

Evaluierung der Regelgüte für tachymetrisch gesteuerte Fahrzeuge

Otto Lerke und Volker Schwieger

Zusammenfassung

Das Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart, betreibt seit einigen Jahren einen Baumaschinensimulator zum Testen unterschiedlicher Sensoren, sowie Filter- und Regelalgorithmen unter Laborbedingungen. Ein tachymetrisch gesteuerter Modell-LKW im Maßstab 1:14 wird dabei so genau wie möglich auf einer vordefinierten Solltrajektorie geführt. Die Querregelung wird durch einen PID-Regler realisiert. Als Qualitätskriterium für die Regelgüte wird der RMS der Querabweichungen zur Solltrajektorie verwendet. Der Simulator erreicht unter Laborbedingungen RMS-Werte von 2 bis 4 mm. Diese Werte geben die Summe aus Messgenauigkeit und Regelgüte an. Ein externes Messsystem, der Laser Tracker API Radian, in Kombination mit einem nachsteuernden Prisma, ermöglicht eine Aufspaltung zwischen den beiden Größen, Messgenauigkeit und Regelgüte. Nach dieser Aufspaltung kann die Regelgüte einzeln betrachtet und evaluiert werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die unter Laborbedingungen erreichten, kombinierten Werte mit den Messungen des Laser Trackers bestätigt werden konnten. Eine Regelgüte von 3,1 mm und eine Messgenauigkeit von 2,9 mm ist bei der Untersuchung festgestellt worden.

Summary

For several years, the Institute of Engineering Geodesy, University of Stuttgart has been operating a construction machine simulator to evaluate the performance of different sensors as well as filter and control algorithms under laboratory conditions. For this purpose a model truck (scale 1:14) is guided on a pre-defined reference trajectory as accurately as possible. The lateral control is realized using a PID controller. The root mean square value (RMS) of the lateral deviation between the driven and reference trajectory is defined as quality criterion. Under laboratory conditions, the simulator achieves RMS values of 2 to 4 mm. These values contain the measurement accuracy and the control quality. An external measurement system, the API Radian laser tracker, in combination with an active target allows to split up the two quantities. Thus the control quality can be evaluated individually. The investigations have shown that the measurements conducted by the laser tracker verify the former achieved RMS values. A control quality of 3.1 mm and a measurement accuracy of 2.9 mm could be stated.

Schlüsselwörter: Regelkreis, Regelgüte, Baumaschinensimulator, Laser Tracker, Zielverfolgendes Tachymeter

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden auf dem Gebiet der automatisierten Baumaschinen große Fortschritte gemacht (Kunze 2011). Automatisch fahrende Baumaschinen erlangen für den Straßenbau immer größere Bedeutung (z.B. Meyer 2003). Auf Grundlage des Automatisierungsgrades des jeweiligen Systems kann nach Stempfhuber und Ingensand (2008) eine Einteilung der Systeme vorgenommen werden. Die Entwicklungen sind oft mit den Gesichtspunkten der Kostenreduzierung und Effizienzsteigerung verknüpft (Heikkilä und Jaakkola 2003, Gläser et al. 2008).

Seit einigen Jahren betreibt das Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS), Universität Stuttgart, einen Baumaschinensimulator (Beetz und Schwieger 2008, Gläser 2007). Das Simulatorsystem besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Als Versuchsfahrzeuge kommen ein Modell-LKW sowie eine Modell-Raupe, beide im Maßstab 1:14, zum Einsatz. Das System wurde entwickelt, um verschiedene Positionssensoren, sowie diverse Filter- und Regelalgorithmen unter Laborbedingungen zu untersuchen (Gläser 2007). Der Simulator befindet sich zurzeit im Ausbau. Bisher ist das System auf die Querregelung beschränkt. Bei realen Baumaschinen spielt die Querregelung z.B. bei Curb- und Gutter-Applikationen eine wichtige Rolle. In Zukunft soll auch eine Längsregelung (Geschwindigkeit) sowie eine Höhenregelung für Werkzeuge implementiert werden.

Für diese Untersuchung wurden als Positionssensor ein zielerfolgendes Tachymeter und als Versuchsfahrzeug der Modell-LKW verwendet. Die Beurteilung der Regelgüte erfolgt anhand des Root Mean Square (RMS) der jeweils berechneten Querabweichungen zwischen der Referenztrajektorie und der tatsächlich gefahrenen Trajektorie. Die Querabweichungen errechnen sich aus dem zur Referenztrajektorie orthogonalen Abstand zweier diskreter Punkte der beiden Trajektorien. Durch eine Querregelung des Fahrzeugs werden diese Abweichungen minimiert, bzw. im Idealfall vollständig ausgeregelt (Beetz 2003).

Das Simulatorsystem kann als ein geschlossener Regelkreis betrachtet werden. In Beetz (2012a) wurde gezeigt, dass der Simulator in der Lage ist, mit einer Genauigkeit von etwa 2 bis 4 mm der Referenztrajektorie zu folgen.

Die Idee dieses Beitrags ist es, ein externes Messsystem, das nicht Teil des Regelkreises ist, zur Evaluierung der Regelgüte einzusetzen. Ein solches Messsystem ist der Laser Tracker API Radian. Dieses Instrument weist eine gleichwertige Winkelmessgenauigkeit und eine um

den Faktor 250 für kinematische und den Faktor 500 für statische Anwendungen höhere Streckenmessgenauigkeit als das Tachymeter auf (Automated Precision Inc. 2014b). Mit einem solchen externen Messsystem lassen sich Informationen sowohl über die Regelgüte als auch die Messgenauigkeit gewinnen (Beetz 2012b). In Beetz (2012b) wurde bereits eine Aufspaltung der beiden Größen mittels einer ähnlichen Methode vorgenommen. Im Unterschied zu diesem Beitrag, stand dort jedoch noch nicht das nachsteuernde Prisma für den Laser Tracker zur Verfügung. Aus diesem Grund musste ein aufwändiger Messaufbau realisiert werden, bei dem der Corner-Cube-Reflektor des Trackers, mit einem Öffnungswinkel von 60°, von oben angezielt werden musste, um permanente Sichtverbindung zu gewährleisten. Der dort verwendete Laser Tracker Leica AT901 musste dazu auf einem 8,50 m hohen Podest installiert werden. Näheres dazu kann aus (Beetz 2012b) entnommen werden. Solch ein Messaufbau ist beim nachsteuernden Prisma nicht mehr notwendig, da sich dieses während des Messvorgangs automatisch in Richtung Instrument ausrichtet und somit eine permanente Sichtverbindung gewährleistet.

Neben der Beschreibung dieses Messaufbaus und Auswerteverfahrens, soll die Untersuchung eine Aussage über die Regelgüte und Messgenauigkeit des Positionierungssensors erlauben.

2 Regelkreise

Zu Beginn dieses Kapitels sollen zunächst die Begriffe »Steuern« und »Regeln« genau definiert werden.

Nach DIN 19226 »(...) ist das Steuern, die Steuerung, der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen« (DIN 1994).

»Das Regeln, die Regelung ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe) erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird« (DIN 1994).

2.1 Prinzipieller Aufbau eines Regelkreises

In Abb. 1 ist eine Systemskizze eines geschlossenen Regelkreises dargestellt. Tab. 1 gibt einen Überblick über die Variablen und Komponenten des geschlossenen Regelkreises.

Das Regelziel kann, wie für den Fall der Baumaschinensteuerung, zeitlich variabel formuliert werden und ist als Führungsgröße im Sinne der Regelungstechnik zu verstehen. Dabei stellt die Führungsgröße $w(t)$ das geforderte zeitliche Verhalten der Regelgröße $y(t)$ dar. Liegt hiervon eine Abweichung vor, so wird von einer Regelabweichung

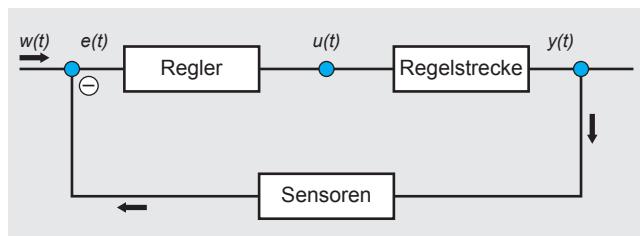


Abb. 1: Geschlossener Regelkreis

Tab. 1: Variablen und Komponenten des Regelkreises nach Gläser et al. (2008)

Variable	Regelkreis
$w(t)$	Führungsgröße
$e(t)$	Regelabweichung
$u(t)$	Stellgröße
$y(t)$	Regelgröße

chung $e(t)$ gesprochen. Diese wird vom Regler beeinflusst, der wiederum eine Stellgröße $u(t)$ erzeugt, die die Baumaschine, die sogenannte Regelstrecke (auch dynamisches System) beeinflusst. Der Zustand dieser Regelstrecke kann messtechnisch als Regelgröße $y(t)$ erfasst werden und wiederum mit der Führungsgröße verglichen werden.

2.2 PID-Regler

Bei dieser Untersuchung kommt ein PID-Regler zum Einsatz. Der PID-Regler besteht aus drei Anteilen, dem P-, dem I- und dem D-Anteil. Diese Anteile werden als Reglergrundtypen bezeichnet (Busch 2012). An dieser Stelle sollen diese unterschiedlichen Grundtypen kurz beschrieben werden.

Beim P-Regler ist das Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal. Bei einer Änderung des Eingangssignals erfolgt entsprechend eine proportionale Änderung des Ausgangssignals ohne zeitliche Verzögerung. Der Vorteil beim Einsatz des P-Reglers ist seine kurze Reaktionszeit ohne zeitliche Verzögerung. Nachteilig ist die Tatsache, dass Störungen nie vollständig ausgeregelt werden und somit immer eine Regeldifferenz bleibt (Busch 2012). Mathematisch kann zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße folgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$x_{aP} = K_p \cdot x_e, \quad (1)$$

K_p – Proportionalbeiwert,
 x_e – Eingangssignal,
 x_{aP} – Ausgangssignal des P-Reglers.

Beim I-Regler ist die Geschwindigkeit der Änderung der Ausgangsgröße proportional zur Eingangsgröße. Die Reaktion der Ausgangsgrößen erfolgt ohne zeitliche Verzögerung. Ist die Eingangsgröße konstant ungleich Null, dann steigt die Ausgangsgröße linear, also mit konstanter

Änderungsgeschwindigkeit, an. Die Stärke dieses Reglers liegt darin, dass Störungen ohne bleibende Regeldifferenz ausgeregelt werden. Allerdings fällt die Reaktionszeit auf Änderungen des Eingangssignals oder etwaige Störungen lang aus (Busch 2012). Der mathematische Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße kann wie folgt dargestellt werden:

$$x_{al} = K_I \cdot x_e \cdot \Delta t, \quad (2)$$

K_I – Integralbeiwert,

Δt – Zeitdifferenz zwischen Auswertezzeitpunkt und Beginn der Integrationszeit,

x_{al} – Ausgangssignal des I-Reglers.

Beim D-Regler ist die Ausgangsgröße proportional zur Änderung seiner Eingangsgröße. In Kombination mit anderen Grundtypen bewirkt der D-Anteil eine schnellere Ausregelung von starken Störungen. Allerdings ist ein D-Regler alleine nicht zur Ausregelung von Störungen geeignet, da er nur im Falle eines sich ändernden Eingangssignals eine Stellgröße abgibt. Liegt eine konstante Regeldifferenz vor, so kann diese nicht ausgeregelt werden (Busch 2012). Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße ist in (3) dargestellt:

$$x_{aD} = K_D \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t}, \quad (3)$$

K_D – Differenzialbeiwert,

x_{aD} – Ausgangssignal des D-Reglers.

Der PID-Regler kann mathematisch als eine Addition der Anteile der drei Grundtypen beschrieben werden. Das Ausgangssignal kann somit wie folgt zusammengefasst werden:

$$x_{aPID} = x_{aP} + x_{al} + x_{aD}. \quad (4)$$

Unter Verwendung der Gl. (1), (2) und (3) kann für das Ausgangssignal eines PID-Reglers folgender Zusammenhang aufgestellt werden:

$$x_{aPID} = \underbrace{K_P \cdot x_e}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{K_I \cdot x_e \cdot \Delta t}_{\text{I-Anteil}} + \underbrace{K_D \cdot \frac{x_e}{\Delta t}}_{\text{D-Anteil}}. \quad (5)$$

Nach Busch (2012) kann das Ausgangssignal auch als Funktion der Vorhaltezeit T_v und der Nachstellzeit T_n formuliert werden:

$$x_{aPID} = K_P \cdot \left(x_e + \frac{1}{T_n} \cdot x_e \cdot \Delta t + T_v \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \right), \quad (6)$$

Beim PID-Regler kommen die Stärken der einzelnen Grundtypen zum Tragen. Somit genügt dieser Regler den

hohen Anforderungen an Regelgeschwindigkeit und Genauigkeit. Allerdings ist für ein optimales Regelverhalten eine exakte Abstimmung der drei Parameter K_P , K_I , K_D bzw. K_P , T_v , T_n aufeinander notwendig. Diese Abstimmung kann unter Umständen sehr kompliziert ausfallen (Busch 2012). Sind die Parameter der Regelstrecke bekannt, so kann z.B. ein Näherungsverfahren nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) angewendet werden. Die Parameter werden dabei empirisch über die Analyse der Sprungantwort bestimmt (Mann et al. 2005). Bei unbekannten Kenngrößen der Regelstrecke eignet sich das Verfahren nach Ziegler und Nichols besser (Mann et al. 2005). Dieses experimentelle Verfahren basiert auf der Analyse der Reglerstabilitätsgrenze.

2.3 Regelgüte

Die Regelgüte hängt ursächlich von der Wahl der Regler ab. Nach Busch (2012) ist die Regelgüte von der optimalen Reglereinstellung abhängig. Als Maß für die Regelgüte ist dort die charakteristisch verbleibende Regeldifferenz Δx angegeben. Diese sollte bei einer optimalen Reglereinstellung Null sein. Als weitere Kriterien für die Regelgüte sind die Überschwingzeit x_m , die Anregelzeit T_{an} sowie die Ausregelzeit T_{aus} angegeben (Abb. 2).

Betrachtet man nicht nur die Einschwingzeit, sondern den Gesamtverlauf der Regelung, so wurde in Beetz (2012a) gezeigt, dass sich das Kriterium der Betragsflächen besser für die Beschreibung der Regelgüte eignet. Dabei werden alle vorangegangenen Kriterien in einem Kriterium vereint. Die Voraussetzung für einen guten

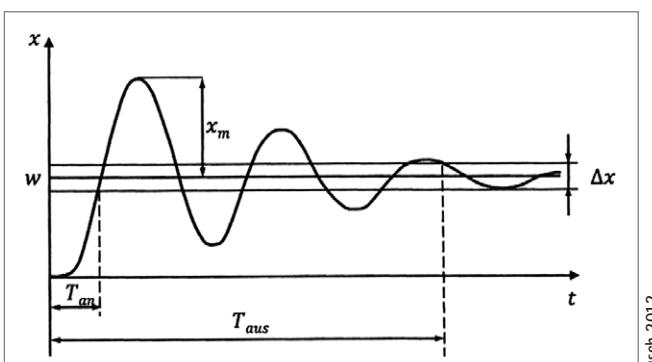


Abb. 2: Überschwingweite, An- und Ausregelzeit

Busch 2012

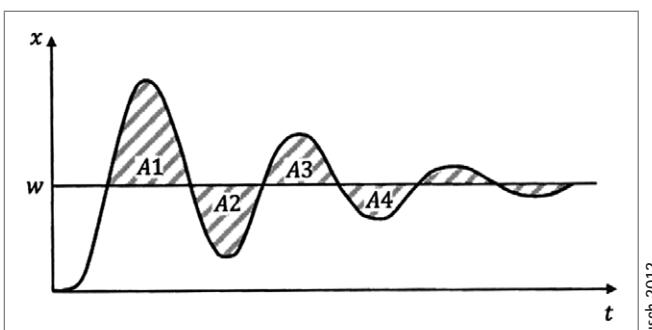


Abb. 3: Kriterium der Betragsfläche

Busch 2012

Regler bei dieser Definition ist, dass die Summe aller Teilflächen (A_1, A_2, \dots) aus Abb. 3 minimal wird.

Diese Beitragsfläche kann wie folgt berechnet werden:

$$A_{ges} = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \int_0^{\infty} |e| dt, \quad (7)$$

e – Regelabweichung.

In Mann et al. (2005) wird des Weiteren beschrieben, wie durch die Integration der Regelabweichung über die Zeit die Fläche unter der Kurve aus Abb. 3 zunächst als »beitragslineare Regelfläche« und anschließend als »quadratische Regelfläche« formuliert werden kann. Beetz (2012a) beschreibt, wie durch Diskretisierung und Normierung dieser »quadratischen Regelfläche« die Gl. (8) hergeleitet wird, welche den RMS als Gütekriterium definiert:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}, \quad (8)$$

e_i – Querabweichung zur Solltrajektorie,

n – Anzahl der Messungen.

Die Regelgüte ist beim Simulator, wie bereits in Abschnitt 1 aufgeführt, neben der Messgenauigkeit, anteilig in der Querabweichung zur Solltrajektorie enthalten. Die Berechnung der Querabweichung erfolgt nach Beetz (2003). Diese Querabweichungen werden anschließend zur Berechnung des RMS verwendet. Somit kann folgender Zusammenhang aufgestellt werden: Ist die Querabweichung klein, so ist auch der RMS der Regelgüte klein und daraus resultierend die Regelgüte hoch. Des Weiteren lässt sich festhalten, dass bei einer hohen Regelgüte eine minimale Querabweichung zur Solltrajektorie zu erwarten ist.

3 Aktueller Stand des Baumaschinensimulators am IIGS

Der IIGS Baumaschinensimulator dient als Untersuchungseinrichtung für unterschiedliche Sensoren, Regelalgorithmen und Filter. Das Ziel ist es, ein sich bewegendes Fahrzeug so genau wie möglich auf einer vordefinierten Trajektorie zu bewegen.

3.1 Prinzipieller Aufbau

Der Baumaschinensimulator besteht aus mehreren Komponenten. Ein Modell-LKW und eine Modell-Raupe im Maßstab 1:14 stehen zur Verfügung und repräsentieren unterschiedliche Baumaschinen. Diese werden wahlweise mit einem Tachymeter oder mit RTK-GNSS gesteuert. In dieser Arbeit kommt die Kombination aus Modell-LKW und Tachymeter zum Einsatz. Das Tachymeter erfasst

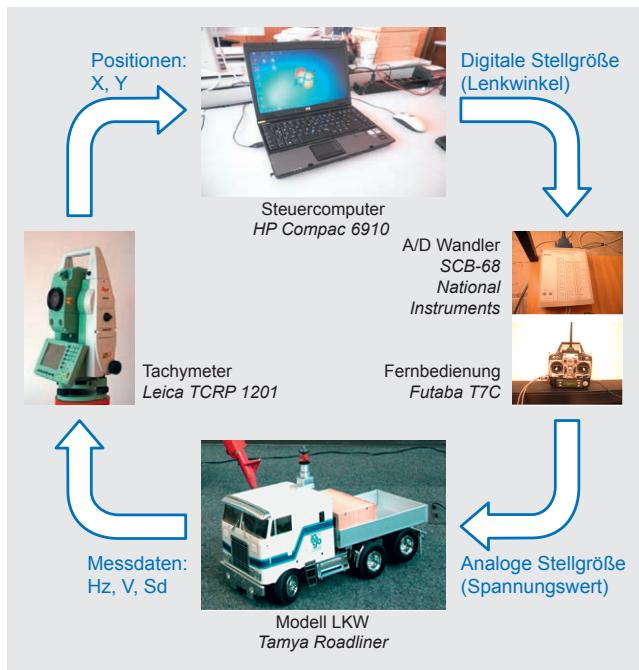


Abb. 4: Hardwarekomponenten im Regelkreis

die aktuelle Position und sendet diese an einen Steuerrechner. Der Steuerrechner verarbeitet die Position und errechnet die Querabweichung zur Solltrajektorie. Aus den Querabweichungen errechnet der Steueralgorithmus einen optimalen Lenkwinkel, die sogenannte Stellgröße (vgl. Tab. 1 und Tab. 2). Der Lenkwinkel, der zunächst digital zur Verfügung steht, wird dann im Analog-/Digital-Wandler in eine elektrische Größe, die Spannung, konvertiert. Dieser Spannungswert wird anschließend über die Fernbedienung an den Lenkmotor des Modell-LKWs gesendet, der den Steuerbefehl in einen Lenkwinkeleinschlag umsetzt. Dieser Vorgang wiederholt sich acht- bis zehnmal in der Sekunde. Diese Wiederholanzahl resultiert unmittelbar aus der maximalen Datenerfassungsrate des verwendeten Leica TCRP1201 Tachymeters (vgl. Tab. 3). Abb. 4 stellt die Simulator-Hardware-Komponenten im Regelkreis dar.

Tab. 2 repräsentiert die Zuordnung zwischen den Regelkreiskomponenten aus Tab. 1 und den entsprechenden Simulatorkomponenten.

Tab. 2: Zuordnung zwischen Regelkreiskomponenten und Simulatorkomponenten

Regelkreis	Simulator
Führungsgröße	Solltrajektorie
Regelabweichung	Querabweichung zwischen Soll und Ist
Stellgröße	Lenkwinkel
Regelgröße	Position und Orientierung
Regler	PID
Regelstrecke	Modell-LKW
Sensor	Tachymeter

Die programmtechnische Umsetzung wurde in der grafischen Programmiersprache *LabView* von National Instruments implementiert. Es stehen zwei Hauptgruppen an Programmen bereit. Die erste Hauptgruppe beinhaltet alle Programme und Funktionen, die zur Positionsbestimmung des Tachymeters sowie des Fahrzeugs benötigt werden. Die zweite Hauptgruppe besteht aus Programmen, die für die Führung des Fahrzeugs notwendig sind. Dort werden u. a. unterschiedliche Regler ausgewählt und deren Parameter eingestellt. Die Programme kommunizieren mit dem Tachymeter mittels einer Schnittstelle. Im Simulator stehen zwei Schnittstellen zur Verfügung. Die Kommunikation erfolgt entweder über die Leica GeoCOM- oder über die Leica MGUIDE-Schnittstelle. Hierbei handelt es sich um Protokolle und Befehlsketten, mit denen es möglich ist, den Sensor, hier das Tachymeter, aus der Software heraus anzusteuern. Umgekehrt werden die erfassten Sensordaten mittels der Schnittstelle an die Steuersoftware zur Verarbeitung weitergegeben. In dieser Untersuchung wird Leica MGUIDE als Schnittstelle zwischen dem Simulator und dem Tachymeter verwendet, da hier der Effekt des Synchronisierungsfehlers für das verwendete Tachymeter nicht nachweisbar ist (Beetz 2012a).

3.2 Tachymeter als Messinstrument

Das Tachymeter nimmt im Simulatorregelkreis die Rolle des Sensors ein. Das verwendete Tachymeter ist ein Leica TCRP1201. In Kombination wird das 360° Miniprisma GRZ101 als Ziel verwendet. Den Herstellerangaben sind die in Tab. 3 angegebenen Werte zu entnehmen.

3.3 Trajektorien und Referenznetz

Die Solltrajektorien wurden im Messkeller des IIGS eingerechnet und angelegt. Für den Indoor-Bereich stehen, wie in Abb. 5 dargestellt, drei unterschiedliche Trajektorien zur Verfügung (Beetz 2012a). Die Trajektorien liegen in diskreter Form, als Punkte mit einem Abstand von 10 cm, vor.

Die Trajektorien sind so konzipiert, dass unterschiedliche Trassierungselemente, wie Klohoide, Gerade oder

Tab. 3: Herstellerangaben Leica TCRP 1201 (Leica 2015b)

Winkelmessung	Hz, V: 1" (ca. 5 $\mu\text{m}/\text{m}$)
IR EDM Distanzmessung	Standardmodus: 2 mm + 2 ppm (für Stationierung) Tracking-Modus: 5 mm + 2 ppm (für kinematische Anwendungen)
Reichweite für 360° Miniprisma (GRZ101)	350 m im ATR-Modus (Prismenerkennung) 300 m im LOCK-Modus (Prismenverfolgung)
Maximale Geschwindigkeit (LOCK Modus)	Tangential (Standard-Modus): 5 m/s bei 20 m; 25 m/s bei 100 m Radial (Tracking-Modus): 5 m/s
Maximale Datenrate	8–10 Hz

Kreisbögen enthalten sind. Die »Acht« ermöglicht darüber hinaus die Durchfahrt von Links- und Rechtskurven. Die »Niere« gibt die Möglichkeit, Klohoiden und Kreisbögen mit unterschiedlichen Parametern zu durchfahren.

Das Referenznetz des Messkellers ist ein lokales System, bestehend aus sechs Punkten mit X, Y, Z Koordinatentripeln. Signalisiert werden die Punkte beim Tachymeterbetrieb mit Leica Rundprismen GPH1P. Die Abb. 6 stellt eine generalisierte und nicht maßstabsgetreue Skizze des Referenznetzes dar.

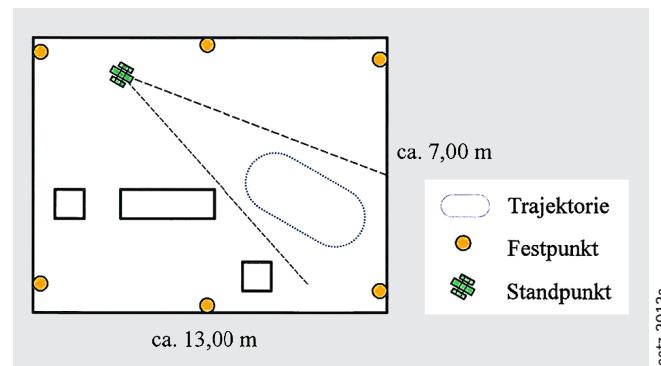


Abb. 6: Skizze des Referenznetzes des IIGS-Messkellers

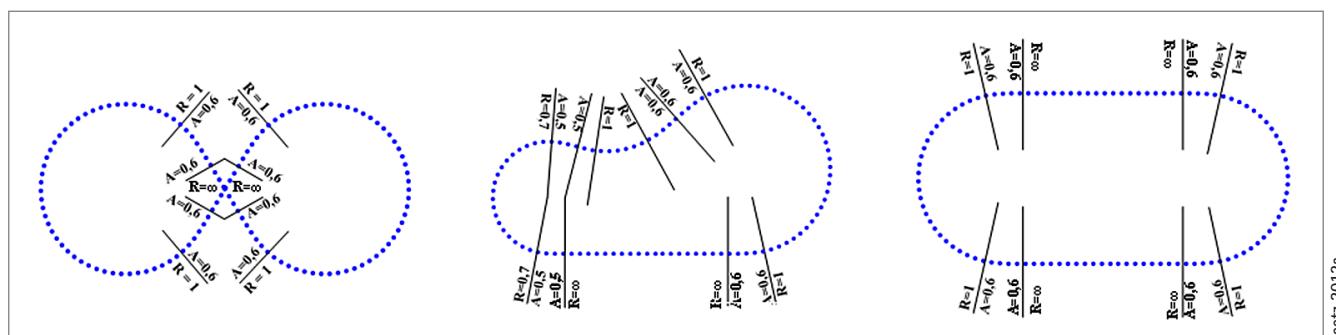


Abb. 5: Referenztrajektorien: »Acht« (links), »Niere« (Mitte) und »Oval« (rechts)

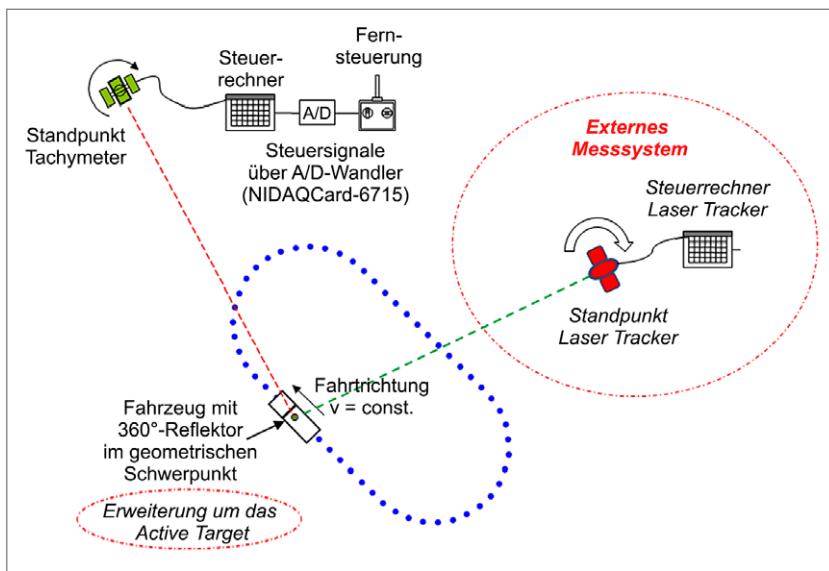


Abb. 7: Messanordnung Simulator-Tracker-System

Tab. 4: Testumgebung

Testumgebung	Szenario 1	Szenario 2
Trajektorie	»Oval«	»Acht«
Regler	PID mit $K_p = 25, T_n = 0,15 \text{ min}, T_v = 0,001$	
Geschwindigkeit des Modell-LKWs		ca. 10 cm/s
Schnittstelle zwischen Tachymeter und Simulator		Leica MGUIDE
Erfassungsmodus des Laser Trackers	ADM, zeitliche Diskretisierung von 10 Hz	

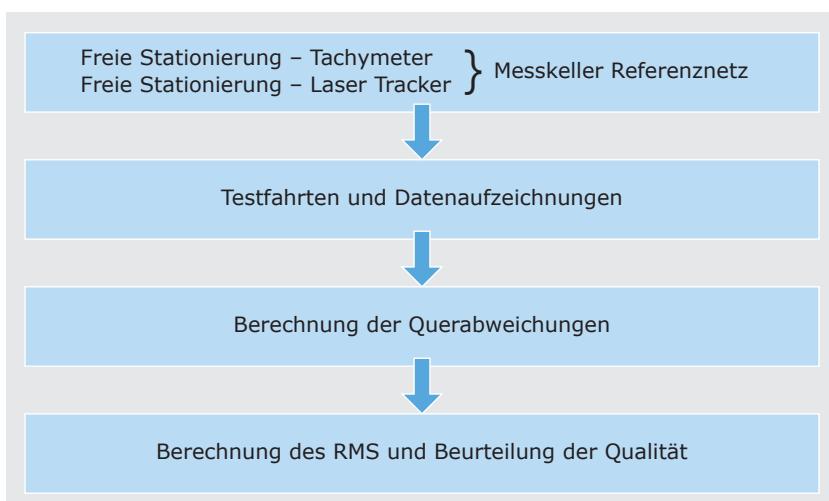


Abb. 8: Ablaufdiagramm des Auswerteprozesses

4. Evaluierung der Regelgüte

4.1 Messaufbau

Der prinzipielle Messaufbau ist in Abb. 7 dargestellt. Beide Messsysteme, Tachymeter und Laser Tracker, haben eigene Steuercomputer. Der Steuercomputer des Trackersystems steuert das Instrument mittels der Software *Spatial Analyzer* von Newriver Kinematics®. Hier können Kalibrierprogramme ausgeführt werden sowie unterschiedliche Messmodi voreingestellt werden. Solche Messmodi können z.B. vorgegebene räumliche oder zeitliche Diskretisierungen während der Erfassung sein.

Während dieser Untersuchung wurden zwei Trajektorien befahren, das »Oval« und die »Acht«. Es ergeben sich zwei Testszenarien, die in Tab. 4 zusammengefasst dargestellt sind.

Insgesamt werden pro Szenario zwei Runden gefahren. Es wird jeweils die zweite Runde ausgewertet, da in der ersten Runde das Einschwingen des Fahrzeugs auf die Solltrajektorie stattfindet.

Die anschließende Evaluierung erfolgt im Post-Processing. Die einzelnen Schritte des Auswerteprozesses sind im Ablaufdiagramm in Abb. 8 dargestellt.

4.2 Laser Tracker als Messinstrument

Der Laser Tracker wird als externes Messsystem eingesetzt und befindet sich systemtechnisch außerhalb des Regelkreises. Somit können unabhängige Kontrollmessungen des Simulatorsystems vorgenommen werden. Der hier zum Einsatz kommende Laser Tracker API Radian hat zwei Messmodi für die Streckenmessungen: interferometrisch (IFM) und mittels eines Absolutentfernungsmessgerätes (ADM). Bei kinematischen Anwendungen in Kombination mit dem nachsteuernden Prisma wird das ADM verwendet. Der IFM-Modus wird bei der Stationierung des Laser Trackers eingesetzt. Weitere Herstellerangaben sind in Tab. 5 angegeben.

Wie bereits erwähnt, verfügt der API Radian Laser Tracker über eine aktive Zielvorrichtung, das nachsteuernde Prisma. Dieses nachsteuernde Prisma,

Tab. 5: Technische Spezifikationen API Radian Laser Tracker (Automated Precision Inc. 2014b)

Winkelauflösung	$\pm 0,018''$
Winkelgenauigkeit	3,5 $\mu\text{m}/\text{m}$
Maximale Quergeschwindigkeit	6 m/s
Genauigkeit Streckenmessung IFM (statisch)	$\pm 10 \mu\text{m}$ oder 5 ppm
Genauigkeit Streckenmessung ADM (kinematisch)	10 ppm

vom Hersteller Active Target genannt (Abb. 9), hat die Eigenschaft, dass es sich unabhängig von seiner Position, immer Richtung Instrument bzw. Laserstrahl ausrichtet. Somit ist bei kinematischen Anwendungen gewährleistet, dass die Sichtverbindung zwischen Instrument und Ziel immer bestehen bleibt. Realisiert wird die Nachführung mittels zweier Servomotoren, die im Active Target eingebaut sind. Ein Motor stellt die horizontale, der andere die vertikale Richtung zum Instrument ein. Detaillierte Beschreibungen der Funktionsweise des Active Targets sind vom Hersteller nicht veröffentlicht, jedoch werden in den Arbeiten von Horst und von Gösseln (2012) sowie Kyle (2008) verschiedene Ansätze vorgestellt.

Der Beitrag von Horst und von Gösseln (2012) benennt Voraussetzungen, die für die Orientierung des Prismas notwendig sind. Diese sind Kenntnisse über die Position und Ausrichtung des Prismas zum Instrument, sowie Kenntnis über die Position des Instruments selbst. Methoden zum Gewinnen dieser Informationen basieren auf GPS-Messungen, Kompassen sowie Signalstärkemessungen mittels einer Richtantenne. Kyle (2008) beschreibt einen optischen Ansatz für die Bestimmung der Orientierung des Prismas, der in geschlossenen Räumen realisiert werden kann. Dieser Ansatz wird mit Hilfe eines Nadelochreflektors und eines CCD-Chips realisiert. Dabei passiert ein Teil des einfallenden Laserstrahls den Nadelochreflektor und trifft auf den CCD-Chip. Die x-y-Koordinate des CCD-Chips ist abhängig von der Richtung, aus der der Laserstrahl emittiert wird. Die Position des Reflektors sowie das Koordinatensystem des Trackers sind bekannt, bzw. können aus direkten Messungen des Trackers bestimmt werden (Kyle 2008).

Unter Genauigkeitsaspekten sind nachsteuernde Prismen generell den 360°-Prismen überlegen (Horst und von Gösseln 2012). Weitere Angaben zum hier eingesetzten Active Target können Tab. 6 entnommen werden.

Zum Betreiben des Laser Trackers wird, wie bereits erwähnt, das Softwarepaket *Spatial Analyzer* verwendet. Damit können sowohl Datenerfassungen, wie auch Auswertungen vorgenommen werden.

Vor der Messdurchführung wird das Active Target, zusätzlich zum Tachymeterprisma, mit einem Adapter am Modell-LKW befestigt. Dieser Adapter ist so konstruiert, dass sowohl das Tachymeterprisma als auch das Active Target in einer vertikalen Linie über dem Schwerpunkt

Tab. 6: Technische Spezifikationen Active Target (Automated Precision Inc. 2014a)

Zentriergenauigkeit	$\pm 3 \mu\text{m}$
Winkelgeschwindigkeiten	50 °/s
Gewicht	0,9 kg



Abb. 9:
Laser Tracker API Radian und Active Target

Automated Precision Inc. 2014b

des Fahrzeugs angeordnet sind. Um Falschanzielungen des Tachymeters zu vermeiden, wurde das Tachymeterprisma mit einer Verlängerung oberhalb des Active Targets befestigt. Falschanzielungen werden verursacht, wenn sich beide Ziele im Sichtfeld des Tachymeterfernrohrs befinden. Das Sichtfeld ist beim TCRP1201 mit 2,7 m bei 100 m Entfernung angegeben, was einem Winkel von 1,66 gon entspricht (Leica Geosystems 2015b). Die durch den Messaufbau bedingten, maximalen Zielentfernung im Messkeller betragen, je nach Standpunkt des Tachymeters, maximal zwischen 8 und 9 m. Nach Deumlich und Staiger (2002) entspricht der Durchmesser des Sehfeldes der Zielverfolgung bei Leica Tachymetern ungefähr 1/3 des Durchmessers des visuellen Sichtfeldes. Reduziert man die Sichtfeldangabe des Herstellers auf die maximale Zielentfernung von 9 m, ergibt sich für das visuelle Sichtfeld ein Wert von 24,3 cm. Somit muss der Abstand zwischen den beiden Reflektoren GRZ101 und Active Target mindestens 4,1 cm betragen, was dem maximalen Radius



Abb. 10:
Kombination aus Tachymeterprisma (oben) und Active Target (unten) am Modell-LKW

des Sichtfeldes der Zielverfolgung entspricht. Die eingesetzte Verlängerungsvorrichtung erfüllt diese Forderung. Die Abb. 10 zeigt die Adaptor-Reflektor-Kombination am Modellfahrzeug.

Das Instrument wird im Referenznetz, das auch für das Tachymeter verwendet wird, frei stationiert. Zur freien Stationierung werden die sphärischen Reflektoren (SMR) mit einer Zentriergenauigkeit von 0,0001" verwendet (Automated Precision Inc. 2014). Diese sind in Abb. 11 dargestellt.

Für die Streckenmessung bei der freien Stationierung kommt die IFM-Methode zum Einsatz. Anschließend wird



Abb. 11: Sphärische Reflektoren

der Messmodus auf ADM umgestellt, da der interferometrische Modus herstellerbedingt nicht für kinematische Messszenarien ausgelegt ist. Es folgt dann die Erfassung der gefahrenen Trajektorie mit dem Active Target.

Die Punkte des Referenznetzes (siehe Abb. 6) werden beim Einsatz des Laser Trackers mit den in Abb. 11 dargestellten, sphärischen Reflektoren und einem dafür speziell gefertigtem Adapter bestückt. Der Adapter ist so konstruiert, dass er hinsichtlich Offsets und Befestigungen dem



Abb. 12: Signalisierung der Referenzpunkte des Messkellernetzes am IIGS. Oben: sphärischer Reflektor mit Adapter für Laser-Tracker-Betrieb, unten: Leica Rundprisma GPH1P für Tachymeterbetrieb

Adapter des Rundprismas gleicht. Die Konstruktion wurde so gewählt, um die Befestigungszapfen des Messkellers nutzen zu können. Die Signalisierung des Netzes ist in Abb. 12 dargestellt.

4.3 Trennung von Regelgüte und Messgenauigkeit

Die Aussage über die Genauigkeit wird anhand der mittleren quadratischen Fehler (RMS) gewonnen (siehe (8)), die sich aus Querabweichungen zwischen der Referenztrajektorie, der tatsächlich gefahrenen Trajektorie, bestimmt mit dem Laser Tracker, und der mit dem Tachymeter gemessenen Trajektorie berechnen lassen.

Wie zuvor erwähnt, beinhaltet der aus den Simulator-testfahrten hervorgehende RMS-Wert der Querabweichungen sowohl die Messgenauigkeit als auch die Regelgüte.

Die Messgenauigkeit ist ursächlich dem Messinstrumentarium, hier dem Tachymeter zuzuordnen. Dort sind Aufstellungsfehler, Stationierungsfehler, Instrumentenfehler, Anzielfehler, Totzeiten, Synchronisierungsfehler sowie weitere Einflüsse zusammengefasst.

Durch die Hinzunahme eines externen, unabhängigen Messsystems, dem Laser Tracker, ist es möglich, die beiden Größen voneinander zu trennen. Um die Trackerdaten auszuwerten und Aussagen über die Regelgüte des Simulators machen zu können, wird ein in Matlab implementierter Algorithmus verwendet, der die Querabwei-

chung zwischen der Referenztrajektorie und der tatsächlich gefahrenen Trajektorie, berechnet.

Je nach Vergleichskombination der unterschiedlichen Trajektorien können in Anlehnung an Beetz (2012b) folgende Definitionen vorgenommen werden:

- der RMS zwischen Tachymeter-Trajektorie und Referenztrajektorie beinhaltet die Summe aus Regelgüte und Messgenauigkeit,
- der RMS zwischen Referenztrajektorie und Laser-Tracker-Trajektorie repräsentiert die Regelgüte,
- der RMS zwischen der Tachymeter-Trajektorie und der Laser-Tracker-Trajektorie beschreibt die Messgenauigkeit.

Nach diesen Kriterien werden im nachfolgenden Abschnitt die Auswertung und die Beurteilung der Regelgüte vorgenommen.

5 Ergebnisse

Die Abb. 13 und 14 zeigen die Querabweichungen aus den durchgeführten Testfahrten der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Qualitätsparameter.

Den dargestellten Abb. 13 und 14 ist zu entnehmen, dass der Graphenverlauf der Regelgüte deutlich glatter ist als die Verläufe der Graphen für Querabweichungen und Messgenauigkeiten. Dieses Verhalten gründet hauptsächlich in der Anzahl der Messungen, bzw. der Anzahl der Vergleichsoperationen, die für die Evaluierung durchgeführt werden. Während bei der Regelgüte 1.016 Punkte für das »Oval« bzw. 1.308 Punkte für die »Acht« für die Berechnung zur Verfügung stehen, sind es bei den beiden anderen Qualitätsparametern deutlich mehr. Deren Anzahl der Vergleichsoperationen hängt von der Anzahl der Tachymettermessungen ab, die wiederum von der gefahrenen Geschwindigkeit des Modell-LKWs abhängen. Der insgesamt unruhige Verlauf aller Qualitätsparameter in den Abb. 13 und 14 ist auf die verbleibende Regeldifferenz des PID-Reglers aufgrund der Zeitabhängigkeit der Führungsgröße zurückzuführen.

In Abb. 15 sind beispielhaft die Referenz-, die Laser-Tracker- und die Tachymetertrajektorie in einem vergrößerten Bildausschnitt dargestellt.

Tab. 7 zeigt die Ergebnisse der Testfahrten. Die RMS-Werte liegen für die Regelgüte für beide Trajektorien bei 3,1 mm. Die Messgenauigkeit liegt bei 2,8 mm für das »Oval« und bei 2,9 mm für die »Acht«. Diese Messgenauigkeiten decken sich mit den Herstellerangaben für das Tachymeter (vgl. Tab. 3).

Tab. 7: RMS der Qualitätsparameter aus beiden Testfahrten

	Querabweichung [m]	Regelgüte [m]	Messgenauigkeit [m]
Oval	0,0029	0,0031	0,0028
Acht	0,0028	0,0031	0,0029

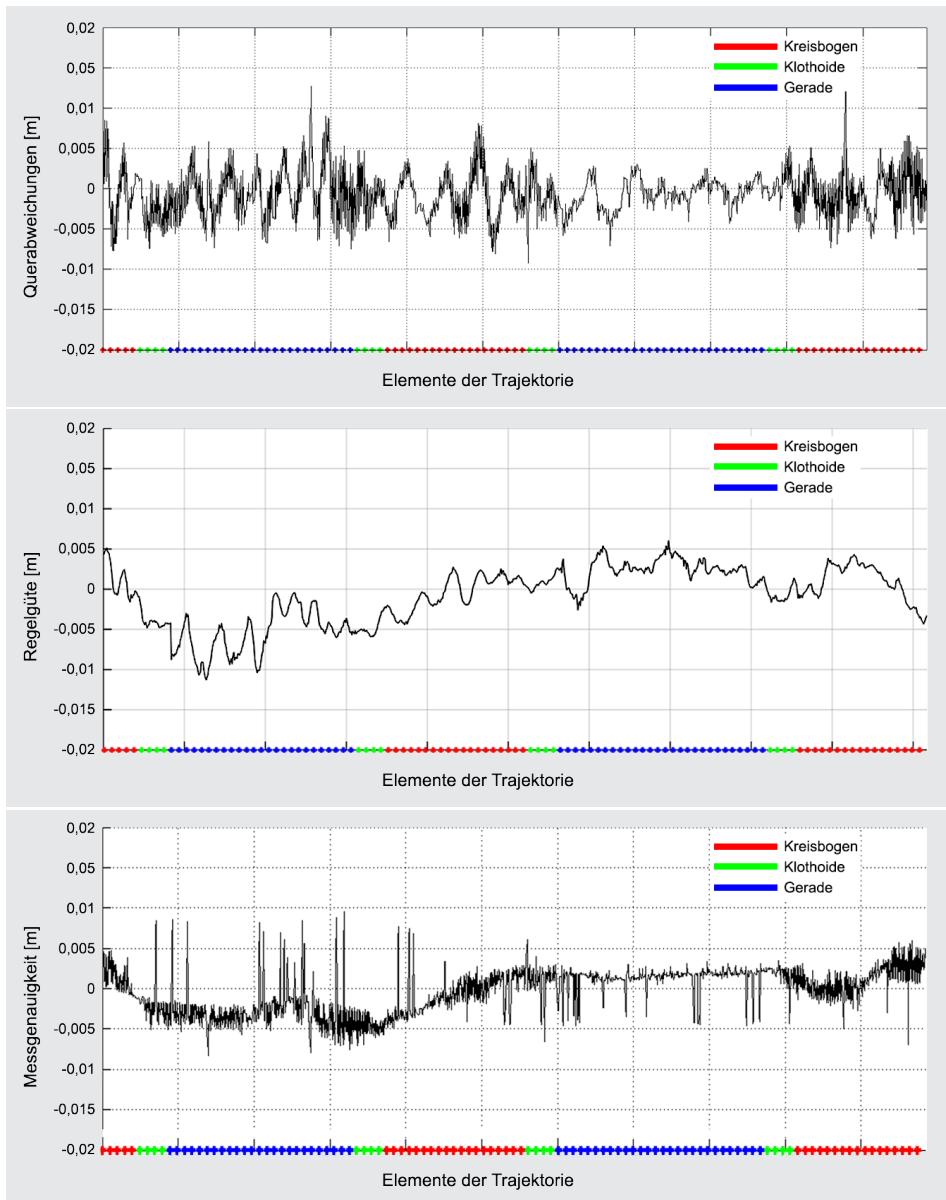


Abb. 13:
Ergebnisse der Testfahrt »Oval«.
Oben: Querabweichungen,
Mitte: Regelgüte,
unten: Messgenauigkeit

Abschnitt 4.3 beschreibt, wie sich Querabweichungen als Summe aus Regelgüte und Messgenauigkeit zusammensetzen. Demnach wäre zu erwarten, dass eine quadratische Addition der RMS-Werte für Regelgüte und Messgenauigkeit, gleich den RMS-Werten der Querabweichungen sind. Die Betrachtung der Zahlenwerte zeigt jedoch, dass das Ergebnis einer solchen Addition nicht die erwarteten Resultate liefert. Somit liegt die Vermutung nahe, dass systematische Einflüsse durch eine isolierte Betrachtung der Querabweichungen nicht aufgedeckt werden können. Erst die Anwendung des hier durchgeführten Verfahrens zur Aufspaltung in Regelgüte und Messgenauigkeit erlaubt es, Systematiken aufzudecken. Die numerischen Werte deuten darauf hin, dass Systematiken vorliegen. Die Untersuchung dieser bleibt weiteren Beiträgen vorbehalten.

In Beetz (2012b) wurde gezeigt, dass für das TCRP 1201 in Kombination mit der Leica MGUIDE-Schnittstelle für Geschwindigkeiten von 10 cm/s RMS-Werte von 3 mm für Messgenauigkeit und Regelgüte erreicht werden können. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Testfahrten bestätigen diese Werte.

Allerdings wurde festgestellt, dass die erfassten Querabweichungen durch den vertikalen Aufbau der beiden Ziele auf dem LKW-Gehäuse beeinflusst werden. Abb. 10 zeigt, dass die Aufbauhöhe im Zusammenspiel mit dem Eigengewicht des Active Target zu Schwingungen der Gesamtkonstruktion führt. Diese Schwingungen werden dadurch verstärkt, dass die Konstruktion an einem Kunststoffgehäuse befestigt ist. Somit beeinflussen die durch das Fahren verursachten Schwingungen die Lage der beiden Reflektoren und verringern sowohl die allgemeine Qualität als auch die Position der streng vertikal übereinander angeordneten Reflektoren. Zusätzlich implizieren die Servomotoren des Active Targets beim Nachsteuern kleine Kraftmomente, die ebenfalls in Schwingungsbewegungen des Aufbaus resultieren.

Die Summe dieser Einflüsse führt zur Verringerung der Genauigkeit während der Testfahrten. Die daraus resultierenden Genauigkeitseinbußen können hier jedoch nicht quantitativ angegeben werden.

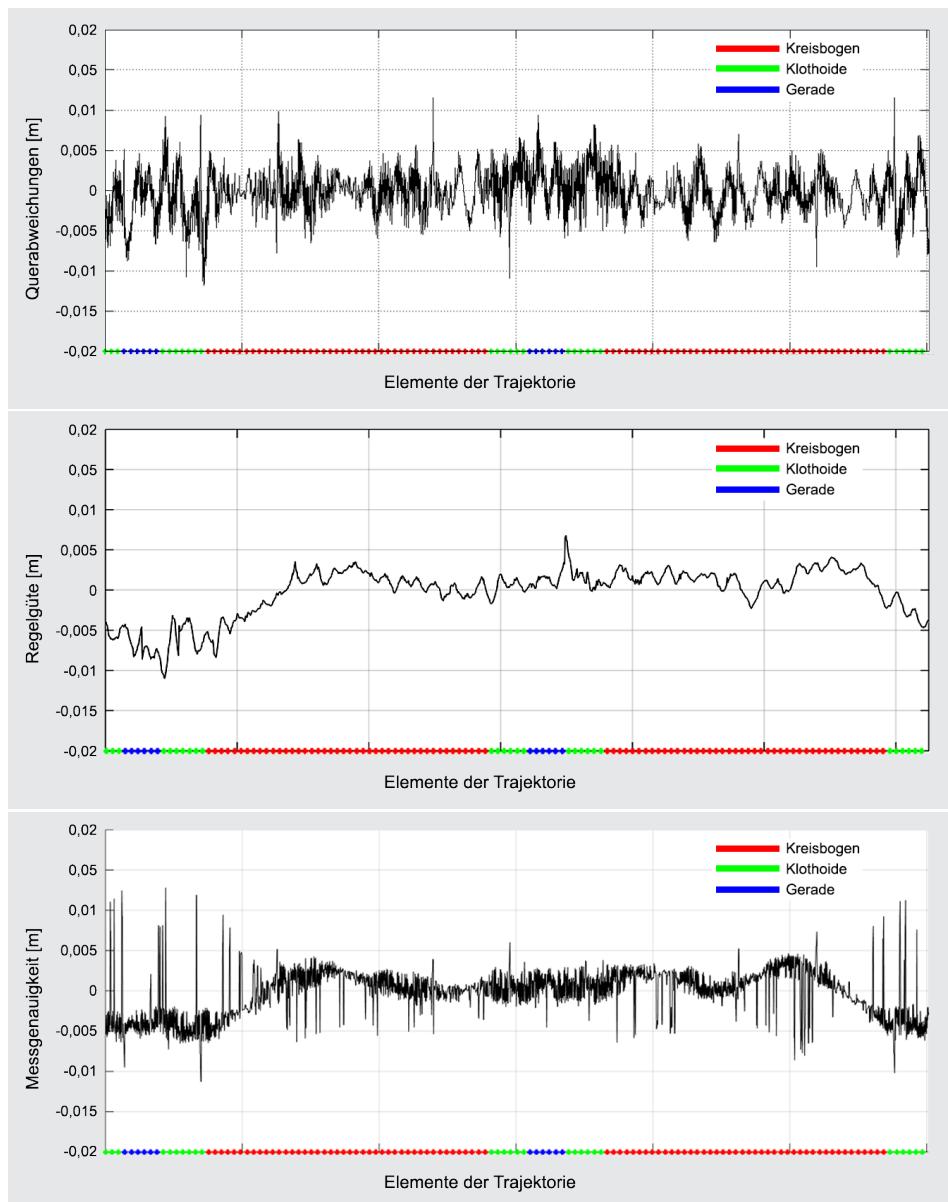


Abb. 14:
Ergebnisse der Testfahrt »Acht«.
Oben: Querabweichungen,
Mitte: Regelgüte,
unten: Messgenauigkeit

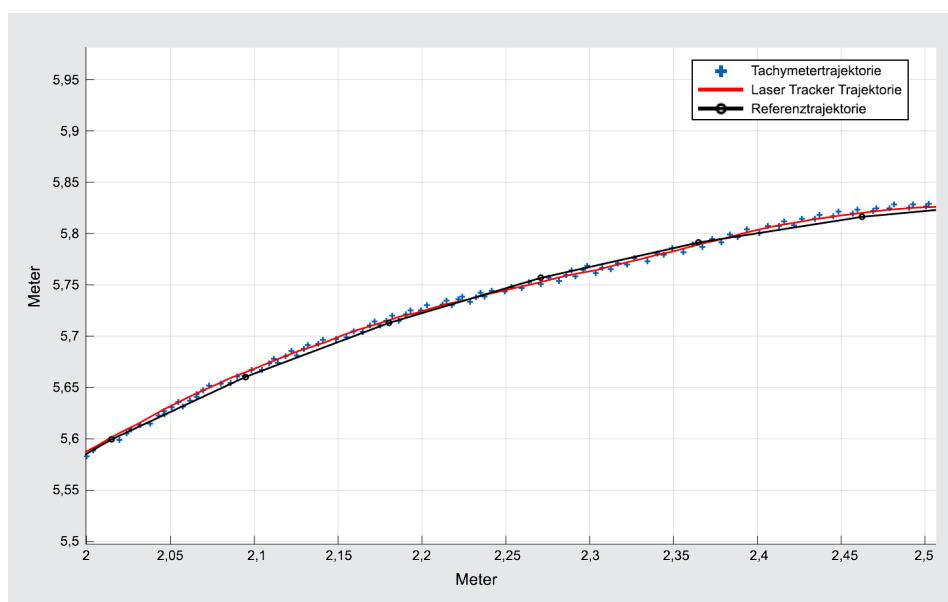


Abb. 15:
Referenz-, Laser-Tracker- und Tachymetertrajektorie im vergrößerten Ausschnitt

6 Fazit und Ausblick

Es wurde ein neues Evaluierungssystem für die Evaluierung der Regelgüte entwickelt. In dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Evaluierung der Regelgüte des Baumaschinensimulators mittels Laser Tracker und Active Target möglich ist. Der Tracker, hier als externes Messsystem eingeführt, weist eine gleichwertige Winkelmessgenauigkeit und eine um den Faktor 250 höhere kinematische Streckenmessgenauigkeit auf, als das Tachymeter, das den Simulator steuert. Aussagen über die Messgenauigkeit und die Regelgüte konnten aus den erfassten Messdaten abgeleitet werden. Für beide Trajektorien ist eine Regelgüte von 3,1 mm festgestellt worden. Die erreichte Messgenauigkeit lag durchschnittlich bei 2,9 mm.

Es ist jedoch anzumerken, dass die Evaluierung unter Laborbedingungen stattgefunden hat. Bei der Nutzung des Tachymeters in Außenbereichen oder auf Baustellen ist mit Genauigkeitseinbußen zu rechnen, da dort Einflüsse wie z.B. Refraktion eine Rolle spielen. Des Weiteren verursachen Dieselmotoren realer Baumaschinen ebenfalls Schwingungen und Vibrationen.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei der freien Stationierung des Trackersystems das gleiche Festpunkt- netz wie für das Simulatorsystem verwendet wird. Eventuelle Ungenauigkeiten des Festpunktnetzes beeinflussen die Stationierungsgenauigkeit des Trackers.

Für zukünftige Untersuchungen ist es notwendig die Regelparameter des PID-Reglers besser aufeinander abzustimmen, um dem instabilen Zielaufbau besser Rechnung zu tragen und das Aufschwingen zu reduzieren. Auch der Einsatz alternativer Regler, wie z.B. Fuzzy-Regler, ist denkbar, um das Aufschwingen des Zielaufbaus am Modell-LKW zu minimieren. Ebenfalls ist eine Verstärkung der LKW-Kunststoffplattform, die den Aufbau trägt, sinnvoll.

Am IIGS sind weitere Testfahrten und Untersuchungen zur Trennung von Messgenauigkeit und Regelgüte für GNSS-Sensoren geplant.

Literatur

- Automated Precision Inc. (2014a): Active Target Specifications, www.apisensor.com. Letzter Zugriff: 03.04.2014.
- Automated Precision Inc. (2014b): Technische Spezifikationen, API Radian Laser Tracker. www.apisensor.com. Letzter Zugriff: 03.04.2014.
- Beetz, A. (2012a): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 688.
- Beetz, A. (2012b): Separation of Control Quality and Measurement Accuracy for Guiding Control Tasks of an Indoor Construction Machine Simulator. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 13–15th November 2012.
- Beetz, A., Schwieger V. (2008): Integration of Controllers for Filter Algorithms for Construction Machine Guidance. 1st International Conference on Machine Control & Guidance, 2008.

- Beetz, A. (2003): Entwicklung ausgewählter Komponenten eines Regelkreises zur Fahrzeugsteuerung und deren Realisierung in einem Testsystem. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- Busch, P. (2012): Elementare Regelungstechnik. 8., überarbeitete Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- DIN (1994), DIN 19226: Begriffe der DIN 19226 – Regelung und Steuerung. Beuth Verlag, Berlin.
- Gläser, A., Möhlenbrink, W., Schwieger, V. (2008): A Contribution to Construction Machine Automation. *Journal of Applied Geodesy* 2 (2008). DOI 10.1515/JAG.2008.011
- Gläser, A. (2007): Modulares System zur Automatisierung hochgenauer geometrischer Positionierung und Bahnführung im Bauwesen. Dissertation, Universität Stuttgart. http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3169/pdf/Diss_Glaeser.pdf.
- Heikkilä, R., Jaakkola, M. (2003): Automatic Control of Road Construction Machinery – Feasibility and Requirements. 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.
- Horst, S., von Gösseln, I. (2012): Active Prism for Total Station Measurements. 3rd International Conference on Machine Control & Guidance Proceedings, 2012.
- Kerekes, G. A. (2014): Evaluation of the Control Quality for a Construction Machine Simulator using the Laser Tracker API Radian. Masterarbeit, Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- Kirschner, H., Stempfhuber, W. (2008): The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations – A State of the Art Report on the Leica TPS1200+. 1st International Conference on Machine Control & Guidance, 2008.
- Kunze, G. (2011): Fachskript Transport- und Baumaschinentechnik – Einleitung. Elektronische Ressource. www.baumaschine.de. Letzter Zugriff: 05.01.2015.
- Kyle, Stephen (2008): Roll Angle in 6DOF Tracking. Coordinate Metrology Society Conference, Charlotte-Concord, 2008.
- Leica Geosystems (2006): GeoCOM Reference Manual 2006.
- Leica Geosystems (2015a): Produktinformation Prismen Maßangaben. www.leica-geosystems.de. Letzter Zugriff: 15.04.2015.
- Leica Geosystems (2015b): Technische Daten TPS 1200. www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/tps1200/brochures-datasheet/Leica_TPS1200+_TechnicalData_en.pdf. Letzter Zugriff: 15.04.2015.
- Mann, H., Schiffelgen, H., Frorier, P. (2005): Einführung in die Regelungstechnik. 10. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien.
- Meyer, H. J. (2003): Anwendung von geodätischen Positionsmesssystemen in Straßenbaumaschinen. Baumaschinentechnik 2003 – Erfahrungen, Methoden, Innovationen – Fachtagung 20./21.03.2003 Dresden. Heft Nr. 23 der Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen.
- Newriver Kinematics (2014): Spatial Anslyzer User Manual. www.kinematics.com. Letzter Zugriff: 26.05.2015.
- Stempfhuber, W., Ingensand, H. (2008): Baumaschinenführung und -steuerung – Von der statischen zur kinematischen Absteckung. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jahrgang 133, Heft 1.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Otto Lerke | Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger
Institut für Ingenieurgeodäsie, Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
Tel.: 0711 685-84050 [Lerke]
Tel.: 0711 685-84041 [Schwieger]
otto.lerke@ingeo.uni-stuttgart.de
volker.schwieger@ingeo.uni-stuttgart.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaeis.info.