

## **Der Gleismesswagen *swiss trolley*: Leistungsmerkmale und Anwendungen**

Ralph Glaus, ETH Zürich

Nathan Lauener, HTA Burgdorf

Urs Müller, terra vermessungen AG, Zürich

Martin Baumeler, Grunder Ingenieure AG, Burgdorf

**Zusammenfassung:** Der Gleismesswagen *swiss trolley* ist ein gemeinsames Projekt der Berner Fachhochschule und der terra vermessungen AG. Weitere Partner in einem Folgeprojekt sind die ETH Zürich und die Grunder Ingenieure AG. Dank des modularen Aufbaus lässt sich der Gleismesswagen für verschiedene Bahnvermessungsaufgaben einsetzen und den aktuellen Bedürfnissen anpassen. Dieser Bericht beschreibt die Leistungsmerkmale des Gleismesswagens und erläutert anhand zweier Beispiele Einsatzmöglichkeiten. Der *swiss trolley* kam bei der Gleisabsteckung der Festen Fahrbahn im Tunnel Zürich-Thalwil zum Einsatz. Der Projektpartner Grunder Ingenieure AG setzte zwei Gleismesswagen für die Absteckung von 18 km Fester Fahrbahn ein. Die Auslegung für das kinematische Erfassen von Gleisanlagen war ein Hauptziel bei der Entwicklung des Gleismesswagens. Resultate einer Kalibrationsmessfahrt auf einem gut definierten Gleisabschnitt werden beschrieben. Der Gleismesswagen wurde hier von einem Trimble ATS600-Tachymeter eingemessen. Dieses Tachymeter zeichnet sich durch besonders günstige Eigenschaften bei kinematischen Vermessungen aus.

**Abstract:** The track surveying vehicle *swiss trolley* is a joint venture of the polytechnic Burgdorf and terra vermessungen AG. In a follow-up project, the Swiss Institute of Technology Zurich and Grunder Ingenieure AG collaborate as additional partners. The modular design allows for the adaption of different surveying tasks in the domain of track surveying. This paper gives an overview of the track surveying vehicle and points out possible applications by means of two examples. The *swiss trolley* was used for the alignment of the slab track in the Zurich-Thalwil tunnel. There, the project partner Grunder Ingenieure AG applied two trolleys for the alignment of 18 km of slab track. Furthermore, the track surveying trolley features the ability of kinematic surveying. Results of a calibration survey on a well defined track section are presented. Absolute reckoning was done by means of a Trimble ATS600 total station. This total station is characterised by favourable properties for kinematic surveys.

## 1 Einleitung

Für Vermessungsaufgaben rund um den Bahnbau existiert eine Vielzahl verschiedenster Messsysteme. Neben nach wie vor verwendeten statischen Systemen gewinnt die kinematische Vermessung von Gleisanlagen und gleisnahen Objekten an Bedeutung. Im Rahmen von Gleissanierungen benötigen Projektingenieure ein Messsystem, das die geforderte Absolut- und Relativgenauigkeit liefert. Überdies muss das System auch rentabel auf kurzen Gleisabschnitten oder auf Strecken ohne GPS Empfang (Tunnels, Brücken, enge Täler) eingesetzt werden können. Ein Beispiel eines solchen Systems verkörpert der von der Berner Fachhochschule Burgdorf in Zusammenarbeit mit terra vermessungen AG entwickelte Gleismesswagen *swiss trolley*. Massgebend gefördert wurde das Projekt durch die Kommission für Technologie und Innovation des Bundesamtes für Berufsbildung und Technologie. In einem Folgeprojekt wurde der Gleismesswagen für verschiedene Anwendungen optimiert. Als zusätzliche Partner konnten die Grunder Ingenieure AG sowie das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich gewonnen werden.

## 2 Leistungsmerkmale des Gleismesswagens *swiss trolley*

Der modulare Aufbau ermöglicht eine Anpassung an verschiedene Vermessungsaufgaben. Der Messwagen ist ausgerüstet mit Neigungsmessern, einem Spurweitenmesssystem und Odometern. In seiner Grundausstattung werden Überhöhung, Gradient, Kilometrierung, Spurweite und Temperatur erfasst. Als Produkte resultieren Weg-Verwindungs- und Weg-Spurweiten-Diagramme. Die Absolutreferenzierung des Messwagens kann mit Hilfe von GPS-RTK oder Tachymetern realisiert werden. Beim Einsatz von GPS werden die Daten synchron zum PPS-Signal des GPS-Empfängers aufgezeichnet. Bei der Verwendung eines Tachymeters erfolgt die Synchronisierung in einem Datennachbearbeitungsschritt. Der Einsatz von Laserscannern in Kombination mit dem Gleismesswagen ist vorgesehen (Abbildung 1).

Überhöhung und Gradient des Gleises werden mit Hilfe von zwei, in einer isolierten Box montierten Neigungssensoren gemessen. Bei den verwendeten Neigungsmessern handelt es sich um flüssigkeitsgedämpfte Pendelsensoren. Dank der isolierten, temperaturstabilisierten Box können Temperaturquerwirkungen auf die Sensoren minimal gehalten werden. Typische Genauigkeiten der verwendeten Sensoren im statischen Modus liegen bei 0.2 mrad. Die Rekonstruktion sämtlicher Sensorsignale erfolgt durch lineare Funktionen. Die Neigungsmesser-Kennlinien wurden durch den Vergleich mit Sollneigungen kontrolliert. Nullpunktfehler werden jeweils zu Beginn einer Messfahrt durch Zweilagennessung über einer Referenzfläche überprüft.



*Abbildung 1: Gleismesswagen mit GPS-Antenne, Aktivprisma und Laserscannern*

Die Spurweite wird als Funktion der Winkelposition zweier an den Gleisen entlang schleifender Taster bestimmt. Die Ausdehnung des Wagengehäuses kann dank der Temperaturmessung mitberücksichtigt werden, nimmt allerdings bei gemässigten Temperaturen vernachlässigbar kleine Werte an. Die Genauigkeit des Spurweitenmesssystems beträgt 0.5 mm.

Zwei Odometer zeichnen den zurückgelegten Weg auf. Das Mittel zwischen den in den beiden Vorderrädern platzierten Odometern liefert gerade die Weglänge der Gleis-Mittellinie. Differentielle Odometermessungen zur Ableitung von Richtungsinformation werden momentan nicht verwendet. Falls die Odometerdaten schlupffrei sind, liegt die Genauigkeit bei 50 ppm.

Abbildung 2 verschafft einen Überblick über die verwendeten Sensoren.

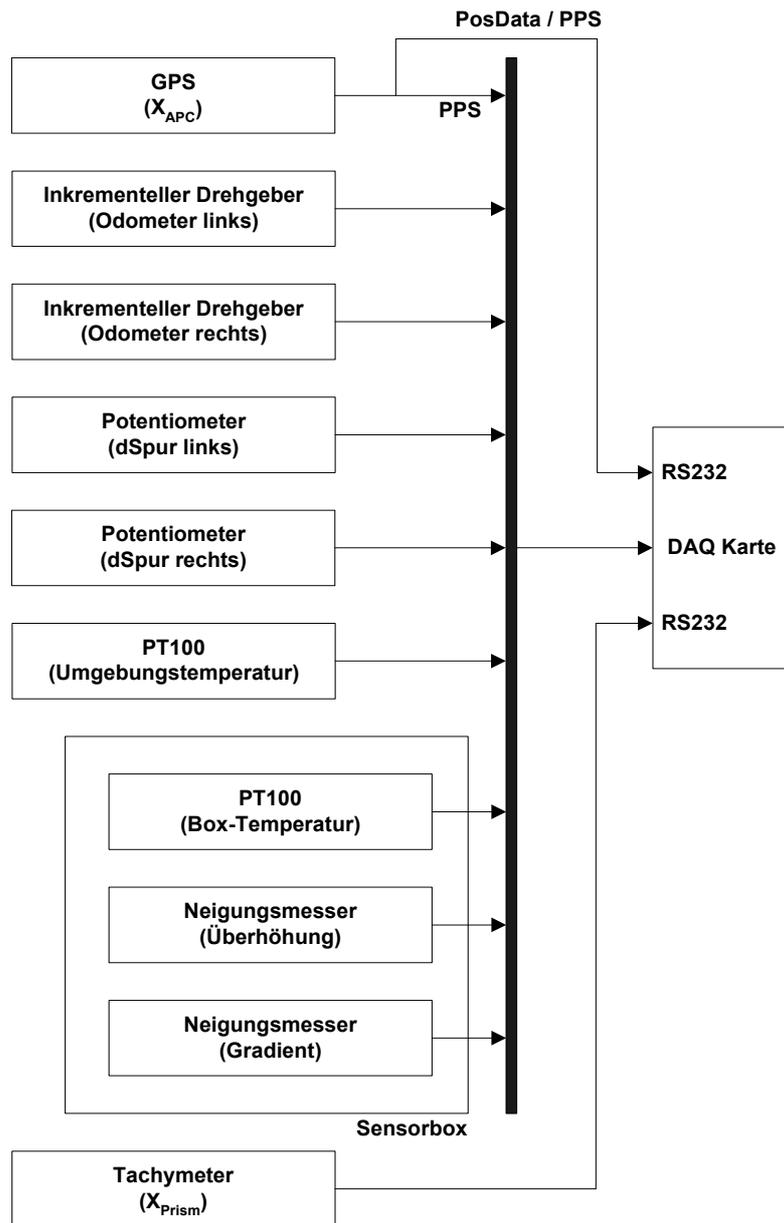


Abbildung 2: Blockdiagramm der beim Gleismesswagen verwendeten Sensoren

### 3 Stop-and-Go-Modus

Der Stop-and-Go-Modus soll anhand der Absteckung der Festen Fahrbahn im Zürich-Thalwil-Tunnel erläutert werden. Der Stop-and-Go-Modus ermöglicht ausserdem, das statische Fehlerverhalten der Sensoren abzuschätzen.

Bei Bahn-Neubaustrecken setzt sich vor allem auf Tunnelabschnitten ein neues Bauprinzip durch. Bei der so genannten Festen Fahrbahn ist die Verbindung zwischen Gleisrost und Untergrund im Gegensatz zum Schottergleis starr. Vor-

teile dieser Bauart gegenüber einem Schottereinbau liegen vor allem in einem bedeutend kleineren Unterhaltsaufwand. Das Einbetonieren der Schwellen hat zur Folge, dass Anpassungen an der Schienenlage nachträglich nur beschränkt und mit grossem Aufwand realisierbar sind. Die Absteckung der Festen Fahrbahn muss daher mit grosser Sorgfalt erfolgen. Toleranzen im Millimeter-Bereich sind gefordert. Zur Absolutpositionierung müssen Präzisionstachymeter verwendet werden.

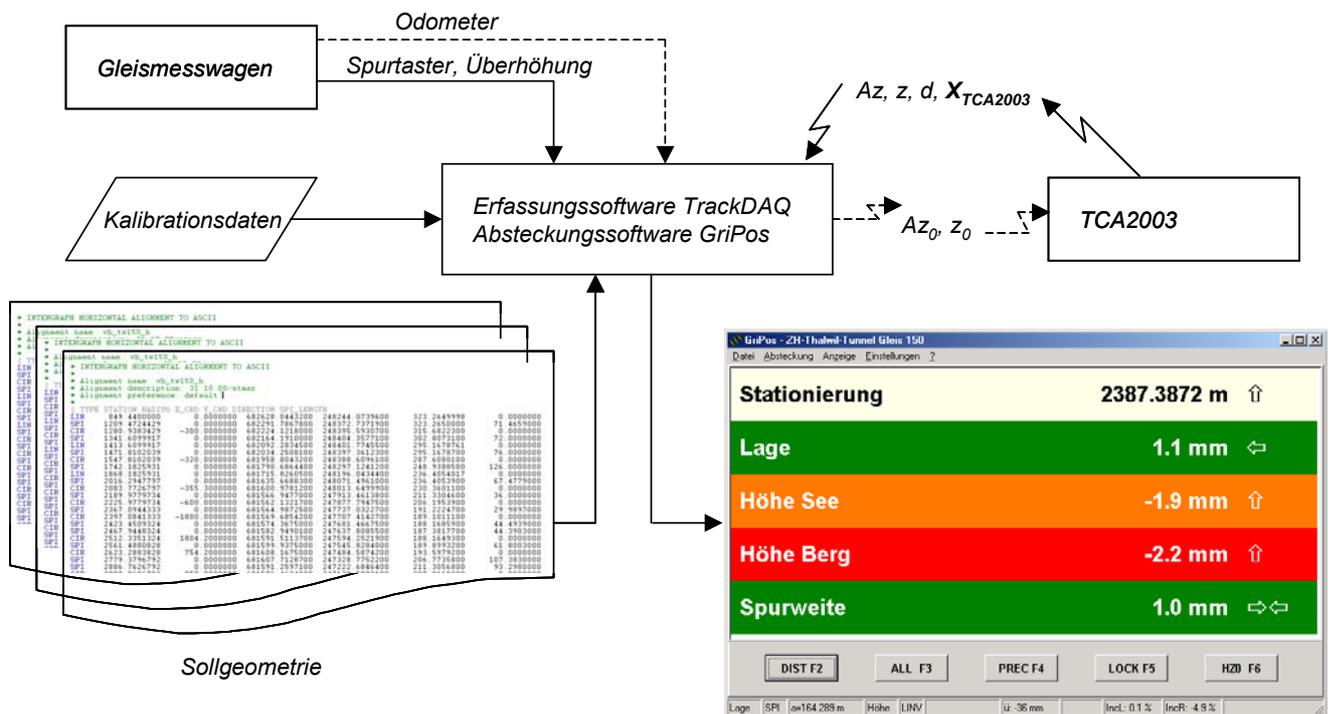


Abbildung 3: Prinzip der Gleisabsteckung

Das Funktionsprinzip der Absteckung mit Hilfe des Gleismesswagens ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Nach einer ersten Initialisierungsmessung kann sich das Tachymeterfernrohr, gestützt auf die Odometermessung und die Sollgeometrie-Parameter, jederzeit auf das am Messwagen befestigte Prisma positionieren. Das mit automatischer Zielerkennung ausgerüstete Tachymeter liefert über Datenfunk alle drei Sekunden aktualisierte, polare Messelemente. Zusammen mit den Neigungs- und den Spurmessungen kann der um einen bestimmten Betrag vom Ursprung versetzte Reflektorpunkt auf einen Referenzpunkt reduziert werden. Ein Vergleich der aus den polaren Messelementen abgeleiteten und ins Projektionssystem reduzierten Koordinaten mit der Sollgeometrie liefert Korrekturwerte für die Lage, Höhe, Überhöhung und Spur. Die Höhenkomponenten werden dabei für jede Schiene separat ausgewiesen.

Das im Zürich-Thalwil-Tunnel verwendete Richtsystem erlaubt ein stufenloses Korrigieren der Schienen in Höhe und Lage im Bereich von 1/10 mm [Ablinger,

2001]. Im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen wird der Gleisrost beim Richtvorgang durch das elastische Verhalten der Schienen nur minimal beeinflusst.

Den Referenzrahmen bildeten Gleisversicherungsbolzen, die sich im Abstand von 35 m im Tunnelparament befanden. Die Genauigkeit (mittlere Konfidenzellipse) wurde vom Bauherrn mit 1 mm angegeben. Die Absteckung des Gleisrostes erfolgte polar von Freien Stationen aus, die mit Hilfe von Messungen zu acht Anschlusspunkten referenziert wurden. Durch die Anordnung der Tachymeterstationen dürfen auf keinen Fall langperiodische Fehler ins Gleis übertragen werden. Fehler mit der Frequenz der Stativaufstellungen können minimiert werden, indem kurze Zielweiten sowie genügend Verknüpfungspunkte zwischen zwei Stationierungen gewählt werden. Durch das Stationieren im Gleis wird ausserdem eine unkritische Fehlerübertragung gewährleistet. Eine mangelnde Genauigkeit des elektronischen Distanzmessers hat auf den Richtprozess keinen Einfluss. Durch die Verwendung eines LEICA TCA2003 Präzisionstachymeters wurden mit der gewählten Messanordnung Genauigkeiten der orientierten Richtungen besser als 1 mgon erreicht.

Der Kalibrierung der Sensoren kommt beim Einbau der Festen Fahrbahn angesichts der rigorosen Toleranzvorgaben eine grosse Bedeutung zu. Zusätzlich bringt es der Messprozess mit sich, dass keine Zweilagmessungen durchgeführt werden können. Nullpunktfehler lassen sich also nicht eliminieren. Dies gilt sowohl für die Achsfehler des eingesetzten Tachymeters als auch für den Neigungssensor.

Zwischen August 2002 und März 2003 wurden insgesamt 18 km Feste Fahrbahn im Zürich-Thalwil-Tunnel eingebaut. Die vorgegebenen Leistungen von 250 m Grob- und Feinrichten pro Schicht konnten auf Vermessenseite problemlos eingehalten werden.

#### **4 Kinematischer Modus**

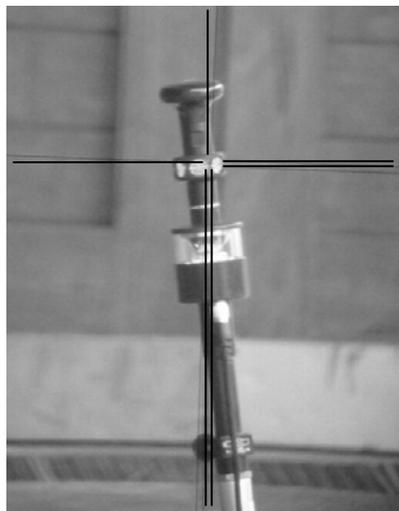
Die Absolutpositionierung des Gleismesswagens im kinematischen Betrieb kann mit GPS-RTK oder Tachymeter geschehen. Zur optimalen Schätzung der Messwagentrajektorie werden die Felddaten in einem Postprocessing nachbearbeitet. Das Postprocessing gliedert sich dabei in mehrere Schritte.

In einem ersten Schritt wird jeder Datenkanal auf Ausreisser untersucht. Die Gründe für Ausreisser sind vielfältig. So können Schweissnähte an den Schienen Störbeschleunigungen verursachen, die die Neigungsmessung negativ beeinflussen. Im selben Bearbeitungsschritt erfolgt eine erste Datenreduktion. Die Längsneigungsmessungen werden von translatorischen Beschleunigungen befreit. Die Translationsbeschleunigungen lassen sich aus der Wegmessung mit Hilfe glättender Polynome und den entsprechenden Ableitungen berechnen. Kubische Pa-

rabeln liefern dabei gute lokale Anpassungen mit moderater Rauschverstärkung. Zentripetalbeschleunigungen werden vernachlässigt. Dies ist in Anbetracht der geringen Betriebsgeschwindigkeit (Schritttempo) und der grossen Gleisradien zulässig.

In einem folgenden Bearbeitungsschritt werden Positionierungs- und Messwagendaten auf ein vorgegebenes Zeitintervall normalisiert. Ist ein Tachymeter der Positionsgeber, so erfolgt gleichzeitig eine Synchronisierung von Tachymeter- und Messwagendaten. Das Tachymeter muss dabei bereits synchronisierte Daten für die unabhängig arbeitenden Winkel- und Distanzmesssysteme liefern. Beim verwendeten Tachymeter Trimble ATS600 ist die Synchronisierung gemäss Hersteller besser als 5 ms. Im ATS600 wird dies erreicht, indem zwei benachbarte Richtungsmessungen auf den Zeitpunkt der dazwischen liegenden Distanzmessung interpoliert werden. Bei GPS ist dieser Synchronisationsschritt hin-fällig, da die Messwagendaten synchron zum PPS gespeichert werden.

Die Reduktion der Positionierungsdaten auf einen Referenzpunkt erfordert im Falle des ATS600 einen speziellen Reduktionsschritt. Der auf Aktivprisma-Technologie ausgelegte ATS600 verfolgt nicht den Referenzpunkt des Prismenrings sondern einen Diodenring. Dies führt zu einer verfälschten Richtungsable-sung bei geneigtem Prisma. Im stark überhöhten Gleis kann dieser Fehler in Ab-hängigkeit der azimuthalen Ausrichtung des Tachymeterfernrohrs relativ zur Gleisrichtung bis zu 5 mm betragen. Die Abbildung 4 illustriert dieses Verhal-ten.



*Abbildung 4: Automatische Anzielung eines ATS600 Aktiv-prismas im überhöhten Gleis*

In einem letzten Bearbeitungsschritt erfolgt eine Glättung der Daten. Zur opti-malen Schätzung der Trajektorie wird ein Kalman-Filter verwendet. Bei den meisten Anwendungen kennt man den Sollverlauf des Gleises. Es müssen also

nur noch Restablagen des wahren Gleises zur Sollposition geschätzt werden. Im Postprocessing ist es ausserdem möglich, die Trajektorie in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung zu filtern und anschliessend zu glätten. Gegenüber einer nur vorwärts gefilterten Lösung kann so die Varianz reduziert werden. Die in zwei Richtungen gefilterte und geglättete Lösung ist zudem weitgehend frei von Phasenverschiebungen.

## 5 Resultate einer kinematischen Vermessung

In einem Tunnel mit bekannter Gleislage wurden mehrere Messfahrten im kinematischen Modus durchgeführt. Die Betriebsgeschwindigkeit lag bei 1.8 m/s. Im Gegensatz zur Absteckung der Festen Fahrbahn wurde das Instrument ausserhalb des Gleises stationiert. Vorbeifahrten wurden so ermöglicht. Genauigkeitseinbussen bei der distanzdominierten Achsbestimmung auf Höhe des Instruments werden in Kauf genommen. Auf der andern Seite ist es offensichtlich, dass sich die Arbeitsleistung bei dieser Messanordnung um beinahe einen Faktor zwei erhöhen lässt. Bei der Vorbeifahrt am Tachymeter wurde während den Versuchsmessungen die Geschwindigkeit nicht verlangsamt, um den Effekt der nicht perfekten Synchronisierung zwischen Richtungs- und Distanzmessung des Tachymeters untersuchen zu können. Insgesamt wurde der 400 m lange Abschnitt fünfmal in Hin- und Rückrichtung abgefahren. Ein Vergleich der fünf Aufzeichnungen in Vorwärtsrichtung lieferte die folgenden Genauigkeiten für die Messwagensensoren (Tabelle 1):

Typ	Standardabweichung
Gradient	1.5 mrad
Überhöhung	0.5 mm (Normalspur)
Spurweite	0.2 mm

*Tabelle 1: Standardabweichungen der Messwagensensoren im kinematischen Modus.*

Die Genauigkeit der Gradientmessung ist gegenüber der Genauigkeit der Überhöhungsmessung um einen Faktor fünf vermindert. Der Hauptgrund liegt in den translatorischen Beschleunigungen, die sich nicht perfekt modellieren lassen. Spurweite und Überhöhung werden jedoch auch kinematisch sehr genau erfasst.

Verbleibende Nullpunktfehler der Neigungsmesser können durch den Vergleich der Hin- und Rückfahrten aufgedeckt werden. Hin- und Rückfahrten lassen sich ferner zur Bestimmung der horizontalen Abweichung des Prismenzentrums vom Wagenursprung verwenden.

Zum Vergleich stand ausserdem ein Referenzdatensatz zur Verfügung. Eine unabhängige Messung wurde auf dem betreffenden Gleisabschnitt vom Unternehmer mit dem Hergie-System [Dünisch et al., 2000] durchgeführt.

In der Abbildung 5 sind die Differenzen von der Sollachse für die Lagekomponente einer Hin- und Rückfahrt sowie des Referenzdatensatzes dargestellt. Je zwei Extremwerte sind für die Hin- und Rückfahrt bei den Kilometrierungen 53665 m und 53675 m zu beobachten. Diese Extremwerte liegen symmetrisch zum Tachymeterstandort bei der Kilometrierung 53670 m. Der Grund dieser Abweichungen liegt in einem Restsynchronisationsfehler zwischen Richtungs- und Distanzmesssystem des ATS600. Die Konsequenz solcher Fehler auf die Positionierung ist im Detail bei [Stempfhuber et al., 2000] beschrieben. Für eine gerade Trajektorie, eine konstante Geschwindigkeit  $v$  und eine Zeitverzögerung  $dt$  kann die Abweichung von der Solltrajektorie angegeben werden mit:

$$dh = \frac{1}{2} v dt \sin 2\alpha \quad (1)$$

$\alpha$  ist der Winkel zwischen Lotfusspunkt des Tachymeters auf die Trajektorie und der momentanen Position des Prismas. Bemerkenswert an (1) ist, dass die Abweichung unabhängig von der Winkelgeschwindigkeit des Tachymeterfernrohrs ist. Die Amplituden in Abbildung 5 lassen den Schluss zu, dass der Restsynchronisationsfehler für das verwendete Instrument im Bereich von 10 ms liegen muss.

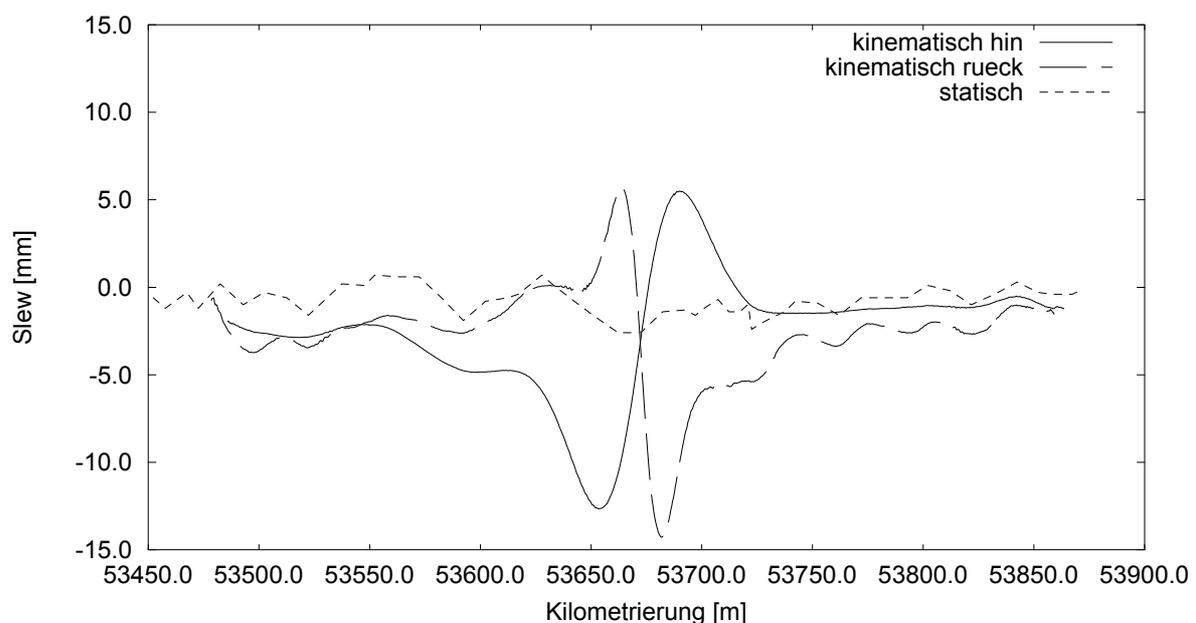


Abbildung 5: Horizontale Abweichungen von der Sollachse

Kalibrierte Kurven finden sich in der Abbildung 6. Es verbleiben Abweichungen in der Grössenordnung von 2 Millimetern zwischen den Kilometrierungen 53500 m und 53670 m. Mit einiger Wahrscheinlichkeit kann dies der Prismenorientierung zugeschrieben werden. Die Messunsicherheit, abgeleitet aus den Messungen über die ganze Strecke, kann für die Horizontalkomponente mit 3 mm angegeben werden.

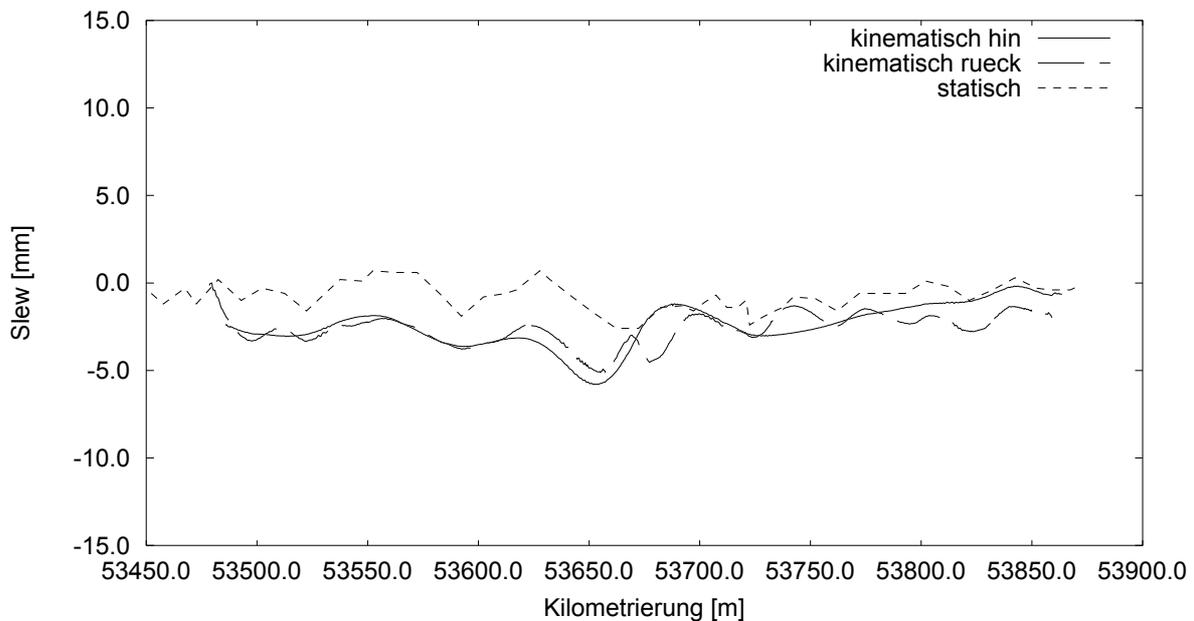


Abbildung 6: Horizontale Abweichungen von der Sollachse  
(behandelte Tachymetermessungen)

Ähnliche Kurven mit vergleichbaren Messunsicherheiten können für die vertikalen Abweichungen ermittelt werden.

## 6 Schlussfolgerungen

Die operationelle Einsatzbereitschaft des Gleismesswagens *swiss trolley* konnte bei der Absteckung der Festen Fahrbahn im Zürich-Thalwil-Tunnel nachgewiesen werden. In diesem Projekt kam der Gleismesswagen in Verbindung mit einem Präzisionstachymeter zum Einsatz. Die rigorosen Toleranzvorgaben erforderten eine sorgfältige Kalibrierung der Messwagen und der Tachymeter. Eine andere Anwendung hat die kinematische Gleisaufmessung zum Ziel. In Abhängigkeit der Aufgabe und ihrer Genauigkeitsanforderung können GPS-RTK oder Tachymeter für die Absolutpositionierung verwendet werden. Für kalibrierte Sensoren können bei Verwendung eines Trimble ATS600 Tachymeters Genauigkeiten im Bereich von 3 mm für die Lage- und Höhenkomponente erreicht werden. Die terra vermessungen AG führt für den Betreiber des britischen Schienennetzes „Network Rail“ Gleisvormessungen im kinematischen Modus

durch. Gegenüber dem vom Betreiber eingesetzten, konventionellen System resultieren erhebliche Leistungssteigerungen.

## 7 Literatur

ABLINGER, P. [2001]: Vermessen und Einrichten von Festen Fahrbahnen – Systemkonzept. Der Eisenbahningenieur 9/2001, Tetzlaff Verlag, Hamburg.

DÜNISCH, M., H. KUHLMANN [2001]: Investigation of Accuracy of Tracking Motorized Tacheometers. Proceedings of the Optical 3D-Measurement Techniques V Congress, Wien 2001.

W. STEMPFHUBER, K. SCHNÄDELBACH, W. MAURER [2000]: Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. Ingenieurvermessung 2000, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.

### **Anschriften:**

ETH Zürich:  
Ralph Glaus  
geomETH, Geodätische Messtechnik  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich  
glaus@geod.baug.ethz.ch

HTA Burgdorf:  
Nathan Lauener  
Institut für mechatronische Systeme  
Pestalozzistrasse 20  
3400 Burgdorf  
nathan.lauener@isburg.ch

terra vermessungen AG:  
Urs Müller  
Obstgartenstrasse 7  
8035 Zürich  
mueller@terra.ch

Grunder Ingenieure AG:  
Martin Baumeler  
Bernstrasse 21  
3400 Burgdorf  
martin.baumeler@grunder.ch