

Andreas Schütze

Mehrkanal-IR-Sensorsysteme zur Qualitätssicherung von Öl und Wasserstoff

Saarbrücken, 13. Dezember 2018

Vorlesung: Perspektiven der Ingenieurwissenschaften

SYSTEMS

ENGINEERING





Fokus: Intelligente Sensorsysteme zur Messung chemischer Größen, sowohl für die Gasphase als auch in Flüssigkeiten. Wir nutzen sowohl chemische als auch physikalische Effekte und verknüpfen (Mikro-)Sensoren mit Elektronik für Betrieb und Datenerfassung sowie mit angepassten Signalverarbeitungskonzepten zu komplexen Messsystemen.

Zwei sich ergänzende Bereiche

- Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes
 - Grundlagenforschung
 - Schwerpunkt Gasmesstechnik, u.a. Luftgüte
- Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik
 - Angewandte F&E
 - Schwerpunkt fluidische Sensorsysteme, u.a. Ölqualität

> Warum Messung chemischer Größen?



- Sicherheitstechnik
 - Explosionsschutz, z.B. CH_4 im Bergbau (bzw. im Haushalt)
 - Vergiftungsschutz, z.B. CO im Bergbau (bzw. im Parkhaus)
- Qualitätskontrolle
 - Dichtheitsprüfung von Verpackungen
 - Prüfung von Lebensmitteln
 - Ölqualität z.B. in Flugzeughydraulik und BHKW
- Umwelttechnik
 - Abgaskontrolle und -regelung, z.B. Lambda-Sonde im Pkw
 - Erkennung von Umweltverschmutzung, Identifizierung der Verursacher
- Komfortanwendungen
 - bedarfsgerechte Lüftung in Toiletten und Küchen
 - automatische Umluftklappe im Pkw



Chemische Sensoren zeigen Prinzip-bedingte Nachteile

- Alterung/Drift/Vergiftung, da keine hermetische Kapselung möglich ist
- häufig geringe Selektivität, da die chemische Interaktion von verschiedenen Substanzen ausgelöst werden kann
- geringe Genauigkeit als Folge der Alterung und weiterer Quereinflüsse, z.B. Temperatur
- Messunsicherheit typisch $> 10\%$

Physikalische Messung wird genutzt, z.B.

- Infrarotabsorption: Moleküle (Feder-Masse-System), in der Gas- oder Flüssigphase, werden von Licht zum Schwingen bei ihrer Resonanzfrequenz angeregt; diese Lichtfrequenz wird selektiv absorbiert, ihre Intensität wird gemessen.
- Wärmeleitung, z.B. zur Messung von Verbrennungsabgasen
- Bestimmung des Brechungsindex von Flüssigkeiten zur Konzentrationsmessung von Zucker o.ä.

- Schwingungen der Atome in einem Molekül können bei Änderung des Dipolmoments mit IR-Strahlung (ca. 2-20 µm) angeregt werden.

⇒ Absorption

Lambert-Beer'sches Gesetz

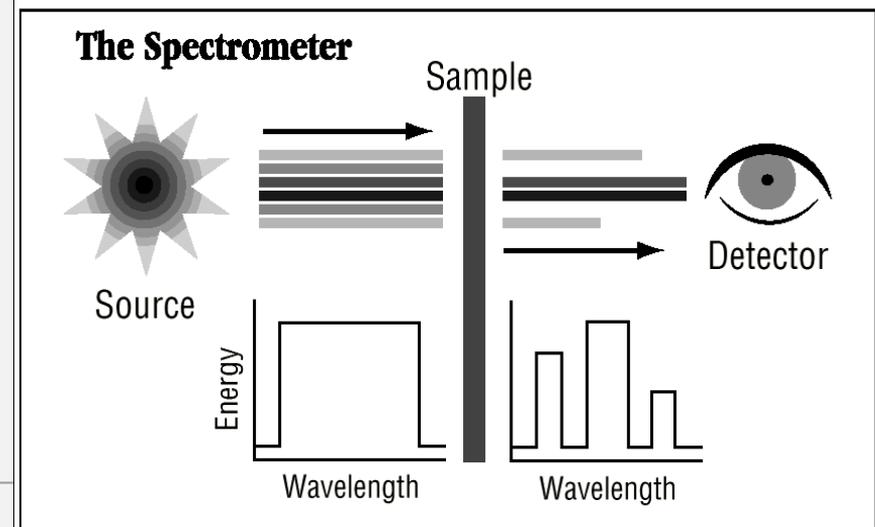
$$I = I_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot c \cdot l)}$$

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \alpha \cdot c \cdot l$$

mit: c: Konzentration, l: Weglänge,
 $\alpha(\lambda)$: Extinktionskoeffizient

- “Schlüssel­frequenzen“
 Angabe in „Wellenzahl“, d.h. Wellen pro Zentimeter, damit proportional zur Frequenz.

aus: "Analytikum", K. Doerffel, R. Geyer,
 VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie,
 Leipzig 1981



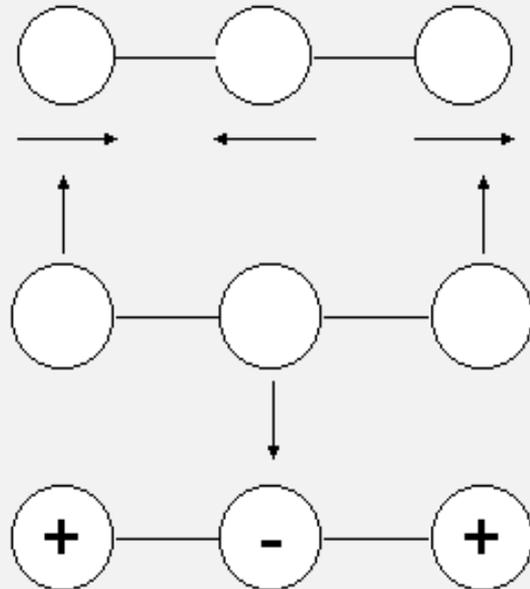
Valenzschwingungen A=B; ca. 1500cm ⁻¹	Valenzschwingungen A=B, 2000..2500cm ⁻¹	Valenzschwingungen A-H 3000..3500cm ⁻¹
C=C 1650	C≡C 2100	C-H 3000
C=N 1650	C≡N 2250	O-H 3600
C=O 1700	C=O 2240	N-H 3500
P=O 1300		Si-H 2200
		P-H 2400

Schwingungsformen:

• Beispiel CO₂: $Z = 3 \cdot 3 - 5 = 4$



sym. Valenzschwingung
1334 cm⁻¹ 3657cm⁻¹



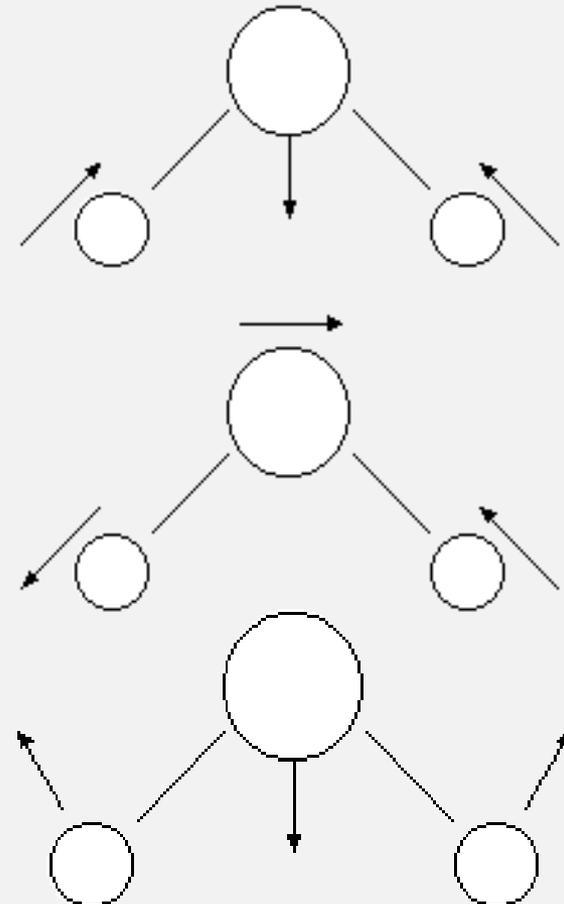
asym. Valenzschwingung
2349 cm⁻¹ 3756cm⁻¹

Deformationsschwingung

667 cm⁻¹ 1595cm⁻¹
2-fach entartet
Schwingung in
zwei Ebenen

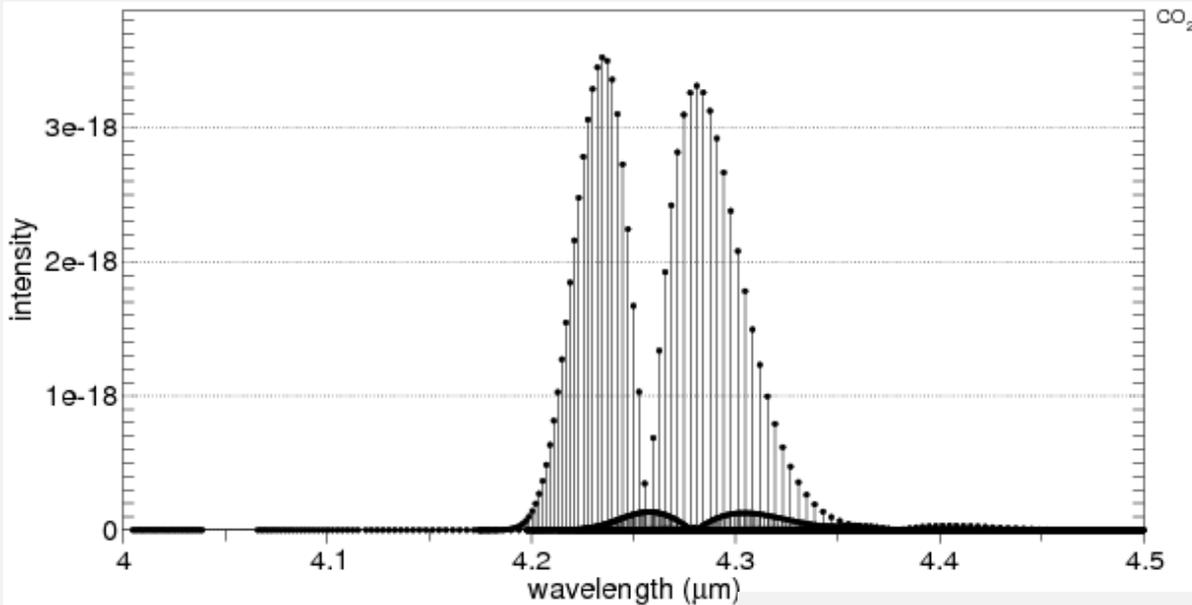
siehe auch: <http://www.ir-spektroskopie.de>

• Beispiel H₂O: $Z = 3 \cdot 3 - 6 = 3$



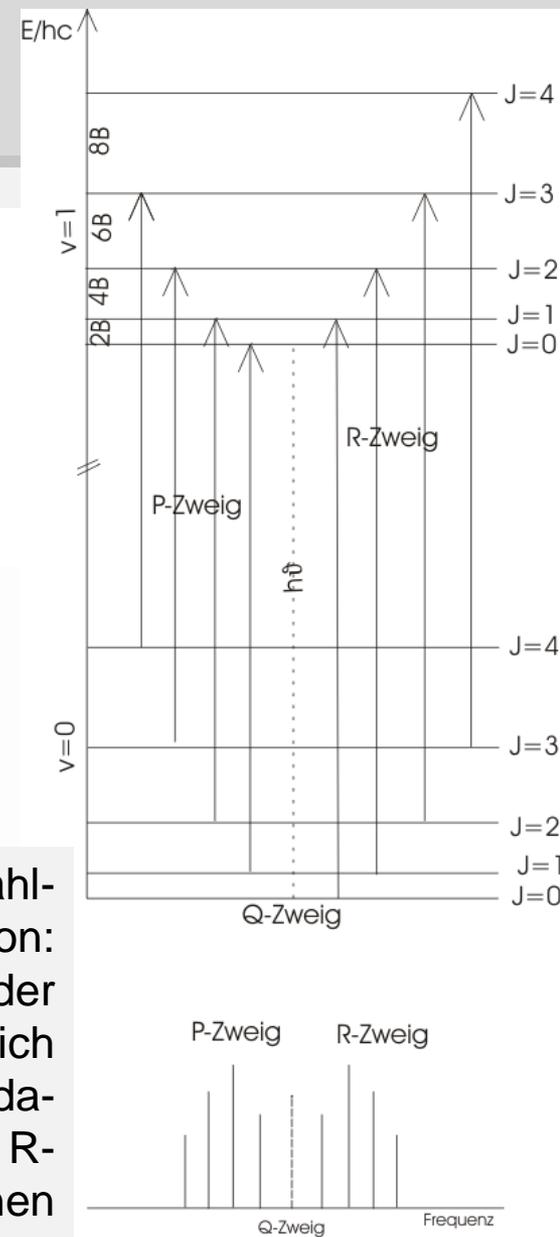
> Grundlagen IR-Spektroskopie

Beispiel: CO₂-Spektrum



Oben: Darstellung der Feinstruktur, hier über der Wellenlänge [μm]. Die typische Struktur entsteht durch Überlagerung der Schwingung mit zusätzlichen Rotationsanregungen, so dass sich eine relativ breite Bande ergibt.

Quantenmechanische Auswahlregeln für die IR-Absorption: zusätzlich zur Anregung der Grundschiwingung ändert sich der Drehimpuls J um ± 1 , dadurch entstehen P- und R-Zweig mit vielen einzelnen Linien.

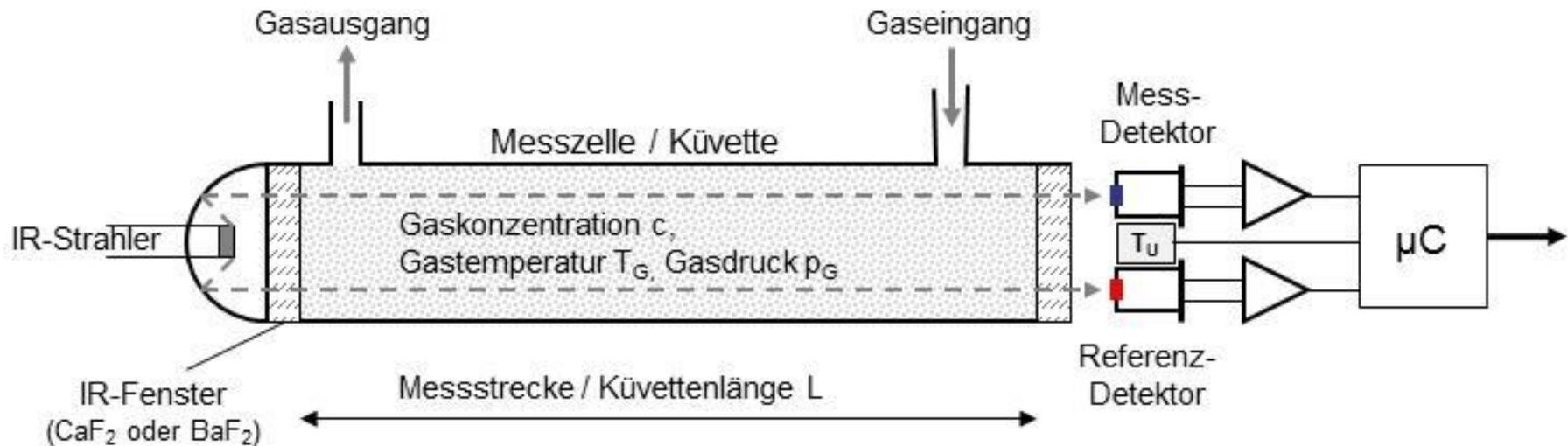


> Grundlagen IR-Spektroskopie



- Nicht-dispersive IR-Absorptionsmessung erfordert hohen apparativen Aufwand
- ermöglicht quantitative Messungen mit
 - hoher **Genauigkeit**
 - guter **Langzeitstabilität**

→ Typische Messanordnung für Gaskonzentrationsbestimmung



Quelle: http://witec-sensorik.de/?page_id=208

Integriertes Multisensorsystem zur Zustandsüberwachung von Schmierflüssigkeiten

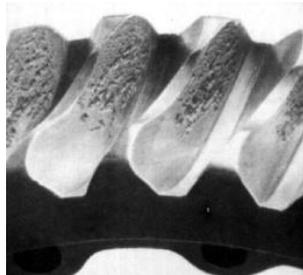
Dipl.-Ing. Torsten Bley



Dissertation durchgeführt am
Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik

Motivation

- Schmierflüssigkeiten besitzen je nach Anwendungen unterschiedliche Grenzwerte für definierte Parameter (Funktionsbereiche)
 - Viskosität
 - VI-Index
 - Acid Number
- Verlassen des Bereichs bedeutet Schadensrisiko bzw. erhöhter Verschleiß an Maschine oder Anlage



→ Betriebsstundenabhängige Wechselintervalle

oder

→ Überwachung des Schmierflüssigkeitszustands

www.tribology.co.uk
internet

Bestimmung des Schmierflüssigkeitszustands

■ Laboranalytik

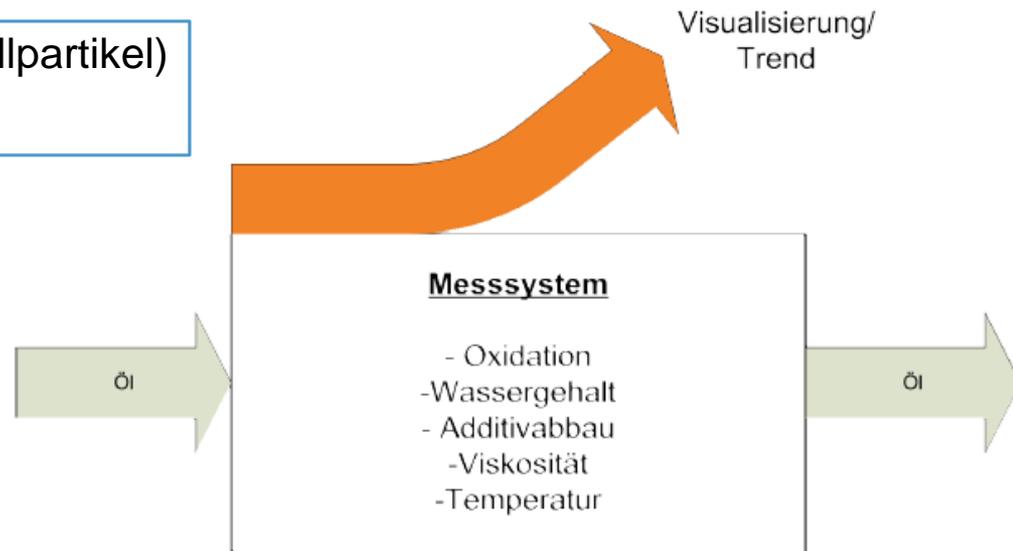
- Probenentnahme an der Maschine/Anlage und Untersuchung im Labor
- Sehr hohe Genauigkeit mit aufwändigen Laboranalysemethoden:
 - Anzahl und Art der Partikel (optisch, Atom-Emissions-Spektroskopie,...)
 - Chemischer Verschleiß der Schmierflüssigkeit (z.B. FTIR, Acid Number, Base Number,...)
- Gefahren
 - Probenentnahme in vordefinierten Zeiträumen
 - Ort der Probenentnahme
 - Zeitraum der Analyse
 - Kosten

→ Online-Methode zur Bestimmung der Flüssigkeitsqualität erwünscht

Sensorsystem

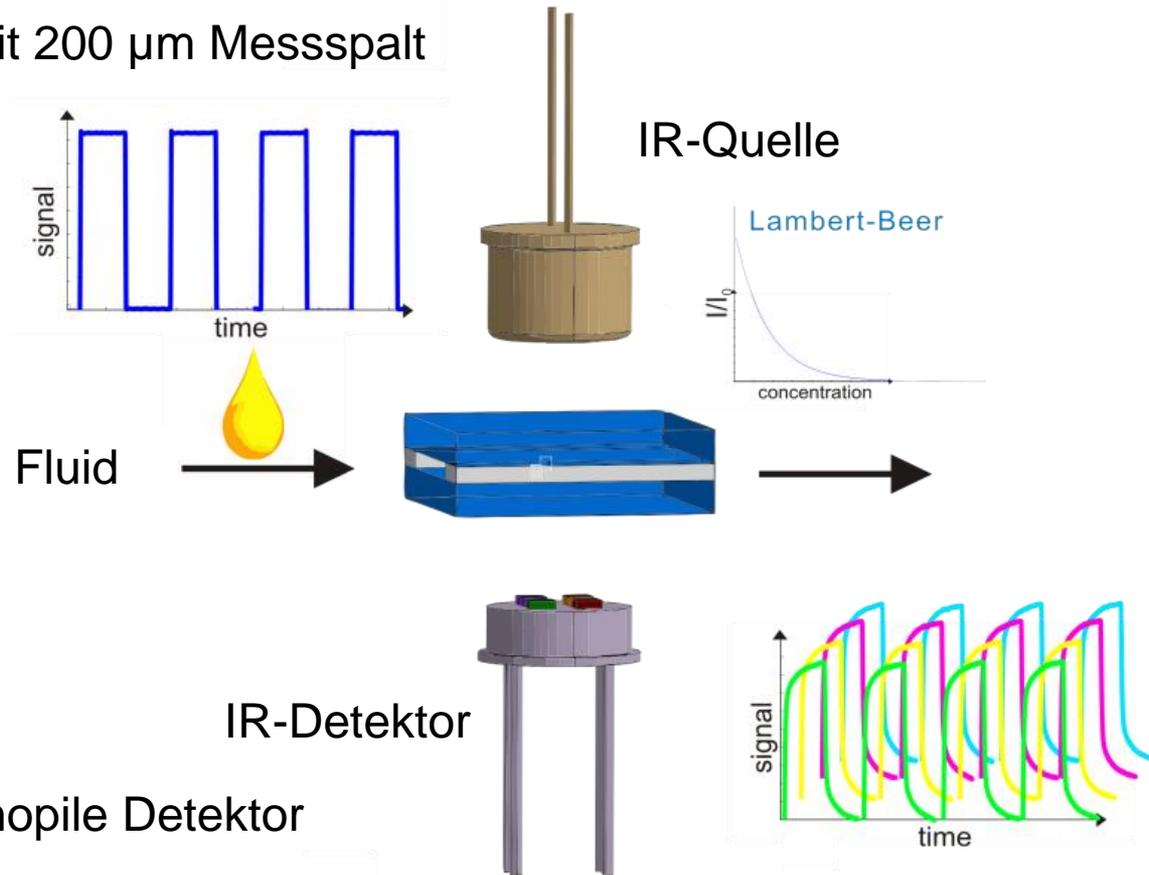
- Anforderungen an das Sensorsystem:
 - Messung von Oxidation, Wassergehalt
 - Breitbandig einsetzbar
 - Kompakt und kostengünstig
 - Nichtinvasiv
 - Möglichst keine Querempfindlichkeiten
 - Online-Sensor
 - Viskositätsmessung
 - Partikelart (Luft, Staub-, Metallpartikel)
 - Partikelkontamination

Entwickelt im Parallelprojekt
D. Schön, Prof. Löffler-Mang



Sensorsystem

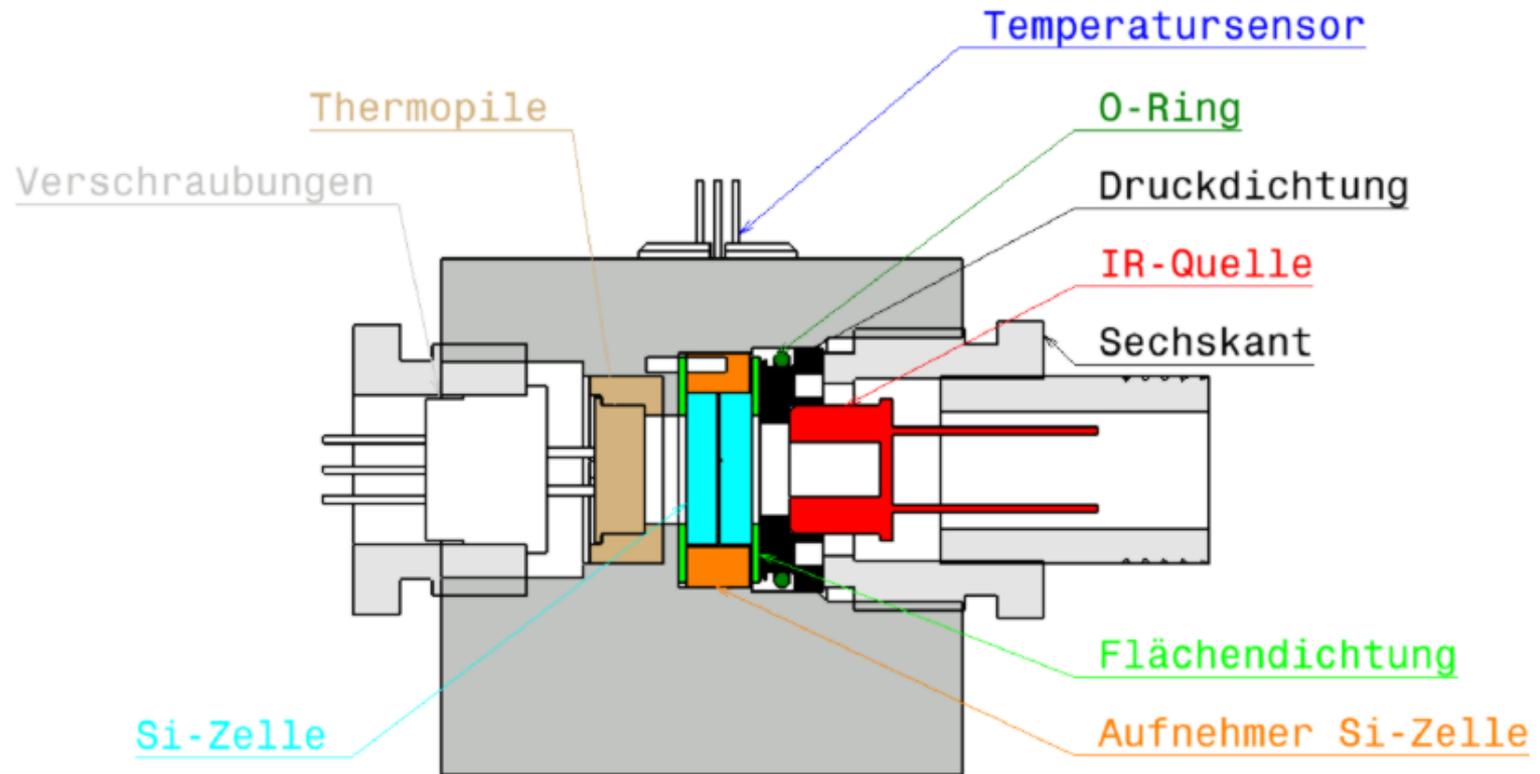
- Mikrostrukturierte IR-Quelle
- Si-Küvette mit 200 μm Messspalt



- 4-fach Thermopile Detektor
- Gepulster Betrieb für hohes SNR

Sensorsystem

- Realisiertes kompaktes Sensorsystem (BMBF-Projekt NaMiFlu)



Charakterisierung – Bestimmung der Viskosität

■ Druckcharakterisierung

- Laminarer Fluss
- Bestimmung der Viskosität anhand der Druckdifferenz

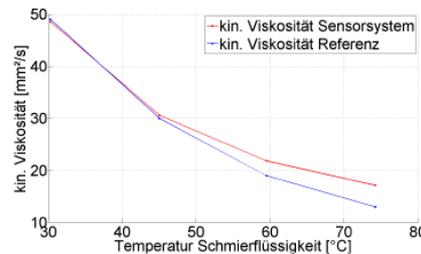
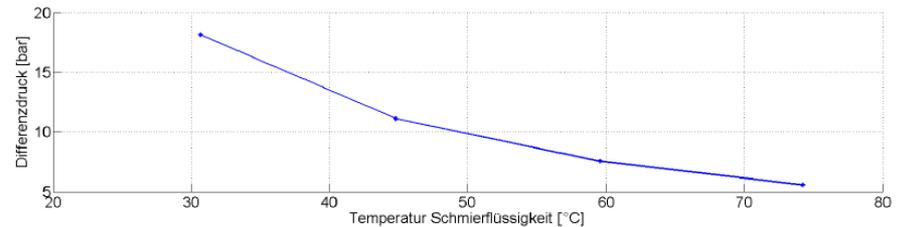
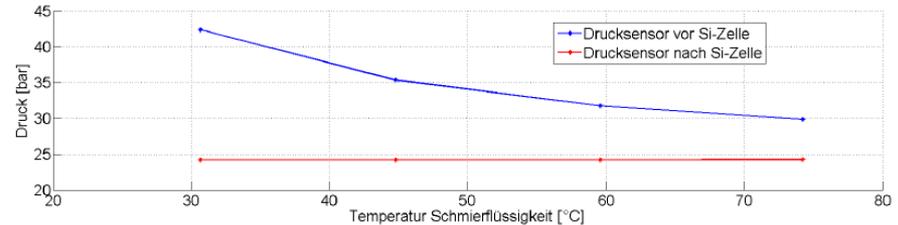
$$R_{lam} = \left(\frac{c_1 \cdot \nu \cdot l \cdot \rho}{2 \cdot d^2 \cdot A} \right)$$

$$\Delta p = R_{lam} \cdot Q$$

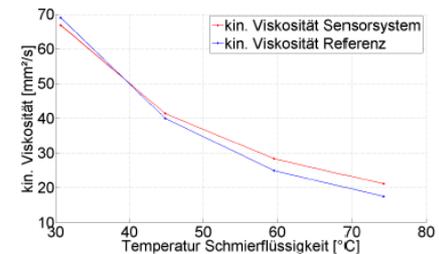
ν	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
l	Rohrlänge
A	durchströmter Querschnitt
Q	Volumenstrom

■ Viskosität mit Sensorsystem

- Parameterbestimmung mit frischer Schmierflüssigkeit
 - Bestimmung der Viskosität von 3 Tage gealterter Schmierflüssigkeit
- Abweichung bis 20% (75°C)



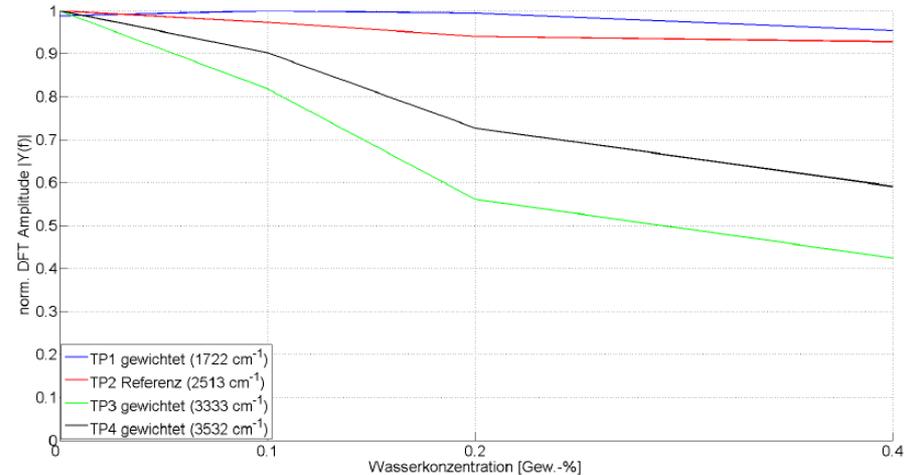
HETG 0d



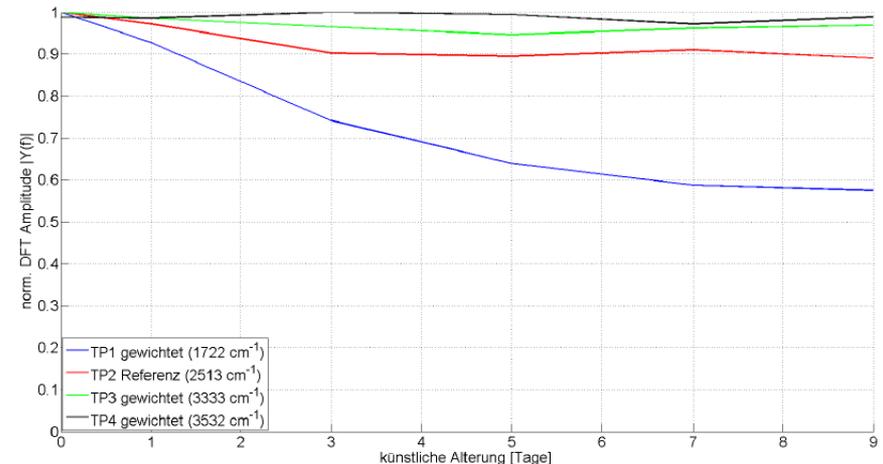
HETG 3d

Charakterisierung – Bestimmung von Wasser und Oxidation

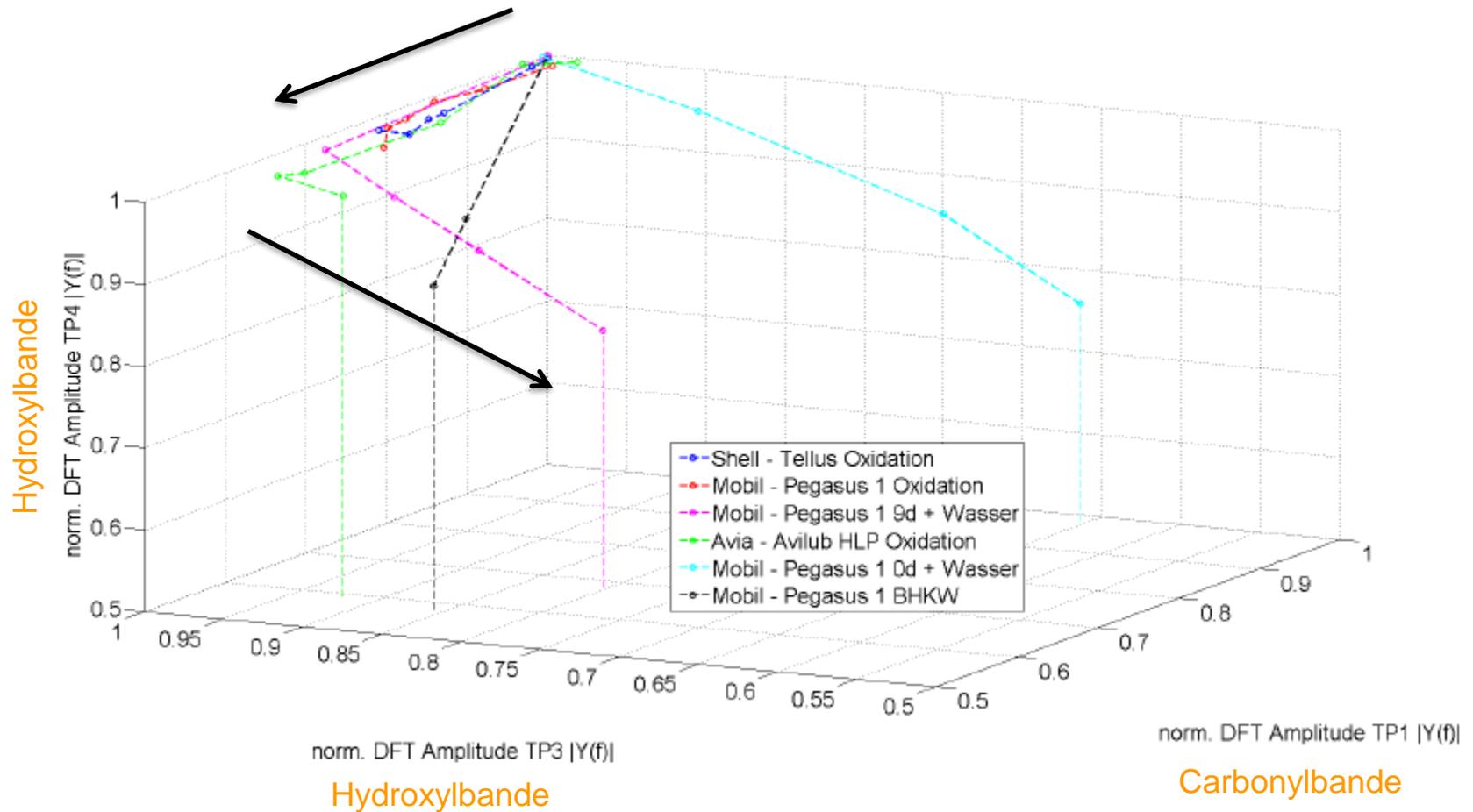
- Synth. Motoröl – Wasserzugabe
 - Carbonylbande – [TP1](#)
 - konstant
 - Hydroxylbande – [TP3](#) & [TP4](#)
 - Reaktion auf Wasserzugabe
- Wasseranreicherung beobachtbar



- Mineralöl – künstl. Oxidation
 - Carbonylbande – [TP1](#)
 - Reaktion auf Oxidation
 - Hydroxylbande – [TP3](#) & [TP4](#)
 - sehr geringe Reaktion
- Anstieg der Oxidation beobachtbar



Charakterisierung – Vergleich von Schmierflüssigkeiten



Mobilsystem

■ Einsatz des Sensorsystems im Feldtest

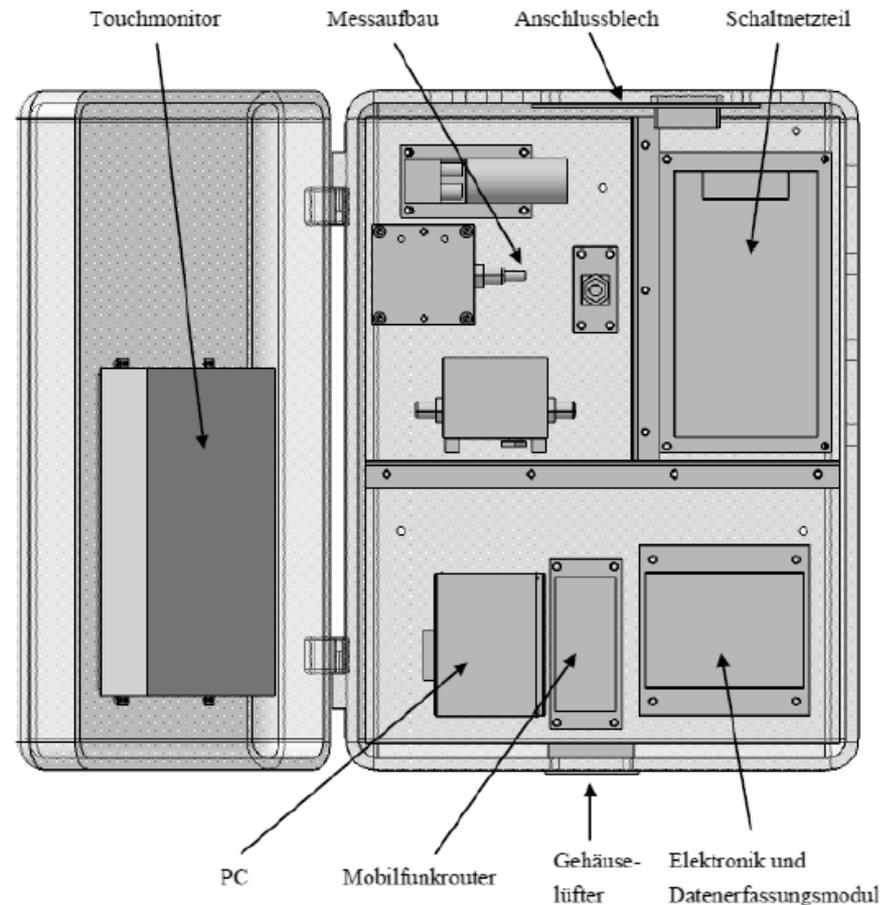
- Eigenständiger PC
- UMTS / VPN Zugriff
- Integrierte Elektronik
- Sensorsystem und Pumpe
- Vorfiltrierung
- Vorkühlung

■ Laborprüfung

- Mobil 1 künstlich gealtert

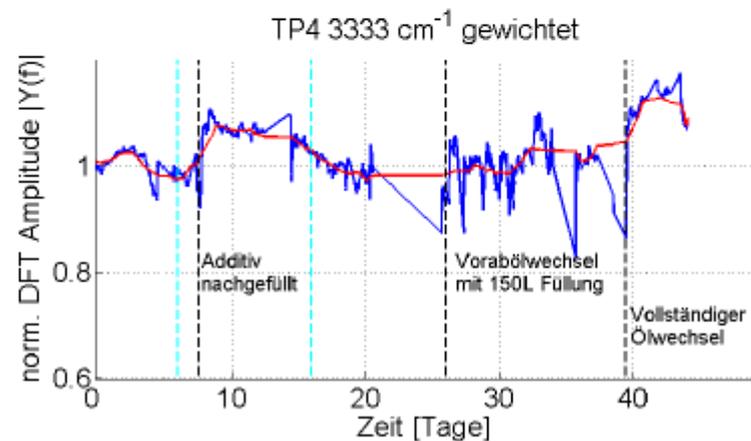
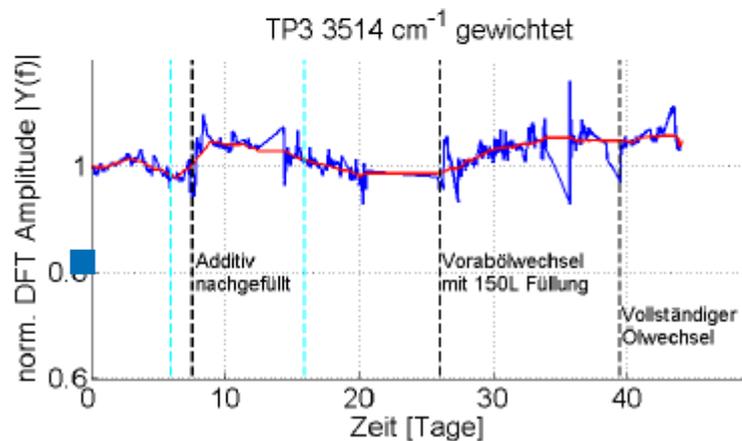
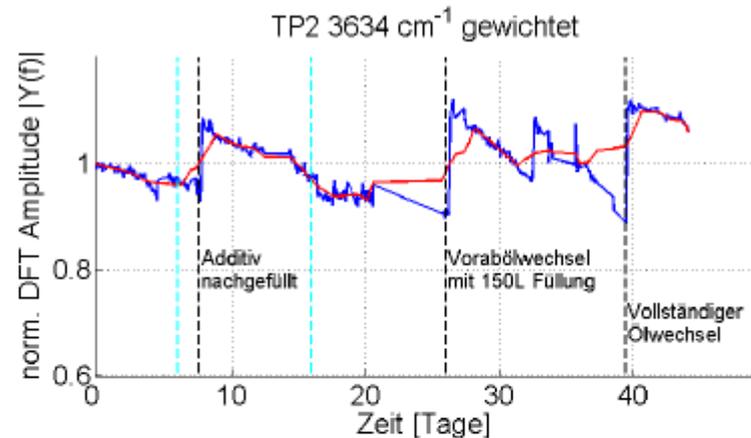
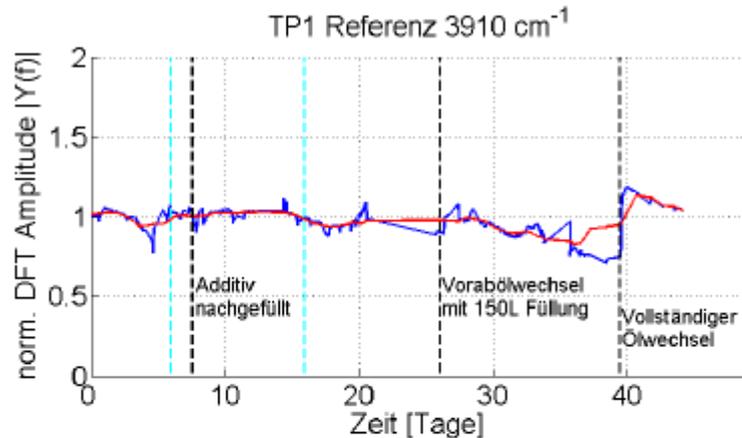
■ Feldtest

- Kühlschmierstoff einer Schraubenpresse (RUIA AG, Beckingen)



Feldtestergebnis RUIA AG

- Eindeutige Indikation von Ölwechseln und Additivzugaben



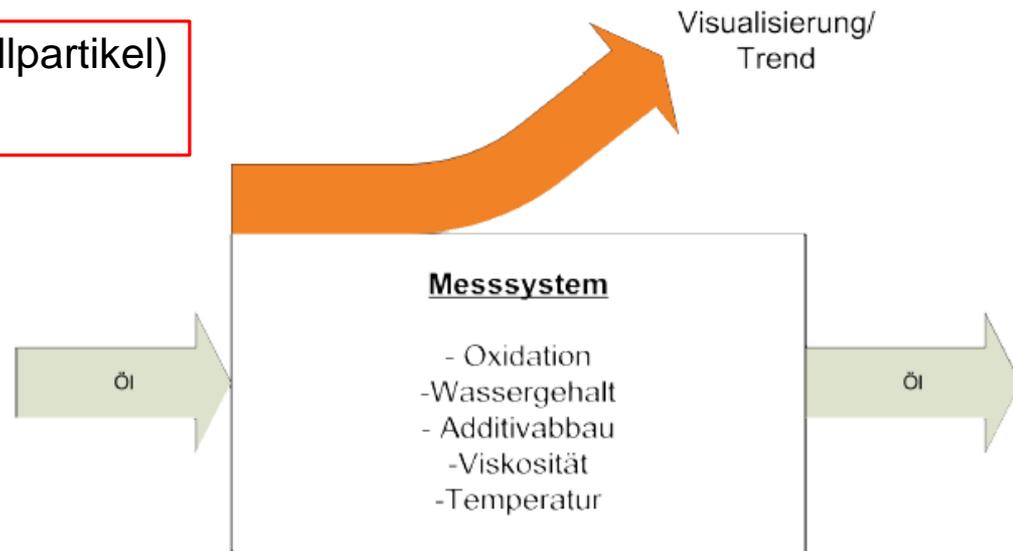
- Manueller Prozess mit Sensorsystem automatisierbar

Sensorsystem

■ Anforderungen an das Sensorsystem:

- Messung von Oxidation, Wassergehalt
- Breitbandig einsetzbar
- Kompakt und kostengünstig
- Nichtinvasiv
- Möglichst keine Querempfindlichkeiten
- Online-Sensor
- Viskositätsmessung
- Partikelart (Luft, Staub-, Metallpartikel)
- Partikelkontamination

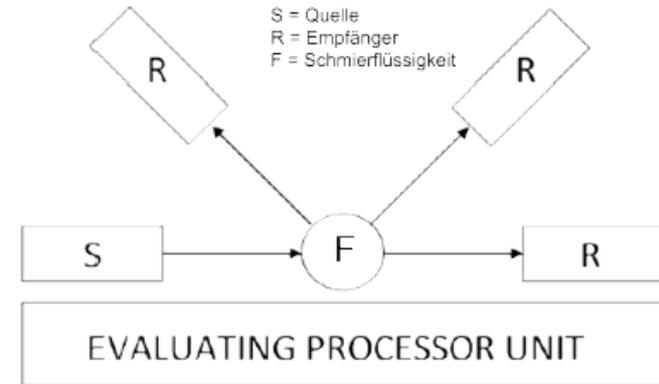
Entwickelt im Parallelprojekt
D. Schön, Prof. Löffler-Mang



Partikelsensorsystem

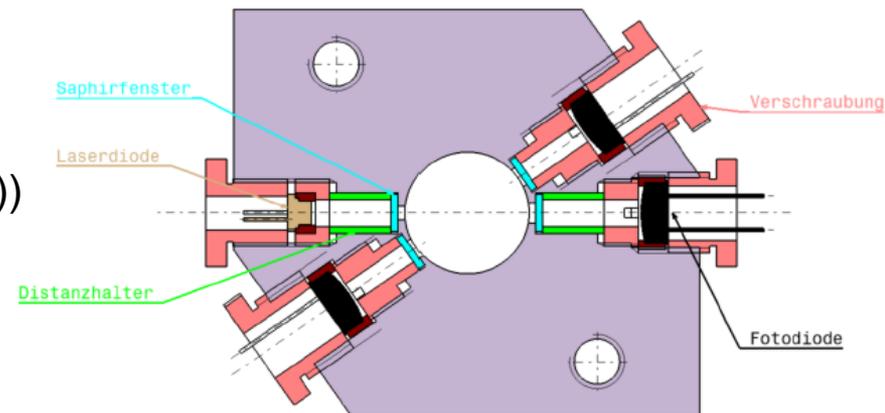
■ Prinzip

- Lichtstreuung bei Partikeldurchmessern im Bereich der Laserwellenlänge
- Erfassung der Lichtstreuung in drei Richtungen
 - Vorwärtsstreuung (35°)
 - Rückwärtsstreuung (145°)
 - Transmission (180°)
- Messung/Unterscheidung von Staub- & Metallpartikeln, Luftblasen



■ Aufbau

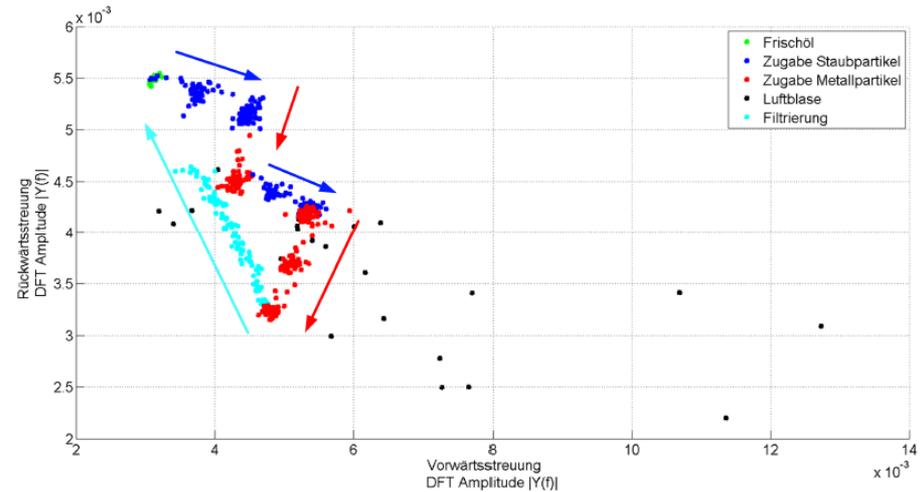
- Modifikation
- Laserdiode 785 nm (220 mW (pulsed))
- 3x Fotodiode 400...1100nm (20 ns)
- Abdichtung gegen Schmierflüssigkeit mit Al_2O_3 -Fenstern
- Laserfrequenz 60 Hz, DFT (250 ms)



Partikelsensorsystem

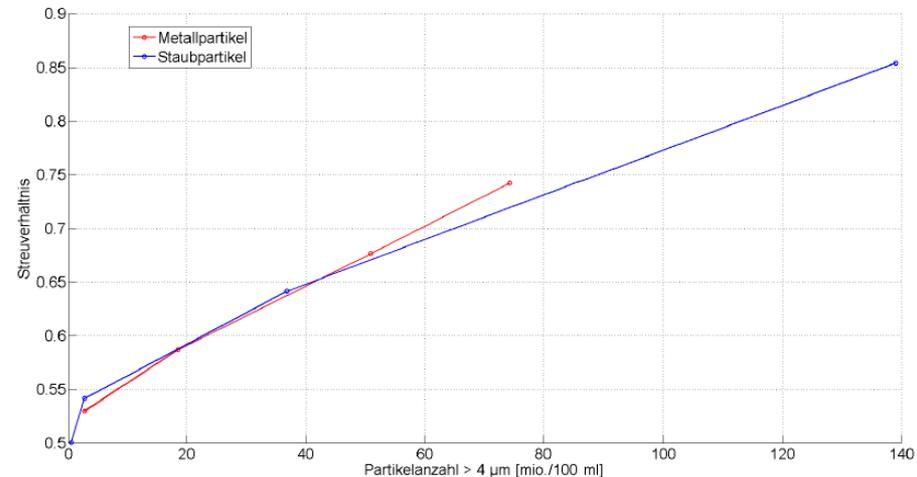
■ Unterscheidung von Partikeln

- Vorwärts- gegen Rückwärtsstreuung
- Trennung von Staub- und Metallpartikel
- Luftblasen als starke Streuung sichtbar



■ Messung der Partikel

- Referenzmessung mit Partikelmikroskop (Morphology G3) Messung der Partikel > 4µm
- Nutzung des Streuverhältnisses
- Anstieg Streuverhältnis nahezu gleich zur Partikelanzahl bei Verunreinigung mit SP oder MP



Fazit

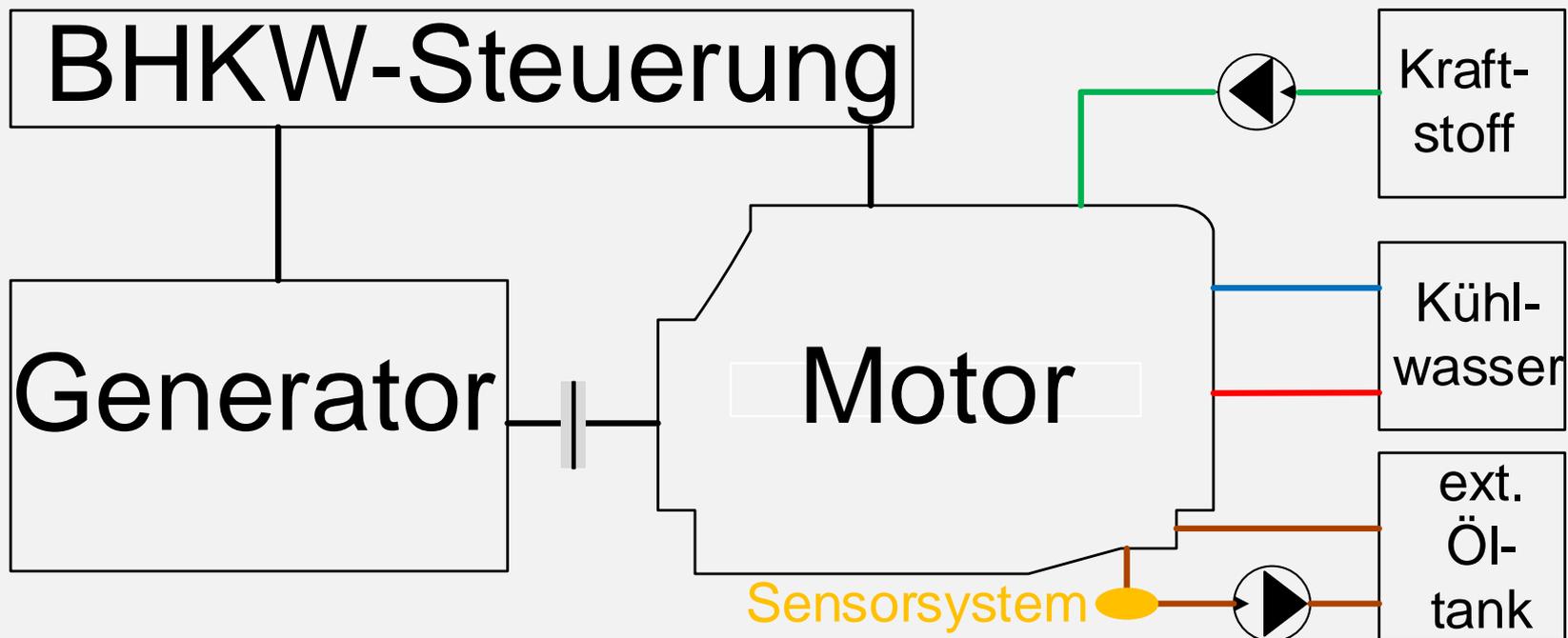
- Entwicklung bzw. Charakterisierung eines Sensorsystems zur Bestimmung der Fluidqualität
 - Verifikation der spektralen Banden für Oxidation, Wasser, Additive
 - Auslegung und Charakterisierung der Systemkomponenten
 - Charakterisierung des Sensorsystems bei unterschiedlichen Bedingungen
 - Verifikation des Messverfahrens an gealterten und kontaminierten Proben
 - Mobilsystem zur Feldtesterprobung des Sensorsystems
 - Funktionsüberprüfung im Labor
 - Online-Messung des Kühlschmierstoffzustands an einer Schraubenpresse
 - Möglichkeit der Zustandsüberwachung gegeben
 - Partikelsensorsystem
 - Übernahme und Modifikation des Sensorsystems
 - Charakterisierung durch künstliche Kontamination der Schmierflüssigkeit
 - Trennung von Luftblasen, Staub- und Metallpartikeln
- Kombination beider Sensorsysteme
COPS – Combined Oil Quality and Particle Measurement System

Messsystem zur Online-Qualitätsüberwachung von Schmierölen in Gas- und Diesel-betriebenen BHKW-Motoren

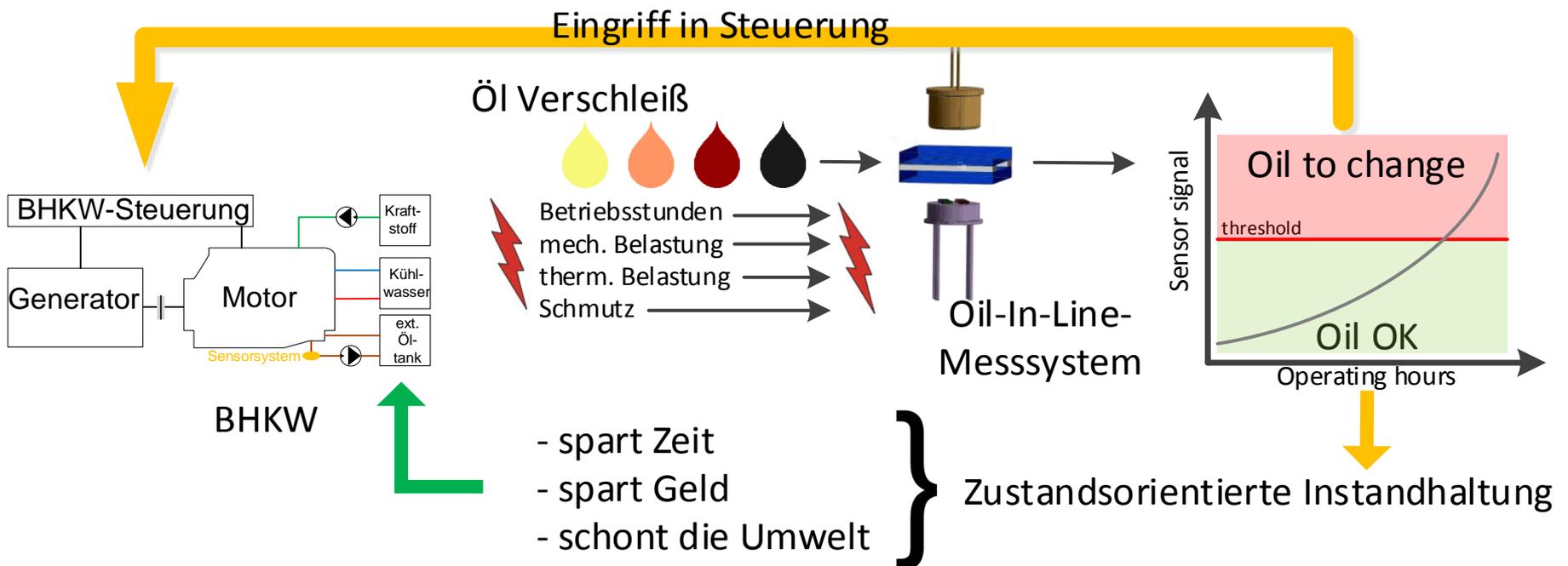
- BHKW: Blockheizkraftwerke (z.B. Krankenhaus, auch privat); auch: KWK (Kraft-Wärme-Kopplung), Strom + Wärme
- Motor: typisch Pkw-Motor (z.B. Dieselmotor von VW)



- Ölwechsel Pkw-Motor alle ~ 15.000 km = ~ 300 h
 - BHKW: nach ~ 14 Tagen Ölwechsel fällig?
 - Lösung: externer Öltank (ca. 100 l) für längere Intervalle
 - Regelmäßiger Test der Ölqualität im Labor
- Ziel: **Online-Ölqualitätsmessung**

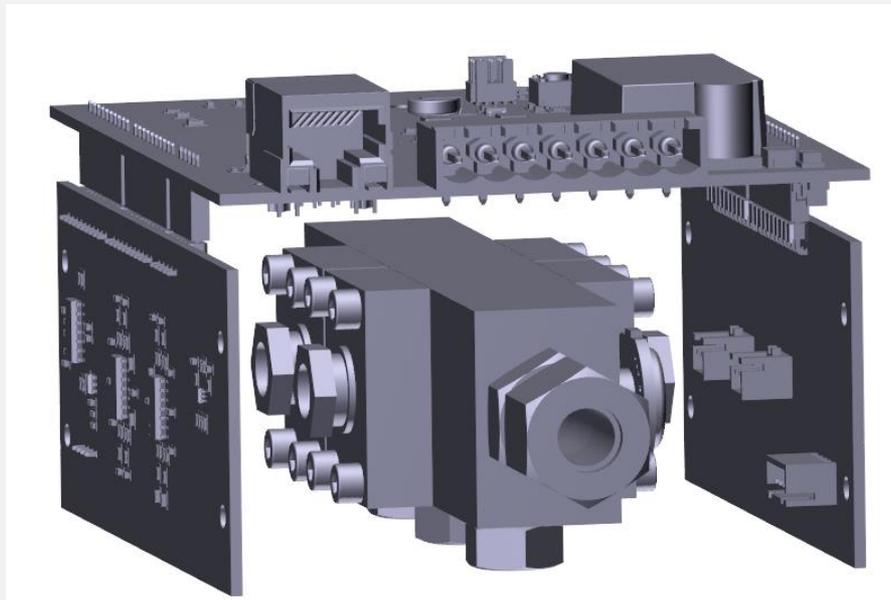


- Übertragung der Ölqualitätssensors von Hydraulik auf Motoröl
- Verifikation für unterschiedliche Ölsorten
- Erprobung in Feldversuchen mit Partner
→ eindeutige Korrelation Sensormesswerte zu Laboranalyse



Kompakte Systemlösung

- Messzelle mit 2 IR-Sensorzellen → bis zu 7 Messkanäle
- Elektronik für Betrieb der Quellen und Auslesung
- Interne Auswertung
- Schnittstelle zur Anlagensteuerung und Datenübertragung
→ kommerzialisiert von Projektpartner ZILA



Felderprobung





**HAIMa - H₂ – und Kationen-Kontamination:
Alterungseffekte, Material- und Sensorentwicklung;
Teilvorhaben: Entwicklung und Erprobung von
Messprinzipien zur H₂-Qualitätsüberwachung**

Zentrum für Mechatronik und
Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH

Projektpartner



HAIMa – Teilvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Messprinzipien zur H₂-Qualitätsüberwachung

Problemstellung

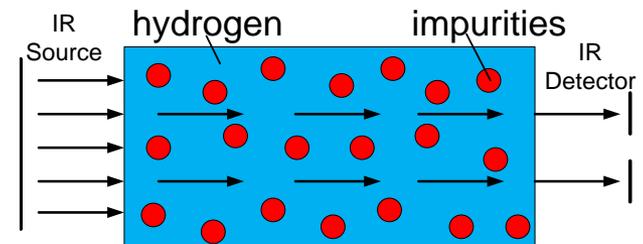
- **Verunreinigungen im Wasserstoff** verursachen bei H₂-Brennstoffzellen dauerhafte **Schäden** und **Reduzierungen** des **Wirkungsgrades**.
- **Verunreinigungen** können durch die Erzeugung, Transport oder Lagerung (z.B. Tankstellen) des **Wasserstoffes eingeschleppt** werden.
- Zur Zeit keine Onlineüberwachung der Wasserstoffqualität möglich.

Vorgehen

- Auswahl geeigneter **onlinefähiger Messmöglichkeiten** (IR-Absorption, ggfs. weitere Sensorprinzipien) zur Detektion relevanter Verunreinigungen im H₂.
- **Charakterisierung** von Wasserstoffgemischen bei **hohen Drücken**.
- Ableitung und Umsetzung eines **Messsystems**

Ziele

- Entwicklung eines online-fähigen Sensorsystems zur H₂-Qualitätsüberwachung bzw. Detektion der Kontaminationen.
- Know-how Aufbau in der Hochdruck-IR-Messtechnik und weiterer Messprinzipien.
 - Beitrag zur Energiewende



1. Motivation

2. Grundlagen

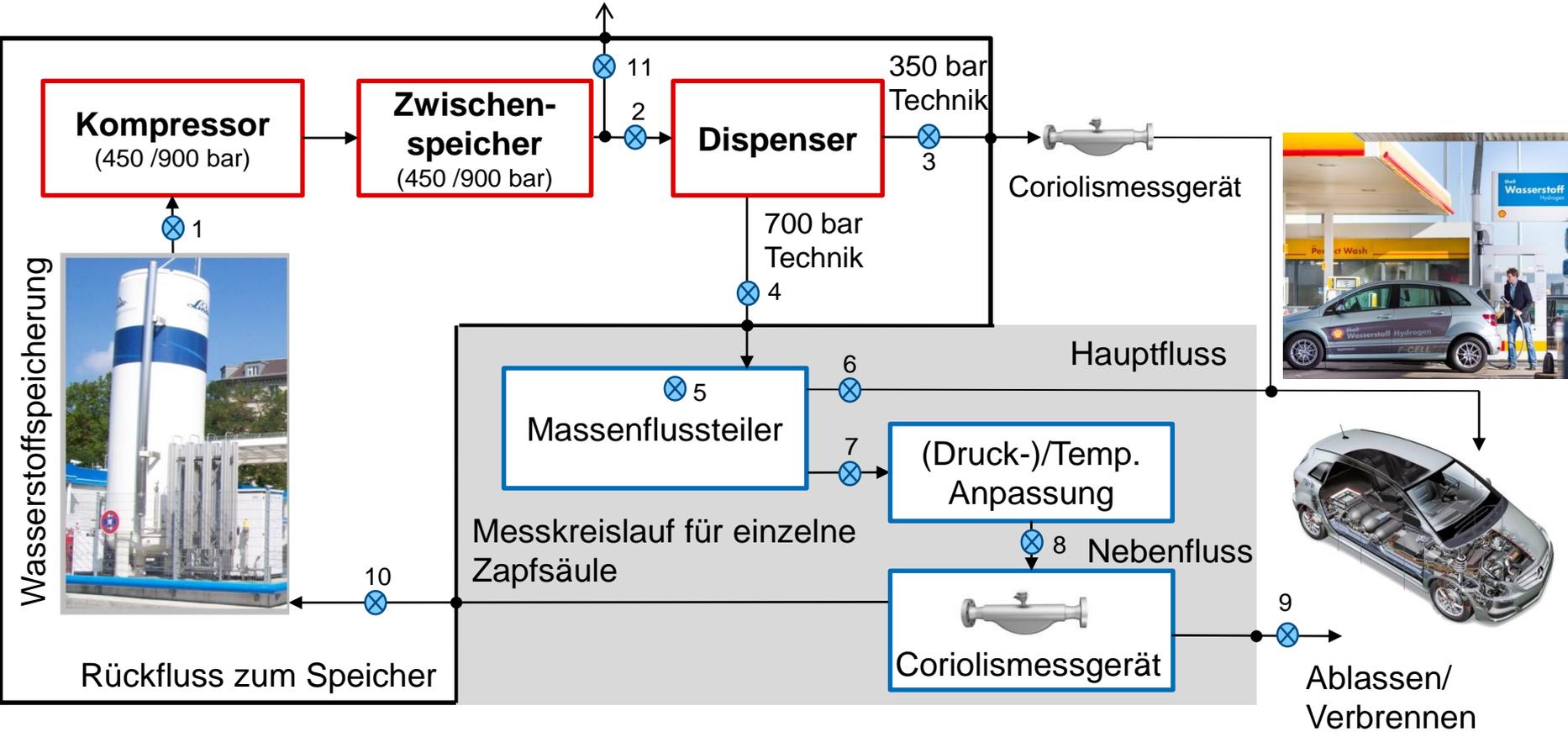
3. Auslegung des online-Messsystems

4. Simulation des Verhaltens der Banden bei Druckerhöhung

5. Messergebnisse

6. Fazit & Ausblick

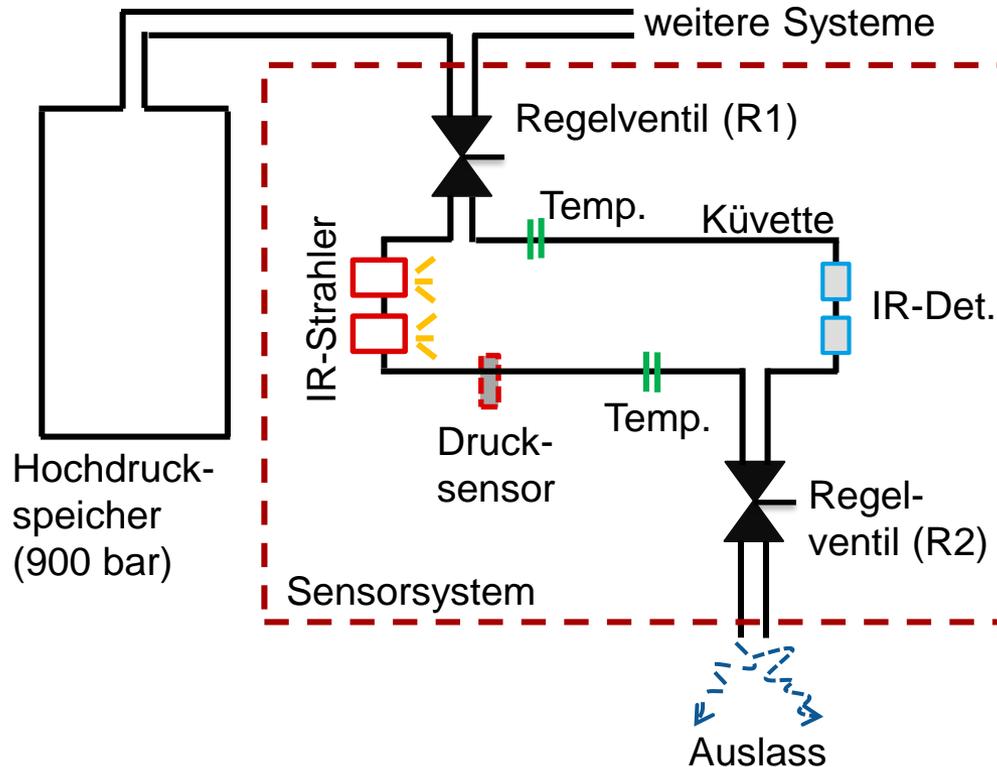
Kreislauf für eine Wasserstofftankstelle



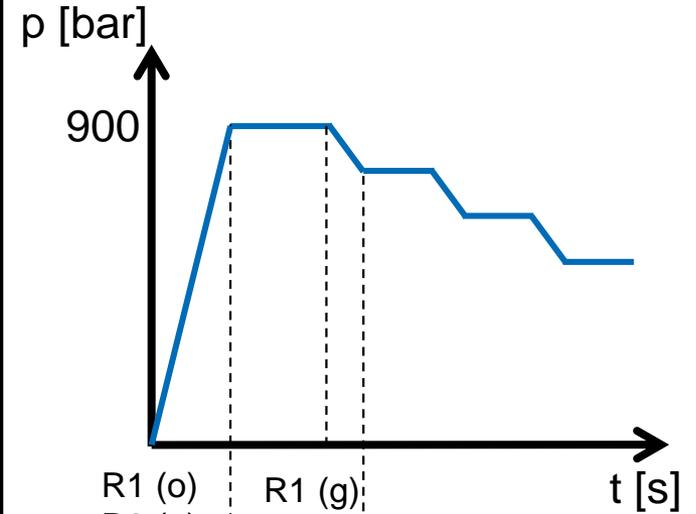
⊗ Mögliche Stellen für Verunreinigungsmessungen

Prinzip des Messsystems

Messsystem



Messablauf



R1 (o) R1 (g)
 R2 (g) R2 (o)

 R1 (g) R1 (g)
 R2 (g) R2 (g)

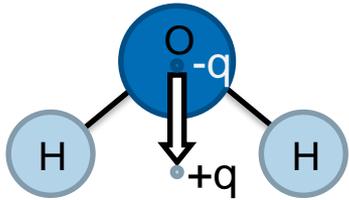
o := offen
 g := geschlossen

Norm SAE J2719

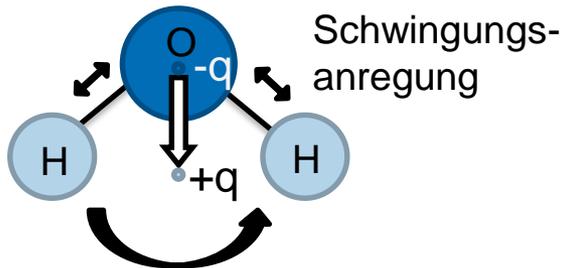
Stoff	Chemische Formel	Verunreinigungsgrenze (ppmv)	Brennstoffzelle-Beeinträchtigung
Wasser	H ₂ O	5	Leistungsverringierung
Kohlenwasserstoffe	C _x H _y	2	vorzeitige Alterung od. Leistungsverringierung
Methan	CH ₄	0,1	vorzeitige Alterung od. Leistungsverringierung
Ethan	C ₂ H ₆	0,1	vorzeitige Alterung od. Leistungsverringierung
Ethylen	C ₂ H ₄	0,1	vorzeitige Alterung od. Leistungsverringierung
Propan	C ₃ H ₈	0,01	vorzeitige Alterung od. Leistungsverringierung
Sauerstoff	O ₂	5	Leistungsverringierung
Stickstoff	N ₂	100	Leistungsverringierung
Argon	Ar	100	Leistungsverringierung
Helium	He	300	-
Kohlendioxid	CO ₂	2	-
Kohlenmonoxid	CO	0,2	Katalysatorgift (vorzeitige Alterung)
Schwefelverbindungen	H ₂ S, COS, CS ₂ , SO ₂	0,001	Membranschädigung
Hydrocarbonsäure	HCOOH	0,2	Membranschädigung
Ammoniak	NH ₃	0,1	Katalysatorgift (vorzeitige Alterung)
Formaldehyd	H ₂ CO	0,01	Membranschädigung
Halogenierte Stoffe	-	0,05	-

IR-Aktivität (1)

H₂O: Permanentdipol



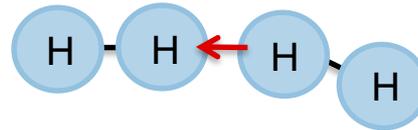
↓
elektromagnetisches
Feld



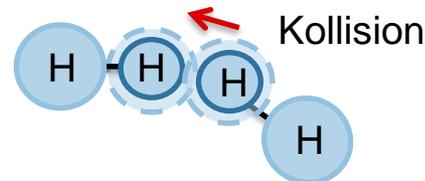
Moleküle mit:

- Dipolmoment (permanent oder veränderlich)
- induziertes Dipolmoment durch Wechselwirkung

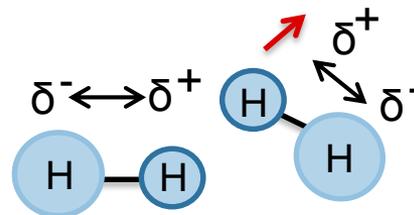
H₂: kein Dipolmoment



↓ Druckerhöhung
→ Stöße



↓ Dipolinduzierung



Bei Druckerhöhung steigt
Kollisionswahrscheinlichkeit

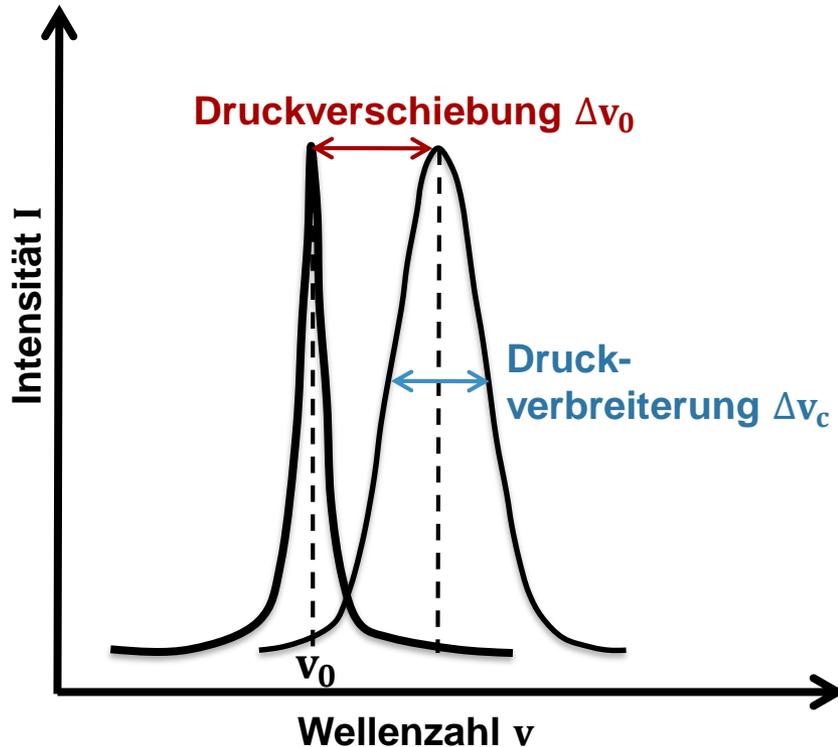
IR-Aktivität von ursprünglich
IR-inaktiven Stoffen (H₂, N₂,
O₂ → kein Dipolmoment)

→ wenige Messungen in
diesem Bereich
durchgeführt

Fazit:

Lage und Intensität der
Absorptionsbanden müssen
experimentell bestimmt
werden

IR-Aktivität (2)



Theoretische Berechnung

Beispielwerte für CO_2 und CO:

Druckverbreiterungskoeffizient:

- CO_2 : $0,42 \frac{\text{cm}^{-1}}{\text{bar}}$
- CO : $0,25 \frac{\text{cm}^{-1}}{\text{bar}}$

Druckverbreiterung Δv_c bei 800 bar:

- CO_2 : $338,9 \text{ cm}^{-1}$
- CO : $200,6 \text{ cm}^{-1}$

Druckverschiebung Δv_0 bei 800 bar:

- CO_2 : $122,8 \text{ cm}^{-1}$
- CO : $72,7 \text{ cm}^{-1}$

Spektrale Simulation mit HITRAN on the Web

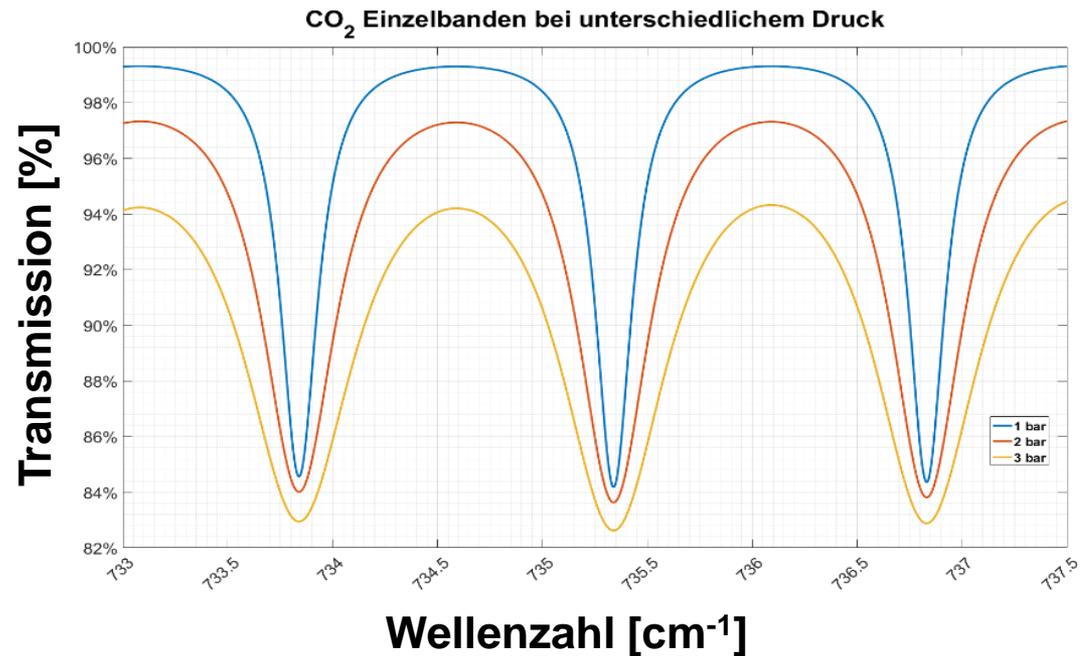
Simulationsprogramm

HITRAN on the Web (Zuev Institute of Atmospheric Optics):



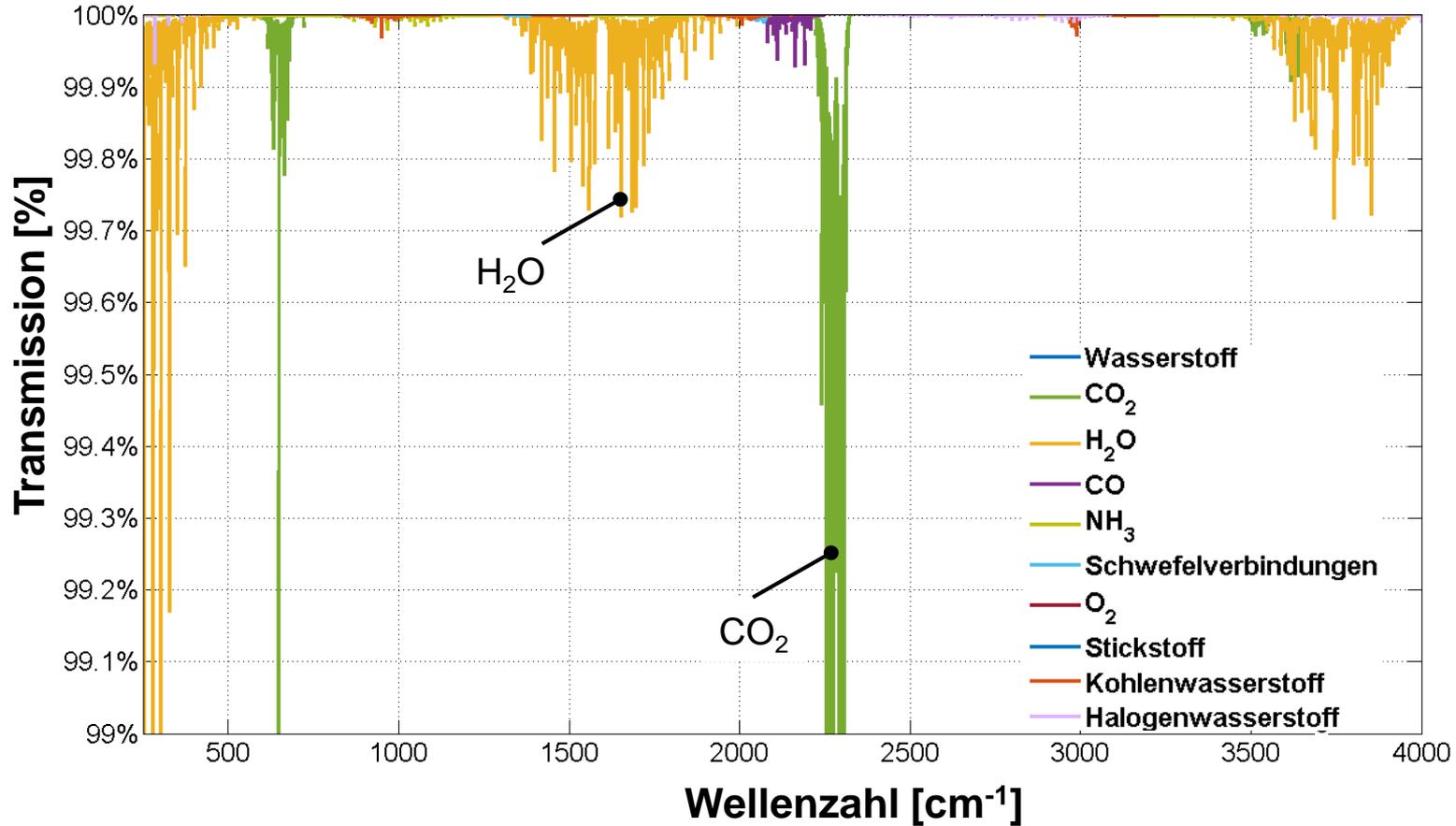
Randbedingungen

- Simulation der Spektren bis 100 bar
- Berücksichtigung von Druckverbreiterung und -verschiebung
- **Luft** als Hintergrund
- Temperatureinflüsse
- unterschiedliche Weglängen und Konzentrationen



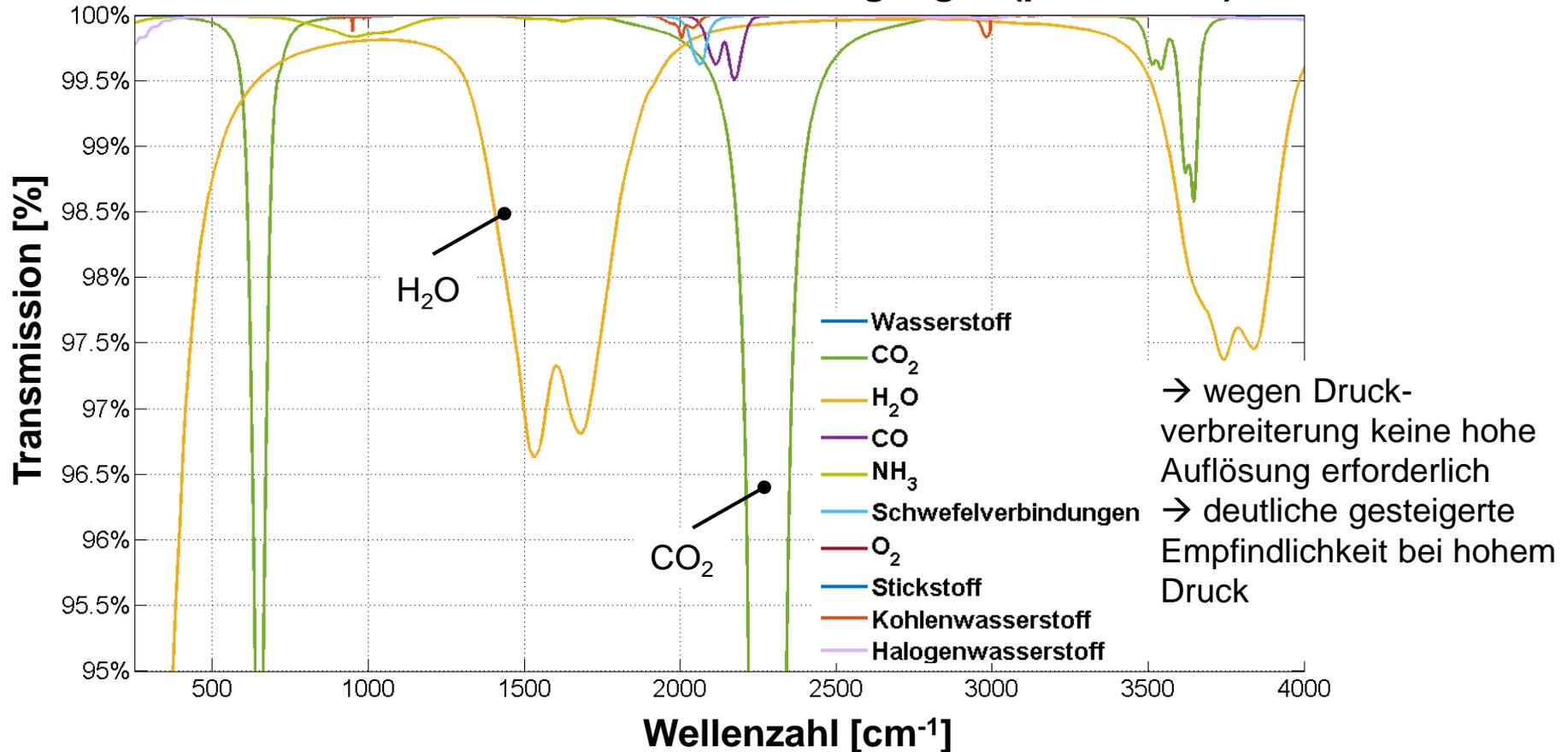
Spektrale Simulation (1)

Wasserstoff mit IR-aktiven Verunreinigungen (p = 1 bar)



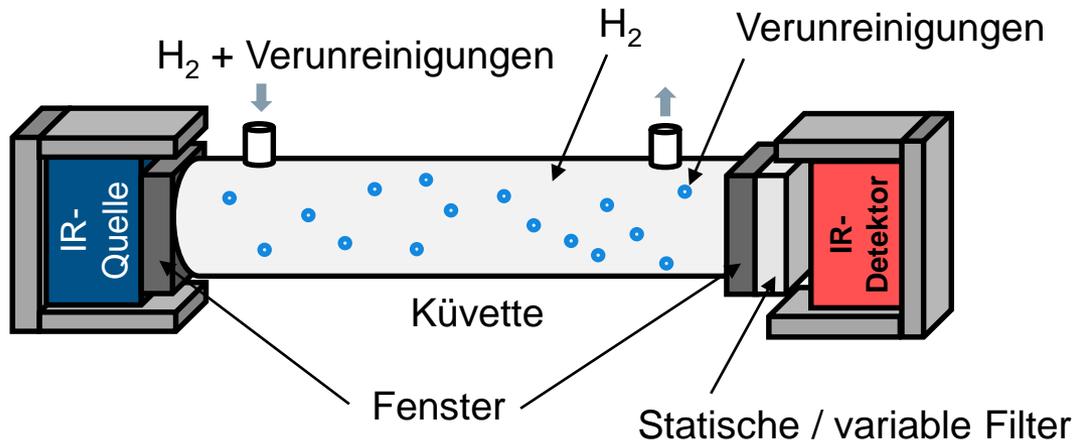
Spektrale Simulation (2)

Wasserstoff mit IR-aktiven Verunreinigungen (p = 100 bar)



Auslegung des online-Messsystems

Konzept für das online-Messsystem

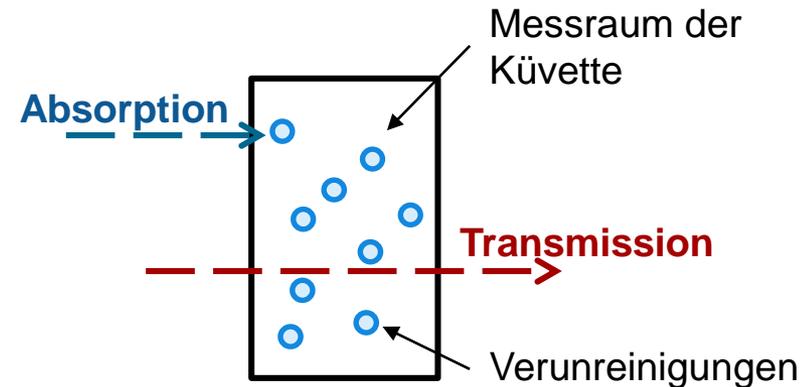


Lambert-Beer-Gesetz

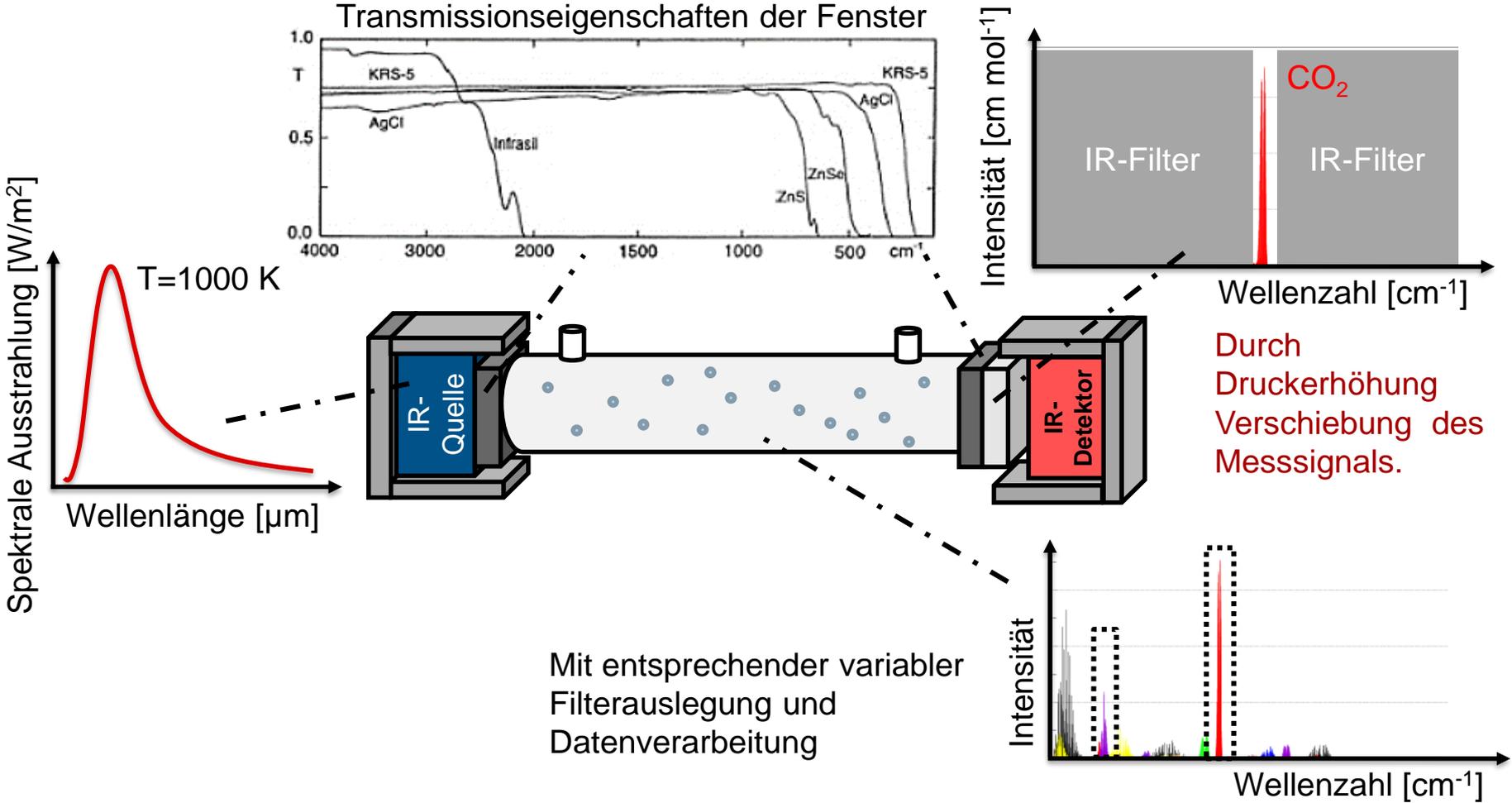
$$I_T(l, \lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(\epsilon(\lambda) \cdot c \cdot l)$$

Auslegungsgrößen des Messsystems:

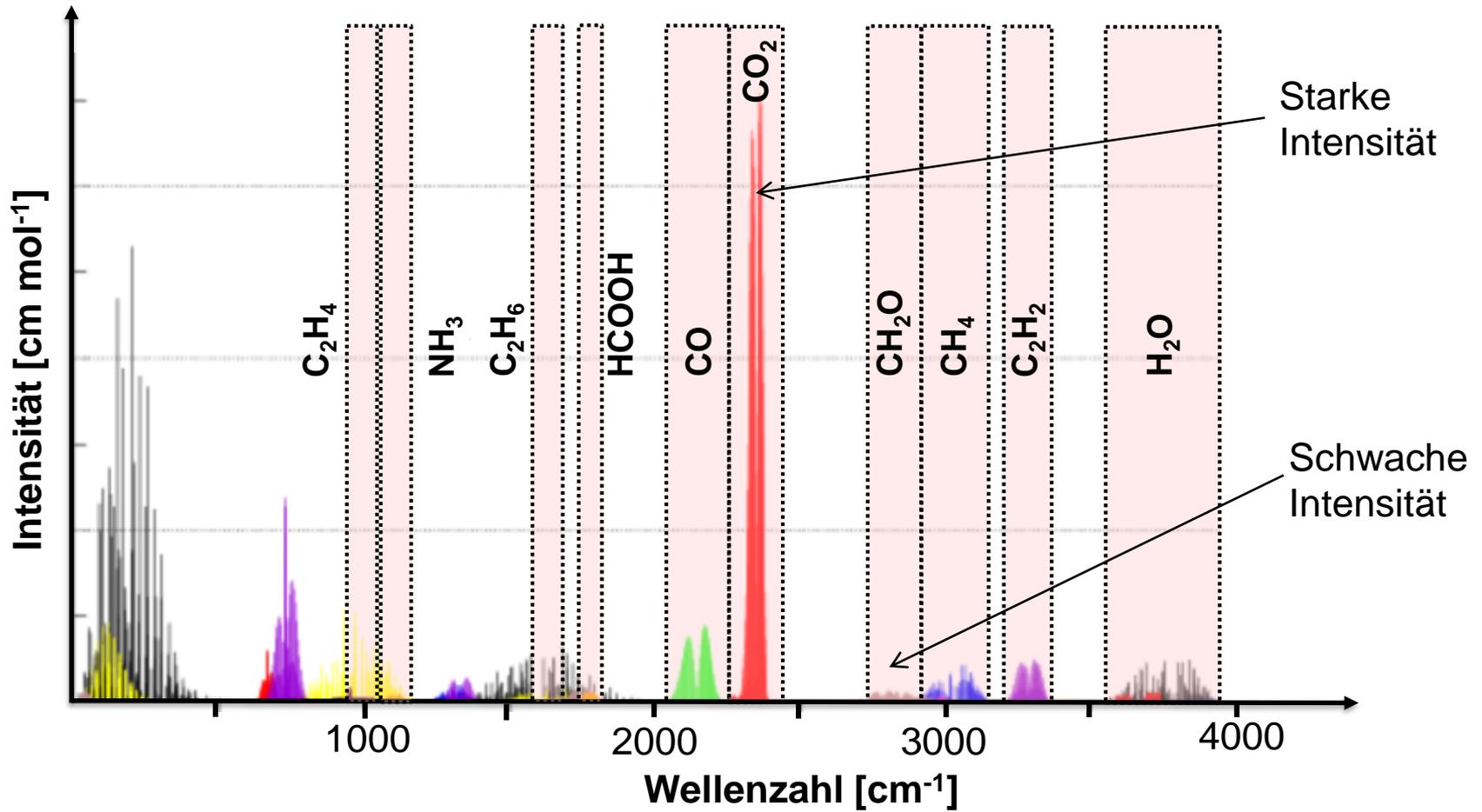
- Weglänge
- Größe der Messküvette (Durchmesser, Mantelstärke)
- IR-Quelle
- Filterauswahl
- IR-Detektor
- Fenstermaterial & -dicke
- Mögliche Linsenauslegung
- Vergoldung der Messküvette



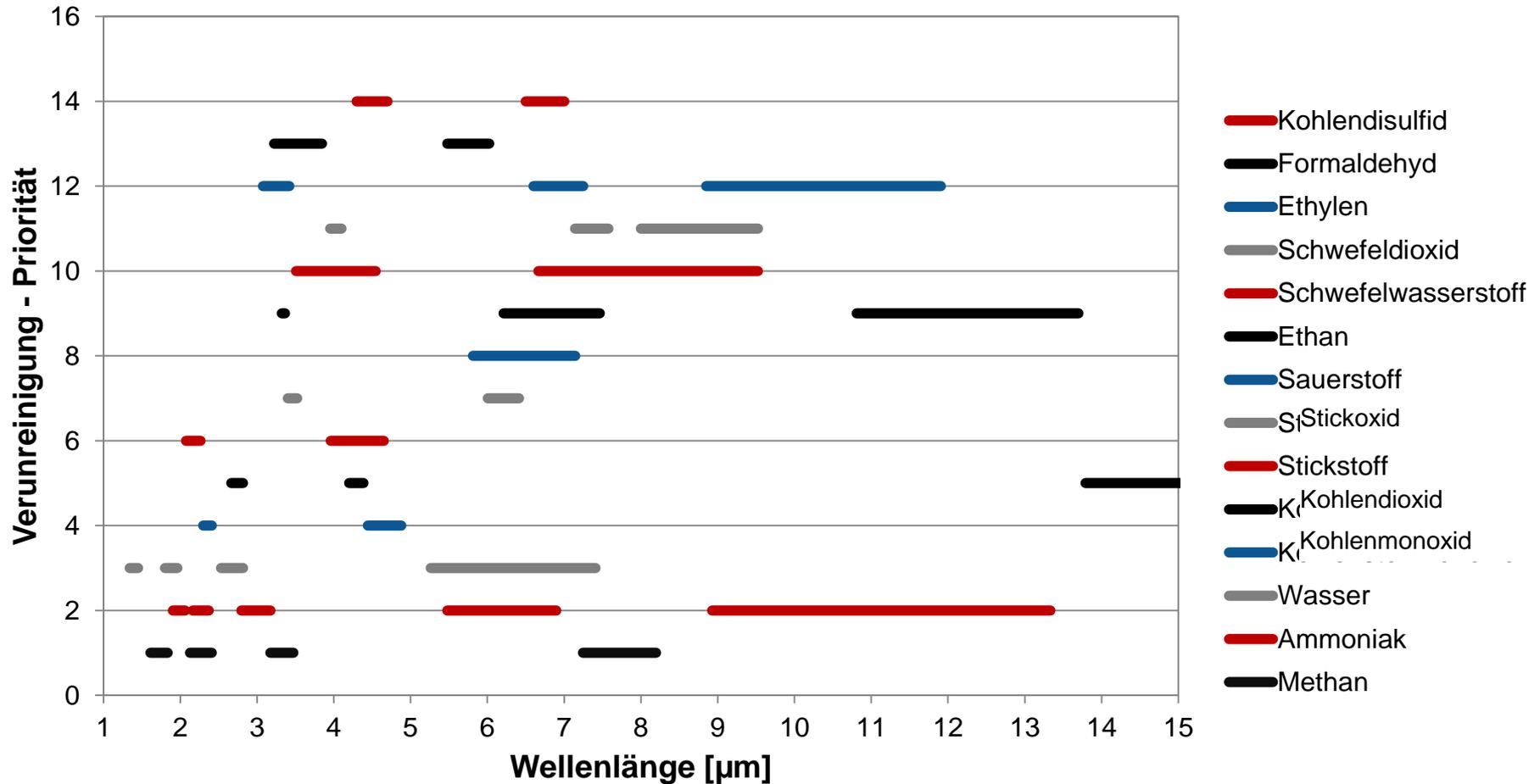
Konzept für das online-Messsystem



Auslegung - Filterauswahl



Spektrale Banden für Verunreinigungen



Messergebnisse

Messungen am ZeMA

1. Messung

2. Messung

3. Messung

Einstellung eines konstanten Massenflusses

100 % CO₂
1 bar

30 % CO₂ + 70 % H₂
1 bar

1 % CO₂ + 99 % H₂
1 bar

Abriegeln

Zusatz von
Wasserstoff (H₂)
30 bar

Zusatz von
Wasserstoff (H₂)
65 bar

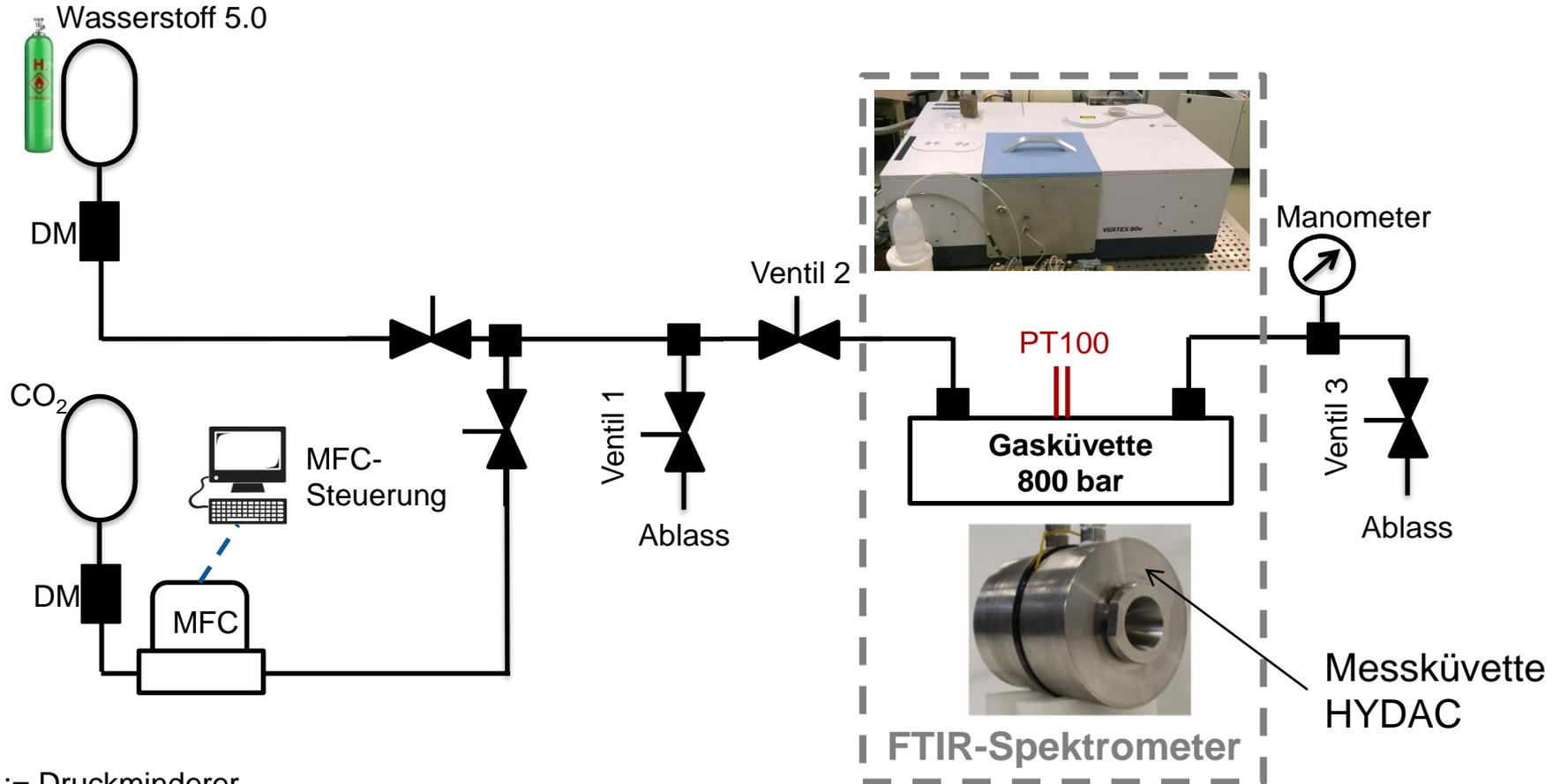
Zusatz von
Wasserstoff (H₂)
30 bar

3 vol.-% CO₂

0,5 vol.-% CO₂
5000 ppm

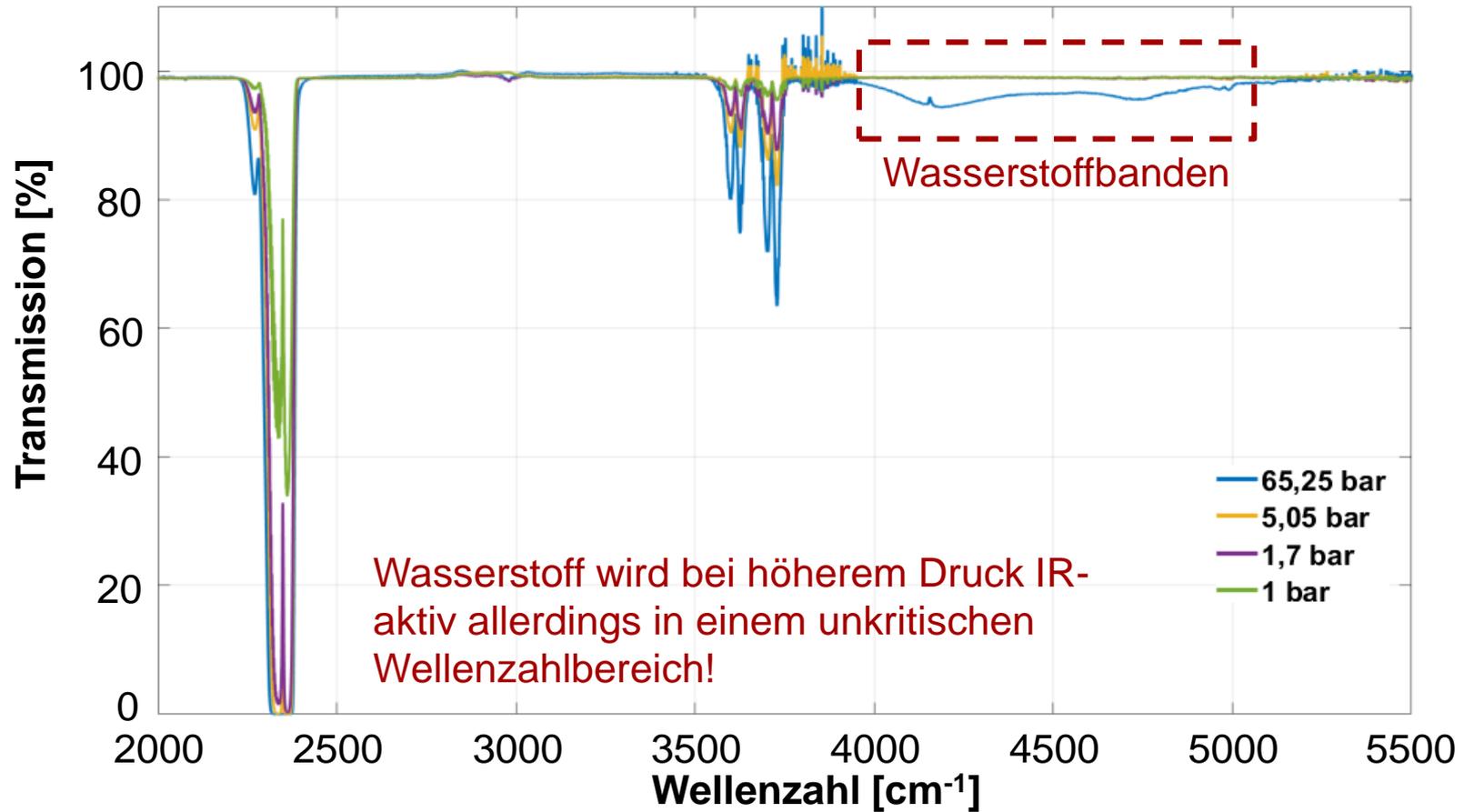
0,03 vol.-% CO₂
300 ppm

Messaufbau für erste Versuchsreihe

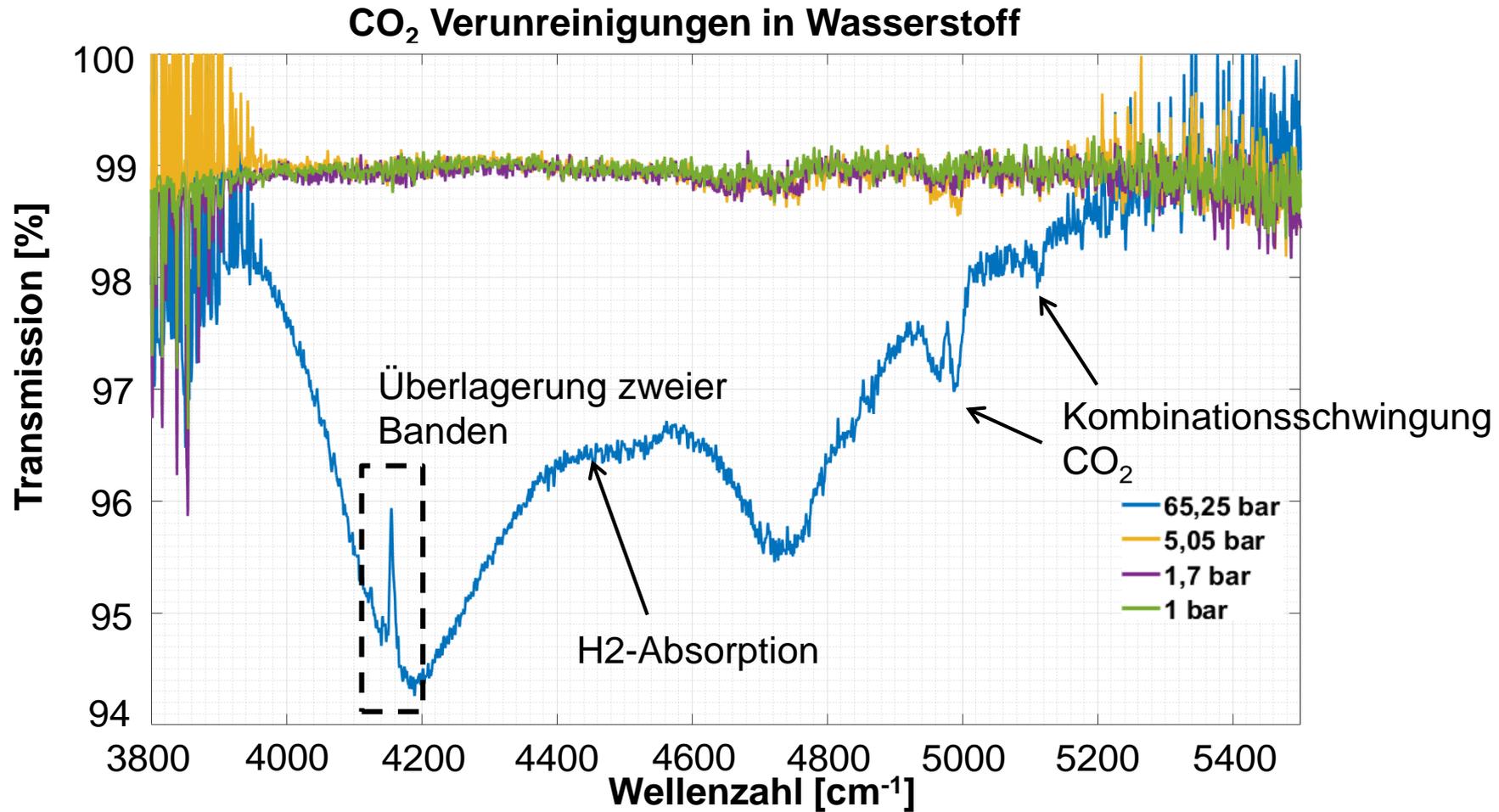


Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie-Messung (~0,5 vol.-% CO₂)

CO₂ Verunreinigungen in Wasserstoff

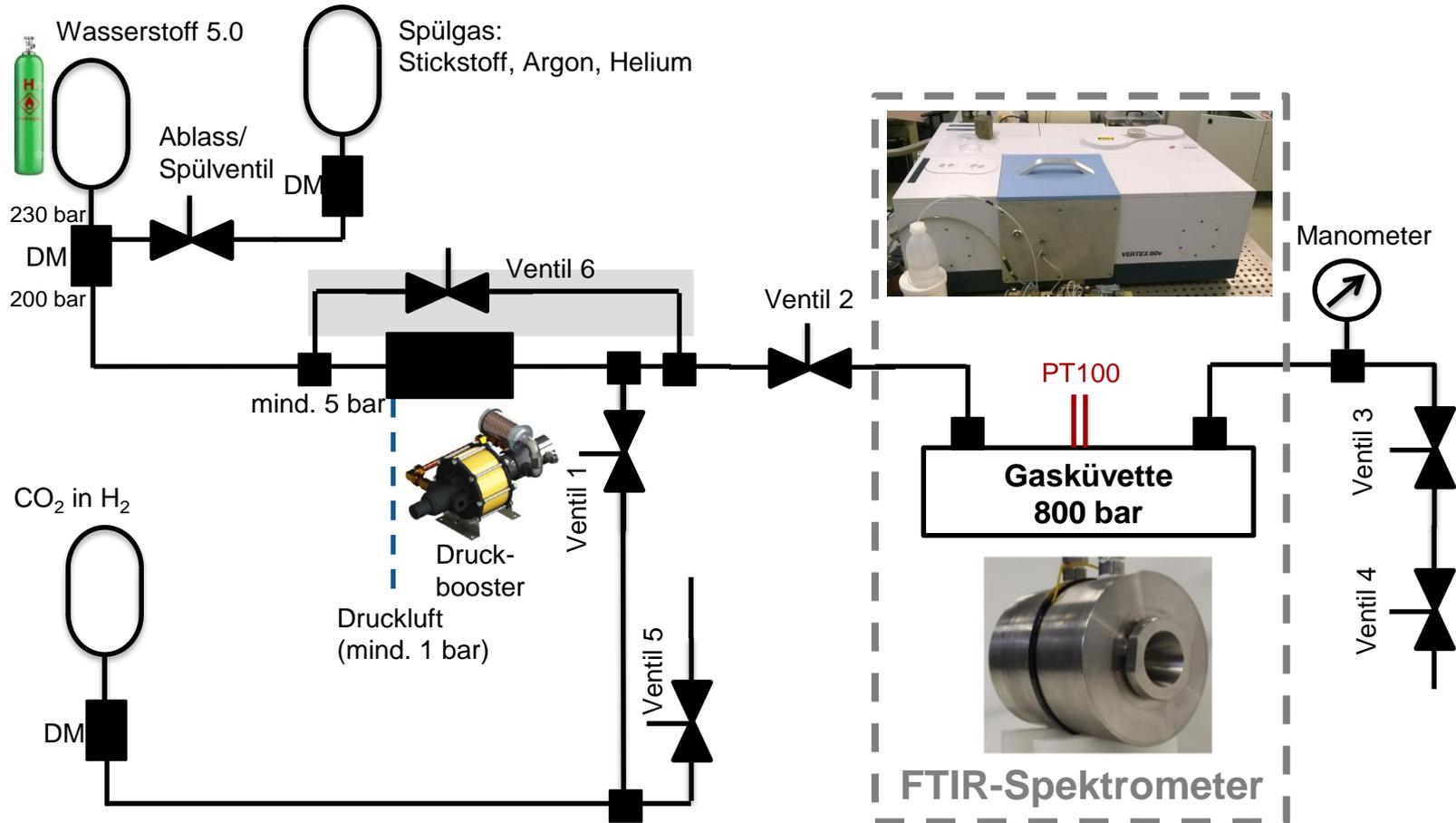


Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie-Messung (~0,5 vol.-% CO₂)



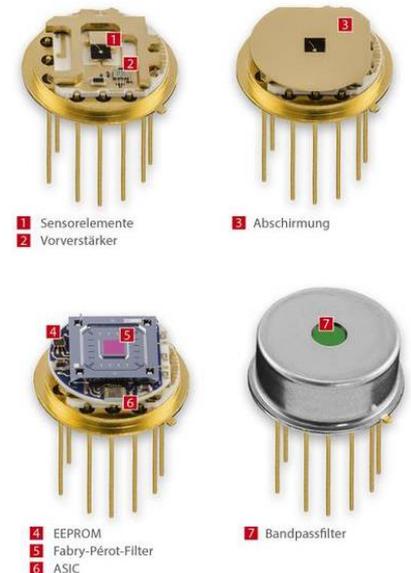
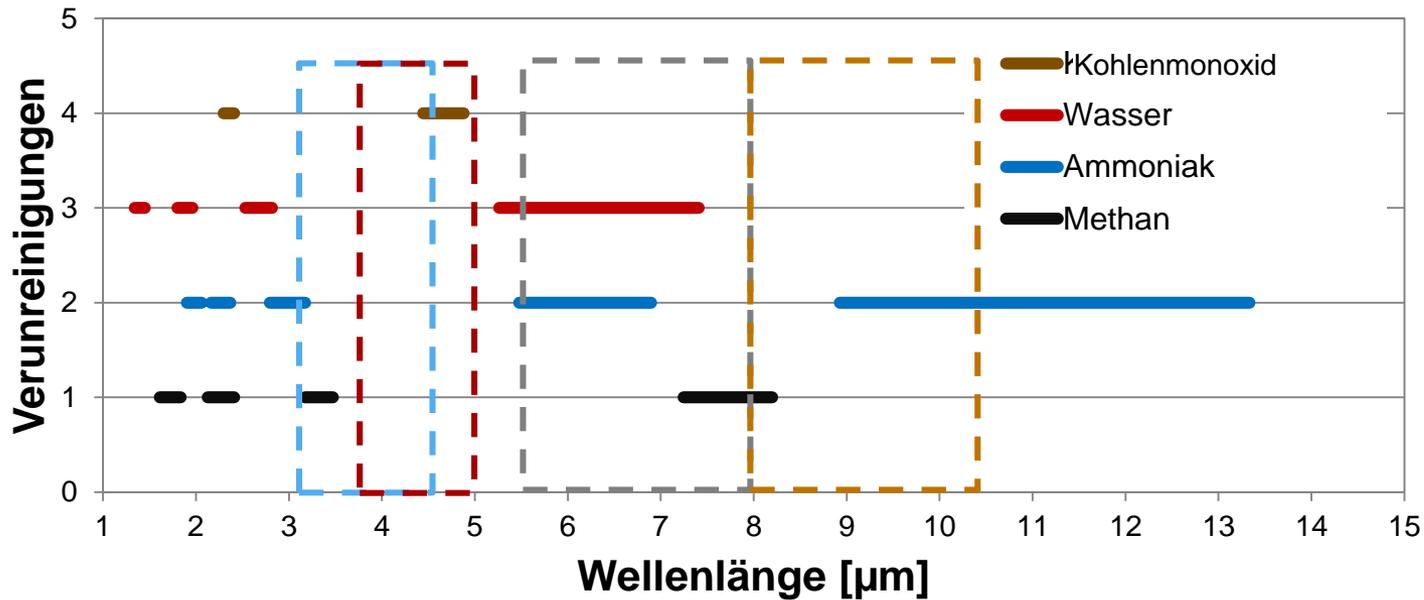
Ausblick

Ausblick – Messaufbau für höhere Drücke am ZeMA

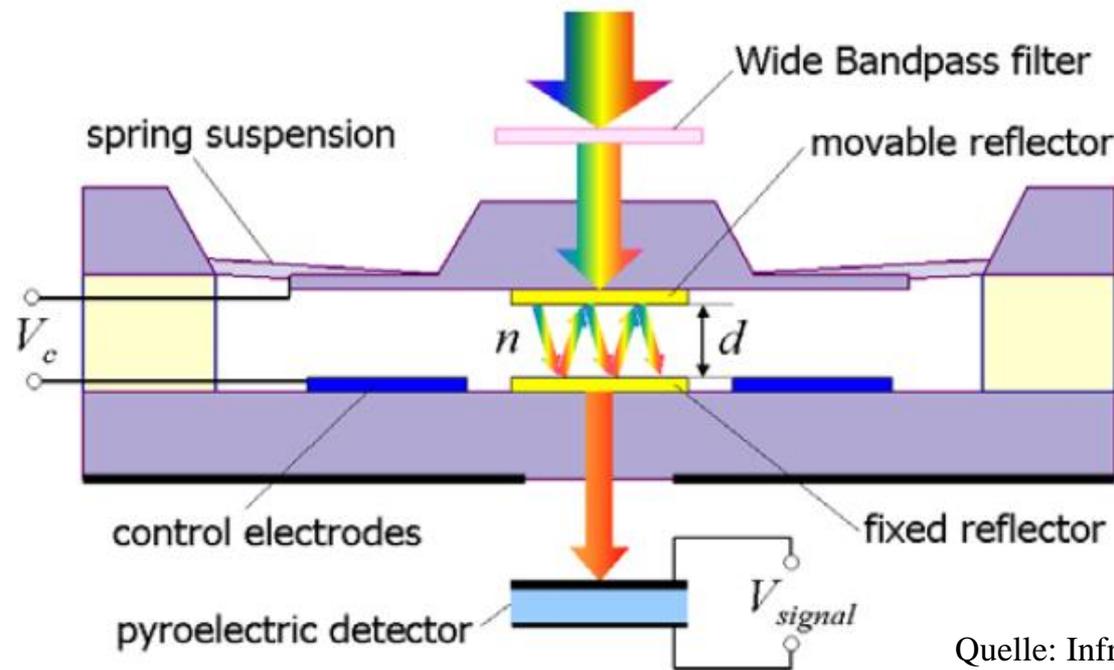
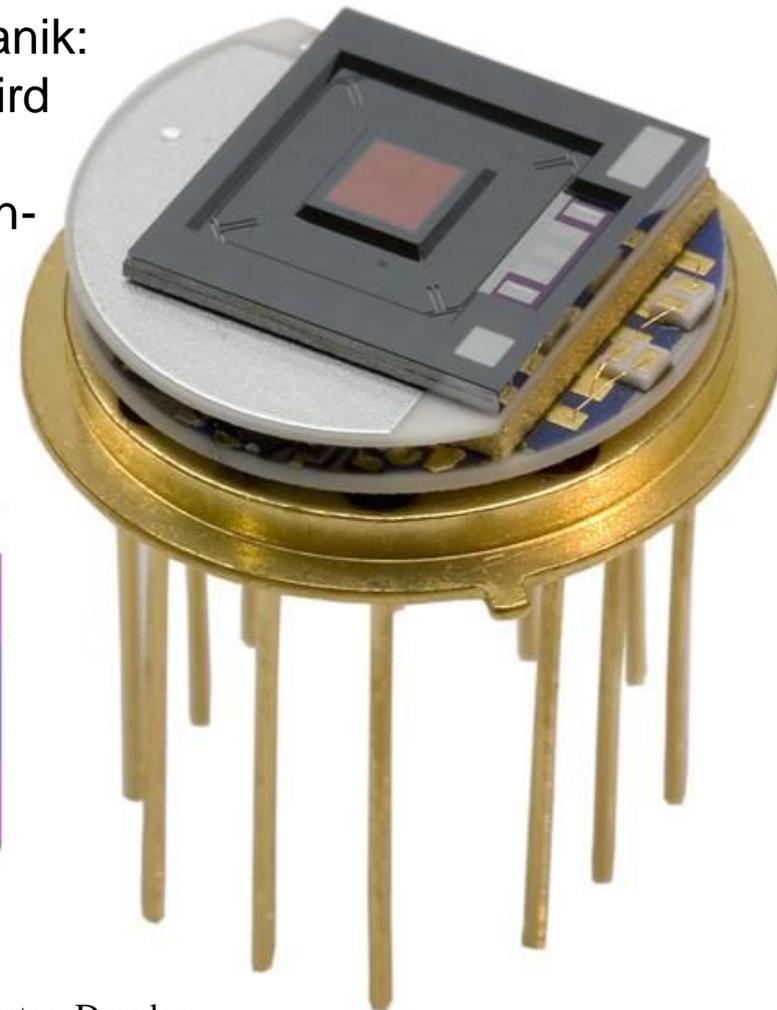


Ausblick – Durchstimmbare Fabry-Perot-Filter

	LFP-3144(C)-337	LFP-3850(C)-337	LFP-5580(C)-337	LFP-80105(C)-337
Durchstimmbereich CWL	(3,1 ... 4,4) μm	(3,8 ... 5,0) μm	(5,5 ... 8,0) μm	(8,0 ... 10,5) μm
Spektrale Auflösung HPBW	(55 ... 70) nm	(60 ... 75) nm	(100 ... 130) nm	(130 ... 220) nm
Filterzeitkonstante	(3 ... 15) ms	(2 ... 12) ms	(1 ... 10) ms	(1 ... 8) ms



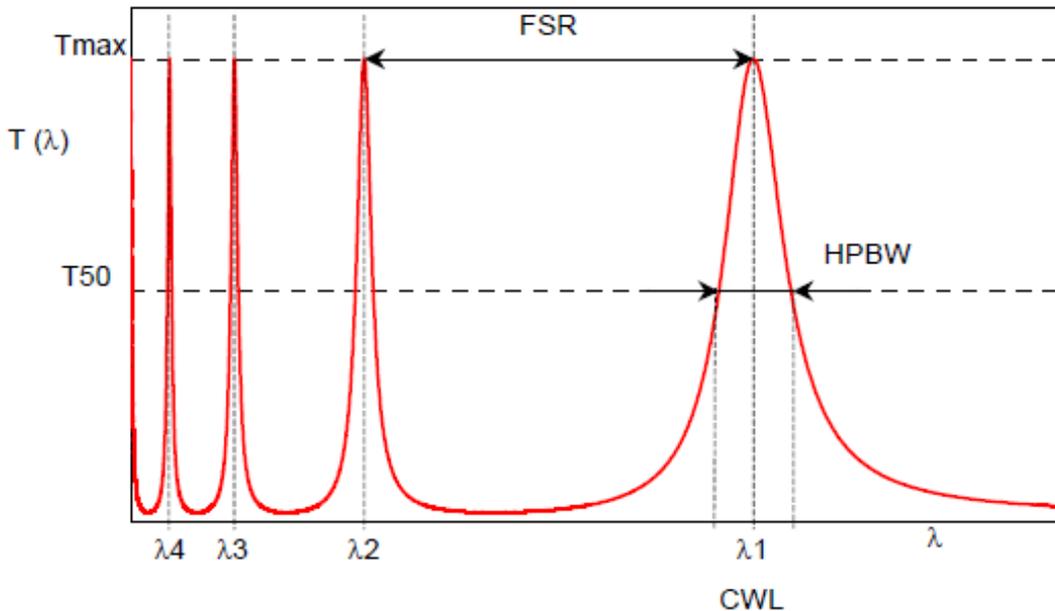
Fabry-Perot-Mikrospektrometer in Si-Mikromechanik:
Zwei Si-Wafer mit Abstandshalter, der Abstand wird elektrostatisch variiert, durch Mehrfachreflektion im Spalt zwischen zwei Spiegeln wird eine Wellenlänge durchgelassen, die anderen gefiltert.



Quelle: Infratec, Dresden

Fabry-Perot-Spektrometer in Si-Mikromechanik:

Transmissionsspektrum $T(\lambda)$ eines Fabry-Perot-Spektrometers in Abhängigkeit vom Spiegelabstand d und dem Reflexionsgrad R der Spiegel (je größer der Reflexionsgrad, desto häufiger wird das Licht zwischen den Spiegeln reflektiert und umso mehr Teilstrahlen werden überlagert \rightarrow schmalere Interferenzmaxima
Allerdings ist die Durchlasswellenlänge nicht eindeutig, d.h. der Spektralbereich ist beschränkt ($T_{\max} = 2 * T_{\min}$), Eindeutigkeit wird erzielt durch einen Bandpassfilter.

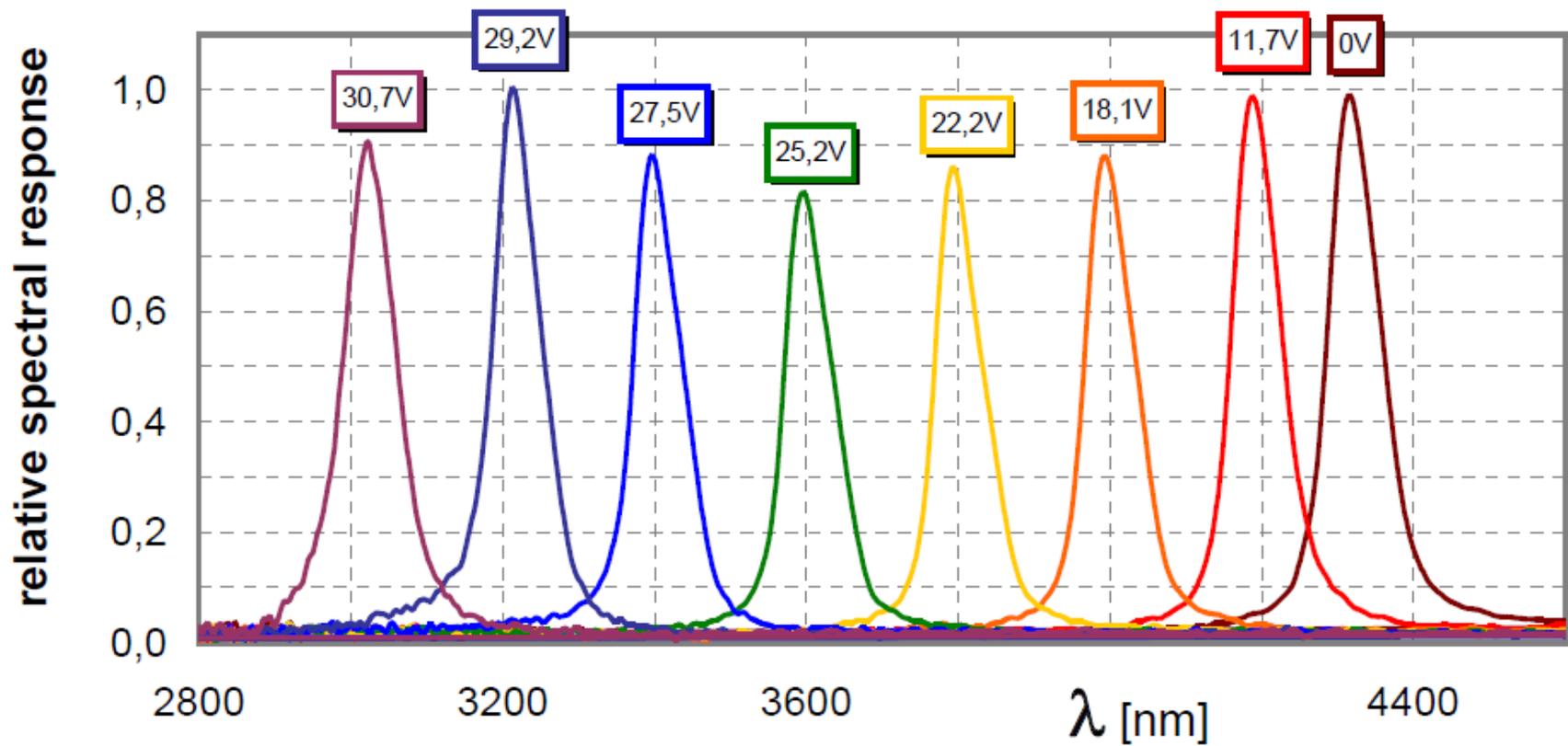


$$T(\lambda) = \frac{T_{\max}}{1 + F \sin^2(2\pi d/\lambda)}$$

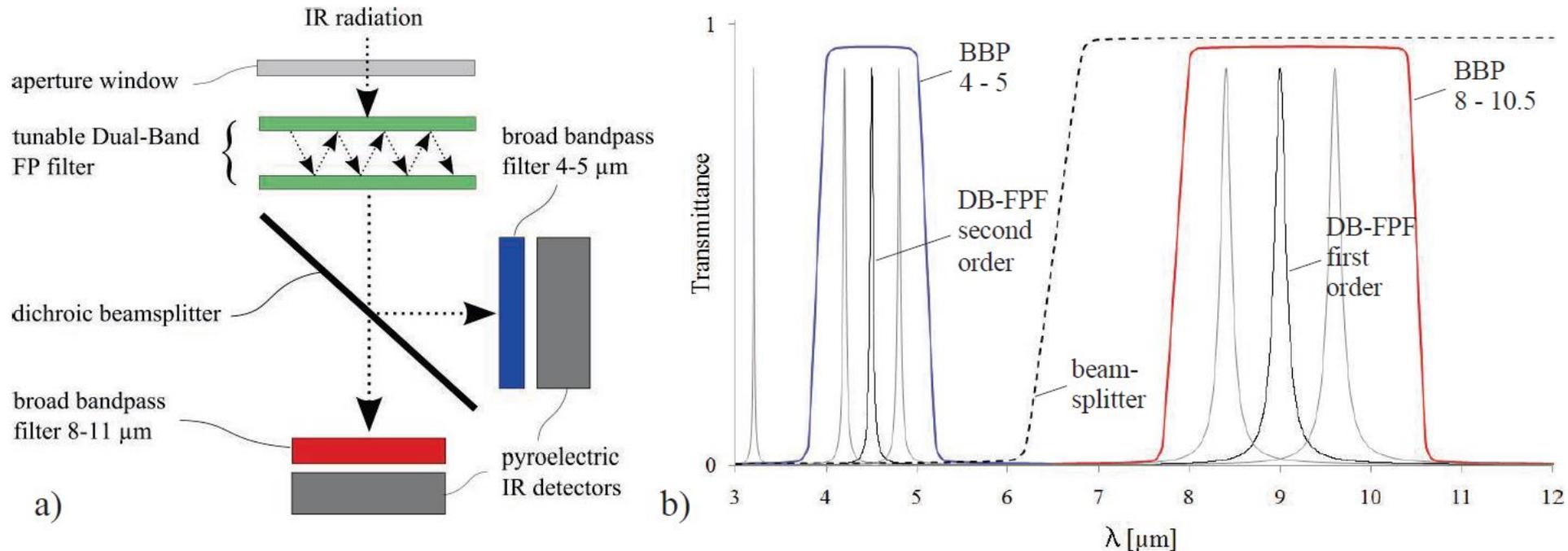
with the F-value:

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}$$

Fabry-Perot-Spektrometer in Si-Mikromechanik:
Transmissionsspektrum $T(\lambda)$ des integrierten Mikro-Fabry-Perot-Spektrometers bei unterschiedlichen Ansteuerspannungen. Das Spektrometer deckt den für chemische Sensoren interessanten Bereich von 3 bis 4,3 μm ab.

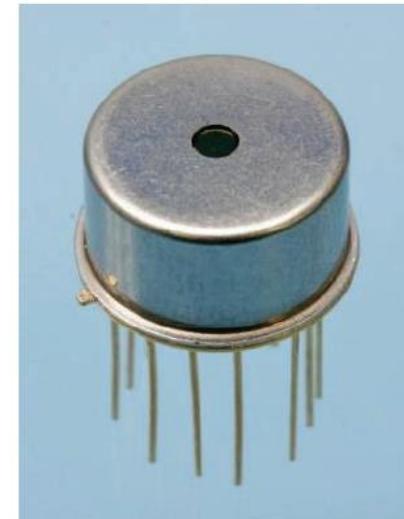
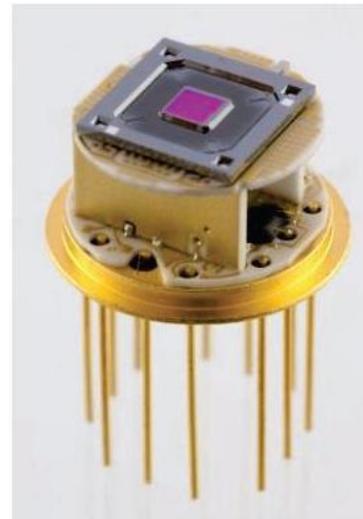
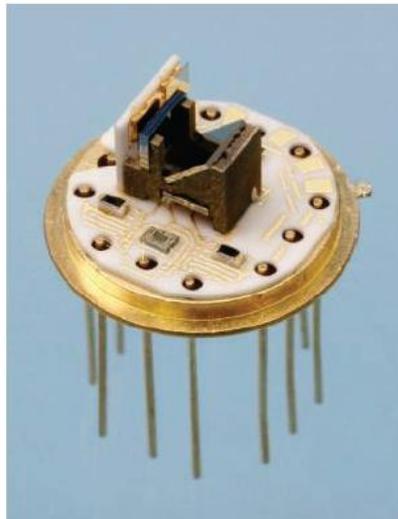
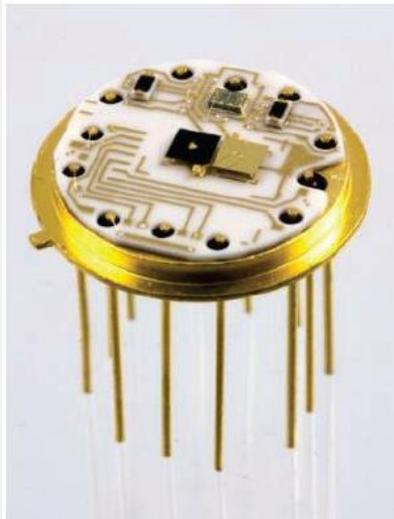


Fabry-Perot-Spektrometer in Si-Mikromechanik:
 Transmissionsspektrum $T(\lambda)$ eines FPF ist eingeschränkt – Erweiterung durch Kombination zweier Detektoren durch Ausnutzen der ersten und zweiten Ordnung des FPF ($4 - 5 \mu\text{m}$ bzw. $8 - 10,5 \mu\text{m}$) durch entsprechende Bandpassfilter (BBP)

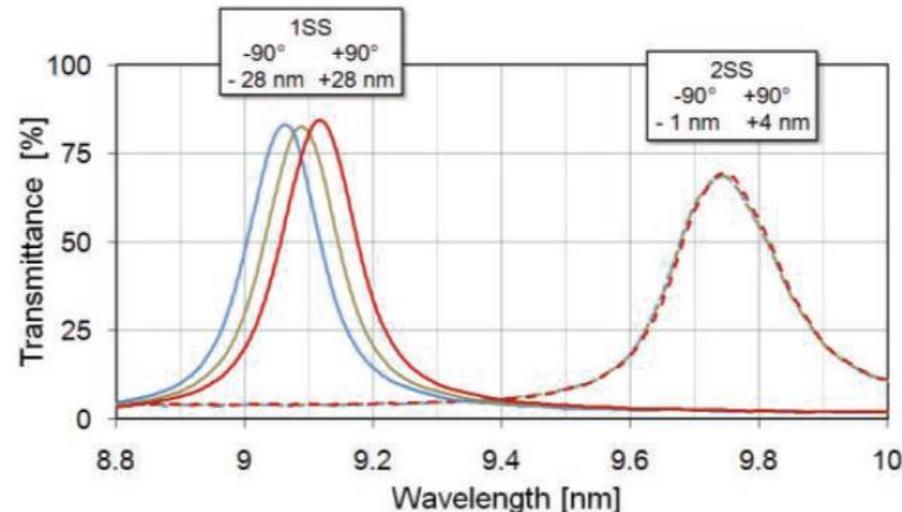
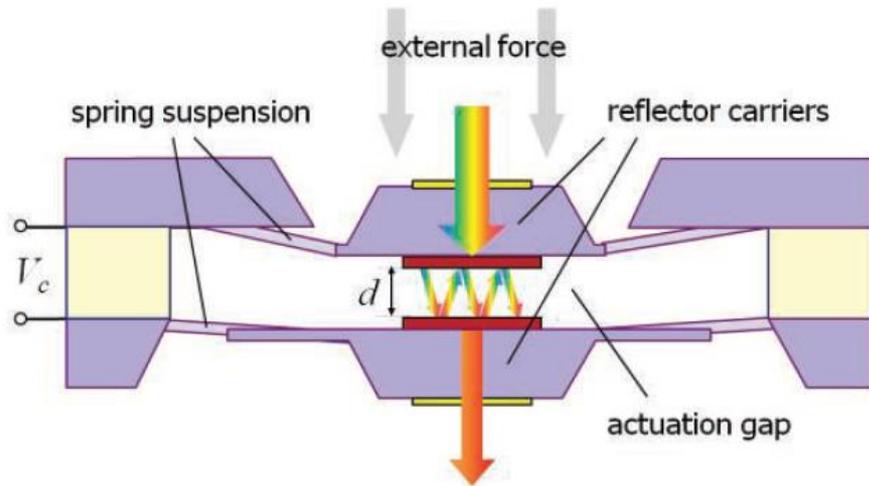


- Quelle: M. Ebermann, M. Meinig, S. Kurth, K. Hiller, E. Gittler, N. Neumann : Tiny Mid- and Long-Wave Infrared Spectrometer Module with a MEMS Dual-Band Fabry-Pérot, IRS2 2011, Nuremberg/Nürnberg, 07.-09.06.2011

Fabry-Perot-Spektrometer in Si-Mikromechanik:
Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) – vergleichsweise komplex, dennoch sinnvoll, weil die teuerste Komponente (FPF) nur einmal benötigt wird.

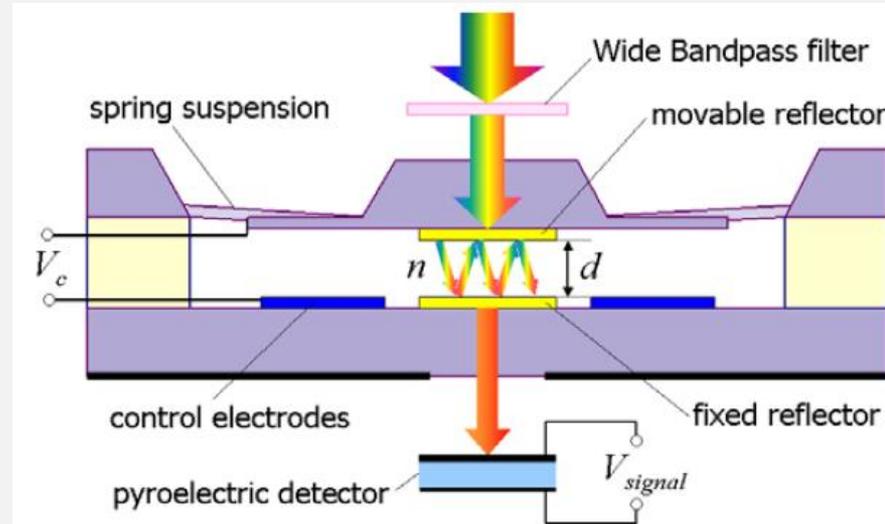


- Quelle: M. Ebermann, M. Meinig, S. Kurth, K. Hiller, E. Gittler, N. Neumann : Tiny Mid- and Long-Wave Infrared Spectrometer Module with a MEMS Dual-Band Fabry-Pérot, IRS2 2011, Nuremberg/Nürnberg, 07.-09.06.2011



Neues Design mit Doppelfederanordnung (2SS) verbessert die Unabhängigkeit von der Lage im Vergleich zur einfachen Aufhängung (1SS): dort führt die Erdbeschleunigung bereits zu einer spektralen Abweichung von ± 28 nm.

- Quelle: M. Ebermann, M. Meinig, S. Kurth, K. Hiller, E. Gittler, N. Neumann: Tiny Mid- and Long-Wave Infrared Spectrometer Module with a MEMS Dual-Band Fabry-Pérot, IRS2 2011, Nuremberg/Nürnberg, 07.-09.06.2011





Dank an

- alle Mitarbeiter beider Teams
- Geldgeber: BMBF, BMWi, Land Saarland, EU, Industriepartner