

# Hochgenaue Verlustmessungen für optische Schichten und Materialien Cavity Ring Down mit Weißlicht

Tobias Baselt, Fabiola Basan und Peter Hartmann (Institut für Oberflächentechnologien und Mikrosysteme, Westsächsische Hochschule Zwickau)

Eine Basistechnologie zur Fertigung von optischen Komponenten ist die Herstellung verlustarmer Schichtsysteme. Der zentrale Parameter für die Klassifikation einer hochreflektierenden Schicht ist der spektrale Reflexionsfaktor  $R(\lambda)$  bzw. der entsprechende Transmissionsverlust eines transparenten Bauteils oder einer Antireflexschicht. Ein an der Westsächsischen Hochschule entwickeltes breitbandiges Messverfahren zur hochgenauen Bestimmung optischer Verluste (besser  $10^{-5}$ ) nutzt ein homogenes Superkontinuum (500 nm – 1650 nm), erzeugt mit Hilfe einer Photonischen Kristallfaser, welche mit NANOsekundenpulsen eines passiv gütegeschalteten Nd:YAG-Mikrochiplaser gepumpt wird.

## Spektralphotometrie contra Cavity Ring Down

Insbesondere für sehr hohe Reflexionsfaktoren  $R > 99,99 \times$  bzw. sehr geringe Transmissionsverluste ist die Anwendung herkömmlicher Reflexions- bzw. Transmissionsmessungen nicht mehr möglich. Sowohl die rauschbegrenzte Nachweispfeifähigkeit der entsprechenden Detektoren als auch die Intensitätsstabilität der eingesetzten Laserquellen verursachen in diesem Fall signifikante Messfehler, die deutlich größer als die zu messenden Intensitätsunterschiede sind. Eine Alternative zur direkten Intensitätsmessung ist die Analyse des Zeitverhaltens eines optischen Aufbaus. Im Zentrum steht die aus der Cavity-Ring-Down-Spektroskopie [A. ÓKeefe, D.A.G. Deacon, Rev. Sci. Instrum. 59, 2544 (1988)] bekannte Messanordnung, bei welcher die zu messende Schicht Bestandteil eines stabilen optischen Resonators hoher Güte (cavity) ist. Die Messung des zeitlichen Abfalls der transmittierten Intensität eines Laserpulses (ring down) ermöglicht die Bestimmung der Verluste des optischen Resonators und damit der Reflektivität der Spiegel oder des Verlustes eingebrachter optischer Schichten bzw. Medien (Abb. 1).

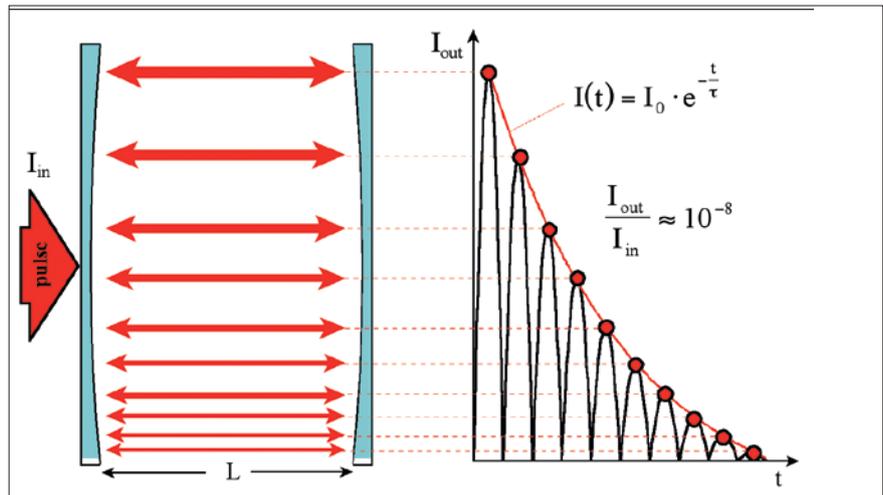


Abb. 1: Grundprinzip der Cavity Ring Down Technik (CRD).

## Cavity Ring Down mit Weißlichtpulsen?

Ein wesentlicher Nachteil der etablierten CRD-Techniken ist der eingeschränkte Wellenlängenbereich der typischerweise eingesetzten abstimmbaren Laserquellen. Der Einsatz einer Weißlichtquelle hingegen ermöglicht die Ausdehnung der Arbeitswellenlänge vom sichtbaren Spektralbereich bis in den nahen Infrarotbereich.

Entscheidend für die Messgenauigkeit und die Dynamik des Messverfahrens sind die Brillanz und das Zeitverhalten der Weißlichtquelle. Für stabile, reproduzierbare Einkopplung der Lichtpulse in den optischen Resonator ist der Einsatz einer Faserkopplung zwischen Weißlichtquelle und cavity praktisch unabdingbar. Die Flankensteilheit der Anregungspulse limitiert die maximal messbaren Verluste. Die Rückflanke der Messpulse sollte sehr stabil und ▶

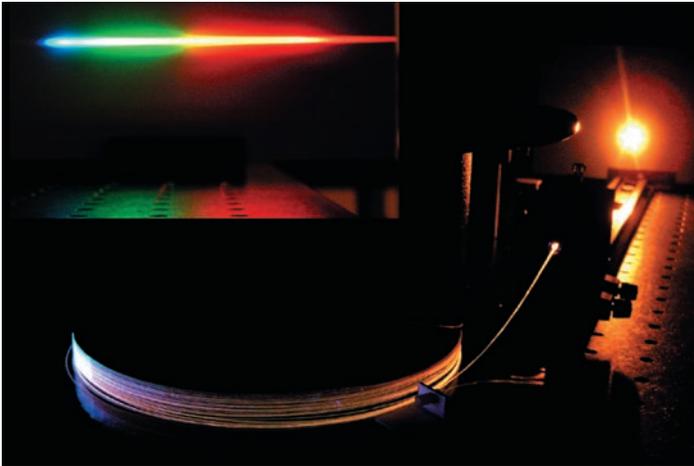


Abb.2: Spektral zerlegtes Superkontinuum (500 nm bis 1650 nm, typische spektrale Leistungsdichte 0,9  $\mu\text{W}/\text{nm}$ , Intensitätsschwankungen kleiner 7 dB) erzeugt in einer Photonischen Kristallfaser (Nulldispersionswellenlänge 1040nm) gepumpt mit einem passiv gütegeschalteten NANOsekunden Nd:YAG-Mikrochiplaser (IMPEX HighTech GmbH).

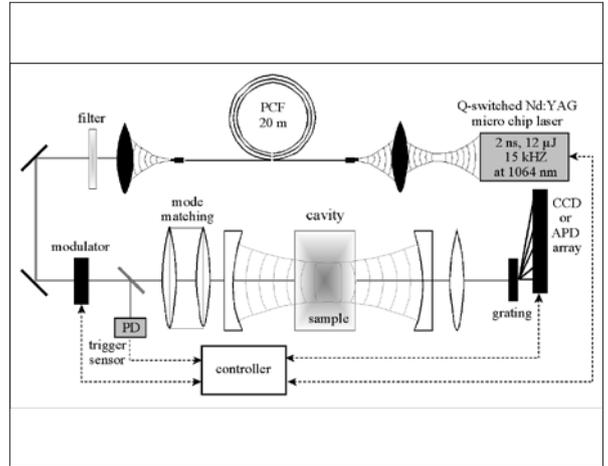


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau des Weißlicht-CRD-Verlustmessplatzes

kürzer als  $t_f \leq 1 \mu\text{s}$  sein. Mechanooptisch modulierte Weißlichtquellen (thermische Lichtquellen, cw-Laser), aber auch Blitzlampen sind dafür ungeeignet. Optimal für breitbandige CRD-Verlustmessungen ist der Einsatz einer sogenannten Superkontinuumquelle. Unter dem erstmals von Alfano und Shapiro [R. R. Alfano, and S. L. Shapiro, „Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass“, Physical Review Letters 24, 584 (1970).] beschriebenem Superkontinuum versteht man extrem breitbandige Strahlung, erzeugt durch die spektrale Verbreiterung eines monochromatischen Laserpulses hoher Intensität in einem stark nichtlinearen Medium.

Für die CRD-Messungen kommt eine Superkontinuumquelle bestehend aus einer 20 m langen Photonischen Kristallfaser (Nulldispersionswellenlänge 1040 nm) gepumpt mit einem passiv gütegeschal-

teten Nd:YAG-Mikrochiplaser (IMPEX HighTech GmbH, Pulslänge  $t_w = 2 \text{ ns}$ ,  $E_p = 12 \mu\text{J}$ , Wiederholrate 15 kHz) zum Einsatz. Das hoch brillante Superkontinuum besitzt im Bereich 500 nm bis 1650 nm eine flache Leistungskurve (typische spektrale Leistungsdichte 0,9  $\mu\text{W}/\text{nm}$ , Intensitätsschwankungen kleiner 7 dB) und eine Flankensteilheit der Weißlichtpulse von  $t_f \leq 1 \text{ ns}$ .

### Reinraum oder Flowbox?

Die Abbildung 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Verlustmessplatzes. Ein PC (lab view-Programm) steuert über den Controller des Mikrochiplasers und einen zusätzlichen Modulator die Erzeugung der Superkontinuumpulse synchron zur Datenaufnahme. Die vorgefilterten Weißlichtpulse werden durch ein Linsensystem an den optischen Resonator angepasst.

Die Probe ist Bestandteil des optischen Resonators, entweder direkt im Modenvolumen (Antireflexbeschichtungen, hochtransparente Materialien unter dem Brewsterwinkel) oder als einer der Resonatorspiegel (hochreflektierende Beschichtungen). Der Signalnachweis erfolgt mit Hilfe eines Arrays von Lawinendioden bzw. einen schnellen sequenziell arbeitenden CCD-Sensor.

Zur Messung extrem geringer Verluste im ppm-Bereich muss das aktive Messvolumen gegen Umgebungseinflüsse abgeschirmt werden. Die Abbildung 4 zeigt den kompakten transportablen Messaufbau integriert in eine Miniflowbox (elektronische Komponenten und der Controller im Gehäuseunterteil). Im Messvolumen wird ca. zwei Minuten nach dem Probenwechsel eine Partikelkonzentration (0,5  $\mu\text{m}$  Partikel) von kleiner 1000 Partikel pro Quadratzoll erreicht. ▶

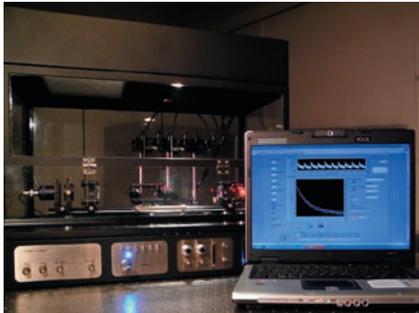


Abb. 4: Kompakter Messaufbau integriert in eine Miniflowbox. Die elektronischen Komponenten sowie der Controller sind im Gehäuseunterteil untergebracht.

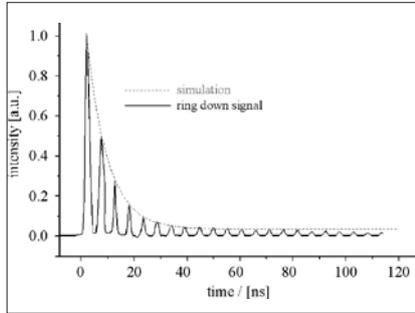


Abb. 5a: Typisches Cavity Ring Down Signal eines isolierten Signalkanals (APD, 3,5 ns Superkontinuum-Puls, Arbeitswellenlänge 630 nm).

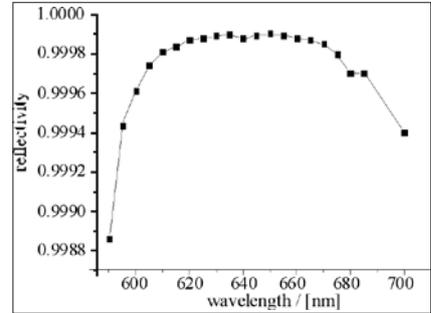


Abb. 5b: Gemessene Reflektivität eines HeNe-Laser-spiegels als Funktion der Wellenlänge.

### Anwendungsbeispiel

Die Abbildung 5 zeigt eine typische Ring-Down-Kurve eines 3,5 ns Pulses, welcher in einen 15 cm langen Zweispiegelresonator geringer Güte eingekoppelt wurde. Das Messsignal zeigt die typischen periodischen Intensitätsmaxima, verursacht durch die Auskopplung des im Resonator umlaufenden optischen Pulses. Die Einhüllende der Intensitätsmaxima kann mit einer Exponentialfunktion angepasst werden (lab view Routine). Aus der Abfallzeitkonstante wird die Reflektivität bzw. der optische Verlust bei der entsprechenden Wellenlänge berechnet. Beispielhaft zeigt die Abbildung 5b den Verlauf der Reflektivität eines hochreflektierenden HeNe-Laserspiegels über einen Bereich von 100 nm aufgenommen mit einer Genauigkeit von  $2 \cdot 10^{-6}$ !

### Grenzen und Möglichkeiten

Der Einsatz einer Superkontinuumquelle auf Basis einer mikrochipplasergepumpten photonischen Kristallfaser ermöglicht hochgenaue Cavity Ring Down Verlustmessungen über einen extrem großen Spektralbereich von mehr als 1000 nm (VIS bis NIR). Bedingt durch die optimale Form und Länge der Superkontinuum-Weißlichtpulse wird dabei eine Dynamik von mehr als 50 000 ppm erreicht. So können

Reflektivitäten im Bereich von  $R = 0,95$  bis  $R = 0,99995$  oder Transmissionsverluste im Bereich von  $\tau = 0.05$  bis  $\tau = 0.00005$  mit einer Genauigkeit besser  $2 \cdot 10^{-6}$  gemessen werden.

Die Arbeiten werden gefördert durch das FH3-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. ○

**Tobias Baselt** absolvierte im Jahr 2006 sein Studium der Physikalischen Technik an der Westsächsischen Hochschule und arbeitet heute als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Optische Technologien am Institut für Oberflächentechnologien und Mikrosysteme.

**Fabiola Basan** studierte Medizintechnik an der Technischen Universität Chemnitz. Seit 1992 arbeitet sie als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Physikalische Technik / Informatik und betreut unter anderem die Praktika Lasertechnik und Technische Optik.

**Peter Hartmann** studierte von 1982 bis 1987 Physik in Berlin und Jena; 1991 Promotion; 1991 bis 1997 wiss. Assistent FSU Jena; 1997 Research Associate, Indiana University Bloo-

ington; 1998 bis 2002 wiss. Assistent (C1) am Institut für Optik und Quantenelektronik; 2002 Habilitation, Lehrbefugnis für das Fach Experimentalphysik, Ernennung zum Privatdozenten an der FSU Jena. 2003 erfolgte die Berufung an die Westsächsische Hochschule Zwickau.



Fabiola Basan und Tobias Baselt.

# Seminare an Westsächsischer Hochschule Zwickau

## LINOS Optikausbildung

**Auf eine mehr als 110jährige erfolgreiche Tradition kann die Ingenieurausbildung im westsächsischen Zwickau heute zurückblicken. In den vergangenen Jahren ist LINOS mit der Hochschule eine enge Verbindung eingegangen. Von den praxisnahen Seminaren und Vorträgen haben schon etliche Studentinnen und Studenten profitieren können.**

Auf eine mehr als 110jährige erfolgreiche Tradition kann die Ingenieurausbildung im westsächsischen Zwickau heute zurückblicken. Im Jahre 1897 als „Höhere Fachschule für Maschinenbau, Elektrotechnik und verwandte Fächer“ gegründet, bietet die Westsächsische Hochschule heute eine breite Palette von Diplom-, Bachelor- und Masterstudiengängen für aktuell mehr als 4.000 Studenten an. Dabei reicht das Spektrum von Kunst, Architektur und Sprachen über soziale Studienrichtungen bis hin zum klassischen Maschinenbau oder der Physikalischen Technik. Am Fachbereich Physikalische Technik/Informatik studieren aktuell über 200 Studenten in den Spezialisierungsrichtungen Physikalische Messtechnik, Biomedizinische Technik, Umwelttechnik und Mikrosystemtechnik. Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Studiengänge ist die Ausbildung in den Fächern Technische Optik und Lasertechnik.

Bereits seit der Gründung des Fachbereichs im Jahre 1992 besteht in Fragen der Optikausbildung eine fruchtbare Kooperation mit LINOS. So wurden die Praktika der Technischen Optik und der Lasertechnik mit Unterstützung aus Göttingen eingerichtet, damals noch unter dem früheren Namen Spindler & Hoyer.

Aber auch die Weiterbildung von Mitarbeitern im Rahmen der Veranstaltungsreihe „Technische Optik in der Praxis“ ist Bestandteil dieser erfolgreichen Verbindung von Hochschule und Unternehmen. Seit dem Jahr 2005 hat sich eine von der Firma LINOS durchgeführte Schulungsveranstaltung als fester Bestandteil der Optikausbildung an der WHZ etabliert. Aber auch über die Grenzen des Fachbereiches und der Hochschule hinaus ist das Seminar Optikdesign ein lukratives Angebot an die Optikanwender in der Region Westsachsen. So soll das Seminar in den nächsten Jahren für einen deutlich größeren Zuhörerkreis angeboten werden. ◦



Fabiola Basan mit Studenten der Physikalischen Technik im Praktikum Technische Optik.



Thomas Thöniß bei Simulationsübungen mit dem Programm WinLens™ im Rahmen eines Seminars Optikdesign an der FH Zwickau.

> **Kontakt:**  
[www.fh-zwickau.de](http://www.fh-zwickau.de)

**LINOS**

A member of the Qioptiq Group

No. 17 | 1. Quartal 2008 *optolines*