

# Neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten



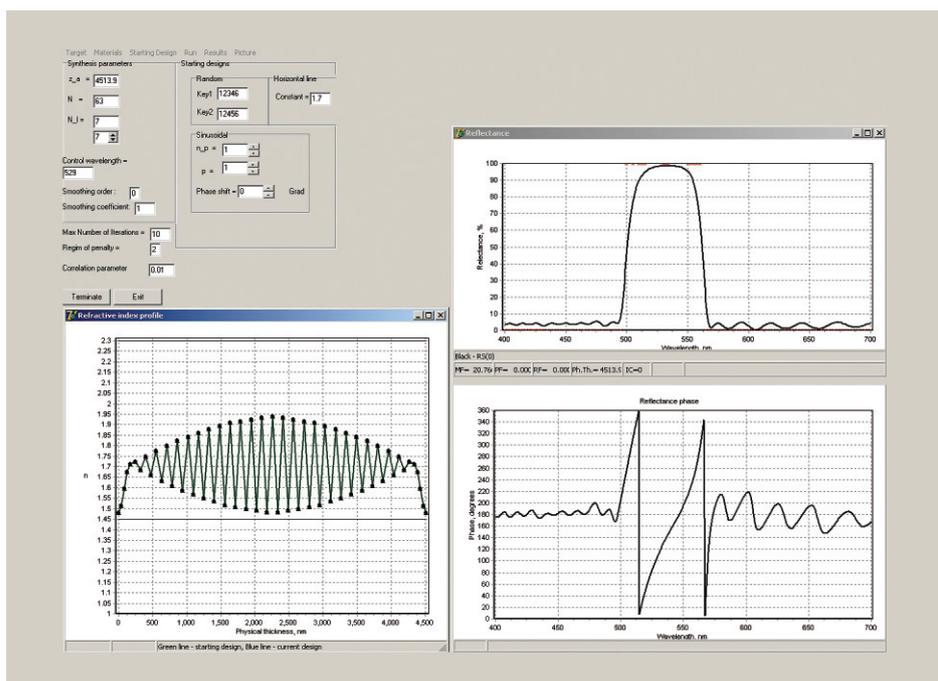
Norbert Kaiser

Eine der grundlegendsten optischen Technologien, die zu einer erheblichen Leistungssteigerung optischer Systeme geführt hat, sind optische Beschichtungen. Mit optischen Schichten können Oberflächen für die vielseitigen Anforderungen einer extrem reichhaltigen Palette von modernen und zukünftigen optischen Anwendungen maßgeschneidert werden. Neben der Möglichkeit der direkten Anpassung der spektralen Transmissionseigenschaften sind optische Schichten in der Lage eine Vielzahl anderer Oberflächeneigenschaften zu realisieren, wie z. B. die Umweltstabilität der Oberflächen, die Abriebfestigkeit oder Selbstreinigungseffekte. Die nächste Generation von optischen Schichten wird noch weiter gehen und optische

Eigenschaften mit anderen anspruchsvollen Anforderungen verbinden, etwa Sensorfunktion oder die Kontrolle von selektiven Übertragungsparametern. Schon heutzutage sind optische Schichten in nahezu allen optischen Komponenten, von Brillengläsern über Fließbandprodukte wie Ferngläser, CD Spieler, Kameras bis hin zu »high end«-Produkten, wie sie in der Grundlagenforschung oder in der Laser- und Informationstechnologie benötigt werden, funktionsbestimmend. Auf vielen »high tech«-Gebieten definiert die Qualität optischer Schichten die technologischen Grenzen und die Effizienz des optischen Systems und der damit verbundenen Anwendung. Daher werden optische Schichten als eine der entscheidenden Schlüsseltechnologien angesehen, die auch weiterhin den Fortschritt in vielen Applikationen und zukünftigen Entwicklungen bestimmt. Dieser Beitrag informiert über neue Entwicklungen auf dem Gebiet optischer Schichten am IOF Jena.

Abb. 1: Rugate Design Modul zur Berechnung der Reflexion eines apodisierten Rugatefilters mit einer Gesamtdicke von 4514 nm. Unten links: Brechzahlprofil. Oben rechts: Filterreflexion bei senkrechtem Lichteinfall. Unten rechts: Phase der reflektierten Welle.

Fig. 1: Rugate design module calculating the reflectance of an apodized rugate filter with a physical thickness of 4514 nm. Bottom on left: Refractive index profile, top on right: normal incidence reflectance, bottom on right: reflectance phase.



## Einführung

Optische Schichten, in der Regel mehrlagig, dienen zum Einstellen der optischen Eigenschaften (Reflexion, Transmission, Absorption) einer Oberfläche. Ihre Funktion beruht auf dem Interferenzeffekt und den intrinsischen Eigenschaften (Absorption) der Schichtmaterialien. Optische Schichten müssen sub-nm genau, also atomgenau, hergestellt werden. In den letzten Jahren wurden dabei erhebliche Fortschritte erzielt, die vor allem auf den Gebieten Design, Herstellung und Charakterisierung liegen. Es gibt jedoch noch erhebliche Defizite, um mit den Anforderungen an die moderne Optikentwicklung Schritt zu halten. Diese stellen einen wichtigen Forschungsschwerpunkt am IOF Jena dar.

# Latest developments in the field for coatings for optical instrumentation

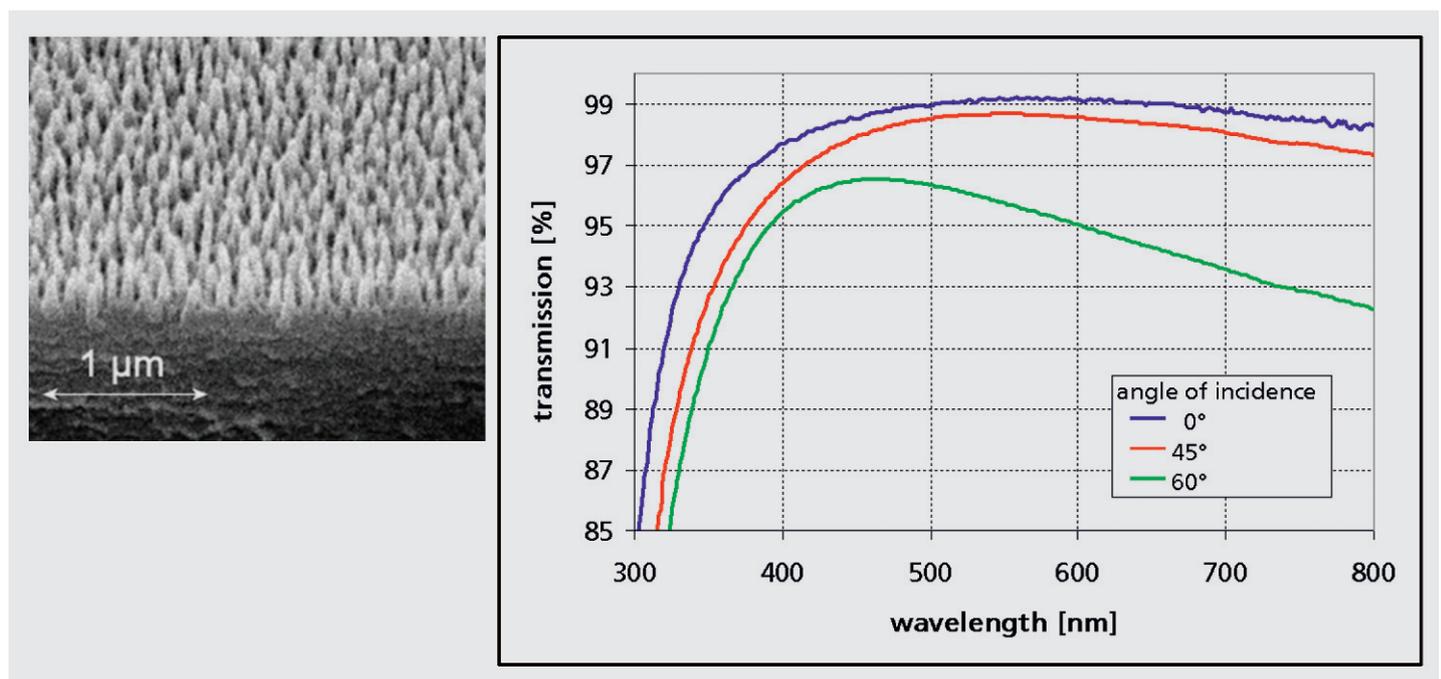
Optical devices are addressing an ever-increasing number of industrial and research applications: imaging and vision, health care, security, space, telecommunications, transportation, industrial process control, laser fusion, solar energy utilization etc. As users expect increasingly demanding performances optical systems designers and manufacturers are faced with growing challenges. This overview will be devoted to coatings, with special emphasis on the latest IOF developments in the fields of optical instrumentation. Examples of theoretical, experimental, and technological aspects will cover both fundamental and applied research, as well as development, practical techniques and applications.

## Introduction

Optical coatings are usually multilayer film structures used to obtain desired transmittance, reflectance and absorbance from surfaces. The characteristic may be due to the intrinsic property of the material (e.g. metal reflectors) or due to interference effects. Today optical thin films are involved in numerous optical systems where they constitute a key to their ultimate performance. For most applications, high accuracy is required on both the optical and non-optical properties, including low-loss energy balance, mechanical and thermal behaviour, damage threshold and non-linear properties.

Abb. 2:  
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer PMMA-Oberfläche mit Antireflexstruktur (links) und gemessene Transmission einer beidseitig geätzten PMMA-Scheibe für unterschiedliche Lichteinfallswinkel (rechts).

Fig. 2:  
Scanning electron micrograph of PMMA surface with ion-etched antireflective microstructure (left) and spectral transmission for different light incidence angles, measured after etching of both sides of a plane sample (right hand).



## Schichtdesign

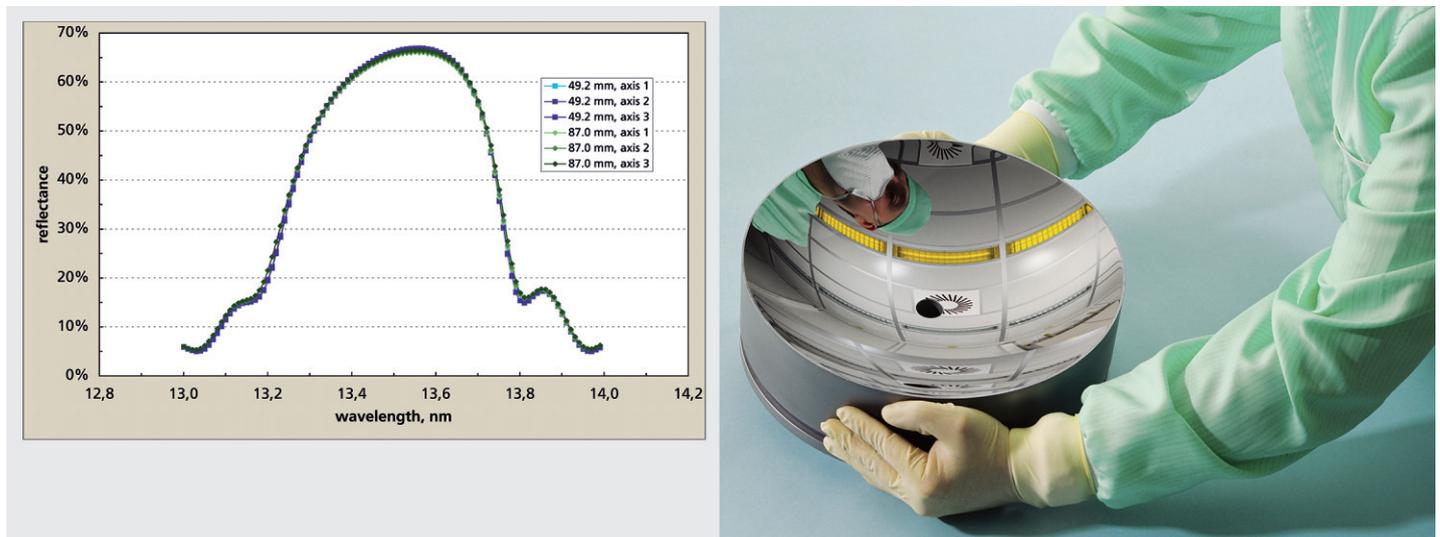
Das Schichtdesign ist der erste Schritt bei der Schichtherstellung. Es entsteht eine Schichtfolge für den Herstellungsprozess, ein Leitfaden für die Monitorierung der Schichten während der Herstellung und die Grundlage für die Erkennung von Beschichtungsfehlern (reverse engineering). Moderne Designsoftware kann nur in einer engen Symbiose mit den praktischen Aspekten der Schichtherstellung erfolgreich eingesetzt werden. Im Unterschied zum klassischen Optikdesign gibt es das reine Schichtdesign als ein abgeschlossenes Tätigkeitsfeld nicht. Das Schichtdesign ist ein Bestandteil der Schichtherstellung und wird in der Regel von den Personen durchgeführt, die auch die Schichten herstellen und charakterisieren. Am IOF wurden neue Designwerkzeuge entwickelt, die besonders für inhomogene Brechzahlverläufe (Abb. 1) hervorragende Produktionsunterstützung gewährleisten [1].

## Optische Schichten für transparente Kunststoffe

Präzisions- und Gebrauchsoptiken aus transparenten Kunststoffen ersetzen heute an vielen Stellen optische Bauteile aus Glas. Von Vorteil sind das geringe Gewicht sowie die hohe Bruchfestigkeit, aber in besonderem Maße auch die Möglichkeiten zur Formgebung. So können komplizierte asphärische Oberflächen im Spritzgussverfahren oder Fresnelstrukturen durch Heißpressen kostengünstig in hohen Stückzahlen abgeformt werden. Die für High-End-Produkte immer häufiger geforderte optische Funktionalisierung, hauptsächlich die Entspiegelung (Abb. 2), sowie verbesserte Kratzschutz- und Barriereigenschaften können durch Aufdampfen von dünnen Schichten erzielt werden. Die Entwicklung von qualitativ hochwertigen Beschichtungen für Kunststoffoptiken ist zu einem wesentlichen Faktor im Verdrängungswettbewerb mit den klassischen Glasoptiken geworden.

Abb. 3:  
Mo/Si beschichteter EUV-Kollektorspiegel speziell für Hochleistungs-LPP-Quellen.  
 $R > 66,5 \%$ ,  $\lambda = 13,500 \text{ nm}$ , Bandbreite der R-Kurve  $> 0,510 \text{ nm}$ , Standardabweichung der Peakwellenlänge =  $0,001 \text{ nm}$  (Messungen: PTB Berlin, BESSY II).

Fig. 3:  
Mo/Si coated EUV collector mirror for high-power LPP sources.  $R > 66.5 \%$ ,  $\lambda = 13.500 \text{ nm}$ , Bandwidth of reflectivity at half maximum  $> 0.510 \text{ nm}$ , standard deviation of peak wavelength =  $0.001 \text{ nm}$  (measurements: PTB Berlin, BESSY II).



Great progress has been made in almost all aspects. However, there are still problems and barriers to overcome. Identification and possible solutions represent an important aspect of research and development at IOF Jena.

---

## Coating Design

Coating design is part of the manufacturing process of optical coatings itself. It generates the layer sequence for the production run, assists the monitoring of the deposition process during the run, and enables a reverse engineering after the run. Computer-assisted coating design does not reduce the need for comprehensive knowledge, skill, and experience in thin-film optics both in theory and in practice. Coating design needs thin-film design software consisting of packages for input, analysis, refinement, synthesis, and manufacturing assistance. New IOF tools give insight into how optical coatings function and how they might be designed to meet given requirements (Fig. 1) /1/.

---

## Multifunctional coatings and structures on plastic optics

Injection moulded or hot-embossed polymer optics can replace glass optics as long as improved properties or lower costs can be achieved with the plastic parts. The problems with handling polymers in coating processes stimulate new coating or treatment techniques /2/. An alternative possibility to decrease the reflection on polymer surfaces is the use of appropriate layers with decreasing effective index

from substrate site to air. Investigations show that the application of special ion bombardment conditions leads to stochastic antireflective structures on acrylic surfaces: so-called "NANO-moth eyes" (Fig. 2). The plasma source of a Leybold APS has been used to perform the etching step. The performance of the antireflective structure is much less sensitive to the angle of light incidence compared to interference coatings.

In summary, this procedure should be favourably applied on curved and microstructured surfaces, but only on surfaces that do not have to be touched or cleaned later. Cost effective mass production may be possible by direct ion etching for small optical parts, as well as by replication of the structure onto larger parts.

---

## XUV Optics

Today, XUV optics is regarded as one of the most important segments in optics. It can sufficiently extend the application of the modern optics, satisfy the gradual requirements in fabrication of high volume integrated circuits, space optics, and novel characterization methods for materials and life sciences, and therefore is an intensively active research field at IOF Jena /3/.

XUV optics can be found in many applications starting with extreme ultraviolet lithography, space technologies, and synchrotron radiation (Fig. 3). Meanwhile, it plays a significant role in many development fields, such as physics, chemistry, astrophysics, biology, medicine. The efficiency of numerous applications in innovative and future technology fields are still limited by the quality of XUV optics.

Eine hochinteressante Alternative zur Entspiegelung durch Interferenzschichtsysteme bietet das Einbringen einer Subwellenlängen-Oberflächenstruktur mit Antireflexeigenschaften /2/. Diese kann praktisch z. B. mit einer Ionenquelle APS (Leybold-Optics) hergestellt werden (Abb. 2).

## XUV Optiken

Optiken für kurze und extrem kurze Wellenlängen im XUV sind heute einer der kritischsten Bereiche der Optischen Technologien. Die extremen Anforderungen sind nur mit sehr hohem Zeit- und Kostenaufwand schrittweise realisierbar. Nur wenige Entwickler und Hersteller weltweit haben dieses Niveau erreicht. Motiviert sind die Anstrengungen durch den riesigen und profitablen Halbleitermarkt. Aber auch zahlreiche Anwendungen außerhalb der Lithographie wie XUV-Astrooptiken, Synchrotronoptiken und XUV-Mikroskope haben dazu geführt, dass dieser extreme Spektralbereich intensiver Forschungsgegenstand am IOF ist /3/. Neue Anwendungen in verschiedenen Bereichen der Festkörper- und Astrophysik, Chemie, Biologie und Medizin sind derzeit nur noch von Fortschritten der Optiken begrenzt. Heute liegt der Schwerpunkt jedoch auf der EUV-Lithographie. Die definierte Abscheidung hochreflektierender Gradientenschichtsysteme auf ultrapräzise gefertigten Substraten ist gegenwärtig eine der größten Herausforderungen (Abb. 3).

## Aktuelle Entwicklungen

Die wichtigsten Trends /4 – 6/ sind:

- Prozesskontrolle und in-situ Monitoring (siehe Abb. 4)
- Transfer neuer Beschichtungstechnologien in die Produktion
- Beschichtungen für die Lithographie (193 nm Immersion und EUV 13,5 nm)
- Beschichtung von Kunststoffen
- Multifunktionale Schichtsysteme (optisch, mechanisch, elektrisch)
- Spannungsreduzierte Schichtsysteme
- Metall-dielektrische Systeme für die Luft- und Raumfahrt

## Zusammenfassung

Schichttechnologien sind für die Entwicklung von konkurrenzfähigen Neuerungen in der Optik eine unabdingbare Voraussetzung. Das enorme wirtschaftliche Potential wird noch unterstrichen von den großen Nettoumsätzen, die mit optischen Schichten erzielt werden. In vielen Technologiegebieten schwankt das Verhältnis der Kosten des fertigen Produktes zu den Schichtkosten zwischen 10 und 1000.

Im Laufe der schnellen Entwicklung der optischen Technologien werden die europäischen Firmen durch neue anspruchsvolle Aufgaben herausgefordert, die aktuellen Produktionszyklen für optische Schichten und Komponenten zu revolutionieren.

Als Hauptanwendungen seien hier die Informationstechnologie, die Halbleiterlithographie, die Medizin, neue Laseranwendungen und die »life sciences« genannt. All diese stellen an die Dünnschichttechnologie Anforderungen, die weit über die Grenze der momentan verwendeten Beschichtungstechniken hinausreichen.

Literatur:

- /1/ Stenzel, O.; Kaiser, N.: dieser Jahresbericht, S. 76.
- /2/ Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.: dieser Jahresbericht, S. 78.
- /3/ Yulin, S. et al.: dieser Jahresbericht, S. 80.
- /4/ Amra, C.; Kaiser, N.; Macleod, A. (Eds.): *Advances in Optical Thin Films II*, September 13 – 15, 2005, Jena, SPIE Vol. 5963.
- /5/ Kaiser, N.: *Optical coatings – trends and challenges for the present and the future*, *Glass Coatings*, 44-50, 3 (2005).
- /6/ Kaiser, N.; Pulker, H. K. (Eds.): *Optical Interference Coatings*, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003).

## Actual Topics

Focus is on optical films that combine optical design with micro structural features tailored on the nm- and  $\mu\text{m}$ -scale and engineered band gap to functional characteristics such as mechanical and chemical protection, electrical conductivity, gas and vapour permeability, and others. Evaluation of film stability and integrity in harsh physical and chemical environments, their compatibility with novel substrate materials (including organic polymers), business aspects, experimental designs, and industrial scale-up are important as well.

Some actual trends /4 – 6/ are:

- Integration of coating technologies into production lines
- Process control and monitoring (see Fig. 4)
- Optical and protective coatings on plastics
- Coatings for lithography (193 nm immersion and EUV 13.5 nm)
- Multifunctional systems (optical, mechanical, electrical)
- Stress reduced systems
- Metal-dielectrical systems for air and space applications

## Summary

Optical coatings provide the means to engineer the properties of optical surfaces according to the various demands of an extremely broad range of applications in modern and future Optical Technologies. Besides the direct adjustment of the spectral transfer function, optical coatings are employed to optimise a variety of other surface characteristics including for example environmental stability, abrasion resistance or self-cleaning effects. The next generation of optical coatings will even go further and combine optical properties with other sophisticated features as for instance with a sensory functionality or also with an active control of selected transfer parameters. Today, optical coatings can be found in nearly every technical device, from ophthalmic glasses, to mass products such as cameras, binoculars, price scanners, or disc players, up to high-end products including complex optical systems for fundamental research, information and laser technology.

In many high technology areas, the quality of the available optical coatings defines the technical limits of the optical systems and the efficiency of the related applications. Therefore, optical coatings are considered as one of the critical enabling technologies governing further progress in many future developments and applications. As a direct key for the development of competitive innovations in the Optical Technologies, leadership in optical thin film technology is an indispensable prerequisite at IOF for an economic area of highest technology status.

### References

- /1/ Stenzel, O.; Kaiser, N.: this report, p. 77.
- /2/ Schulz, U.; Munzert, P.; Kaiser, N.: this report, p. 79.
- /3/ Yulin, S. et al.: this report, p. 81.
- /4/ Amra, C.; Kaiser, N.; Macleod, A. (Eds.): Advances in Optical Thin Films II, September 13 – 15, 2005, Jena, SPIE Vol. 5963.
- /5/ Kaiser, N.: Optical coatings – trends and challenges for the present and the future, Glass Coatings, 44-50, 3(2005).
- /6/ Kaiser, N.; Pulker, H. K. (Eds.): Optical Interference Coatings, Springer Series in Optical Sciences, Volume 88 (2003).

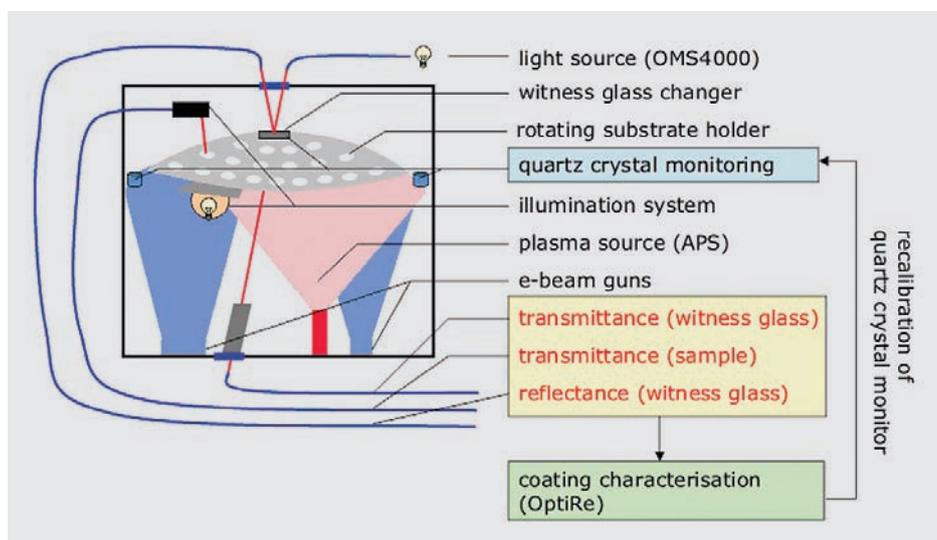


Abb. 4: Prinzip des optischen Breitbandmonitoring für plasma-ionengestützte Beschichtungen.

Fig. 4: Principle of optical broadband monitoring for plasma-ion assisted electron beam evaporation.