4. Aalener Photonik-Tag
16. November 2012

PHOTON^{n}

SP2: Photonische Sensorik

TP2.2: Faseroptischer Gassensor

Alberto Rodrigues, Volker Lange, Dietrich Kühlke

Hochschule Furtwangen

A. Possani, M. Cabaleiro, S. Keshavarzi, V. Shevtschenkov

X. Seng

Vortragsübersicht

1. Einführung
2. Anforderungen
3. Laser Absorptionsspektroskopie
4. Experimente
   a) Mikrostrukturierte Fasern (PCF)
   b) Kapillarfasern
   c) Mikrokanalstrukturen
5. Auswertealgorithmus
6. Zusammenfassung

1. Einführung

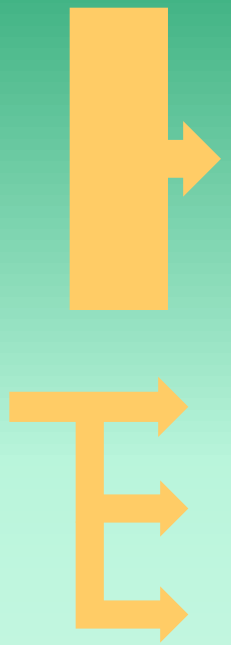
Gassensoren

Aufgaben in der Prozess- und Qualitätskontrolle:

- Umwelttechnologie (Überwachung von Schadstoffemissionen)
- Automobilindustrie (Lambda-Sonde, Luftqualität im Fahrgastraum)
- Gebäudemanagement (Raumklimatisierung, Erkennung von Bränden)
- Lebensmittelindustrie

2. Anforderungen

- Hohe Empfindlichkeit
- Hohe Selektivität
- Schnelle Antwortzeit
- Geringe Gasmengen



Laserspektroskopie

Hohlfasern

Kapillaren

Mikrokanalstrukturen

PHOTON^{n} TP2.2

3. Laser Absorptionsspektroskopie

Grundlage: Lambert – Beer Gesetz

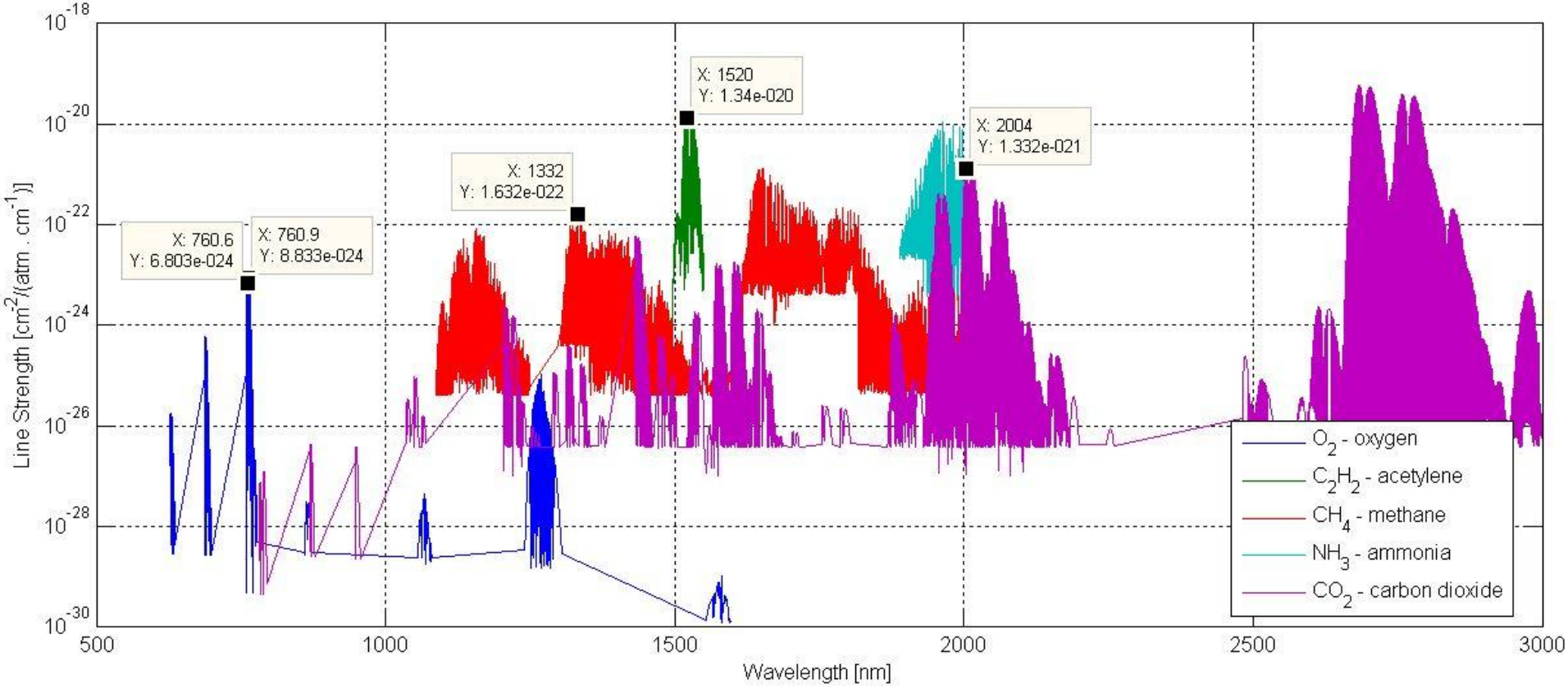
$$I(x) = I_0 e^{-\propto x}$$

Absorptionslänge x
Absorptionskoeffizient α
α enthält alle Informationen über
- Gaskonzentration
- Linienstärke
- Messbedingungen (p,T)

Lichtabsorption immer dann, wenn die Photonenenergie mit einem Energiezustand des Gasmoleküls (Rotation, Vibration) zusammentrifft.

3. Laser Absorptionsspektroskopie

Selektivität / Empfindlichkeit



Quelle: Hitran Datenbank

3. Laser Absorptionsspektroskopie

Selektivität / Empfindlichkeit

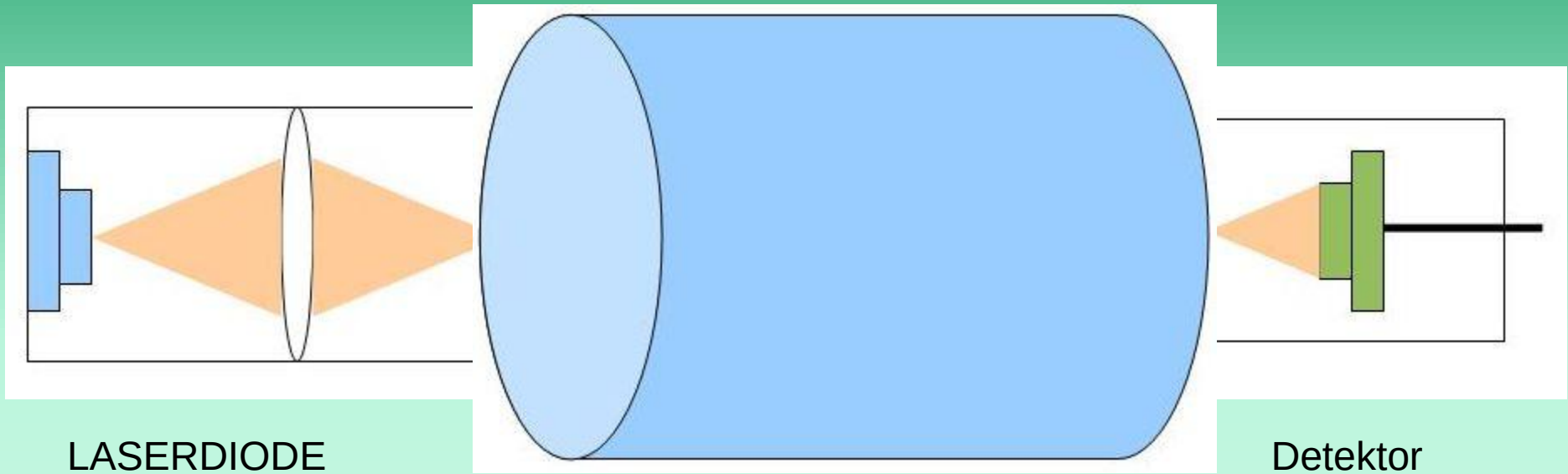
Gas	Wavelength [nm]	Line Strength [$cm^{-1}/(atm.cm^{-2})$]	Comparison to O_2
O_2 – oxygen	760,6	6,803E-24	1
CH_4 – methane	1331,5	1,632E-22	24
CO_2 - carbondioxide	2002	1,05E-21	154
NH_3 – ammonia	1963	1,117E-20	1642
C_2H_2 – acetylene	1520	1,34E-20	1970

PHOTON^n **TP2.2** : Laser Absorptionsspektroskopie schwach absorbierender Gase

3. Laser Absorptionsspektroskopie

Messaufbau

Absorptionsstrecke



LASERDIODE
(SM, $\Delta\lambda$=100MHz)

Detektor

Schwach absorbierende Gase
benötigen große Weglänge (1-5 m) !

3. Laser Absorptionsspektroskopie

Messaufbau

Absorptionsstrecke

LASERDIODE
(SM, $\Delta\lambda$=100MHz)

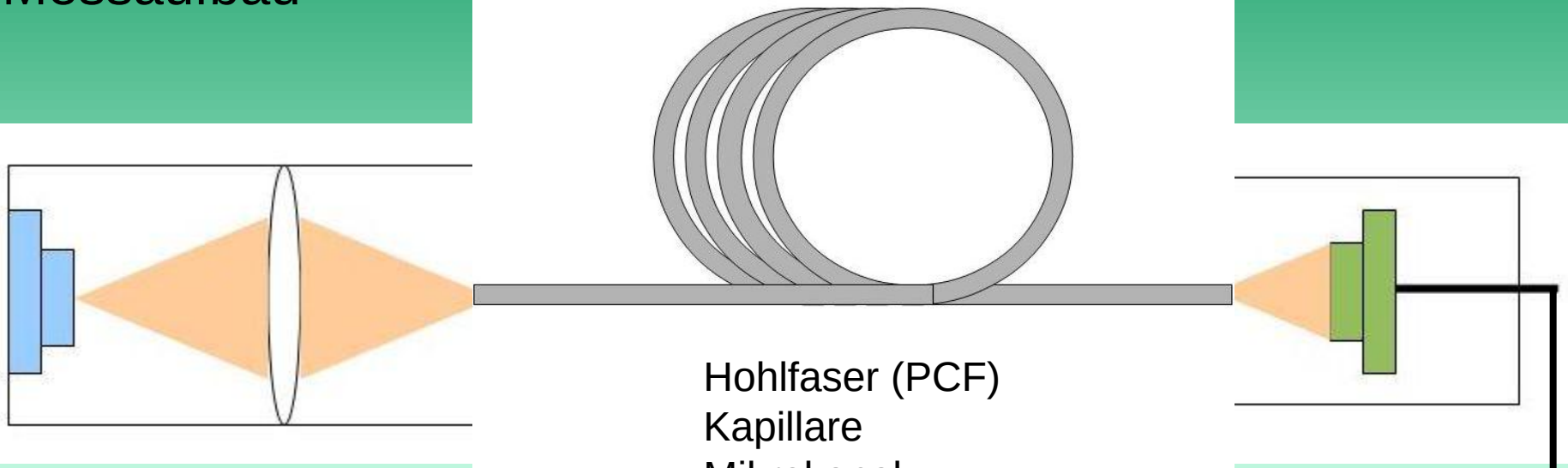
Detektor

Faltung des Weges mit Mehrwegzelle
mit relativ großem Volumen

3. Laser Absorptionsspektroskopie

Messaufbau

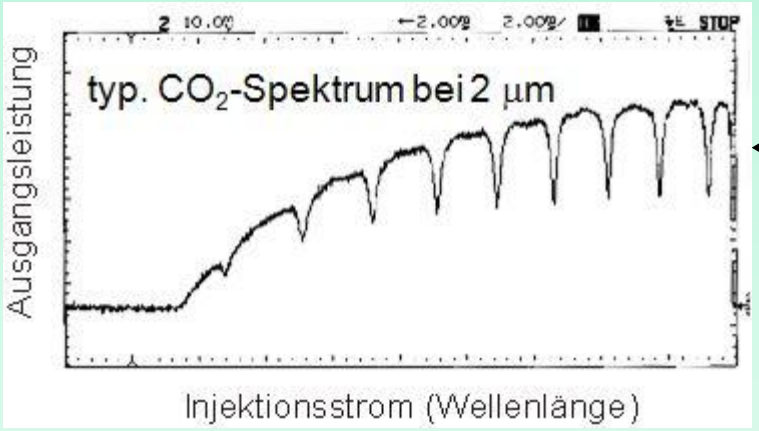
Absorptionsstrecke



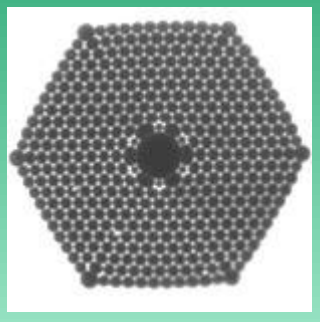
Hohlfaser (PCF)
Kapillare
Mikrokanal
PHOTON^{n} TP2.2

LASERDIODE
(SM, $\Delta\lambda$=100MHz)

Detektor



4a. Strukturierte Hohlfasern (PCF)



Acetylenmessung C_2H_2

Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers

T. Ritari, J. Tuominen, and H. Ludvigsen

23 August 2004 / Vol. 12, No. 17 / OPTICS EXPRESS 4080

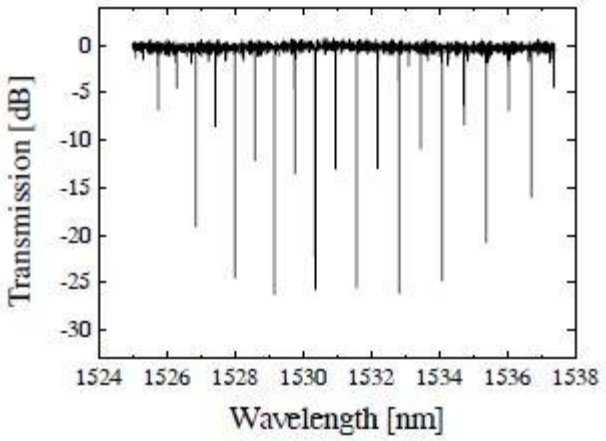
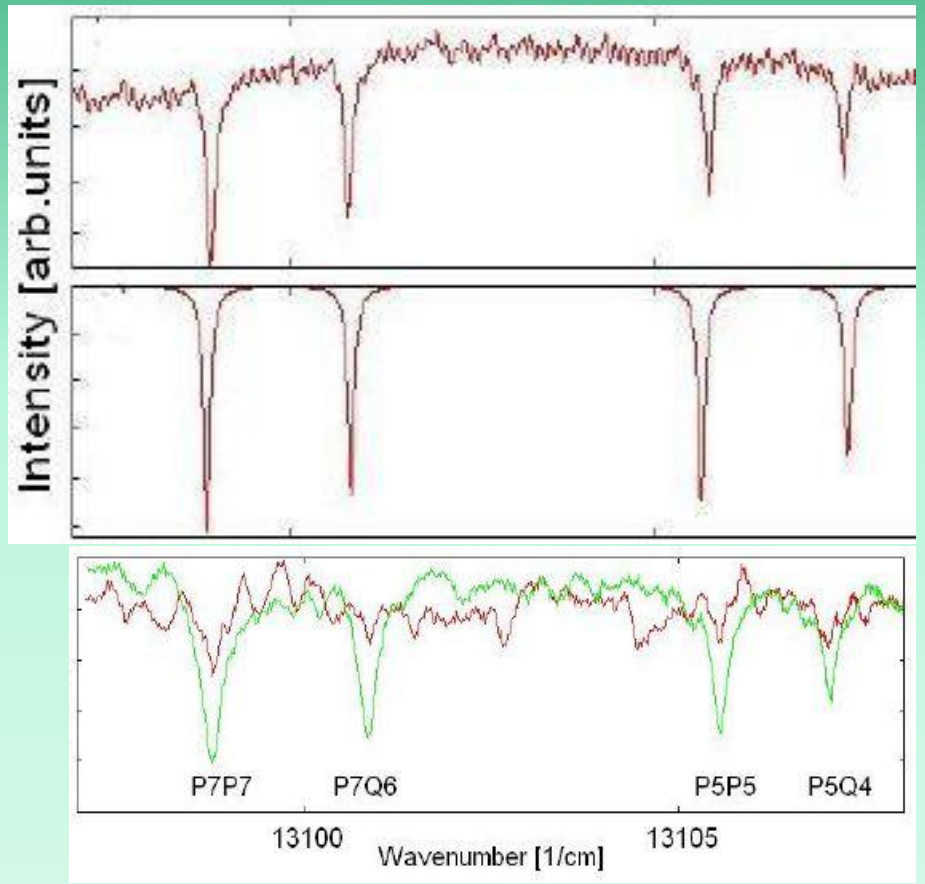


Fig. 6. Normalized absorption spectrum of the P-branch of $^{12}C_2H_2$ at 10 mbar in a 1 m long PBF1500 measured using a tunable laser (step size 1 pm).

PCF AIR-6-800 (Crystal Fibre)
Core Durchmesser 6 μm
Cladding Durchmesser 122 μm
Coating Durchmesser 243 μm
Dämpfung <0.4 dB/m @ 760-800 nm
NA 0.17 @ 780 nm
Biegeradius > 25mm

4a. Strukturierte Hohlfasern (PCF)

Sauerstoffmessung O_2 (Linienstärke um ~2000 schwächer wie Acetylen)



2m Luftweg / Normaldruck

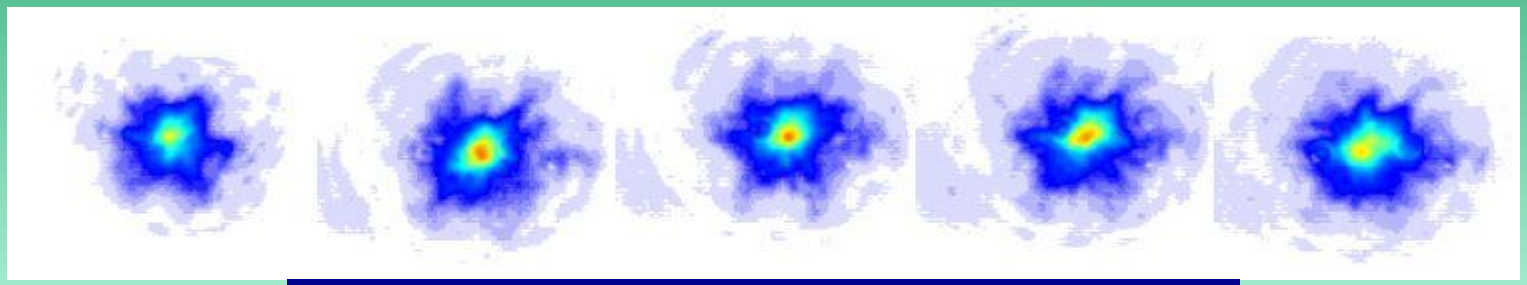
Hitran
Molekül datenbank

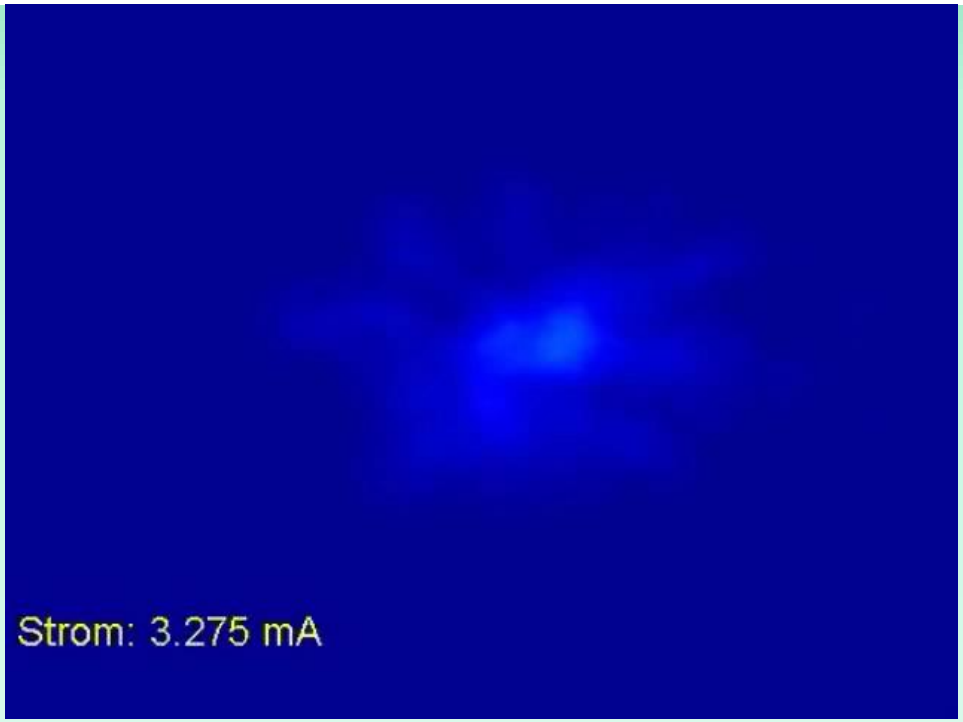
PCF
100Pa
40000Pa

4a. Strukturierte Hohlfasern (PCF)

Signalrauschen verursacht durch das spektrale Transmissionsverhalten der PCF

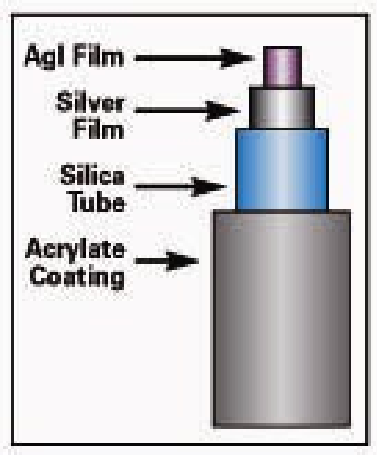
Nahfeldprofil bei unterschiedlichen Wellenlängen:





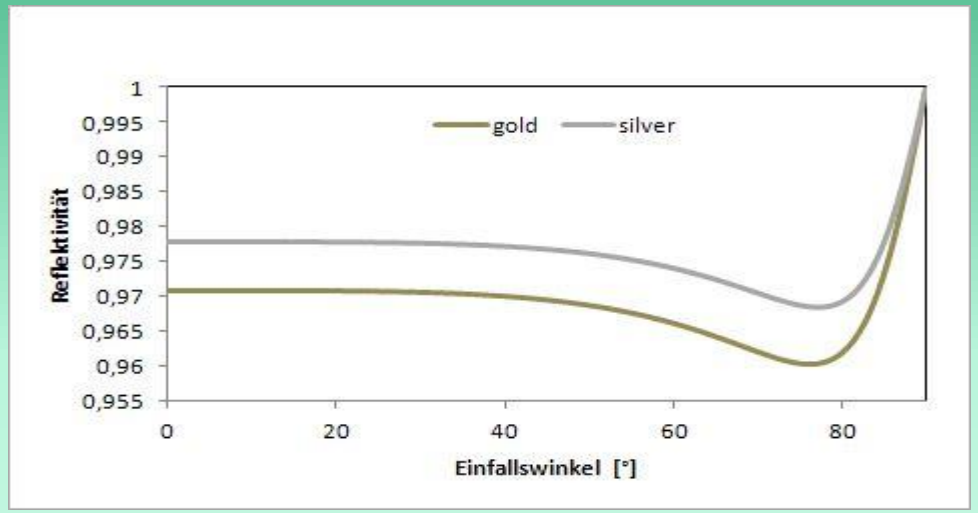
4b. Kapillare

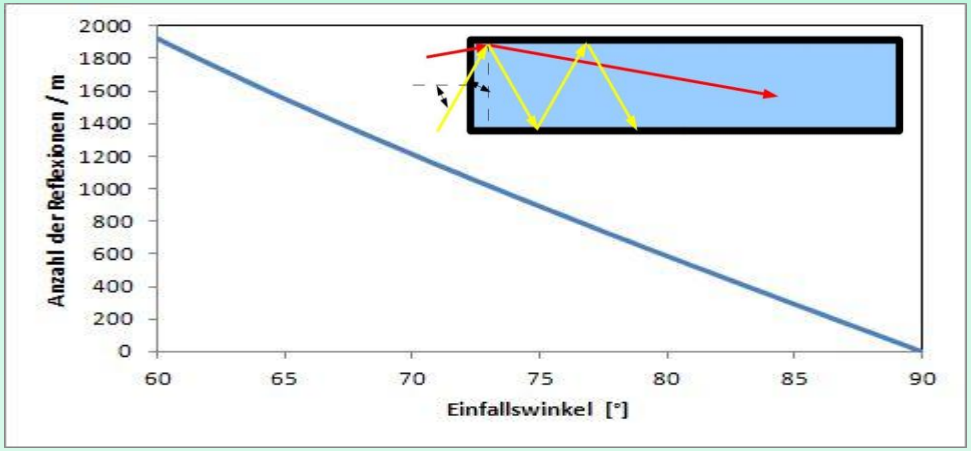
Glaskapillare mit
Silberbeschichtung:



Polymicro Techn.
Doko Eng. LLC
Durchm. (innen / außen):
320/450, 530/700, 700/850 µm
Dämpfung > 10 dB/m
Biegeradius > 250 mm

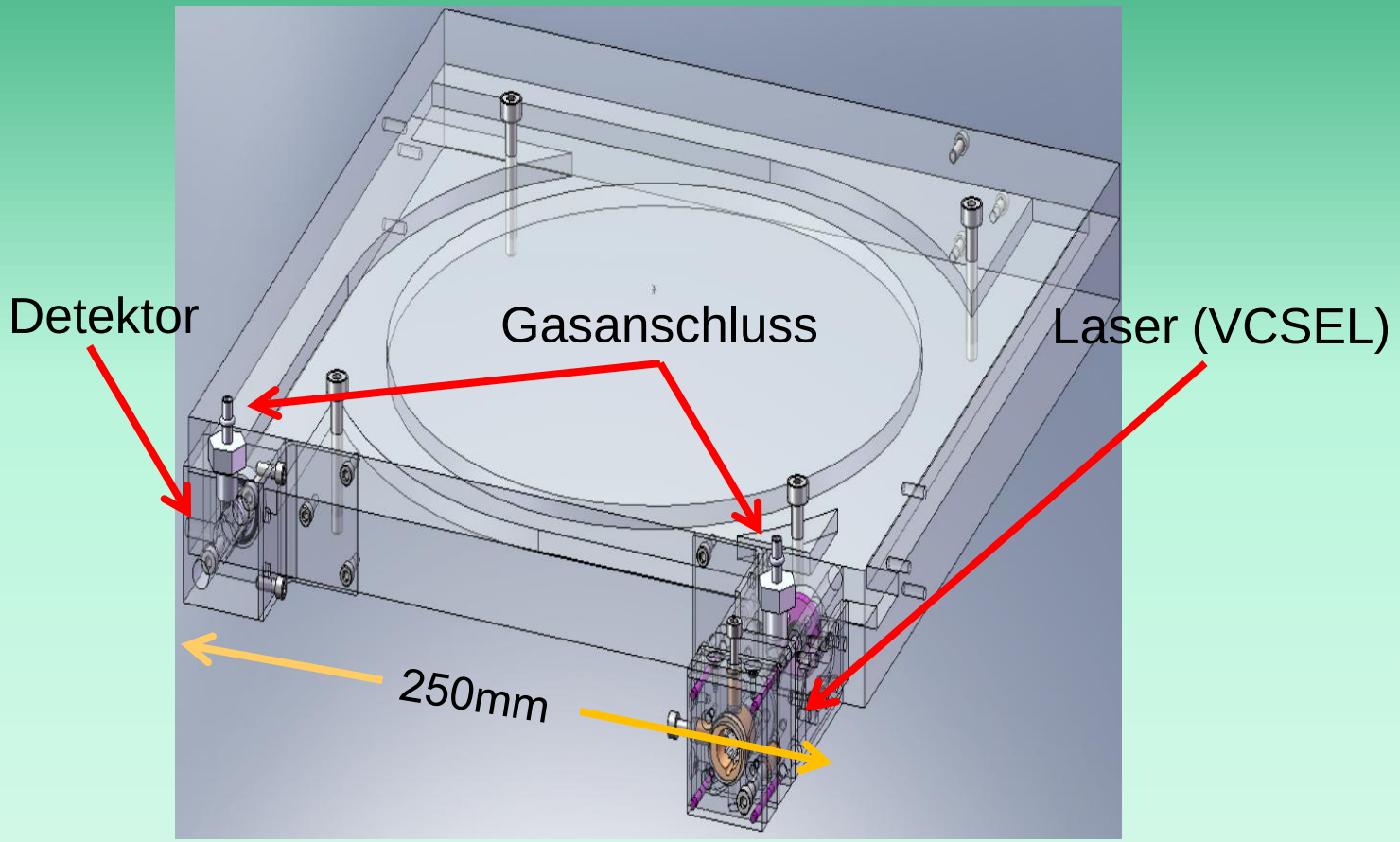
<u>Anzahl der Reflektionen bestimmt die Dämpfung</u>
Zemax-Simulationen:
Innendurchmesser, Krümmung, Kopplungswinkel





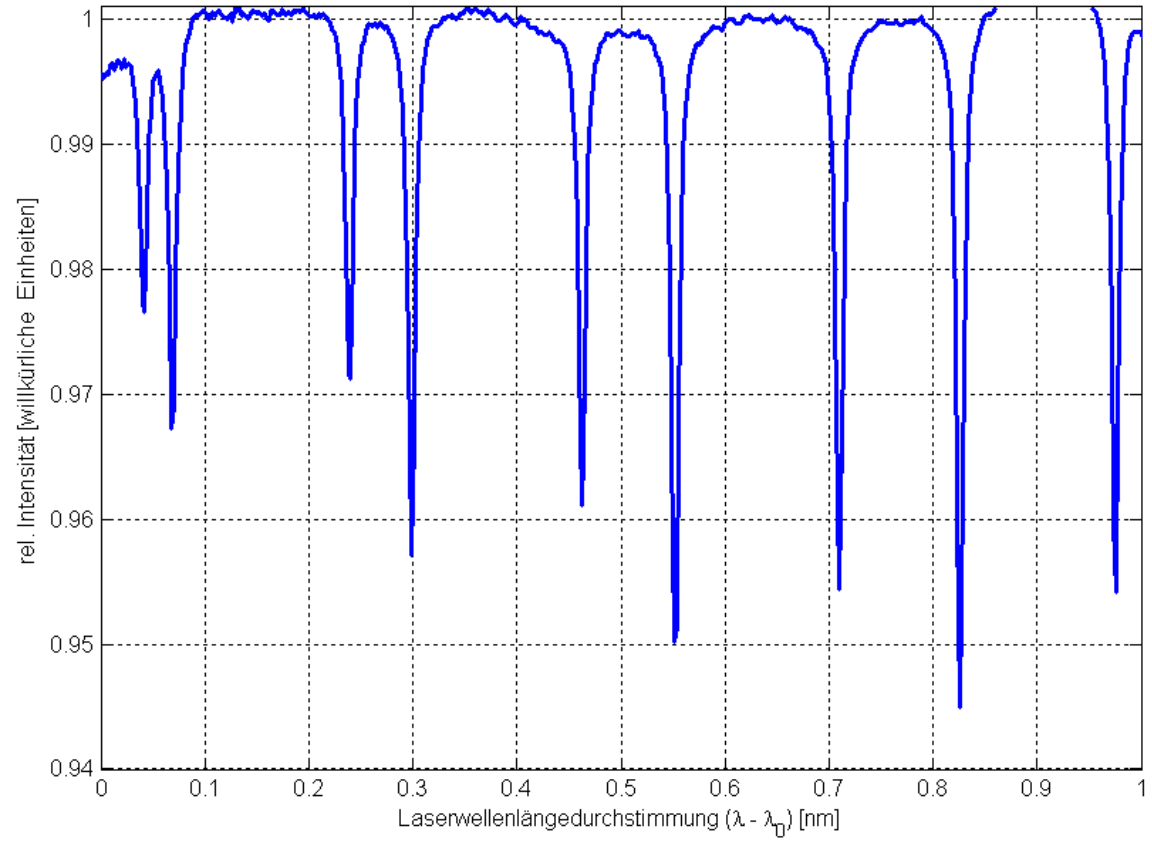
4b. Kapillare

Sensoraufbau für O_2 und CO_2



4b. Kapillare

Sauerstoffmessung O_2 (Linienstärke um ~2000 schwächer wie Acetylen)



geringes Signalrauschen !

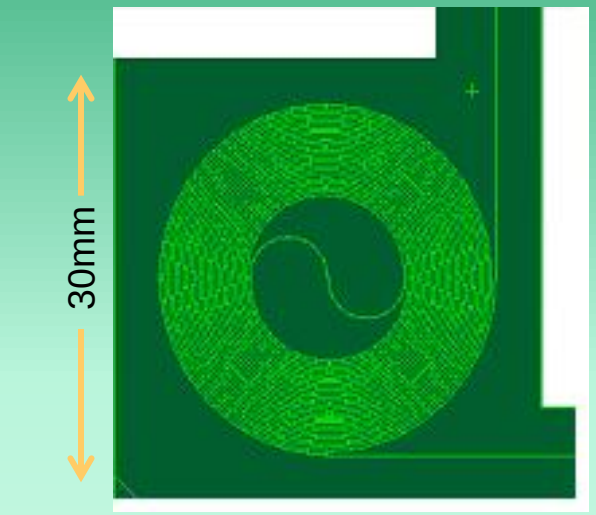
4a/b. Vergleich PCF - Kapillare

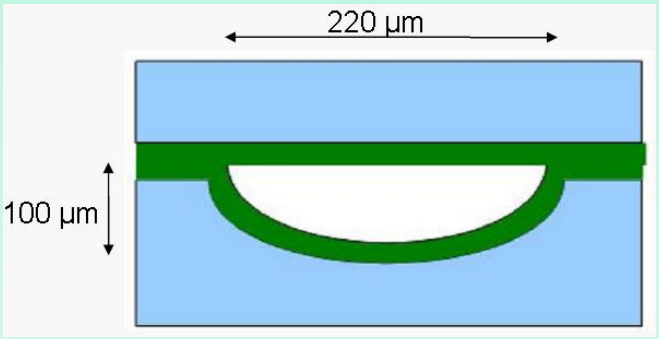
Eignung für ***schwach*** absorbierende Gase:

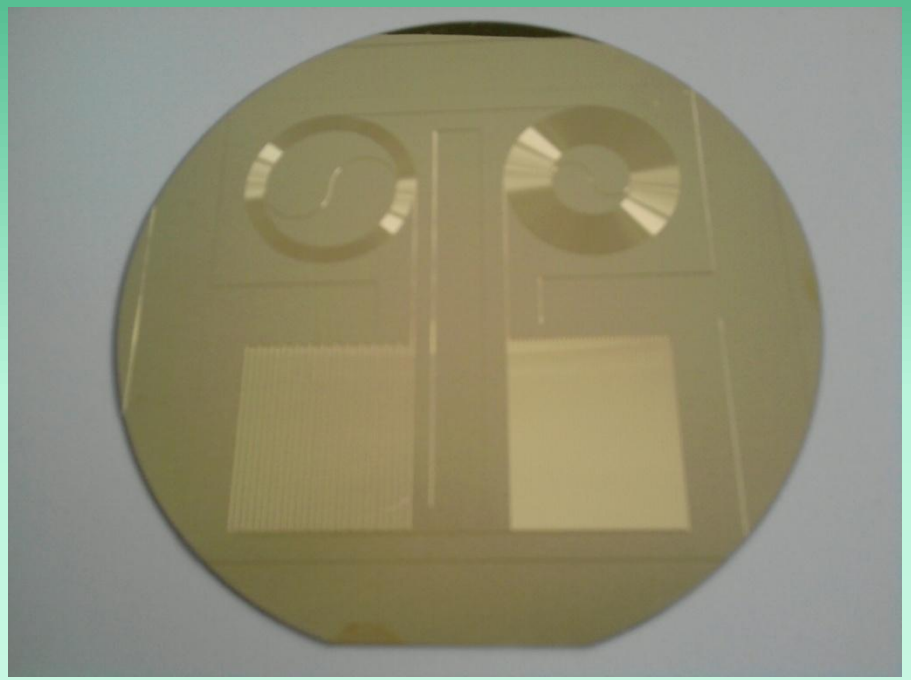
Eigenschaft	PCF	Kapillare
Dämpfung	gering	hoch
Dämpfungsabhängigkeit vom Kopplungswinkel	sehr gering	hoch
Dämpfungsabhängigkeit von Krümmung	sehr gering	hoch
Minimaler Krümmungsradius	klein	groß
Spektrale Transmission	starkes Rauschen	rein
Transmissionsband	sehr schmal	weit
Füllzeit für Gase	sehr lang	kurz

4c. Mikrokanalstrukturen

Strukturierte Glaswafer:





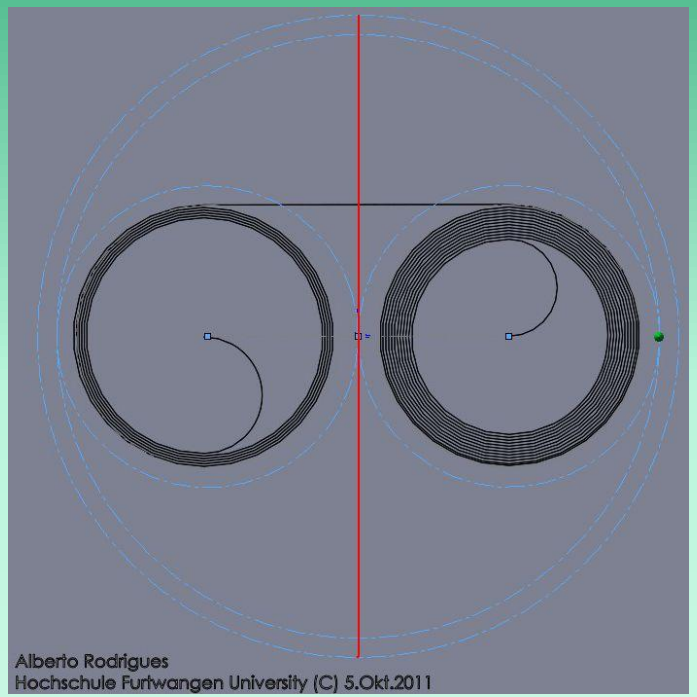


Lichttransmission konnte nachgewiesen werden !

Probleme: Goldhaftung auf Glas
Lichtwegumkehrung
Partikel zwischen den Wafern
Waferebenheit

4c. Mikrokanalstrukturen

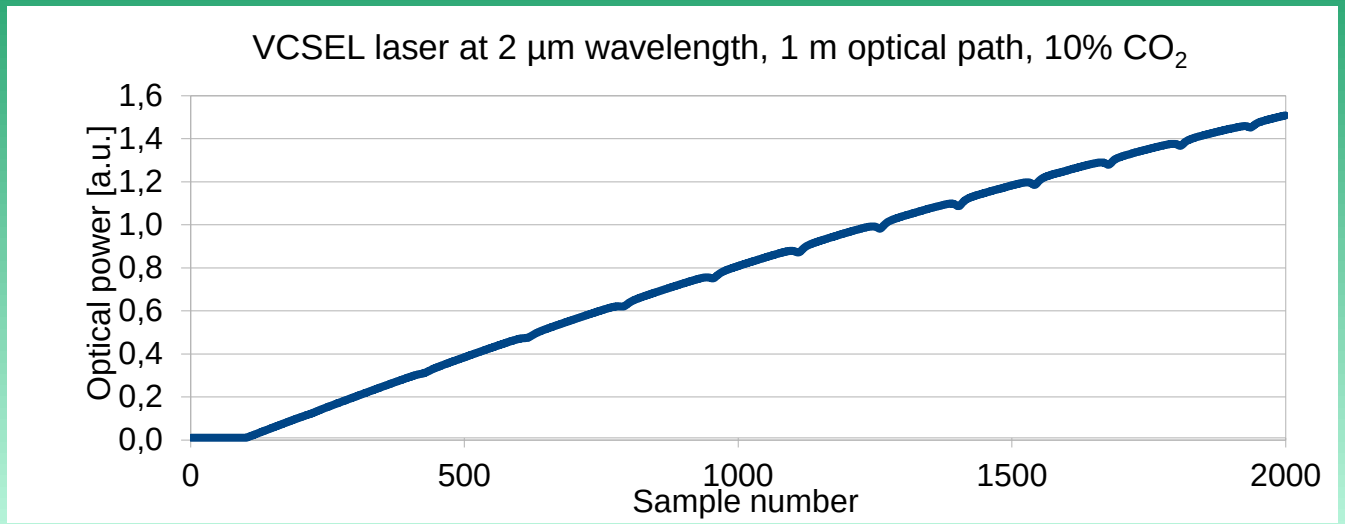
Strukturierte Glaswafer :



Neuer Design ohne Umkehrung des Lichtweges (Öffnung im Deckelwafer)

Silberbeschichtung mit Passivierungsschicht
(S1Optics GmbH)

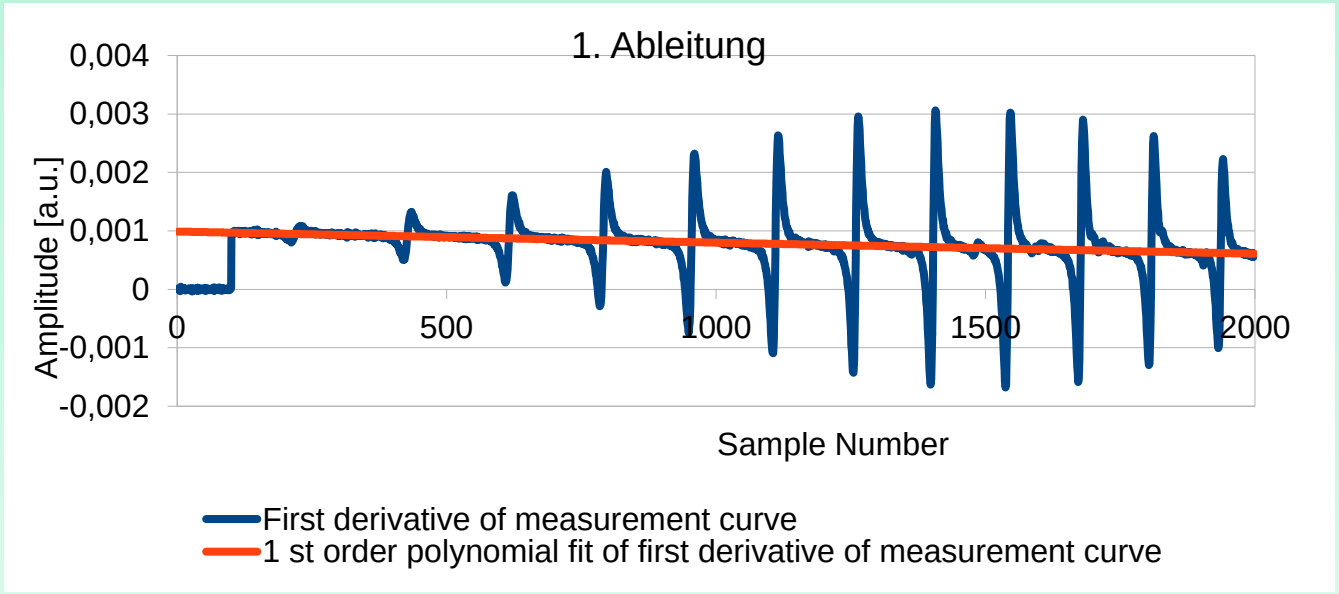
5. Auswertealgorithmus



$$y = B * e^{\sum L_n}$$

mit:

$$B = av^2 + bv + c$$



$$L_n = \frac{-\propto_n}{1 + \left(\frac{v - v_{0,n}}{\gamma_n}\right)^2}$$

Zwischen den Absorptionslinien:

$$\partial y \approx \partial B$$

5. Auswertealgorithmus

$$y = B * e^{\sum L_n}$$

Erste Ableitung der Cauchy-Lorentz Absorptionskurven $\frac{\partial \sum L}{\partial v}$:

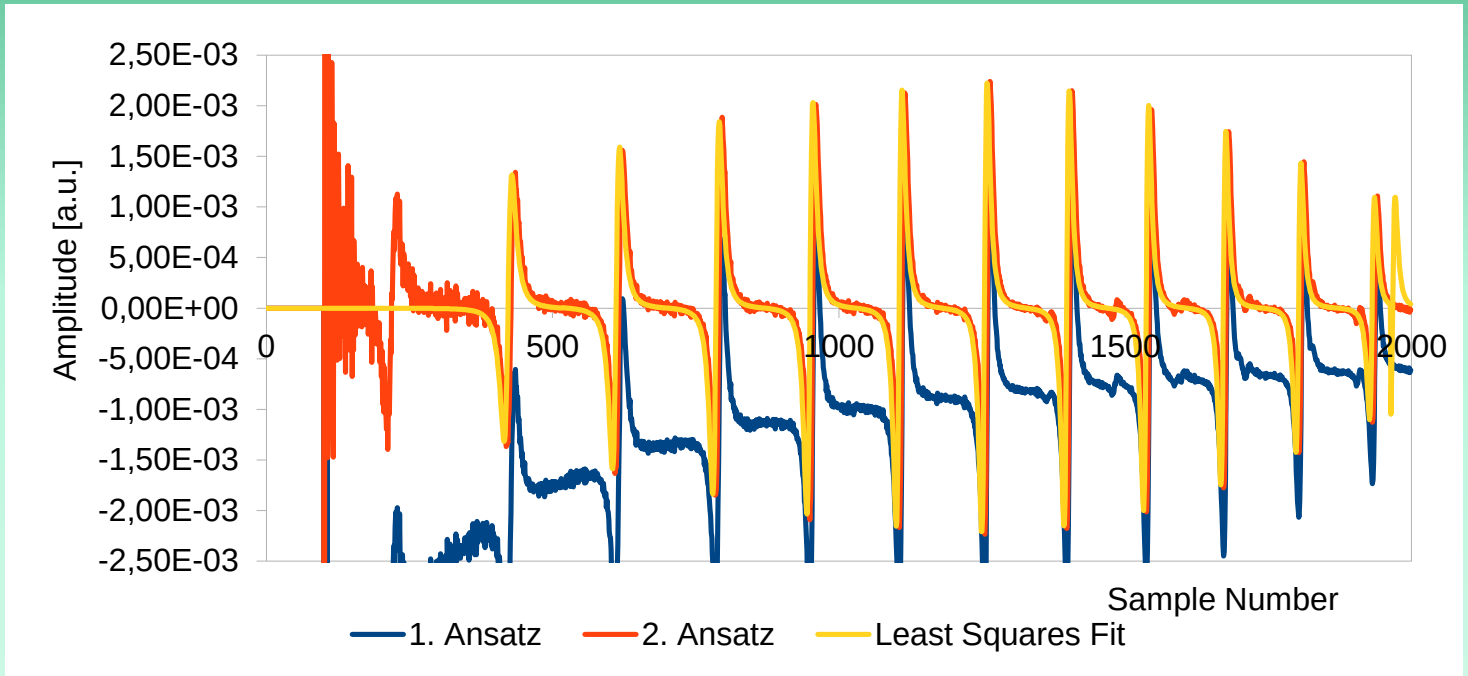
1. Ansatz : $\frac{\partial \sum L}{\partial v} = \frac{\partial y/\partial v}{y} - \frac{\partial B/\partial v}{B}$ (exakt, benötigt B)

2. Ansatz : $\frac{\partial \sum L}{\partial v} = \frac{\partial y/\partial v - \partial B/\partial v \, e^{\sum L_n}}{y} \approx \frac{\partial y/\partial v - \partial B/\partial v}{y}$

bei kleinen Konzentrationen ist exp($\sum$L)≈1

5. Auswertealgorithmus

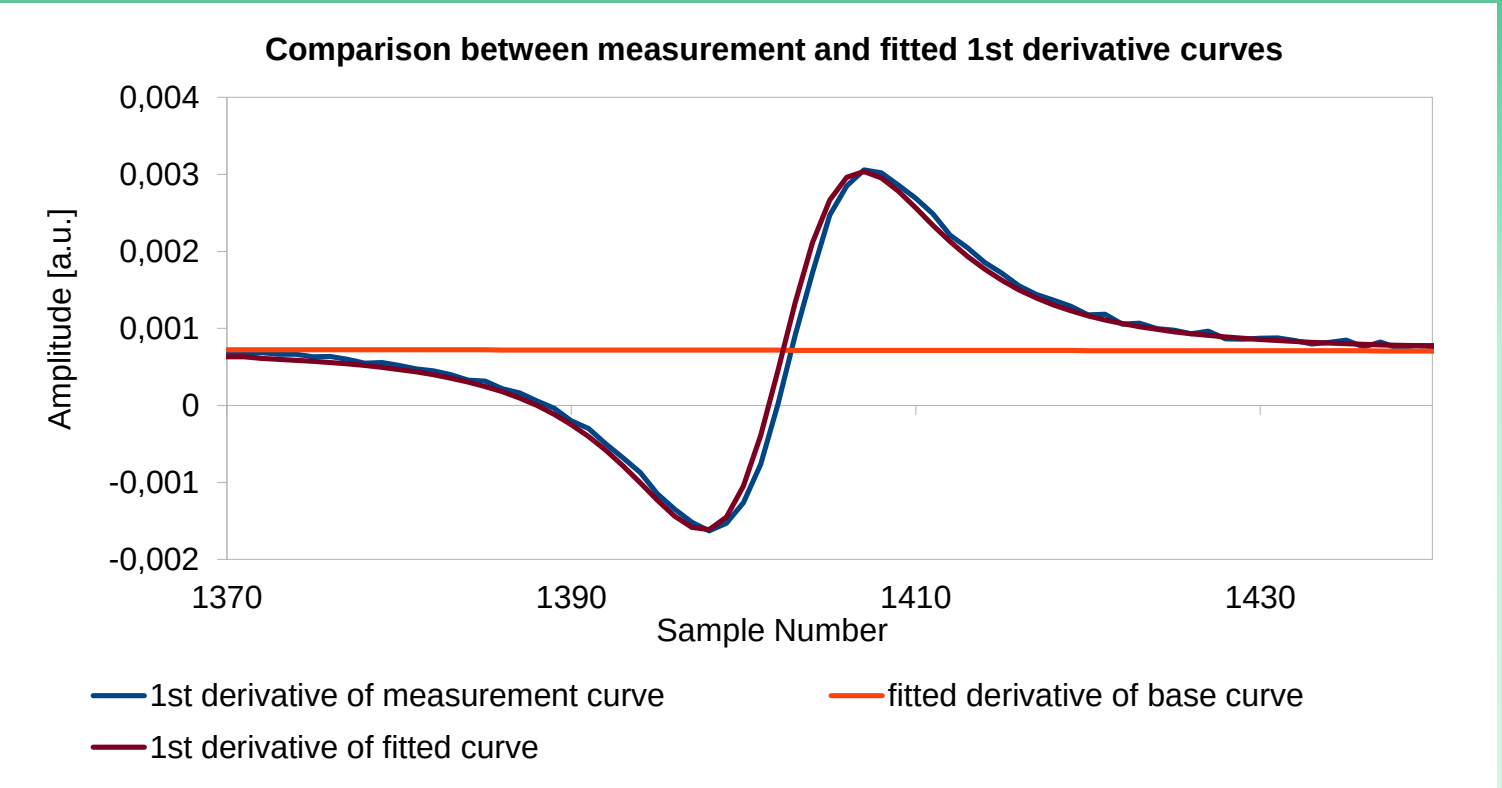
Erste Ableitung der Cauchy-Lorentz Absorptionskurven $\frac{\partial \sum L}{\partial v}$



Kurvenanpassung an Ableitung ergibt die gesuchte Gaskonzentration

5. Auswertealgorithmus

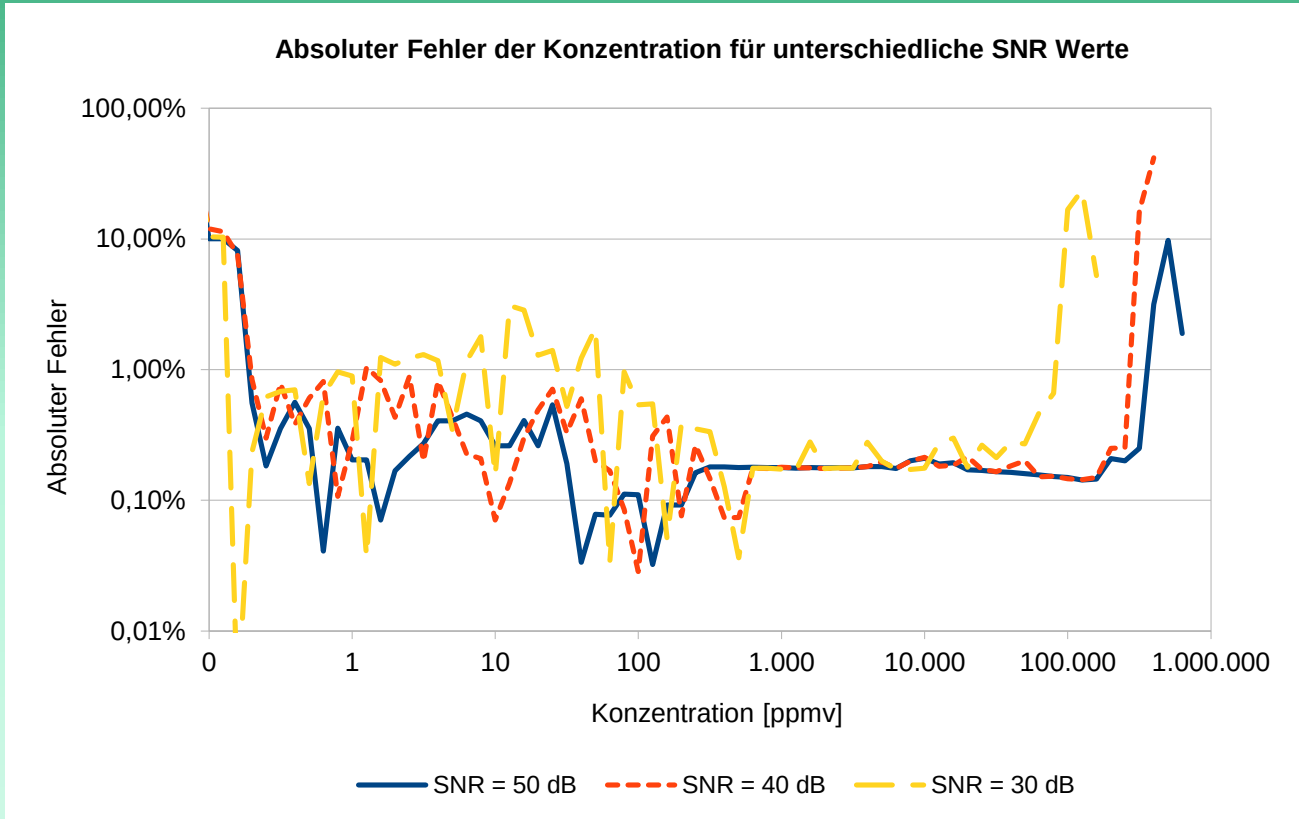
Erste Ableitung der Cauchy-Lorentz Absorptionskurven $\frac{\partial \sum L}{\partial v}$



Kurvenanpassung an Ableitung ergibt die gesuchte Gaskonzentration

5. Auswertealgorithmus

Genauigkeit des Verfahrens:



A. Rodrigues, V. Lange, D. Kühlke; Algorithm for concentration analysis with laser absorption spectroscopy; SPIE Optical System Design 2012

SPIE Optical Systems Design

26 - 29 November 2012
CCIB - Centre Convencions Internacional Barcelona
Barcelona, Spain

6. Zusammenfassung

- PCF wenig geeignet für Gase mit kleinen Linienstärken
- Problemlösung: Glaskapillaren mit metallischer Schicht

  aber: großer Biegeradius ergibt großen Sensoraufbau
- Problemlösung: Mikrokanalstrukturen in Glaswafer
- Auswertealgorithmus für schnelle Gasanalyse

6. Zusammenfassung

Veröffentlichungen:

M. Cabaleiro, V. Lange, D. Kühlke; Oxygen sensor based on hollow-core photonic crystal fibres, SPIE Photonics Europe 2008
A. Rodrigues, V. Lange, D. Kühlke; Spectroscopy Gas Sensing Based on Hollow Fibres, SPIE Photonics Europe 2011
A. Rodrigues, V. Lange, D. Kühlke; Echtzeitüberwachung von Gasen, GIT Labor-Fachzeitschrift 2012
A. Rodrigues, V. Lange, D. Kühlke; Algorithm for concentration analysis with laser absorption spectroscopy; SPIE Optical System Design 2012

6. Zusammenfassung

Literatur:

T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen, “Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers”, Optics Express Vol. 12 No. 17, 4080-4087,(2004)

L.S. Rothman et al, “The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database”, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 96, 139-204 (2005)

S. Hartwig, A. Lambrecht, Charakterisierung von Hohlfasern für kompakte Infrarot-Gasmesszellen, Technisches Messen 75 (2008) 10, 555-564

M. Mohebbi, R. Fedosejevs, V. Gopal, J.A. Harrington, “Silver-coater hollow-glass waveguide for applications at 800 nm”, Applied Optics, Vol. 41, No. 33, 7031-7035 (2002)

Polymicro Technologies, LLC, “The Book on the technologies of Polymicro” and product catalogue, 2005

Doko Engineering LTD, Hollow glass fibres for infrared lasers, http://do-ko.jp/specs.html, accessed on February 2009.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

4. Aalener Photonik-Tag 16. November 2012

PHOTON^{n}

TP2.2: Faseroptischer Gassensor

Alberto Rodrigues , Volker Lange, Dietrich Kühlke

HOCHSCHULE FURTWANGEN UNIVERSITY HFU

ZAFH-Photon^{n}

Project funded by Europe Union European Regional Development Fund and the state of Baden- Württemberg

gefördert durch die Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
und das Land Baden-Württemberg