

Auswertetechniken von Lasertriangulationssensoren am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II

Evaluation of Laser Triangulation Based Sensors Using the Example of the Rail Track Surveying System RACER II

Thorsten Strübing

Die geometrische Erfassung von Objekten, beispielsweise Gleisen, erfolgt bei Multi-Sensor-Systemen oftmals nicht mehr durch die Signalisierung konkreter Punkte, sondern durch die Erhebung von Massendaten mittels terrestrischem Laserscanning, Photogrammetrie oder vergleichbaren Messverfahren. Im Folgenden werden beispielhafte Ansätze zur Ableitung von Objektparametern anhand von Messdaten der Lasertriangulationssensoren des Gleisvermessungssystems RACER II vorgestellt. Aus den gewonnenen Messdaten werden automatisch die interessierenden Gleisparameter abgeleitet, wobei Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und entsprechend nachzuweisen sind.

Schlüsselwörter: Gleisvermessung, Lasertriangulation, Scanning, Splines

Geometric acquisition of objects, for instance rail tracks, by multi-sensor systems today is often not performed by signalization of concrete points, but by the collection of mass data using terrestrial laser scanning, photogrammetry or comparable measurement procedures. Exemplary approaches to obtain object parameters from measurements of laser triangulation sensors by the rail track surveying system RACER II are given below. From the collected measurements, the interested rail track parameters are generated automatically. However, accuracy and reliability of the results have to be ensured and established equivalently.

Keywords: Rail track surveying, laser triangulation, scanning, splines

1 EINLEITUNG

Terrestrische Laserscanner ermöglichen eine schnelle und berührungslose Abtastung komplexer Oberflächenstrukturen. Das Messergebnis bilden Massendaten in Form von Punktwolken oder Profilen. Je nach Projektionstechnik sind die einzelnen Punkte entlang der Objektoberfläche jedoch unregelmäßig, d.h. das projektive, systematische Raster wird abhängig von der Entfernung und Beschaffenheit des Objekts entlang der Objektoberfläche verzerrt. Infolgedessen werden die einzelnen Messpunkte durch den Auftreffwinkel des Laserstrahls, der Rauigkeit oder dem Material der Oberflächenstruktur unterschiedlich beeinflusst, wodurch für die Punkt-

wolke beziehungsweise die Profilmessung keine homogene Datenqualität unterstellt werden kann. Diese Eigenschaft wirkt sich auf die Modellierung der Messdaten im stochastischen Modell aus, insbesondere, wenn aus den Messdaten geometrische Primitive wie Geraden oder Bögen im Rahmen einer Ausgleichung abgeleitet werden sollen. Zudem wirken sich Verschmutzungen an der Objektoberfläche, temporäre Sichthindernisse oder Reflexionsstörungen des Laserstrahls auf die Bestimmung solcher Größen aus.

Punktwolken oder Profilmessungen enthalten die gesuchten geometrischen Informationen nur indirekt, weil relevante Messpunkte

nicht exakt signalisiert werden, so wie es vergleichsweise der Operateur eines Tachymeters durchführen würde. Um beispielsweise einen Eckpunkt aus einer Profilmessung ableiten zu können, muss im Regelfall der Schnittpunkt von Geraden bestimmt werden. Die Geraden werden ihrerseits durch Messpunkte repräsentiert, die aufgrund ihrer individuellen Messunsicherheit im Rahmen einer Ausgleichung zu berücksichtigen sind. Die Messpunkte einer Geraden müssen auf grobe Ausreißer hin untersucht werden, damit sich diese nicht als Hebelbeobachtungen auswirken können. Ferner wirkt sich eine zu geringe Anzahl von Messpunkten ebenfalls negativ auf die Ableitung geometrischer Informationen aus.

2 GLEISVERMESSUNG

Die Gleisvermessung umfasst insbesondere Vermessungsaufgaben, welche die geometrischen Parameter eines Gleises relativ zu benachbarten Messpunkten entlang der Gleisgeometrie (innere Geometrie) oder in einem übergeordneten Bezugssystem (äußere Geometrie) beschreiben. Nachfolgend wird lediglich der Gleisoberbau hinsichtlich des Verbunds aus Schwellen und Gleis, Letzteres bestehend aus zwei Schienensträngen, betrachtet. Informationen zu weiteren Bestandteilen des Gleiskörpers können beispielsweise in /Lichtberger 2003/ nachgeschlagen werden.

Die Erfassung der Gleisparameter erfolgt entweder taktil über Anschlagpunkte des Gleisvermessungssystems (Abb. 1), meist in Kombination mit induktiven Weggebern oder berührungslos über punktuelle oder linienhafte Lasermesssysteme sowie beispielsweise Ultraschallsensoren. Berührungslose Sensoren haben den Vorteil, dass sie die zu vermessende Oberfläche nicht beeinflussen und verschleißarm sind. Linienhafte Lasermesssysteme wie Profillaserscanner oder Lasertriangulationssensoren ermöglichen die nahezu simultane Erfassung einer komplexen Oberflächenstruktur, aus der sich neben den interessierenden Gleisparametern beispielsweise auch die Abnutzung der Schienenoberfläche ermitteln lässt. Demgegenüber können sich taktiler Sensoren vorteilhaft bei Verschmutzungen der Objektoberfläche auswirken, sofern der Anpressdruck ausreichend ist, um den Schmutz zu verdrängen. Andererseits resultiert eine Verschmutzung der Anschlagpunkte in entsprechenden Offsets, welche die Messungen beeinflussen.

2.1 Gleisparameter

Die Gleisgeometrie lässt sich durch Lage und Höhe der Gleismittelachse (GMA) im übergeordneten Koordinatensystem, der Spurweite sowie Überhöhung (Querneigung) und Gradiente (Längsneigung) an einem beliebigen Punkt des Gleises beschreiben (Abb. 2). Dabei wird die GMA durch den Mittelpunkt der Schnittpunkte der beiden Schienenmittelachsen (SMA) mit der Tangentialgeraden der Schienenoberkanten definiert. Durch Parallelverschiebung der

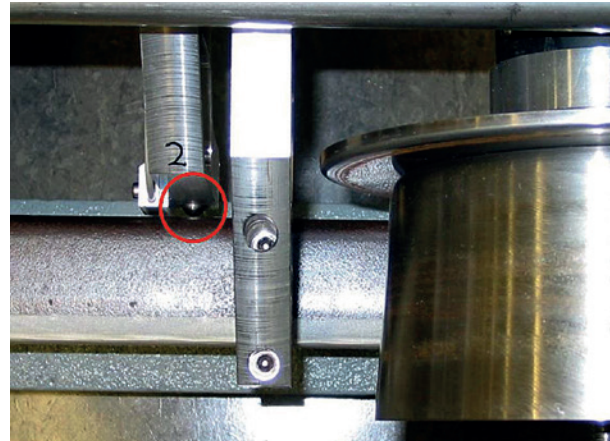


Abb. 1 | Taktiler Erfassung der Gleisparameter über Anschlagpunkte

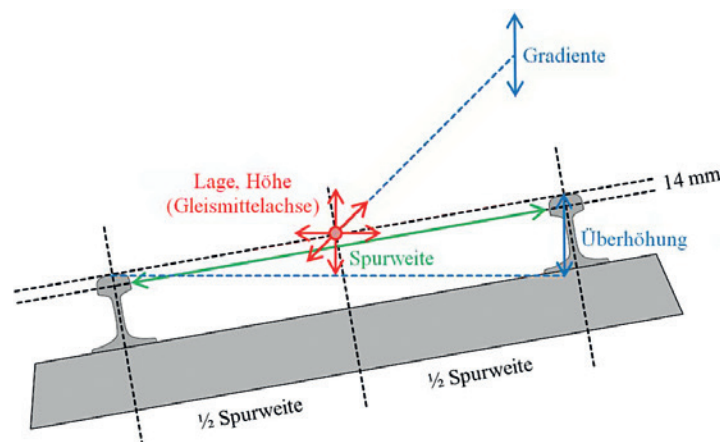


Abb. 2 | Gleisparameter der äußeren Geometrie /Strübing 2015/

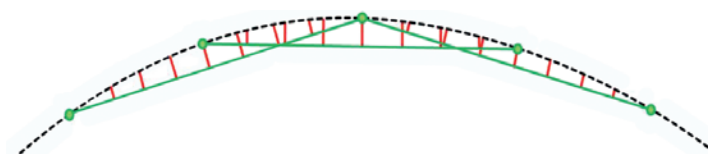


Abb. 3 | Gleisparameter der inneren Geometrie /Strübing 2015/

Tangentialgeraden um einen festen Betrag (in der Regel 14 mm) erhält man die Spurweite, welche die Berührungspunkte der Radinnenkränze mit den Schieneninnenkanten eines Schienenfahrzeugs repräsentiert. Die Überhöhung wird für gewöhnlich in mm/1,5 m angegeben, die Gradiente in Promille. Beide Parameter beziehen sich auf den absoluten Höhenbezug des übergeordneten Koordinatensystems.

Die innere Geometrie eines Gleises benötigt im Gegensatz zur äußeren Geometrie kein übergeordnetes Bezugssystem. Zwei Punkte entlang der GMA bilden eine Sehne (Abb. 3, grün), wobei die Pfeilhöhen jeweils die Abstände eines Bogenpunkts normal zur Sehne eines Bogens darstellen (Abb. 3, rot). Die einzelnen Sehnen können aneinandergereiht oder überlappend angeordnet werden. Für weitere Verfahren wird beispielsweise auf /Möser et al. 2000/ und /Retscher 1996/ verwiesen.

Die Verfahren zur Bestimmung der relativen und äußeren Geometrie können entweder getrennt voneinander oder kombiniert wie

beispielsweise im Langsehenverfahren bestimmt werden. Beim Langsehenverfahren werden zusätzlich die Sehnendpunkte des relativen Verfahrens im übergeordneten Bezugssystem koordiniert. Durch stetige Bestimmung der in Abb. 2 dargestellten Gleisparameter im übergeordneten Bezugssystem kann die innere Gleisgeometrie im Nachgang ermittelt werden, sofern die benötigten Positionen der Sehnendpunkte und der Pfeilhöhen erfasst wurden.

Die innere Geometrie repräsentiert die Gleichförmigkeit eines Gleises und beeinflusst damit maßgeblich den Fahrkomfort, die Abnutzung der Schienen sowie die maximal mögliche Geschwindigkeit eines Schienenfahrzeugs auf der Strecke. Durch die äußere Geometrie wird das Gleis innerhalb seiner unmittelbaren Umgebung beschrieben, wodurch unter anderem durch die Beschreibung von Lichtraumprofilen Kollisionen der Schienenfahrzeuge mit Bahnsteigen, Tunnelwänden oder dem Gleisoberbau (Masten, Leitungen etc.) vermieden werden.

2.2 Gleisvermessungssystem RACER II

Für die Bestimmung der Gleisparameter werden in der Praxis halb- oder vollautomatisierte Messsysteme eingesetzt. Eine Auswahl dieser Systeme ist in /Strübing 2015/ dargestellt. Die nachfolgenden Auswertemethoden beziehen sich auf das Gleisvermessungssystem RACER II (Abb. 4), das am Institut für Geodäsie an der Universität der Bundeswehr München in Kooperation mit dem Schweizer Ingenieurbüro Ristag /Ristag Ingenieure AG 2016/ entwickelt wurde. Eine Aufgabe von RACER II bestand in der Kontrolle der Gleise beider Röhren des Gotthard-Basistunnels im Auftrag der AlpTransit Gotthard AG, wobei insgesamt 114 km feste Fahrbahn vermessen wurden.

Das Gleisvermessungssystem RACER II besteht aus einem Mess- und einem Antriebswagen. Der Messwagen ist auf drei Laufrädern gelagert, wobei die starre Rahmenkonstruktion, abgesehen von der durch Temperaturunterschiede beeinflussten Materialausdehnung, die innere Orientierung der einzelnen Sensoren im Koordinatensystem des Messwagens (Messwagensystem – MWS) konstant hält. Das MWS wird durch ein Präzisionstachymeter (Leica TM30 /Leica Geosystems 2009/) unter Abschaltung des geräteinternen Kompensators im übergeordneten Bezugssystem positioniert und orientiert. Zusätzlich werden Längs- und Querneigung des MWS über einen



Abb. 4 | Gleisvermessungssystem RACER II /Strübing 2015/

Zweiachs-Neigungsmesser kontrolliert. Zur Erfassung der meteorologischen Daten sind im RACER II zwei Temperatursensoren und ein Luftdrucksensor verbaut. Die Stromversorgung wird über zwei 48-V-Akkus gewährleistet, wie sie für Elektrofahrräder verwendet werden. Damit kann das Gleisvermessungssystem problemlos eine 10-Stunden-Schicht betrieben werden.

Der Bezug des MWS zu den Schienen erfolgt über vier Lasertriangulationssensoren der Firma MEL vom Typ M2-ILAN 120/60 /MEL 2010/, welche die Schieneninnenkanten mit einer Abtastrate von 100 Hz und etwa 290 Messpunkten pro Profillinie erfassen. Drei Sensoren ermöglichen die Kompensation einer horizontalen Verdrehung des Messwagens gegenüber der GMA, der vierte Sensor dient der Redundanz und damit der Kontrolle der Messwerte sowie der automatischen Kompensation im Fall eines Sensorausfalls.

Die Lasertriangulationssensoren besitzen individuelle Koordinatensysteme (Abb. 5, „S“), deren Ursprung und Achsen nicht direkt signalisierbar sind. Um die innere Orientierung der Sensoren im übergeordneten MWS (Abb. 5, „MSS“) zu erhalten, wird der indirekte Bezug im Rahmen einer Kalibrierung über eine Referenzgeometrie (Abb. 5, „RFG“) hergestellt. Die Verbindung aller drei Koordinatensysteme erfolgt über die Bestimmung der Orientierungen von MWS und RFG in einem gemeinsamen Referenzsystem, das durch einen Lasertracker mit entsprechend höherer Genauigkeit gegenüber den zu bestimmenden Parametern der inneren Orientierung der Lasertriangulationssensoren realisiert wird. Details zur weiteren Vorgehensweise sind ein Schwerpunkt in /Strübing 2015/ und sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

3 AUSWERTETECHNIKEN VON LASERTRIANGULATIONSENSOREN

Ganz allgemein lässt sich die Auswertung von durch Lasermesssysteme erfassten Massendaten in die Bereiche Objekterkennung, Segmentierung und Klassifizierung gliedern. Bei der Objekterkennung wird zunächst das interessierende Objekt von den restlichen Umgebungsinformationen (Hintergrund) isoliert. Anschließend wird das Objekt mittels Segmentierung in Teilmengen untergliedert und durch definierte Homogenitätskriterien mathematisch parametrisiert. Die Teilmengen repräsentieren zumeist geometrische Primitive, wie Geraden, Bögen oder Ebenen, und werden durch standardisierte

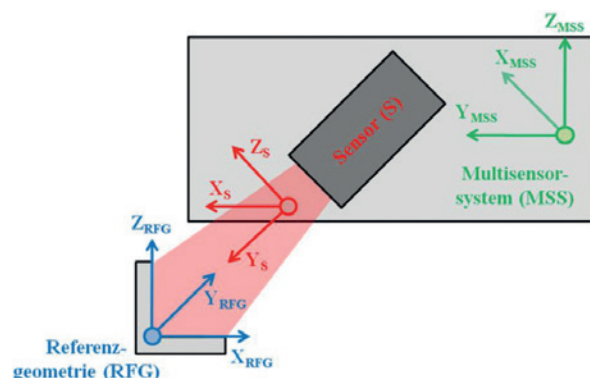


Abb. 5 | Koordinatensysteme bei der Kalibrierung eines MSS /Strübing 2015/

Fokus auf Produktivität ...

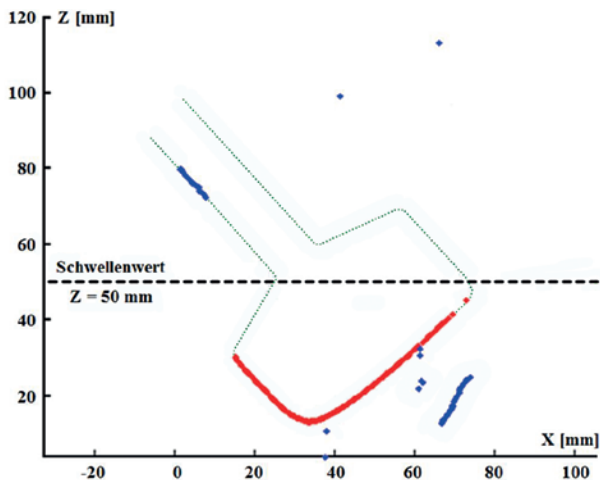


Abb. 6 | Filtertechniken zur Isolation relevanter Messdaten /Strübing 2015/

Algorithmen, wie beispielsweise regionenbasierte Segmentierung, Bereichswachstumsverfahren oder dem RANSAC-Algorithmus, ermittelt. Im abschließenden Schritt der Klassifizierung erfolgt die Zuordnung der ermittelten Segmente zu einem vorab definierten Objekt. Dieser Schritt ist erforderlich, da die Segmente je nach Aufnahmewinkel des Sensors nur einen Teil des gesuchten Objekts abbilden, wie beispielsweise einen Bogen als Teil eines Zylinders. Für weitere Details wird auf /Strübing 2015/ verwiesen.

3.1 Aufbereitung der Messdaten

In einem ersten Schritt werden die mit 100 Hz erfassten Profile auf 10 Hz reduziert, indem jeweils zehn aufeinander folgende Profile hinsichtlich der korrespondierenden Profilpunkte arithmetisch gemittelt werden. Diese Vorgehensweise ist nur bei statischer Messdatenerfassung möglich. Hier sei darauf hingewiesen, dass der RACER II aufgrund der Stationierung des MWS mittels Tachymeter im Stop & Go-Modus operieren muss und damit während der Messdatenerfassung sämtliche Sensoren ruhend sind.

Der zweite Schritt umfasst eine Vorfilterung, wobei mittels Schwellenwertabfrage der obere Bereich der in Abb. 6 dargestellten Schienenengeometrie isoliert wird. Abb. 6 zeigt einen typischen Datensatz eines Lasertriangulationssensors des RACER II. Die Z-Achse des lokalen Sensorkoordinatensystems ist um etwa 45° gegenüber der SMA geneigt, um möglichst homogene Verhältnisse bei der Abtastung der Schienenoberfläche zu erzielen. Im oberen Bereich der Abbildung ist ein Teil des Schienenstegs abgebildet, der jedoch für die folgende Auswertemethode nicht relevant ist. Die Abtrennung dieser Punktgruppe erfolgt über einen Schwellenwert in Richtung der Z-Achse des Sensorkoordinatensystems.

Abb. 6 zeigt unterhalb des Schwellenwerts die interessierenden Messpunkte, wobei noch in Blau dargestellte fehlerhafte Messungen vorhanden sind. Diese können beispielsweise durch Fremdlichteinwirkung verursacht werden, sind aber aufgrund spezieller Schutzbleche beim RACER II kaum relevant. Dennoch empfiehlt es sich, diese Messungen herauszufiltern, da sie sich durch einen schwächeren Remissionswert signifikant von den korrekten Messpunkten unterscheiden. Somit lassen sich durch einen entsprechenden Schwellenwert im Rahmen einer Intensitätswertfilterung die in Abb. 6 rot dargestellten Messpunkte isolieren.

3.2 Modellierung über Teilpolynome

Eine homogene Datenqualität kann im konkreten Anwendungsfall angenommen werden, weil die Lasertriangulationssensoren mit einer Messunsicherheit von <0,1 mm deutlich genauer messen, als es die Genauigkeitsforderungen der daraus abge-



... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Dem Innovationsführer und Erfinder der Digitalnivelliere - Leica Geosystems - ist es gelungen, neue Digitalnivelliere zu entwickeln, die Ihren Arbeitsablauf deutlich beschleunigen.

Möglich wird dies durch das Zusammenspiel der neuen Autofokus Funktionalität, der neuen großen Farb-Touch Anzeige, der hochwertigen Weitwinkel-Kamera und dem neuen Digitalkompass.

leiteten Gleisparameter des RACER II erfordern (Details siehe /Deutsche Bahn AG 2011/). Eine differenzierte stochastische Betrachtung der einzelnen Messpunkte kann somit entfallen. Diese Annahme wurde durch entsprechende Versuche mit verschiedenen Materialien, Auftreffwinkeln und Temperaturen bestätigt /Strübing 2015/. Dennoch unterliegen die gefilterten Messpunkte einem verbleibenden Messrauschen. Ferner benötigt der gewählte Ansatz eine höhere Punktdichte, sodass die Schienenoberfläche basierend auf den vorhandenen Messpunkten modelliert werden muss, um mittels Interpolation Lücken zu schließen.

Eine Möglichkeit zur Modellierung der Messdaten besteht in der Approximation über Teilpolynome, wobei die Messpunkte zunächst in zusammenhängende Punktgruppen mit mindestens fünf Punkten unterteilt werden. Jedoch kann es an den Übergängen benachbarter Teilpolynome zu Knicken oder Sprüngen kommen. Diese lassen sich unter Verwendung von Stetigkeitsbedingungen beziehungsweise Restriktionen glätten. Abb. 7 zeigt das Grundprinzip dieser Vorgehensweise. Bei festen Intervallbreiten hinsichtlich der X -Achse des lokalen Sensorkoordinatensystems müssen zusätzlich an den Übergängen Stützpunkte Θ_k mit $k = 1, \dots, n-1$ ($i = 1, \dots, n$ Anzahl der Intervalle) interpoliert werden, welche jeweils in beiden benachbarten Teilpolynomen als Messpunkte vorkommen. Ausgehend von Polynomen dritten Grades (kubische Splines) der Form

$$f(X_{i,j}) = Z_{i,j} = a_{0,i} + a_{1,i}X_{i,j} + a_{2,i}X_{i,j}^2 + a_{3,i}X_{i,j}^3 - v_{i,j}, \quad (1)$$

mit $i = 1, \dots, n$ Intervallen und $j = 1, \dots, m_i$ Messpunkten $P = \{X_j, Z_j\}$ nebst zugehörigen Verbesserungen $v_{i,j}$ sowie den Parametern des kubischen Polynoms $a_0, \dots, a_3$ werden die folgenden Stetigkeitsbedingungen $C_0, \dots, C_2$ definiert:

$$\begin{aligned} C_0: f_i(X_{i,\Theta_k}) &= f_{i+1}(X_{i+1,\Theta_k}) \\ \Rightarrow a_{0,i} + a_{1,i}X_{i,\Theta_k} + a_{2,i}X_{i,\Theta_k}^2 + a_{3,i}X_{i,\Theta_k}^3 &= a_{0,i+1} + a_{1,i+1}X_{i+1,\Theta_k} + a_{2,i+1}X_{i+1,\Theta_k}^2 + a_{3,i+1}X_{i+1,\Theta_k}^3. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C_1: f'_i(X_{i,\Theta_k}) &= f'_{i+1}(X_{i+1,\Theta_k}) \\ \Rightarrow a_{1,i} + 2a_{2,i}X_{i,\Theta_k} + 3a_{3,i}X_{i,\Theta_k}^2 &= a_{1,i+1} + 2a_{2,i+1}X_{i+1,\Theta_k} + 3a_{3,i+1}X_{i+1,\Theta_k}^2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C_2: f''_i(X_{i,\Theta_k}) &= f''_{i+1}(X_{i+1,\Theta_k}) \\ \Rightarrow 2a_{2,i} + 6a_{3,i}X_{i,\Theta_k}^2 &= 2a_{2,i+1} + 6a_{3,i+1}X_{i+1,\Theta_k}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Durch Einführung der Restriktionen lassen sich Sprungstellen durch C_0 und Knicke durch C_1 vermeiden (vgl. Abb. 7). Ergänzend wird durch die Einführung von C_2 eine gleichbleibende Krümmung der modellierten Schienenoberfläche gewährleistet, was insbesondere bei Messlücken erforderlich wird. Nach /Niemeier 2008/ und /Schulze 2009/ können Restriktionen in einem Ausgleichsmodell wie folgt formuliert werden:

$$(B_k - B_k) \cdot \begin{pmatrix} X_{i,\Theta_k} \\ X_{i+1,\Theta_k} \end{pmatrix} = 0. \quad (5)$$

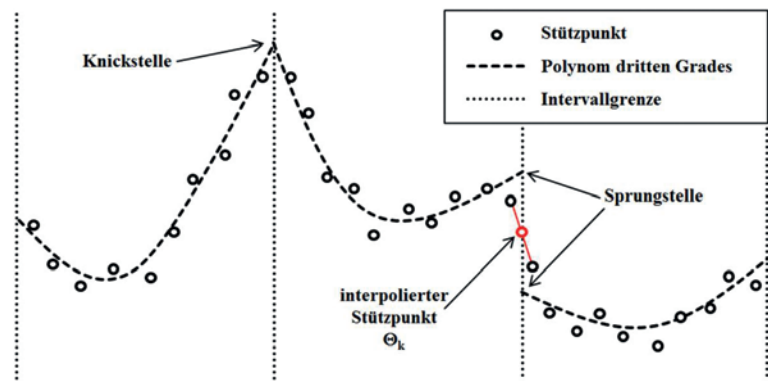


Abb. 7 | Modellierung der Messpunkte über Teilpolynome ohne die Einführung von Restriktionen /Strübing 2015/

Durch Einsetzen der Stetigkeitsbedingungen (2) bis (4) sind die einzelnen Bedingungsmatrizen für die Intervallübergänge aufzustellen

$$\begin{aligned} B_k &= \begin{pmatrix} 1 & X_{i,\Theta_k} & X_{i,\Theta_k}^2 & X_{i,\Theta_k}^3 \\ 0 & 1 & 2X_{i,\Theta_k} & 3X_{i,\Theta_k}^2 \\ 0 & 0 & 2 & 6X_{i,\Theta_k} \end{pmatrix} \quad \text{und} \\ -B_k &= \begin{pmatrix} 1 & X_{i+1,\Theta_k} & X_{i+1,\Theta_k}^2 & X_{i+1,\Theta_k}^3 \\ 0 & 1 & 2X_{i+1,\Theta_k} & 3X_{i+1,\Theta_k}^2 \\ 0 & 0 & 2 & 6X_{i+1,\Theta_k} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

aus denen sich die Gesamtmatrix aller Teilpolynome B wie folgt zusammensetzt:

$$B = \begin{pmatrix} B_1 & -B_1 & & 0 \\ & B_2 & -B_2 & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & B_{n-1} & -B_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Zum Aufstellen der Designmatrix als Gesamtmatrix A wird zu jedem Teilpolynom A_i gebildet:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ & & A_i \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & A_n \end{pmatrix}, \quad \text{mit: } A_i = \begin{pmatrix} 1 & X_{i,1} & X_{i,1}^2 & X_{i,1}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{i,j} & X_{i,j}^2 & X_{i,j}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{i,m_i} & X_{i,m_i}^2 & X_{i,m_i}^3 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Ausgehend von (7) und (8) lassen sich die gesuchten Parameter der einzelnen kubischen Teilpolynome $\hat{x}$ durch ein erweitertes Gauß-Markov-Modell bestimmen:

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^T P A & B^T \\ B & 0 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} A^T P L \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

siehe /Niemeier 2008/ mit k als Korrelatenvektor. Der Beobachtungsvektor L enthält sämtliche Profilpunkte P zuzüglich der interpolierten Stützpunkte Θ_k . Im konkreten Anwendungsfall entspricht die Gewichtsmatrix P der Einheitsmatrix, da die Messpunkte als unkorreliert und gleichgewichtet betrachtet werden.

Abschließend wird auf Basis der ausgeglichenen Teilpolynome ein Punktraster im Abstand von 0,1 mm entlang der X-Achse des lokalen Sensorkoordinatensystems erzeugt. Das Punktraster vereinfacht die folgenden Berechnungen erheblich hinsichtlich Komplexität und Rechenzeit. Obwohl es sich dabei um ein Approximationsverfahren handelt, können die Genauigkeitsanforderungen an die Gleisparameter des Gleisvermessungssystems problemlos eingehalten werden.

3.3 ERMITTLUNG DER POI

Wesentliches Element für die Ableitung der Gleisparameter des RACER II stellen die sogenannten Points of Interest (POI) dar, welche ihrerseits aus den Objektpunktarten PSOK (Punkt Schienenoberkante) und PSW (Punkt Spurweite) bestehen. Aus den Messdaten jedes Lasertriangulationssensors lassen sich entsprechend Abb. 8 jeweils zwei POI extrahieren. In Summe entstehen somit insgesamt acht POI, aus denen sich die Gleisparameter berechnen lassen.

Die Ermittlung der POI basiert auf einer verebneten Vektorrechnung, da die Lasertriangulationen orthogonal zur Schienenoberfläche ausgerichtet sind und damit keine Projektionsverzerrungen

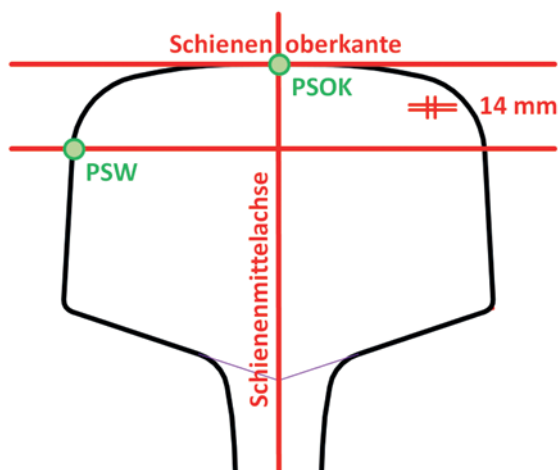


Abb. 8 | Definition der Objektpunktarten PSOK und PSW /Strübing 2015/

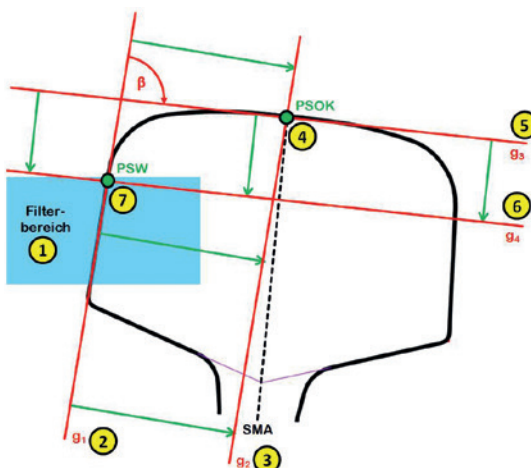


Abb. 9 | Vorgehensweise bei der Bestimmung der POI

berücksichtigt werden müssen. Zudem bildet das Sensorkoordinatensystem ohnehin einen zweidimensionalen Raum. An dieser Stelle soll lediglich das Grundprinzip anhand der in Abb. 9 gelb dargestellten Schritte verdeutlicht werden.

Zunächst werden die Profildaten der einzelnen Lasertriangulationssensoren über die Parameter der bekannten inneren Orientierung in das MWS transformiert. Da das MWS bereits mittels tachymetrischer Messungen in das übergeordnete Bezugssystem überführt wurde, liegen sämtliche Messpunkte im übergeordneten Koordinatensystem mit absolutem Höhenbezug vor. Daher lassen sich die Rasterpunkte mittels Schwellenwerte in Richtung der Z-Achse filtern (1), aus denen mittels Regression die ausgleichende Gerade g_1 ermittelt wird (2). Die Gerade g_1 wird um einen festen Betrag (schienentypabhängig) in Richtung SMA parallel verschoben und bildet g_2 (3). Der Betrag ist vom Schienentyp abhängig und wird im Vorfeld aus dem grundlegenden CAD-Modell abgeleitet. PSOK (4) ist damit jener Punkt aus der Menge der Rasterpunkte, dessen Abstand minimal zu g_2 ist. Durch Rotation der Geraden g_2 in PSOK um den Winkel β (schienentypabhängig) und Parallelverschiebung der dadurch entstandenen Gerade g_3 (5) um einen festen Betrag (in der Regel 14 mm) in Richtung Filterbereich erhält man die Gerade g_4 (6). Abschließend stellt PSW (7) jenen Punkt aus der Menge der Rasterpunkte dar, dessen Abstand minimal zu g_4 ist. Da die Lasertriangulationssensoren nur die Schieneninnenseite abtasten (vgl. Abb. 6), ist eine Verwechslung mit der gegenüberliegenden Außenseite ausgeschlossen.

3.4 CAD-Vergleich

Alternativ zur vorgestellten Modellierung der Messdaten über Teilpolynome kann auch der direkte Vergleich mit einem zugrunde liegenden CAD-Modell zielführend sein, indem die gemessene Ist-Geometrie der Schienenoberfläche auf die Soll-Geometrie des CAD-Modells transformiert wird. Damit lassen sich vor allem Differenzkonturen zwischen Soll und Ist erstellen, aus denen beispielsweise Aussagen hinsichtlich der Schienenabnutzung getroffen werden können. Bei der Entwicklung des RACER II wurde die Transformation des CAD-Modells mit einer Variante des ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point; Details siehe beispielsweise /Kapoutsis et al. 1999/ oder

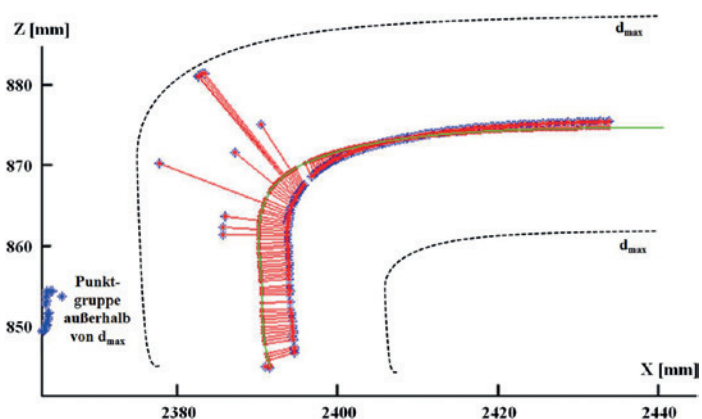


Abb. 10 | Umsetzung eines ICP-Algorithmus für den RACER II /Strübing 2015/

/Chetverikov et al. 2005/) implementiert, jedoch aufgrund des deutlich höheren Rechenaufwands für das Online-Processing verworfen. Die Ableitung von Differenzkonturen blieb zunächst ebenfalls aus.

Abb. 10 zeigt das Grundprinzip des implementierten ICP-Algorithmus. Dabei werden für alle Messpunkte die jeweils kürzesten Entfernungen zur grün dargestellten Soll-Geometrie ermittelt. Neben den in /Strübing 2015/ vorgestellten Ansätzen, die kürzesten Entfernungen direkt aus der Soll-Geometrie abzuleiten, wird alternativ ein Näherungsverfahren vorgeschlagen, dass unter Einhaltung der erforderlichen Genauigkeiten mathematisch einfacher und mit weniger Rechenzeit zum gleichen Ergebnis führt. Dabei wird die Soll-Geometrie in ein Punktrastraster überführt, sodass die einzelnen Distanzen iterativ über Punktpaare ermittelt werden.

Beim ICP-Algorithmus handelt es sich um einen iterativen Prozess, bei dem die ermittelten Transformationsparameter als Näherungswerte in den folgenden Optimierungszyklus eingehen. Damit die Ausgleichung zuverlässig konvergiert, muss die betrachtete Menge der Messpunkte innerhalb eines sukzessiv verengenden Filterbands reduziert werden, um Hebelbeobachtungen abzuspalten. Das Filterband ist in Abb. 10 mit $d_{\max}$ dargestellt und wird um die Soll-Geometrie herum gebildet. Praktische Versuche haben gezeigt, dass eine schrittweise prozentuale Reduzierung von $d_{\max}$ die besten Ergebnisse liefert. Dies trifft insbesondere bei einer großen Anzahl von Fehlmessungen innerhalb der Messdaten zu, was einen weiteren Vorteil gegenüber der Methode aus Abschnitt 3.2 darstellt. Die ICP-Methode wird deshalb für das optionale, aber zeitunkritische Post-Processing der Messdaten vorgehalten. Für Details zur Umsetzung des ICP-Algorithmus beim RACER II wird auf /Strübing 2015/ verwiesen.

4 ERMITTLUNG DER GLEISPARAMETER

Bis auf die Spurweite lassen sich sämtliche im Abschnitt 2.1 vorgestellten Gleisparameter direkt aus den PSOK ableiten. Da insgesamt vier PSOK beziehungsweise vier PSW vorhanden sind, können grundsätzlich zwei Messprofile mit einer Stationierung des MWS im Abstand von 0,6 m generiert werden. In der Praxis werden üblicherweise Messprofile in größerem Abstand gefordert, sodass pro Stationierung des MWS lediglich ein gemittelttes Messprofil generiert zu werden braucht. Die Lage und Höhe der GMA wird demnach als Schwerpunkt aus dem arithmetischen Mittel aller vier PSOK gebildet. Die Parameter Überhöhung und Gradienten lassen sich jeweils aus den gegenüberliegenden PSOK-Paaren in Längs- oder Querrichtung der GMA über die zugehörigen Höhendifferenzen der PSOK berechnen. Die Spurweite muss aus den jeweils gegenüberliegenden PSW abgeleitet werden. Für sämtliche Berechnungen wurde die Rahmenausdehnung des RACER II aufgrund der Materialtemperatur zum Messzeitpunkt sowie die relativen Orientierungen der einzelnen Lasertriangulationssensoren im MWS berücksichtigt.

4.1 Qualitätsmanagement

Um Ergebnisse der Auswertung bereits während der Messung beurteilen zu können und gegebenenfalls vor Ort eine Wieder-

holungsmessung anzuschließen, wird beim RACER II eine Reihe statistischer Kenngrößen ermittelt, welche automatisiert, teilweise nur als warnende Anzeige, den Operateur bei der Durchführung der Messungen unterstützen. So kann beispielsweise die Standardabweichung der Abstände der einzelnen Messpunkte zu den ausgeglichenen Teilpolynomen verglichen mit Erfahrungswerten aus dem Normalverhalten der Lasertriangulationssensoren Aufschluss über eine signifikante Störung in den Messwerten eines Sensors geben. Ein wichtiges Kriterium ist die Prüfung einer Mindestanzahl von Messpunkten pro Teilpolynom, um Lücken in den Messdaten kenntlich zu machen.

Ferner werden die Restklaffungen der 3D-Helmert-Transformation der Tachymetermessungen des MWS in das übergeordnete Bezugssystem mittels Schwellenwertabfrage dahingehend überprüft, ob einzelnen Messungen oder gegebenenfalls die zugrunde liegenden Gleisversicherungspunkte des Bezugssystems fehlerhaft sind. Darüber hinaus können die aus der Transformation ermittelten Parameter Überhöhung und Gradienten mit den Messwerten des Neigungsmessers verglichen und somit auf Plausibilität überprüft werden.

Durch die Verwendung von vier Lasertriangulationssensoren und der daraus abgeleiteten redundanten Menge an POI lassen sich jederzeit zwei getrennte Messprofile auswerten. Durch Vergleich der jeweils korrespondierenden POI können die Gleisparameter Spurweite, Überhöhung und Gradienten auf Plausibilität überprüft werden, da benachbarte Messprofile im Bereich von 0,6 m keine signifikanten Unterschiede im Schienenverlauf zeigen dürfen. Eine Alarmierung erfolgt in diesen Fällen bei Überschreitung von Schwellenwerten, welche im Vorfeld durch den Anwender abhängig von den Toleranzen des gegenwärtigen Gleises durch Stellgrößen definiert werden.

4.2 Validierung

Die Berechnung der Gleisparameter ist ein Algorithmus, in dem viele Unwägbarkeiten wie Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung der Sensoren oder bei der Systemkalibrierung im Fehlerhaushalt zusammenwirken und die Genauigkeit der Gleisparameter beeinflussen. Ferner kommen Verschmutzungen der Schienenoberfläche und die Verwendung fehlerhaft bestimmter oder beschädigter Gleisversicherungspunkte des übergeordneten Bezugssystems hinzu. Diese Effekte sind stochastisch schwer zu modellieren, sodass eine unabhängige Kontrolle mit einem Referenzmesssystem eine sinnvolle Alternative darstellt.

Für die Überprüfung des Gleisvermessungssystems RACER II wurden in insgesamt drei Schritten Versuchsumgebungen geschaffen (Labor, Außenbereich, Versuchsstollen), in denen die Messunsicherheiten des RACER II hinsichtlich der abgeleiteten Gleisparameter untersucht wurden. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf den Versuchsstollen im Lötschberg-Basistunnel, Schweiz /Strübing 2015/.

Abb. 11 zeigt den Messaufbau zur Ermittlung der Soll-Geometrie eines Gleisabschnitts im Versuchsstollen des Lötschberg-Basistunnels. Das Referenzmesssystem bildet der Lasertracker Leica AT901-LR. Durch speziell gefertigte Adapter können die zugehörigen 2,5-Zoll-Corner-Cube-Reflektoren (CCR) direkt auf die Steckzapfen der Gleisversicherungspunkte des Bezugssystems montiert werden



Abb. 11 | Validierungsmessung im Versuchsstollen des Lötschberg-Basistunnels /Strübing 2015/

Zielgröße RACER II	Validierungsmessungen	
	Genauigkeit (1σ)	Präzision (1σ)
Stationierung _x	0,09 mm	0,08 mm
Stationierung _y	0,13 mm	0,13 mm
Stationierung _z	0,09 mm	0,09 mm
Spurweite [mm]	0,23 mm	0,03 mm
Längsneigung	0,13 ‰	0,02 ‰
Querneigung	0,15 mm/1,5 m	0,06 mm/1,5 m

Tab. 1 | Ergebnisse der Validierungsmessungen /Strübing 2015/

unter Beibehaltung des Punktzentrums auf $<0,1$ mm. Vorteilhaft ist, dass die verwendeten CCR auch vom Tachymeter des RACER II gemessen werden können. Ungenauigkeiten durch unterschiedliche Adapter oder Prismentypen werden dadurch minimiert.

Um zusätzlich den von den Tachymetermessungen unabhängigen Bezug zu den POI herzustellen, wird das MWS durch Passbohrungen auf dem RACER II durch die CCR des Lasertrackers bei jeder Stationierung neu vermessen. Der Vorgang ist in Abb. 11 dargestellt. Die Schienenoberfläche wird mit dem handgeführten Sensor T-Scan flächenhaft als Punktwolke erfasst und liegt bereits im Koordinatensystem des Lasertrackers vor. Durch Gegenüberstellung der POI als Ist-Geometrie mit den Projektionen der POI auf die Soll-Geometrie der T-Scan-Messungen lassen sich die in Tab. 1 dargestellten Differenzen ableiten. Im Ergebnis bleiben sämtliche Differenzen innerhalb üblicherweise geforderter Vorgaben.

5 FAZIT

Die vorgestellten Methoden zur Auswertung der Messdaten der Lasertriangulationssensoren des RACER II haben in der praktischen Umsetzung zuverlässig funktioniert. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Rechenzeiten während eines Messzyklus im Stop&Go-Betrieb konnten die Methoden des direkten CAD-Vergleichs mittels ICP-Algorithmus nicht ohne weitere Optimierung der implementierten Algorithmen eingesetzt werden. Im Post-Processing wurden die Ergebnisse beider Verfahren gegenübergestellt, wobei sich im Ergebnis allerdings kein Nachteil des Näherungsverfahrens gegenüber dem CAD-Vergleich zeigt.

DANK

Die Inhalte der Dissertation /Strübing 2015/ wurden mit dem GKG-MPreis 2015 der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel ausgezeichnet. Mein besonderer Dank gilt stellvertretend Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes als Vorsitzende des GKG für die Berücksichtigung im Nominierungsverfahren und den Erhalt des Preises.

LITERATUR

Alkhatib, H. & Kutterer, H. (2013): Estimation of Measurement Uncertainty of kinematic TLS Observation Process by means of Monte-Carlo Methods. In: JAG 7 (2). DOI: 10.1515/jag-2013-0044.

Chetverikov, D.; Stepanov, D.; Krsek, P. (2005): Robust Euclidean Alignment of 3D Point Sets: the trimmed Iterative Closest Point Algorithm. In: Image and Vision Computing, IEEE, 23(2005)1.3, 299–309.

Deutsche Bahn AG (2011): Fahrbahnen abstecken; vermessungstechnische Anforderungen zum Bau der Festen Fahrbahn. Richtlinie 883.0031, Anlage 1, Gleis- und Bauvermessung: Bautechnik, Leit-, Signal- und Telekommunikationstechnik, gültig ab 01.01.2011.

Kapoutsis, C.; Vavoulidis, C.; Pitas, I. (1999): Morphological Iterative Closest Point Algorithm. In: IEEE Transactions on Image Processing, (1999)8/11, 1644–1646.

Kutterer, H., Alkhatib, H., Paffenholz, J.-A. & Vennegeerts, H. (2010): Monte-Carlo simulation of profile scans from kinematic TLS. In: Proceedings of the FIG Congress 2010. Facing the Challenges - Building the Capacity. Sydney, 11-16 April. FIG, 12.

Leica Geosystems (2009): Leica TM30–Technical Data, Datenblatt. Leica Geosystems AG, Heerbrugg.

Lichtberger, B. (2003): Handbuch Gleisbau – Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Tetzlaff, Hamburg.

MEL, Intelligente Sensoren und Messsysteme (2010): M2-iLAN-2 Laserscanner, Datenblatt. www.MELsensor.de (11/2016).

Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H.; Werner, H. (Hrsg.) (2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Eisenbahnbau. 2. Auflage. Wichmann, Heidelberg.

Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. 2. Auflage. W. de Gruyter, Berlin/New York.

Retscher, G. (1996): 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearem Filterverfahren. Dissertation, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien.

Ristag Ingenieure AG (2016): www.ristag.ch (11/2016).

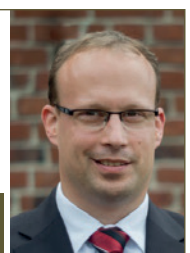
Schulze, M. J. (2009): Optimale Auswertung von kinematischen Neigungsmessungen mit simultaner tachymetrischer Positionsbestimmung bei einem kinematischen Gleismesssystem. Diplomarbeit, Geodätisches Institut, Leibniz-Universität Hannover.

Strübing, T. (2015): Kalibrierung und Auswertung von lasertriangulationsbasierten Multisensorsystemen am Beispiel des Gleisvermessungssystems RACER II. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie, 91, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg.

Dr.-Ing. Thorsten Strübing

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE

Werner-Heisenberg-Weg 39 | 85579 Neubiberg
thorsten.struebing@unibw.de



Manuskript eingereicht: 01.12.2016 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet