

## Ermittlung der Randbedingungen für ein Dichtemessverfahren mit Lasertechnik

FA 5.151

Forschungsstelle: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (Prof. Dr.-Ing. W. Kudla)

Bearbeiter: Gaßner, W./Szczyrba, S./Uhlig, M.  
Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: September 2011

### 1 Aufgabenstellung

Im Erd- und Straßenbau ist die ausreichende Verdichtung der Schüttmaterialien das zentrale Qualitätsmerkmal. Die ZTV E-StB 09 enthält dafür Vorgaben für den zu erreichenden Verdichtungsgrad  $DP_r$ , der als Quotient aus der im Feld bestimmten Trockendichte  $pd$  und der Proctordichte  $pP_r$  definiert ist, die im Labor ermittelt wird.

Für die Bestimmung der Dichte sind mit DIN 18125-2 die folgenden Feldversuche eingeführt:

- Ausstechzylinderverfahren (A),
- Sandersatz-Verfahren (S),
- Ballon-Verfahren (B),
- Flüssigkeitseratz-Verfahren (F),
- Gipsersatz-Verfahren (G),
- Schürftgruben-Verfahren (Sch).

Die Verfahren können jedoch nicht bei allen Bodenarten eingesetzt werden und besitzen zudem eine relativ hohe Messunsicherheit, sodass die Standardabweichungen bezogen auf den Verdichtungsgrad in Abhängigkeit von der Bodenart und vom Messverfahren zwischen 0,9 und 2,0 %  $DP_r$  schwanken.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie FA 5.137 wurde daher ein neues Dichtemessverfahren mit Lasertechnik entwickelt, bei dem die Volumenbestimmung mittels Laserstrahlabtastung der Prüfgrubenwandung und anschließender Volumenberechnung erfolgt. In Zusammenarbeit mit der Fa. Schniering Ingenieurgesellschaft mbH wurde ein erster Prototyp des Gruben-Volumen-Scanners GVS angefertigt und die Tauglichkeit des Verfahrens durch Vergleichsmessung an unterschiedlichen Prüfgruben nachgewiesen.

In dieser ersten Entwicklungsstufe war das Gerät noch netzgebunden und daher für einen Feldeinsatz nur bedingt geeignet. Auch die Scanzeit war mit ca. 20 min noch deutlich zu lang. Um die Entwicklung des Dichtemessverfahrens mit Lasertechnik fortzuführen und die Randbedingungen des Verfahrens zu ermitteln, wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens ein Prototyp II des Grubenvolumenscanners entwickelt (Bild 1), der durch folgende Verbesserungen im Vergleich zum Prototyp I gekennzeichnet war:

- Verkleinerung des Scankopfes,
- Abtastung der Prüfgrubenwandung mit kontinuierlicher Rotation,
- Verkleinerung der Steuereinheit,
- netzunabhängige Stromversorgung,
- Staubschutz,
- Erhöhung der Scangeschwindigkeit und damit
- Verringerung der Scandauer auf ca. 5 Minuten,
- Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zum Erkennung und Erfassen von Schattenstellen.

Die gerätetechnische Weiterentwicklung erfolgte bei der Fa. Schniering Ingenieurgesellschaft, Essen im Auftrag und nach den Vorgaben der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Für die Ermittlung der Randbedingungen des Messverfahrens wurden mit dem Prototypen II Untersuchungen von der TU Bergakademie Freiberg bei unterschiedlichem Lichteinfall, bei unterschiedlichen Temperaturen und unter Staubeinwirkung durchgeführt. Zusätzlich erfolgten Messreihen in bisher noch nicht getesteten Böden mit sehr grobkörnigem, scharfkantigem Material, das nach ZTV SoB-StB in Schottertragschichten eingesetzt wird. Beim Aushub entstehen bei diesen Böden i. d. R. Prüfgruben mit sehr rauen, ungleichmäßigen Wandungen mit hervorstechendem Grobkorn. Bei grobkörnigen und scharfkantigen Böden handelt es sich um die prüftechnisch schwierigsten Bodenarten, die mit den Feldversuchen nach DIN 18125-2 nur eingeschränkt und mit erhöhtem Aufwand geprüft werden können.

Wie auch in der Machbarkeitsstudie FA 5.137 wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Vergleichsmessungen zwischen den verschiedenen Messverfahren teilweise an künstlich hergestellten Prüfgruben ausgeführt. Dadurch war es möglich, das Volumen bei hoher Versuchsanzahl mit allen aufgeführten Verfahren zu ermitteln, um einen Vergleich der Standardabweichungen zu ermöglichen.

### 2 Funktionsweise und Gerätebeschreibung

Auch beim Dichtemessverfahren mit Lasertechnik erfolgt die Dichtebestimmung über eine getrennte Ermittlung der Masse und des Volumens. Für die Volumenermittlung wird die gesamte Oberfläche der Prüfgrube vor und nach dem Aushub mit einem Laserstrahl abgetastet. Der Scankopf des Prototypen II besteht aus einem Laserdistanzsensor, der während des Scans gleichmäßig um eine Vertikalachse rotiert. Über einen weiteren Antrieb kann der Laserkopf auch um eine horizontale Achse geschwenkt werden, sodass die gesamte Oberfläche in einem sehr engen Raster mit bis zu 200 000 Messpunkten erfasst wird. Während des Scanvorgangs wird fortlaufend die exakte Position des Scankopfes über zwei Winkelsensoren für den Vertikalwinkel und den Horizontalwinkel ermittelt. Jeder Oberflächenpunkt ist damit über die Messwerte Abstand, Vertikalwinkel und Horizontalwinkel eindeutig in Polarkoordinaten bestimmt.

Die Steuerung und Verarbeitung der Messdaten erfolgt über eine Steuereinheit, die zusammen mit den NiMh-Zellen für die Energieversorgung in einem stoßfesten und wasserdichten Koffer angeordnet ist (Bild 1, links). Für die Volumenberechnung und die Visualisierung der Prüfgruben wurde eine Software entwickelt, die auf einem handelsüblichen Net- oder Notebook eingesetzt



Bild 1: Grubenvolumenscanner GVS, Prototyp II

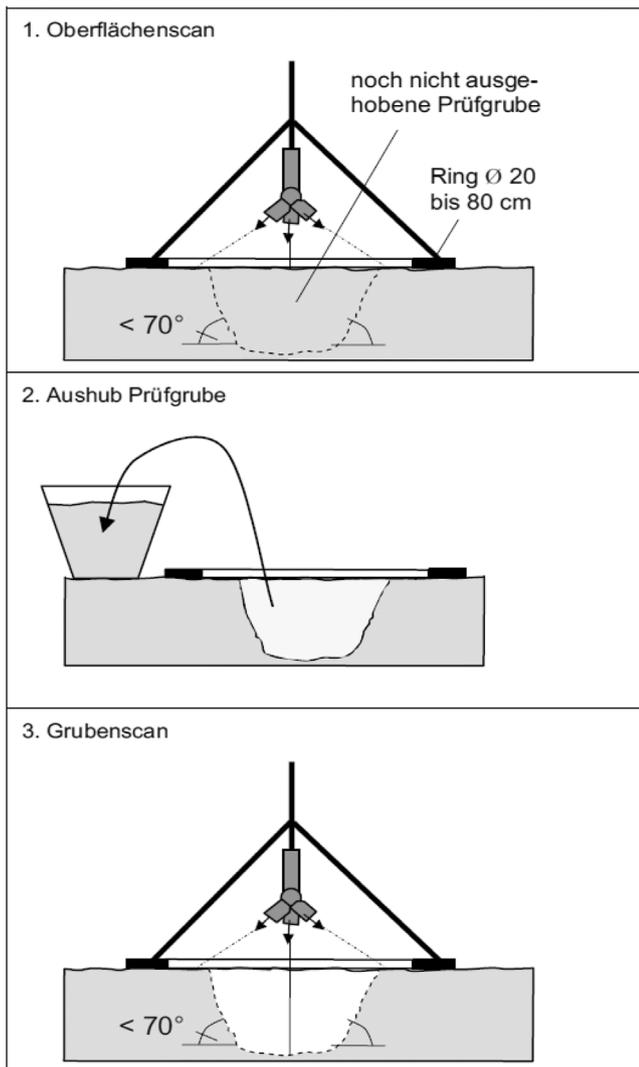


Bild 2: Versuchsablauf beim Dichtemessverfahren mit Lasertechnik

werden kann. Jeder Scan wird dabei in einer Datenbank abgelegt. Der gesamte Versuchsablauf ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Begonnen wird mit einem Oberflächenscan (0-Scan) im Bereich der späteren Prüfgube, die mit einem Ring eingegrenzt werden kann. Nach dem Aushub der Prüfgube, die nicht mit senkrechten sondern mit leicht geneigten Wänden hergestellt werden sollte, folgt der abschließende Grubenscan. Das Volumen der Prüfgube wird durch die Volumendifferenz zwischen Grubenscan und 0-Scan ermittelt.

Aus der Prüfgubenwandung hervorstehende Steine können einen kleinen Bereich der Wandung verdecken. Diese Bereiche werden als Schattenbereiche bezeichnet, da der Laserstrahl die Prüfgubenwandung dort nicht erreichen kann, sondern auf das vorstehende Objekt trifft. Auch bei der Volumenbestimmung können diese Bereiche daher nicht berücksichtigt werden, sodass ein geringfügig zu kleines Volumen ermittelt wird.

Für den Prototypen II wurde ein Algorithmus zum Erkennen solcher Schattenbereiche entwickelt, mit dem gleichzeitig das Volumen des jeweiligen Schattenbereichs abgeschätzt wird. Übersteigt der geschätzte Schattenanteil einen vorgegebenen Anteil im Vergleich zum Gesamtvolumen, so ist die Prüfgubenwandung zu verbessern, in dem z.B. vorstehende Steine vorsichtig gelöst werden. Danach muss ein erneuter Scan ausgeführt werden.

### 3 Durchgeführtes Messprogramm

Mit mehreren Messreihen wurde der Einfluss der folgenden Umgebungsfaktoren auf das Messergebnis untersucht:

- Lichteinfall,
- Feuchtigkeit auf Oberflächen,
- Staubeinwirkung,
- Temperaturunterschiede.

Weiterhin wurden Vergleichsmessungen mit den Standardverfahren an unterschiedlichen künstlich hergestellten Prüfformen und an Prüfguben ausgeführt, die in Material für Schotter- und Kiestragschichten ausgehoben wurden und somit dem Praxis-einsatz entsprechen.

#### Untersuchungen zum Lichteinfall

Bei den Untersuchungen zum Lichteinfall wurden Messungen auf einer Interferometermessbahn durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Streuung der Messwerte bei annähernd senkrechtem Auftreffen des Laserstrahls deutlich kleiner war, als bei flachen Einfallswinkeln von  $30^\circ$  (Zunahme der Standardabweichungen von 0,12 mm auf 0,23 mm).

Bei diesen Messungen traten auch systematische Fehler auf. Die mit dem GVS gemessenen Abstandsänderungen waren mit zunehmender Messdistanz kleiner als beim Referenzmessverfahren. Mit dem Laser des GVS wurden also tendenziell zu kurze Abstandsänderungen gemessen. Bei Abstandsänderungen von 20 cm lag die systematische Messabweichung zwischen ca. 0,2 und 0,4 mm. Es könnten daher für jeden Sensor eigene Kalibrierkurven erstellt und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Eine zusätzliche Beleuchtung mit Tageslichtprojektoren, die von der Lichtstärke etwa einem bedeckten Sommertag entsprach, zeigte keinen Einfluss auf das Messergebnis. Allerdings zeigte sich bei den späteren Vergleichsmessungen im Freien, dass Messungen unter direkter Sonneneinstrahlung nicht möglich waren und bereits unter Schirmabschattung der Anteil von ungültigen Messpunkten und die Streuungen der ermittelten Volumina erheblich zunahm. Der Prototyp II hatte keinerlei Blende am Sensor. Bei weiteren Geräten sind daher Blenden vorzusehen. Alternativ könnte auch die ganze Prüfgube mit Schirmen direkt über dem Trägerrahmen abgeschattet werden.

#### Einfluss von feuchten Oberflächen

Eine Befeuchtung der Zielfläche bei der Interferometermessbahn hatte keinen Einfluss auf die gemessenen Abstandsänderungen. Vergleichsmessungen mit trockenen und angefeuchteten Prüfguben zeigten keine Mittelwertabweichungen bei der Volumenbestimmung, jedoch eine Zunahme bei den Streuungen der einzelnen Messvolumen.

Der Einfluss von feuchten Oberflächen ist gering. Messungen an Prüfguben mit nassen Oberflächen sind zu vermeiden.

#### Staubeinwirkungen

Messungen können auch bei sehr hohen Staubeinwirkungen problemlos ausgeführt werden. Staubablagerungen auf dem Schutzglas beeinflussen die Brechungseigenschaften und damit auch die Ergebnisse der Abstandsmessungen. Das Schutzglas des Sensors ist daher vor jeder Messung mit einem Pinsel zu säubern.

#### Temperaturunterschiede

Die durchgeführten Messreihen ergaben keinen eindeutigen Einfluss von Temperaturunterschieden auf das Messergebnis. Allerdings wurde die Auswertung durch wiederholte Funktionsstörungen des Prototypen II erschwert. In Abhängigkeit von der Konstruktion kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass ein Temperatureinfluss bei einer ungleichmäßigen Ausdehnung der tragenden Bauteile des Scankopfes besteht. Es ist daher mit jedem Gerät eine entsprechende Messreihe durchzuführen, um diesen Einfluss zu untersuchen und ggf. Korrekturen vorzunehmen.

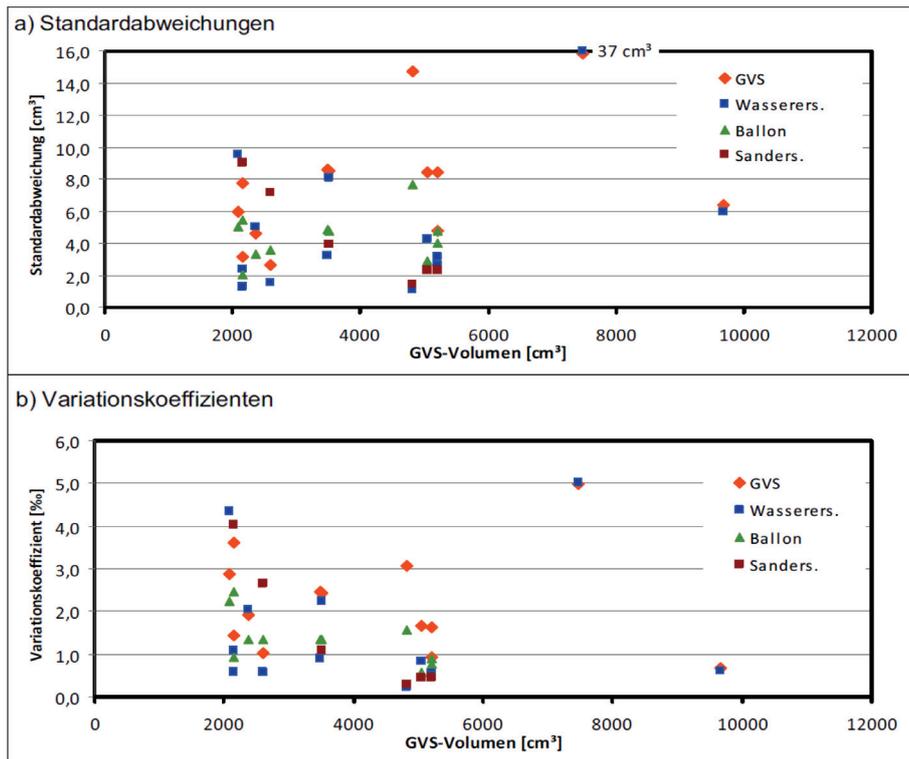


Bild 3: Steuerung der Messergebnisse in Abhängigkeit vom Volumen der Prüfform

**Wiederholgenauigkeit zufällige Messabweichung**

Bei den Vergleichsmessungen lagen die Standardabweichungen bei den Messungen mit dem GVS zwischen 3 cm³ und 8,5 cm³ (Bild 3, oben). Nur bei den Messungen im Freien, im Schotter und bei einer Messreihe an der Prüfform 8 traten höhere Standardabweichungen auf. Die Variationskoeffizienten nahmen mit zunehmendem Volumen außer bei den vorgenannten Messreihen von 3,6 % auf 0,7 % ab. Durch eine sehr sorgsame Ausführung der Vergleichsverfahren waren die zufälligen Messabweichungen bei den Vergleichsverfahren sogar noch etwas geringer (Bild 3).

In DIN 18125-2 werden die Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen für die Feldmessverfahren mit 0,15 bis 0,20 g/cm³ angegeben. Die Dichte wird als Quotient aus Masse und Volumen mit zwei unabhängigen fehlerbehafteten Eingangsgrößen berechnet.

Nach DIN 18125-2 ist die Masse mit einer Genauigkeit von  $0,001 \cdot m_d$  zu bestimmen (Variationskoeffizient bei der Massebestimmung 1,0 ‰). Unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung nach Gauss beträgt die rechnerische Standardabweichung für die Dichtebestimmung mit dem Prototypen II damit ca. 0,008 g/cm³ bei einer Dichte des Bodens von ca. 2,0 g/cm³. Dieser Wert liegt deutlich unter den Standardabweichungen, die in DIN 18125-2 für die Feldmessverfahren angegeben werden. Bei Prüfgruben mit größerem Durchmesser nimmt dieser Wert noch weiter ab. Voraussetzung ist allerdings die Reduktion der systematischen Messabweichung beim GVS.

**Systematische Messabweichung**

Bei den Vergleichsmessungen traten signifikante Unterschiede zwischen den Volumenmittelwerten des Prototypen II und der Vergleichsverfahren auf. Bei kleinen und mittleren Volumen wurden mit dem GVS um bis zu 100 cm³ kleinere Volumen ermittelt. Bei großen Volumen von über 7000 cm³ waren die mit dem GVS bestimmten Volumen größer, als die mit den Referenzverfahren ermittelten Volumina (Bild 4, oben).

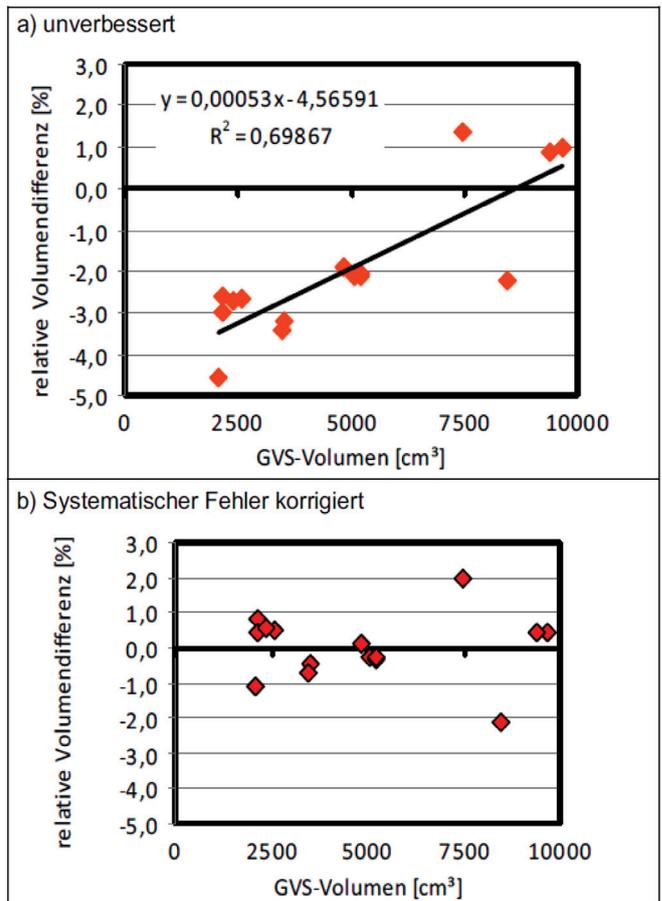


Bild 4: Systematische Messabweichung zwischen GVS und Wasserersatzverfahren

Bei der relativen Volumendifferenz zeigte sich ein linearer Zusammenhang, mit dem die berechneten Volumen des Prototypen II um den systematischen Fehler korrigiert werden konnten (Bild 4, unten). Nach der Korrektur lagen die relativen Volumendifferenzen im Vergleich zum Wasserersatzverfahren im Bereich von  $\pm 1,0\%$  (außer bei den Messungen im Schotter).

Bezogen auf die Dichtebestimmungen lagen die Unterschiede zwischen Wasserersatz- und Scanverfahren mit den korrigierten Volumenwerten bei  $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  und damit in der Größenordnung der Abweichungen der Feldmessverfahren nach DIN 18125-2 untereinander.

Die systematische Messabweichung ist für jedes Gerät des GVS an Prüfgruben mit unterschiedlichem Volumen zu untersuchen. Wenn dabei, wie beim Prototypen I und II, systematische Messabweichungen festgestellt werden, sind Korrekturfunktionen aufzustellen, die bei der Volumenberechnung anzusetzen sind.

### 4 Folgerungen für die Praxis

#### Empfehlungen

- 1) Mit dem Prototypen II konnte die Scangeschwindigkeit deutlich erhöht werden, sodass ein Scan nach ca. 5 Minuten abgeschlossen wird.
- 2) Das Gerät wurde deutlich verkleinert. Da zudem die Energieversorgung netzunabhängig erfolgt, kann der Prototyp II auch für Feldmessungen eingesetzt werden.
- 3) Die Beschleunigung des Scanvorgangs und die Verkleinerung der Systemkomponenten haben zu einer deutlich erhöhten Störanfälligkeit geführt, die die Messungen stark behinderte. Im Zuge der weiteren Entwicklung sind hier erhebliche Verbesserungen notwendig.
- 4) Gegenüber dem Prototypen I war eine geringe Erhöhung der Streuungen der Messwerte zu beobachten (mittlere Standardabweichung  $7 \text{ cm}^3$ ). Somit lag die zufällige Messabweichung höher als bei den durchgeführten Feldmessverfahren nach DIN 18125-2.
- 5) Bei den Messungen im Schotter zeigten sowohl die Vergleichsmessverfahren als auch der GVS erhöhte Streuungen der Messwerte.
- 6) Bei Messungen im Freien stieg der Anteil von ungültigen Messpunkten bereits im Schatten deutlich an, sodass die Streuung der Ergebnisse stark anstieg. Unter direkter Sonneneinstrahlung wurden die Messungen so stark gestört, dass keine sinnvolle Volumenermittlung möglich war. Weitere Geräte sind daher mit Blenden am Sensor auszurüsten. Alternativ sind die Prüfgruben mit Schirmen vollständig abzuschatten.
- 7) Wie auch beim Prototypen I traten beim Prototypen II systematische Messabweichungen auf, für die eine Korrekturfunktion abgeleitet wurde. Die korrigierten Volumina zeigten Abweichungen zum Wasserersatzverfahren von  $\pm 1,0\%$  und lagen somit in der Größenordnung, die die Ergebnisse der Feldmessverfahren nach DIN 18125-2 auch untereinander zeigten. Für jedes Gerät ist daher die systematische Messabweichung in Abhängigkeit vom Volumen zu untersuchen und ggf. zu korrigieren.
- 8) Um die Qualität einer Prüfgrube zu überprüfen, wurde ein Algorithmus in die Auswertung aufgenommen, mit dem das Volumen der Bereiche abgeschätzt werden kann, die vom Laser aufgrund vorspringender Objekte nicht erfasst werden können (Schattenbereiche). Der Algorithmus ist prinzipiell geeignet, Schattenbereiche zu erkennen und deren Größe abzuschätzen. Die Umsetzung beim Prototypen II lieferte bei ungültigen Messpunkten zu hohe Schattenvolumen und ist daher weiter zu verbessern.
- 9) Bei einem senkrechten Auftreffen des Laserstrahls auf die Oberflächen waren die Streuungen geringer als bei sehr flachem Auftreffen. Aufgrund der hohen Punkteanzahlen mit bis zu 200 000 Messpunkten ist der Einfluss des Neigungswinkels auf das Messergebnis jedoch gering.
- 10) Bei feuchten Oberflächen können Messungen problemlos ausgeführt werden. Messungen bei Regen und nassen Prüfgruben sind zu vermeiden.
- 11) Auch unter sehr starken Staubeinwirkungen konnten Messungen problemlos ausgeführt werden. Staubablagerungen auf dem Sensor sind jedoch vor jeder Messung zu entfernen, da die Abstandsmessung ansonsten beeinflusst wird.
- 12) Eine Temperaturabhängigkeit im Bereich zwischen  $5^\circ\text{C}$  und  $25^\circ\text{C}$  konnte beim Prototypen II nicht festgestellt werden. Sie ist jedoch für jede Geräteentwicklung neu zu untersuchen, da in Abhängigkeit von der Konstruktion ungleichmäßige Temperaturverformungen nicht ausgeschlossen werden können.
- 13) Mit den untersuchten Prototypen I und II konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, ein Feldmessverfahren auf der Grundlage der Lasertechnik zu entwickeln, mit dem eine höhere Wiederholgenauigkeit erreicht werden kann, als bei den eingeführten Feldmessungen nach DIN 18125-2.
- 14) Als nächster Entwicklungsschritt wird derzeit ein Prototyp III hergestellt, mit dem große Prüfgruben mit einem Durchmesser bis zu  $1,0 \text{ m}$  erfasst werden können. Durch eine bessere Lagerung der Achsen und eine verbesserte Antriebstechnik soll die Wiederholgenauigkeit weiter erhöht und der systematische Fehler reduziert werden. Die angestrebte Erhöhung des Messbereiches lässt sich jedoch nicht ohne einen Anstieg der Gesamtmasse des Systems erreichen.