Spiegelsubstrate für professionelle astronomische Teleskope – ein Überblick

Thorsten Döhring, Sebastian Zeising

Hochschule Aschaffenburg, Fakultät Ingenieurwissenschaften, D-63743 Aschaffenburg

mailto:thorsten.doehring@h-ab.de

In astronomischen GroÇteleskopen sind bei der Auswahl der Spiegelsubstrate technische Auswahlkriterien, kommerzielle Aspekte, sowie Anforderungen des Projektmanagements zu ber¿cksichtigen. Anhand einer Liste von Substraten bestehender Observatorien werden Eigenschaften, Limitationen, Prozessketten und Entwicklungstrends f¿r solche optischen Prªzisionshalbzeuge diskutiert.

1 Einführung

Bei astronomischen Teleskopspiegeln ist deren Funktionalitªt durch eine d¿nne Reflexionsschicht, zumeist aus Aluminium, gegeben. Was bleibt da als Aufgabe des Spiegelsubstrates? Das Substrat dient als Trªger f¿r die Reflexionsschicht, ermºglicht technisch die Spiegelpositionierung und garantiert die Prªzision von Form und Oberflªche unter den Teleskop-Umgebungsbedingungen.

2 Ideale Spiegelsubstrate

Wie sªhe nun ein ideales Spiegelsubstrat aus? Man sollte hier zwischen der geforderten technischen Spezifikation und implizit vorausgesetzten Eigenschaften unterscheiden. Ein ideales Substrat hªtte wohl folgende technische Spezifikationen [1]: thermische Nullausdehnung, hohe Wªrmeleitfªhigkeit, niedrige Wªrmekapazitªt, hohe Steifigkeit, hohe Festigkeit, geringe Dichte und hohe Homogenitªt. Ferner erf¿llt es implizit vorausgesetzte Eigenschaften: Isotropie und Stabilitªt aller Materialeigenschaften, einfache Messbarkeit dieser Parameter, exzellente Polierbarkeit, ideale Elastizitªt, hºchste Bestªndigkeit bei chemischen Schichtablºsungsprozessen, Unzerbrechlichkeit, Ungiftigkeit und Umweltfreundlichkeit.

Daneben gibt es auch Anforderungen des Projektmanagements. Hier ist ebenfalls zwischen expliziten und impliziten Forderungen zu unterscheiden. Eine kommerzielle Anforderung ist die preisg¿nstige Beschaffung des Substrates. Implizit werden aber weitere Eigenschaften vorausgesetzt: preisg¿nstige Bearbeitungs-, Polier- und Beschichtungsprozesse sowie eine langfristige Lieferbarkeit f¿r jede Form, GrºÇe und Menge - mit kurzen Lieferzeiten. Ferner sollte das Produkt in vielen Anwendungen seit langer Zeit bewªhrt haben.

Alle gelisteten Anforderungen an ein ideales Spiegelsubstrat sind real nicht gleichzeitig erf¿llbar, sie widersprechen sich sogar teilweise. Ein solches ideales Material f¿r Spiegelsubstrate existiert somit nicht und es kann dieses auch nicht geben [1].

3 Materialien für reale Spiegelsubstrate

Daher wird nun betrachtet, welche Materialien f¿r reale astronomische Spiegelsubstrate eingesetzt werden bzw. wurden [2] [3]. Diese Materialien lassen sich in sieben Gruppen klassifizieren: Glªser (Borosilikatglas, Kalk-Natron-Glas), Quarzglas (SiO_2, ULE), Glaskeramik (Cervit, Zerodur, Sitall, Clearceram), Keramik (SiC, Cesic), Komposite (CFK und andere Verb¿nde), Metalle (Kupfer, Beryllium, Aluminium, Stahl, Silizium, Speculum) sowie fl¿ssige Metalle (Quecksilber). Die Unterstreichungen kennzeichnen dabei jene Substratmaterialien, die bereits f¿r groÇe monolithische Spiegel (> Ï 3m) verwendet wurden.

In der folgenden Grafik sind mehrere Materialien bez¿glich den wichtigen KenngrºÇen thermische Stabilitªt (Quotient aus Ausdehnungskoeffizient α und Wªrmeleitkoeffizient λ) und spezifischer Steifigkeit (Quotient aus Elastizitªtsmodul E und Dichte ρ) angeordnet. Auf den ersten Blick erscheint insbesondere SiC hier als gut geeignet, Borosilikatglas dagegen als eher ungeeignet.

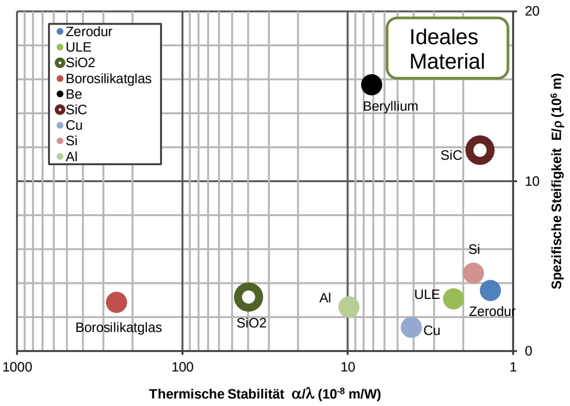

***Abb. 1** Kennzahlen einiger Spiegelsubstratmaterialien.*

4 Der Markt für Astronomie-Spiegelsubstrate

Die Betrachtung des Marktes wurde auf Monolithen mit einem Durchmesser grºÇer als 3m

beschränkt. Segmentierte Spiegel sind daher nicht berücksichtigt. In der folgenden Grafik sind die Spiegel bestehender und in Bau befindlicher Observatorien aufgetragen, und zwar der Durchmesser gegenüber dem Inbetriebnahmejahr [3] [4]. Die Materialien der jeweiligen Substrate sind mit unterschiedlichen Symbolen gekennzeichnet.

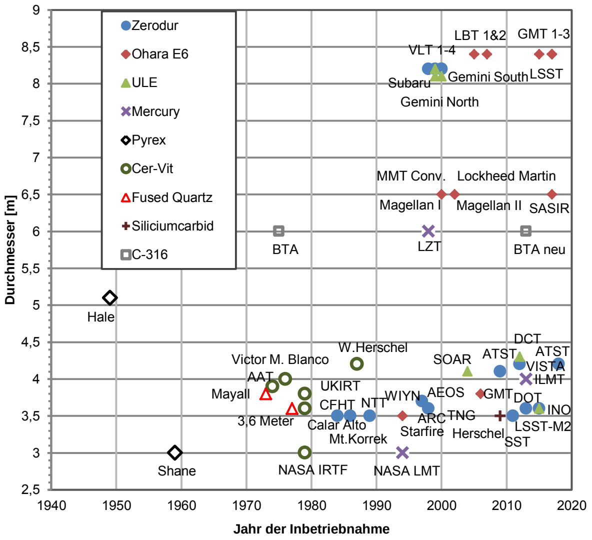

__Abb. 2__ Durchmesser monolithischer Spiegelsubstrate in astronomischen Observatorien im historischen Kontext.

Für die Interpretation ist eine Unterteilung nach Größenklassen vorgenommen. Bei Spiegeln mit Durchmessern zwischen 3m und 5m sind ⅔ der Substrate aus Nullausdehnungsmaterialien gefertigt, insbesondere aus Zerodur. Trotz vordergründig guter Eigenschaften wurde nur beim Herschel-Satelliten SiC eingesetzt, wohl wegen Herausforderungen bei Herstellung und Politur [5].

Obwohl Borosilikatglas im Kennzahlenvergleich der Materialien eher ungünstige Eigenschaften aufweist, sind ⅔ der prestigeträchtigen Riesenspiegel in der Größenklasse oberhalb von 5m daraus gefertigt. Für die Auswahl der Substrate sind hier wohl vorrangig nichttechnische Aspekte, wie wirtschaftspolitische Einflüsse und die Marketingstrategie des Herstellers im Zusammenhang mit impliziten Anforderungen des Projektmanagements, ausschlaggebend. Ein freier Wettbewerb der Substratanbieter ist so nur bedingt gegeben.

5 Technologische Trends

Anhand von Beiträgen auf einschlägigen Konferenzen lassen sich aktuelle Technologietrends bei astronomischen Spiegelsubstraten identifizieren [6]. In Schlagworten sind dies die Serienproduktion von Spiegelsegmenten, Spiegel mit kürzeren Brennweiten, Fertigung komplexer Asphären, Verwendung neuer Materialien (SiC, CFK, Al, …), größere und komplexere Leichtgewichtsstrukturen, Verbindungstechnologien, Ätztechnologien (bei Zerodur), Festigkeitsuntersuchungen, genauere Wärmedehnungsmessungen und eine kundenspezifische Einstellung der Wärmedehnung.

6 Chancen und Risiken

In Europa steht die astronomische Wissenschaft in Zeiten der Finanzkrise vor neuen Herausforderungen. Auch in den USA droht aus Geldmangel die Stilllegung einiger Großteleskope. Marktrisiken für die Herstellung großer monolithischer Spiegelsubstrate sind neben diesen Budgetkürzungen im Wissenschaftsbereich die zunehmende Verwendung segmentierter Teleskopspiegel. Somit könnten große Spiegelsubstrate wissenschaftlich und für Hersteller auch ökonomisch an Attraktivität verlieren und ein Auslaufmodell darstellen.

Andererseits bietet dieser Markt auch neue Chancen: Schwellenländer planen nun ebenfalls große Teleskope, die segmentierten ELT-Primärspiegel benötigen große Sekundärspiegel oder sind wie beim GMT sogar aus riesigen Einzelspiegeln zusammengesetzt. Sonnenteleskopspiegel und gewichtserleichterte Satellitenoptiken werden immer größer und Großteleskope werden für Spezialanwendungen wie die Exoplanetensuche interessant. Damit werden wohl auch in der nächsten Dekade große astronomische Spiegelsubstrate benötigt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Professionelle astronomische Großteleskope sind komplexe optische Hochtechnologiesysteme an der Grenze der technischen Machbarkeit, die oftmals monolithische Primärspiegel mit riesigen Abmessungen verwenden. Die Entscheidung bei der Auswahl der Spiegelsubstrate wird dabei häufig nicht nur nach technischen Kriterien getroffen, Anforderungen des Projektmanagements, wirtschaftspolitische Einflussnahme und kommerzielle Aspekte geben oftmals den Ausschlag.

Literatur

[1] T. Döhring et al.: "Mirrors for solar telescopes made from ZERODUR glass ceramic," Proc. SPIE Vol. 6689 (2007), S. 66890X

[2] P. Dierickx: “Optical fabrication in the large”, Proc. of Bäckaskog Workshop (Lund University & ESO, 1999), S. 224

[3] J. M. Hill: “Reflecting Telescopes”, Stand: 11.6.2013 *http://abell.as.arizona.edu/~hill/list/bigtel99.htm*

[4] T. Westerhoff et al.: „Progress in 4 m class Zerodur mirror production“, Proc. SPIE Vol. 8126 (2011), S. 81260A

[5] R. Geyl, M. Cayrel: “Low CTE Glass, SiC & Beryllium for lightweight mirror substrates”, Proc. SPIE. Vol. 5965 (2005), S. 59651F

[6] P. Hartmann et al.: “Zero-expansion glass ceramic Zerodur – Recent developments reveal high potential”, Proc. SPIE. 8450 (2012), S. 845022