

# Berührungslose Oberflächenerfassung mittels PMD-Kameratechnologie im Braunkohletagebau

**Dipl.-Ing. Bernd Steyer, Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer**

*Leibniz Universität Hannover*

*Institut für Transport- und Automatisierungstechnik*

*Transporttechnik*

**Abstract:** In Zusammenarbeit mit der RWE-Power AG forscht das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik am Einsatz der PMD-Kameratechnologie zur berührungslosen Umgebungserfassung im industriellen Umfeld. Ziel ist, am Beispiel des Einsatzes bei der Braunkohleförderung mittels eines Schaufelradbaggers, die Umgebung des Abbaugerätes zu erfassen und im Modell darzustellen.

Zu diesem Zweck wurde im Braunkohletagebau an einem Schaufelradbagger eine Messeinrichtung aufgebaut, die es ermöglichen soll, während des Gewinnungsprozesses die Tagebauoberfläche zu erfassen. Der Aufbau und der aktuelle Stand der Messungen werden im Beitrag vorgestellt.

## 1 Einleitung

### 1.1 Beschreibung der Anwendung

Zukünftige Entwicklungen im Braunkohletagebau machen völlig neue Konzepte für die Datenerfassung und Verarbeitung von Geoinformationen notwendig. Die Kenntnis der Beschaffenheit und Oberfläche der gesamten Lagerstätte ist hierbei von großer Bedeutung. Die Beschaffenheit [OKJ07] der Lagerstätte, also das anstehende Material steht bei den hier beschriebenen Untersuchungen nicht im Vordergrund, sondern die Erfassung der Tagebauoberfläche. Die Erstellung des 3D-Modells des Braunkohletagebaus basiert auf Daten, die durch Befliegen des Tagebaugeländes unter Verwendung einer digitalen Messkamera aufgenommen werden. Mit den bekannten Methoden der Photogrammetrie und Stereobildauswertung werden aus diesen Daten in einem Postprocessing-Prozess Raumkoordinaten ermittelt. Diese sind die Basis für die weitere Detaillierung des Modells.

Damit das Modell auch in den Zeiträumen zwischen den Befliegungen aktuell ist, werden kontinuierlich die Positionen der Schaufelradbagger und die räumliche Lage der Schaufelradachse bestimmt. Da grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, dass dort wo sich das Schaufelrad einmal befunden hat kein Material mehr ist, lässt sich durch diese Gesetzmäßigkeit die Oberfläche des Tagebaus nachmodellieren. Das Schaufelrad ist jedoch nicht der einzige Einfluss, der die Oberfläche bearbeitet. Es werden Hilfsgeräte (Dozer etc.) eingesetzt und durch Witterungserscheinungen kann Material von der Oberfläche abgetragen werden. Somit verliert das Modell mit wachsendem zeitlichem Abstand zur letzten Befliegung seine Aktualität.

Im Besonderen die nachgeschalteten Systeme der Automatisierung der Großgeräte benötigen jedoch in Zukunft Online-Informationen über die Beschaffenheit als auch die Lage des abzubauenen Materials und relativ dazu die eigene Position. Das kann mit dem oben beschriebenen Verfahren nicht erreicht werden.

## 1.2 Auswahl einer geeigneten Alternative

Ziel ist es also, bereits während des Abbaubetriebes mit einer geeigneten berührungslosen Messmethode die Oberfläche des bearbeiteten Stoßes georeferenziert zu erfassen und damit die notwendigen Informationen für nachgeschaltete Systeme liefern zu können.

Die Umgebungsbedingungen im Tagebau führen zu der Entscheidung den PMD-Sensor für diese Untersuchung auszuwählen. Im Folgenden werden die Umgebungsbedingungen aufgeführt und die unterschiedlichen Sensoren hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für die Umgebungsbedingungen bewertet.

Aus der Literatur [Kra04] sind vielfältige Verfahren zur Erzeugung von dreidimensionaler Messinformation bekannt. Eine Möglichkeit besteht darin, das zu messende Objekt aus unterschiedlichen Perspektiven photographisch aufzunehmen und aus der bekannten Basis und der Parallaxenverschiebung der homologen Punkte im Bild die Tiefeninformation zu erhalten. Im vorliegenden Einsatzfall ist die Photogrammetrie jedoch nicht geeignet, da homologe Punkte nur gut in kontrastreichen Szenen gefunden werden können, diese liegen jedoch beim Abbau von gleichartigem Material (Braunkohle, Sand, etc.) nicht oder nur selten vor. Zusätzlich ist dieses Verfahren sehr stark abhängig von den herrschenden Lichtverhältnissen. Diese Gründe sprechen dafür andere Messmethoden als die Triangulation zu verwenden.

Ein weit verbreiteter Ansatz besteht darin, die bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle zu verwenden um aus der Laufzeit die Distanz zwischen dem der Welle aussendenden und der Welle reflektierenden Objektes zu bestimmen. Diese Verfahren unterscheiden sich einzig in der Art der verwendeten Welle, deren Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit. Gängige Wellenarten sind Schallwellen und elektromagnetische Wellen. Schallwellen sind für den vorliegenden Fall ungeeignet, da sie periodische Schwankungen in der Luft darstellen und demzufolge durch Wind abgelenkt werden können. Für die Distanzmessung von bewegten Objekten aus ist es ebenfalls wichtig, Wellen zu verwenden deren Ausbreitungsgeschwindigkeit gegenüber der Geschwindigkeit des bewegten Objektes möglichst hoch ist. Der Vergleich zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall im Vakuum mit der von elektromagnetischen Wellen macht deutlich, dass elektromagnetische Wellen für die Aufgabe der mobilen Umgebungserfassung von bewegten Plattformen aus zu bevorzugen sind:

$$\frac{c_0}{v_0} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{300 \text{ m/s}} = 1 * 10^6$$

Die Sensoren, die für diese Anwendung näher betrachtet werden, haben demzufolge folgende Eigenschaften gemeinsam:

- berührungsloses Messsystem
- Laufzeitmessung
- aktives Messsystem
- Emission von elektromagnetischen Wellen

Übliche Verfahren für die Bestimmung von Oberflächeninformationen mittels Laufzeitmessung sind scannende Systeme. So wurde bereits in [RSU07] ein System vorgestellt, das auf Basis von Laserscannermessungen, die mit Hilfe von einem Inertialmesssystem registriert bzw. georeferenziert werden, von einer bewegten Plattform aus die Umgebung vermisst. Ein hiermit vergleichbares System, jedoch ohne Stützung durch eine IMU<sup>1</sup> wird bereits im Tagebau eingesetzt, dessen Einsatz beschränkt sich jedoch bisher auf den Einsatz auf der Absetzerseite des Tagebaus. Folgende Bedingungen prädestinieren den Laserscanner für den Einsatz auf der Absetzerseite:

- geringe Staubbelastung im Anbringungsort des Scanners
- mechanische Belastung, Vibrationen und Stöße fallen in ihrer Frequenz geringer aus, da keine direkte Interaktion zwischen dem Stahlbau und der Geländeoberfläche besteht
- große Entfernungen (>100m) erfordern eine geringe Strahlaufweitung um einen möglichst kleinen Messspot zu erhalten und damit hohe Detailtreue

Auf der Baggerseite herrschen jedoch andere Umgebungsbedingungen, die den Einsatz der Laserscanner dort in Frage stellen.

- Belastung des Anbringungsortes durch Staubentwicklung
- Belastung des Anbringungsortes durch Bedüsung mit Wasser zur Staubbindung
- mechanische Belastung durch direkte Interaktion von Stahlbau und Geländeoberfläche
- vergleichsweise niedrige Entfernungen (<40m)

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde in einer Studie die Beeinflussung der Laserscanner durch diese Umgebungsbedingungen untersucht. Das Ergebnis dieser Studie zeigt, dass Laserscanner hochpräzise Messdaten liefern, solange die Umgebungsbedingungen günstig sind. Tritt jedoch vermehrt Staubentwicklung auf und wird dieser zusätzlich von ungünstig fließenden Luftströmen in den Bereich zwischen Sensor und Oberfläche getragen, dann treten vermehrt Fehlmessungen auf.

Diese Punkte haben dazu geführt, dass für den genannten Einsatzzweck eine weitere Technologie hinsichtlich ihres Nutzens für eine Oberflächenvermessung untersucht wird. In [Wig07] wurde bereits die PMD-Technologie vorgestellt. Die Applikationen, die in diesem Beitrag Erwähnung finden, beziehen sich hauptsächlich auf kurze Messdistanzen (<7,5m). Durch die Verwendung von unterschiedlichen

---

<sup>1</sup> Inertial Measurement Unit

Modulationsfrequenzen, seitens des Herstellers, konnte der Messbereich jedoch auf einen Eindeutigkeitsbereich von 150m ausgeweitet werden, wodurch diese Technologie auch für die Messung von großen Messdistanzen Verwendung finden kann. Die Eigenschaften der PMD-Technologie, die dazu geführt haben, dass dieses Messverfahren für den genannten Einsatzzweck verwendet wird sind folgende:

- aktives Messverfahren
- Verwendung elektromagnetischer Wellen
- Eindeutigkeitsbereich 150m
- flächenhafte Oberflächenerfassung
- keine rotierenden Komponenten
- mögliche Anpassung des Erfassungsbereichs durch kompakte Optiken

## 2 PMD-Kamera

### 2.1 Funktionsprinzip

Eine detaillierte Beschreibung der Technologie kann in [Lan00] und [Zha03] gefunden werden. Die Kamera beruht auf dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Anders jedoch als bei Laserscannern kann auf eine aufwendige Signalverarbeitung verzichtet werden. Das Funktionsprinzip soll hier kurz anhand von Abbildung 1 erläutert werden.

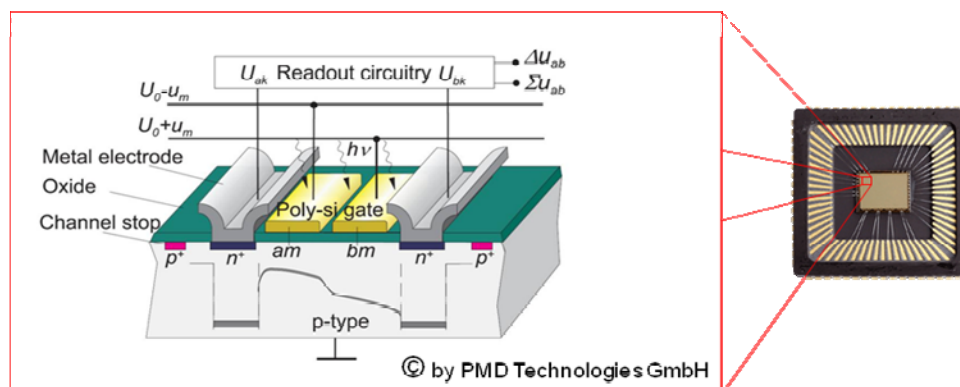


Abbildung 1: struktureller Aufbau eines PMD-Pixels

Das Bild zeigt ein PMD-Pixel in dreidimensionaler Darstellung. Im Unterschied zu normalen CMOS-Bildsensoren sind hier zusätzliche Bauteile, die im Bild mit *Poly-si gate* bezeichnet sind, vorhanden. Desweiteren besitzt jeder Pixel zwei statt einer Ausleseelektrode. Diese vergleichsweise geringe Modifikation ist der Schlüssel für die Abstandsmessung. Die PMD-Kamera ist kein passiver Sensor, sie besteht abgesehen vom CMOS-Sensor aus einer speziellen Lichtquelle, die im NIR<sup>2</sup>-Bereich arbeitet. Diese sendet rechteckförmige Lichtimpulse an die zu beobachtende Szene aus. Trifft dieses Licht auf den CMOS-Sensor, werden gemäß dem Photoelektrischen Effekt Elektronen aus dem Halbleitermaterial ausgelöst. Bei einem

<sup>2</sup> Nahe-Infrarot

Standardsensor werden diese freigewordenen Elektronen in Kondensatoren gesammelt und ausgelesen. Im Photonenmischdetektor hingegen werden die Elektronen an den im Bild mit *Metal electrode* bezeichneten Elektroden ausgelesen, von denen je Pixel zwei, anstatt üblicherweise einer, vorhanden sind. Die transparenten *Poly-si gates am* und *bm* werden im Gegentakt mit einer Modulationsspannung angesteuert. Das führt zu einer Ladungsschaukel, die je nach angelegter Modulationsspannung die ausgelösten Elektronen unterhalb der linken oder rechten Metallelektrode sammelt. Die Gegentaktmodulation der *Poly-si gates* findet in der gleichen Frequenz mit welcher die Lichtquelle moduliert ist statt. Die ausgelösten Elektronen werden somit unterhalb einer Metallelektrode in Phase und unterhalb der anderen in Gegenphase gesammelt. Aus der Differenz der gesammelten Elektronen in einem Abtastzyklus kann auf die Phasenverschiebung zwischen ausgesendetem und empfangenem Licht geschlossen werden. In Abbildung 2 sind für zwei unterschiedliche Phasenverschiebungen die Generierung von Ladungsträgern und deren Transfer zu den jeweiligen Pixelhälften dargestellt.

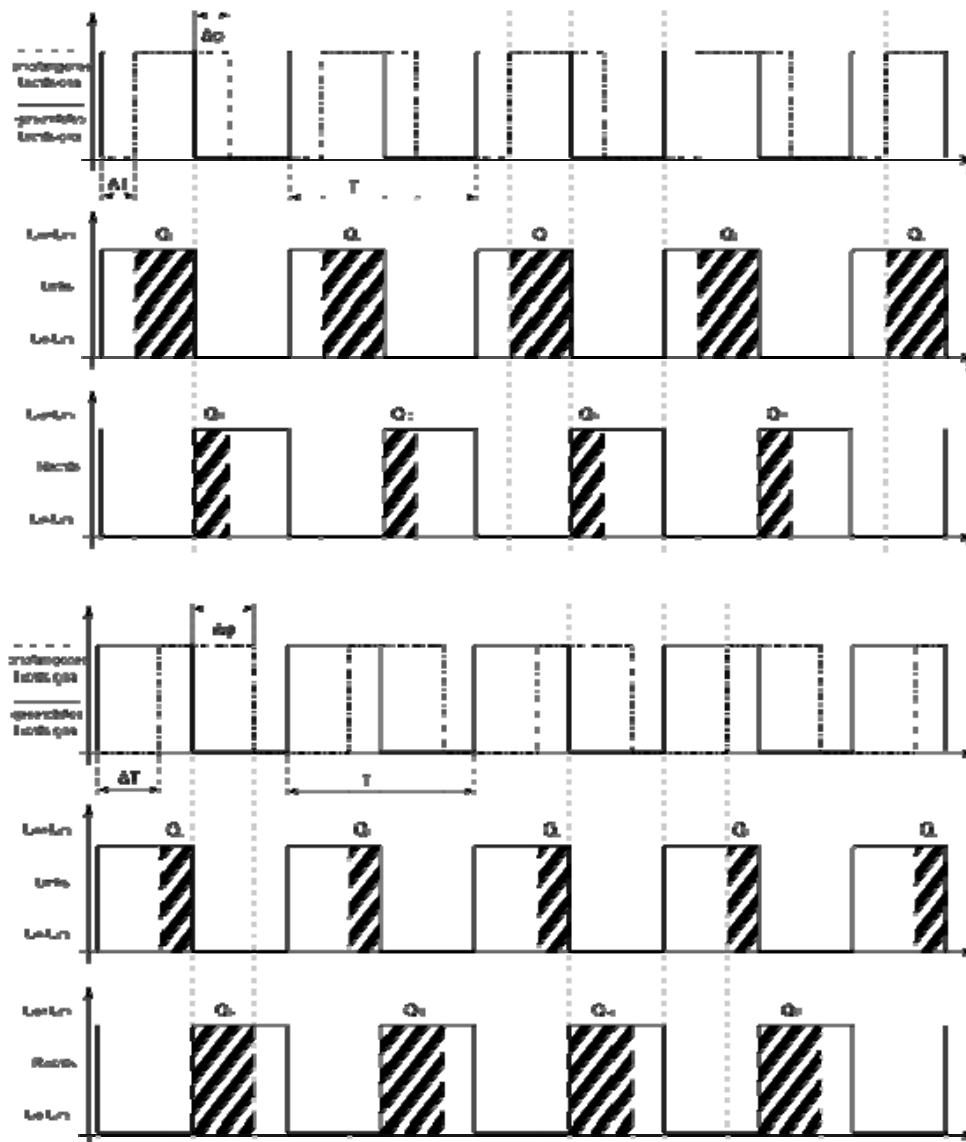


Abbildung 2: Ladungsträgerverteilung auf die Potentialtöpfe

Bei bekannter Modulationsfrequenz ist, unter Verwendung der Lichtgeschwindigkeit als bekannte Größe für die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Berechnung der Abstandsinformation möglich:

$$d = \frac{c_0 \Delta\varphi}{4 \pi f_{mod}}$$

## 2.2 Rekonstruktion der Messdaten im Raum

Für jeden Pixel im Sensorarray liegen nach der Anwendung des Prinzips der Ladungsschaukel Entfernungswerte vor, die zur Rekonstruktion der aufgenommenen Szene herangezogen werden. Für die Rekonstruktion der Szene wird ein Bezugskoordinatensystem benötigt, auf welches sich die Entfernungsdaten beziehen. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Linsenebene. In erster Näherung wird davon ausgegangen, dass der Mittelpunkt der Bildebene mit der optischen Hauptachse der Linse übereinstimmt. Die Bildebene und die Linsenebene liegen komplanar zueinander. Unter der Verwendung der zentralperspektivischen Abbildungsvorschrift ist der einzig noch verbleibende Parameter für die innere Orientierung die Kammerkonstante  $f$ .

Für die Rekonstruktion der aufgenommenen Szene werden für jedes Sensorelement in der Bildebene dessen Mittelpunkt berechnet und ein Vektor, der aus dem Koordinatenursprung des Bezugskoordinatensystems auf den Mittelpunkt weist. Dieser Vektor wird in seiner Richtung umgekehrt und auf die Länge 1 normiert. Das Ergebnis nach der Durchführung für jedes Sensorelement ist eine Matrix von Richtungsvektoren, die mit dem entsprechenden Messwert des jeweiligen Sensorelementes multipliziert und um den Euklidischen Abstand des Sensorelements zum Koordinatenursprung verkürzt werden. Diese Vorgehensweise liefert den Raumpunkt der zu rekonstruierenden Szene zu jedem Sensorelement (s. Abbildung 3).

Sollen aus diesen gemessenen 3D-Informationen Oberflächen von einer mobilen Beobachtungsposition rekonstruiert werden, muss die Georeferenzierung der einzelnen Bilder erfolgen. Hierzu dienen die Parameter der äußeren Orientierung, in diesem Fall die Pose<sup>3</sup> des Bezugskoordinatensystems der PMD-Kamera.

---

<sup>3</sup> als Pose wird hier die Kombination aus Position und Richtung bezeichnet

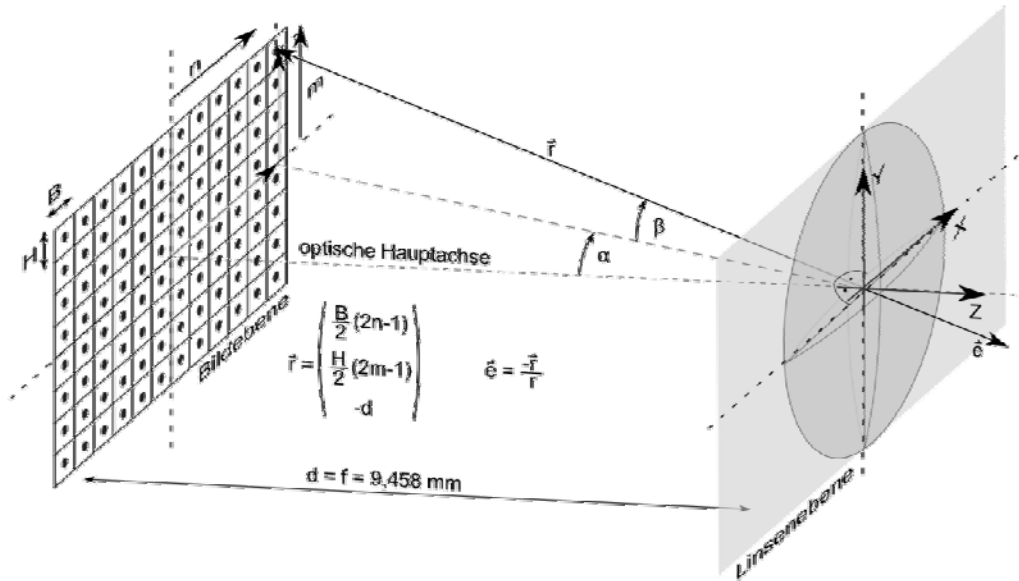


Abbildung 3: geometrische Verhältnisse zur Bildung der Richtungsvektoren

Grundlage hierfür ist ein während des Stillstandes des Baggers durch Messungen am Stahlbau des Baggers gebildetes Modell. Die Lage des Modells im Raum wird während des Baggerbetriebs kontinuierlich via GPS und Neigungsmesserdaten festgestellt, sodass die Orientierung der PMD-Kamera zu jedem Zeitpunkt bekannt ist. Mit diesen Informationen werden lassen sich schlussendlich die Kamerabilder verknüpfen und führen zu georeferenzierten Punktwolken. Abbildung 4 verdeutlicht das grafisch.

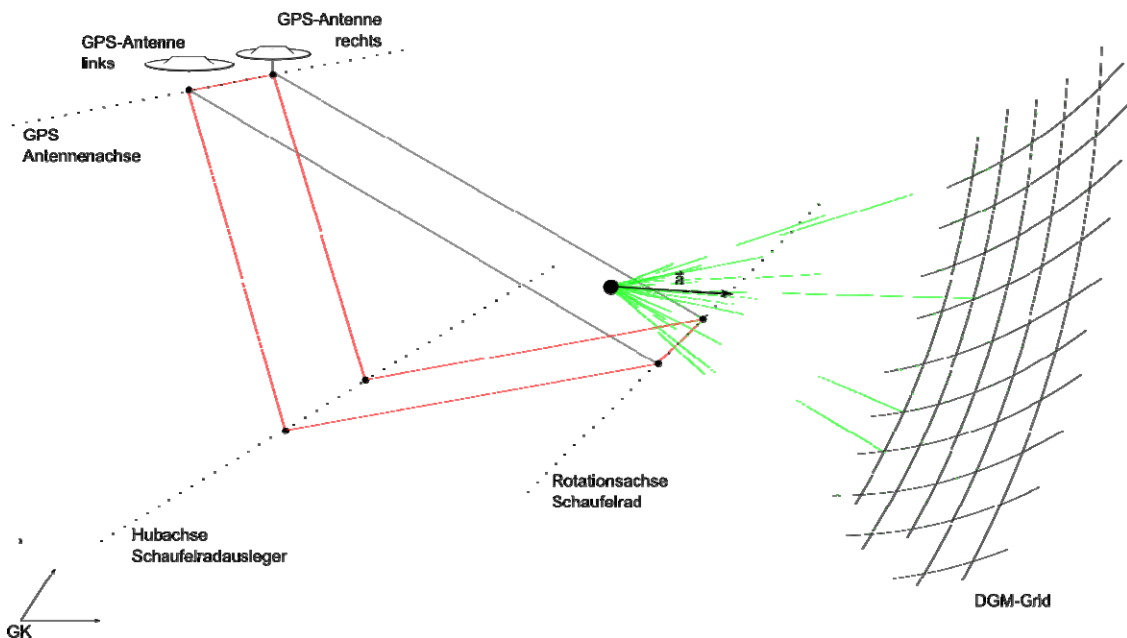


Abbildung 4: Modell zur Georeferenzierung

### 3 Messanlage

#### 3.1 Aufbau

Ziel der Untersuchungen ist, anhand automatisierter Messdatenauswertung eine Aussage über die Nutzbarkeit der PMD-Technologie für den bereits beschriebenen Einsatzzweck zu ermöglichen. Der Aufbau der hierzu verwendeten Messplattform auf einem Schaufelradbagger im Rheinischen Braunkohlerevier ist in Abbildung 5 dargestellt.

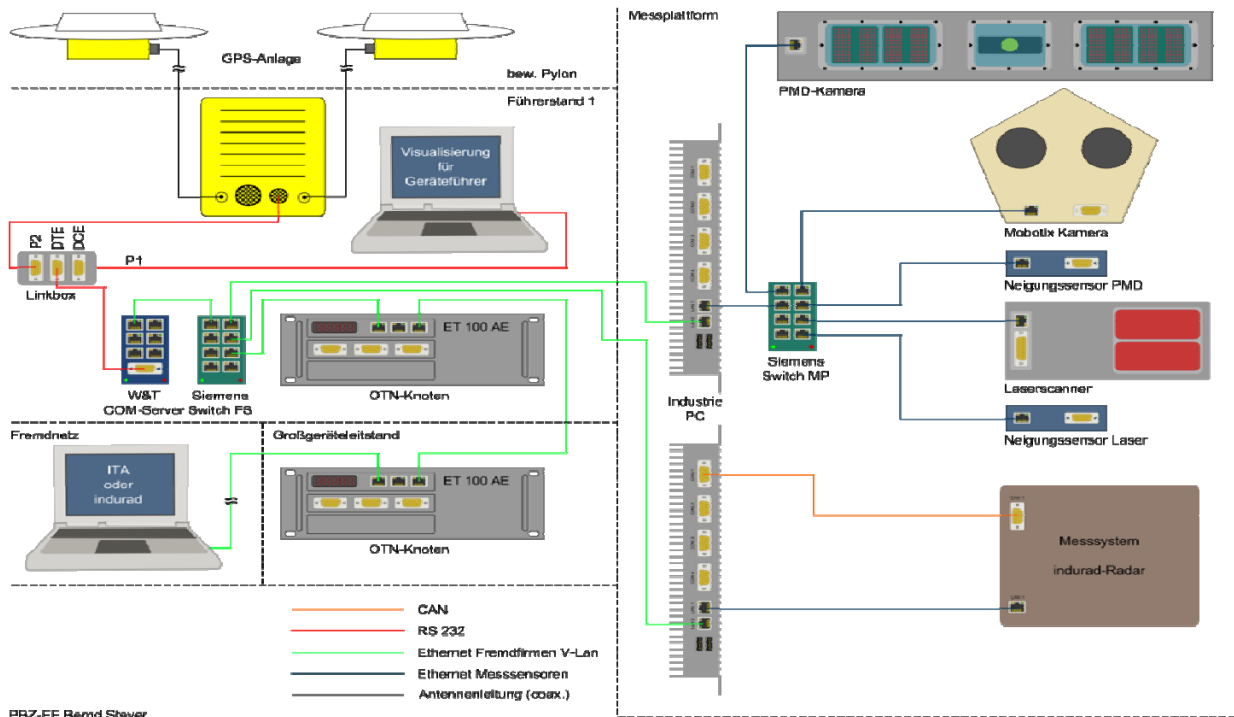


Abbildung 5: Aufbau der Messplattform

Wie im rechten Bereich des Aufbaus zu erkennen ist, ermöglicht die Messplattform den Vergleich zwischen momentan drei Sensorsystemen, die alle über dieselbe Georeferenzierung verfügen.

Da die Sensoren sich in rauem industriellem Umfeld ohne Unterbrechung im Einsatz sind, müssen die Komponenten vor den Umgebungseinflüssen geschützt sein. Der Laserscanner und die Radarsensoren erfüllen diese Voraussetzungen bereits ab Werk, da die PMD-Kamera sich zum Zeitpunkt des Aufbaus im Prototypenstatus befindet, hat das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik ein Gehäuse entwickelt und aufgebaut, welches für den Tagebaueinsatz geeignet ist.

In Abbildung 6 ist der Prototyp der PMD-Kamera, eingebaut das Gehäuse, zu sehen. In der Mitte befindet sich die Kamera und jeweils rechts und links davon die modulierten Lichtquellen um die zu beobachtende Szene ausleuchten zu können.



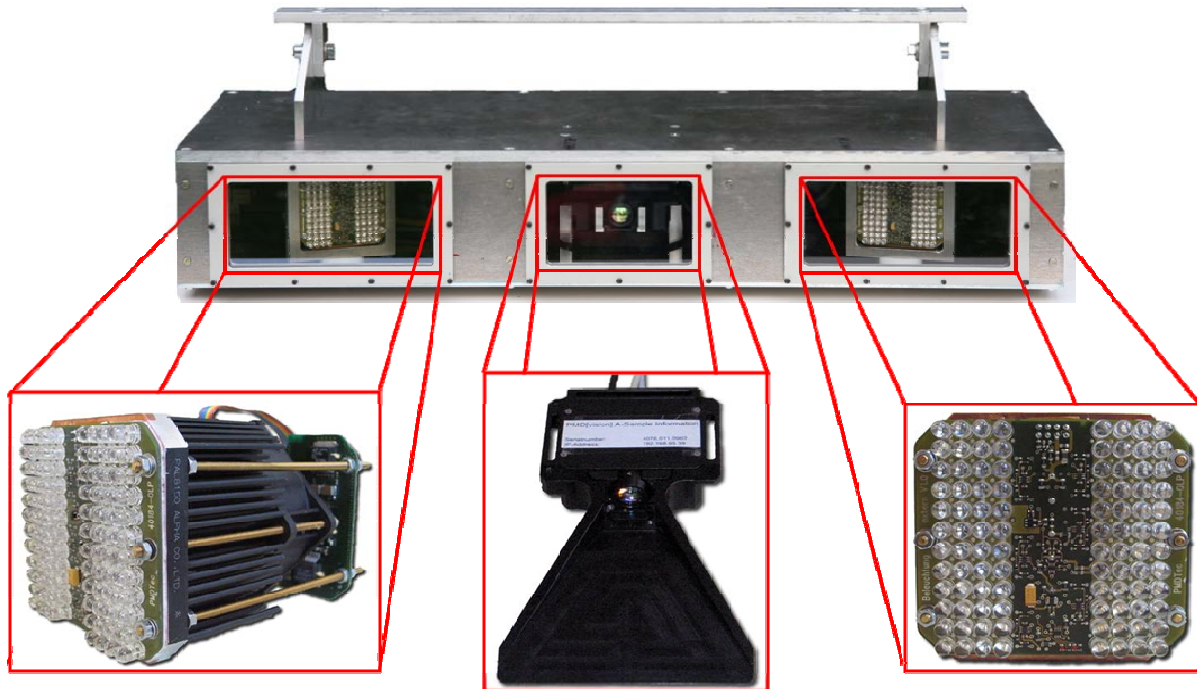


Abbildung 6: Prototyp PMD-Kamera für Tagebaueinsatz

Da die Kamera mit NIR-Lichtquellen arbeitet, ist das Licht mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Aus diesem Grund werden die Lichtquellen der Kamera durch eine Videokamera mit Nightshot-Funktion, diese setzt den Filter für NIR-Licht außer Kraft, nachts ausgerichtet um eine homogene Ausleuchtung und daraus resultierend eine sichere Datenaufnahme zu gewährleisten.

### 3.2 Auswertungen

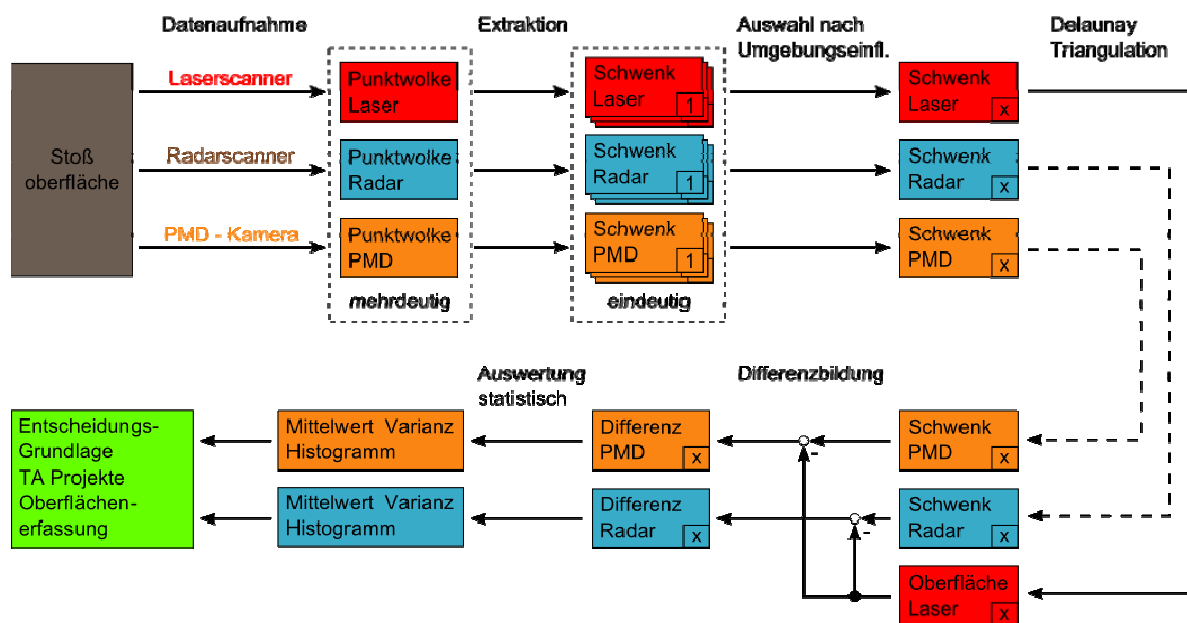
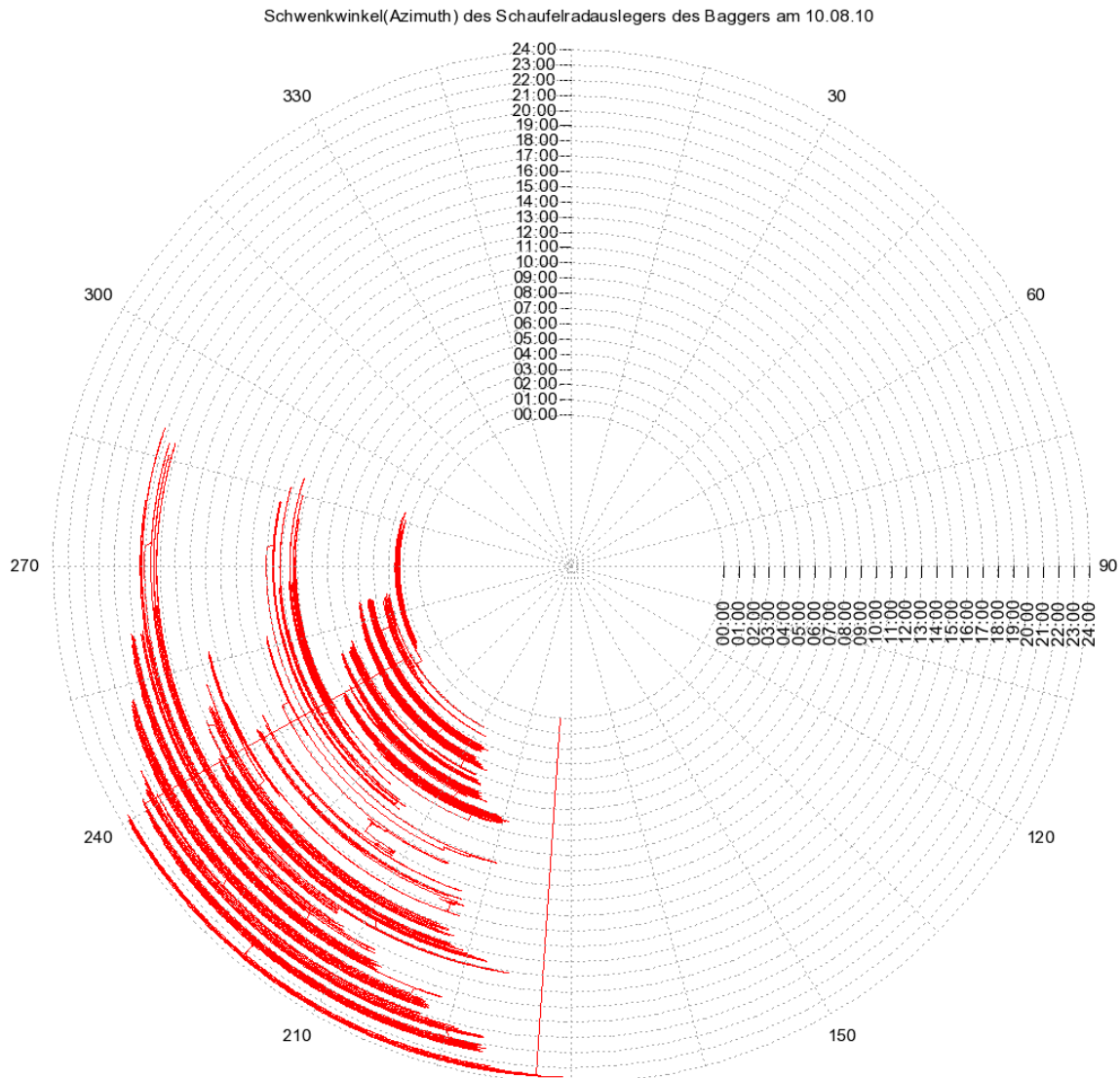


Abbildung 7: Schema der Vergleichsmessungen

Es werden dreidimensionale Punktwolken miteinander verglichen. Da dieser Vergleich nicht ohne weiteres möglich ist, wird nach dem Schema in Abbildung 7

eine Vergleichbarkeit der Daten erzeugt. Das Schema zeigt zusätzlich zu den hier bereits verglichenen Sensoren Laserscanner und der PMD-Kamera, bereits die Daten des Radars, die zu den hier beschriebenen Vergleichsmessungen noch nicht herangezogen werden.



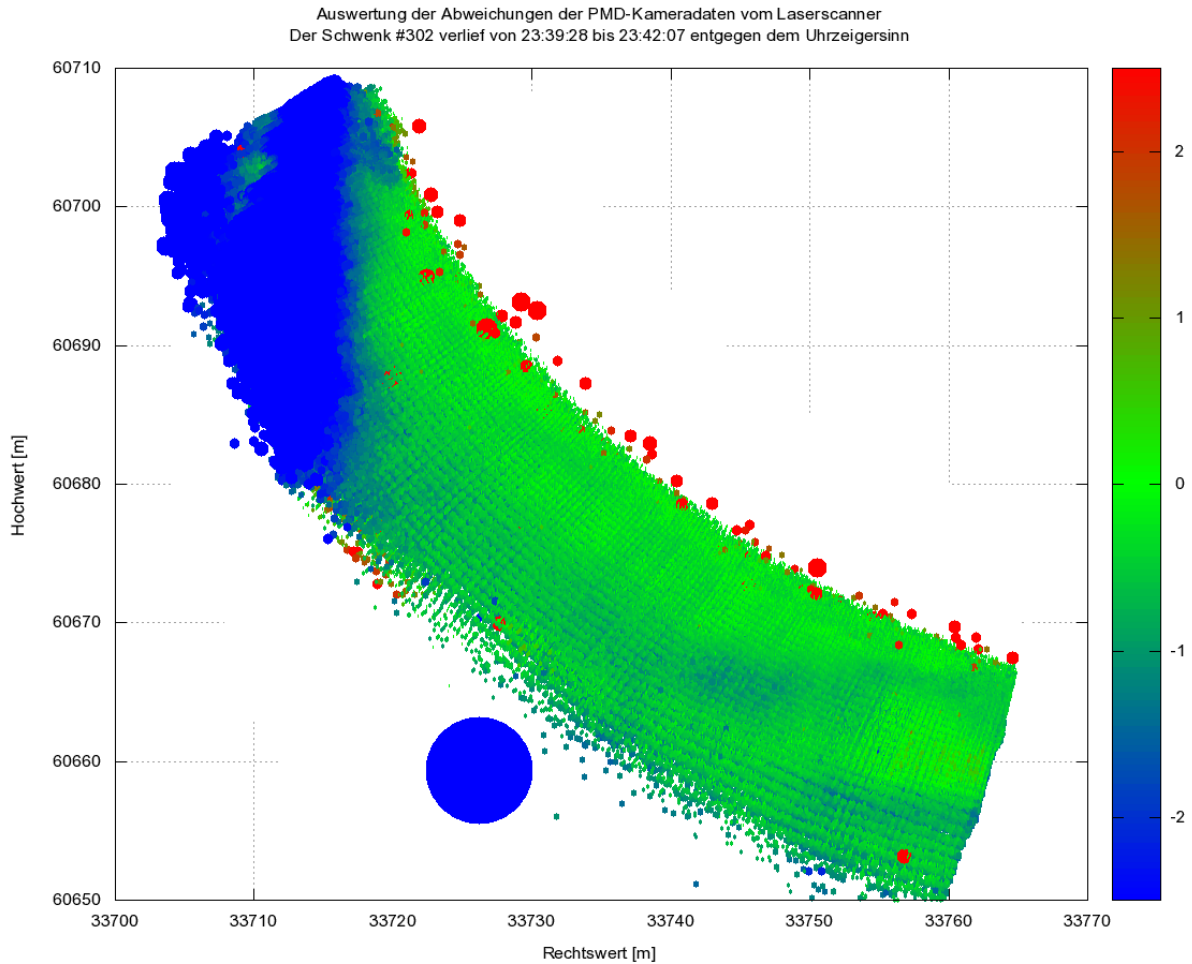
**Abbildung 8: Azimut des Baggers, berechnet aus GPS-Informationen**

Das Prinzip der Vergleiche ist dabei folgendes: es werden in einem ersten Bearbeitungsschritt miteinander vergleichbare Punktwolken, die hier bezeichneten Schwenks ermittelt. Über die GPS-Antennenposition ist die Richtung des Baggers bekannt und kann gemäß Abbildung 8 dargestellt werden. Ein Schwenk verläuft von einem Wendepunkt bis zum nächsten, anhand der Zeiten der Schwenks werden die Daten eines Tages in Schwenks zerlegt und ausgewertet.

Da das Lasersystem als Referenz für die Vergleiche dient, wird aus den Daten des Lasersystems eine geschlossene Oberfläche erzeugt und die Abweichungen der Höhe der PMD-Kameramesspunkte ermittelt. Aus diesen Vergleichen resultiert eine Grafik, aus denen die Abweichungen abgelesen werden können und die einen Eindruck über die Qualität der Rohdaten des PMD-Kamerasystems liefert. Eine

© 2010 Logistics Journal : Proceedings – ISSN 2192-9084 10

solche Grafik zeigt Abbildung 9. Die Farbe sowie die Größe der Punkte in der Grafik entsprechen hierbei der Abweichung bzw. ihres Absolutwertes. Das hat den Vorteil, dass auch einzelne Messpunkte mit hoher Abweichung in der Punktwolke schnell auffallen.



**Abbildung 9: Abweichung PMD-Kamera zum Laserscanner**

Die reine Betrachtung der Abweichungen liefert die Erkenntnis, dass sowohl Punkte mit geringer Abweichung zur triangulierten Laserscanneroberfläche erzeugt werden als auch Bereiche existieren in denen Abweichungen jenseits der Toleranzgrenze von wenigen Dezimetern auftreten. Jedoch auch in Bereichen mit geringer Abweichung treten Ausreißer auf, die unbehandelt eine resultierende Oberfläche trianguliert aus den aufgenommenen Messpunkten verschlechterten. Derzeit werden Verfahren entwickelt diese Punkte sicher zu erkennen und aus dem Resultat zu entfernen.

## 4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Messeinrichtung im Braunkohletagebau auf der Gewinnungsseite, ausgeführt als Mobile-Remote-Sensing Anlage, vorgestellt. Darüber hinaus wurde ein Verfahren beschrieben, welches einen Vergleich der Messdaten unterschiedlicher Systeme ermöglicht und dazu dient die Messsysteme bezüglich Ihrer Eignung als Oberflächenerfassungssystem zu bewerten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die PMD-Technologie gelegt, da diese Vorteile gegenüber bereits verwendeter Technologien liefert und einen neuen Ansatz in der Oberflächenerfassung darstellt.

## Literatur

- [Kra04] Kraus, K.: Photogrammetrie, Band I-III. Berlin: Walter de Gruyter Verlag, 2004.
- [Lan00] Lange, R.: 3D time-of-flight distance measurement with custom lid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Siegen: Schrift zur Erlangung der Doktorwürde, Universität Siegen, 2000.
- [Zha03] Zhang, Z.: Untersuchung und Charakterisierung von PMD (Photomischdetektor)-Strukturen und ihren Grundschaltungen. Siegen: Schrift zur Erlangung der Doktorwürde, Universität Siegen, 2003.
- [OKJ07] Overmeyer, L.; Kesting, M.; Jansen, K.: SIMT Technology. Bulk Solid Handling, 2007.
- [RSU07] Rieger, P.; Studnicke, N.; Ullrich, A.: Mobile Laser Scanning Anwendungen, Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 340-350, 2007.
- [Wig07] Wiggenhagen, M.: Erste Erfahrungen mit dem 3D-Sensor PMD[Vision] 19K, Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 131-136, 2007.