

Klaus Chmelina  
Peter Staubmann

# Geodätische Aspekte beim Einsatz von Motorlasersystemen im Tunnelbau

**Der Einsatz motorisierter elektronischer Tachymeter mit automatischer Zielerkennung erlaubt die Steigerung der Effizienz und Produktivität der geodätischen Arbeiten im Bereich des konventionellen Tunnelbaus. Die Systeme lassen sich sowohl zur Steuerung des Tunnelvortriebs, zur Profilkontrollmessung als auch zur Deformationsbeobachtung für geotechnische Interpretationen einsetzen.**

## 1 Einleitung

Zu den klassischen Aufgaben der Ingenieurgeodäsie im Bereich des Tunnelbaus zählen die Steuerung des Tunnelvortriebs, die Ausführung von Profilkontrollmessungen zur geometrischen Überprüfung des hergestellten Regelprofils und die laufende Durchführung von Verschiebungsmessungen für die geotechnische Interpretation des Verformungsgeschehens.

Durch den Einsatz automatischer Meßsysteme haben sich vor allem für den Bereich des konventionellen Tunnelbaus in den letzten Jahren neue Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz und Produktivität der geodätischen Arbeiten eröffnet. Eine hervorzuhebende Entwicklung stellen hier sog. Motorlasersysteme dar. Unter Verwendung dieser Systeme gelingt es heute, die eingangs angeführten Aufgaben im Vortriebsbereich teilweise vollautomatisch und unter weitgehender Vermeidung von Störungen des Bauge-schehens auszuführen. Ein erfolgreicher Einsatz in der Praxis ist jedoch nicht voraussetzungsfrei, sondern erfordert die Beachtung der äußeren Einflüsse des spezifischen Anwendungsumfelds. Im folgenden werden der Aufbau, die technischen

Merkmale und die Meßaufgaben eines Motorlasersystems beschrieben, wesentliche Ursachen für Meßungenauigkeiten aufgezeigt, ihre mögliche Größenordnung anhand durchgeführter Testmessungen abgeschätzt und die Vorteile solcher Systeme im Vergleich mit bisher angewandten Verfahren verdeutlicht.

## 2 Systemaufbau und -bedienung

Die Hardware des hier beschriebenen Motorlasersystems neuerer Generation (Abb. 1) besteht aus einem motorisierten, elektronischen Tachymeter mit automatischer Zielerkennungs- und -verfolgungsfunktion (z. B. Leica TCA 1800) und einem okularseitig ansteckbaren Diodenlaser (z. B. Leica DL3). Das Instrument wird üblicherweise im Tunnel auf einer Konsole aufgestellt und via Stromversorgungs- und Datenübertragungsleitung mit einem nur wenige Meter entfernten, in einem Schutzgehäuse untergebrachten Steuerrechner verbunden. Alle Meßabläufe werden von einem Steuerprogramm mit einfach zu bedienender, menügesteuerter Benutzerführung überwacht. Alle Eingaben zur Konfiguration werden be-

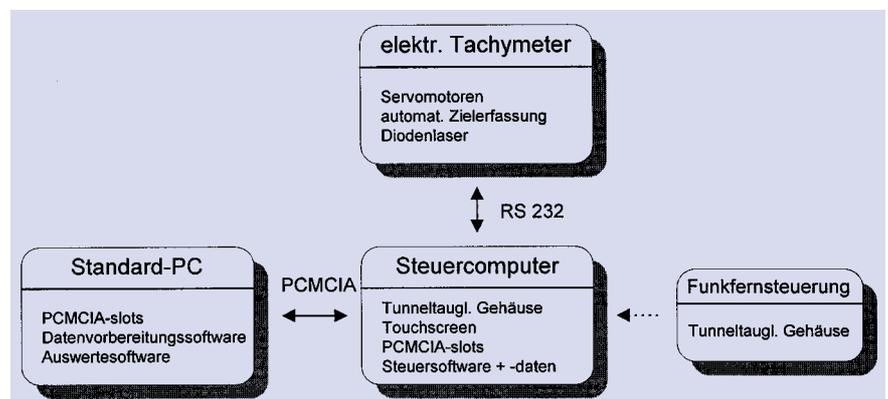


Abb. 1: Systemkomponenten eines Motorlasers

quem über das Touchscreen des Rechners vorgenommen. Diverse Meßfunktionen können optional über eine transportable Funkfernsteuereinheit ausgelöst werden. Die Vorbereitung der Steuerdaten erfolgt extern, z. B. im Rechner des Bürocontainers. Mittels PCMCIA-Karte werden diese Daten in den Tunnelrechner übertragen; in umgekehrter Weise können Meßdaten für nachfolgende Auswertungen abgeholt werden. Die unmittelbare Auswertung und Anzeige von Meßergebnissen am Bildschirm des Tunnelrechners ermöglicht die sofortige Verwendung dieser Daten für den laufenden Baubetrieb.

### 3 Technische Daten

#### Tachymeter TCA 1800

Standardabweichung für die Distanzmessung:

S:  $\sigma = \pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$

Standardabweichung für die Winkelmessung:

Hz:  $\sigma = \pm 0,3 \text{ mgon}$

V:  $\sigma = \pm 0,3 \text{ mgon}$

Positioniergenauigkeit:

**0,5 mgon**

Lagegenauigkeit der automatischen Zielerkennung bis 500 m:

**< 2 mm** unter Normalbedingungen auf Leica-Rundprismen

#### Diodenlaserokular DL3

Leistung:

**< 5 mW** (Laserklasse 3b)

Wellenlänge:

**620–690 nm**

Reichweite:

**ca. 200 m** unter Tunnelbedingungen

### 4 Meßaufgaben

#### 4.1 Die Vortriebssteuerung

Vom Diodenlaser des Tachymeters werden entlang seiner Fernrohrzielinie eine Reihe vordefinierter profilbezogener Punkte einem Meßzyklus folgend nacheinander an die Ortsbrust des Tunnels projiziert. Diese Laserpunkte dienen den Baumannschaften z. B. als Bezugspunkte für das Stellen der Ausbaubögen. Hierfür werden die

Punkte an der Bezugstationierung des zu stellenden Bogens aufgefangen, dieser manuell zwischen den Laserpunkten eingepaßt und anschließend fixiert. Üblicherweise reichen für den Stellvorgang drei Punkte (beide Kalottenfüße, Firste), deren geometrische Lage im Regelprofil aus Sichtbarkeitsgründen etwas innerhalb des Bogenprofils definiert wird. Die konstanten horizontalen und vertikalen Sollabstände der Punkte zur Bogeninnenkante werden mittels Maßband oder Zollstab hergestellt. Auf ähnliche Weise kann z. B. im Falle eines Baggervortriebs die Ausbruchlinie für den nächsten Abschlag oder bei Sprengvortrieb die Position von Bohranzsetzpunkten direkt an der Ortsbrust visualisiert werden.

Vor Beginn dieses Meßzyklus werden vom System automatisch Stehachsschiefe und Kompensatorindexfehler bestimmt sowie Richtungs- und Distanzmessungen zu in der Regel vier bis sechs meist festvermarkten, koordinativ bekannten Prismen durchgeführt und nach dem Verfahren der Freien Stationierung die Standpunktdaten berechnet. Die vorliegende Redundanz erlaubt die Überprüfung der Qualität der Standpunktbestimmung. Werden nach dem Ausgleich entsprechende Grenzwerte der Qualitätsparameter (Standardabweichung der Koordinaten und der Orientierung, Redundanz, . . .) über- oder unterschritten, verhindert das System einen Start des o. a. Meßzyklus. Bei der Vortriebssteuerung wird somit der Tachymeter nach erfolgter Standpunktbestimmung nur mehr als Laserpointer verwendet. Um die anzuzeigenden Profildaten auf den aktuellen Vortriebsstand zu beziehen, muß die Bezugstationierung der Ortsbrust oder des jeweiligen Ausbaubogens einmal vom Tachymeter gemessen oder manuell eingegeben werden. Die Vorteile des Motorlasers gegenüber den sonst in Verwendung stehenden Richtlasern liegen im automatischen Erkennen von Lageveränderungen des Instruments (z. B. zufolge Anstoßens oder Gebirgsverformungen), im Wegfallen der bei Richtlasern nötigen Abstich-

listen (speziell bei gekrümmtem Achsverlauf), in der geometrisch bedingten größeren Reichweite in Kurven und der rascheren Herstellung der Meßbereitschaft (Ein Motorlaser ersetzt bis zu drei Richtlaser).

#### 4.2 Die Profilkontrolle

Das Motorlasersystem unterstützt die Profilkontrollmessungen unter Ausnutzung der automatischen Zielverfolgungsfunktion des Tachymeters. Für festzulegende Werte der Tunnelstationierung werden die Sollkoordinaten z. B. von Profildaten der Spritzbetonschale, der Bogeninnenkante oder der Ausbruchlinie vorbereitet und auf PCMCIA-Speicherkarte bereitgestellt. Nach erfolgter Anschlußmessung (Kap. 4.1) positioniert der Tachymeter seine Fernrohrzielinie in Richtung des ersten zu messenden Profildatenpunktes. Eine manuell an die Tunnelwand in der Gegend des sichtbaren Lasers gehaltene Profilmessscheibe, in deren Zentrum ein Reflektor angebracht ist, wird von der Zielerkennungsfunktion erkannt, die Ziellinie exakt auf das tatsächliche Prismenzentrum nachgeführt und die Messung mittels Funkfernsteuerung ausgelöst. Anschließend wird der nächste Profildatenpunkt angefahren. Unmittelbar nach Abschluß aller Messungen erfolgen die automatische Berechnung der Koordinaten unter Berücksichtigung des radialen Abstands des Reflektors vom Rand der Profilmessscheibe und eine grafische Darstellung der Ergebnisse in Form von Profildaten an der Anzeigeeinheit. Als vorteilhaft erweist sich, daß die Profilkontrollmessungen aufgrund der Einfachheit der Systembedienung von den Baumannschaften selbständig und zu jeder Zeit ausgeführt werden können. Dies ermöglicht z. B. eine abschließende Kontrolle der Position eines Ausbaubogens unmittelbar nach dem Stellen, aber noch vor dem endgültigen Fixieren. Die Anwesenheit des Vermessungsexperten im Tunnel ist für diese Tätigkeit somit nicht mehr erforderlich.

### 4.3 Die absolute 3d-Verschiebungsmessung

Vollautomatisch können vom System die üblicherweise in regelmäßigen Abständen in Form festvermarkter Prismen im Tunnel angeordneten Meßquerschnittspunkte beobachtet werden. Die auszuführenden Messungen dienen der laufenden Überwachung des Verformungsgeschehens und sind im unmittelbaren Vortriebsbereich besonders bedeutend. Der Meßzyklus kann hier wahlweise manuell oder entsprechend einem definierbaren Zeitintervall vom System automatisch ausgelöst werden. Wie bei der Profilkontrolle erfolgt die grafische Aufbereitung der absoluten 3d-Verschiebungsergebnisse unmittelbar im Anschluß an die Messungen in Form verschiedenartiger geotechnischer Verschiebungsdiagramme. Für den Tunnelabschnitt zwischen Motorlaserposition und Ortsbrust bedeutet dies die Möglichkeit einer permanenten Überwachung aller dort befindlichen Meßquerschnitte ohne Störung des Baugeschehens. Die Arbeit des verantwortlichen Geodäten beschränkt sich auf die Bereitstellung der Steuerdaten und die Wartung des Systems.

## 5 Fehlerquellen und Störeinflüsse

### 5.1 Einleitung

Für die Anwendung in der Tunnelvermessung werden heute von derartigen Meßsystemen für die beschriebenen Aufgaben in etwa folgende Genauigkeiten verlangt:

- für die Vortriebssteuerung  $< \pm 1-2 \text{ cm}$
- für die Profilkontrolle  $< \pm 5-10 \text{ mm}$
- für die Verschiebungsmessungen  $\pm 1 \text{ mm}$

In Tab. 1 sind nun die für die Praxis wesentlichsten äußeren Fehlerquellen und Störeinflüsse, die davon beeinflussen Meßaufgaben des Motorlasers (Vo = Vortriebssteuerung, P = Profilkontrolle, V = Verschiebungsmessung) sowie die Art der daraus resultierenden Fehler der Meßer-

Tab. 1: Äußere Fehlerquellen und Störeinflüsse im Tunnel

Bezeichnung der Fehlerquelle	beeinflusste Meßaufgabe des Motorlasers	Art der Verfälschung der Meßergebnisse
Ungenauigk. d. Bezugsstationierung	Vo	s
Schiefstellung der Profilmessscheibe	P	s
Justierfehler des Laserokulars	Vo	s
mehrere Prismen im Gesichtsfeld	V, P	g oder 0
Nichterkannte Gebirgsverformung im Bereich der Referenzpunkte	VO, V, P	s oder 0
starkes Gegenlicht	V, P	0
Refraktion	Vo, V, P	s
starke Staubbelastung	Vo, V, P	0
starke Erschütterungen	Vo, V, P	g oder 0
verschmutzte Prismen	Vo, V, P	g oder 0
befeuchtete Prismen	Vo, V, P	g
Ausfall von Referenzpunkten für die Freie Stationierung	Vo, V, P	s oder 0
allg. Bedienfehler des Operateurs	Vo, V, P	g oder 0

gebnisse (g = grob, s = systematisch, 0 = Messung unmöglich) angeführt. Vielfach liegen die Fehlerbeträge innerhalb der vorgegebenen Toleranzen. In bestimmten Fällen nehmen sie jedoch unerwartet große Werte an. Hierzu werden nachfolgend die Fehler, hervorgerufen durch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Bezugsstationierung, durch Messung auf verschmutzte bzw. feuchte Prismen, zufolge des Vorhandenseins mehrerer Prismen im Gesichtsfeld des Fernrohres sowie starken Gegenlichts näher betrachtet. Abschließend werden die Ergebnisse einer unter Laborbedingungen erfolgten Dauerverschiebungsmessung einer unter tatsächlichen Vortriebsbedingungen durchgeführten Dauermessung gegenübergestellt und dabei das Problem des Ausfalls von Referenzpunkten diskutiert.

### 5.2 Auswirkung eines Fehlers der Bezugsstationierung auf die Vortriebssteuerung

Für die Vortriebssteuerung berechnet das Steuerprogramm Horizontal- und Vertikalrichtungen zu Bezugspunkten, die sich in einer Ebene normal zur Tunnelachse befinden. Die Tunnelachse schneidet die Ebene in der vom Operateur einzugebenen Bezugsstationierung (z. B. des Ausbaubogens). Falls größere Abweichungen der tatsächlichen Position des Ausbaubogens von seiner Bezugsstationierung unerkannt bleiben, wird der Laserpunkt also vor oder hinter dieser Ebene „aufgefangen“. Dies hat Abweichungen des an dieser Stelle sichtbaren Laserpunkts von seiner Sollposition im Regelprofil zur Folge.

Unter der vereinfachenden Annahme eines kreisförmigen Tunnel-

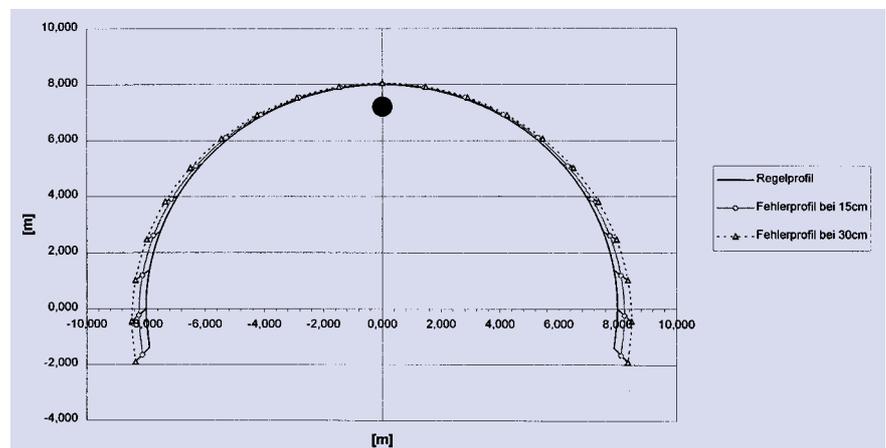


Abb. 2: Fehlerhafte Bezugspunktpositionen bei Stationierungsfehlern von + 15 bzw. + 30 cm

querschnitts ( $R = 8 \text{ m}$ ) und einer geradlinig verlaufenden Achse zeigt Abb. 2 zehnfach überhöht die fehlerhaft vom System angezeigten Bezugspunktpositionen (Fehlerprofile) bei Stationierungsfehlern von  $+15 \text{ cm}$  bzw.  $+30 \text{ cm}$ . Angenommen werden eine Motorlaseraufstellung in der Firste (schwarzer Punkt) und ein Abstand von  $50 \text{ m}$  bis zur Bezugstationierung.

Aufgrund dieser Meßanordnung liegen die Fehlerprofile symmetrisch zur Tunnelachse. Die betragsmäßig größten Fehler treten im Bereich der Kalottenfußpunkte auf. Im Bereich der Firste ergeben sich hingegen nur geringe Abweichungen vom Sollprofil. Die Abweichungen erreichen beim Kalottenfuß bei  $+30 \text{ cm}$  Stationierungsfehler in Vortriebsrichtung ein Maximum von immerhin  $7 \text{ cm}$  und liegen damit deutlich außerhalb der geforderten Toleranz. Bei engen Kurven können die auftretenden Fehler entsprechend noch größere Werte annehmen. Mit größer werdendem Abstand des Motorlasers zur Bezugstationierung sowie kleiner werdendem Radius des Regelprofils verringern sich die Abweichungen direkt proportional. Liegt die tatsächliche Stationierung eines Ausbaubogens vor der eingegebenen Bezugstationierung, so hat dies ein Unterprofil, umgekehrt ein Überprofil zur Folge.

Analog entstehen Fehler bei der Absteckung des Ausbruchsrandes oder von Bohransetzpunkten zufolge der Unebenheit der Ortsbrust. Die Eingabe einer möglichst exakten Bezugstationierung ist daher eine wichtige Voraussetzung für eine geometrisch korrekte Vortriebssteuerung innerhalb der ansonsten mit Motorlasersystemen erzielbaren hohen Genauigkeiten. Für die Wahl der Aufstellposition des Meßsystems im Regelprofil kann die Firste aufgrund der Symmetrie und Beträge der Fehler als theoretisch noch am günstigsten eingestuft werden; hinsichtlich Installationsaufwand, rascher Erreichbarkeit und Reichweite in Kurvenbereichen wird aus praktischen Gründen jedoch vielfach eine Montage seitlich im Ulm vorgezogen.

### 5.3 Auswirkung verschmutzter bzw. feuchter Prismen auf die Verschiebungsmessungen

Für die optischen 3d-Verschiebungsmessungen werden heute im untertägigen Bereich aus Kostengründen vielfach Folienprismen verwendet. Vom Motorlaser können alle vom Standpunkt aus sichtbaren, in der Regel in Meßquerschnitten angeordneten Prismen unter Ausnutzung der automatischen Zielerkennungsfunktion gemessen werden. Während bislang bei manueller Meßweise aufgrund des Aufwands und der Behinderung der Bauarbeiten üblicherweise nicht mehr als einmal täglich beobachtet wurde, kann mit Motorlasern auf ein beinahe kontinuierliches Monitoring übergegangen werden. In weiterer Folge können die erfaßten Verschiebungen permanent mit Grenzwerten verglichen werden, um so die Möglichkeit einer rechtzeitigen Alarmierung zu schaffen. Vor allem aufgrund der in Tunneln vorherrschenden ungünstigen Meßbedingungen kann es jedoch zu Fehlalarmen kommen. Häufige Ursache hierfür

stellen mit Staub oder Spritzbeton verschmutzte Folienprismen dar. Die automatische Zielerkennung basiert auf der Berechnung des Schwerpunktes des reflektierten, am CCD-Sensor anliegenden Signals, womit keinesfalls gewährleistet ist, daß auch tatsächlich das Prismenzentrum erfaßt wird. Bei herkömmlicher manueller Messung hingegen kann trotz erkennbarer Verschmutzung das Prismenzentrum zumeist noch korrekt eingestellt werden.

In einem praktischen Versuch wurden automatische Messungen zu einem in Abb. 3 ersichtlichen, künstlich mittels Klebefolie teilweise abgedeckten,  $40 \text{ m}$  entfernten Folienprisma durchgeführt.

Die in Abb. 4 dargestellten Ergebnisse zeigen, zugeordnet zum „Verschmutzungsgrad“ des Folienprismas, Quer- und Höhenabweichungen bezogen auf die Ziellinie des Tachymeters.

Wie ersichtlich kann die automatische Zielerkennung verschmutzter Folienprismen grob fehlerhafte Ergebnisse in der Richtungsbestim-

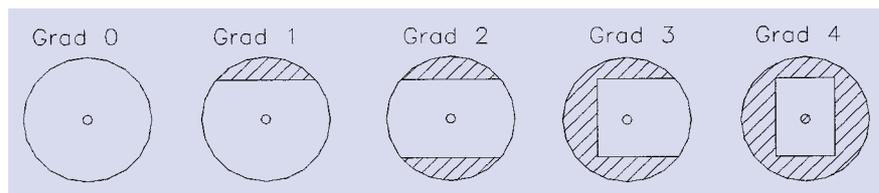


Abb. 3: Simulierte „Verschmutzung“ eines Folienprismas

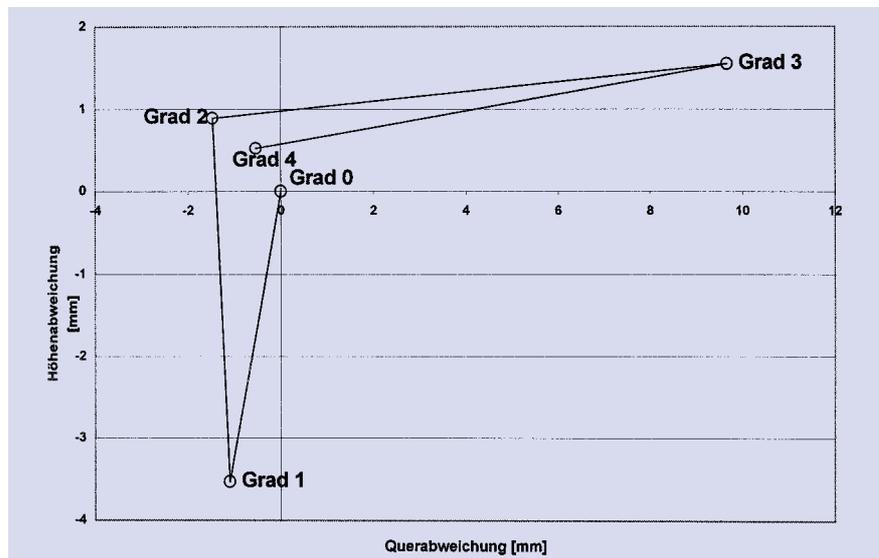


Abb. 4: Quer- und Höhenabweichungen aus Messungen zu einem abgedeckten Folienprisma

mung liefern. Die Auswertung der Längsabweichungen (Strecken) ergibt jedoch keinerlei signifikante Fehler. Die Ergebnisse zeigen somit deutlich, daß automatisch ausgeführte Verschiebungsmessungen zu Folienprismen mit Motorlasersystemen nur bedingt zuverlässig sind. Ähnliche Probleme treten auch bei der Messung zu feuchten Folienprismen auf. Im folgenden Versuch (Abb. 5) wurden zunächst zehn automatische Messungen zu einem 40 m entfernten, trockenen und anschließend zehn weitere Messungen zum selben, inzwischen mit Wasser befeuchteten Prisma ausgeführt. Es werden die in bezug auf die Visurrichtung aufgetretenen Quer-, Längs- und Höhenabweichungen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen erneut, daß vor allem signifikante Quer- und Höhenabweichungen, nicht jedoch Längsabweichungen zufolge der Befeuchtung auftreten. Längere Zeit unter dem Einfluß von Feuchtigkeit und Staub stehende Folienprismen unterliegen außerdem einem Prozeß fortschreitenden „Erblindens“, dessen Auswirkung dem Effekt einer Verschmutzung ähnlich ist.

Bei weiteren Versuchen konnte nachgewiesen werden, daß Messungen zu Mini- oder Standard-Rundprismen ebenfalls, jedoch in weitaus

geringerem Maß fehlerhaft beeinflußt werden. Zur Gewährleistung der verlangten hohen Genauigkeiten folgt jedenfalls die Forderung, den Aufwand einer regelmäßigen Reinigung der Prismen in Kauf zu nehmen.

#### 5.4 Der Einfluß mehrerer Prismen im Gesichtsfeld des Fernrohres

Aufgrund der heute im Tunnelbau durchaus üblichen Meßquerschnittsabstände von 10 bis 20 m kann es dazu kommen, daß bei einer Messung zwei oder mehrere Prismen gleichzeitig im Gesichtsfeld des Fernrohres sichtbar werden. Für diesen Fall wurde untersucht, unter welchen Bedingungen es zum Versagen der automatischen Zielerkennung, zu Prismenverwechslungen oder zu fehlerhaften Meßwerten kommen kann. In der ersten Versuchsanordnung bestand die Aufgabe in der Messung eines 15 m entfernten Miniprismas, wobei 30 m dahinter ein zweites schrittweise horizontal in die Visurrichtung TCA 1800 – erstes Prisma bewegt wurde. Bei diesem Versuch wurde die Fernrohrziellinie auf das zu erfassende näherliegende Prisma voreingestellt. Es wurde festgestellt, daß überraschenderweise alle Messungen unabhängig von der Position des zweiten Prismas problemlos durch-

geführt werden konnten. Auch die Genauigkeit litt nicht unter dem Einfluß des zweiten Prismas im Gesichtsfeld.

In einem zweiten Versuch sollte nun das unbewegte, weiter entfernte Miniprisma gemessen werden. Wurde dieses vom nahen Prisma verdeckt, wurde natürlich zum nahen Prisma gemessen. Erschienen die beiden Prismen durch das Fernrohr teilweise überdeckt bzw. knapp nebeneinander, so gab das System die Fehlermeldung („mehrere Prismen gefunden“) aus. Erschienen sie noch ein Stück weiter versetzt, so wurde wieder zum näherliegenden Prisma gemessen, obwohl die Ziellinie auf das entferntere voreingestellt war, und das Ziel somit eindeutig wechselt. Bei Überschreitung eines Grenzwinkels Prisma 1 – TCA 1800 – Prisma 2 von ca. 0,4 gon wird das Ziel wieder korrekt erkannt. Ähnliche Ergebnisse wurden bei Verwendung von Folienprismen erzielt. Allerdings ergaben die Versuche hier, daß die Lage des erfaßten Ziels in Querrichtung um bis zu 2 mm verfälscht werden kann.

Zur Vermeidung dieses Effekts in der Praxis bleibt es die Aufgabe des Vermessungsingenieurs, die Montagepositionen von Meßsystem und Prismen geeignet auszuwählen. Als hilfreich erweist sich eine höhenmäßig leicht versetzte Anordnung hintereinanderliegender Prismen.

#### 5.5 Der Einfluß starken Gegenlichts

In mehreren Meßversuchen zu Folien- und Miniprismen wurde untersucht, inwieweit starkes Gegenlicht auf die Messungen störend wirkt. Hierzu wurde als Lichtquelle ein baustellenüblicher Scheinwerfer mit einer Leistung von 500 Watt schrittweise hinter einem zu messenden Prisma quer zur Visurrichtung horizontal vorbeibewegt. Der Scheinwerfer lag wahlweise zwischen 1 und 5 m hinter dem Prisma, die Meßdistanzen lagen zwischen 10 und 45 m. Es wurde ermittelt, daß, erst wenn die Lichtquelle deutlich innerhalb des Gesichtsfeldes des Fernrohres liegt, die Zielerkennung versagt und

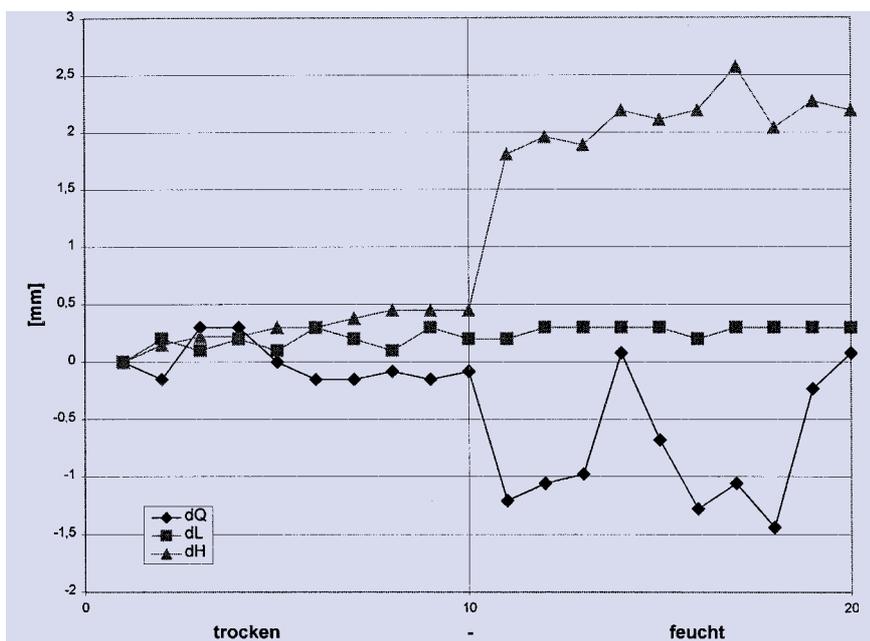


Abb. 5: Quer-, Längs- und Höhenabweichungen (dQ, dL, dH) aus je zehn Messungen zu trockenem und feuchtem Folienprisma

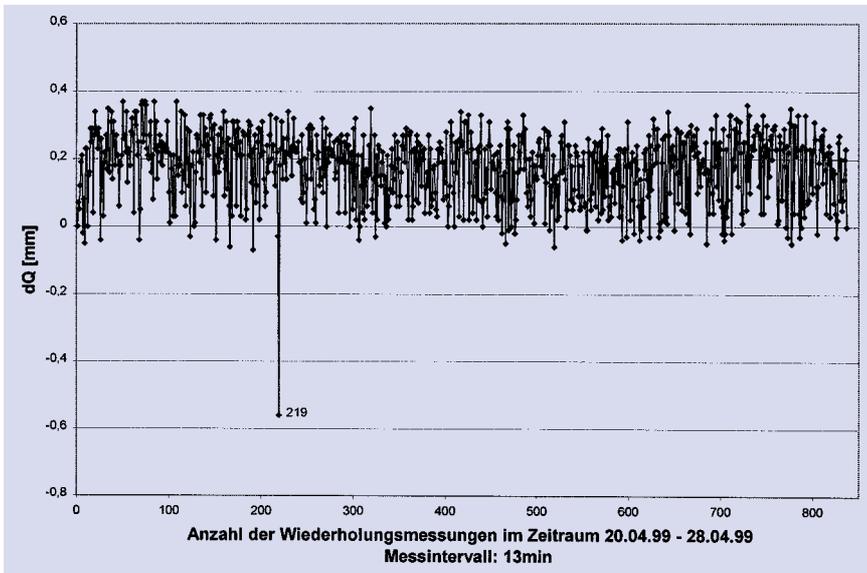


Abb. 6: Querverschiebungen  $dQ$  eines Meßpunktes während einwöchiger Dauer-messung im Labor

entsprechende Fehlermeldungen angezeigt werden. Weiters reagiert das System bei Verwendung von Folienprismen wesentlich empfindlicher auf Gegenlicht als bei Miniprismen. Ein Einfluß auf die Meßgenauigkeit wurde nicht nachgewiesen. Kann das Ziel vom System erfaßt werden, wird es auch fehlerfrei gemessen. In der Baupraxis ist vor allem im Vortriebsbereich stets mit Gegenlicht zu rechnen, es empfiehlt sich daher, die Scheinwerfer in genügend großem Abstand zu den Prismen zu montieren oder diese gegebenenfalls kurzfristig auszuschalten.

### 5.6 Das Problem des Ausfalls von Referenzpunkten, Langzeitstabilität

Zu Beginn jeder neuen Meßepoche werden für die Bestimmung der Standpunktsdaten des Motorlasers zunächst automatisch die Stehachsfehler längs und quer sowie die Kompensatorindexfehler bestimmt und danach Messungen zu in der Regel vier bis sechs koordinativ bekannten Referenzprismen vorgenommen (Kap. 4.1). Dies ergibt für das anschließende, ebenso selbsttätig ausgelöste Berechnungsverfahren der Freien Stationierung eine als durchaus ausreichend anzusehende Überbestimmung. Kommt es jedoch aufgrund von Sichthindernissen oder anderen Ursachen zum Ausfall

einzelner Referenzmessungen, reduziert sich die Gesamtredundanz und es ändert sich plötzlich die geometrische Konfiguration für den Ausgleich. In der Folge führt dies zu geringfügigen Änderungen in den Standpunktsdaten (Orientierung, Koordinaten) und davon beeinflusst werden auch die Koordinaten aller gemessenen Neupunkte dieser Epoche. Abb. 6 zeigt beispielhaft die Auswirkung dieses Effekts, erkennbar in der 219. Meßepeche einer einwöchigen Dauer-messung eines 30 m entfernten Miniprismas, bei der einer von vier Referenzpunkten nicht beobachtet werden konnte. Der Versuch wurde im Labor durchgeführt.

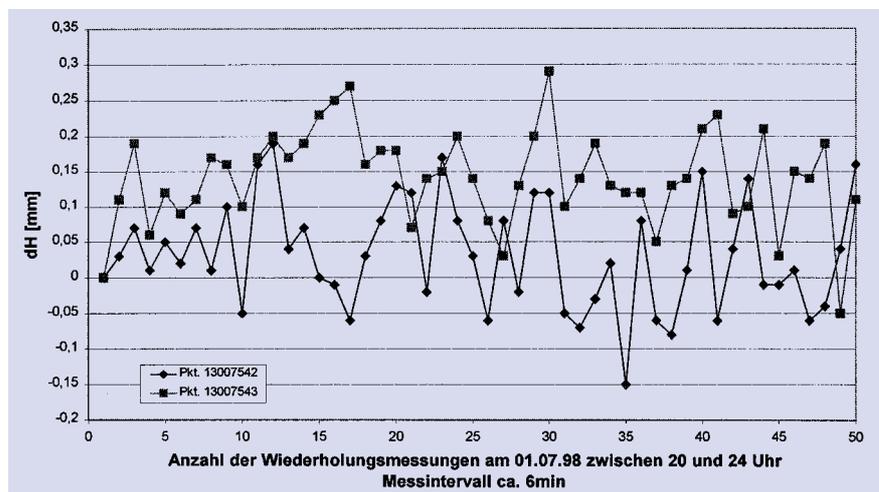


Abb. 7: Höhenverschiebungen  $dH$  zweier Meßpunkte während vierstündiger Dauer-messung im Tunnel

Bleibt die geometrische Konfiguration für die Freie Stationierung jedoch gleich, dokumentiert der Dauerversuch die hohe innere Meßgenauigkeit des Systems sowie seine Langzeitstabilität. Während des gesamten Meßzeitraums kam es zu keinerlei Ausfällen. Dies konnte ebenfalls bei Messungen unter Vortriebsbedingungen auf einer Wiener U-Bahn-Baustelle bestätigt werden. Abb. 7 zeigt dazu als Beispiel diesmal die Höhenverschiebungen zweier ca. 50 m vom Motorlaser entfernter Miniprismen. Bei der geotechnischen Beurteilung der Verschiebungsergebnisse ist somit die Qualität der Standpunktsbestimmung unbedingt mitzubersichtigen, um Fehlinterpretationen zufolge eines Ausfalls von Referenzpunkt-messungen zu vermeiden.

## 6 Zusammenfassung der Vorteile im Vergleich mit bisher angewandten Verfahren

Trotz der beschriebenen Fehlerquellen bieten Motorlasersysteme entscheidende Vorteile gegenüber den bisher im Tunnelbau in Verwendung stehenden Verfahren. Im Bereich der Vortriebssteuerung liegen im Vergleich zu den herkömmlichen Methoden mit Richtlasern diese Vorteile vor allem:

- im raschen Reagieren auf einen Profilwechsel beim Ausbruch (z. B. Aufweitungen)

- im Wegfallen von aufwendigen Abstichlisten
- in der dichteren Signalisierung von Punkten für die Herstellung des Ausbruchs oder das Stellen der Stützbögen durch die Vortriebsmannschaften
- in der geometrisch bedingten größeren Laserreichweite in Kurven
- im automatischen Erkennen von größeren Lageveränderungen des Standpunkts

Bei der Profilkontrolle ergeben sich Vorteile gegenüber einer manuellen Meßweise aufgrund:

- der sofortigen grafischen Anzeige der Ergebnisse unmittelbar nach der Messung
- der Ausführbarkeit der Messungen durch ungeschultes Personal
- der ständigen Meßbereitschaft während des Baubetriebs
- des Ein-Mann-Betriebs bei Verwendung einer Funkfernsteuerung

Bei der Verschiebungsmessung können als vorteilhaft genannt werden:

- die automatische Ausführung eines beinahe kontinuierlichen Monitorings
- die automatische Überwachung der Meßergebnisse (Alarmfunktion)
- die Vermeidung von Behinderungen des Baubetriebs
- ebenfalls die sofortige grafische Anzeige der Ergebnisse unmittelbar nach der Messung

## 7 Zukunftsaspekte

Grundsätzlich bewirkt der Einsatz von Motorlasern bereits heute eine große Arbeitsentlastung des Vermessungsexperten. Erste Erfahrungen bestätigen, daß im Falle von kurzen, geradlinigen Tunnelbauten alle erforderlichen Vermessungsarbeiten für den Vortrieb weitgehend automatisch ausgeführt werden können. Die Tätigkeiten des Geodäten beschränken sich dann in erster Linie auf Installation, Datenbereitstellung und gegebenenfalls War-

tung des Systems. Weiterentwicklungen bestehender Systeme befassen sich derzeit mit Verbesserungen der Benutzerschnittstelle des Steuerprogramms und der Implementierung zusätzlicher Meßfunktionen in den Bereichen Absteckung oder Steuerung von Baumaschinen. Weiters wird an die Installation einer Datenfernübertragung gedacht, wodurch diverse Meßabläufe auch vom zentralen Baubüro aus überwacht werden können. Im Bereich der Software besteht Bedarf an der Entwicklung „intelligenter“ Programme, mit deren Hilfe das System Messungen und Berechnungen unter Nutzung entsprechenden „Wissens“, z. B. über die Berücksichtigung der beschriebenen äußeren Fehlerquellen, steuern kann.

## Dank

Besonderer Dank gilt der Firma Geodata GmbH, Leoben, für die Bereitstellung eines Motorlasersystems zur Durchführung der Testmessungen.

## Literatur

- BAYER, G. (1997): Dynamic Aspects of the TCA 1800 Automatic Total Station. In: GRUEN, A.; KAHMEN, H.: Optical 3-D Measurement Techniques IV, Wichmann Verlag, 1997, pp. 319–328.
- INGENSAND, H.; BÖCKEM, B. (1997): Automatic Location and Pointing Techniques in Local Positioning Systems. In: GRUEN, A.; KAHMEN, H.: Optical 3-D Measurement Techniques IV, Wichmann Verlag, 1997, pp. 320–338.
- INGENSAND, H. (1999): Robotertachymeter – Polare Positioniersysteme der Zukunft. In: Moderne Sensorik für die Bauvermessung, VDI-Bericht Nr. 1454, 1999, VDI-Verlag GmbH, pp. 33–47.
- GEODATA ZT – GMBH (1999): Firmenunterlagen und Handbücher.
- KAHMEN, H. (1998): Vermessungskunde. 19. Auflage, Verlag De Gruyter.
- KATOWSKI, O. (1998): Motorisierte Theodolitmeßsysteme. In: Hybride Vermessungssysteme Grundlagen und Anwendungen, DVW-Schriftenreihe 29/1998, Verlag Wittwer, pp. 151–165

- STEINDORFER, A.; SCHUBERT, W.; RABENSTEINER, K. (1995): Problemorientierte Auswertung geotechnischer Messungen. Felsbau 13, Vol. 6.
- STEINDORFER, A.; SCHUBERT, W. (1996): Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation. Felsbau 14, Vol. 2.

Adresse der Autoren:  
K. CHMELINA, P. STAUBMANN  
Institut für Geodäsie und Geophysik,  
Technische Universität Wien,  
Gußhausstraße 27–29, A-1040 Wien

## Zusammenfassung

**Der Einsatz automatischer, motorisierter Tachymetermeßsysteme im Tunnelbau bietet für die untertägigen Meßaufgaben Vortriebssteuerung, Profilkontrolle und Verschiebungsmessung zahlreiche Vorteile. Anhand der gezeigten Beispiele wird jedoch deutlich, daß bei Verwendung derartiger Systeme die Beurteilung der Meßergebnisse die Kenntnis und Berücksichtigung möglicher, mit dem Anwendungsumfeld verbundener Fehlerquellen unbedingt erforderlich macht.**

## Summary

**The application of motorized total stations in tunnelling offers many advantages for setting out, profile control and displacement monitoring. The given examples are showing clearly that for the interpretation of the measuring results it is necessary to consider carefully the possible error sources related to the application field.**

