



TECHNIK IM FOKUS

DATEN FAKTEN HINTERGRÜNDE

Helmut A. Schaeffer
Roland Langfeld

Werkstoff Glas

Alter Werkstoff mit großer Zukunft



Springer Vieweg

Technik im Fokus

Helmut A. Schaeffer · Roland Langfeld

Werkstoff Glas

Alter Werkstoff mit großer Zukunft



Springer Vieweg

Helmut A. Schaeffer
Berlin, Deutschland

Roland Langfeld
Frankfurt am Main, Deutschland

ISSN 2194-0770

ISBN 978-3-642-37230-8

ISBN 978-3-642-37231-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-37231-5

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Fotonachweis Umschlag: Parabol-Spiegelrinne eines Solarkraftwerks mit Receiver-Rohren in der Brennnlinie (Bildrechte: SCHOTT AG)

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Kaum ein Material fasziniert uns so sehr wie der Werkstoff Glas. Seine Lichtdurchlässigkeit schätzen wir bei Verglasungen von Gebäuden, seine chemische Beständigkeit bei Flaschen und Gläsern. Und wir erfreuen uns an der Vielzahl der künstlerischen Glasobjekte aus Vergangenheit und Gegenwart, die die nahezu unendlichen Möglichkeiten der Formgebung und Bearbeitung vor Augen führen.

Dabei ist uns nicht bewusst, dass erst der Einsatz des Werkstoffs Glas die Funktion von technischen Geräten und Systemen ermöglicht: optische Gläser in Objektiven von Kameras und Endoskopen, Glaswolle für die Schall- und Wärmedämmung, dünnes Flachglas für Bildschirme, Laptops und Smartphones sowie Glasfasern für die Telekommunikation. Diese vielfältigen Anwendungen benötigen unterschiedlich zusammengesetzte Gläser und stellen somit immer neue Herausforderungen an die Forschung und technische Umsetzung.

Mit dem vorliegenden Buch zeichnen die Autoren den langen Weg des Glases beginnend mit den frühen historischen Kunstobjekten bis zu den innovativen Anwendungen nach. Glaskomposition und Glaseigenschaften, die Prozessabläufe beim Schmelzen von Glas sowie Formgebungsverfahren sind Themen des Buches, die dem interessierten Leser die unerschöpfliche Welt des Glases erschließen.

Berlin und Frankfurt am Main, Juli 2013

Helmut A. Schaeffer
Roland Langfeld

Inhaltsverzeichnis

1	Was ist Glas?	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Geschichte des Glases	2
1.2.1	Frühe Herstellung von Glas	3
1.2.2	Glas der Antike	4
1.2.3	Venedig und die europäische Glaskunst	6
1.2.4	Erste technische Anwendungen von Glas	9
1.2.5	Automatisierungen der Herstellung	10
1.2.6	Glas-Innovationen	12
1.3	Glasstruktur – Ist Glas eine Flüssigkeit?	15
1.3.1	Strukturelle Beschreibung des Glaszustandes	17
1.4	Visko-elastisches Verhalten von Glas	23
1.5	Keimbildung und Kristallisation	24
1.6	Zusammensetzung und Eigenschaften von Gläsern	28
1.6.1	Netzwerkbildner	28
1.6.2	Netzwerkmodifizierer	29
1.6.3	Zwischenoxide	30
1.6.4	Beispiele für Glaszusammensetzungen	30
1.6.5	Wirkung von Farboxiden	34
1.6.6	Kolloidale Färbung	39
	Weiterführende Literatur	40
2	Glas und seine vielfältigen Anwendungen	41
2.1	Einleitung	41
2.2	Glas für Verpackung, Labor und Pharmazie	42
2.2.1	Physikalische und chemische Eigenschaften	42

2.2.2	Glas-Verpackung für Getränke und Lebensmittel	48
2.2.3	Gläser für Labor und Industrie	50
2.2.4	Gläser für Pharmazie und Medizin	54
2.3	Optik	56
2.3.1	Einleitung	56
2.3.2	Transmission und Absorption des Lichtes	57
2.3.3	Lichtbrechung und Dispersion	60
2.3.4	Qualitätsmerkmale optischer Gläser	63
2.3.5	Brechzahl und Abbe-Zahl	63
2.3.6	Optische Systeme	66
2.3.7	Lichtleitfasern	70
2.3.8	Aktive Gläser	71
2.3.9	Substrate für optische Anwendungen mit höchster Formkonstanz	73
2.4	Architektur und Automobilbau	76
2.4.1	Einleitung	76
2.4.2	Glasspiegel	77
2.4.3	Wärmeschutz- und Sonnenschutzgläser	78
2.4.4	Entspiegelte Gläser	81
2.4.5	Gläser mit elektrisch leitfähigen Beschichtungen	82
2.4.6	Gläser mit variabler Lichtdurchlässigkeit	84
2.4.7	Selbstreinigendes Glas	85
2.4.8	Festigkeit	86
2.5	Elektrotechnik und Elektronik	96
2.5.1	Anwendung von Glas in Elektrotechnik und Elektronik	96
2.5.2	Physikalische Grundlagen	98
2.5.3	Einschmelzgläser	101
2.5.4	Gläser zum Löten und Passivieren	104
2.5.5	Substratgläser für die Elektronik	105
2.6	Lampen	107
2.6.1	Einleitung	107
2.6.2	Glühlampen	108
2.6.3	Halogenglühlampen	109
2.6.4	Gasentladungslampen	110
2.6.5	Halbleiter-Lichtquellen (LEDs)	112
2.7	Energie	113

2.7.1	Thermische Isolation	113
2.7.2	Anwendung in der Solartechnik: Solarthermie und Photovoltaik	114
2.7.3	Spezialgläser für den Einsatz in der solarthermischen Stromerzeugung	116
2.8	Telekommunikation	118
2.9	Andere Anwendungen	119
2.9.1	Anwendungen in der Nukleartechnik	119
2.9.2	Glaskeramik im Haushalt und in der Industrie	122
2.9.3	Bioglas	124
2.9.4	Glasflakes	126
2.9.5	Mikro-Glaskugeln	128
2.9.6	Optische Datenspeicherung	129
	Weiterführende Literatur	130
3	Herstellung – Schmelzen und Formgebung von Glas	131
3.1	Einleitung	131
3.2	Glasrohstoffe und Recyclingscherben	131
3.3	Glasschmelzöfen	135
3.3.1	Energiebedarf	137
3.3.2	Flammenbeheizung	138
3.3.3	Elektrobeheizung	140
3.3.4	Umweltschutz	141
3.4	Formgebung	142
3.4.1	Herstellung von Flachglas	143
3.4.2	Herstellung von Behälterglas	148
3.4.3	Herstellung von Rohren	156
3.4.4	Herstellung von Glasfasern	159
3.5	Unkonventionelle Glasherstellverfahren	162
3.5.1	Flammenhydrolyse	162
3.5.2	Sinterverfahren	165
3.5.3	Sol-Gel Verfahren	166
3.5.4	Biogene Gläser	168
	Weiterführende Literatur	169

4	Die Zukunft des Glases	171
4.1	Einleitung	171
4.2	Dünnstgläser: Glas von der Rolle	171
4.3	Hochfestes Glas	174
4.4	Energieeinsparung bei der Glasherstellung	177
4.5	Umweltschutz und Verknappung von Rohstoffen	180
4.6	Metallische Gläser	181
4.7	Ausblick	185
	Weiterführende Literatur	187
5	Anhang	189
5.1	Verbände und Organisationen	189
5.2	Deutsche Universitäten und Institute mit Glasbezug	190
5.3	Ausgewählte Museen rund ums Glas	191
5.4	Wissenswertes zum Thema Glas	191
5.5	Glossar	192
	Sachverzeichnis	197

1.1 Einleitung

„Glas“ – ein Begriff, der uns vertraut ist, den wir im täglichen Leben gebrauchen, ohne ihn sonderlich zu hinterfragen. Wir denken vorrangig an ein Trinkgefäß oder an kunstvoll gestaltete Objekte. Gleichmaßen bezeichnet „Glas“ aber auch eine Klasse von Materialien mit ähnlichen Eigenschaften. Dieses Buch ist dem **Werkstoff** „Glas“ gewidmet: seiner Herstellung, seinen Eigenschaften und Anwendungen sowie den technischen Herausforderungen bei der Suche nach neuen Einsatzgebieten.

Glas ist ein Werkstoff wie etwa Keramik, Metalle oder Kunststoffe. Glas erscheint glatt, scharfkantig brechend, oft durchsichtig und glänzend. Im Vergleich zu Metall – duktil, undurchsichtig – sind Gläser spröde und meist transparent. Mit ihrer porenfreien Oberfläche unterscheidet sich eine Glasscheibe andererseits von der körnigen und porösen Struktur einer Keramik. Das deutsche Wort „Glas“ ist zurückzuführen auf den germanischen Begriff „glasa“ – das Glänzende, Schimmernde. Und im Vergleich zu einem Bergkristall mit seiner regelmäßigen geometrischen Struktur besitzen Gläser keine Vorzugsstruktur.

Wir befassen uns zunächst mit der mehr als 5000-jährigen Geschichte des Werkstoffs Glas von der Entdeckung der Glasherstellung über die vielfältige Nutzung des Materials für Schmuck oder Gefäße bis hin zu den modernen Spezialgläsern mit ihren vielfältigen Anwendungen in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens. Es folgt eine ausführliche Darstellung der Einzigartigkeit des Werkstoffs Glas. Sie beruht auf seiner Struktur als eingefrorene Flüssigkeit, die zu dem besonderen vis-

koelastischen Verhalten des Glases führt. Und wir erfahren mehr über die ungewöhnlichen Eigenschaften einer besonderen Glasanwendung, der Glaskeramik. Den Abschluss bildet eine ausführliche Übersicht der unterschiedlichen Zusammensetzungen heutiger Glastypen.

1.2 Geschichte des Glases

Glasartige Materie findet man in der Natur in vielfältiger Form, da sie sich unter verschiedensten geologischen Bedingungen bilden kann. Die am häufigsten vorkommenden natürlichen Gläser sind *Obsidiane* (s. Abb. 1.1). Sie entstehen durch vulkanische Tätigkeit, wenn das Magma so schnell abkühlt, dass die Gesteinsschmelze keine Kristallite bilden kann und in der ungeordneten Struktur der Flüssigkeit einfriert. Obsidiane wurden bereits in der Steinzeit als Werkzeug zum Schneiden oder als Stichwaffe genutzt. Das sehr harte, muschelig brechende und damit scharfe Kanten erzeugende Material eignet sich hervorragend für Messer, Speer- und Pfeilspitzen.

Abb. 1.1 Obsidian (Bildrechte: Deutsches Museum München)





Abb. 1.2 Zeitstrahl

1.2.1 Frühe Herstellung von Glas

Die Anfänge des künstlichen Glases werden im ägyptischen Raum in der Zeit um 5000 v. Chr. vermutet (s. Abb. 1.2). Glas gehört damit nach der Keramik zu den ältesten hergestellten Werkstoffen. Es ist denkbar, dass im Zusammenhang mit dem Brennen von Keramik zufällig kalkhaltiger Quarzsand in heißem Zustand mit Asche (und damit mit Natrium- oder Kaliumcarbonat) in Berührung kam und zu Glas geschmolzen ist.

Sand, Soda und Kalk, aus denen Glas im Wesentlichen auch heute noch geschmolzen wird, finden sich bereits in der ältesten erhaltenen Glasrezeptur auf Tontafeln der Bibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal (668–626 v. Chr.). Sie lautet übersetzt: „Nimm 60 Teile Sand, 180 Teile Asche aus Meerespflanzen und 5 Teile Kreide – und du erhältst Glas“ (mit der Asche aus Meerespflanzen gewinnt man Soda-Natriumcarbonat Na_2CO_3).

Abb. 1.3 Glasbecher des Pharaos Thutmosis III, um 1450 v. Chr., Höhe 8,1 cm (Bildrechte: Staatliches Museum Ägyptischer Kunst München)



1.2.2 Glas der Antike

Das älteste von Menschen hergestellte Glas wurde bei Ausgrabungen in ägyptischen Königsgräbern entdeckt. Es sind Glasperlen, die in die Zeit um 3000 v. Chr. datiert werden. Mit der damaligen Ofentechnik konnten nur kleine Glasposten erzeugt werden, neben Perlen findet sich Glas aus dieser frühen Zeit auch in Form von Glasuren auf Schmuckstücken und auf Keramikgefäßen.

Parfümfläschchen aus Glas und Reste der bei der Glasherstellung verwendeten Tiegel, die man bei Tell el Amarna (ca. 1350 v. Chr.) in Oberägypten fand, belegen, dass sich um 1500 v. Chr. die Ofentechnik in Ägypten deutlich weiterentwickelt hatte. Die Schmelzöfen konnten nun nicht nur die für Perlen und kleine Figuren nötigen Mengen, sondern auch ausreichend Glas für die Produktion von Gefäßen bereitstellen.

Hohlglas in Form von Vasen und Bechern fertigte man mit der *Sandkerntechnik* (s. Abb. 1.3). Dabei wurden Glasfäden auf eine Sandform gewickelt, nach nochmaligem Erhitzen und Erstarren konnte der Sandkern herausgelöst werden. Durch die unterschiedlichen Farben der Glasfäden und die Veränderung der noch weichen Farbbänder mittels Metallzinken in der Kammzugtechnik entstanden kunstvolle Ornamente.

Die Zeit des Römischen Reiches (ca. 500 v. Chr. bis 400 n. Chr.) kann als erste Blütezeit der Glasherstellung bezeichnet werden. In Sy-

rien wurde ca. 200 v. Chr. die Glasmacherpfeife erfunden, die bis heute in der handwerklichen Fertigung verwendet wird: Mit einem etwa 1,5 m langen Metallrohr mit isoliertem Holzgriffstück wird ein zähflüssiger Glasposten aufgenommen und zu einer Hohlform aufgeblasen. Das Blasen ermöglicht die Herstellung wesentlich dünnwandigerer Hohlformen unterschiedlichster Geometrie.

Voraussetzung hierfür ist eine Glasschmelze, die so dünnflüssig ist, dass man sie durch Blasen formen kann. Den antiken Glasmachern, deren Öfen die erforderlichen Temperaturen von über 1000 °C noch nicht erreichten, gelang dies durch einen zweistufigen Schmelzprozess. Sie stellten zuerst Rohglas in Barren her, das sie für die eigentliche Verarbeitung wieder einschmolzen und dabei weniger Energie benötigten als für eine einstufige Schmelze. Diese Arbeitsteilung war nicht nur sehr effektiv und machte große Mengen an Glas verfügbar, sondern sie gewährleistete auch eine zuverlässig hohe Qualität. An Orten mit Rohstoffvorkommen entstanden Zentren zum Schmelzen des Rohglases. Von dort aus wurde es zur Weiterverarbeitung (auch über große Entfernungen) versandt. Ein Schiffswrack aus dem 3. Jahrhundert n. Chr. entdeckte man an der südfranzösischen Küste mit mehr als drei Tonnen Rohglas an Bord.

Reiche Verzierungen von Glasgefäßen durch Gravuren, Facetten oder Reliefs und vielfältigste Färbungen bis hin zum Rubinglas belegen die hohe Meisterschaft der antiken Glaskunst (s. Abb. 1.4). In römischer Zeit waren zudem bereits mit Metall beschichtete Spiegelgläser und sogar Fensterscheiben aus Glas bekannt, wie Funde in Pompeji (79 n. Chr., unter Lava begraben) zeigen.

Als Folge der Aufteilung in eine primäre Rohglasherstellung und die an anderen Orten mögliche sekundäre Glasverarbeitung verbreitete sich die Glasmacherkunst schnell im ganzen Mittelmeerraum, und mit der Ausdehnung des Römischen Reiches wurden Glashütten in den nördlichen Provinzen, u. a. in Gallien, in Köln und Trier errichtet. Der Untergang des Imperiums jedoch brachte die reiche antike Glaskunst im westlichen Teil des Reiches zum Stillstand. Die Glasherstellung verlagerte sich in das neu entstandene byzantinische Oströmische Reich, die Traditionen lebten dort weiter. Charakteristisch für diese Periode von 400–700 n. Chr. sind gläserne Prunkkannen und Stängelgläser zur Verwendung als Trinkgefäße.

Abb. 1.4 Römisches Diatretglas, Gräberfeld bei Köln-Braunsfeld, 3./4. Jh. n. Chr., Höhe 12,1 cm (Bildrechte: Römisch-Germanisches Museum Köln)



1.2.3 Venedig und die europäische Glaskunst

Über Handelsbeziehungen mit Byzanz kam die Kunst des Glasmachens nach Venedig und damit zurück nach Europa. In Venedig entstand ein neues Zentrum der Glasherstellung und entwickelte sich ab dem 14./15. Jahrhundert zu großer Blüte (s. Abb. 1.5). Den venezianischen Glasmachern gelang es, farbloses *Kristallglas* („cristallo“) als Substitutionswerkstoff für den teuren Bergkristall zu schmelzen, indem sie das in der Regel grünstichige Glas durch Zusatz von Braunstein (Manganoxid MnO_2) entfärbten. Cristallo-Glas wurde in der Renaissance zur Haupteinnahmequelle der Stadt, und die Kunst seiner Herstellung war lange Zeit ein gut gehütetes Geheimnis. Um es zu schützen, wurde die Glasproduktion auf die Insel Murano verlagert. Offiziell mit dem Brandschutz begründet, sollten die Glasmacher mit ihren Familien an die Insel gebunden und damit eine Weitergabe ihres Wissens und Könnens verhindert werden.

Die Ofentechnik erforderte in dieser Zeit noch immer das Erschmelzen der Glasfritte zu Rohglas, um dann die eigentliche Glasverarbeitung mit den erreichbaren Temperaturen zu ermöglichen. Anders als in der

Abb. 1.5 Pokal Facon de Venise, 2. Hälfte 16. Jh., Höhe 24,2 cm (Bildrechte: Historischer Verein Neuburg a. d. Donau, Schlossmuseum Neuburg, Foto: Hajü Staudt)



Antike, wo sich die beiden Stufen des Herstellungsprozesses auf verschiedene Produktionsstätten verteilten, war Venedig ein Glaszentrum, in dem sowohl das Schmelzen des Rohglases als auch die Weiterverarbeitung erfolgte.

Auch in den Waldglashütten im deutschsprachigen Raum, an deren Gründung oft aus Murano entflozene Glasmacher beteiligt waren, wurde nach dieser Technologie produziert – es sind bis ins 18. Jahrhundert Wanderglashütten, die sich am Ort reicher Holzvorkommen ansiedelten. Sie benötigten Holz nicht nur zum Beheizen der Schmelzöfen, sondern in weit größeren Mengen zur Gewinnung des Soda-Ersatzes Pottasche (Kaliumcarbonat K_2CO_3), und zogen weiter, wenn sie die natürlichen Vorräte verbraucht hatten. Die Glasartikel dieser Hütten weisen, bedingt durch Verunreinigungen in den Rohstoffen, einen deutlich grünen Farbton auf, die Waldglasfärbung (s. Abb. 1.6).

Eine bedeutsame Erfindung der Barockzeit ist das Guss-Walz-Verfahren zur Herstellung von Spiegelglas (s. Abb. 1.7). Louis Lucas de Nehou (1641–1728) entwickelte es 1688 in der Glashütte von Saint-Gobain, die der französische „Sonnenkönig“ Ludwig XIV. gegründet hatte, um mit seiner Vorliebe für luxuriöse glanzvolle Spiegelsäle nicht von Venedig abhängig zu sein, das bis dahin allein gute Spiegel liefern konnte.



Abb. 1.6 Waldgläser (Bildrechte: Deutsches Museum München)

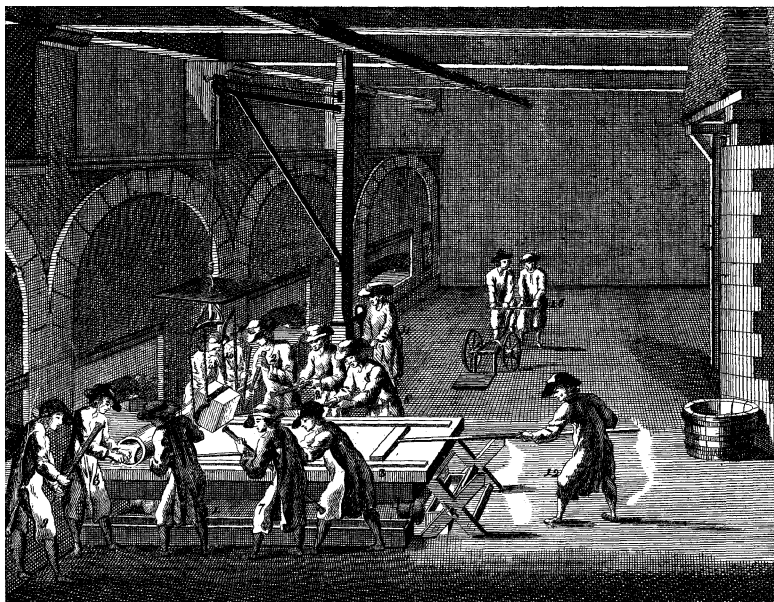


Abb. 1.7 Spiegelglasherstellung

1.2.4 Erste technische Anwendungen von Glas

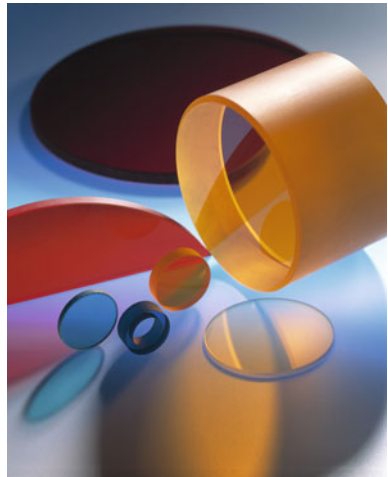
Seit der Erfindung des Glases konzentrierte sich die Nutzung des wertvollen Werkstoffs bis in das 13. Jahrhundert hinein auf Luxusgüter und künstlerische Gestaltungen; man verwendete Glas für die Herstellung von edlen Bechern, kunstvollen Vasen und Behältnissen für kostbare Flüssigkeiten oder auch für die farbigen Fenster von Kirchen.

Doch schon im Mittelalter wurde mit den ersten Brillen zur Korrektur von Fehlsichtigkeiten, die zunächst aus geschliffenen Edelsteinen bestanden und in Italien seit Mitte des 13. Jahrhunderts aus Glas gefertigt wurden, ein erstes technisches Anwendungsfeld für Glas erschlossen. Linsen aus Glas, das sich besser zum Schleifen eignet als kristalline Mineralien, sind dann auch die entscheidenden Bestandteile des 1590 von Zacharias Janssen (ca. 1588–1631) und seinem Sohn konstruierten Mikroskops sowie des 1608 von Hans Lipperhey (1570–1619) erfundenen Fernrohres. Zur Verbesserung der Qualität dieser optischen Instrumente wurde im 18. Jahrhundert das bleihaltige Flintglas entwickelt, das zusammen mit dem bereits bekannten Kronglas die Farbfehler von Linsensystemen abschwächte.

Joseph von Fraunhofer (1787–1826) begann Anfang des 19. Jahrhunderts mit der systematischen Entwicklung neuer optischer Glassorten und deren Anwendung in Linsensystemen für Fernrohre mit vermindertem Farbfehler (Fraunhofer **Achromate**). Der entscheidende Durchbruch gelang schließlich *Otto Schott* (1851–1935) mit seinen Forschungen, die 1881 mit der Entwicklung eines neuen Glastyps (Boratglas) die vollkommene Achromasie (Freiheit von Farbfehlern) bei Fernrohrobjektiven ermöglichten.

Das späte 19. Jahrhundert brachte in schneller Folge weitere Fortschritte in der technischen Anwendung von Glas. 1887 entwickelte *Otto Schott* chemisch resistente und temperaturbeständige Borosilicatgläser, die endlich zuverlässige Messungen mit dem bereits 1654 von *Ferdinando II. de Medici* (1610–1670) erfundenen, wegen der **Nullpunktdepression** jedoch ungenauen Flüssigkeitsthermometern erlaubten. Die überzeugenden Qualitäten der von *Otto Schott* in Zusammenarbeit mit *Ernst Abbe* und *Carl Zeiss* entwickelten speziellen Glaszusammensetzungen begründeten den Ruf des 1884 gegründeten Unternehmens *Jenaer Glaswerke Schott & Genossen* (s. Abb. 1.8). Im Haushalt gehört der

Abb. 1.8 Farbfilterglas
(Bildrechte: SCHOTT AG)



Gebrauch von Borosilicatglas, das oft noch „Jenaer Glas“ genannt wird, zum Alltag. Auch die optischen Gläser für Linsensysteme in Mikroskopen, Ferngläsern und Kameras sind zur Selbstverständlichkeit geworden.

1.2.5 Automatisierungen der Herstellung

Thomas Alva Edison (1847–1931) hatte bei der Entwicklung der elektrischen *Glühlampe* von vornherein einen breiten Kreis von Abnehmern im Sinn. 1880 schloss er mit der Glashütte von Corning, New York (USA), einen Vertrag zur Produktion der Kolben für seine 1879 patentierte Glühlampe. Der Siegeszug des elektrischen Lichts bescherte dem Werkstoff Glas die erste Massenproduktion seiner Geschichte; für die Glashütte von Corning war dies der Beginn des erfolgreichen Aufstiegs zu einem einzigartigen Spezialglasunternehmen. 1926 entwickelten die Corning Glass Works die Ribbon-Maschine, die Tagesproduktionen von mehr als 1 Mio. Stück Glaskolben ermöglichte.

Die Automatisierung und damit die zunehmend kostengünstige Herstellung von Glas für den Alltagsgebrauch fußt auf zwei Errungenschaften des 19. Jahrhunderts: einerseits auf der Erfindung der künstlichen

Soda im Jahre 1865 durch den Chemiker Ernest Solvay (1838–1922), die nicht nur die umständliche und energieaufwendige Gewinnung der Potasche ersparte, sondern auch eine ortsunabhängige und gleichbleibende Qualität des wichtigen Glasrohstoffes garantierte; andererseits auf der Entwicklung eines Wannenofens durch die Brüder Friedrich und Hans Siemens (1826–1904) in den 1860er Jahren, der Glas in einem kontinuierlichen Schmelzprozess bereitstellte.

Damit waren die Voraussetzungen für die ungeheure Produktivität der Ribbon-Maschine wie auch für die anderen Automatisierungsverfahren des 20. Jahrhunderts geschaffen. Es konnten nun große Mengen von Flachglas für Architektur, Fenster und Kfz-Scheiben, aber auch Flaschen, Konservengläser und gläsernes Tischgeschirr für den täglichen Gebrauch produziert werden.

1902 erfand Emile Fourcault (1862–1919) das Fourcault-Verfahren, bei dem ein Glasband über eine auf der Oberfläche des Glasbades liegende keramische Schlitzdüse kontinuierlich nach oben abgezogen wird. Es ermöglichte erstmals die kostengünstige Herstellung von Fensterglas, und der Umweg der Einzelfertigung von Glasscheiben über geblasene Zylinderformen wurde überflüssig.

Bei dem dann 1952 von *Alastair Pilkington* (1920–1995) patentierten Float-Verfahren zur Produktion von Flachglas wird Glas aus der Schmelzwanne auf ein Zinnbad zur Formgebung gegossen. Dadurch erhält das Glas eine exzellente Planität und Oberflächengüte (beidseitige Feuerpolitur). Das Float-Verfahren hat im Bereich des Fensterglases seit den 1960er-Jahren alle anderen Verfahren weitgehend verdrängt. Nur bei der Herstellung von extrem dünnem Flachglas, das mit Dicken von weniger als 1 mm Verwendung als Displayglas von Bildschirmen findet, wird es von dem 1964 von S.M. Dockerty patentierten Corning Down-Draw-Verfahren übertroffen.

Die herausragenden Erfindungen zur kostengünstigen Fabrikation von Hohlglas waren die 1903 von *Michael J. Owens* (1859–1923) entwickelte erste vollautomatische Flaschenglasmaschine und die ab 1925 eingesetzten IS-Maschinen (**I**ndividual **S**ection), die heute bis zu 600 Flaschen pro Minute produzieren.

Abb. 1.9 Glasfaserbündel für Beleuchtungsanwendungen (Bildrechte: SCHOTT AG)



1.2.6 Glas-Innovationen

Die Forschungen der modernen Glaswissenschaft konzentrieren sich in Fortführung der Entwicklungen von Otto Schott auf neuartige Glaszusammensetzungen. Herausragende Beispiele haben längst Eingang in unser Leben gefunden – dabei ist uns oft nicht bewusst, dass es sich um Anwendungen des Werkstoffs Glas handelt. Im Jahre 1953 wurden in den Corning Glass Works die ersten temperaturstabilen Glaskeramiken durch *Stanley Donald Stookey* entwickelt. 1968 brachte die Schott AG die Glaskeramik Zerodur® als Material mit – der Alltagserfahrung widersprechend – thermischer **Nullausdehnung** auf den Markt. Das Jahr 1970 wurde zur Geburtsstunde der Glasfaser (s. Abb. 1.9) für die optische Nachrichtenübertragung, als im Glaswerk von Corning Inc. mit hochreinem Quarzglas erstmals die Dämpfung (Lichtabsorption) unter 20 dB/km gesenkt werden konnte, was einer Transmission von 1 % auf 1 km Faserstrecke entspricht. Heute basiert unser Internet auf Glasfasern mit einer Lichtabsorption von weniger als 0,2 dB/km, einer 95%igen Transmission bei 1 km Faserlänge.

Die Bedeutung des Werkstoffes Glas für unser Leben hat sich im Verlauf vor allem der letzten zwei Jahrhunderte grundlegend gewandelt. Gegenstände aus Glas sind heute keine Luxusgüter mehr, sondern