

# ANWENDUNG EINER UV-OPTIMIERTEN SUPERKONTINUUMQUELLE AUF BASIS EINER MIKROCHIPLASER-GEpumPTEN PHOTONISCHEN KRISTALLFASER FÜR HOCHPRÄZISE OPTISCHE VERLUSTMESSUNGEN

Tobias Baselt<sup>1</sup>, Thomas Hammer<sup>1</sup>, Peter Pauker<sup>1</sup>, Georg Kuka<sup>2</sup> und PeterHartmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Westsächsische Hochschule Zwickau, Institut für Oberflächentechnologien und Mikrosysteme, Dr. Friedrichsring 2a, 08012 Zwickau

<sup>2</sup> Fiberware GmbH Mittweida, Bornheimer Straße 4, 09648 Mittweida

## Kurzfassung:

Hochgenaue optische Verlustmessungen sind eine unabdingbare Voraussetzung für die Entwicklung neuer optischer Materialien oder komplexer optische Beschichtungen. Das vorgestellte Messverfahren nutzt ein homogenes Superkontinuum (500nm–1650nm), erzeugt mit Hilfe einer Photonischen Kristallfaser, welche mit Nanosekundenpulsen eines passiv gütegeschalteten Nd:YAG-Mikrochiplaser gepumpt wird. Realisiert werden breitbandige optische Verlustmessungen mit einer Genauigkeit von 2ppm bei optischen Verlusten von weniger als 50ppm.

## Abstract:

Precise optical loss measurements are a prerequisite for the development of new optical materials and complex optical multilayers used for high-reflective, low loss components. A flat supercontinuum (500nm–1650 nm), generated by a photonic crystal fiber pumped with a train of kHz nanosecond Q-switched microchip laser pulses at 1064nm is used for high sensitive loss measurements better than 2ppm for 50ppm losses.

## 1. Einleitung

Zur Messung sehr geringer optischer Verluste im ppm-Bereich ist die Anwendung herkömmlicher Reflexions- bzw. Transmissionsmessungen nicht mehr möglich. Sowohl die rauschbegrenzte Nachweisempfindlichkeit der entsprechenden Detektoren als auch die Intensitätsstabilität der eingesetzten Laserquellen verursachen in diesem Fall signifikante Messfehler, deutlich größer als die zu messenden Intensitätsunterschiede.

Eine Alternative zur direkten Intensitätsmessung ist die Analyse des Zeitverhaltens eines optischen Aufbaus. Im Zentrum steht die aus der cavity-ring-down-Spektroskopie CRD [1,2] bekannte Messanordnung, bei welcher die zu messende Probe 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 Resonatorspiegel oder des Verlustes eingebrachter optischer Schichten bzw. Medien (Abb. 1).

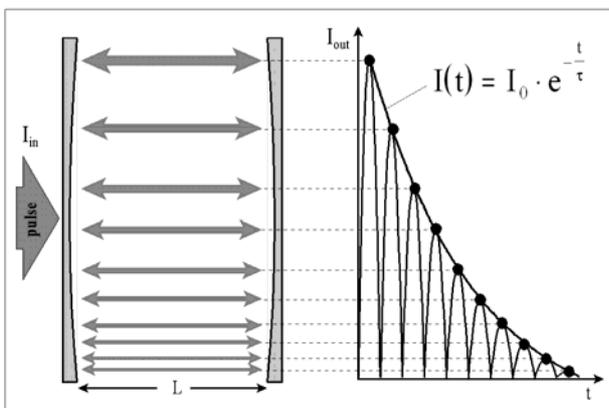


Abb. 1 Grundprinzip der Cavity-Ring-Down Technik

## 2. 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 eingesetzten 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 kürzer als  $t_f \leq 1\mu s$  sein. Mechano-optisch modulierte Weißlichtquellen (thermische Lichtquellen) aber auch Blitzlampen sind damit ungeeignet.

Optimal für breitbandige CRD-Verlustmessungen ist der Einsatz einer so genannten Superkontinuumquelle. Unter dem erstmals von Alfano und Shapiro [3] beschriebenen Superkontinuum versteht man extrem breitbandige Strahlung erzeugt durch die spektrale Verbreiterung eines monochromatischen Laserpulses hoher Intensität in einem stark nichtlinearen Medium.

## 3. UV-Optimiertes Superkontinuum

Erzeugt wurden die Weißlichtpulse auf Basis einer Superkontinuumquelle bestehend aus einer Photonischen Kristallfaser (PCF, Nulldispersionswellenlänge 1040nm, Firma Fiberware Mittweida) gepumpt durch einen passiv gütegeschalteten Nd:YAG-Mikrochiplaser mit einer Pulslänge im Bereich  $t_w = 500ps$  bis 2ns und einer Pulsenergie von  $E_p = 12\mu J$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 1064nm$ , sowie einer Wiederholrate von typ.  $f_w = 15kHz$ . Die

Flankensteilheit der Weißlichtpulse beträgt typischerweise  $t_f \leq 1\text{ns}$ .

Zur Vergrößerung des Messbereiches und der Dynamik des Verfahrens wurden Untersuchungen zur Optimierung der spektralen Leistungsdichte der Superkontinuumquelle durchgeführt. Die Abbildung 2 zeigt die relative integrale Leistungsdichte der Superkontinuumquelle im sichtbaren Spektralbereich (400nm bis 800nm) in Abhängigkeit von der Länge der Photonischen Kristallfaser für typische Pumpbedingungen ( $t_w = 500\text{ps}$ ,  $E_p = 12\mu\text{J}$ ,  $f_w = 15\text{kHz}$ ).

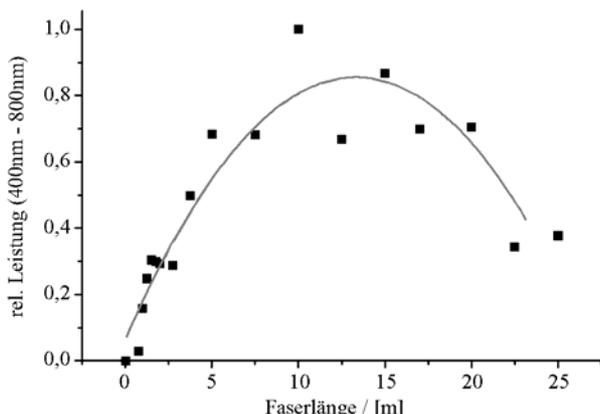


Abb. 2 Relative integrale Leistungsdichte der Superkontinuumquelle (400nm bis 800nm) in Abhängigkeit von der Länge der PCF ( $t_w = 500\text{ps}$ ,  $E_p = 12\mu\text{J}$ ,  $f_w = 15\text{kHz}$ ).

Bei den gewählten Anregungsbedingungen zeigt die spektrale Leistungsdichte im VIS-Bereich ein ausgeprägtes Maximum bei  $13\text{m} \pm 2\text{m}$  Faserlänge. Für diese optimale Länge der Photonischen Kristallfaser besitzt das Spektrum der Weißlichtquelle eine typische spektrale Leistungsdichte von  $P = 2,5\mu\text{W}/\text{nm}$  bei typischen Intensitätsschwankungen von kleiner 7dB.

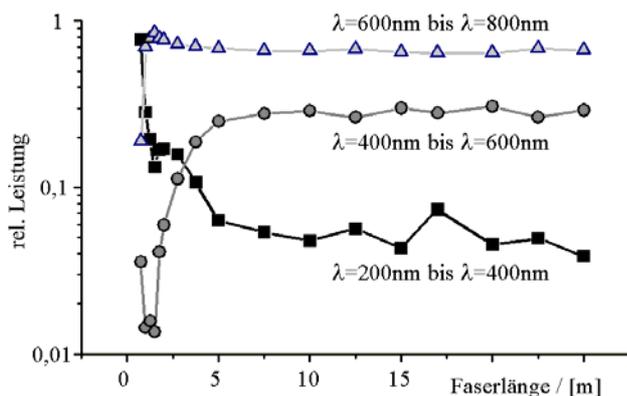


Abb. 3 Relative integrale Leistungsdichte der Superkontinuumquelle in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen in Abhängigkeit von der Länge der PCF ( $t_w = 500\text{ps}$ ,  $E_p = 12\mu\text{J}$ ,  $f_w = 15\text{kHz}$ ).

Die Abbildung 3 zeigt die relative Verteilung der Intensität des Superkontinuums in unterschiedlichen Spektralbereichen als Funktion der Länge der Photonischen Kristallfaser. Für Faserlängen von 5m bis 25m ist die relative Verteilung der spektralen Leis-

tungsdichte nahezu konstant. Der Leistungsanteil im UV-Bereich (200nm bis 400nm) ist dabei etwa eine Größenordnung geringer als im sichtbaren Spektralbereich. Für Faserlänge kleiner etwa 5m hingegen wird eine signifikante Erhöhung der relativen spektralen Leistungsdichte im UV-Bereich beobachtet.

Die Wahl der Länge der Photonischen Kristallfaser ermöglicht damit in engen Grenzen die Optimierung der spektralen Leistungsdichte der Weißlichtpulse für die Anwendung bei optischen Verlustmessungen. Eine weitere Zunahme des UV-Anteils im Superkontinuum kann durch die Optimierung der Struktur der Photonischen Kristallfaser realisiert werden [4,5].

#### 4. CRD-Messaufbau

Die Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Verlustmessplatzes. Ein PC 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).

Für den selektiven Signalnachweis können die Weißlichtpulse vor der Einkopplung in den optischen Resonator schmalbandig gefiltert werden. Über die Justage des Filters kann die Arbeitwellenlänge variiert werden. Der Signalnachweis erfolgt mit Hilfe eines hochempfindlichen APD-Detektors.

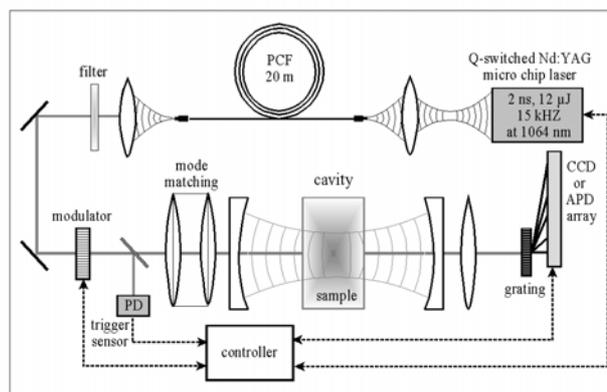


Abb. 4 Prinzipieller Aufbau des Cavity-Ring-Down Messplatzes

Alternativ zum beschriebenen Selektion der Messwellenlänge über schmalbandige Filter, kann das Ring-Down-Signal auch mit Hilfe eines Gittermonochromators spektral zerlegt werden. Der Signalnachweis erfolgt in diesem Fall mit Hilfe eines Arrays von Lawinendioden bzw. eines schnellen, sequenziell arbeitenden CCD-Sensors.

Zur Messung extrem geringer Verluste im ppm-Bereich muss das aktive Messvolumen gegen Umgebungseinflüsse abgeschirmt werden. Für die optimale Kontrolle des aktiven Volumens wurde der

Messaufbau in eine kompakte Miniflowbox integriert. Im Messvolumen wird damit, ca. zwei Minuten nach dem Probenwechsel, eine Partikelkonzentration (0,5  $\mu\text{m}$  Partikel) von kleiner 1000 Partikel pro Quadrat-zoll erreicht.

## 5. Resultate und Diskussion

Die Abbildung 5 zeigt die Ring-Down-Kurve eines 3,5ns Pulses, welcher in einen 15cm langen Zwei-spiegelresonator geringer Güte eingekoppelt wurde. Das Messsignal zeigt die typischen periodischen Intensitätsmaxima, verursacht durch den im Resonator umlaufenden optischen Puls. Die Intensitätsabnahme der Pulsechos wird durch die Auskopplung an den Spiegeln und die Verluste im Resonator bestimmt. Die Einhüllende der Intensitätsmaxima wurde mit einer Exponentialfunktion angepasst. Aus der Abfallzeitkonstante wird die Reflektivität bzw. der optische Verlust in der Probe bei der entsprechenden Wellenlänge berechnet.

Die Bandbreite des Einzelmesspunktes wird durch den Gittermonochromator begrenzt und liegt bei ca. 1nm.

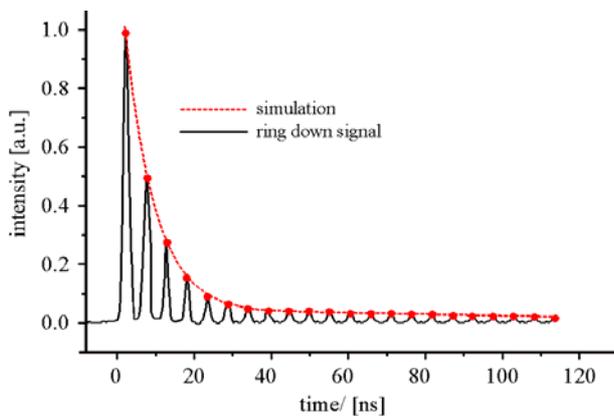


Abb. 5 Typischer Signalverlauf (ring down). Eingekoppelt wurde ein Weißlichtpuls der Länge  $t_w=2,5\text{ns}$  in einen 80cm langen Zweispiegelresonator bei einer Zentralwellenlänge von  $\lambda=670\text{nm}$ .

Beispielhaft zeigt die Abbildung 6 den gemessenen Verlauf der Reflektivität eines hochreflektierenden HeNe-Laserspiegels über einen Bereich von 100nm. aufgenommen. Die realisierte Messgenauigkeit von  $2 \cdot 10^{-6}$  liegt mehrere Größenordnungen über der, herkömmlicher optischer Verlustmessungen. Die Dynamik des Messverfahrens wird für große optische Verluste durch die Flankensteilheit der Superkontinuum-Weißlichtpulse begrenzt. Für extrem geringe Verluste begrenzen die Nachweisempfindlichkeit des Detektors und die Restverunreinigungen des aktiven Volumens das Messverfahren.

Das spektrale Auflösungsvermögen kann durch die Wahl des Monochromators und die Auflösung des Detektors (APD-Zeile, CCD) an die Messbedingungen angepasst werden.

Die Ausdehnung des Messbereiches wird durch die spektrale Leistungsdichte der Weißlichtquelle und

die Breitbandverspiegelung der Resonatorspiegel begrenzt.

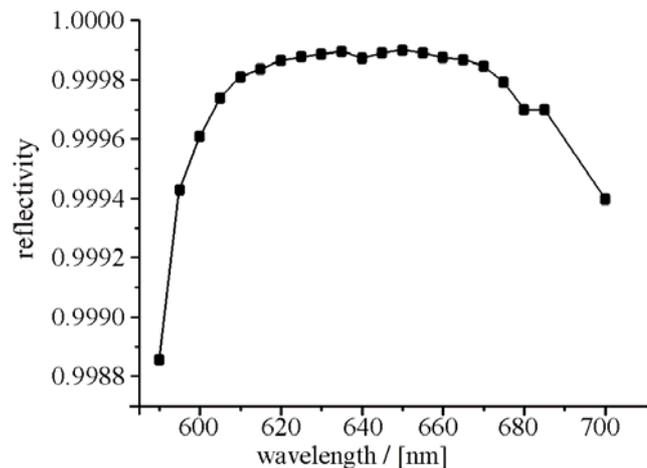


Abb. 6 Spektrales-Reflexionsvermögen eines HeNe-Laserspiegels, gemessen mit einer Genauigkeit von 2ppm.

Bei einer Bandbreite von ca. 100nm im UV-Bereich bzw. ca. 400nm im NIR-Bereich, kann die Zentralwellenlänge von 450nm bis 1650nm variiert werden.

## 6. Zusammenfassung

Der Einsatz einer Superkontinuumquelle auf Basis einer Mikrochip-laser-gepumpten Photonischen Kristallfaser ermöglicht hochgenaue Cavity Ring Down Verlustmessungen über einen extrem großen Spektralbereich von mehr als 1500 nm (UV bis NIR). Bedingt durch die optimale Form und Länge der Superkontinuum-Weißlichtpulse wird dabei eine Dynamik von mehr als 50000ppm 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.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung dieser Arbeiten durch das FH<sup>3</sup>-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

## Literaturverzeichnis

- [1] A. ÓKeefe, D.A.G. Deacon, Rev. Sci. Instrum. 59 (1988), 2544.
- [2] Romanini, and Lehmann, J. Chem. Phys. 99(1993), 6287
- [3] R. R. Alfano, and S. L. Shapiro, Physical Review Letters 24 (1970), 584.
- [4] A. Kudlinski, A. K. George, J. C. Knight J. C. Travers, A. B. Rulkov, S. V. Popov and J. R. Taylor, Optics Express Vol.14, No.12 (2006), 5715.
- [5] J. M. Stone and J. C. Knight, Optics Express Vol. 16, No. 4 (2008), 2670.