



Technische
Universität
Braunschweig



Halbleitertechnik



Fraunhofer
WKI



Nanobalancedetektor für personenbezogene Messungen von Nanopartikel-Expositionen (NanoExpo)

H. S. Wasisto¹, S. Merzsch¹, A. Waag¹, I. Kirsch², T. Salthammer², E. Uhde², E. Peiner¹

¹TU Braunschweig / ²Fraunhofer WKI

Inhalt

- Motivation
- Personal Monitor (PM) / Übersicht
- Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole
- Cantilever-Nanobalance
- Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)
- Optimierung -> Cantor II
- Zusammenfassung

Motivation

- Zunehmende Wahrnehmung potenzieller gesundheitlicher Risiken durch künstliche Nanopartikel (NP)
 - Aufnahme von NP hauptsächlich durch Inhalation
 - Überwachung der Konzentration luftgetragener Partikel am Arbeitsplatz ein zentraler Punkt im Arbeitsschutz
- Arbeitsschutz:
- minimale Belastung exponierter Personen
 - kontinuierliche personenbezogene Überwachung
- Ziel: **kostengünstiger, batteriebetriebener, kontinuierlich messender Personal Monitor (PM) für luftgetragene NP**
- künstliche NP-Aerosole zum Test

Personal Monitor (PM) / Übersicht

- optische / elektrische Zähler:
 - noch voluminös/schwer, hohe Leistungsaufnahme
 - zu teuer
 - optische Zähler für NP mit $\varnothing < 300$ nm in der Regel blind
- Mikromechanische Resonatoren
 - geringste Massen detektierbar, z.B. für bio/chem. Spurenanalyse
 - Auflösung, Leistungsaufnahme skalieren mit Miniaturisierung
 - für hohe Stückzahlen geeignetes Packaging -> niedrige Stückkosten
 - für die Aerosoldetektion am Arbeitsplatz geeignet?
 - gefordert: LOD $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einer Zeitauflösung von 1 min

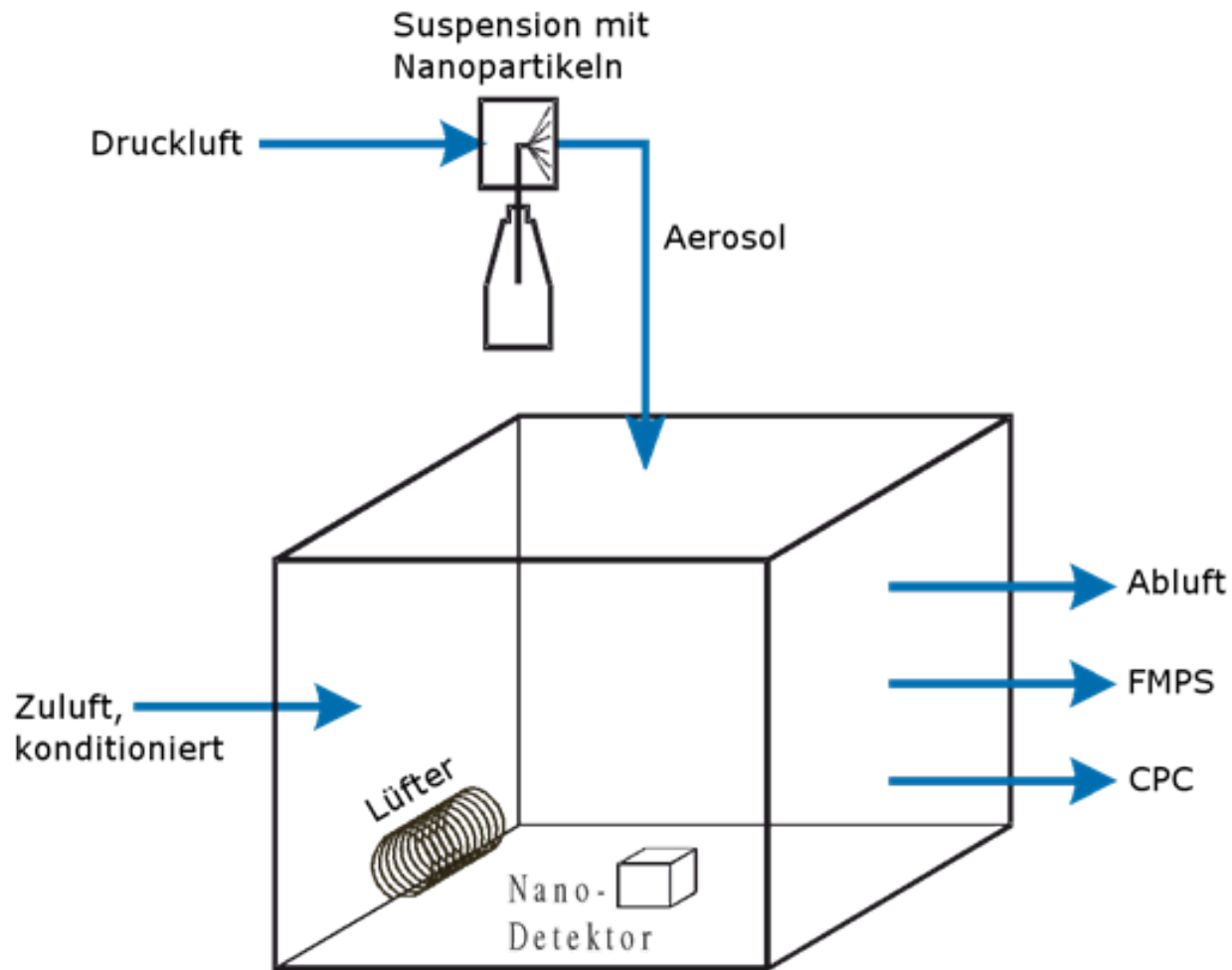
Inhalt

- Motivation
- Personal Monitor (PM) / Übersicht
- Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole
- Cantilever-Nanobalance
- Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)
- Optimierung -> Cantor II
- Zusammenfassung

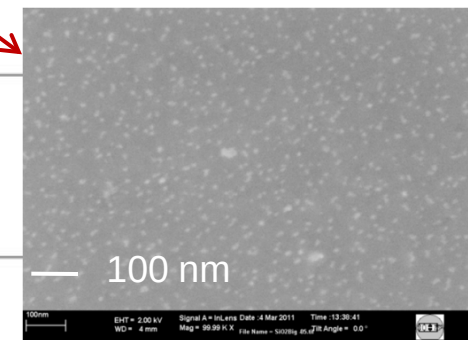
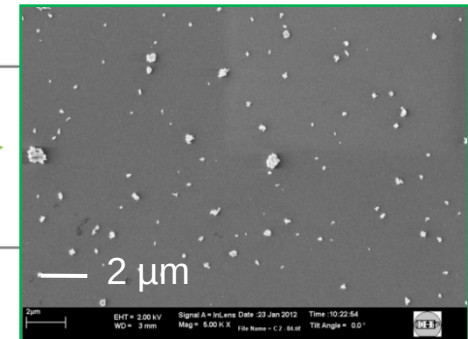
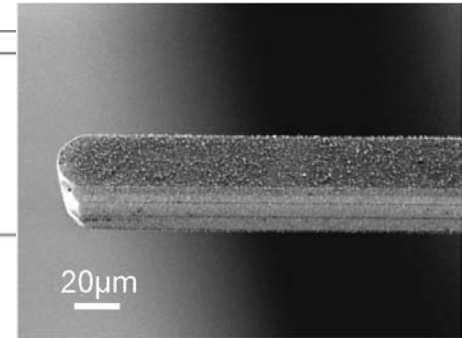
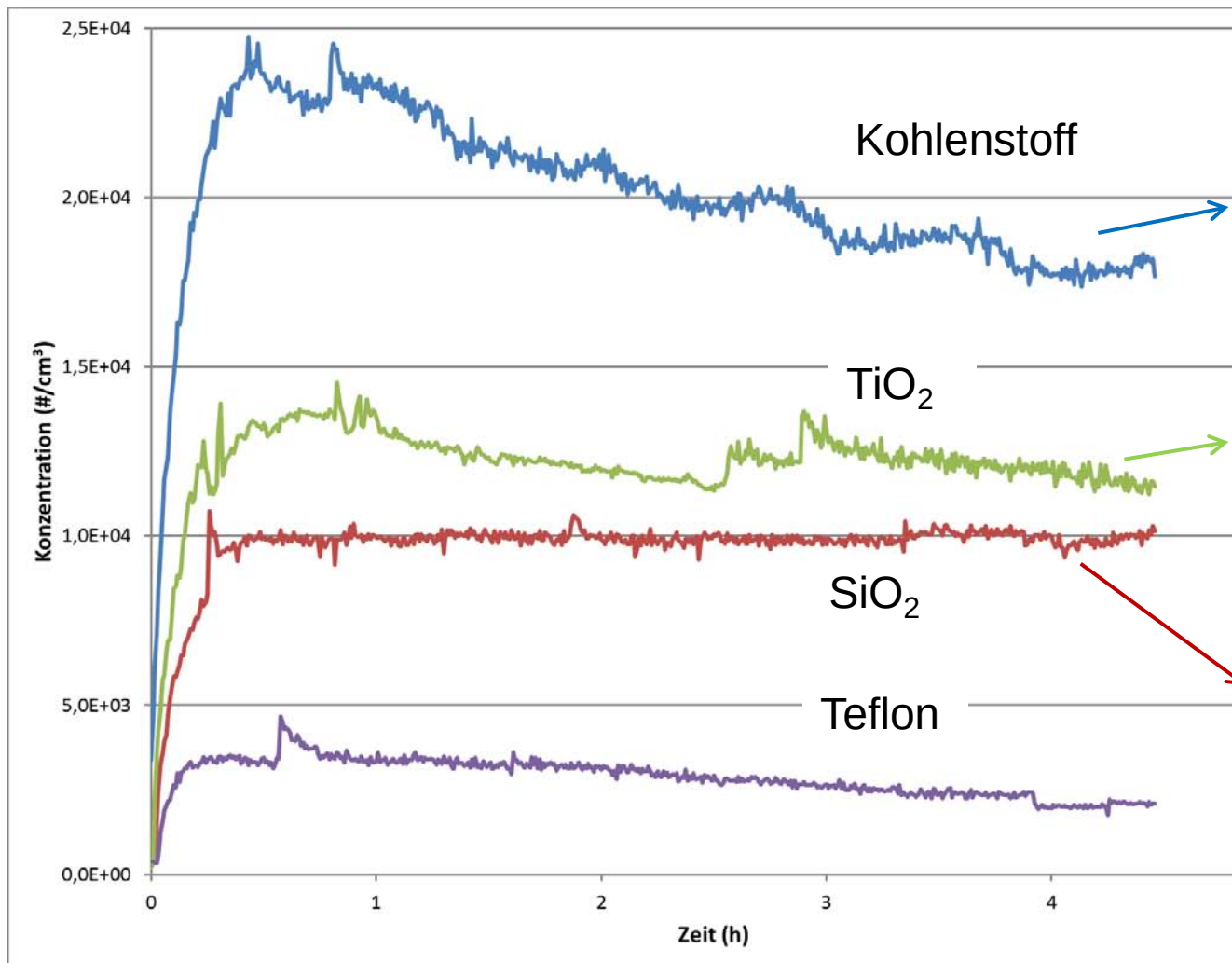
Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole

- Herstellung von künstlichen Aerosolen (C, SiO₂, TiO₂) mit Atomizer (TSI 1-Jet oder BGI 6-Jet)
 - stabile Konzentrationen von 10³ bis 10⁵ NP/cm³
 - bimodale Größenverteilung: einzelne NP ~ 20 nm / Agglomerate ~ 120 nm
 - Ladungsverteilung im Aerosol nahezu im Gleichgewicht, in ersten Versuchen zeigte eine Neutralisation mit radioaktiver Quelle kaum Auswirkung auf Konzentration
- > elektrostatische Sammlung von NP mit positiver oder negativer Ladung möglich
- > auf die Vorschaltung eines Partikelladers (z.B. Corona) wird verzichtet

Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole



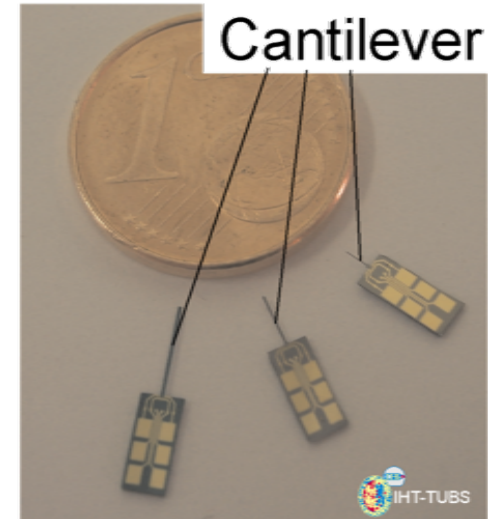
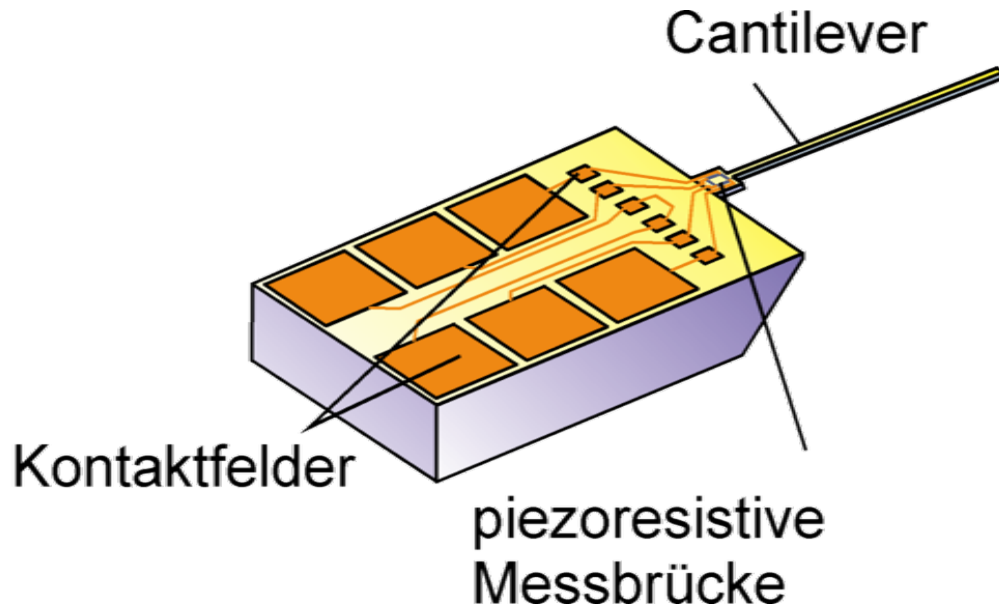
Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole



Inhalt

- Motivation
- Personal Monitor (PM) / Übersicht
- Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole
- **Cantilever-Nanobalance**
- Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)
- Optimierung -> Cantor II
- Zusammenfassung

Cantilever-Nanobalance

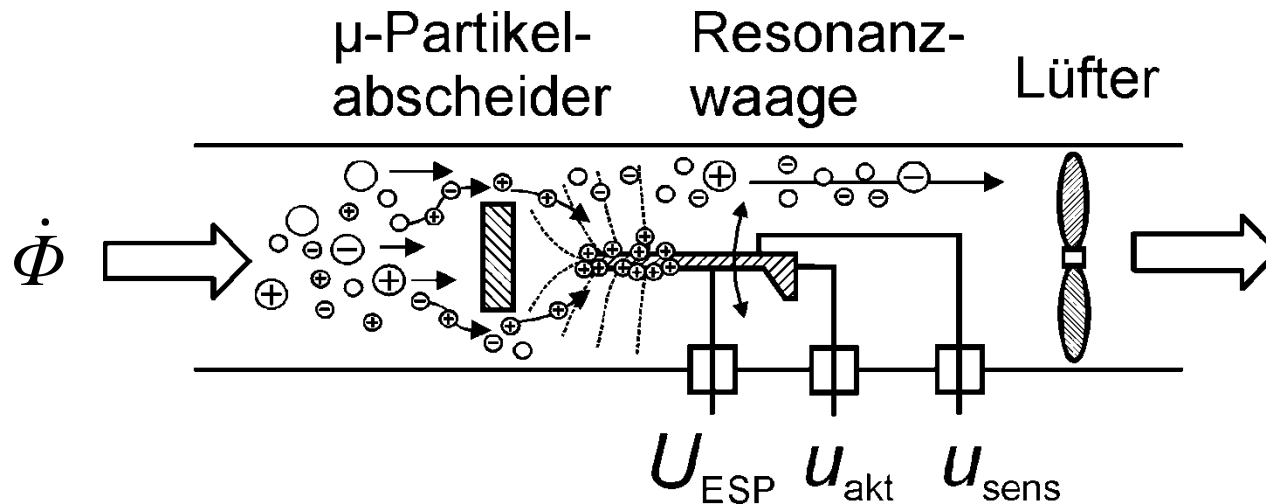


Sauerbrey-Gleichung:
$$\Delta m \approx 2m_0 \frac{\Delta f}{f_0}$$

Inhalt

- Motivation
- Personal Monitor (PM) / Übersicht
- Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole
- Cantilever-Nanobalance
- Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)
- Optimierung -> Cantor II
- Zusammenfassung

Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)



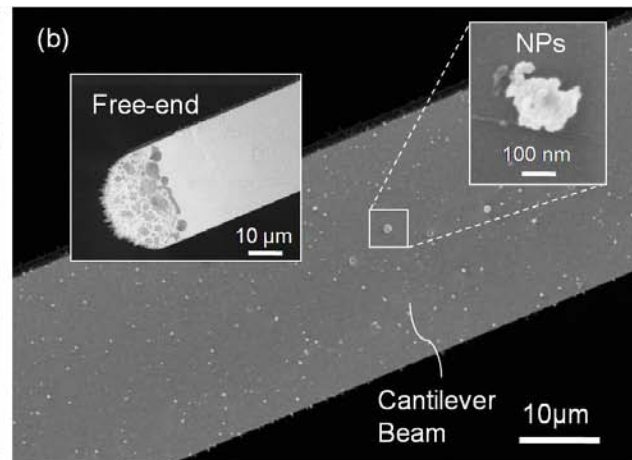
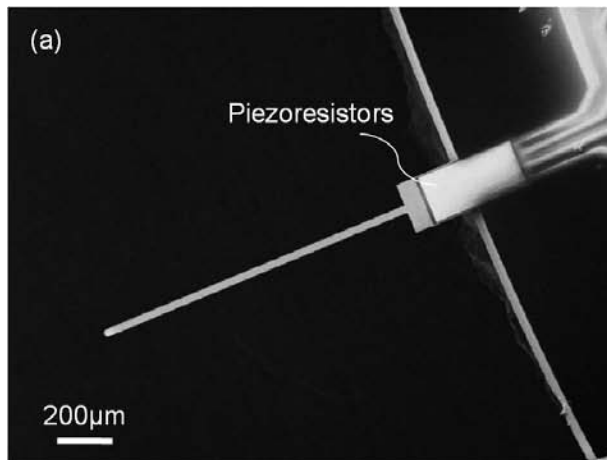
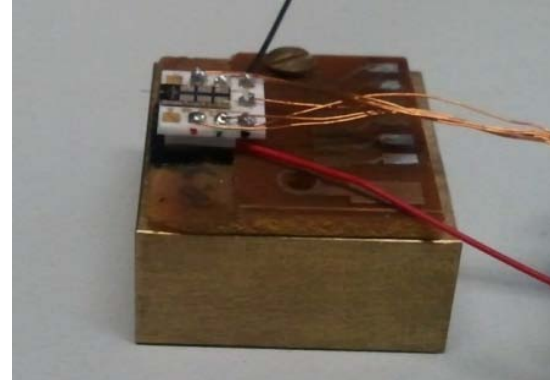
$$c_m = \frac{1}{\eta(\dot{\Phi}, A, E)} \frac{2m_0}{\dot{\Phi} \Delta t} \frac{\Delta f}{f} (\Delta m, rF, T, p)$$

$$c_{m,\min} = \frac{2m_0}{\eta \dot{\Phi} \Delta t Q}$$

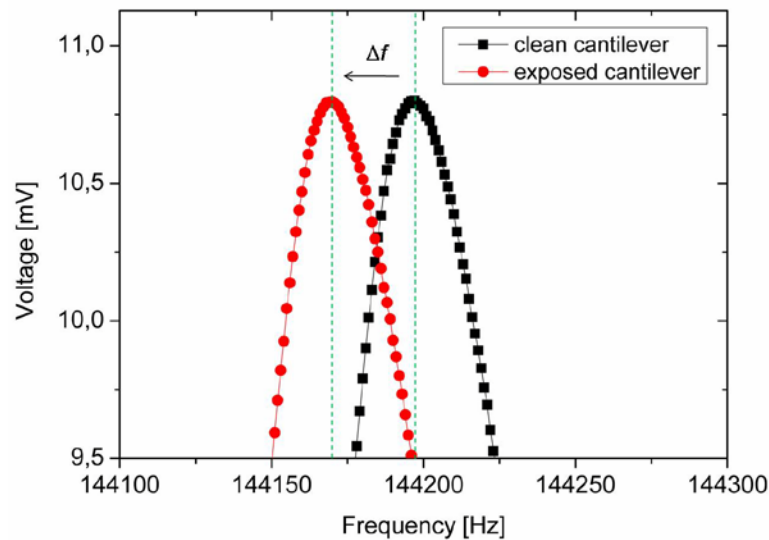
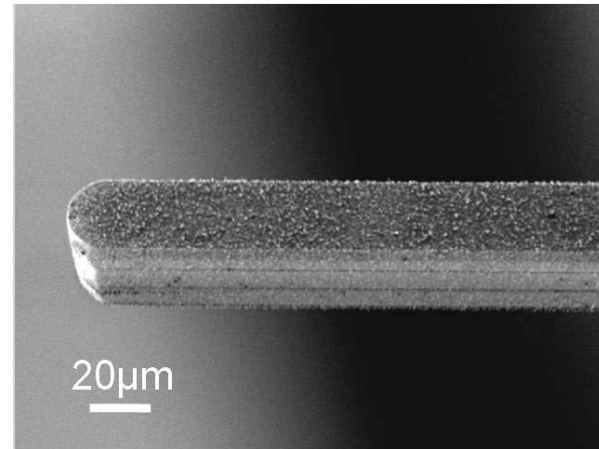
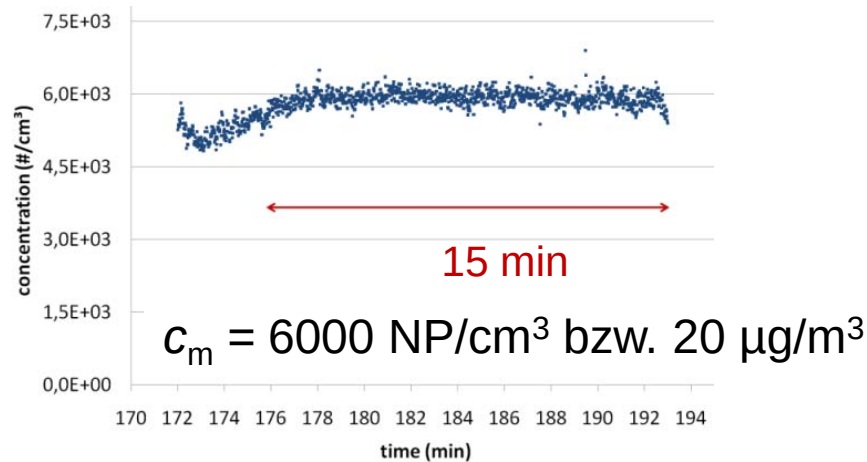
angestrebte Kennwerte :

- Detektionslimit: $c_{m,\min} < 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 - Sammelzeit: $\Delta t < 1 \text{ min}$
- $\rightarrow c_{m,\min} \times \Delta t < 1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{min}$

Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)



Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)



- NP-Belag (2,69 ng) mit ersten beiden Moden nachgewiesen
- höheres Auflösungsvermögen durch Linienformauswertung

Inhalt

- Motivation
- Personal Monitor (PM) / Übersicht
- Künstliche-Nanopartikel-(NP)-Aerosole
- Cantilever-Nanobalance
- Cantilever-Nanopartikel-Detektor (Cantor)
- Optimierung -> Cantor II
- Zusammenfassung

Optimierung -> Cantor II

Type of Sensor	Mass Surface Density Sensitivity / Mass Sensitivity	Mass Surface Density Resolution / Mass Resolution
QCM	$0.3-1.6 \frac{\text{Hz.cm}^2}{\text{ng}}$ [29, 30] / $1 \frac{\text{Hz}}{\text{ng}}$ [10]	$\sim 10 \frac{\text{ng}}{\text{cm}^2}$ [29, 30] / 3000pg [10]
SAW	$15 \frac{\text{Hz.cm}^2}{\text{ng}}$ [29] / $260 \frac{\text{Hz}}{\text{ng}}$ [10]	$\sim 1 \frac{\text{ng}}{\text{cm}^2}$ [29] / 0.3pg [10]
FBAR	$\sim 800 \frac{\text{Hz.cm}^2}{\text{ng}}$ [13, 30]	$2.5 \frac{\text{ng}}{\text{cm}^2}$ [30] / 1pg [13]
Piezoelectrically Actuated MEMS	$10 \frac{\text{Hz.cm}^2}{\text{ng}}$ / $4 \frac{\text{kHz}}{\text{ng}}$ [14]	$1 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2}$ / 0.25pg [14]
Thermally Actuated MEMS	$15 \frac{\text{Hz.cm}^2}{\text{ng}}$ / $1500 \frac{\text{kHz}}{\text{ng}}$	$0.6 \frac{\text{ng}}{\text{cm}^2}$ / 0.01pg

Univ. Denver:

- Sensor mit integriertem thermischem Antrieb für höchste Masseauflösung: 10 fg
- einzelne NP mit $\varnothing > 200 \text{ nm}$ nachweisbar
- allerdings: Tests unter Normaldruckbedingungen mit kleineren NP stehen aus

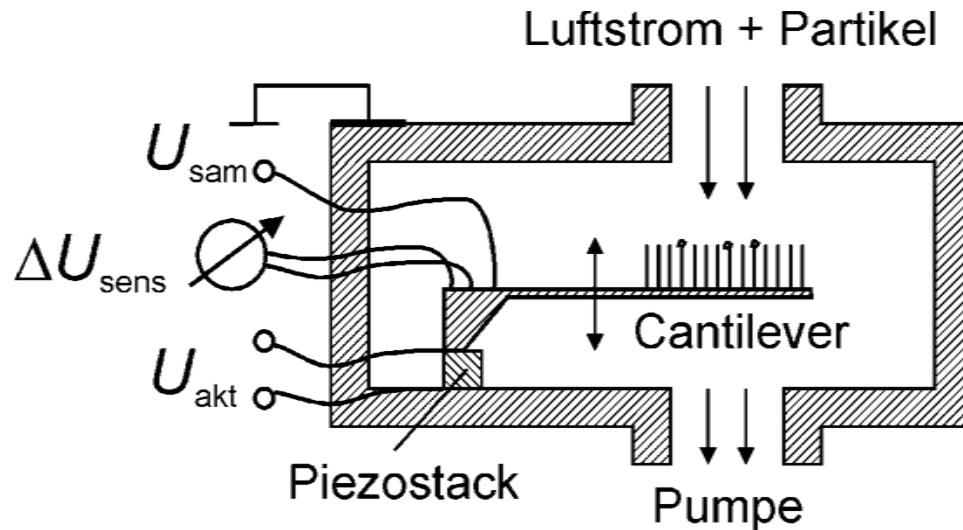


A. Hajjam et al., IEEE Sens. J. **11** (2011) 2883-2890, U Denver.

Optimierung -> Cantor II

Nanowire-Array:

- Oberflächenvergrößerung
- drastisch verringerte Resonatormasse ($\times 10^{-5}$)
- Herstellung durch Ätzen oder selbstorganisiertes Wachstum



Zusammenfassung

- Bedarf an kostengünstigem, batteriebetriebenem, kontinuierlich messendem Personal Monitor (PM) für luftgetragene NP
- Mikro/nanomechanische Resonanzwaage
- Künstliche Aerosole (C, SiO₂, TiO₂, mit Atomizertechnik): bimodale Größenverteilung, Ladungsverteilung nahezu im Gleichgewicht
- Elektrostatische Abscheidung von NP auf Cantilever-Resonatoren:
 - mit ersten Mustern (Cantor I) können 6000 C-NP/cm³ mit einer Zeitauflösung von 15 min nachgewiesen werden
 - Elektrodenfläche definiert Abscheideort
 - Abscheiderate kann über Feldstärke eingestellt werden
- Ausblick Cantor II:
 - integrierter thermischer Aktor -> höchste Masseauflösung
 - Nanodraht-Array -> große Sammelfläche bei kleiner Masse der Einzelresonatoren

Danksagung

- Technische Unterstützung durch Juliane Arens und Doris Rümmler, IHT-TUBS, Sebastian Wientzek, Fraunhofer-WKI
- Projektbegleitung: Dr. Hans-Jörg Clar, PtJ
- Finanzielle Unterstützung: BMBF 03X0098A/B



GEFÖRDERT VOM

