

## ELEKTRISCHES LICHT WEGBEREITER DES INDUSTRIE- UND INFORMATIONSZEITALTERS

Werner Späth

OSRAM Opto-Semiconductors, Abteilung Innovations Management

Elektrisches Licht ist in unserem modernen Zeitalter so etwas Selbstverständliches, dass man sich wenig Gedanken darüber macht, welch grosse wirtschaftliche Bedeutung im allgemeinen und welch grossen Einfluss auf das Leben und die Lebensqualität des Einzelnen dieses künstliche Licht hat. Künstliche elektrische Lichtquellen haben beginnend mit den thermischen Strahlern (Plancksche Strahler) im 19. Jahrhundert über die Gasentladung bis zu den heutigen Festkörperlichtquellen entscheidend zum technischen Fortschritt im vorigen Jahrhundert beigetragen und werden in diesem eine noch weitaus wichtigere Rolle spielen. Heute werden in Deutschland etwa 8% der elektrischen Energie, das entspricht etwa 40 Mrd kWh pro Jahr, für die Erzeugung von elektrischem Licht verwendet.

### 1. Licht

Wenn man von Licht spricht, dann meint man den Teil des elektromagnetischen Spektrums, den das menschliche Auge wahrnehmen kann. Vom anderen, dem weitaus grösseren, spricht man von Strahlung. Häufig hält man sich nicht so genau an diese Definition, so dass man z.B. auch Röntgen-, UV- oder IR- Strahlung Licht nennt. Der Strahlungsfluss wird in Watt gemessen und der Lichtstrom in Lumen. Der spektrale Empfindlichkeitsverlauf des menschlichen Auges reicht von etwa 400 nm bis 700 nm und hat bei 555 nm seinen Maximalwert. Dieser ist auf 1 normiert und hat den Absolutwert 683 Lumen/Watt (lm/W). Für weisses Tageslicht, das aus spektralem Mischlicht besteht, liegt die physikalische Grenze für die Lichtausbeute bei 199 lm/W.

Die Beleuchtungsstärke wird in Lux (lx) angegeben ( $1\text{lx} = 1\text{ lm/m}^2$ ). Die natürliche Beleuchtungsstärke reicht von 100 000 Lux bei Sonnenschein im Sommer bis zu einigen Millilux bei Sternenlicht.

### 2. Glühlampe

1879 hat Edison die Kohlefadenlampe erfunden und damit eine neue Ära der Lichterzeugung eingeläutet. Obwohl sie nur geringfügig heller als die damals üblichen Gaslampen war – diese hatten durch die Erfindung des Glühstrumpfes durch Auer von Welsbach eben einen grossen Sprung nach vorne getan –, war der Siegeszug des elektrischen Lichtes nicht mehr aufzuhalten. Dies lag zum einen daran, dass elektrischer Strom im Vergleich zu Gas leicht zu vertei-

len und zu handhaben war, wegen der Abwesenheit von brennbaren Gasen niedriges Feuer- und Unfallrisiko in sich barg und während der Lichterzeugung kein Sauerstoff verbraucht und keine Abgase generiert wurden, was speziell in geschlossenen Räumen das Wohlbefinden des Menschen beeinträchtigt, und zum anderen daran, dass die Lichtausbeute von anfänglichen 1,5 lm/W durch die Verwendung von Wolframglühfäden anstelle von Kohlefäden relativ schnell über 10 lm/W bis auf maximal 15 lm/W gesteigert und die Herstellkosten der Glühlampe in kurzer Zeit deutlich abgesenkt werden konnten. **Mit der Erfindung der Glühlampe wurde gleichsam das Feuer für die Lichterzeugung domestiziert.**

Die Steigerung der Lichtausbeute stagnierte über viele Jahre, da der Wolframdraht, die thermische Lichtquelle, nicht über 3000°C erhitzt werden konnte und Materialien, die bei höheren Temperaturen betrieben werden konnten, nicht gefunden wurden. Dies bedeutete, dass der Wirkungsgrad bei vernünftigen Lebensdauern der Lampen (ca. 1000 h) nicht wesentlich über 6%-8% hinaus gesteigert werden konnte. Erst in den fünfziger Jahren gelang es durch Zusatz von Halogenen in das Schutzgas die Lichtausbeute um mehr als 50% zu steigern und die Lebensdauer der Lampen zu verdoppeln. Die Halogene binden das abdampfende Wolfram und führen es über eine Transportreaktion der Wendel wieder zu und erhöhen dadurch deren Lebensdauer. Sie verhindern gleichzeitig den Niederschlag von Wolfram auf den „kalten“ Glaswänden und die daraus resultierende Absorption des Lichtes. Halogenlampen brauchen daher nur einen wesentlich kleineren Glaskörper. Das geringere Lampenvolumen macht die Füllung mit teuren Edelgasen wirtschaftlich möglich, welche wiederum eine deutliche Verbesserung der Lampenparameter mit sich bringt.

Mit einem dielektrischen Bandfilter auf der Innenseite des Glaskörpers, das den sichtbaren Anteil an der erzeugten Strahlung durchlässt und den hohen IR-Anteil zur Wendel zurückreflektiert, also recycelt, konnte eine weitere Effizienzsteigerung um 30% erreicht werden. Die grosstechnische Umsetzung dieser Technologie war eine enorme Herausforderung für Ingenieure und Techniker.

Die Halogenlampe hat sich wegen ihrer hohen Effizienz, ihrer guten Farbwiedergabe und Kompaktheit eine breite Anwendung in der Allgemeinbeleuchtung erobert.

### 3. Gasentladung

Feuer und Blitz haftete in der Mythologie immer etwas Göttliches an. In der griechischen Mythologie hat Prometheus den Menschen das Feuer gebracht und ist dafür schwer bestraft worden. Für den Blitz war der Göttervater Zeus, der Blitzeschleuderer mit Beinamen, selbst zuständig. Der leuchtende Blitz faszinierte und machte Angst zugleich.

Letztere war aber mit Sicherheit nicht der Grund, warum es relativ lange gedauert hat, bis man die Gasentladung, **den domestizierten Blitz also**, im grossen Stil für die Lichterzeugung

nutzten konnte. Denn bereits um 1750 – also mehr als 100 Jahre vor der Erfindung der Glühlampe – konnte man in wissenschaftlichen Zirkeln Gasentladungslampen bestaunen (1). Es fehlten jedoch zu jener Zeit einfach die geeigneten Strom- bzw. Spannungsquellen zum Betrieb der Lampen, die eine Weiterentwicklung begünstigt und sinnvoll gemacht hätten.

Der an Luft frei brennende Kohlelichtbogen wurde schon relativ früh neben der Glühlampe zur Lichterzeugung eingesetzt. Die Wartung und Sicherheitsvorkehrungen für diese Lichtquelle waren jedoch sehr aufwendig, so dass sie keine breite Anwendung und Weiterentwicklung fand.

Erst ab Anfang der dreissiger Jahre wurde intensiv an der **Niederdruckgasentladung in Verbindung mit Leuchtstoffen** (Phosphore) zur Lichterzeugung gearbeitet. Wirtschaftliche Bedeutung erlangte sie in Europa aber erst nach dem 2. Weltkrieg. In einer Quecksilbergasentladung wird etwa 70% der elektrischen Energie in optische Energie umgewandelt und zwar in Strahlung von 254 nm und 185 nm Wellenlänge. Die Photonen dieser Wellenlänge werden mittels Leuchtstoffe auf dem Glaskörper in Photonen des sichtbaren Spektrums umgewandelt. Die Energiedifferenz, d.h. mehr als die Hälfte der Energie, wird in Wärme umgewandelt und ist für die Lichterzeugung verloren. Den Wirkungsgrad einer Lampe bestimmen in hohem Mass die verwendeten Leuchtstoffe. Mit Silikatleuchtstoffen wurden bereits 1940 40 lm/W erreicht. Heute werden dank der Leuchtstoffe aus Seltenen Erden und elektronischen Vorschaltgeräten Lichtausbeuten bei Leuchtstofflampen von 75-90 lm/W erreicht. Gelänge es, Leuchtstoffe zu entwickeln, die statt ein Photon zwei Photonen im sichtbaren Spektralbereich aus einem kurzwelligeren Photon machten – energetisch ist dies möglich – so führte das zu einem Wirkungsgrad an die 60%.

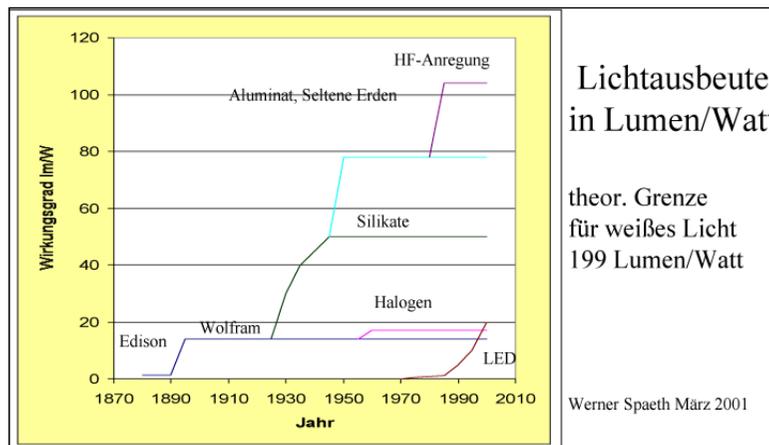


Abbildung 1: Entwicklung der Lichtsteigerung

Neben der Niederdruckgasentladung wird in grossem Umfang die **Hochdruckgasentladung** zur Erzeugung von Licht eingesetzt. Als Füllgas werden z.B. Metallhalide wie Scandiumiodid, Natriumiodid und Iodide der Seltenen Erden verwendet. Diese Lampen sind sehr kompakt, erreichen knapp 60 lm/W, also etwa den Faktor 5 im Vergleich zu einer Standardglühlampe, emittieren im Wesentlichen im sichtbaren Spektralbereich und erreichen Lebensdauern von über 6000 h. Diese Lampen haben einen sehr kleinen Leuchtfleck und können daher mittels reflektiven oder/und transmissiven Optiken gut kollimiert oder fokussiert werden. Sie werden heute in der Allgemeinbeleuchtung, mit grossem Vorteil im Autoscheinwerfer – bessere Strahlqualität bei geringerem Energieverbrauch –, in Projektoren und in vielen anderen technischen Geräten eingesetzt (2).

#### 4. Halbleiterlichtquellen

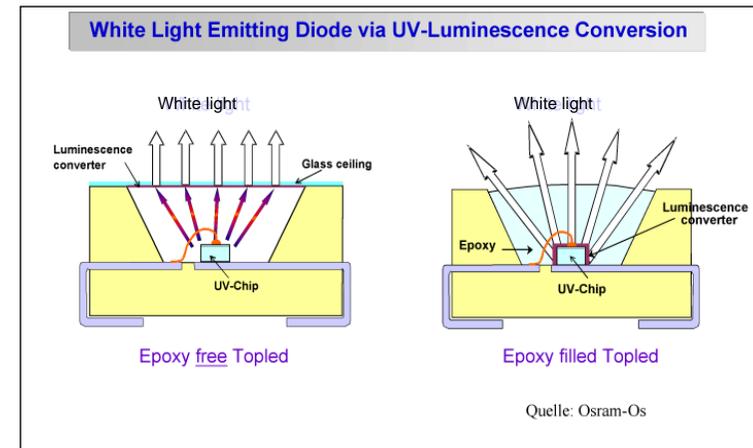


Abbildung 2: Lichtsteigerung bei Halbleiterlichtquellen

Luminiszenzdioden (LED) sind Halbleiterdioden aus sog. III-V-Halbleitern, wie den binären Halbleitern GaAs, GaP, den ternären und quaternären Halbleitern GaAsP, GaAlAs, InGaAlP usw.. Diese wurden bereits 1952 von Welker in den Forschungslaboratorien von Siemens in Erlangen erfunden. Es dauerte allerdings bis Anfang der 70-iger Jahre des vorigen Jahrhunderts, bis nennenswerte Lichtausbeuten mit solchen Halbleiterdioden erzielt wurden. Der ternäre Halbleiter GaAsP und der binäre Halbleiter GaP:N waren die ersten Halbleitersysteme, mit denen rot und gelbgrün leuchtende LED hergestellt werden konnten. Die im Infraroten strahlenden GaAs-Dioden gab es bereits Ende der 60-iger Jahre mit Wirkungsgraden deutlich über 10%. Sie fanden Anwendung in Lichtschranken, Optokopplern und ab Mitte der 70-iger Jahre in der Infrarotfernsteuerung (TV Remote), die ihren Ursprung in Deutschland hatte und sich weltweit durchsetzte.

Die LED haben in den letzten Jahren in der Lichtausbeute dank moderner Epitaxieverfahren und Chiptechnologie einen enormen Sprung nach vorne gemacht. Technologischer Treiber war der Halbleiterlaser, eine Schlüsselkomponente der optischen Datenspeicherung und Datenübertragung. Mit dem GaN ist ein neues Halbleitermaterial hinzugekommen, mit dem man effizient blau- und grünleuchtende LED herstellen kann. In Europa wurden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an diesem Material Ende der 70-iger Jahre aufgegeben, weil man keine Möglichkeit sah, GaN p-leitend zu dotieren und somit eine pn-Diode mit diesem Material zu machen. In Japan wurden die Arbeiten jedoch weitergeführt und Amano und Asaki (3) gelang es dann 1989 einen p/n-Übergang in GaN herzustellen. Die ersten effizienten InGaN-blauleuchtenden LED wurden 1994 und 1995 von Nakamura (4) bei Nichia Chemical demonstriert.

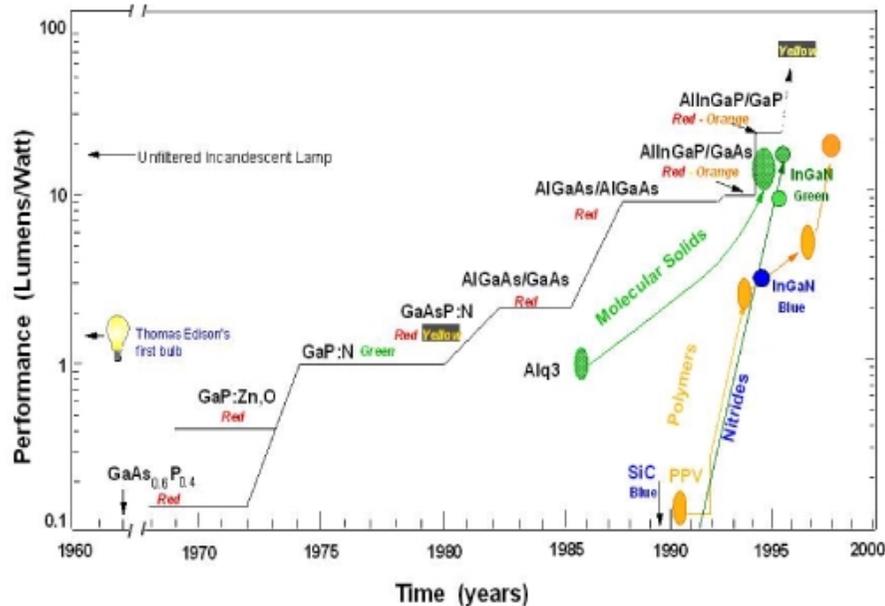


Abbildung 3: Rapid Advancement in Cutting Edge Technology

Mit den Materialsystemen InGaAlP auf GaAs- und InGaN auf SiC- oder Saphirsubstrat ist man in der Lage hocheffiziente LED herzustellen, die das gesamte sichtbare Spektrum vom Violett-blau bis hin zu Rot abdecken.

LED haben mittlerweile eine breite Anwendung gefunden. Bis zu 300 LED sind heute z.B. in einem Auto. Sie werden dort als Signallämpchen, als Hinterleuchtung für LCD oder als drittes Bremslicht verwendet. Die LED hilft Platz, Energie und Kosten sparen. Auch das Handy kommt nicht mehr ohne LED-Hinterleuchtung aus. Vollfarbige Grossdisplays und Verkehrsinformationssysteme nutzen die LED als Lichtquelle.

Für eine Reihe von Anwendungen ist eine weisse LED von grossem Interesse. Dies sind Anwendungen, bei denen alle Vorteile der LED, wie hohe Lebensdauer, mechanische Stabilität, geringe Grösse und Gewicht, Dimm- und Modulierbarkeit, einfache Montage auf Leiterplatte ähnlich einem Si-Standardhalbleiterbauteil und damit einfache Verteilung der verschieden farbigen Lichtquellen über eine Fläche. Um Weisslicht zu erzeugen, regt man in einer LED mit einer blau leuchtenden Diode einen Leuchtstoff zur Gelbemission an. Durch geeignete Mischung des blauen Primärlichtes der Diode und der Gelbemission des Farbstoffes, die im Wesentlichen durch die Konzentration des Leuchtstoffes im Gießharz bestimmt wird, kann man Weisslicht allerdings wegen des Fehlens des Rotanteils mit einer sehr hohen Farbtemperatur von 6000 K erzeugen. Man erreicht heute Lichtausbeuten bei 20 mA Betriebsstrom von etwa 20 lm/W. Werte in der Grössenordnung von 50 lm/W scheinen in absehbarer Zeit möglich.

## 5. Organische LED

Leuchtdioden aus organischen Materialien werden künftig sehr flache Lichtquellen ermöglichen. Die Entwicklung befindet sich derzeit noch am Beginn der industriellen Lernkurve. Die Lichtausbeute für farbige Ausführungen erreicht heute etwa 25-30 lm/W (weiss <10 lm/W). Sie wird derzeit durch Displayanwendungen getrieben. Für die Zukunft sehr interessant ist der Einsatz grossflächiger lichtemittierender Folien als Raumlichtquellen, die auch in gekrümmten Flächen verlegt werden können. Zur Erreichung dieses Zieles sind allerdings noch erhebliche Entwicklungsarbeiten bei den funktionalen Schichten und beim Packaging notwendig und Fragen zur Langzeitstabilität zu klären.

## 6. Licht in der Informations- und Kommunikationstechnik

Dass Licht mehr kann als die Dunkelheit vertreiben, erleben wir heute in der Informations- und Kommunikationstechnik

Mit Licht kommunizieren ist keine Erfindung unserer Zeit. Schon seit alters her nutzt der Mensch Licht als Kommunikationsmittel. Mit Rauch-, Feuer- und Flaggenzeichen konnten grosse Entfernungen schnell überwunden werden. Der Fall Trojas z.B. wurde mit Feuerzeichen nach Griechenland übermittelt (5). Die Griechen konnten später mit einem ausgetüftelten Code das ganze Alphabet optisch übertragen (6). Diese Technik wurde von den Römern

nicht genutzt und geriet in Vergessenheit. Erst der französische Abbé Claude Chappe hat in der Neuzeit (1791-1792) (7) wieder ein optisches Übertragungsverfahren vorgeschlagen, nämlich den Balkentelegraphen, dessen strategische Bedeutung Napoleon schnell erkannte und daher dessen Ausbau forcierte.

Aber all diesen Verfahren haftete der grosse Nachteil an, dass der relativ "langsame" Mensch direkt als Sender und Empfänger wirkte und die Atmosphäre als Übertragungsmedium diente, dessen Transparenz vom Wetter abhängt. Dies war auch der Grund, warum sich elektrische Übertragungsverfahren früher durchgesetzt haben als optische, obwohl der Mensch naturgemäß mit dem Licht mehr vertraut war als mit Elektrizität und Radiowellen. Erst durch Erfindung bzw. Entwicklung von **Optoelektronischen Sende- und Empfängerbauelementen**, insbesondere die des **Halbleiterlasers** und von **Glasfasern mit geringer Dämpfung und Dispersion** als Übertragungsmedium wurde das Tor für die **Kommunikation mit Licht** aufgestossen. Damit verfügt man über die drei Grundkomponenten für eine optische Datenübertragung. Eine zentrale Bedeutung für die Kommunikation mit Licht kommt dem Laser zu; denn er ist nicht nur Schlüsselkomponente für die optische Datenübertragung und die optische Datenspeicherung (CD = Compact Disk und DVD = Digital Versatile Disk), sondern wird künftig auch in der Visualisierung von Daten, also in der Displaytechnik, eine wichtige Rolle als Lichtquelle hoher Strahlqualität spielen.

## 6.1 Optische Datenübertragung

Die Datenübertragung ist heute schon in grossem Umfang eine Domäne des Lichtes, also der Lichtquanten bzw. Photonen sein. Photonen lassen sich praktisch nicht wie die Elektronen von Störfeldern beeinflussen und treten praktisch nicht in Wechselwirkung. Diese Eigenschaften machen sie zu idealen Datentransporteurern.

Photonen transportieren schon heute mehr als 90% der Datenmengen über das Glasfasernetz in Deutschland. Ähnlich hoch ist dieser Anteil auch in den anderen Industrieländern. Diese Datenmengen werden in den nächsten Jahren allein durch den Internetverkehr exponentiell ansteigen. Der Telefonverkehr wird dann in etwa 10 Jahren nur noch 5% des gesamten Datenverkehrs ausmachen. Heute liegen beide bei etwa bei 40 Tausend Terabyte pro Monat. Der Transport dieser Datenmengen ist praktisch nur noch mit optischen Übertragungstechniken zu bewältigen. Die Standardglasfaser ist mit 30 Mio km der meistverlegte Lichtwellenleiter weltweit. Es handelt sich hier um eine singlemodige Stufenindexfaser mit einem äusseren Durchmesser von 125  $\mu\text{m}$  und einem Kern von 9  $\mu\text{m}$  und einer numerischen Apertur von 0,1, das etwa einem Akzeptanzwinkel der Faserr von  $6^\circ$  entspricht. Strahlen mit einem grösseren Divergenzwinkel werden in der Faser nicht mehr geführt und leisten damit keinen Beitrag zum Übertragungssignal. Es war viel Entwicklungsarbeit notwendig, um eine effiziente und vor allen Dingen stabile Kopplung zwischen Laser und Faser im Temperaturbereich von  $-40^\circ$  und  $+85^\circ$  C zu erreichen. Lateralverschiebungen zwischen Laser und Faser von we-

niger als einem Mikrometer führen in der Regel schon zu deutlichen Koppelverlusten. Daher gibt es noch eine Reihe anderer Fasertypen, wie die multimodige Gradienten- und Stufenindexfaser, die wesentlich toleranter bezüglich der optischen Kopplung sind, weil deren numerische Apertur und deren Kern um ein Vielfaches grösser sind als bei der Standardfaser (bei Plastikfasern z.B. bis zu einem Faktor 100 grösserer Kerndurchmesser). Diesen Vorteil bezahlt man allerdings mit deutlich schlechteren Übertragungseigenschaften, was aber bei kurzen Übertragungsstrecken und niedrigeren Bitraten in der Regel keine Rolle spielt.

In einem guten Übertragungssystem reichen in der Regel 1000 Photonen (Energieinhalt weniger als 1000 eV) pro Bit am Empfänger aus, um Daten mit einer Fehlerrate (Biterrorrate = BER) von 1 Fehler pro 1 Milliarde Bits übertragen zu können. Bei einem idealen Empfänger würden bereits 10 Photonen für diese Übertragungsqualität, die Standardqualität in unseren Festnetzen, ausreichen. Wie viel Photonen pro Bit am Anfang einer Übertragungsstrecke nun wirklich auf die Reise geschickt werden müssen, hängt von den Verlusten auf der Strecke ab. Diese werden mit dem Dämpfungskoeffizienten angegeben. Er beträgt für Licht von einer Wellenlänge von 1300 nm etwa 0,3 dB/km und für Licht von einer Wellenlänge von 1550 nm etwa 0,16 dB/km. Das bedeutet, dass bei 1550 nm das in die Faser eingekoppelte Licht nach 100 km noch 2,5% der Anfangsintensität hat. Für ein Bit sind also 40 Tausend Photonen am Fasereingang einzukoppeln, damit die 1000 erforderlichen Photonen am Empfänger ankommen. Das Verhältnis der Intensität am Eingang zur Intensität am Ausgang der Faser ist vergleichbar dem Verhältnis Beleuchtung durch die Mittagssonne im Sommer zu einer elektrischen Raumbeleuchtung. Bei normalem Fensterglas wird diese Intensitätsabnahme bereits bei einigen Metern Glasdicke erreicht. Daraus kann man ermesen, welche Reinheit und Perfektion die Glasfaser haben muss, um diese niedrigen Dämpfungswerte zu erreichen. Die Glasfaser, die im wesentlichen aus Quarz, also Silizium und Sauerstoff besteht, den in der Erdkruste am häufigsten vorkommenden Elementen, hat sehr stark von der Herstellung des Siliziums, dem Substratmaterial für die Mikroelektronikbauelemente (den "Chips") profitiert. Diese Technik hat übrigens ihren Ursprung in Deutschland.

Die einzelnen Bits werden in Form von Lichtimpulsen einer definierten Höhe und zeitlichen Halbwertsbreite in die Faser eingespeist. Deren Höhe und damit deren Energieinhalt nimmt aufgrund der Dämpfung über die Streckenlänge ab, wie oben dargelegt wurde. Deren Breite dagegen nimmt je nach Schwerpunktswellenlänge und spektraler Breite des Lichtimpulses aufgrund der Dispersion zu, so dass nach einer bestimmten Strecke die einzelnen Pulse ineinander laufen und vom Empfänger nicht mehr als Einzelimpulse erkannt werden. Man spricht dann von Dispersionsbegrenzung. Für die Standardfaser beträgt die Dispersion bei 1300 nm etwa 1 ps/km-nm und bei 1550 nm 17 ps/km-nm. Um die geringere Dämpfung bei 1550 nm auch bei sehr hohen Bitraten nutzen zu können, verwendet man daher als Lichtquelle Halbleiterlaser mit sehr schmalen Spektrum ( $< 1\text{nm}$ ). Mit Solitonen- das sind Photonenpakete, die über nichtlineare Wechselwirkung mit dem Übertragungsmedium, der Faser also, als Paket zusammengehalten werden, hat man rein optische Übertragungsstrecken von mehr als 10000 km realisiert. Die Dämpfungsverluste hat man über Faserverstärker wieder ausgeglichen. Das

Soliton kann man sich als eine Art Reigentanzgruppe von Photonen vorstellen, die mit Lichtgeschwindigkeit durch die Faser tanzt, und deren Mitglieder durch interne und externe Wechselwirkungen zusammengehalten werden.

Die nutzbare Bandbreite der Glasfaser beträgt im Wellenlängenbereich von 1250 nm bis 1600 nm 50 THz. Heute werden die meisten Weitverkehrssysteme noch bei einer Bitrate von 2,4 Gbit/sec betrieben, was der Übertragungskapazität von 30 Tausend Telefonkanälen entspricht. Es stecken also im bereits verlegten Fasernetz noch ungeheure Reserven.

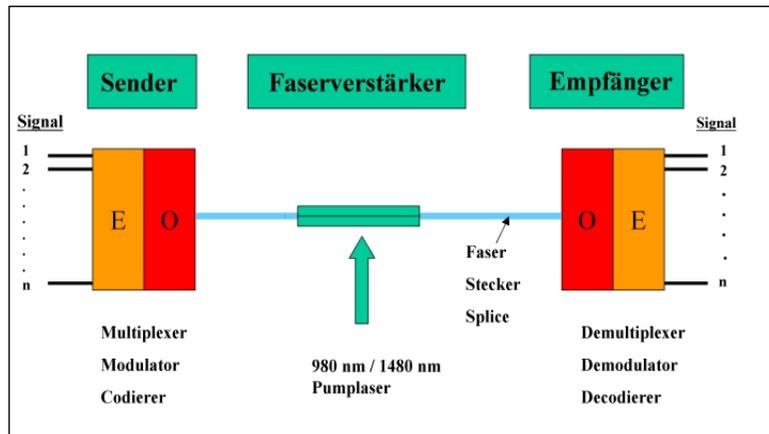


Abbildung 4: Optische Übertragungsstrecke – Weitverkehr

Abb.4 zeigt eine optische Übertragungsstrecke. Die aus den parallelen elektrischen Leitungen ankommenden Bitströme werden in so genannten **ATM-Multiplexern** (= Asynchronous Transfer Mode) in gleich grosse Bitpakete von 53 Bytes "zerlegt". 48 Bytes enthalten die Nutzinformation und 5 Bytes die Adresse für den Empfänger, ähnlich wie bei einem Brief. Diese Bitpakete werden elektronisch zeitlich so ineinander verschachtelt, dass sie als serielle Bitströme von dem optischen Wandler auf die Faser geschickt werden. Man nennt dieses Verfahren **Time-Division-Multiplexing**. Am Ausgang der Faser werden sie elektronisch wieder in die einzelnen Bitpakete zerlegt und weitergeleitet.

Die Glasfaserstrecke selbst enthält einen optischen Verstärker, der mit Halbleiterlasern der Wellenlänge 1460 nm oder 980 nm gepumpt wird. Auf diese Weise kann die optische Übertragungsstrecke je nach Verstärkung bis zu einem Faktor zwei und mehr vergrößert werden. Diese Verstärker gibt es heute nur für 1500 nm. Es wird jedoch intensiv an Verstärkern für einen grösseren Wellenlängenbereich geforscht.

Um die Übertragungskapazität der Faser besser zu nutzen, wird die Bitrate Zug um Zug erhöht. Das nächste kommerzielle System wird eine Bitrate von 10 GBit/s haben. Im Labor experimentiert man bereits mit 40 Gbit/s und mehr. Der andere Weg ist, Lichtimpulse verschiedener Wellenlänge für die Übertragung zu verwenden. Wie man das weisse Sonnenlicht z.B. mit einem Prisma in einzelne Spektralfarben aufspalten kann – ist am Regenbogen in der Natur zu beobachten – und diese Spektralfarben mit ebenso einem Prisma wieder zu weissem Licht zusammenfügen kann, so kann man das auch mit infrarotem Licht. Wählt man Sender mit schmaler spektraler Breite aus, so dass die Wellenlängenbereiche des emittierten Lichtes der einzelnen Sender nicht überlappen, so kann man das Licht dieser Wellenlängenbereiche z.B. mit einem Prisma – es gibt aber auch eine Reihe anderer Methoden – zusammenführen und in die Faser einkoppeln. Am Ausgang der Faser wird dieses "Mischlicht" wieder in die einzelnen Wellenlängenbereiche oder anschaulicher in die einzelnen Farben zerlegt und den zugehörigen Empfängern zugeführt. Die Faser ist gleichsam ein Tunnel mit separaten Gleisen für die einzelnen "Farbenzüge", die sich gegenseitig nicht beeinflussen und nicht stören und von denen jeder mit einer anderen Bitrate beladen sein kann. Man nennt diese Methode **Wellenlängenmultiplexen** oder englisch **Wavelength Division Multiplexing (WDM)**. Liegen die Wellenlängenbereiche sehr dicht beieinander und sind schmal, so spricht man von **Densed Wavelength Division Multiplexing (DWDM)**. Der Vorteil ist sofort sichtbar. Die Übertragungskapazität erhöht sich proportional der Anzahl der verwendeten Wellenlängenbereiche. Man braucht im Prinzip nur Sender entsprechender Wellenlänge und WDM-Bausteine am Ein- und Ausgang der Faser. Die Elektronik ist bei allen die gleiche. Es wurden mit Hilfe dieser Technik Übertragungsstrecken von 240 km Länge mit einer Übertragungskapazität von 3,2 Tbit/s realisiert worden (8). Das entspricht einer Übertragungskapazität von 40 Mio Telefonkanälen. Mittlerweile liegt der Rekord über 7 Tbit/s und einer Streckenlänge von 80 km. Kommerziell wird es demnächst Systeme mit einer Übertragungskapazität von 160 x 10 Gbit/s, also 1,6 Tbit/s, und einer Streckenlänge von 80 km geben (9).

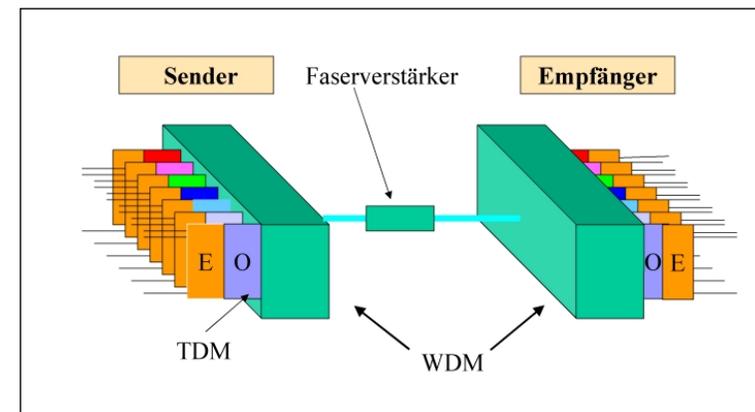


Abbildung 5: WDM-Übertragungssystem

Aber auch über kurze Strecken werden Zug um Zug optische Netze den Datentransport übernehmen. Bei Grossrechnern ist die optische Datenübertragung schon seit mehr als zehn Jahren Stand der Technik. Selbst im Auto wird künftig der Datentransport über Fasern erfolgen, da die Bandbreite der Kupfernetze für die moderne Autoelektronik nicht mehr ausreichend und störsicher genug ist. Neben der höheren Zuverlässigkeit erreicht man damit auch eine Gewichtreduzierung des Autos.

## 6.2 Optische Datenspeicherung

Die Datenspeicherung hat im Hinblick auf Qualität, Menge und Kosten durch die Nutzung der Photonen einen gewaltigen Sprung nach vorne gemacht. Kostengünstige Halbleiterlaser waren die Voraussetzung für den Siegeszug der CD und werden es auch für DVD sein, die seit kurzem auf dem Markt ist und die dank des rot statt infrarot strahlenden Lasers wegen des kleineren Leuchtfleckes eine Speicherkapazität von knapp fünf Gigabyte hat, also fast das Zehnfache der CD. Mit dem blauemittierenden Halbleiterlaser, dessen Entwicklung weltweit vorangetrieben wird, lässt sich diese Kapazität nochmals vervierfachen. Selbst die magnetische Datenaufzeichnung steht längerfristig vor einem Wandel; denn die magnetischen Domänen sind nur bis zu einer bestimmten Grösse stabil (supermagnetischer Effekt). Für die Überwindung dieser physikalischen Grenze bzw. Steigerung der Flächenspeicherdichte gilt die magneto-optische Nahfeldspeicherung als aussichtsreiches Konzept. Sie lässt eine Speicherkapazität von 100 Gigabyte pro Disk erwarten.

## 6.3 Visualisierung

Der Mensch kann mit seinen Augen etwa 200 Mbit/s an Information aufnehmen, Grössenordnungen mehr als mit den Ohren. Daher kommt der Visualisierung von Information in der modernen Gesellschaft eine eminent wichtige Grundaufgabe zu. Neben der klassischen Kathodenstrahlröhre und dem Flüssigkristall-Bildschirm werden künftig Projektionsgeräte, wie Beamer mit LCD- oder Digitalspiegel- Bildgeber (DMD = Digital- Mirror- Device) und Raster-Systeme (Flying- Spot) für die optische Darbietung von Information enorm an Bedeutung gewinnen. Kompakte, hocheffiziente Lichtquellen sind die Basis für diese Geräte. Bei letzteren erfolgt die Bilderzeugung durch Ablenkung eines modulierten Rot-Grün-Blau(RGB)- Laserstrahles mittels eines bewegten Spiegels. Selbst in Autos werden künftig ähnlich wie in Flugzeugen Bildinformationen in die Windschutzscheibe projiziert, so dass der Fahrer beim Lesen der Information den Kopf nicht mehr bewegen und die Augen nicht mehr adaptieren braucht. Hier werden ebenfalls kompakte, hocheffiziente Lichtquellen, nämlich Halbleiterlichtquellen verwendet.

## 7. Schlussbemerkung

Das elektrische Licht hat wesentlich zu unserem technischen Fortschritt beigetragen und war ein Wegbereiter für das Industrie- und Informationszeitalter. Ausreichend Licht zu jeder Tageszeit machte es möglich, unabhängig vom Sonnenlicht zu arbeiten, Industrieanlagen länger und damit das investierte Kapital besser zu nutzen. Elektrisches Licht machte es möglich, Informationen in grossen Mengen kostengünstig zu übertragen, zu visualisieren und zu speichern. Elektrisches Licht wird in vielen modernen industriellen Prozessen, wie der Photolithographie, einer Schlüsseltechnologie in der Halbleiterfertigung, in der Analytik und in vielem mehr genutzt. Elektrisches Licht war und ist eine Voraussetzung für die Produktivitätssteigerung in unserem Wirtschaftsleben und eine Stütze unseres Wohlstandes.

## Literatur

- (1) Physik – Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung: Denkschrift zum Jahr der Physik; ein Bericht an Gesellschaft, Politik und Industrie, Hrsg. DPG. Markus Schwoerer, Bad Honnef, Dt. Physikalische Ges., 2000
- (2) Dieter Hofmann, Reinhard Weitzel, Siemens Review – R&D Special – Fall 1995 „More Light from Less Power“
- (3) H. Amano, M. Kitho, K. Hiratsuka, I. Akasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) 2112
- (4) S. Nakamura, T. Mukai, M. Seoh, Phys. Lett. 64 (1994) 1687
- (5) Aischylos: Tragödien und Fragmente, Ernst Heimeran Verlag, München 1959
- (6) Vegetius: Epitoma rei militari; B. G. Teubner Verlag Stuttgart 1967
- (7) F. Klemm: Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte 45 (1977) 1
- (8) A. Färbert, A. Schöpflin, A. Richter, C.-J. Weiske, K. Kotten, P. M. Krummrich, A. Schex, C. Glingener and D. Chen, S. Wheeler, D. Nguyen OFC 2001, Proceedings PD - 36 Anaheim (2001)
- (9) A. Färbert, G. Mohs, S. Spälter, J.-P. Elbers, C. Fürst, A. Schöpflin, E. Gottwald, C. S. Scheerer, C. Glingener Ecoc 200, Proceedings PD - 1.3, Munich (2000)
- (10) Siemens, ICN