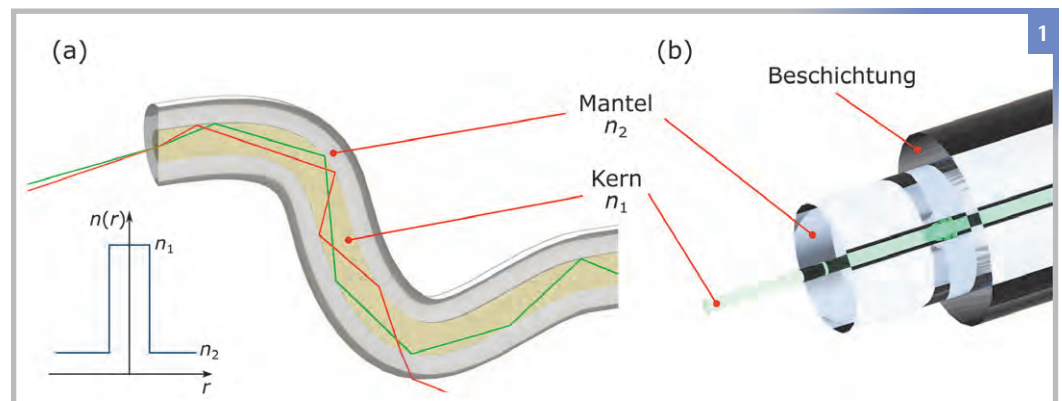


Mehr als nur Lichtleitung

INNOVATIVE GLASFASERHERSTELLUNG AM HITEC

In den Laboratorien des HITEc-Gebäudes können aufgrund der technischen Ausstattung in Zukunft neuartige, laseraktive und strahlungsharte Fasern realisiert werden.

Wissenschaftler vom Institut für Quantenoptik und vom Laser Zentrum Hannover e.V. berichten über die Verbindung der klassischen Forschung an laseraktiven Glasfasern mit Weltraumanwendungen. Ziel dabei ist es, ein Forschungszentrum für die Herstellung von Spezialfasern zu etablieren.



Optische Glasfasern oder Lichtwellenleiter sind aus vielen Bereichen unseres Alltags nicht mehr wegzudenken: In komplexen medizinischen Anwendungen werden Glasfasern zum Beispiel bei der Endoskopie eingesetzt. Auch in der modernen industriellen Produktion, vor allem der Lasermaterialbearbeitung sind optische Fasern in der Strahlführung oder als Strahlquelle bereits etabliert. Ebenso werden in der Sensorik mehr und mehr Konzepte auf der Basis von Glasfasern entwickelt. Der Begriff Lichtwellenleiter wird aber heute überwiegend assoziiert mit der modernen optischen Datenübertragung über Glasfaserkabel und ihrer enormen Kapazität, die im Zeitalter des Hochgeschwindigkeits-Internets den gesamten Globus umspannt. Heutzutage lassen sich mittels modernster Multiplexverfahren Signalübertragungsraten von bis zu 10^{14} bit/s pro Faser erreichen.

Die Lichtleitung in optischen Fasern beruht auf dem Effekt der Totalreflexion, der an der Grenzfläche zwischen einem optisch dichteren hin zum optisch dünneren Medium auftritt (s. Infokasten 1): Ein innerer hochbrechender Faserkern (n_1) ist umgeben von einem niedrigbrechenden Mantel ($n_1 > n_2$). Die Brechungsindexvariation innerhalb einer solchen Glasfaser wird dabei durch die Verwendung unterschiedlicher Fremdatome, sogenannter Dotanden, im Kern und im Mantel erreicht. Der so ausgebildete Wellenleiter ermöglicht eine nahezu verlustfreie Führung optischer Strahlung über hunderte von Kilometern. Glasfasern können mittlerweile aber viel mehr, als nur eine reine Lichtleitung: Durch eine Dotierung des Faserkerns mit seltenen Erden, wie zum Beispiel Ytterbium, kann eine Verstärkung von Licht bis hin zur Laseraktivität erreicht werden. Moderne Faserlasersysteme lie-

Abbildung/Infokasten 1

- (a) Verteilung des Brechungsindex in einer optischen Glasfaser. Ein innerer, hochbrechender Faserkern mit Brechungsindex n_1 ist umgeben von einem niedrigbrechenden Mantel mit $n_1 > n_2$. Die Brechungsindexvariation innerhalb der Glasfaser wird dabei durch den Einsatz unterschiedlicher Fremdatome, sogenannter Dotanden, im Kern und im Mantel erreicht und führt zu einer Lichtleitung innerhalb des Faserkerns. Unterhalb eines kritischen Akzeptanzwinkels der einfallenden Lichtstrahlen in die Faser werden diese im Faserkern geführt, wobei die lokale Krümmung des Wellenleiters an der Grenzfläche zwischen Kern und Mantel eine Rolle spielt.
- (b) Aufbau einer optischen Glasfaser. Der aus Glas bestehende Kern bzw. der Mantel werden zum mechanischen Schutz mit einem Schutzmantel aus mehreren Polymerschichten überzogen.

gen auf einem Leistungsniveau von über 100 kW und finden vielfältige Verwendung in Forschung und Industrie.

Die Aktivitäten der Forschungsgruppe »Integrierte Photonik« am HITec fügen sich in diesen innovativen Themenkomplex der modernen Fasertechnologie ein. Im Vordergrund sollen dabei aber nicht neue Rekorde für Hochleistungsfaserlaser stehen, son-

dern vielmehr die Realisierung von neuartigen laseraktiven und strahlungsharten Fasern. Diese Spezialfasern sollen in der Entwicklung von hochstabilen Strahlquellen sowie in diversen Experimenten im Bereich der Grundlagenforschung eingesetzt werden, wobei strahlungsharte Fasern deren Einsatz im Weltraum ermöglichen sollen. Durch die bestehende Forschungslinie Quano met der Wissenschaftsallianz der Technischen Universität Braunschweig und der Leibniz Universität sowie der EFRE-Kooperation LaPOF soll in Zukunft eine Expertise für Fasertechnologie am Standort Hannover ausgebildet werden. Ziel ist es, ein Forschungszentrum für die Herstellung von Spezialfasern zu etablieren. Neben eigener Forschung zur Optimierung und Analytik von laseraktiven und strahlungsharten Fasern sollen für andere mit dem HITec assoziierte Forschungseinrichtungen spezifische Problemlösungen, wie

zum Beispiel maßgeschneiderte faserbasierte Strahlquellen für neuartige Sensorkonzepte, erarbeitet werden. Die Fasertechnologie am HITec soll hier den Status einer zentralen Enabling-Technologie einnehmen.

Der Prozess der Herstellung einer Glasfaser umfasst folgende Schritte: Ausgehend von einem Anforderungsprofil wird zunächst ein Faserdesign erarbeitet, das neben der

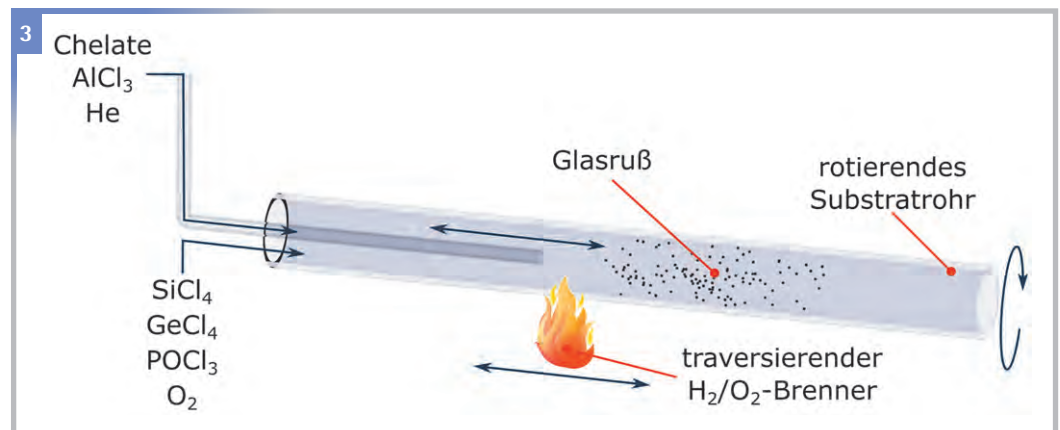
Geometrie der Faser auch ein entsprechendes Dotierungsprofil vorgibt und das die diversen optischen Eigenschaften der Faser bestimmt. Dieses Faserdesign bildet die Grundlage für die Erzeugung einer Faserpreform – einem Glasstab mit einem Durchmesser von 10 bis zu 50 mm und einer Länge bis über einem Meter. Die Preform entspricht bezüglich der Materialfolge und des Brechwertprofils einer vergrößerten Version der späteren Faser und definiert damit weitgehend deren spätere optische Eigenschaften. Die eigentliche Faser wird schließlich in einem Faserziehturm hergestellt. Dafür wird die Preform unter präzise kontrollierten Bedingungen lokal aufgeschmolzen und unter konstantem Zug zur Faser ausgezogen. Gleichzeitig erfolgt eine zusätzliche Ummantelung der empfindlichen Glasoberfläche zum mechanischen und chemischen Schutz, bevor die Faser schließlich aufgewi-

ckelt wird. Aus einer einzigen Preform können auf diese Weise viele Kilometer Glasfaser kontinuierlich gezogen werden. Die gesamte Herstellungskette wird von einer umfassenden optischen und mechanischen Charakterisierung begleitet, um die komplexe Prozessführung zu kontrollieren.

Am HITec-Gebäude werden diese Fertigungsschritte gegenwärtig mit der Einrichtung von modernsten Anlagen umgesetzt. Für die Preformherstellung steht ein spezielles Labor zur Verfügung, das auf einer Fläche von etwa 80 m² alle notwendigen Apparaturen in Reinraumumgebung beherbergt. Kernstück des Labors ist eine Glasdrehbank, die mit einer Anordnung von Wasserstoff/Sauerstoff-Brennern und einer komplexen Gaszufuhreinheit ausgestattet ist (siehe Abbildung 2). Die Preformherstellung erfolgt mittels des *Modified Chemical Vapor Deposition* (MCVD)-Verfahrens. Dafür wird die Drehbank mit einem speziellen Glasrohr bestückt, das als Flussreaktor dient und den späteren Mantel in der Faserarchitektur bildet. Die Reaktanden werden in Form flüchtiger Verbindungen eingesetzt, in die Gasphase überführt und in das Glasrohr eingeleitet. (siehe Abbildung 3) Die Reaktandgasmischung enthält vornehmlich das äußerst korrosive Siliziumtetrachlorid (SiCl₄) sowie hochreinen Sauerstoff (O₂), die anschließend thermisch durch den travertierenden Brenner zur Reaktion gebracht werden. Bei der Reaktion bildet sich feiner Ruß aus amorphen Glaspartikeln (SiO₂), die sich in der Folge auf der Innenwand des Glasrohres abscheiden. So wird im Prozess, unter kontinuierlicher Rotation des Glasrohres, schichtweise die Preform aufgebaut – beginnend vom äußeren Mantel hin zum späteren Kern. Durch Ände-

Abbildung 3

Schematische Darstellung des Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD)-Verfahrens: Flüchtige Vorstufen der Glasbildner und Dotanden, vornehmlich Siliziumtetrachlorid (SiCl_4) sowie Aluminiumchlorid (AlCl_3), Germaniumtetrachlorid (GeCl_4) und Phosphoroxychlorid (POCl_3), werden mittels Trägergasen (Sauerstoff (O_2) und Helium (He)) in ein Substratrohr eingeleitet und dort thermisch zur Reaktion gebracht. Entstehender Glas-Ruß scheidet sich in der Folge schichtweise innerhalb des Glasrohres ab. Der Aufbau der Faserpreform erfolgt vom Mantel hin zum Faserkern. Eine Laseraktivität der Fasern kann durch weiteren Zusatz flüchtiger Seltenerdchelate erreicht werden. Durch Variation der Reaktandgasmischung zwischen einzelnen Abscheidungszyklen lässt sich eine graduelle Änderung des Brechungsindex innerhalb der Preform einstellen.



Die Einstellung der Reaktandgasmischung bei jeder Brennertraverse kann eine quasi kontinuierliche Variation der radialen Dotandenkonzentration erreicht werden. Typische Dotanden zur Steigerung des Brechungsindex sind dabei Germanium (Ge), Phosphor (P) und Aluminium (Al), während Bor (B) und Fluor (F) den Brechungsindex des Glases verringern. In gleicher Weise

kann eine Dotierung des Kerns mit laseraktiven Materialien erfolgen, wobei relativ komplexe metallorganische Verbindungen dem Gemisch zugefügt werden müssen. Die Dotierung erfolgt dabei als Gasphasenprozess simultan zur Bildung der Glaspartikel, wodurch sehr homogene Dotandenverteilungen im Material erreicht werden. Nach Abschluss des MCVD-Prozesses

befindet sich im Mantelrohr ein relativ poröses Gefüge aus Quarz-Ruß, vergleichbar mit einem Schwamm. Die große Oberfläche kann in der Folge dazu genutzt werden, weitere Dotanden darauf zu binden und mittels eines anschließenden Sinterprozesses in der Glasmatrix zu fixieren. Prozessbedingt verbleibt im Zentrum des Glasrohres ein kleiner offener Kanal, der abschließend bei Temperaturen von etwa 2000 °C durch die Oberflächenspannung des verflüssigten Glases kollabiert, woraufhin sich ein kompakter Glasstab bildet.

Nach einer eingehenden Inspektion und Charakterisierung der Preform bezüglich der erreichten optischen Eigenschaften und der Konfektionierung erfolgt dann die Übergabe an den Faserziehturm. Im HITEC-Gebäude ist in einem Reinraum ein Faserziehturm mit einer Höhe von 12 m installiert, der mit allen Komponenten zur Herstellung komplexer Fasergeometrien ausgestattet ist. Dem Herstellungsprozess folgend wird die Preform zunächst in die Haltevorrichtung des Ziehturms eingesetzt und dann am unteren Ende mit einem Graphitofen lokal auf Temperaturen bis zu 2200 °C erhitzt (siehe Abbildung 4). Das Glas wird hierbei verflüssigt, ist allerdings noch immer hochviskos. Die bereits in der Preform ein-

gestellte Dotandenverteilung bleibt unter definierten Prozessbedingungen vollständig erhalten. Unter konstanter Regelung der Temperatur entsteht zunächst ein Tropfen an der Preform, welcher der Gravitation folgend abtropft und einen entsprechenden Glasfaden nach sich zieht. Wenn der Tropfen aufgefangen und der entstandene Faden kontinuierlich bei permanenter Kontrolle seines Durchmessers gefördert wird, entsteht die Lichtleitfaser mit einem der Preform analogen Dotierungsprofil und den korrelierten optischen Eigenschaften. So können aus einer einzelnen Preform (Länge ca. 1,5 m, Durchmesser ca. 5 cm) bis zu 200 km Faser innerhalb eines Arbeitstages ausgezogen werden, was einer maximalen Fördergeschwindigkeit von etwa 400 m Faser in der Minute entspricht.

Aufgrund der geringen Dicke kühlt die empfindliche Glasfaser bereits nach wenigen Metern Entfernung zum Graphitofen ausreichend ab (typische Faserdurchmesser liegen beispielsweise bei 125 μm). Im weiteren Verlauf des Zugprozesses kann die Glasfaser mit verschiedenen Polymeren beschichtet werden. Das sogenannte Coating dient der mechanischen Stabilisierung der Faser und wird im letzten Teil des Ziehturms ausgehärtet, bevor die Glasfaser auf ihre Bruchstabilität geprüft und auf eine Spuleneinheit gewickelt wird.

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der eingerichteten Labore ist die Verbindung der klassischen Forschung an laseraktiven Glasfasern mit Weltraumanwendungen, den Quantentechnologien und insbeson-

dere auch mit der Quantensorik, die im wissenschaftlichen Konzept des HITec-Gebäudes und in den kooperierenden Instituten eine herausragende Rolle spielt. Weitere Aspekte, die das besondere Potenzial der Einrichtung widerspiegeln, sind die umfangreichen, flexiblen Möglichkeiten zur Dotierung und komplexen Co-Dotierung der Fasern mit verschiedenen Elementen und sogar Nanopartikeln. Mit der neuen Fertigungskette für Glasfasern im HITec-Gebäude werden herausragende technische Möglichkeiten für die Erforschung neuartiger Konzepte für optische Glasfasern geschaffen, die für die weitere Entwicklung der Lasertechnik und insbesondere deren Anwendungen wichtige Impulse setzen können.



Prof. Dr. Detlev Ristau

Jahrgang 1957, ist Professor am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover und arbeitet seit über 30 Jahren in der optischen Dünnschichttechnologie. Seine Forschungsschwerpunkte sind unter anderem die Entwicklung und präzise Kontrolle moderner Ionenprozesse für die Fertigung hochwertiger und stabiler optischer Schichten.
Kontakt: d.ristau@lzh.de



Dr. Axel Rühl

Jahrgang 1975, leitet die Quantometer Arbeitsgruppe »Integrierte Photonik« am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen beinhalten neben Fasertechnologie und Laserentwicklung mit einem Schwerpunkt auf Faserlasersysteme auch Präzisionspektroskopie und Frequenzmetrologie.
Kontakt: ruehl@iqo.uni-hannover.de



Dr. Matthias Ließmann

Jahrgang 1982, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Quantenoptik und seit 2012 in die Planungen der Aktivitäten der Faserherstellung am HITec eingebunden. Sein Forschungsschwerpunkt umfasst die Charakterisierung optischer Komponenten.
Kontakt: liesmann@iqo.uni-hannover.de