

# Vater der Glasfaserkommunikation

**Charles Kuen Kao erhält den Physik-Nobelpreis 2009 für seine bahnbrechenden Leistungen zur Lichtübertragung in Glasfasern.**

Hans-Georg Unger

Schon ab 1950 suchten Forscher in den Laboratorien der Nachrichtentechnik nach neuen Übertragungsmedien mit geringeren Verlusten in einem breiten Frequenzbereich. Koaxialkabel waren weitgehend ausgereizt, da in ihnen die Dämpfung durch ohmsche Verluste mit der Wurzel aus der Frequenz zunimmt und damit Bandbreite und Übertragungskapazität begrenzt sind. Eine bessere Breitband-Übertragung versprach der metallische Rundhohlleiter bei Millimeterwellen. In ihm erfahren die axialsymmetrischen Eigenwellen mit transversal elektrischem Feld eine Dämpfung, die mit steigender Frequenz sinkt. In einem Kupferrohr mit 5 bis 10 Zentimeter Innendurchmesser wird von diesen die Eigenwelle niedrigster Ordnung nur um ein oder wenige Dezibel pro Kilometer abgeschwächt, und zwar über einen Bereich von mehr als 100 GHz.

Diese Konkurrenz galt es zu übertrumpfen, als der diesjährige Nobelpreisträger für Physik, Charles Kuen Kao, seine Untersuchungen von Glasfasern aufnahm. Die Erfindung des Lasers und verbesserte Photodetektoren hatten die Breitband-Übertragung mit optischen Signalen nahe gelegt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen anfangs Wellenleiter, die den gaußschen Strahl aus einem Laser, der in seinem transversalen Grundmodus schwingt, in einer periodischen Folge von Glaslinsen immer wieder refokussieren. Der technische Aufwand war ähnlich hoch wie bei den Rundhohlleitern; auch die Dämpfung war vergleichbar. Im optischen Spektralbereich können aber die Frequenzbänder um Größenordnungen breiter und damit die Übertragungskapazität entsprechend höher als bei Millimeterwellen sein.



Charles Kao hatte in den 60er-Jahren die entscheidenden Ideen, um Licht mit

niedrigen Verlusten innerhalb von Glasfasern zu transportieren.

Auch Glasfasern galten als Alternative. Dass sie Licht durch Totalreflexion leiten, war bekannt und für Anwendungen in Medizin und Messtechnik sowie für entsprechende Beleuchtungsaufgaben längst erprobt. Kern-Mantel-Fasern mit Lichtleitung im Glaskern und optischer Isolierung nach außen durch den Mantel kamen bereits zum Einsatz. Auch ihr Modenspektrum war bekannt.

Angesichts der hohen Verluste schienen diese Glasfasern aber für die optische Signalübertragung nicht geeignet zu sein. Die Dämpfung lag bei einem Dezibel pro Meter; nach nur 20 Metern Faserlänge war die Lichtintensität also auf ein Prozent des Eingangswertes abgeklungen. Solche Fasern konnten daher mit den üblichen Übertragungsmedien nicht konkurrieren.

Kao trat Anfang 1966 als erster mit fundierten Überlegungen zu den Ursachen der hohen Dämpfung vor die Fachwelt, seine Veröf-

fentlichung darüber hatte er 1965 eingereicht [1]. Mitverfasser war ein junger Theoretiker aus Kaos kleiner Gruppe bei den Standard Telecommunications Laboratories in England, mit dem zusammen er die Wellenausbreitung in Glasfasern berechnet hatte. Die beiden erkannten, dass hauptsächlich Materialverluste, die durch Streuung an Brechzahlswankungen und durch Absorption in den Verunreinigungen entstehen, die optischen Wellen abschwächen. Strahlungsverluste an Störungen der perfekten Fasergeometrie wie Faserkrümmungen, Durchmesser-schwankungen oder versetzte Verbindungen lassen sich dagegen leicht begrenzen. Neben den sonst üblichen optischen Gläsern schlug Kao Quarzglas für verlustarme Glasfasern vor. Er prognostizierte, dass die Absorptionsverluste in genügend reinem Glas bei weniger als 20 dB/km liegen und die Grenzwerte unvermeidlicher Verluste sogar noch viel niedriger sind.

Prof. em. Dr. Hans-Georg Unger, Institut für Hochfrequenztechnik, Technische Universität Braunschweig, Schleinitzstr. 22, 38106 Braunschweig

Charles Kao regte an, die Glasfaser in ihrem Grundmodus als Monomodefaser zu betreiben und schlug für Kern-Mantel-Fasern konkrete Werte für den Kerndurchmesser und die Brechzahldifferenz zwischen Kern und Mantel vor. Als Strahlungsquellen dienten ihm ein He-Ne-Laser, der in seinem transversalen Grundmodus schwingt, und ein GaAs-Laser. In Glasfasern mit verschiedenen Kerndurchmessern erzeugte er damit selektiv den Grundmodus sowie verschiedene Moden nächsthöherer Ordnungen. Seine Schlussfolgerungen aus diesen frühen Untersuchungen erscheinen aus heutiger Sicht visionär. So schloss Kao u. a., dass eine Kern-Mantel-Faser aus Glas mit einem Kerndurchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge und einem vielfach größeren Außendurchmesser als optischer Wellenleiter z. B. dazu dienen kann, Nachrichten zu übermitteln. Der Wellenleiter arbeitet mit dem transversalen Grundmodus, er ist genügend biegsam und erfordert mechanische Toleranzen, die leicht einzuhalten sind. Im Vergleich zu Koaxialkabel- und Richtfunksystemen hat der Wellenleiter eine höhere Übertragungskapazität, nämlich mehr als 1 GHz, und Vorteile hinsichtlich der Materialkosten – soweit Kaos Folgerungen.

Kao selbst hat zu den weiteren Entwicklungen beigetragen, indem er die spektrale Dämpfung von Licht in Gläsern für optische Wellenleiter gemessen hat. Er wies dabei nach, dass Quarzglas die erforderliche Reinheit erreichen kann, um Nachrichten optisch zu übertragen [2]. Eindrucksvoll waren die weltweiten Aktivitäten, die Kao mit seinen Erkenntnissen und Vorschlägen in Gang setzte. Zunächst wurde fieberhaft versucht, Vorformen aus hochreinem Quarzglas herzustellen, um daraus Fasern zu ziehen. Als ersten gelang es Glasexperten bei Corning in den USA, mit einem CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition) hochreines Quarzglas mit einer chemischen Reaktion aus der Gasphase abzuscheiden und zwar gleich zu einer zylindrischen Vorform mit

einem Kern höherer Brechzahl. 1970 erreichten die daraus gezogenen Fasern Dämpfungswerte von 20 dB/km.

## Der Durchbruch

Nun konzentrierte sich alle Welt auf die optische Nachrichtentechnik mit Glasfasern als Übertragungsmedium. Modifizierte CVD-Verfahren ermöglichten Quarzglasfasern höchster Materialreinheit mit Germaniumdotierung, um die Brechzahl im Kern geringfügig zu erhöhen. Sie haben bei Wellenlängen um 1,55  $\mu\text{m}$  eine Restdämpfung unter 0,2 dB/km. Mit abnehmender Wellenlänge steigt die Dämpfung aufgrund der Rayleigh-Streue charakteristisch allmählich an und erreicht bei  $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$  einen Wert von 1 dB/km. Mit zunehmender Wellenlänge erhöht sich die Dämpfung durch Infrarotabsorption des Quarzglases auf 1 dB/km bei  $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$ . Dazwischen liegt ein über 150 THz breiter Spektralbereich, der sich für die Informationsübertragung eignet.

Zunächst hatten diese verlustarmen Quarzglasfasern dickere Kerne, welche die Strahlung in vielen Moden mit unterschiedlichen Laufzeiten führten. Dies begrenzte die übertragbaren Impulsraten. Diese Einschränkung gilt auch in Gradientenfasern mit quadratischem Brechzahlprofil im Kern und damit nahezu gleichen Laufzeiten aller Moden. Erst Kao Idee, eine Monomodefaser mit einem entsprechend dünnen Kern zu ver-

wenden, ermöglichte sehr hohe Impulsraten und erlaubte es, die volle Übertragungskapazität zu nutzen.

Dies hat schließlich die Entwicklung der Elektronik, Optoelektronik und Photonik für die optische Nachrichtentechnik beflügelt. Ultraschnelle Mikroelektronik für Impulsraten von 40 Gigabit/s war gefragt. Doppelhetero-Diodenlaser auf InP-Basis wandeln schnelle elektrische Impulsfolgen in optische, alternativ können integriert-optische Schalter die Laserstrahlung extern modulieren. Integriert-optische Multiplexer und Demultiplexer erlauben es, mehrere oder sogar viele optische Signale unterschiedlicher Wellenlängen gleichzeitig zu übermitteln. Mit Erbium-dotierten Glasfaserverstärkern lassen sich größere Entfernungen überbrücken. Die Hochleistungs-Glasfasersysteme unserer Tage übertragen bis zu mehrere Terabit/s pro Glasfaser über globale Entfernungen. Ohne das dichte Netz von Glasfaserkabeln, welches die Kontinente und Weltmeere überzieht, gäbe es nicht das Internet, so wie es heute allgegenwärtig ist.

## Pionierarbeit in Deutschland

Auch in Deutschland wurde früh in der Industrie und an Hochschulen an Glasfasern für die optische Nachrichtentechnik geforscht. Am Forschungsinstitut von AEG-Telefunken setzte man z. B. von Anfang an auf die Monomodefaser und leistete dafür Pionierarbeit. Auch ein modifiziertes CVD-Verfahren,



Charles Kuen Kao (geb. 1933 in Shanghai) studierte Elektrotechnik in England und promovierte 1965 an der University of London. Während seiner Promotion arbeitete er bei den Standard Telecommunications Laboratories in Harlow, wo er seine grundlegenden Beiträge zur Glasfasertechnik leistete. 1970 gründete Kao das Department of Electronic Engineering an der Chinese University of Hongkong, 1974 wechselte er in die USA zur ITT-Corporation. Heute lebt Kao in Hongkong.

mit dem sich verlustarme Quarzglasfasern herstellen lassen, wurde hier entwickelt. Manfred Börner, der in leitender Funktion an diesen Forschungsarbeiten beteiligt war, meldete im Dezember 1966 ein Schlüsselpatent für ein Übertragungssystem an, das durch folgende Merkmale gekennzeichnet ist [3]:

- die sendenden Laserorgane sind Halbleiterlaser, vorzugsweise Halbleiterinjektionslaser;
- die photoempfindlichen Empfänger sind Halbleiterphotodioden;
- die Impulsaufbereitungseinrichtungen sind Halbleiterschaltungen und
- die Übertragungsstrecke besteht aus Lichtwellenfaserleitern.

Mit diesen allgemeinen Patentansprüchen entwickelte Börner ein Jahr nach Kaos visionären Aussagen zur Signalübertragung mit Glasfasern konkrete Vorstellungen über den Aufbau von Glasfasersystemen. Seine Ideen erscheinen heute naheliegend. Damals aber funktionierten Halbleiterlaser nur

kryogen gekühlt bzw. bei Zimmertemperatur nur im Impulsbetrieb mit extrem niedrigem Tastverhältnis. Sie kamen daher für Glasfasersysteme nicht infrage. Alferov [4] und Kroemer [5] hatten zwar schon 1963 erkannt, dass in Doppelheterostrukturen Laserbetrieb bei Zimmertemperatur möglich sein müsste. Solche Laser herzustellen und ihren Dauerstrichbetrieb bei Zimmertemperatur zu realisieren, gelang aber erst 1969 [6]. Börner hat mit seinen Überlegungen Recht behalten und gilt deshalb bei vielen in Deutschland als Erfinder der Glasfasersysteme. Alferov und Kroemer erhielten für ihre Erkenntnisse den Physik-Nobelpreis 2000. Charles Kao aber ist wegen seiner frühen Erkenntnisse zu Glasfasern für die optische Signalübertragung der „father of fiber optic communication“.

- [1] K. C. Kao und G. A. Hockham, Proc. I.E.E. **113**, 7151 (1966)
- [2] K. C. Kao und T. W. Davies, J. Scien. Instr. **2**, 1063 (1968)
- [3] M. Börner, Mehrstufiges Übertragungs-

system für in Pulscodemodulation dargestellte Nachrichten DBP 125413, Anmeldetag 21.12.1966

- [4] Zh. I. Alferov und R. F. Kazarinov, Authors certificate no. 27448 Application no. 950840, 30.3.1963
- [5] H. Kroemer, Proc. IEEE **51**, 1782 (1963)
- [6] Zh. I. Alferov et al., Fizika i Tekn. Poluprovodn. **3**, 1328 (1969)

#### DER AUTOR

**Hans-Georg Unger** ist Professor am Institut für Hochfrequenztechnik der TU Braunschweig, das er 1960 gegründet und bis zu seiner Emeritierung 1993 geleitet hat. Er beschäftigte sich schon in den 50er-Jahren mit dämpfungsarmen Wellenleitern für Millimeterwellen für die Breitband-Telekommunikation. Anfang der 60er-Jahre begann er mit Untersuchungen von Lasern und optischen Wellenleitern für die Informationsübertragung. Er hatte bereits früh Kontakt mit Kao, der durch gegenseitige Besuche vertieft wurde.



## Neugierig?



Sachbücher von  WILEY-VCH

THOMAS POSCH, ANJA FREYHOFF  
und THOMAS UHLMANN (Hrsg.)

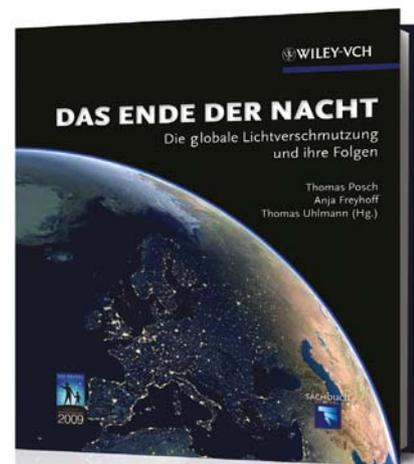
### Das Ende der Nacht

Die globale Lichtverschmutzung  
und ihre Folgen

ISBN: 978-3527-40946-4  
November 2009 120 S. mit 50 Farbabb.  
Gebunden € 29,-

Jedem Stadtbewohner fällt auf, dass wir aufgrund der urbanen Streustrahlung kaum mehr Sterne am Nachthimmel sehen können. Welchen Einfluss hat der Verlust der Nachtdunkelheit auf den Menschen und was bedeutet dies für die Tiere und Pflanzen?

Dieses Buch beruht auf der Fernsehdokumentation „The Dark Side of Light“ und stellt – erstmalig in deutscher Sprache – die Folgen der sogenannten Lichtverschmutzung vor. Der Natur und der Menschheit drohen ungeahnte Auswirkungen, die in Fallbeispielen allgemein verständlich dargestellt werden. Darüber hinaus illustriert ungewöhnliches Bildmaterial diese „dunkle Seite“ des Lichts.



532340908\_bv

 WILEY-VCH

Wiley-VCH • Tel. +49 (0) 62 01-606-400 • Fax +49 (0) 62 01-606-184 • E-Mail: [service@wiley-vch.de](mailto:service@wiley-vch.de)

[www.wiley-vch.de/sachbuch](http://www.wiley-vch.de/sachbuch)