

## Deformationsmessung von Gesteinsproben bei hohen Drücken mittels Weißlichtinterferometrie

Dipl.-Ing. Waldemar Przybilla, M.Sc. Dipl.-Ing.(FH) Harald Kohlhoff, Dipl.-Ing. Constanze Schilder  
BAM-8.6, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
(030) 8104-0, waldemar.przybilla@bam.de, harald.kohlhoff@bam.de, constanze.schilder@bam.de

**Schlagwörter:** Weißlichtinterferometrie, Deformationsmessung, EFPI-Sensor, Hochdruckumgebung, 3D-Darstellung

### Einleitung

Das Feld der Geomechanik wird mit vielfältigen Untersuchungsmethoden und -werkzeugen bearbeitet. Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Prüfung verlangen wissenschaftliche Instrumente zur qualitativ hochwertigen Ermittlung gänzlich verschiedener Materialcharakteristika. Ein Anwendungsfeld für technologisch hochwertige Prüfmethoden findet sich in der Ermittlung der Materialbeschaffenheit von Gesteinsproben aus Probebohrungen. Unterschiedliche Eigenschaften, wie der Widerstand gegen Gasdiffusion oder die Ermittlung der vorhandenen Scher- oder Druckfestigkeit geben den Wissenschaftlern entscheidende Hilfestellungen – beispielsweise für die Standortwahl zukünftiger CO<sub>2</sub>-Speicher oder in der Technologiewahl bei der Erschließung fossiler Energielagerstätten.

Die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung stellt ihre Technologien für derartige Messaufgaben zur Verfügung. Simulation der Gestaltverformung einer zylinderförmigen Gesteinsprobe unter Einfluss einer triaxialen

Drucksituation – wie unter realen Bedingungen am ursprünglichen Ort der Probe tief unter der Erdoberfläche – soll hierbei mit weit geringerer Messunsicherheit und mit wesentlich höherem Informationsgehalt als bisher geschehen.

Deformationsexperimente werden bei unserem Projektpartner, dem Gesteinslabor Dr. Eberhard Jahns in Druckzellen (Bild 1) durchführt. Stand der Technik ist die Ermittlung der Umfangsänderung der Gesteinsprobe, die axial durch Druckstempel belastet und dabei tonnenförmig verformt wird. Das Messgerät ermittelt die Umfangsänderung über eine umlaufende Kette mit scherenförmiger Übersetzungsmechanik durch Verformung eines DMS. Zur triaxialen Prüfung werden Probe und Messgerät in einem Druckkörper zudem vollständig vom Hydraulikfluid umschlossen und mit Drücken bis 2000 bar und Temperaturen bis 200 °C belastet. Der Informationsgehalt einer Umfangsmessung wird bei realistisch anisotroper Verformung der Gesteinsprobe höheren Ansprüche aber nicht gerecht. Die BAM löst diese Problemstellung durch Verwendung faseroptischer Wegmesstechnik.

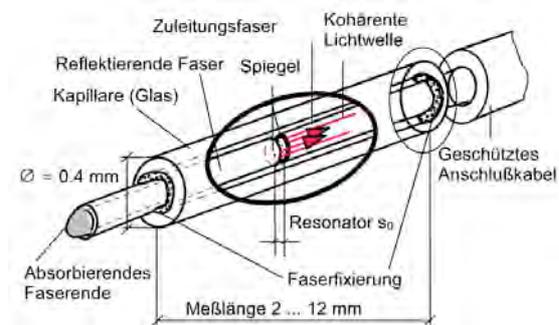


**Bild 1:** Triaxialprüfzelle der Fa. Gesteinslabor Dr.Eberhard Jahns

### 1. Systementwicklung/ Aufbau

Für das Messsystem wird ein mechanisches Übersetzungselement mit interferometrischer Wegmesstechnik kombiniert, um einen klein dimensionierten Sensor für die punktförmig lokale Verformungsmessung zu erhalten. Mehrere Sensoren in einer Messebene erlauben somit die Erfassung von Gestaltverformung und Lage eines Probenquerschnitts. Die fotomechanischen Sensoren sollen radiale Bewegungen mit Messunsicherheiten im Bereich  $<1 \mu\text{m}$  über einen mehrtägigen Messzyklus erfassen. Hierbei liegt die Herausforderung in der robusten Ausführung des Sensors, der im Hydraulikfluid extremen Belastungen von 2000 bar und hohen Temperaturen von 200°C ausgesetzt ist. Ausgeführt wird eine offene

Untersetzungsmimik mit faseroptischem Wegaufnehmer (Bild 3) nach Bauart extrinsischer interferometrischer Fabry-Perot-Fasersensoren (Bild 2).



**Bild 2:** extrinsischer interferometrischer Fabry-Perot-Fasersensor (Dr.-Ing.W.R. Habel, Dr.-Ing.B. Hillemeier, 1999).

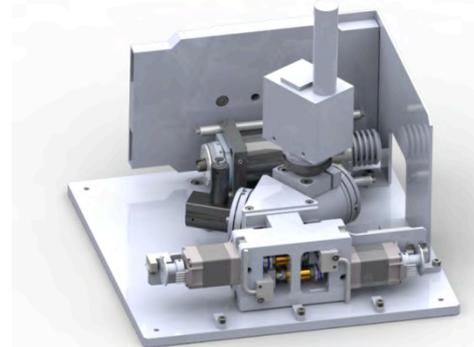
Die interferometrisch erzeugte Weginformation wird über Glasfasern aus dem Druckkörper herausgeführt, wo sie zu jeder Zeit durch ein Auswertegerät erfasst, verarbeitet und als konkrete Probengestalt computertechnisch gespeichert und dargestellt wird.



**Bild 3:** optomechanische Sensorköpfe an einer Gesteinsprobe

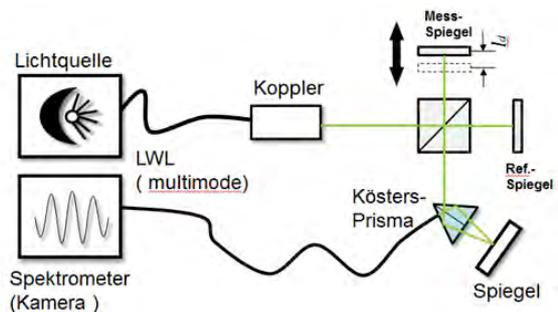
Dabei ist durch gekoppelte Weißlichtinterferometrie ein absoluter Wert für die Stellung des Tastelementes des optomechanischen Sensorkopfs ermittelbar. Diese Position entspricht der lokalen Probengestalt und bleibt auch bei Unterbrechung der Messung erhalten – ein sequentielles Auslesen der Sensorköpfe wird hier ermöglicht. Die verwendete Fasertechnologie erlaubt den Einsatz eines optischen Multiplexers. Ein Auswertegerät lässt sich somit modular aufbauen und nachträglich mit größerer Messstellenzahl betreiben. Limitierend wirkt hierbei nur die

gewünschte Messfrequenz in Verbindung mit leistungsfähigen Lichtquellen (Bild 4).



**Bild 4:** BAM-Auswertegerät der Sensorköpfe

Das Auswertegerät erfasst Interferenzmuster durch eine hochauflösende Kamera. Weiterverarbeitung und Auswertung der Bilder erfolgt mittels PC, der darüber hinaus die Einstellung der optischen Elemente wie Spiegel und Lichtquelle vorgibt. Ein prinzipieller Messaufbau ist in Bild 5 dargestellt.



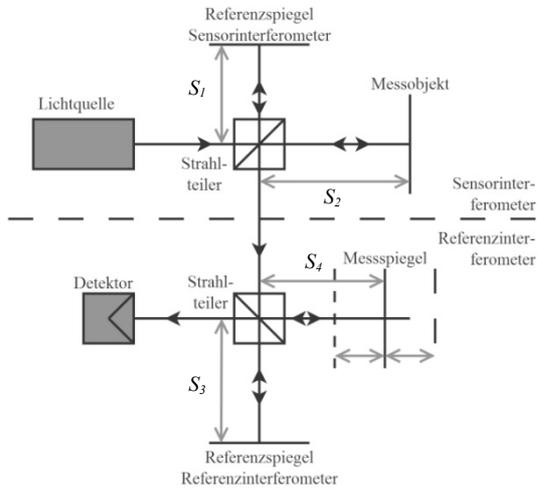
**Bild 5:** prinzipieller Messaufbau des BAM-Auswertegerätes

## 2. Auswertung der Interferenzmuster

Aus dem Interferenzmuster des Kamerabilds wird ein Grauwert-Profil abgeleitet. Bei der Grauwertprofilbestimmung kann ein Bildausschnitt aus dem Gesamtbild definiert werden, welcher dann zur weiteren Bearbeitung herangezogen wird. Mittels Glättungsfunktionen, Mittelwert-berechnung, FFT bzw. Ableitung und Maximalwertsuche sowie eines Detrend-Algorithmus kann die Verschiebung des Sensors im optomechanischen Sensorkopf aus dem Grauwertprofil ermittelt werden. Der Detrend-Algorithmus (Z.Xiao, P.C.B. Phillips, 1999) gleicht Hintergrund-Schattierungen aus, um Fehlberechnung der Maximalwerte und ein hiermit verbundenes falsches Messergebnis zu verhindern. Bildbearbeitungs-Filter wie Invertierung oder Farbfilter zur Vorverarbeitung der Bilder vervollständigen die Möglichkeiten zur Qualitätsanpassung.

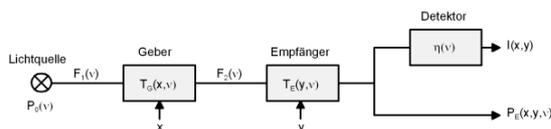
### 3. Theoretische Grundlagen

Der Messaufbau besteht hauptsächlich aus einem System von zwei in Reihe geschalteten Interferometern, wie in Bild 6 zu sehen.



**Bild 6:** Gekoppeltes Weißlichtinterferometer zweier Michelson-Interferometer (Dipl.-Ing.C. Schilder, 2009)

Bei der Betrachtung eines optischen Systems zweier Interferometer mit einer breitbandigen Lichtquelle, Glasfaserkabel als LWL und einem Detektor am Ausgang, lässt sich folgendes Übertragungsschaltbild (Bild 7) zeichnen.



**Bild 7:** Übertragung spektral codierter Messwerte  
Quelle: C.Bosbach, Diss. RWTH-Aachen, 2003

Das Intensitätssignal am Detektor kann aus den Transmissionsfunktionen des Geber- und Empfängerinterferometers sowie dem Leistungsdichtespektrum am Empfänger aus folgender Beziehung abgeleitet werden:

$$I(x, \nu) \approx \int_0^{\infty} |T_G(x, \nu)|^2 |T_E(y, \nu)|^2 P(\nu) d\nu$$

Beim Aufbau des Systems mit zwei Interferometern mit den unterschiedlichen Wegstrecken  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , wobei  $2X = S_1 - S_2$ ;  $y = S_3 - S_4$  sowie die Berücksichtigung des Leistungsdichtespektrums  $P$ , ergibt sich für das Intensitätssignal:

$$I(x, \nu) \approx \int_0^{\infty} |E(\nu)|^2 P(\nu) d\nu$$

Eine Reihenentwicklung der frequenzabhängigen Größen um die Mittenfrequenz  $\nu_0$  nach Phase u. Amplitude ergibt nach (A.Koch, 1991):

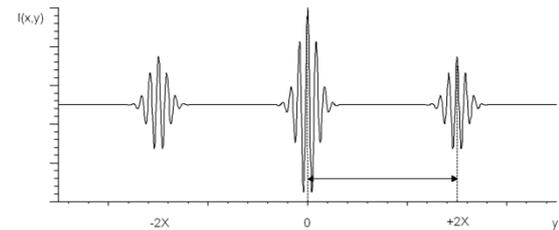
$$I(x, y) \approx \frac{1}{4} \tag{i}$$

$$+ \frac{1}{4} e^{-\frac{\pi^2 \cdot y^2 \cdot \Delta \nu^2}{2}} \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_0 \cdot y + \Psi_E) \tag{ii}$$

$$+ \frac{1}{8} e^{-\frac{\pi^2 \cdot (y+x)^2 \cdot \Delta \nu^2}{2}} \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_0 \cdot (y+x) + \Psi_E + \Psi_G) \tag{iii}$$

$$+ \frac{1}{8} e^{-\frac{\pi^2 \cdot (y-x)^2 \cdot \Delta \nu^2}{2}} \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_0 \cdot (y-x) + \Psi_E - \Psi_G) \tag{iv}$$

Hierbei entspricht der Term (ii) der Hauptsignatur und die Terme (iii) und (iv) den Nebensignaturen in Bild 8.



**Bild 8:** Hauptsignatur und Nebensignaturen

Anstelle des ersten Michelson-Interferometers wird nun ein extrinsisches Fabry-Perot-Interferometer eingesetzt. Für den Fall, dass das EFPI in Luft eingesetzt wird, ist der Absorptionskoeffizient  $r_i$  zwischen Objekt (spiegelnder Deformationsübertrager an der Gesteinsprobe) und der Lichtaustrittsfaser Null. Der Brechungsindex in Luft wird als konstant angenommen, so dass sich für die Transmissionsfunktion des Geberinterferometers ergibt:

$$|T_G(x, \nu)|^2 = \frac{(r_{sp} - r_{obj})^2 + 4 r_{sp} \cdot r_{obj} \sin(2\pi \nu x)}{(1 - r_{sp} \cdot r_{obj})^2 + 4 r_{sp} \cdot r_{obj} \sin(2\pi \nu x)}$$

Beim Übergang von Luft und Glas ergibt sich ein Wert von  $r_{sp}=0,2$  für den Absorptionskoeffizienten. Für die Transmissionsfunktion des Empfängerinterferometers gilt:

$$|T_E(x, \nu)|^2 = \frac{1}{2} (1 + \cos(2\pi \nu x))$$

so dass sich am Ausgang nach der Entwicklung einer geometrischen Reihe ergibt:

$$I(x, \nu) \approx \int_0^{\infty} |T_G(x, \nu)|^2 |T_E(y, \nu)|^2 P(\nu) d\nu$$

$$= \int_0^{\infty} T_{erm_A} P(\nu) d\nu \tag{i}$$

$$+ \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \cdot T_{erm_A} P(\nu) \cos(2\pi \nu y) d\nu \tag{ii}$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{2} (r_{sp} \cdot r_{obj})^i T_{erm_B} P(\nu) \cos(2\pi \nu (y + i x)) d\nu \tag{iii}$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{2} (r_{sp} \cdot r_{obj})^i T_{erm_B} P(\nu) \cos(2\pi \nu (y - i x)) d\nu$$

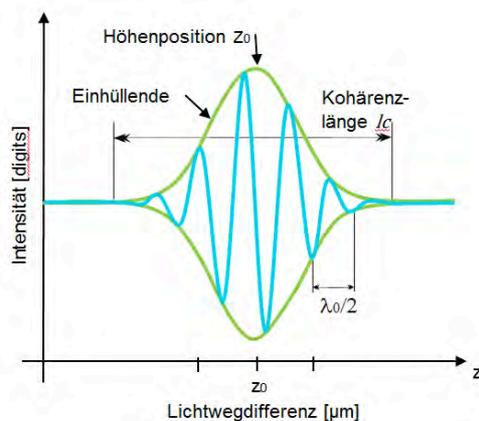
wobei gilt:

$$T_{erm_A} = \frac{(r_{sp}^2 + r_{obj}^2) - 2(r_{sp} \cdot r_{obj})^2}{(1 - r_{sp} \cdot r_{obj})^2}$$

$$T_{erm_B} = \frac{1 - (r_{sp}^2 + r_{obj}^2) + (r_{sp} \cdot r_{obj})^2}{(1 - r_{sp} \cdot r_{obj})^2}$$

Wie auch bei der Berechnung für den allgemeinen Fall der beiden Michelson-Interferometer stellt der Term (i) den Gleichanteil, abhängig von Reflexionskoeffizienten  $r_{Sp}$  u.  $r_{Obj}$  dar. Die Hauptsignatur wird durch Term (ii) beschrieben und die Terme (iii) und (iv) beschreiben die sich wiederholenden Nebensignaturen. Für die weitere Auswertung genügt es, die beiden ersten Nebensignaturen ( $i = 1,2$ ) zu verwenden.

Bei der Messdatenauswertung gibt die mathematische Beziehung zwischen Periodendauer  $T$  u. der Wellenlänge  $\lambda$  innerhalb des Korellograms eine Möglichkeit der Skalierung vor. ( $T = \lambda_0/2$ , Bild 9)



**Bild 9:** Interferenzmuster des Kamerabildes (Dr.T.Seifert, Dissertation, 2005)

$$I(z) = I_o \left( 1 + e^{\left[ -4 \left( \frac{z-z_0}{l_c} \right)^2 \right]} \cos \left( 4\pi \frac{z-z_0}{\lambda_0} \right) \right)$$

Intensitätsverteilung (Dipl.-Phys. M.Hering, 2007)

Alternative Skalierungsmöglichkeiten können durch Einflechtung eines Referenz-EPFI's durchgeführt werden. Dieser erzeugt mit seinem definierten Gap-Abstand eine feste Signatur, auf derer eine Skalierung des Messbereichs erfolgen kann.

Beide Skalierungsarten sind in der Software implementiert und können ein oder ausgeschaltet werden.

#### 4. Software

Die Software ist in C# ausgeführt und basiert hauptsächlich auf einer Kamerabildauswertung der Interferenzstreifen. Hierbei kann der relevante Bereich zur Auswertung in einem Vorschauenfenster unter dem Menüpunkt *Bild-Setup* (Bild 10) manuell eingestellt werden.

In diesem ausgewählten Bereich werden die Grauwerte der Bildpunkte spaltenweise

aufsummiert und im Hauptfenster als Linienprofil angezeigt.

Im Kartenreiter *Einstellungen* kann auf die Auswertung der einzelnen Bildpunkte Einfluß genommen werden. Eine Mittelung der Grauwerte über die Anzahl der ausgewählten Bildzeilen kann vorgenommen werden.



**Bild 10:** Bildvorschau mit Bereichseinstellung

Hierbei erfolgt eine Normierung des Linienprofils auf die Zeilenanzahl. Zum Vergleich kann das Originalsignal (ohne Mittelung) bzw. nur der gleitender Mittelwert des berechneten Linienprofils dargestellt werden. Zur Eliminierung der Bildschatten und der damit verbundenen möglichen Fehlmessung, sind drei Verfahren implementiert: Differenzbildung von Original u. gleitendem Mittelwert, Transformation in den Frequenzbereich mit Löschen der Frequenzanteile bei Null und Rücktransformation, sowie dem Detrend Algorithmus (Z.Xiao, P.C.B. Phillips, 1999) welcher die besten Ergebnisse lieferte. Zusätzlich zu den genannten Verfahren lässt sich die Ableitung des so berechneten Linienprofils bilden, um möglichst große Interferenzbereiches-änderungen zu erfassen.

Dem nach obigen Verfahren entstandenen Linienprofil kann eine Hüllkurve auferlegt werden, dessen Maxima-Abstände zur Weglängenmessung genutzt werden. Der zu berechnende Abstand sowie die Hüllkurve können sichtbar gemacht werden. Eine Messdatenaufteilung in 3 Messebenen mit 4 Stützstellen ist standardmäßig definiert, und lässt sich bei Bedarf verändern.

Die Skalierung der X-Achse und die damit verknüpfte Einheit der Abstandsberechnung kann auf eine Referenzsignatur bzw. über die Hell-Dunkel-Abstände der Interferenzlinien berechnet werden.

Im Menü *IOW* (IO-Warrior) können alle Einstellungen bzgl. der Spiegeljustage des zweiten Interferometers durchgeführt werden. Hier sind je nach gewähltem Aufbau ein bzw. zwei Spiegel zur Bereichseinstellung des zu erfassenden Interferometerbereichs vorgesehen.

Bei einem Aufbau mit einem Spiegel, läßt sich der erfasste Interferometerbereich skalieren, so daß der max. Messbereich des Kamerabildes ausgenutzt werden kann.

Eine zweite Spiegeleinstellung hat direkten Einfluß auf den zu betrachtenden Interferometerbereich, der mit einem Verfahrensweg senkrecht zu den Interferenzlinien, definiert ausgewählt werden kann. Hiermit lassen sich die Signaturen von mehreren eingeschleiften FPI's direkt in den zu erfassenden Messbereich ziehen, um so die Genauigkeit der Messung zu erhöhen und die Anzahl der Messstellen zu vervielfachen. Die Justage erfolgt über einen Schrittmotor, der über

eine Spindel den Spiegel kippt. Ebenso kann die Anzeige auf dem *LCD-Displays* im gleichnamigen Menü dieser IO-Karte eingestellt werden. Im Kartenreiter *Motor-Setup* werden die Motordaten, wie z.B. Schrittwinkel, Strom, Maximal- und Minimalgeschwindigkeit des angeschlossenen Schrittmotors einmalig definiert. Der Kartenreiter *Motor-Status* zeigt die aktuellen Statusbits des Schrittmotors an. Die Einstellungen im Kartenreiter *Schrittmotor* beziehen sich auf die mechanischen Gegebenheiten der Spiegelverstellung. Hier lassen sich die Spiegel definiert verkippen, um somit eine Bereichsskalierung bzw. Verschiebung durchzuführen.

Mit der Betätigung des Menüpunktes *Messung* erscheint am rechten Fensterrand eine senkrechte Leiste in der die gefundenen Maximalwerte und der daraus resultierende *Abstand* für die aktuelle Messung angezeigt werden (Bild 11).

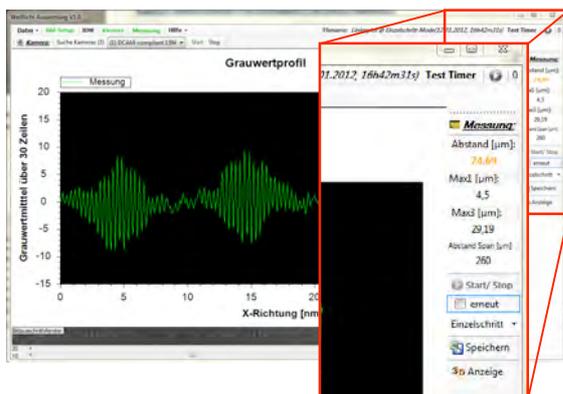


Bild 11: Menüanzeige „Messung“

Unter dem Menüpunkt *Kamera*, befindet sich eine USB-Kamerasuche, ein Dropdown-Menü mit den installierten Kameras sowie eine Start/Stop-Funktion zur ausgewählten Kamera. Eine Suche aller installierter Kameras auf dem PC kann durch die Betätigung von *Suche Kameras* initiiert werden, wodurch die Auflistung dieser im benachbarten Drop-Down-Menü erfolgt.

Die Auswahl der bildgebenden Kamera erfolgt in diesem Drop-Down-Menü, wobei diese noch mit *Start/Stop* zur Messdatenerfassung aktiviert werden muß.

Zur Messdatenerfassung kann im Fenster *Messung* (Bild 11) ein Messmodus eingestellt werden. Hierbei wird bei *Einzelschritt* nur einen Messwert pro Betätigung erfasst. Andere Modi enthalten die Triggerzeiten, mit denen eine Langzeitmessung gestartet werden kann.

Da bei 3 Messebenen und 4 Messstellen pro Messebene nur 12 Messpunkte erfasst werden, kann der *Start/Stop*-Button zur Messdatenaufnahme nur 12 mal betätigt werden (im Einzelschrittmodus), bis eine komplette Erfassung des Gesteinsprobenkörpers durchgeführt ist.

Eine Überwachung der Anzahl noch durchzuführender Messungen im Einzelschrittmode, wird durch ein Countdown-Zähler ermöglicht. (Bild 11, oben rechts).

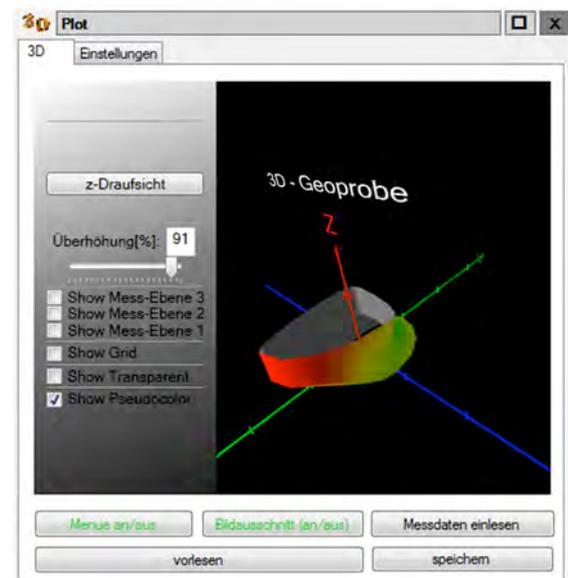


Bild 12: Fenster zur 3D-Darstellung der Probe

Eine erneute Messung lässt sich nur starten, wenn bei *erneut* ein Häkchen gesetzt wird, womit die zuvor gemachten Messdaten verloren gehen.

Durch diese erzwungene Benutzereingabe wird ein ungewolltes Überschreiben der gemachten Messdaten verhindert.

Die Aufgenommenen Messdaten können in einer CSV-Datei (Excel) gesichert werden. Hierbei wird ein Speichername aus einstellbarem Prefix, dem eingestelltem Datenaufnahme-Mode, dem aktuellem Datum und Startzeit der ersten Messung automatisch generiert. Alternativ können nach der kompletten Aufnahme aller Messdaten einer Gesteinsprobe (Standardanzahl =12), diese per Knopfdruck auf *3D-Anzeige* im gesonderten sich öffnenden Fenster (Bild 12) dargestellt und abgespeichert werden. Hierbei ist im Standardfall eine *Überhöhung* von 50% eingestellt, welche durch den Benutzer mittels Schieberegler verändert werden kann. Die Überhöhung  $\ddot{U}$  errechnet sich aus dem Radius  $r$  des Probenkörpers (Standard  $r=5\text{cm}$ ), dem minimalen, maximalen sowie den aktuellen Messwert ( $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$ ,  $M_{\text{akt}}$ ) einer Probe mit folgender Formel:

$$\ddot{U} = r \cdot \frac{M_{\text{akt}} - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}}$$

Die Überhöhung ist notwendig, da die sehr kleine Ausdehnung von einigen  $\mu\text{m}$  in den Radien der Probenkörper im Vergleich zum großen Radius nicht sichtbar wäre und die 3D-Darstellung nur einen Zylinder zeigen würde. Die Visualisierung der Daten als 3D-Körper wird durch Falschfarbendarstellung (*show pseudocolor*) und einer Einblendung der Messwerte in den Messebenen ergänzt. Das 3D-Modell der Probengestalt, kann im CAD-Format (\*.stl) anderen Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin kann ein Prüfbericht als Word-Datei (\*.doc) automatisch per Knopfdruck erstellt werden.

## 5. Zusammenfassung u. Ausblick

Es hat sich gezeigt, dass ein Laboraufbau mit den genannten Interferometern zu brauchbaren Resultaten führt und die sich ergebenden Interferenzbilder in ihren Kontrasten und Grauwert Höhen auswertbare Ergebnisse liefern.

Um die optischen Fehler im Strahlengang des Interferometers möglichst gering zu halten ist es von Bedeutung, in wie weit die Kohärenzeigenschaften erhalten bleiben. Die zeitlichen Kohärenzbedingungen werden durch die eingesetzte Faser nicht stark beeinflusst. Jedoch sind die räumlichen Kohärenzeigenschaften wesentlich durch die Faser beeinflusst. Um nun eine gute Sichtbarkeit des Interferogramms zu gewährleisten, muss eine

zeitliche und räumliche Kohärenz gegeben sein, wie es beim Einsatz von Single-Mode-Fasern der Fall ist. (Dr.-Ing. C. Bosbach, 2003)

In der momentanen Ausbaustufe des BAM-Auswertegerätes sind keine sicheren Messungen möglich. Der zukünftige Einbau geeigneter Lichtquellen und eine Optimierung der Faserkomponenten sollte die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erhöhen.

### Literaturverzeichnis

- A.Koch. (1991). *Strecken neutrale und Busfähige faseroptische Sensoren für die Wegmessung mittels Weißlichtinterferometrie*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Dipl.-Ing.C. Schilder. (2009). *Dipl.Arbeit: Untersuchungen zu fasergekoppelten Weißlichtsensoren*. Ilmenau: Technische Universität.
- Dipl.-Phys. M.Hering. (2007). *Angewandte statistische Optik in der Weißlicht-Interferometrie*. Heidelberg: Ruprecht – Karls – Universität.
- Dr.-Ing. C. Bosbach. (2003). *Miniaturisiertes Weißlicht-Interferometer mit hoher Messfrequenz für die Abstandsmessung*. Aachen: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule.
- Dr.-Ing.W.R. Habel, Dr.-Ing.B. Hillemeier. (1999). *Rückwirkungsarme faseroptische Miniatursensoren zur Bewertung der Anfangsverformung hydraulisch erhärtender Werkstoffe*. DGZfP-Berichtsband 66 CD.
- Dr.T.Seifert, Dissertation. (2005). *Verfahren zur schnellen Signalaufnahme in der Weißlichtinterferometrie*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Z.Xiao, P.C.B. Phillips. (1999). *Efficient detrending in cointegrating regression*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Yale University.