

# Miniaturisierung einer Anlage zur Untersuchung von Feinstaubteilchen kleiner PM 10 bis PM 2.5 mittels Digitaler Inline Holografie (DIH)

H.Buse, S.Ernst, F.Buchmüller, R.Parkin\*, H.Kreitlow

Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland / Wilhelmshaven Constantiaplatz 4 26723 Emden

\* Mechanical and Manufacturing Engineering / Loughborough University Leicestershire LE11 3TU UK

<mailto:hauke.buse@fho-empden.de>

Mit Hilfe eines DIH - Messaufbaus können Informationen hinsichtlich der Größe und räumlichen Verteilung von Feinstaubpartikeln gespeichert werden. Durch Optimierung der Abbildungsoptik wurde sowohl die Speicherung des durch die betrachteten Partikel erzeugten Wellenfeldes an die Auflösung des CCD Chips angepasst als auch eine starke Vergrößerung der Partikel erreicht.

## 1 Grundlagen

Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von kleiner 10µm repräsentieren den lungenzugänglichen Anteil der in der Umwelt vorkommenden Gesamtstaubmasse (Abb.1).

Klassifizierung von Feinstäuben nach Partikelgröße	
Inhalierbarer Feinstaub PM 10: $d < 10\mu\text{m}$	Grobstaub (Sedimentationsstaub) $d > 10\mu\text{m}$
Lungengängiger Feinstaub PM 2,5: $d < 2,5\mu\text{m}$ PM 1 : $d < 1\mu\text{m}$	
Ultrafeine Partikel UP: $d < 0,1\mu\text{m}$	

**Abb. 1** Einordnung von Feinstäuben in Klassen (PM=particulate matter)

Die negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstäuben auf Atemwegs- und Herz-Kreislauf-erkrankungen ist durch eine große Anzahl von Fallstudien und wissenschaftlichen Veröffentlichungen nachweisbar [1]. Trotz zahlreicher Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet ist es jedoch noch unklar, inwieweit die Partikelgröße, Partikelbeschaffenheit oder deren chemische Zusammensetzung auf die menschliche Gesundheit wirken.

## 2 Klassische Methoden zur Feinstaubanalyse

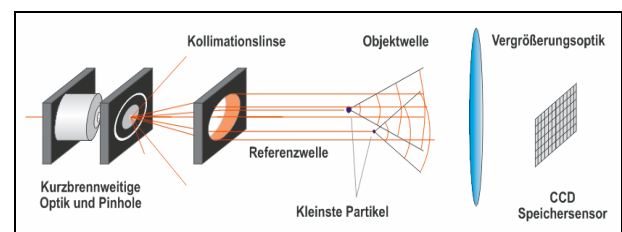
Für die Bestimmung der physikalischen Partikeleigenschaften  $\lambda$ -parameter:

- Partikelgröße
- Räumliche Verteilung

werden z. Z. unterschiedliche physikalische Mess-

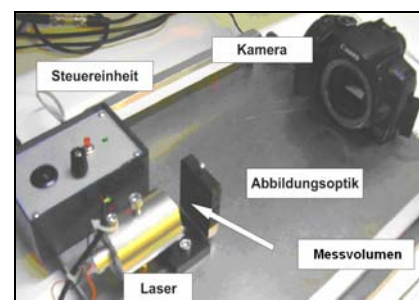
verfahren herangezogen, wie beispielsweise Wä-geverfahren, Elektronen- und Rasterkraftmikroskopie, Streulichtverfahren, LDA (Laser-Doppler-Anemometrie). Hierdurch können nahezu alle interessierenden Parameter bestimmt werden, bis auf die räumliche Verteilung. Die Digitale Holografie als dreidimensionales Kurzzeitspeicherverfahren erlaubt die Bestimmung sämtlicher o. g. Partikelparameter.

## 3 Digitale Inline Holografie



**Abb. 2** Schema einer Hologrammaufnahme nach dem Inline Prinzip

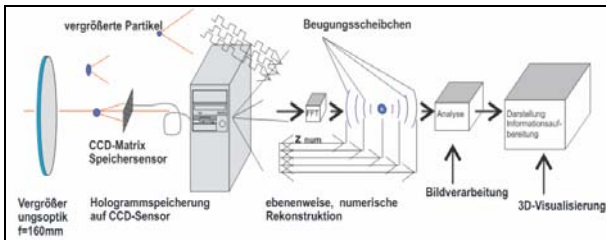
Bei der digitalen Holografie (Abb.2/3) wird ein CCD-Sensor zur Hologrammaufzeichnung verwendet, mit dem das Interferenzmuster aus Überlagerung von Referenz- und Objektwelle elektronisch erfasst und digital auf einem Massenspeicher festgehalten wird.



**Abb. 3** Miniaturisierter Aufbau zur digitalen Holografie

Verglichen mit holografischen Filmen ist das Auflösungsvermögen von CCD-Sensoren derzeit noch etwa 10-fach kleiner. Aus diesem Grund ist das zu speichernde Interferenzmuster so zu skalieren, dass die Informationen vollständig (Aliasing) von dem Sensor aufgezeichnet werden können. Diese Anpassung wird, ähnlich wie in einer Kamera, mit einem optischen Abbildungssystem vorgenommen.

#### 4 Rekonstruktion des gespeicherten Hologramms



**Abb. 4** Prozesskette zur Rekonstruktion von digitalen Hologrammen

Die Beschreibung holografischer Zusammenhänge ist in den so genannten Beugungsintegralen mathematisch festgelegt. Sowohl die Entstehung von Hologrammen aus der Überlagerung zweier kohärenter Wellen, als auch die Rekonstruktion der Objektszene durch Beugung der Referenzwelle am Hologramm kann mathematisch beschrieben werden und alphanumerisch in diskreten Algorithmen umgesetzt werden.

$$\Gamma(m, n) = \frac{ia}{\lambda z} \exp \left[ -i \pi \lambda z \left( \frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2} \right) \right] * \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} T(k, l) \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda z} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2) \right] \exp \left[ +i 2 \pi \left( \frac{km}{N} + \frac{ln}{N} \right) \right]$$

$\Gamma(m, n)$ : Rekonstruierte Ebene im digitalen Bild mit den Bildpunkten x und y

$T(k, l)$ : Auf dem CCD-Sensor gespeichertes Hologramm (Interferenzmuster) mit den Koordinaten x und y

$\lambda$ : Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes

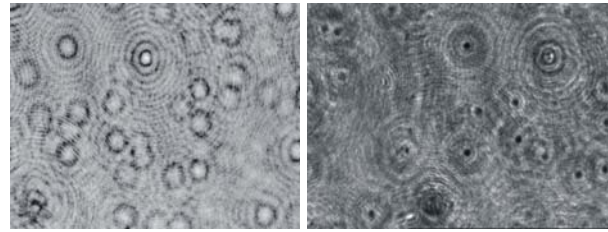
$z$ : Ort, an dem die Ebene  $\Gamma(m, n)$  aufgespannt wird

$\Delta x, \Delta y$ : Pixelbreite, bzw. -höhe des CCD-Sensors der eingesetzten Kamera

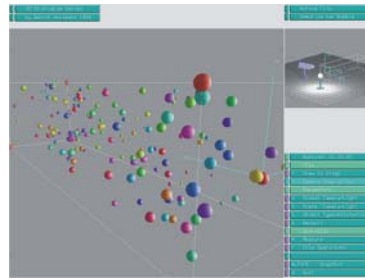
Zur Lösung der Beugungsintegrale wurde eine Software entwickelt, die eine ebene Rekonstruktion der in Form eines Hologramms gespeicherten Objektszene erlaubt.

#### 5 Ergebnisse der Feinstaubholografie

Durch die ebene numerische Rekonstruktion (Abb.5; links) des erhaltenen Interferenzmusters (Hologramm) (Abb.5; rechts) kann die Lage, Form und Größe der streuenden Struktur, hier: Staubpartikel, bestimmt werden. Je nach Lage der Partikel im Messvolumen, erhält man bei der Rekonstruktion verschiedene Ebenen, auf denen die Partikel "scharf" erscheinen. Diese Verteilung kann später in Form einer 3-dimensionalen Auswertung dargestellt werden (Abb.6).



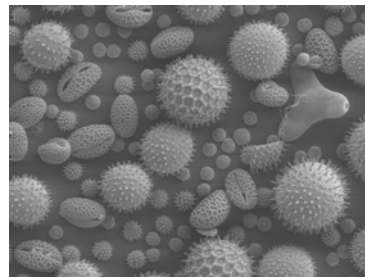
**Abb. 5** Hologramm von 3µm Tracern / rechts: Rekonstruierte Ebene



**Abb. 6** Mit der Visualisierungssoftware berechnete Partikelverteilung

#### 6 Ausblick

Verschiedene physikalische Verfahren zur Sammlung von luftgetragenen Pollen (Abb.7) sind bekannt, sie beruhen u. a. auf: Gravitation, Impaktion und Ansaugen von Testvolumina. Allen Verfahren gemein ist die anschließende mikroskopische Untersuchung und Auszählung der auf dem Trägermaterial befindlichen Pollen. Dieses ist zeitaufwändig und nur teilweise, in Form von bilderkennenden Techniken, automatisierbar.



**Abb. 7** REM- Aufnahme diverser Pollen (Quelle: Dartmouth College, USA)

Darüber hinaus ist keine Aussage über die tatsächliche Verteilung der Pollen möglich. Nachteilig wirkt sich bei dieser Art der Probensammlung zudem die Tatsache aus, dass die Luft (~Pollen) angesaugt wird, und damit u. U. keine Isokinetische (geschwindigkeitsgleiche) Messung stattfinden kann. Somit entspricht die Konzentration der Pollen im eingesaugten Luftstrom nicht der Konzentration in der Außenluft. Mit dem oben beschriebenen miniaturisierten Messsystem lassen sich diese Nachteile beseitigen.

#### Literatur

- [1] Künzli N, Tager IB. Air pollution: from lung to heart. Swiss Med Wkly. 2005;135:697-702