

Kinematische Gleismessung

Ralph Glaus

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Höggerberg, 8093 Zürich
Grunder Ingenieure AG, Bernstrasse 21, 3400 Burgdorf
ralph.glaus@geod.baug.ethz.ch

Thomas Wildi

HTA Burgdorf, Pestalozzistrasse 20, 3400 Burgdorf
terra vermessungen AG, Obstgartenstrasse 7, 8035 Zürich
thomas.wildi@hta-bu.bfh.ch

1 Einleitung

Für die Aufnahme und Absteckung von Objekten rund um den Bahnbau bestehen mittlerweile eine Vielzahl verschiedenster Vermessungssysteme. Neben immer noch eingesetzten konventionellen statischen Methoden gewinnen zunehmend auch kinematische Messsysteme an Bedeutung. Einzelne Eisenbahngesellschaften (Bsp. ÖBB, [Presle, 1995]) verfügen über teure Positionierungssysteme, mit denen grossräumig Strecken abgefahren werden. Diese Systeme werden verwendet, um das Verhalten der Schienen unter dynamischer Belastung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu untersuchen. Die Systeme liefern hohe Relativgenauigkeiten. Im Zusammenhang mit Streckensanierungen benötigen projektierende Ingenieure ein Messsystem, das die geforderten Absolutgenauigkeiten liefert und das sich auch bei kleineren einzumessenden Streckenabschnitten rentabel einsetzen lässt. Ein Beispiel eines solchen kinematischen Messsystems ist der von der Fachhochschule Burgdorf zusammen mit terra vermessungen AG entwickelte Gleismesswagen. Der Gleismesswagen ist modular aufgebaut und kann mit verschiedenen Sensoren bestückt werden. Die Realisierung des Projektes erfolgte mit Unterstützung der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) des Bundesamtes für Berufsbildung und Technologie. In einem Nachfolgeprojekt sollen nun die vom Gleismesswagen akquirierten Daten auf verschiedene Anwendungen optimiert werden. Als zusätzliche Projektpartner konnten das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich sowie die Grunder Ingenieure AG gewonnen werden. Dieser Bericht beschreibt die zum Einsatz kommenden Sensoren und stellt Resultate von zwei Pilotversuchen vor, die die Einsatzmöglichkeiten des Messwagens aufzeigen.

2 Konzept des Messwagens

2.1 Systemdesign

Um den Messwagen in möglichst vielen Anwendungsgebieten einsetzen zu können, wurde ein modulares Systemdesign entwickelt, welches den jeweiligen Bedürfnissen angepasst werden kann. Der modulare Aufbau gliedert sich in die Grundausrüstung **Basic** sowie die beliebig erweiterbaren Optionen **P** (Positioning) und **S** (Scanning).

In der Stufe **Basic** werden die Messgrössen Querneigung, Längsneigung, Weg, Spurweite und Temperatur erfasst. Die aus diesen Grössen berechenbaren Längsprofile können für Deformationsmessungen (Höhe) und erste Zustandserfassungen von Gleisen dienen. Mit der Option **P** wird die 3D-Gleisachsenposition mittels RTK-DGPS oder trackender Tachymeter erfasst. Mögliche Anwendungsgebiete hierfür sind: Gleisaufnahme bei Neubaustrecken bzw. Projektierung von Gleissanierungen. Mit der Option **S** werden 2D-Geländeprofile mittels

Laserscanner (LMS1, LMS2) erfasst, welche eine sehr hohe Scanrate aufweisen. Mögliche Anwendungsgebiete hierfür sind: Vermessung von gleisnahen Objekten (Böschung, Fahrleitungsmasten), Vermessung von Fahrleitungen und Erfassen von Tunnelprofilen.

Die Datenerfassung ist auf eine kinematische Vermessung ausgelegt. Sämtliche Messgrößen werden synchron zum PPS-Takt des GPS erfasst. Die zeitliche Verschiebung der Sensordaten (Neigungen, Spurweite und Weg) bezüglich dem PPS-Takt ist maximal 5ms. Die Synchronität der Sensordaten untereinander ist besser als 0.5ms. Wenn kein PPS-Signal zur Verfügung steht (z.B. mit trackenden Tachymetern), wird die Qualität der Synchronisation entsprechend schlechter (Jitter je nach Gerätespezifikation).

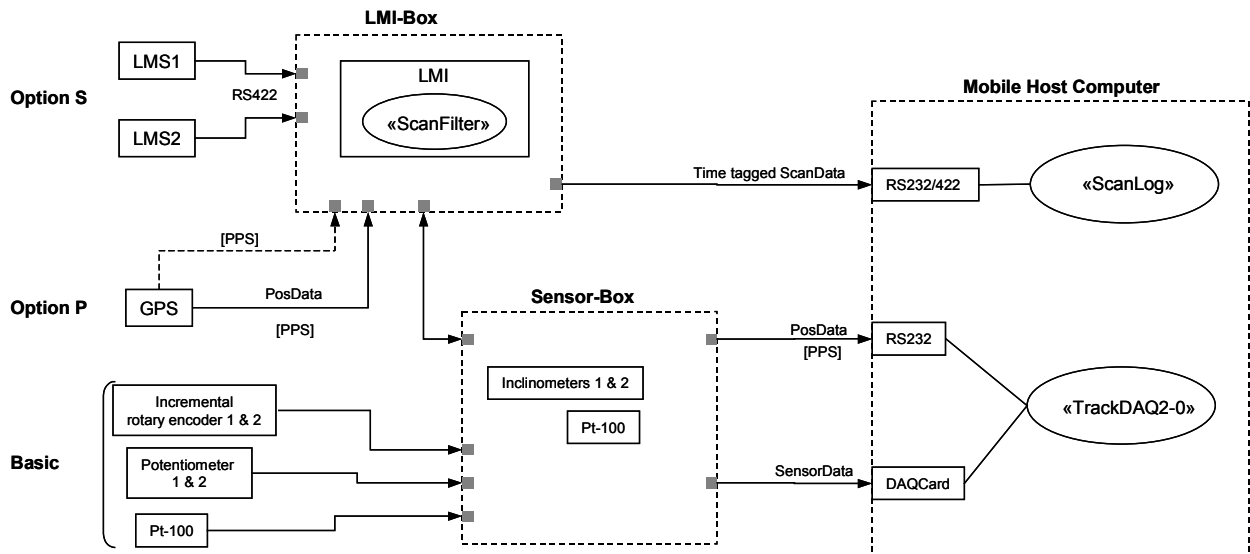


Abbildung 1: System Design des Gleismesswagens

2.2 Überblick über Messgrößen und Sensorik

Die folgende Tabelle zeigt, in welcher Konfiguration (B, P, S) welche Sensoren eingesetzt werden.

Tabelle 1: Messgrößen und Sensorik der Multisensor-Plattform

	Messgröße	Sensor	Hersteller / Typ	Messbereich	Auflösung
B	Weg	Inkremental-Drehgeber	Baumer electric BHL 16.24K2000	-	0.12mm
	Quer- und Längsneigung	Inklinometer	Midori PMP-S15TA-V1	$\pm 15^\circ$	0.01°
	Spurweite	Winkel-Potentiometer	Contelec GL 60 / 45°	1428..1480mm	0.1mm
	Temperatur	PT100	-	-30...80°C	0.1°C
P	Position	RTK-DGPS Empfänger oder trackender Tachymeter	<i>verschiedene</i>	-	1mm
S	2D-Geländeprofil	Laserscanner	SICK LMS200-300106	200° / 8m	0.25° / 1mm
				200° / 80m	0.25° / 10mm

Die Signale der Inkremental-Drehgeber werden in der Elektronik so aufbereitet, dass automatisch die Drehrichtung erkannt wird und eine Mittelung zwischen den beiden Radzählungen durchgeführt wird.

Die eingesetzten Inklinometer messen die Neigung mittels flüssigkeitsgedämpftem Pendel. Der genauigkeitslimitierende Faktor für statische Messungen ist die Temperaturcharakteristik des Sensors. Aus diesem Grund sind die beiden Inklinometer in einer Sensor-Box untergebracht, welche auf $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ temperaturstabilisiert wird. So kann der Fehlereinfluss aufgrund von Temperaturschwankungen minimiert werden und ist für die Neigungsmessung nicht mehr signifikant. Bei der kinematischen Neigungsmessung kommen weitere Einflussfaktoren dazu, welche die Genauigkeit stark beeinflussen. Für die Querneigungsmessung kann der Einfluss der Zentripetalbeschleunigung in Kurvenfahrt ignoriert werden, da sie bei den erreichbaren Geschwindigkeiten mit dem Messwagen nicht signifikant ist. Für die Längsneigungsmessung muss jedoch die translatorische Beschleunigung entsprechend berücksichtigt werden, was mit Hilfe der Odometerstützung realisiert wird. Die bedeutendsten Einflussfaktoren für die kinematische Messung sind das Verhalten bei Vibrationen und Stößen sowie die Linearität der Inklinometerdynamik. Die Neigungsmesser liefern im statischen Modus Genauigkeiten (1 sigma) von 0.05 mrad. Erste Testfahrten lieferten im kinematischen Modus Genauigkeiten von 0.8 mrad für die Querneigung und 1.6 mrad für die Längsneigung.

Die Spurweite wird über die Winkelstellung zweier schleifender Taster erfasst. Für die erreichbaren Geschwindigkeiten mit dem Messwagen ist diese Methode ausreichend und im Vergleich zu berührungslosen Lasersensoren wesentlich kostengünstiger. In der Spurweiten-Berechnung wird die Längenänderung des Wagenrahmens durch Temperaturschwankungen rechnerisch kompensiert. Das Spurweitenmesssystem liefert eine Standardabweichung von 0.5 mm an einer Messung.

Zur kinematischen Positionserfassung können wahlweise RTK-GPS Empfänger oder trackende Tachymeter eingesetzt werden. Bei der Verwendung von Tachymetern ist zu bemerken, dass bei den verschiedenen Geräten sehr grosse Qualitätsunterschiede bei kinematischer Vermessung vorliegen. Das Hauptproblem stellt, wie in [Stempfhuber et al., 2000] gezeigt, die zeitliche Nicht-Synchronität von Richtungs- und Distanzmessung dar.

Die eingesetzten Laserscanner (LMS) liefern 2D-Profildaten mit hoher Auflösung und sehr hoher Scanrate (bis 75Hz). Sie können für verschiedene Reichweiten, Winkelauflösungen und Scanwinkel konfiguriert werden. Die Scandaten werden auf einer speziellen Mikrocontroller-Einheit (LMI) gefiltert und mit einer Zeitmarkierung (GPS-UTC) versehen.

3 Anwendungen.

3.1 Aufnahme von Gleisachsen

Im Rahmen der Nachführung der Datenbank fester Anlagen (DfA) der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wurde vom Auftraggeber die Aufnahme der Gleisachse der Strecke Giubiasco – Locarno mit einer Genauigkeit von 5 cm in Lage und Höhe relativ zu einem vorgegebenen Fixpunktnetz verlangt. Diese Aufgabe wurde mit dem Messwagen erweitert um die Option P (Positioning) realisiert. Mit 20 Hz wurden Spurweiten, Odometerablesungen sowie Quer- und Längsneigungen aufgezeichnet. Zur Positionierung wurde auf dem Messwagen ein GPS-RTK Empfänger Trimble 4700 verwendet. Die mit einem Trimble 4000SSi-Empfänger ausgerüstete Basisstation lag bis maximal 5 km von der Bahnlinie entfernt. Von der Basisstation wurden Phasen- sowie Codedaten mit einer zeitlichen

Auflösung von 1 Hz zum Roverempfänger geschickt. Die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten im Roverempfänger geschah „on the fly“. Insgesamt wurden 18 km Gleis in Hin- und Rückfahrt vermessen. Bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1.5 m/s konnten die Arbeiten in drei Nächten abgeschlossen werden. Zur Gewährleistung der Nachbargenauigkeit wurden alle 500 m ein Bolzen im Fixpunktnetz mit einem weiteren Rover-Empfänger von einer zweiten Messequipe eingemessen. Für ungefähr 10% der Strecke konnten die Phasenmehrdeutigkeiten nicht gelöst werden. Diese Streckenabschnitte wurden in einer zweiten Phase tachymetrisch eingemessen.

Mit Hilfe der Odometermessungen und der Längsneigungen lassen sich Höhendifferenzen aufintegrieren. Diese zeigen im allgemeinen einen glatteren Verlauf als die GPS-Höhen. Allerdings weisen die Inklinometermessungen zeitlich nicht-konstante Drifteffekte auf. Anstelle von globalen Driftparametern wurden die GPS-Höhen lokal mittels eines symmetrischen Glättungsfilters über die Differenzen zwischen GPS-Höhen und Inklinometerhöhen angepasst.

Die Gleisachsaufnahmen in Hin- und Rückfahrt erlauben zum einen eine unabhängige Kontrolle. Zum andern kann die Genauigkeit durch Mittelung der beiden Trajektorien erhöht werden. Für die Mittelbildung wurden Lotabstände auf die Sehnen der Rückfahrt gerechnet und diese gemittelt. Auch für kleine Radien verursacht diese Vereinfachung vernachlässigbar kleine Fehler. Für Sehnen von 1.5 Metern Länge erhält man für Radien > 300 m einen Fehler < 1 mm. Tabelle 2 zeigt die Abweichungen der Hin- und Rückfahrt von der gemittelten Trajektorie. Die Höhenangaben beziehen sich auf die geglätteten Höhen. Die Glättung der GPS-Höhen mittels Inklinometermessungen verbesserte die Höhengenaugigkeit um einen Faktor 1.5.

Tabelle 2: Differenz der einzelnen Messfahrten von der gemittelten Trajektorie

Strecke	μ_{Lage} [m]	σ_{Lage} [m]	$\mu_{Höhe}$ [m]	$\sigma_{Höhe}$ [m]
Cadenazzo – Giubiasco Süd	0.004	0.015	-0.008	0.038
Cadenazzo – Giubiasco Nord	0.006	0.015	-0.002	0.020
Cadenazzo – Locarno	0.005	0.016	0.005	0.025

Die Trajektorien wurden sodann unter Zuhilfenahme der mitgemessenen Passpunkte mittels einer Helmerttransformation ins Fixpunktnetz transformiert und mittels Interpolation der Passpunktklaffen angepasst.

3.2 Schätzen von Gleisgeometrien

Ziel einer Gleissanierung ist die Wiederherstellung eines Soll-Trassenverlaufes. Für die Projektierung von Bahnanlagen wird dabei die durch die Gleisachse beschriebene Raumkurve in eine sogenannte Horizontal- und Vertikalgeometrie aufgeteilt. Als Trassierungselemente für die Horizontalgeometrie werden in der Schweiz Geraden, Kreisbogen und Übergangsbogen für die Beschreibung der Horizontalgeometrie und Geraden und Kreisbogen für die Beschreibung der Vertikalgeometrie verwendet. Falls die Soll-Trasse bekannt ist, kann mit Hilfe des Gleisversicherungssystem der ideale Gleiszustand jederzeit wiederhergestellt werden. In der Schweiz sind für die Hauptlinien der SBB die Sollgeometrien beinahe vollständig erfasst. Bei kleineren Bahngesellschaften sind diese Daten zum Teil nur lückenhaft vorhanden. Mittels Gleisachsaufnahmen und anschließender Regression lassen sich diese Soll-Geometrien bestimmen. Die Soll-Geometrien dürfen dabei von den ursprünglich projektierten Achsen um einen gewissen Betrag abweichen. Der

Zusammenhang zwischen den Messpunkten, der Ist-, der Soll- und der projektierten Trasse ist aus Abbildung 2 ersichtlich.

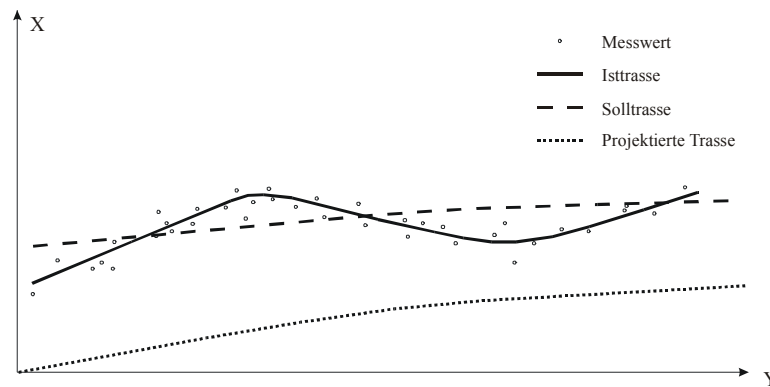


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Messwert, Ist-, Soll- und projektiertes Trasse (nach [Retscher, 1996])

Die Regressionsanalyse zur Ableitung der Soll-Geometrien geschieht im Normalfall CAD-gestützt. Im Folgenden wird ein Verfahren zur Bestimmung von Solltrajektorien ohne a priori-Kenntnisse vorgestellt. Bei bekannter Soll-Trasse kann unter Vorgabe des Messrauschens sodann die Ist-Trasse mit Hilfe der Kollokation optimal geschätzt werden. Das Verfahren lehnt

sich an das in [Retscher, 1996] beschriebene Vorgehen an, wobei die Kenntnis der Lage der Bogenhauptpunkte nicht vorausgesetzt wird. Abweichend zu [Retscher, 1996] können die Bogenhauptpunkte ausserdem simultan bei der Bestimmung der Trendfunktionen mitgeschätzt werden.

Im folgenden beschränken wir uns auf die Darstellung für die Horizontalgeometrie. Die gleichen Algorithmen können auch für Vertikalgeometrien verwendet werden, wobei für die Trassierung nur Geraden und Kreise angesetzt werden müssen.

Falls keine oder nur unvollständige Projektdaten der Strecke vorhanden sind, erfordert das Verfahren zur Bestimmung von Soll- und Ist-Trasse die näherungsweise Bestimmung der Bogenhauptpunkte. Dies lässt sich am einfachsten durch die Analyse des Krümmungsbandes realisieren. Zur Berechnung der Krümmung werden symmetrische Glättungsfilter in Form von Polynomen des Grades n auf die als Funktion der Bogenlänge l parametrisierten Messwertreihen y und x angewandt:

$$\begin{aligned} y(l) &= a_0 + a_1 l + a_2 l^2 + a_3 l^3 + \dots + a_n l^n \\ x(l) &= b_0 + b_1 l + b_2 l^2 + b_3 l^3 + \dots + b_n l^n \end{aligned} \quad (3-1)$$

Für die Krümmung an der Stelle $l=0$ unter Berücksichtigung von (3-1) finden wir in guter Näherung:

$$\kappa = \frac{2a_3 b_2 - 2a_2 b_3}{(a_3^2 + b_3^2)^{3/2}} \quad (3-2)$$

Die Hauptschwierigkeit besteht nun im Detektieren der Krümmungssprünge im Kurvenband, was auf die Bestimmung der zweiten Ableitung des Kurvenbandes der Horizontalgeometrie herausläuft. Eine Möglichkeit besteht in der Faltung des Kurvenbandes mit einer geeigneten Faltungsmaske. Es kann gezeigt werden, dass sich für die Detektion von Rampenkanten, wie sie im Krümmungsband vorkommen, die zweite Ableitung der Gauss'schen Glockenkurve sehr gut eignet. In Abbildung 3 ist die Krümmung als Funktion der Stationierung sowie deren zweite Ableitung nach dem Weg dargestellt. Die detektierten Bogenhauptpunkte sind in Form von gestrichelten, senkrechten Linien angegeben.

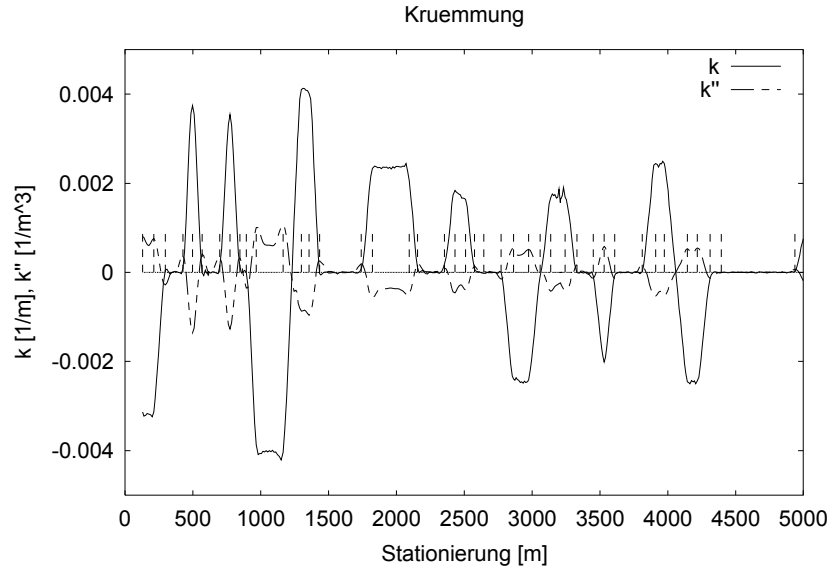


Abbildung 3: Kurvenband mit zweiter Ableitung und Bogenhauptpunkten

Aufgrund der Krümmungsanalyse respektive der a priori-Information sind die Elemente der Trasse bekannt. Die gesuchten Kurvenparameter lassen sich nun elementweise bestimmen. Für die einzelnen Elemente werden die folgenden Beobachtungsgleichungen angesetzt:

$$\begin{aligned}
 y(l_i) &= y_{0_k} + \eta_k(l_i) \cos \tau_{0_k} + \xi_k(l_i) \sin \tau_{0_k} & \text{Mit:} \\
 x(l_i) &= x_{0_k} - \eta_k(l_i) \sin \tau_{0_k} + \xi_k(l_i) \cos \tau_{0_k} & y_{0_k}, x_{0_k}: \text{ Fusspunkt bei } l_{0_k} \\
 \eta_k(l_i) &= \int_{l_{0_k}}^{l_i} \sin(\kappa_{0_k}(l-l_{0_k}) + \frac{c_k}{2}(l-l_{0_k})^2) dl & \tau_{0_k}: \text{ Azimut bei } l_{0_k} \\
 \xi_k(l_i) &= \int_{l_{0_k}}^{l_i} \cos(\kappa_{0_k}(l-l_{0_k}) + \frac{c_k}{2}(l-l_{0_k})^2) dl & \kappa_{0_k}: \text{ Krümmung bei } l_{0_k} \\
 \alpha(l_i) &= (\kappa_{0_k} + c_k(l_i - l_{0_k})) \frac{v^2}{g} & c: \text{ Krümmungsänderung} \\
 & & l_{0_k}: \text{ Stationierung beim ersten (3-3) Elementpunkt} \\
 & & \alpha: \text{ Querneigung} \\
 & & v: \text{ Maximale Geschwindigkeit für kompensierbare Seitenbeschleunigung} \\
 & & g: \text{ Schwerebeschleunigung}
 \end{aligned}$$

In den Bogenhauptpunkten muss ausserdem gelten:

$$\begin{aligned}
 y_k(l_{H_{k+1}} - l_{0_k}) &= y_{k+1}(l_{H_{k+1}} - l_{0_{k+1}}) \\
 x_k(l_{H_{k+1}} - l_{0_k}) &= x_{k+1}(l_{H_{k+1}} - l_{0_{k+1}}) \\
 \tau_k(l_{H_{k+1}} - l_{0_k}) &= \tau_{k+1}(l_{H_{k+1}} - l_{0_{k+1}}) \\
 \kappa_k(l_{H_{k+1}} - l_{0_k}) &= \kappa_{k+1}(l_{H_{k+1}} - l_{0_{k+1}})
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

wobei die Stationierung des Bogenhauptpunktes $l_{H_{k+1}}$ als unbekannt angesetzt wird. Die unter (3-3) aufgeführten Fresnel'schen Integrale können im Falle von Gerade und Kreis elementar gelöst werden. Zusätzliche Bedingungen wie Mindestabstände zu Nachbargleisen und Mindestelementlängen können dem Modell in Form von Pseudobeobachtungsgleichungen hinzugefügt werden. Die unbekannt Parameter werden nach kleinsten Quadraten gelöst.

Für tachymetrische Aufnahmen auf gut instandgehaltenen Gleisen erhält man mit diesem Verfahren typischerweise eine Standardabweichung an einer Koordinate von 1 cm.

Die Lotabstände der Messwerte zur Solltrajektorie können in einem abschliessenden Schritt mit Hilfe der Kollokation geglättet werden. Die Lotabstände werden dabei in einen Signal- und Noise-Anteil aufgetrennt. Als Kovarianzfunktion wird eine Funktion der Form

$$C(\Delta l) = \sigma_s^2 e^{-(\Delta l/a)^2} \quad (3-5)$$

verwendet. Der Parameter a hängt von den langwelligen Gleislagefehlern ab. Simulationen und Untersuchungen an realen Messwertreihen ergaben für den Parameter a einen Wert von ca. 20 m [Retscher, 1996]. Für statische, tachymetrische Aufnahmen wird für die Standardabweichung a priori des Noise-Anteils typischerweise $\sigma_N = 3$ mm angesetzt.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem Gleismesswagen steht ein Gerät zur Verfügung, mit dem sich verschiedenste Aufgaben rund um den Bahnbau wirtschaftlich lösen lassen. Die kinematische Positionierung des Messwagens mit GPS-RTK ohne spezielle Datennachbehandlung lieferte Genauigkeiten für die Trajektorie im Bereich von 1.5 cm für die Lage. Die Genauigkeit der Höhenbestimmung war um einen Faktor 1.5 schlechter. Die Höhe wird dabei mittels der aus den Inklinometer- und Odometermessungen abgeleiteten Höhendifferenzen geglättet. Die Genauigkeit der Aufnahme kann verbessert werden, indem die nach der Reduktion um Trendfunktionen verbleibenden Residuen geglättet werden. Ein Ansatz stellt die Methode der Kollokation dar. Für die Bestimmung von Gleislagefehlern im Subzentimeterbereich sind neben optimalen Filtermethoden auch andere Sensoren einzusetzen, die insbesondere Strecken mit GPS-Ausfall überbrücken können. Im Rahmen des eingangs erwähnten KTI-Nachfolgeprojektes sollen Verfahren zur Messung von Gierungswinkeln und anschliessender Aufintegration entlang der Trajektorie geprüft werden.

5 Literatur

Presle, G., 1995. Vom Mess- zum Vermessungswagen zur Entwicklung der Gleismessfahrzeuge. VIII. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 1995, Fachvorträge, Heft 16, Institut für Geodäsie, Universität Innsbruck, pp. 161 – 165.

Retscher, G., 1996. 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 44, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien.

W. Stempfhuber, K. Schnädelbach, W. Maurer, 2000: Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. Ingenieurvermessung 2000, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, pp. 144 – 154.