Licht der Welt – sie wird heute als Standard-Lichtsensor verwendet (Bild 2d).

In den 1950er Jahren kamen die ersten kommerziellen Halbleiterfotodioden auf den Markt. Durch die Verwendung verschiedener Halbleitermaterialien konnte der detektierbare Spektralbereich weit ins Infrarote und Ultraviolette ausgedehnt werden. Wie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Röhrenelektronik gegenüber der Transistortechnik zusehends an Boden verlor, so verlief auch die Entwicklung in der Lichtsensorik. Heute messen wir fast ausschließlich mit Halbleitersensoren. Dabei werden nicht nur die »klassischen« Anwendungsgebiete in der fotometrischen oder radiometrischen Messung abgedeckt. Halbleiterkristalle werden zum Beispiel zu CCD-Chips strukturiert und in Digitalkameras als Bildsensor verwendet. Auch Untersuchungen einzelner Photonen und ihre Wechselwirkung mit Atomen sind möglich. Hierbei stoßen die Wissenschaftler an die Grenzen ihrer Modelle von Licht und Materie, da die herkömmlichen bildhaften Vorstellungen in der Nanowelt versagen. Licht erweist sich damit als Vermittler zwischen dem, was wir sehen und dem, was wir nicht sehen können.

Vielleicht wäre Goethe durch diese Grenzgänge in die Tiefen der Materie und in die Weiten des Weltalls wieder versöhnt. Er sähe, dass wir zwar



Effekt	Beschreibung	Aktuelle Anwendung
innerer fotoelektrischer Effekt	Bei Bestrahlungen mit Licht fällt der elektrische Widerstand von Halbleitern. An Grenzflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Leitfähigkeit entstehe eine Spannung.	• Fotodiode als universeller Lichtsensor in Photometern, Belichtungsmessern, Spektrometern, Systemen der optischen Kommunikation usw. • Fotodiode mit interner Verstärkung: Avalanche-Diode zur Aufnahme schwacher Signale oder Einzelphotonenzählung • Diode ohne Vorspannung: Solarzelle • CCD-Bildsensor in Kameras • Fototransistor • Fotowiderstand
äußerer fotoelektrischer Effekt	Emmission von Elektronen aus einer Metallplatte bei Bestrahlung mit Licht	• Photomultiplier zur Aufnahme schwacher Lichtsignale oder Einzelphotonenzählung • Bildverstärker in Mikrokanalplatten • Vakuum-Fotozelle (nur noch für Spezialanwendungen, z.B. UV-Messtechnik) • Bildaufnahmeröhre (veraltet)
Widerstandsänderung bei Temperaturvariation	Licht erwärmt elektrischen Leiter, dessen Widerstand sich dadurch erhöht	• Bolometer (inbesondere für IR-Strahlung) • 2D-Bolometerarrays in Wärmebildkameras
Thermoelektrischer (Seebeck-)Effekt	durch Lichteinstrahlung verursachte Temperaturdifferenz an Lötstellen zweier Metalle erzeugt Spannung	• Thermosäule in Laserleistungsmessgeräten • Sensor in Pyrometern zur Temperaturerfassung • Sensor in Pyranometern zur Messung der aus einem Halbraum eintreffenden Strahlung • Sensor in Pyrheliometern zur Messung der direkten Bestrahlungsstärke aus Sonnenrichtung
pyroelektrischer Effekt	durch Lichteinstrahlung verursachte Temperaturänderung verursacht Spannung an bestimmten Kristallen	• Messkopf von Laserleistungsmessgeräten • Sensor zur IR-Detektion, z.B. als Bewegungsmelder • 2D-Arrays in Wärmebildkameras
Lichtabsorption in Gasen	Absorption von Licht in Gasen führt zu Temperaturerhöhung und Volumenvergrößerung	• Golay-Zelle zur Detektion im Spektralbereich IR bis Terahertz

Tabelle 1: Überblick optischer Sensoren (inklusive Infrarot- und Ultraviolettstrahlung)

nicht auf »künstliche Instrumente« verzichten können. Doch es bedarf immer noch des Menschen, diese Messungen zu interpretieren und zu nutzen und Rätsel zu lösen. Das betrifft auch – und vor allem – die Untersuchungen zum Licht.

LITERATUR

[1] H. C. Oerstedt, Zur Entdeckung des Elektromagnetismus, Ostwalds Klassiker Nr. 63 (Leipzig 1895)

[2] J. H. Lambert, Photometria sive de mensure et gradibus luminis colorum et umbra (Basel 1760)

[3] G. S. Ohm, Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet (Berlin 1827)

[4] D. Humphry, Philosophical Transactions oft the Royal Society 111 (1821), 425-439

[5] S. P. Langley, ‚Bolometer', The Meterorological Society (New York 1881)

[6] O. Lummer und E. Pringsheim, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2 (1900), 163 – 180

[7] T. J. Seebeck, Annalen der Physik 82 (1826), 253 – 286

[8] D. Brewster, The Edinburgh Journal of Science 1 (1824), 208 – 215

[9] M. J. E. Golay, The Review of Scientific Instruments 18 (1947), 347 – 356

[10] E. Becquerel, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 9 (1839), 561 – 567

[11] H. Hertz, Annalen der Physik und Chemie 267 (1887), 983 – 1000

[12] W. Hallwachs, Annalen der Physik und Chemie 269 (1888), 301 – 312

[13] M.A. Stoletow, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 107 (1888), 91 – 92.

[14] J. Elster, H. Geitel, Annalen der Physik und Chemie 284 (1893), 625...

[15] V. K. Zworikyn, G. A. Morton und L. Malter, Proceedings of the Institute of Radio Engineers 24 (1936), 351 – 375

[16] L. A. Kubetsky, Proceedings of the Institute of Radio Engineers 25 (1937), 351 – 375

[17] W. Smith, Nature 173 (1873), 303

[18] W. Siemens, Dingler's Polytechnisches Journal 217 (1875), 61 – 63

[19] W. G. Adams und R. E. Day, Proceedings of the Royal Society 25 (1876), 113 – 117

[20] F. Bloch, Zeitschrift für Physik 52 (1929), 555 – 600

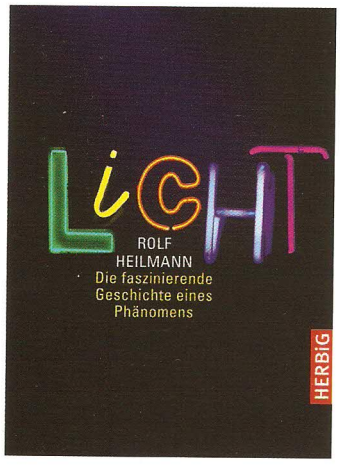
[21] W. Schottky, Zeitschrift für Physik 113 (1939), 367 – 414

[22] R. S. Ohl, US Patent 2402662 (eingetragen 1941)

Autor: Prof. Dr. Rolf Heilmann, Hochschule München, Fakultät für angewandte Naturwissenschaft und Mechatronik

BUCHTIPP

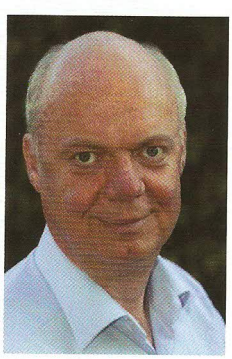
VOM URKNALL BIS ZUR PHOTONIK



Licht – Die faszinierende Geschichte eines Phänomens
Rolf Heilmann
1. Auflage 2013, Herbig Verlag
256 Seiten mit 20 Grafiken,
22 x 14,2 x 2,8 cm
ISBN: 978-3-7766-2711-4
19,99 € (D) / 20,60 € (A) / 9,90 CHF

Was ist es, wie verhält es sich und wozu kann man es nutzen? Schon früh begannen die Menschen, sich Gedanken über das Licht zu machen. Während Denker der Antike nach den Gesetzen der Brechung und Reflexion von Strahlen suchten, begann man im Mittelalter, optische Lesesteine als Sehhilfen zu konstruieren. Jagten manche Wissenschaftler der Neuzeit das Licht durch Raum und Zeit und sinnierten über seinen Charakter als Welle, Teilchen oder Quant, tüftelten andere eifrig an Glühlampen, Laser, LED-Leuchten und Digitalkameras.

In seinem Buch »Licht – Die faszinierende Geschichte eines Phänomens« lädt Physikprofessor Rolf Heilmann ein zu einer Zeitreise durch die Welt der Optik, Farben und Strahlen und verrät, wie Licht seit jeher den Fortschritt der Menschheit beflügelt. Klug, informativ und unterhaltsam beschreibt Rolf Heilmann die Meilensteine in der Geschichte der Lichtforschung. Der Themenreigen spannt sich von Ptolemäus und der Lichtbrechung über Herschel und das unsichtbare Infrarot, bis zu Einstein und den Lichtquanten. Edison, Hertz, Maiman – alle sind sie dabei und auch einen Blick in die Zukunft der Lichtanwendung wirft der Leser bei der Lektüre des Buches.

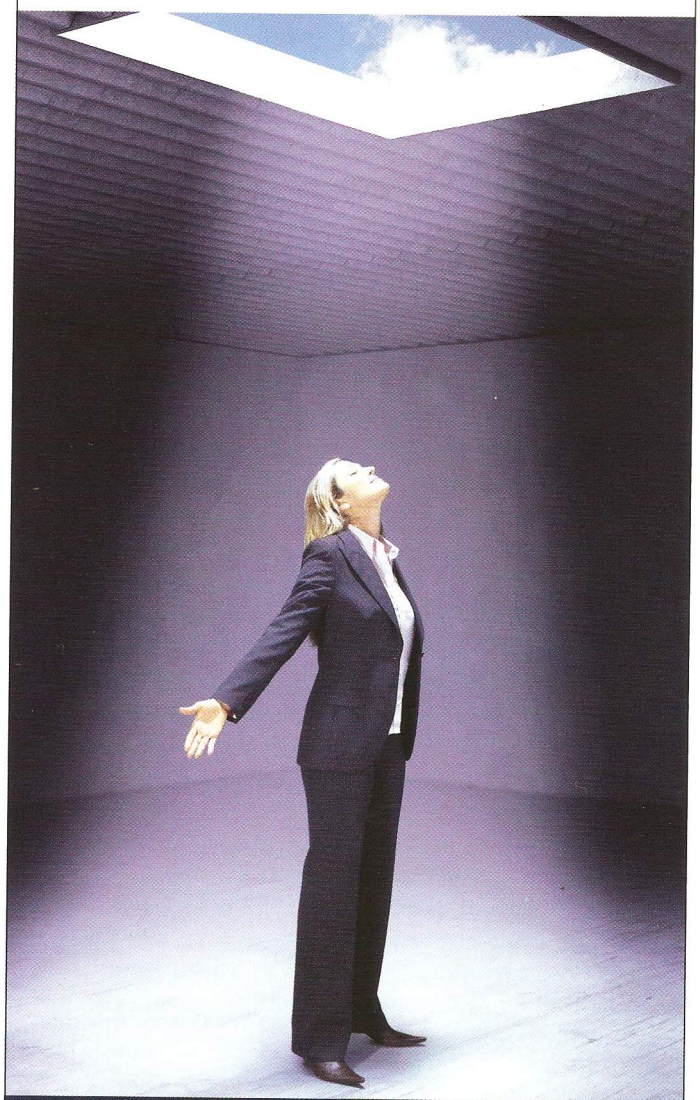


Zum Autor

Prof. Dr. Rolf Heilmann, Jahrgang 1960, studierte Physik an der Universität Leipzig. Er forschte über die Wechselwirkung von Licht mit Kristallen und entwickelte Laser für die Luft- und Raumfahrt. Heute lehrt er an der Hochschule für angewandte Wissenschaften, München, Physik und Photonik und hält populärwissenschaftliche Vorträge und Vorlesungen im Rahmen der Kinder-Uni. Er lebt mit seiner Familie in der Nähe von München.

ESSMANN
LICHT LUFT SICHERHEIT

Und der Tag wird erfolgreich.
Mit Tageslichtsystemen von ESSMANN.



ESSMANN Tageslichtsysteme:
Licht, wo es gebraucht wird.

Fast wie „draußen" arbeiten. ESSMANN Tageslichtsysteme holen natürliches Sonnenlicht in jeden Raum. Natürliches Licht steigert nachweislich die Produktivität und senkt zudem Ihre Energiekosten. ESSMANN Lichtkuppeln und Lichtbänder, seit Jahren bewährt auf den Flachdächern Europas.

Weitere Informationen finden Sie unter:
www.essmann.de

2013
16 – 23 October
Düsseldorf, Germany
makes the difference
Halle 11 • Stand E03

Ein Unternehmen der **ESSMANN GROUP**.