

**Parametrisierung der Gleisgeometrie
aus Befahrungsdaten von Gleismesswagen**

von der Fakultät VI
- Bauingenieur- und Vermessungswesen -
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des Grades

Diplom-Ingenieur

Niels Heuwold
geboren in Neubrandenburg

Berlin, August 2001

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Problemdarstellung	1
1.2 Gliederung	2
2 Gleismesswagen	3
2.1 Grundbegriffe	3
2.2 Beispiele für Gleismesswagen	5
2.3 Funktionsweise des Plasser & Theurer Gleismesswagens EM 80	7
2.4 Vorteile von Gleismesswagen	11
3 Messdaten-Vorverarbeitung	13
3.1 Erzeugung von Krümmungs- und Radienbildern aus Pfeilhöhen	13
3.2 Kalibrierung (rechnerische) der induktiven Messgeber	15
3.3 Korrektur des Krümmungs- und Radienbildes	18
4 Elementfindung	23
4.1 Planungsrichtlinien und -verordnungen	23
4.2 Trassierungselemente im Krümmungs- und Radienbild	25
4.3 Eigenschwingung des Messwagens	27
4.4 Trassenelemente-Roherkennung	31
4.5 Nachbereitung der Trassenelemente-Roherkennung	38
5 Bestimmung der Trassierungsparameter	40
5.1 Bestimmung der Elementübergangskoordinaten	40
5.2 Nachdetektierung sehr kurzer Kreisbögen	51
5.3 Fehlerfortpflanzung für Koordinaten der Elementübergänge im L,K-System	52
5.4 Maßstab in der Bogenlängenmessung	56
6 Erprobung und Analyse	59
6.1 Bewertung der Ergebnisse	60
6.2 Vielfältige Möglichkeiten zur Darstellung der Ergebnisse	63
7 Zusammenfassung	64
7.1 Fazit	64
7.2 Grenzen des Verfahrens zur Detektierung	66
7.3 Ausblick	66
Literaturverzeichnis	68
Anhang A	71
Genauigkeit der Detektierung mittels 'railsoft 1.0'	71
Anhang B	74
Bedienungsanleitung 'railsoft 1.0'	74

1 Einführung

1.1 Problemdarstellung

In der automatisierten Gleisvermessung werden seit ca. 30 Jahren Gleismesswagen genutzt, um Informationen über Gleiszustände zu gewinnen und in der Hauptsache Gleisfehlagen zur Gewährleistung der Fahrsicherheit aufzudecken. Die meisten dieser fahrbaren Messeinrichtungen basieren auf dem Langsehen-Verfahren. Während einer Messfahrt wird jeder Gleisstrang durch Pfeilhöhenmessungen mit einer Messwagen-Basislänge von ca. 5-50 m in regelmäßigen Abständen diskretisiert. Als Ergebnis liegen 'horizontale' (siehe *Bemerkung Kap. 3.3.2*) und vertikale Krümmungsbänder der Gleisstränge vor.

Auf Grund des bisher verbreiteten Vorgehens, bei der Auswertung der so gewonnenen Messdaten jeden Abtastpunkt einzeln zu bewerten, ist eine Aufdeckung von langwelligen Gleislagefehlern (weitaus länger als die Messwagenlänge) - z.B. von großflächigeren Setzungen (u.a. bei Brückenbauten), oder Gleisverschiebungen in Folge der Einwirkung der Fliehkraft zur Kurvenaußenseite - nicht ohne weiteres möglich.

Eine Betrachtung der diskreten Messpunkte als Bestandteile von Trassierungselementen ist nötig.

In diesem Zusammenhang wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz zur automatisierten Bestimmung der horizontalen Gleisgeometrie - konkret der Trassierungselemente und deren Parameter - erarbeitet, in eine Software-Lösung ('railsoft 1.0') umgesetzt und anhand praktischer Beispiele der Berliner U-Bahn getestet.

Grundlage der Bestimmung ist die Kenntnis der verwendeten Trassierungselement-Typen und deren funktionale Zusammenhänge im Krümmungsverlauf (Krümmungsbild).

Es werden Kriterien zur Detektierung der Elemente aufgestellt, deren linearer Verlauf im Krümmungsbild (Geraden, Klothoiden, Kreisbögen) durch eine vermittelnde Ausgleichung bestimmt und die Elementübergangspunkte durch Schnitt der Regressionsgeraden ermittelt.

Die automatisierte Bestimmung der Trassierungselemente und deren Parameter ist insofern bedeutsam, da so nicht nur Gleislagefehler ermittelt werden können, sondern auch Gleise deren Geometrie nicht bekannt ist erfasst werden können. Die Unkenntnis der Gleislage ist nach [PRESLE 1999] selbst in Industrie-Nationen oftmals der Fall. Somit bietet die Erfassung der Gleisgeometrie die Möglichkeit zur Optimierung des Gleisverlaufes, zur Anpassung an moderne Trassierungsrichtlinien und zur dauerhaften Dokumentation und Archivierung.

1.2 Gliederung

Kapitel 2 bietet eine Einführung in die fachlichen Begriffe des Gleisbaus und der Gleisvermessung. Es werden Beispiele für Gleismesswagen und deren Funktionsweise (speziell des bei den Berliner Verkehrsbetrieben benutzten Plasser & Theurer EM 80) erklärt.

In Kapitel 3 werden die gängigen Koordinatensysteme der Trassenplanung im Grundriss vorgestellt. Dies sind insbesondere das L,K-System (Krümmungsbild) und das L,R-System (Radienbild). Notwendige Reduktionen zum Erhalt eines horizontal gelagerten Krümmungsbildes der Gleisachse werden aufgezeigt.

Kapitel 4 schildert die Rahmenbedingungen für Trassierungen auf den Strecken der Berliner U-Bahn und die Vorgehensweise zur ersten Detektierung der Trassierungselemente aus Krümmungs- und Radienverlauf (Roherkennung).

Kapitel 5 veranschaulicht Möglichkeiten zur Verbesserung der Elementübergangskordinaten und der Parameter der Trassierungselemente. Hilfsmittel sind Methoden der Ausgleichsrechnung. Für die ermittelten Koordinaten der Elementübergänge im L,K-System werden über Fehlerfortpflanzung Standardabweichungen ermittelt.

Die Analyse der Ergebnisse anhand von Testdatensätzen von Gleisabschnitten der Berliner U-Bahn erfolgt in Kapitel 6.

Kapitel 7 gibt eine kurze Zusammenfassung, zeigt die Grenzen des entwickelten Verfahrens zur Detektierung der Trassenelemente auf und gibt einen Ausblick.

2 Gleismesswagen

2.1 Grundbegriffe

Gleisstrang

Ein Gleis besteht aus 2 Gleissträngen, welche durch Schwellen aus Holz oder Beton verbunden sind. Gleisstränge (auch Schienen genannt) sind aus hochwertigem Stahl und müssen nahezu punktförmigen Radlasten von $10\ t$ und mehr standhalten.

(aus [FIEDLER 1999])

Gleisachse

Die Gleisachse ist nach [HENNECKE 1993] die in Längsrichtung des Gleises verlaufende Mittellinie zwischen den Gleissträngen. In Kurven mit Spurerweiterungen (siehe *Spurerweiterung*) verläuft die Gleisachse parallel zum äußeren Schienenstrang im Abstand der halben Normalspurweite (siehe *Spurweite*).

Kilometrierung

Die Kilometrierungslinie setzt sich nach [HENNECKE 1993] aus den Trassierungselementen der Gleis- und Streckenachse zusammen. Sie verläuft bei eingleisigen Strecken in der Gleisachse. Nach den Richtlinien für Planung und Trassierung der Berliner U-Bahn [RPT 1970] ist die Kilometrierungslinie für die in der Regel zweigleisigen Strecken der Berliner U-Bahn auf der Bahnachse näherungsweise mittig zwischen den Gleisen festzulegen. (*Anmerkung: Die innerhalb der vorliegenden Arbeit oft verwendete Bogenlänge L auf der Gleisachse ist somit nicht identisch mit der Kilometrierung der zweigleisigen Streckenabschnitte.*)

Gradiente

Die Gradiente ist laut [HENNECKE 1993] der vertikale Verlauf (Längsprofil) der Trassierungslinie. Im Allgemeinen bezieht sich die Gradiente auf die Schienenoberkante der nicht überhöhten Schiene. (siehe *Überhöhung*)

Spurweite

Die Spurweite ist nach [FIEDLER 1999] der kleinste Abstand zwischen den Schienenkopffinnenflächen eines Gleises. Diese wird bei Normalspurbahnen im Bereich $0\text{-}14\ mm$ unter der Schienenoberkante ermittelt. (bei Schmalspurbahnen $0\text{-}10\ mm$ unter Schienenoberkante)

Im Berner Abkommen von 1886 ist die Normalspurweite für Europa mit $1435\ mm$ festgelegt worden.

Spurerweiterung

Im Kurvenverlauf wird aus Gründen von in sich nicht beweglichen 2-achsigen Fahrgestellen die Spurweite vergrößert. Diese Aufweitung erfolgt zur Kurveninnenseite. Nach [RPT 1970] wird bei der Berliner U-Bahn auf eine Spurerweiterung verzichtet, weil alle Fahrzeuge mit Drehgestellen ausgerüstet sind.

Pfeilhöhe

Eine Pfeilhöhe ist der orthogonale horizontal verlaufende Abstand eines Punktes zur Pfeilhöhenbasis (Sehne). In den meisten Fällen wird die Basis der Pfeilhöhenmessung (Sehne) durch die Abtastpunkte der Messachsen 1 und 3 des Messwagens festgelegt und die Pfeilhöhe an der Messachse 2 gemessen. Geringfügige Abweichungen von einer horizontal gelagerten Pfeilhöhe treten durch Überhöhung und Längsneigung eines Gleises auf, denen der Messwagen und somit auch die Pfeilhöhenmessaanordnung im Fahrtverlauf folgt.

Längshöhe

Eine Längshöhe entspricht exakt einer Pfeilhöhe in vertikaler Anordnung und wird zur Ermittlung der Gradienten genutzt.

Überhöhung

Überhöhung ist der Abstand zwischen den Tangentialebenen an die Gradienten beider Gleisstränge. Sie wird oft auch als 'Querhöhe' bezeichnet und stellt einen Höhenunterschied zwischen rechtem und linkem Gleisstrang dar. Die Überhöhung wird zur Kompensation der Fliehkräfte in Kurven verwendet und in der Regel auf dem kurvenäußeren Gleisstrang aufgetragen. Einen Idealzustand erreicht die Überhöhung, wenn die resultierende Kraft F_R aus Fliehkraft F und Gewichtskraft G senkrecht zu der Verbindung beider Schienenoberkanten wirkt.

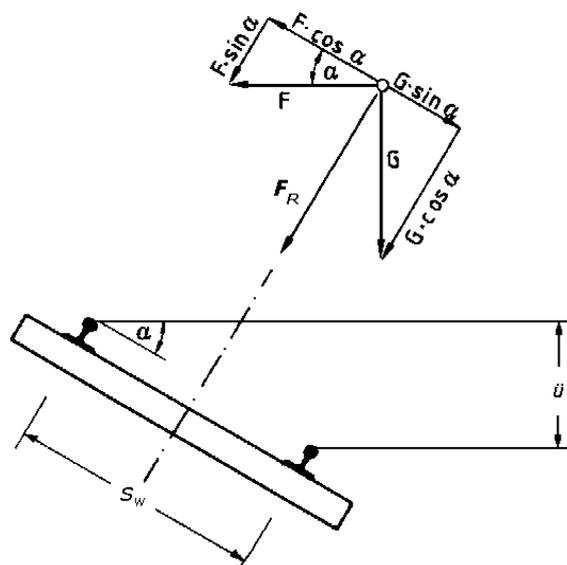


Abbildung 2.1: Kompensation der Fliehkraft durch Überhöhung [FÜRMETZ 1985]

2.2 Beispiele für Gleismesswagen

An dieser Stelle seien zwei Gleismesswagen exemplarisch aus dem zahlreichen Repertoire der Hersteller vorgestellt.

Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) benutzen zur Gleiskontrolle und Gleisabnahme einen Gleismesswagen der österreichischen Firma Plasser & Theurer. Das Modell EM 80 (Baujahr 1984) ist für eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu 80 km/h ausgelegt. Diese Fahr- und Messgeschwindigkeit eignet sich somit ideal für den Betrieb auf U-Bahn-Strecken, deren Entwurfsgeschwindigkeit häufig 60-70 km/h beträgt.



Abbildung 2.2: Gleismesswagen EM 80 (Plasser & Theurer)

Der Gleismesswagen EM80 ermöglicht eine Registrierung von:

- Bogenlänge entlang des linken Schienenstranges
- Längshöhe links und rechts [mm]
- Pfeilhöhe links und rechts [mm]
- Überhöhung [mm]
- Spurweite [mm]
- Geschwindigkeit des Messwagens [km/h]
- Höhe der Stromschiene
- Abstand der Stromschiene

Die Abtastdichte beträgt 25 cm, die Pfeilhöhenbasislänge 10 m.

Die DB Netz AG betreibt auf den ca. 38000 km des DB-Gleisnetzes die automatisierte Messung mit der eigenst entwickelten Oberbaumesswageneinheit (OMWE).

Sie ermöglicht die Messung derselben Parameter wie bereits beim EM 80 der BVG aufgezählt. Im Unterschied zur Funktionsweise des Plasser & Theurer EM 80 wird hier der Gleisverlauf mittels eines Inertialsystems erfasst. Aus den Messwerten der Beschleunigungsmesser werden über doppelte Integration metrische Längenmaße ermittelt.

Die Spurweite wird nach [DB OMWE 1998] 14 mm unter der Schienenoberkante durch optische Antastung der Schienen ermittelt.



Abbildung 2.3: Gleismesswagen OMWE (Deutsche Bahn AG)

Zusätzlich ist die absolute Positionsbestimmung des Messwagens mittels integriertem GPS-Empfänger möglich. Die Abtastintervalle der Sensoren betragen 16 cm . Die Wagenlänge der Oberbaumesswageneinheit (OMWE) beträgt 48 m .

2.3 Funktionsweise des Plasser & Theurer Gleismesswagens EM 80

2.3.1 Messung mittels induktiver Wegaufnehmer

Nahezu alle bekannten Gleismesswagen basieren auf der Messung von Pfeilhöhen. Der Krümmungsverlauf der Gleisstränge wird so in gleichabständigen Abtastintervallen in horizontaler und vertikaler Lage diskretisiert.

Die Messungen erfolgen beim EM 80 der österreichischen Firma Plasser & Theurer mit induktiven Wegnehmern. Diese sind an Abtastern befestigt, welche fortlaufend gegen die Schienenköpfe gepresst werden. Das bedeutet, es werden nicht direkt Strecken für die Berechnung der Pfeilhöhen und sonstigen Größen gemessen, sondern die Änderung der Spannung, die aus der Bewegung der Kerne in den Spulen resultiert. Alle Sensoren werden vor Messfahrtbeginn auf einen Sollwert kalibriert. Die Messwerte entsprechen Änderungen zum Kalibrierwert. Somit gehört dieses Messverfahren in die Gruppe der relativen Messverfahren.

Die gemessenen Spannungsänderungen werden beim Gleismesswagen der BVG durch die Software 'gemad' der Firma TECHNET in metrische Längenmaße anhand von Eich Tabellen überführt. (siehe Abschnitt 2.3.2 Datenerfassung) Die Genauigkeit dieser Messwerte liegt im Bereich von $10^{-1} - 10^{-2} \text{ mm}$.

2.3.2 Datenerfassung

Die Ermittlung und Speicherung der Bewegung des Gleismesswagens erfolgt durch die Software 'gemad' der Firma TECHNET. Die Ergebnisse des Umwandlungsprozesses der gemessenen Induktivitäten in metrische Längenmaße werden auf Grund der hohen Speicherintensität in binären Dateien abgelegt.

Die Datenerfassung (Messung) erfolgt alle $dL = 25 \text{ cm}$. Die Auslösung der Messung wird über ein Messrad am linken Gleisstrang gesteuert.

Im Aufzeichnungsprogramm 'gemad' findet nicht nur die Speicherung der umgewandelten Messwerte statt, sondern auch eine Vorverarbeitung der einzelnen Messwerte. So entstehen Pseudo-Messwerte, die in Kapitel 2.3.3 näher erläutert werden. Durch das Nicht-Speichern der originalen Messdaten ist es im Nachhinein nicht möglich, Korrelationen der vorverarbeiteten Pseudo-Messwerte in etwaigen Ausgleichungen zu berücksichtigen. Eine Änderung dieser Aufzeichnungsmethode sollte für eventuell folgende Untersuchungen in Betracht gezogen werden.

2.3.3 Messgrößen

Bogenlänge

Der Messung der Bogenlänge L kommt insofern eine hohe Bedeutung zu, da auf ihr die Steuerung des Aufnahmezeitpunktes und die Speicherung aller weiteren Messwerte basieren. Die Mess-Intervalle betragen $dL = 25 \text{ cm}$ (siehe Abschnitt 2.2). Die Bogenlänge wird am linken Gleisstrang mittels eines mitgeführten Messrades (Drehgeber) an der mittleren Messachse (Messachse 2) ermittelt, dessen Umdrehungen fortlaufend gemessen werden.



Abbildung 2.4: Messrad zur Bestimmung der Bogenlänge

Pfeilhöhe

Die Messung der Pfeilhöhen h erfolgt mittels 6 Sensoren (jeweils 2 je Achse) in der Ebene, die durch die 3 Messachsen definiert wird. So können je eine Pfeilhöhe auf der rechten und eine auf der linken Seite des Gleismesswagens aus jeweils 3 Sensoren bestimmt werden. Die Messebene verläuft, abgesehen von Überhöhung und Längsneigung, horizontal.

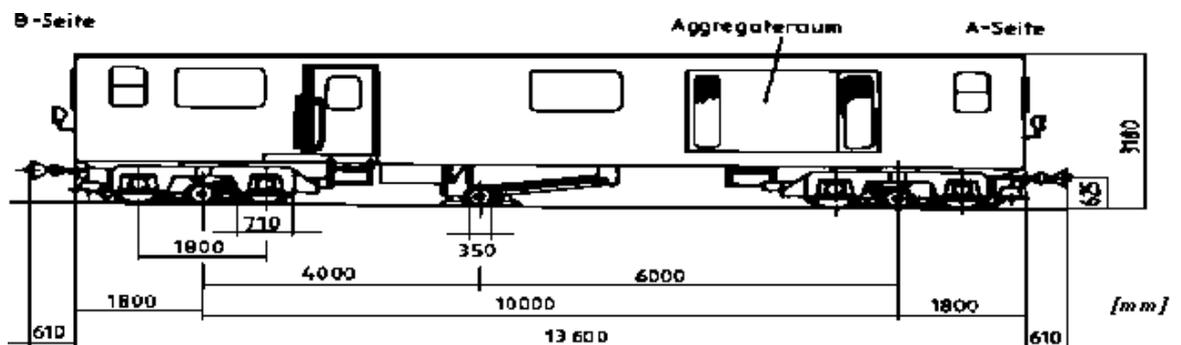


Abbildung 2.5: Aufbau des Gleismesswagens EM 80 [PLASSER&THEURER 1996]

In der vorangegangenen Abbildung 2.5 ist der Aufbau des Mess-Systems des Gleismesswagens EM 80 zu sehen. Gut zu erkennen ist die Basis der Pfeilhöhe von 10 m (Abstand zwischen Achse 1 und Achse 3) und der asymmetrische Fußpunkt der

Pfeilhöhenmessung bei 4 m (Abstand zwischen Achse 1 und Achse 2) bzw. 6 m (Abstand zwischen Achse 2 und Achse 3).

Die Normalmessbasis von 10 m wird nur auf geraden Streckenabschnitten eingehalten. Durch die Drehung der 3 zweiachsigen Fahrgestelle in Kurven verändert sich diese Basis. Sie wird im Kurveninnenbogen verkürzt und am äußeren Schienenstrang verlängert. Diese Änderung der Basis der Pfeilhöhe wird mittels der Sensoren ALC1 und ALC3 erfasst und während der Aufzeichnung mittels 'gemad' auf die Normalbasis von 10 m korrigiert.

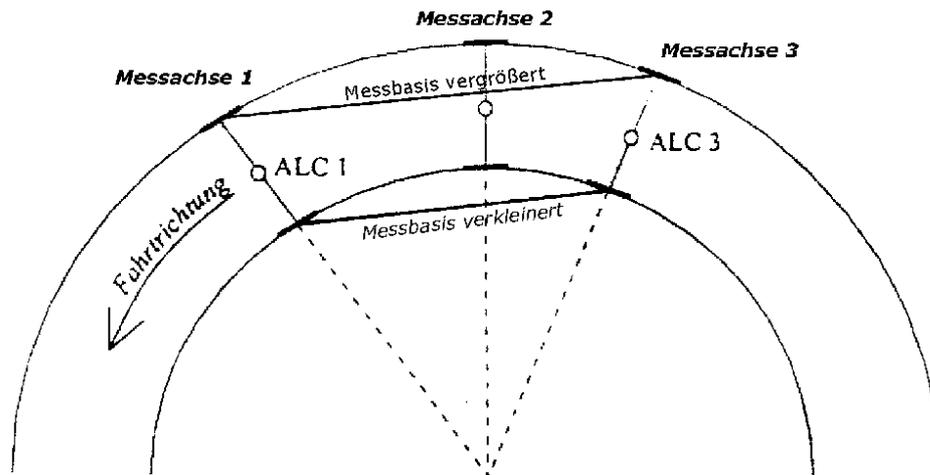


Abbildung 2.6: Veränderung der Pfeilhöhenbasis in Kurven

Die Pfeilhöhe des rechten Gleisstranges wird von der Aufzeichnungssoftware 'gemad' über die Pfeilhöhe des linken Stranges und die gemessene Spurweite berechnet und stellt somit keinen Messwert im eigentlichen Sinne dar. Daher wird dieser Wert zur Bestimmung des Krümmungsbildes innerhalb dieser Arbeit nicht benutzt.

Diese gemessene (jedoch nicht aufgezeichnete) redundante Pfeilhöhe der rechten Seite wäre selbstverständlich eine willkommene Kontrolle und ein Indikator für die Genauigkeit des Messverfahrens.

Die Messdaten für die Pfeilhöhen betragen laut Festlegung in 'gemad' in Linkskurven Werte < 0 und für Rechtskurven dementsprechend Werte > 0 .

Längshöhe

In Analogie zur Pfeilhöhe erfolgt die Messung der Längshöhe mittels 6 Sensoren (jeweils 2 Sensoren je Messachse). Diese messen die vertikale Bewegung der Achsbuchsen gegen den Wagenkasten.

Überhöhung

Die Überhöhung \tilde{u} wird über die 2 Sensoren der Längshöhe an der mittleren Messachse ermittelt. Zusätzlich liefert ein Neigungsmesser kontinuierlich die Querneigung des Wagenkastens gegen die Horizontalebene im Punkt des Neigungsmessers.

Die Vorzeichenregelung wurde in der Aufzeichnungssoftware 'gemad' wie folgt festgelegt: Die Überhöhung beträgt in Kurven mit überhöhtem rechten Gleisstrang (typischerweise Linkskurven) Werte < 0 , und dementsprechend in Kurven mit überhöhtem linken Gleisstrang (typischerweise Rechtskurven) Werte > 0 .

Spurweite

Die Spurweite S_w wird an der mittleren Messachse (Messachse 2) gemessen. Zwei Wegaufnehmer messen den Abstand zum rechten bzw. linken Gleisstrang. Zwischen beiden Sensoren bleibt der Abstand konstruktionsbedingt konstant. Der Kalibrierung der Wegaufnehmer auf einen Sollwert vor Beginn der Messfahrt kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Es werden lediglich Differenzen zu diesem Kalibrierwert gemessen.

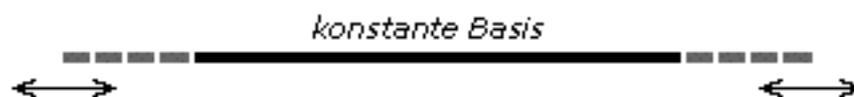


Abbildung 2.7: Schema der Spurweitenmessung des EM 80

2.4 Vorteile von Gleismesswagen

Das Bestreben nach hoher Wirtschaftlichkeit der Streckenabschnitte bewirkt häufig eine enorme Belastung der Gleise. Hohe Fahrgeschwindigkeiten zum Beispiel der ICE von bis zu 300 km/h bewirken große Fliehkräfte in Kurven. Zeitlich dichte Zugfolgen (im Extremfall bei der Berliner U-Bahn zu Hauptverkehrszeiten alle 3 Minuten) und schwere Güterzüge (Gewicht bis zu ca. 20 t/Achse) beanspruchen das Gleis sehr stark. Fehllagen der Gleise und erhöhter Verschleiß sind die logische Folge.

Die entstandenen Gleislagefehler führen zu einer weiteren Erhöhung des Verschleißes an den Wagenrädern und erheblich schlechterem Fahrkomfort, im Extremfall zur Einschränkung der Betriebssicherheit.

Die DB Netz AG misst daher die Hochgeschwindigkeitsstrecken der ICEs ca. alle 2 Monate mit der Oberbaumesswageneinheit (OMWE) auf. Das komplette Netz der DB Netz AG umfasst ca. 38000 km und muss in regelmäßigen Zyklen alle 18 Monate inspiziert werden.

Die Betriebssicherheit des Berliner U-Bahn-Streckennetzes mit einer Länge von ca. 150 km muss von den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) einmal jährlich nachgewiesen werden.

Was bewegt Firmen zum großflächigen Einsatz der Gleismesswagen?

Zur Behebung der Lagefehler sind oft keine Gleissperrungen möglich oder mit hohem Aufwand und hohen Kosten verbunden.

Die komplette Sperrung des aufzumessenden Streckenabschnittes ist mit dem Einsatz von Gleismesswagen jedoch nicht notwendig. Beispielsweise nutzen die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) die nächtliche Betriebspause der U-Bahn zwischen 2.00 und 4.00 Uhr für die turnusmäßigen Überprüfungen des Gleisnetzes.

Die außerordentlich schnelle Informationsgewinnung über den Gleiszustand ermöglicht weiterhin den zielgerichteten und damit wirtschaftlichen Einsatz von Stopf- und Richtmaschinen an Abschnitten mit Gleisfehllagen außerhalb der zulässigen Toleranzen. Gleismesswagen stellen somit einen erheblichen Kostensenkungsfaktor dar.

Gleismesswagen sind außerdem für Bauabnahmen verwendbar.

Weitere Vorteile automatisierter Gleisaufmessung sind:

- kurze Aufmesszeiten (BVG: ca. 20 km/2h; maximale Fahrgeschwindigkeit des Messwagens EM 80 (BVG) bei Messung: 80km/h; des OMWE (DB): 120km/h)
- schnelle Informationsgewinnung durch rechnergestützte Speicherung und Auswertung der Messungen
- rein digitaler Datenfluss im Auswerteprozess, schnelle und übersichtliche thematische grafische und textliche Darstellungen sind möglich
- sehr gute (langfristige) Archivierungsmöglichkeiten auf digitalen Datenträgern

Ein weiterer Aspekt: Durch technische Fortschritte im Gleiskörperbau und der Bahntechnik wachsen nunmehr auch die Anforderungen an eine genaue und schnelle Aufmessung der Gleise. So hat in vielen Bereichen bereits die sogenannte feste Fahrbahn (Gleisunterbau aus Beton) Einzug gehalten, wodurch genauere Positionierungen des Gleises möglich wurden, aber auch enorm weniger Schwingung aufgenommen werden kann, und somit Stöße nahezu ungedämpft an den Wagen weitergegeben werden. Bisher waren diese festen Fahrbahnen den Hochgeschwindigkeitsstrecken der ICEs vorbehalten - inzwischen werden auch für U-Bahnen erste Teststrecken (z.B. U1 Höhe Prinzenstraße) eingerichtet. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Gleiskörper mit kostengünstigerer Herstellung auch im U-Bahn-Betrieb durchsetzen wird.

Diese Entwicklung bedeutet natürlich eine zunehmende Belastung des Gleisoberbaus und der darauf fahrenden Räder der Gleiswagen. Zur Erhaltung des geforderten Fahrkomforts und der Verringerung des Verschleißes ist es daher notwendig geworden, die Wartungsintervalle der Gleise stark zu verkürzen. Daher sind weitestgehend automatisierte und somit wirtschaftliche Aufnahme- und Auswerteverfahren für die Gleisaufnahme zwingend notwendig und erforderlich.

3 Messdaten-Vorverarbeitung

Die weitere spezielle Messdatenaufbereitung und -auswertung wird anhand der Messdaten der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) von Strecken der Berliner U-Bahn und der Geometrie des verwendeten Gleismesswagens Plasser & Theurer EM 80 vollzogen.

3.1 Erzeugung von Krümmungs- und Radienbildern aus Pfeilhöhen

3.1.1 Ermittlung der Krümmung K mittels Pfeilhöhen

Aus der im Abschnitt 2 beschriebenen Pfeilhöhe und dem Wissen über die Anordnung der durch das Programmsystem 'gemad' (siehe Abschnitt 2.3) vorbearbeiteten Pfeilhöhe h lässt sich ein Radius aus den jeweils 3 Punkten einer Pfeilhöhenmessung im lokalen System der Pfeilhöhe berechnen. Wichtige Daten hierfür sind die Basis b der Pfeilhöhe von 10 m , und die Anordnung des Fußpunktes der Pfeilhöhe bei 4 m (von Punkt 1) bzw. 6 m (von Punkt 3).

Somit ergibt sich im lokalen System der Pfeilhöhe:

$$P_1 = [0, 10]$$

$$P_2 = [h, 6]$$

$$P_3 = [0, 0]$$

(alle Koordinaten in [m])

$$\frac{\sin(\eta)}{s_{P_1 P_2}} = \frac{\sin(\varepsilon + \gamma)}{10\text{m}}$$

$$\eta = \arctan\left(\frac{h}{6\text{m}}\right)$$

$$(\gamma + \varepsilon) = \arcsin\left(\frac{b \cdot \sin(\eta)}{\sqrt{(4\text{m})^2 + (h)^2}}\right)$$

$$\delta = 2\pi - 2(\gamma + \varepsilon)$$

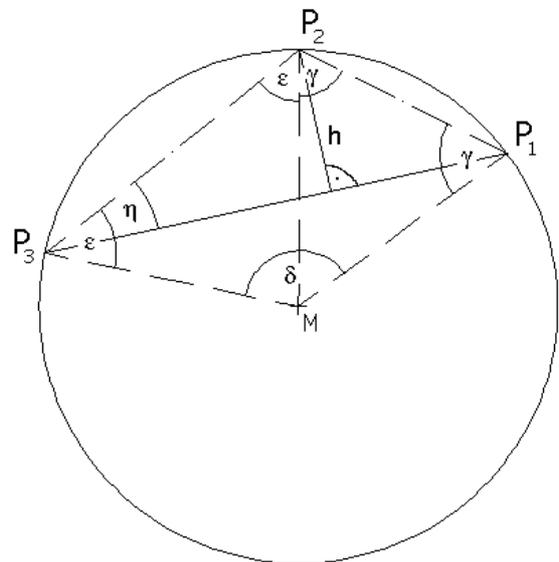


Abbildung 3.1: Ermittlung der Krümmung K aus Pfeilhöhen

Der Radius der Pfeilhöhe ist durch die Punkte $P_1 \dots P_3$ eindeutig festgelegt und ergibt sich

$$\text{zu } R = \frac{b}{2 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}. \quad (3.1)$$

$$\text{Die Krümmung } K \text{ ergibt sich aus dem Zusammenhang } K = \frac{1}{R}. \quad (3.2)$$

3.1.2 Radienbild (L,R - Koordinatensystem)

Stellt man die ermittelten Radien R der Trasse über der Bogenlänge L in einer Grafik dar, erhält man das Radienbild (Grundriss-Darstellung):

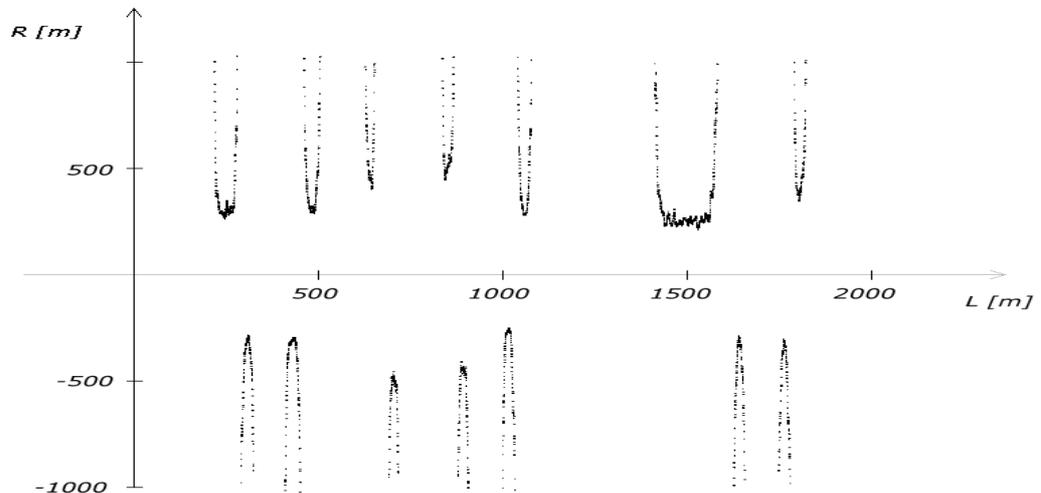


Abbildung 3.2: Radienbild (L,R -System)

Da der Radius an dieser Stelle aus der linken Pfeilhöhe gewonnen wurde, ist der berechnete Radius demzufolge auch der Wert für den linken Gleisstrang. Dieser wird in den folgenden Berechnungen des Abschnittes 3.3 zur Ermittlung des Radius bzw. der Krümmung der Gleisachse verwendet.

3.1.3 Krümmungsbild (L,K - Koordinatensystem)

Werden die Krümmungen K einer Trasse über der Bogenlänge L aufgetragen, entsteht das Krümmungsbild (Grundriss-Darstellung):

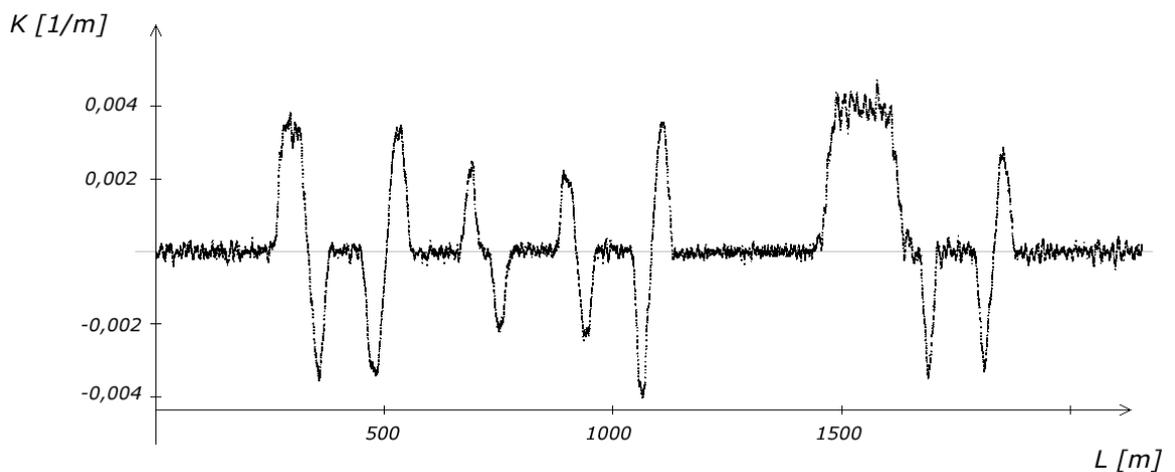


Abbildung 3.3: Krümmungsbild (L,K -System)

Abbildung 3.3 zeigt den selben Gleisabschnitt wie das Radienbild (Abbildung 3.2).

Vorzeichenregelung:

In der Mathematik werden nach [BRONSTEIN 1999] in Fahrtrichtung linksgekrümmte Elemente (z.B. Kreisbogen in einer Linkskurve) im Krümmungsbild mit positiven Vorzeichen der Krümmung abgebildet, rechtsgekrümmte Elemente mit negativem Vorzeichen.

Im Gegensatz dazu wird aus Gründen der Anschaulichkeit häufig bei der grafischen Darstellung des Krümmungsverlaufes einer Trasse dazu übergegangen, Rechtsbogen in positiver Richtung und Linksbogen in negativer Richtung abzutragen. Der Vorteil dieser Darstellungsweise ist eine grundrissähnliche Darstellung des Krümmungsverlaufes. Nach dieser Festlegung sind auch sämtliche Darstellungen in der vorliegenden Arbeit erstellt.

3.2 Kalibrierung (rechnerische) der induktiven Messgeber

Alle Sensoren (hauptsächlich induktive Wegaufnehmer; *siehe Abschnitt 2.3.1*) werden vor Beginn jeder Messfahrt kalibriert. Im praktischen Betrieb wird der Gleismesswagen auf einem Gleisabschnitt angehalten, von dem man annimmt, dass er sich auf einer Geraden befindet und die Gleisstränge den Abstand der Normalspurweite von *1435 mm* aufweisen. An dieser Stelle werden alle induktiven Wegaufnehmer der Pfeilhöhen- und Spurweitenmessung auf einen Nullwert gesetzt. Alle weiteren Messungen während der Messfahrt stellen Differenzen zu diesem Kalibrierwert dar.

Fehllagen (Abweichungen von der Geradenform bzw. der Normalspurweite) des zur Kalibrierung benutzten Gleisabschnittes bewirken demzufolge einen konstanten Versatz (Additionskonstante) aller während der Messfahrt aufgezeichneten Messwerte.

Dieser Versatz kann mit den folgenden Bedingungen in den Bereichen von Geraden ermittelt werden.

Als Bedingungen werden eingeführt:

Die Krümmung K und somit die gemessene Pfeilhöhe h einer Geraden beträgt 0 .

$$(K=0; h=0)$$

Die Spurweite auf einer Geraden entspricht der Normalspurweite von *1435 mm*.

Der häufig anzutreffende Versatz kann durch die hohe Redundanz der Messpunkte (meist mehrere tausend Punkte) auf Geraden sehr gesichert im Krümmungsbild rechnerisch bestimmt werden. Hierzu wird eine im Kapitel 4.4 beschriebene Roherkennung der Trassenelemente durchgeführt, und so die Bereiche der Geraden lokalisiert.

Durch alle Punkte auf Geraden wird im L, K -System (Krümmungsbild) eine ausgleichende Gerade ($K = mL + n$) mit dem Anstieg $m = 0$ berechnet. Da bauartbedingt keine groben Fehler (Ausreißer) in den Messwerten auftreten können (Normalverteilung), wird diese Regressionsgerade durch triviale Mittelbildung mit gleichen Gewichten aller Messpunkte ermittelt. Der Versatz $\Delta K = n_K$ der Regressionsgeraden zur Achse $K = 0$ und der Versatz $\Delta Sw = n_{sw}$ zur Achse $Sw = 1435 \text{ mm}$ stellen die anzubringenden Kalibrierwerte dar.

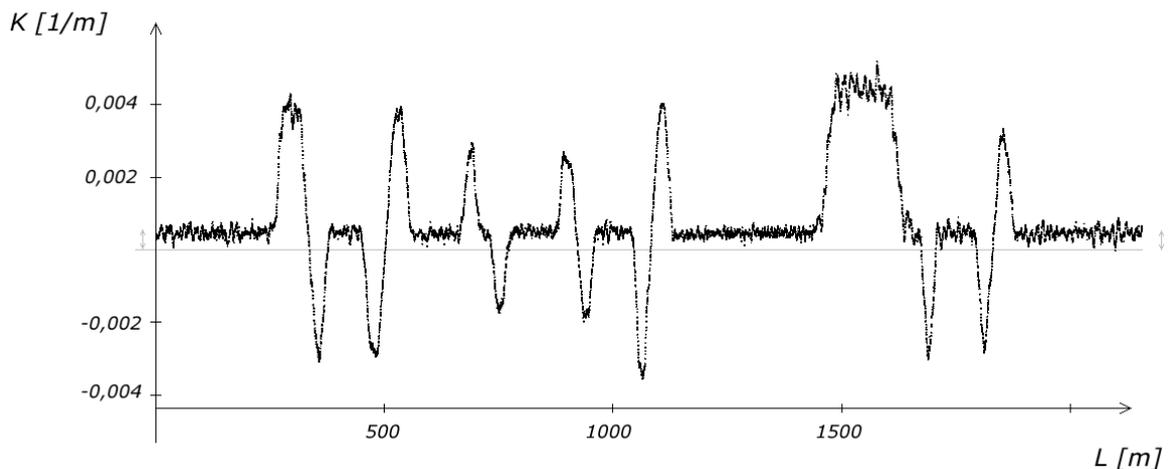


Abbildung 3.4: Kalibrierung der Sensoren zur Pfeilhöhenermittlung

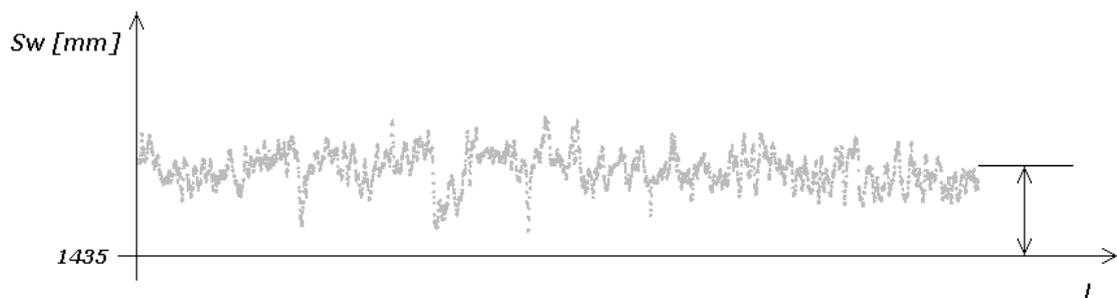


Abbildung 3.5: Kalibrierung der Sensoren zur Spurweitenermittlung

Die rechnerische Kalibrierung der Sensoren wird von der Software 'railsoft 1.0' für jeden Datensatz vorgenommen. Die Kalibrierung kann nur für kleine Versätze automatisiert erfolgen, bei denen die Geraden in der Roherkennung noch als solche detektiert werden können. Ist auf Grund eines größeren Kalibrierversatzes die automatische Kalibrierung nicht möglich, besteht die Möglichkeit, die Kalibrierung manuell über eine Steuerdatei durchzuführen. In den Test-Datensätzen (siehe Abschnitt 6) wurden alle Kalibrierversätze automatisiert in einer Größenordnung bis zu 1 mm festgestellt.

Ohne Kalibrierung würden die ermittelten Parameter R der Kreisbögen auf Grund eines Versatzes von 1 mm wie folgt verfälscht:

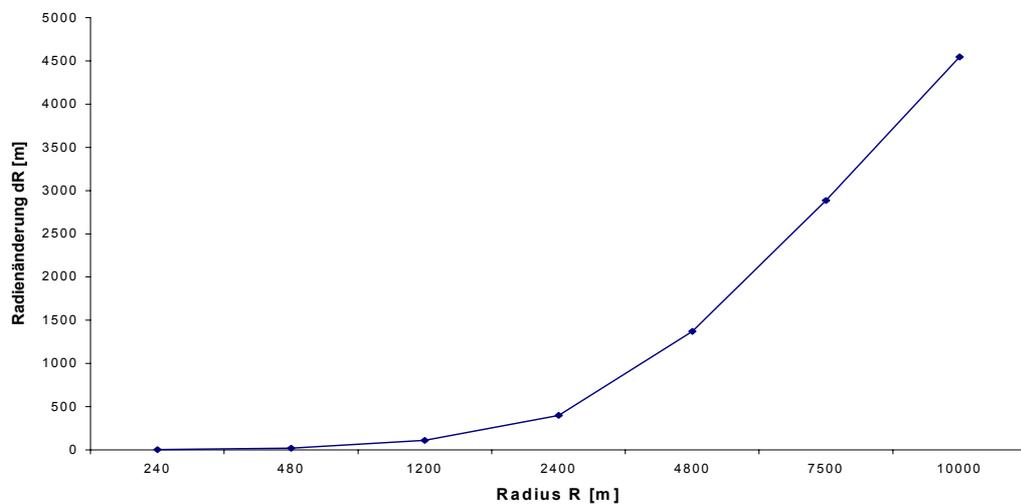


Abbildung 3.6: Änderung des Parameters R als Folge der Kalibrierung

Es ist zu erkennen, dass die Korrektur mit zunehmendem Kurvenradius extrem zunimmt. Doch schon bei einem Radius von 480 m beträgt die Korrektur des Parameters R $18,5\text{ m}$. Auch die Auswirkung auf die Kalibrierung der Sensoren zur Spurweitenmessung kann bedeutende Auswirkung haben, da nach [FIEDLER 1999] und [FÜRMETZ 1985] Abweichungen von der Normalspurweite aus sicherheitstechnischen Gründen nur im Bereich -5 mm bis $+30\text{ mm}$ zulässig sind. Die relevanten Abweichungen zur Minimierung des Verschleißes an Rad und Schiene dürften somit weit unter dem zulässigen Toleranzbereich von 35 mm liegen.

Bei der Bauabnahme von Gleisen sind nach [FÜRMETZ 1985] die zulässigen Abweichungen vom Sollmaß der Spurweite (Normalspurweite $S_w = 1435\text{ mm}$) $\pm 2\text{ mm}$. Die Gleisvermessung zur Bauabnahme erfordert demzufolge eine Genauigkeit unter $\pm 2\text{ mm}$.

Jeder ermittelte Versatz wird mit Hilfe des T-Tests auf Signifikanz geprüft.

Das arithmetische Mittel aus n Beobachtungen der normalverteilten Zufallsveränderlichen x unterliegt der t-Verteilung (Student-Verteilung) [GRÜNDIG].

Die Prüfgröße t ergibt sich aus:

$$t = \frac{x - \xi}{m_x} \quad \text{mit} \quad m_x = \frac{m_i}{\sqrt{n}}; \quad m_i = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

x ... Versatz (arithmetisches Mittel)

ξ ... Erwartungswert ($\xi_K = 0$, $\xi_{S_w} = 1435\text{ mm}$)

m_x ... Schätzwert für die Standardabweichung
des arithmetischen Mittels

Die t-Verteilung geht nach [GRÜNDIG] für Freiheitsgrade $f \rightarrow \infty$ in die normierte Normalverteilung über. Im vorliegenden Fall der Sensorkalibrierung beträgt der Freiheitsgrad meist weit über $f > 1000$. Somit kann von einer Normalverteilung der Messwerte ausgegangen werden.

Die Prüfgröße u ergibt sich aus:
$$u = \frac{x - \xi}{\sigma_x} \quad (3.4)$$

x ... *Versatz (arithmetisches Mittel)*

ξ ... *Erwartungswert ($\xi_K = 0$, $\xi_{Sw} = 1435 \text{ mm}$)*

σ_x ... *Standardabweichung des arithmetischen Mittels*

Überschreitet die Prüfgröße u den Schrankenwert $u_S = 1,96$ ist der bestimmte Versatz mit 95%-iger statistischer Sicherheit signifikant und die Messwerte werden von der Software 'railsoft 1.0' korrigiert. Im anderen Falle ist der bestimmte Wert mit 95%-iger statistischer Sicherheit nicht signifikant und kann vernachlässigt werden.

Ergebnis des T-Tests ist in der absoluten Mehrheit die Bestätigung der Signifikanz des ermittelten Kalibrierversatzes in den Testdatensätzen.

3.3 Korrektur des Krümmungs- und Radienbildes

In der Planung von Verkehrswegen ist die getrennte Festlegung der Trassierungselemente in Lage (Grundriss) und Höhe (Aufriss) üblich. Daher beschäftigt sich dieses Kapitel mit notwendigen Schritten zur Erstellung eines horizontal gelagerten Krümmungs- und Radienbildes der Gleisachse.

3.3.1 Planmäßige Spurerweiterungen

Spurerweiterungen kommen zum Beispiel beim Netz der Deutschen Bahn in Kurven zur Anwendung. (Begriffsklärung: siehe Abschnitt 2.1, *Spurerweiterung*)

Bei der Berliner U-Bahn wird auf eine Spurerweiterung verzichtet. (*siehe Abschnitt 2.1*)

Daher seien an dieser Stelle die Korrekturen genannt, welche auf Grund planmäßiger Spurerweiterungen durchgeführt werden sollten:

- Korrektur der Spurweite S_w
- Korrektur der Bogenlänge L (auf der Seite des Messrades zur Bogenlängenmessung)
- Korrektur des Radius R der Pfeilhöhe h (auf der Seite des Messrades)

3.3.2 Reduktion in eine Horizontalebene

Zur Reduktion des ermittelten Krümmungs- und Radienverlaufes in eine Horizontalebene sind die folgenden geometrischen Korrekturen anzubringen:

- Korrektur der Spurweite Sw
- Korrektur der Bogenlänge L (auf der Seite des Messrades zur Bogenlängenmessung)
- Korrektur des Radius R der Pfeilhöhe h (auf der Seite des Messrades)

Die Reduktion in Längsrichtung des Gleises in eine Horizontalebene wäre nach Auswertung des vertikalen Gleisverlaufes (nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit) zu ergänzen.

Geometrische Korrektur der Spurweite Sw und des Radius R der Pfeilhöhe h

Bei typischen Kurvenüberhöhungen ist der jeweils kurvenäußere Gleisstrang überhöht, um die auftretenden Fliehkräfte teilweise zu kompensieren. Daher ist die geometrische Reduktion in die Horizontalebene in der Regel an dem kurvenäußeren Strang anzubringen.

Die horizontale Spurweite Sw_{hor} ergibt sich nach dem Satz des Pythagoras wie folgt:

$$Sw_{hor} = \sqrt{Sw^2 - \ddot{u}^2} \quad \Delta Sw = Sw_{hor} - Sw \quad (3.5)$$

ΔSw ... Reduktion der Spurweite

Die Reduktion ΔSw nimmt für alle Überhöhungen \ddot{u} (außer $\ddot{u} = 0$) ein negatives Vorzeichen an, was bedeutet, dass die Spurweite Sw in jedem Fall verringert wird bzw. gleich bleibt. Dies ist anhand folgender Skizze gut ersichtlich.

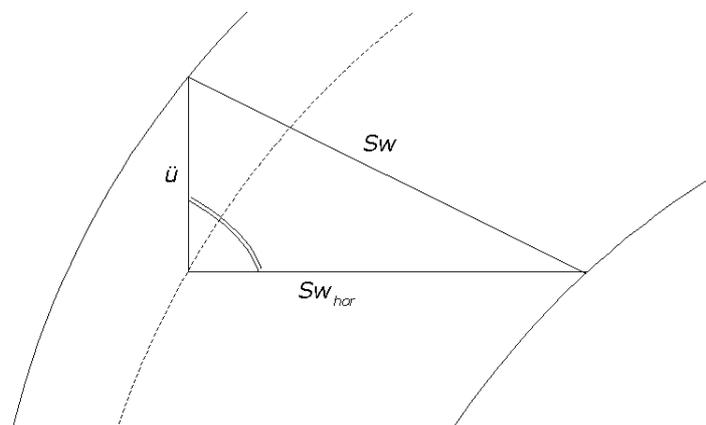


Abbildung 3.7: Geometrische Korrektur der Spurweite (Reduktion in Horizontalebene)

Bei einer Kurvenüberhöhung $\ddot{u} < 0$ (üblich in Links-Kurven mit $R < 0$) ist der rechte Schienenstrang um den Betrag \ddot{u} [mm] gegenüber dem linken überhöht. Dementsprechend muss die Lage des rechten Gleisstranges korrigiert werden. Dies geschieht durch die Korrektur der Spurweite S_w und gegebenenfalls des Radius R_{rechts} .

Demzufolge ist bei einer Kurvenüberhöhung $\ddot{u} > 0$ (üblich in Rechts-Kurven mit $R > 0$) der linke Schienenstrang um den Betrag \ddot{u} [mm] gegenüber dem rechten überhöht. Daher wird zur Reduktion in die Horizontalebene der linke Gleisstrang lagemäßig korrigiert. Dies erfolgt durch Reduktion der Spurweite S_w und des Radius R_{links} .

$$R_{links_hor} = R_{links} - \Delta S_w \quad (3.6) \quad R_{links_hor} \dots \text{horizontaler Radius } R_{links}$$

Durch das Vorzeichen des Radius $R_{links} < 0$ und die Korrektur $\Delta S_w < 0$ in Verbindung mit dem Subtraktionszeichen ergibt sich eine betragsmäßige Verkleinerung des Radius R_{links} des linken Gleisstranges.

Korrektur der Bogenlänge L aufgrund überhöhter Gleisstränge

Aufgrund der Messung der Bogenlänge am linken Gleisstrang (*siehe Abschnitt 2.3.3*) ist bei einer Überhöhung \ddot{u} des linken Gleisstranges auch die ermittelte Bogenlänge dL zu korrigieren. Diese Korrektur ds wird in der Regel bei durchfahrenen Rechtskurven angebracht (Kurvenüberhöhungen werden am kurvenäußeren Gleisstrang umgesetzt). In Abschnitten mit Überhöhung des rechten Gleisstranges (üblich in Linkskurven) braucht demzufolge keine Korrektur der Bogenlänge durchgeführt werden.

$$ds = \frac{dL \cdot (R_{links_hor} - \Delta S_w)}{R_{links}} - dL \quad (3.7) \quad dL = 0,25 \text{ m (siehe Abschnitt 2.3.3)}$$

$$dL_{hor} = dL + ds \quad (3.8) \quad dL_{hor} \dots \text{horizontale Bogenlänge } dL$$

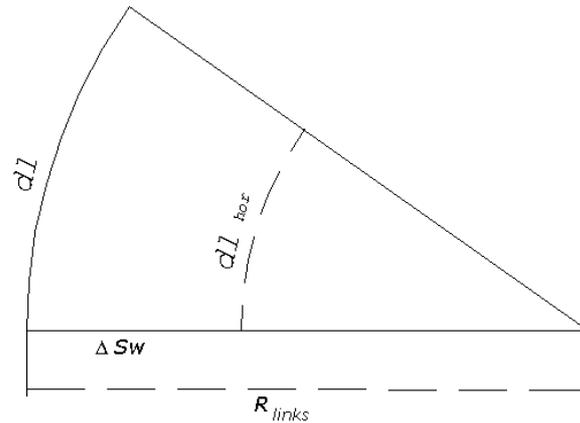


Abbildung 3.8: Korrektur der Bogenlänge L aufgrund überhöhter Gleisstränge

Die Korrektur der Bogenlänge ds hat in jedem Fall ein negatives Vorzeichen, was bedeutet, dass die Bogenlänge dL verkürzt wird. Dies ist anhand Abbildung 3.8 anschaulich nachvollziehbar.

3.3.3 Ermittlung der Gleisachse

Korrektur des Radius R der Pfeilhöhe auf die Gleisachse

Die gemessene, in die Horizontalebene reduzierte Spurweite Sw und der Radius der linken Pfeilhöhe R_{links} werden genutzt, um den Radius der Gleisachse R_{Achse} zu bestimmen.

$$R_{Achse} = R_{links_hor} - \frac{Sw_{hor}}{2} \quad (3.9)$$

Für Rechts-Kurven mit $R > 0$ wird der Betrag des Radius somit geringer. Im Gegensatz dazu bewirkt in Links-Kurven mit $R < 0$ das negative Vorzeichen eine Vergrößerung des Betrages des Radius R .

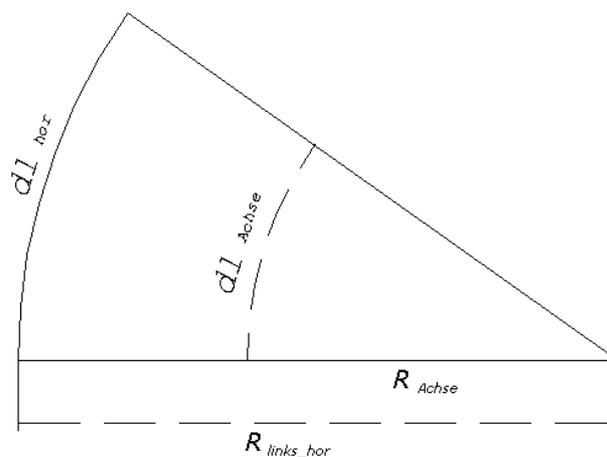


Abbildung 3.9: Reduktion der Bogenlänge dl und des Radius R der Pfeilhöhe auf die Gleisachse

Reduktion der Bogenlänge dL auf die Gleisachse

Auf Grund der Messung der Bogenlänge L am linken Gleisstrang (siehe Abschnitt 2.3.3) ist die ermittelte Bogenlänge dL auf die entsprechende Bogenlänge dL_{Achse} in Gleismitte zu korrigieren.

$$dL_{Achse} = \frac{dL_{hor} \cdot R_{Achse}}{R_{links_hor}} \quad (3.10)$$

dL_{hor} ... horizontale Bogenlänge dL (siehe Abschnitt 3.3.2)

dL_{Achse} ... Bogenlänge auf der Gleisachse

$$ds_{Achse} = dL_{Achse} - dL_{hor} \quad (3.11)$$

ds_{Achse} ... Korrektur der Bogenlänge auf die Gleisachse

Die Korrektur der Bogenlänge ds_{Achse} hat in Links-Kurven ($R > 0$) ein positives Vorzeichen, was eine Verlängerung der Bogenlänge bewirkt. In Rechts-Kurven ($R < 0$) ist die Korrektur ds_{Achse} mit einem negativen Vorzeichen behaftet, was eine Kürzung der Bogenlänge dL zur Folge hat. Dies ist anhand der Skizze (Abbildung 3.9) anschaulich nachvollziehbar.

4 Elementfindung

4.1 Planungsrichtlinien und -verordnungen

4.1.1 BOStrab-Trassierungsrichtlinien

Das Gleisnetz der Berliner U-Bahn fällt in den Wirkungsbereich der bundesweiten Verordnung für den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab). Die BOStrab wurde am 11.12.1987 vom Bundesministerium für Verkehr veröffentlicht.

Für die Trassierung der Gleisstrecken im Wirkungsbereich der BOStrab wurden am 18.05.1993, ebenfalls vom Bundesministerium für Verkehr, die BOStrab-Trassierungsrichtlinien veröffentlicht.

In ihnen werden zur Wahrung der Sicherheit beim Betrieb von Straßenbahnen Regel- und Grenzwerte für Trassierungsparameter festgelegt.

4.1.2 RPT der Berliner U-Bahn

Die Richtlinien für Planung und Trassierung der Berliner U-Bahn (RPT) wurden 1970 vom Berliner Senat für Bau- und Wohnungswesen veröffentlicht.

Seit dem Erscheinen der RPT wurden in der Gleistrassierung der Berliner U-Bahn u.a. einheitlich folgende Trassierungselemente benutzt:

- Gerade
- Übergangsbogen (Klothoide, kubische Parabel)
- Kreis

Vor 1970 wurden aufgrund der noch schlecht entwickelten Rechnertechnik alternativ zu Klothoiden auch biquadratische und kubische Parabeln verwendet. Die Reihenentwicklungen zur Berechnung der Klothoiden waren damals zu rechenaufwendig. Im heutigen Zeitalter leistungsfähiger Rechner ist dieses Problem sicher kein Grund mehr für eine Verwendung von Parabeln als Alternative zur Klothoide.

Die Vielfalt der vor Erstellung der RPT verwendeten Trassierungselemente auf den Strecken der Berliner U-Bahn stellt ein Problem für die automatisierte Detektierung der Trassierungselemente dar. (*siehe Abschnitt 6*)

Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Gleisabschnitte gewählt, die nach den Richtlinien der RPT (nach 1970) geplant und gebaut wurden.

4.1.3 Fahrdynamische und wirtschaftliche Richtlinien

Bei diesen Richtlinien handelt es sich um Empfehlungen aus Gründen des Fahrkomforts und der Geringhaltung des Verschleißes an Gleis und Rädern und einer hohen Reisegeschwindigkeit.

Die Bestrebungen gehen weiterhin dahin, die betriebswirtschaftlich interessanten Energieverbrauchswerte zu minimieren und Fahrzeiten zu verringern.

Zu diesem Thema verweise ich auf einschlägige Literatur (z.B. [FIEDLER 1999], [FÜRMETZ 1985], [SIEGMANN 2000]).

4.2 Trassierungselemente im Krümmungs- und Radienbild

Das Trassierungselement Gerade erscheint im Krümmungsbild als Gerade mit konstanter Krümmung $K = 0$.

Kreisbögen werden im Krümmungsbild als Gerade mit der konstanten Krümmung

$$K = \frac{1}{R} \text{ dargestellt.}$$

Die Klothoide nimmt die Funktion als Übergangsbogen zwischen Elementen unterschiedlicher Krümmung ein. Es wird ein möglichst stetiger Verlauf der Krümmung (Vermeidung von Sprungstellen im Krümmungsverlauf) angestrebt. Dieser wirkt sich positiv auf den Fahrkomfort, den Verschleiß und die Betriebssicherheit der Schienenfahrzeuge aus. Die Klothoide wird im Krümmungsbild als Gerade mit linearem Anstieg $m \neq 0$ abgebildet.

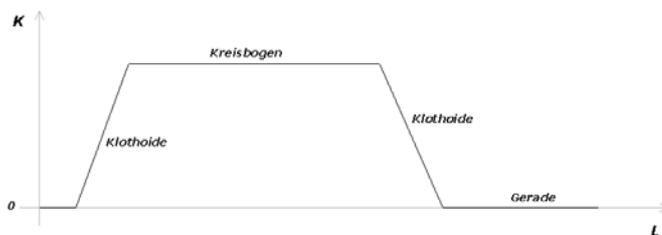


Abbildung 4.1: Trassierungselemente im Krümmungsbild

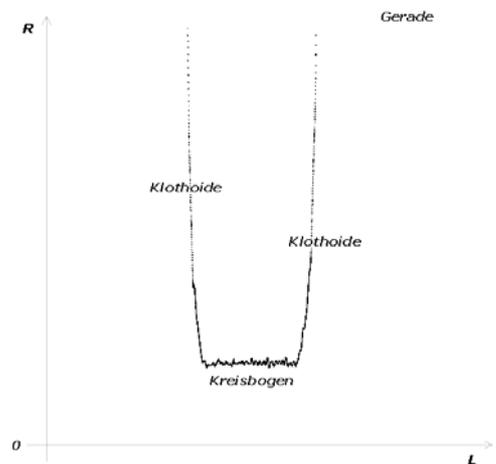


Abbildung 4.2: Trassierungselemente im Radienbild

Unterscheidung der Trassierungselemente im Krümmungsbild:

Gerade: konstante Krümmung ($K = 0$)

Kreis: konstante Krümmung ($K \neq 0$)

Klothoide: stetig linear ändernde Krümmung ($A^2 = RL$ bzw. $A^2 = L/K$)

Der Klothoidenparameter A stellt einen Maßstabsfaktor auf die Längenmaße L und R der Einheitsklothoide $L \cdot R = 1$ dar.

Das Radienbild hat seine eigentliche Bedeutung im Bereich von Kreisbögen. Ein Kreisbogen wird im Radienbild als Gerade mit konstantem Radius $R \neq 0$ abgebildet. Die Abbildung von Klothoiden und Geraden im Radienbild ist auf Grund des reziproken

Verhältnisses $K = \frac{1}{R}$ stark verzerrt und für die Elementdetektierung nicht verwendbar.

An den folgenden Abbildungen ist der Vorteil der Detektierung der Kreisbögen im Radienbild gut zu erkennen. Die reziproke Funktion $1/K$ (Radienbild) verhält sich deutlich aggressiver als der Krümmungsverlauf (Krümmungsbild) in den Unterschieden zwischen Geraden und Kreisbögen. Die Relation zwischen überlagerter Schwingungsamplitude (Kapitel 4.3) und Darstellung des Kreisbogens unterscheidet sich daher stark im Krümmungs- und im Radienbild. Während sich im Krümmungsbild der Kreisbogen mit dem Radius $R \sim 1100 \text{ m}$ kaum von der Schwingungsamplitude der überlagerten Eigenschwingung abhebt, ist im Radienbild ein deutlich trennbarer Unterschied zu erkennen.

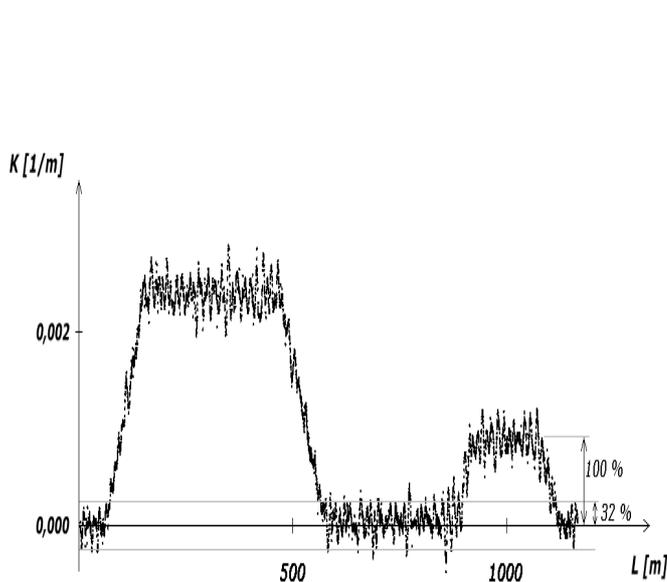


Abbildung 4.3:
Verhältnis $K_{\text{Eigenschwingung}} / K_{\text{Kreisbogen}}$
im Krümmungsbild

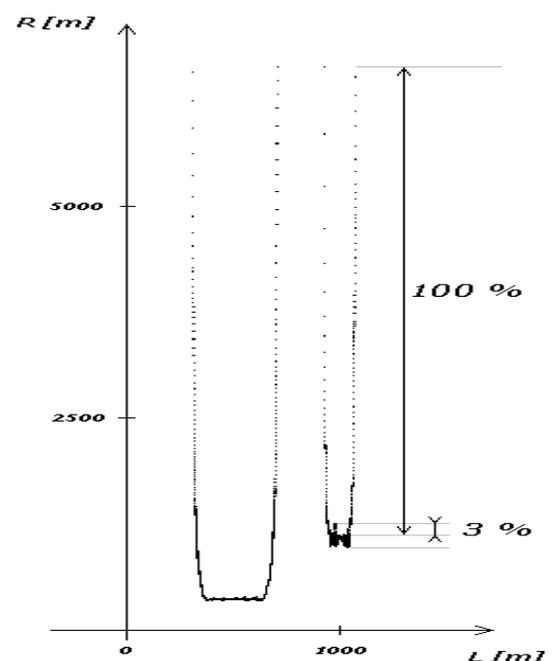


Abbildung 4.4:
Verhältnis $K_{\text{Eigenschwingung}} / K_{\text{Kreisbogen}}$
im Radienbild

In dem gewählten Beispiel für 2 Kreisbögen mit Radien von $R \sim 1100 \text{ m}$ und $R \sim 400 \text{ m}$ beträgt die Relation zwischen $K_{\text{Eigenschwingung}}$ und $K_{\text{Kreisbogen}}$ ca. 11 % bzw. 32 % im Krümmungsbild und ca. 1 % bzw. 3 % im Radienbild.

Diese Eigenschaft prädestiniert das Radienbild zur Verwendung zur Kreisbogen-detektierung.

Eine etwas andere Bewegung vollführen die Radsätze der DB AG. Diese Radsätze mit Rädern konisch geformter Laufflächen beschreiben eine wellenförmige Bahn um die Gleislängsachse. Dies wird auch als Sinuslauf bezeichnet. (siehe [FIEDLER 1999])

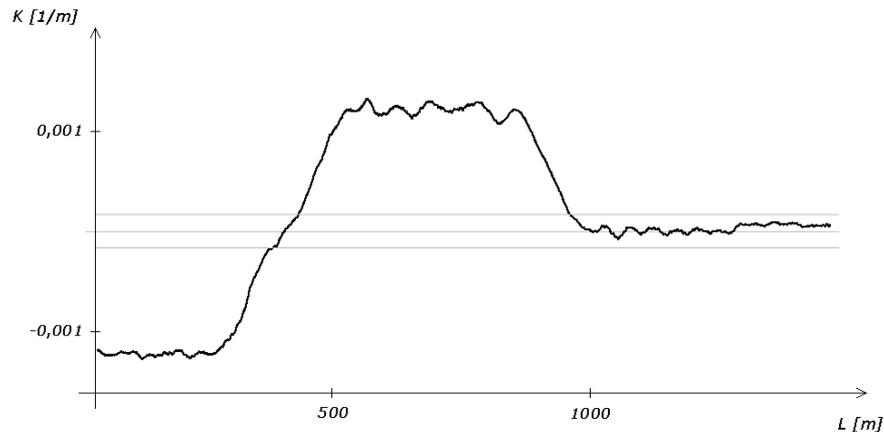


Abbildung 4.2: Eigenschwingung des Messwagens (mit konischen Laufflächen)

4.3.2 Bestimmung der Amplitude der überlagerten Eigenschwingung

Zur automatisierten Detektierung der Trassierungsparameter muss ein Kriterium gefunden werden, um lokale Schwingungen von Erscheinungen eines Trassierungselementes im Krümmungsbild zu unterscheiden. Ein Unterscheidungskriterium stellt die Frequenz f der Schwingung in Abhängigkeit von der Bogenlänge L dar. So kann die überlagerte Schwingung (hohe Frequenzen f_i) von den Trassierungselementen (niedrige Frequenzen f_l) getrennt werden.

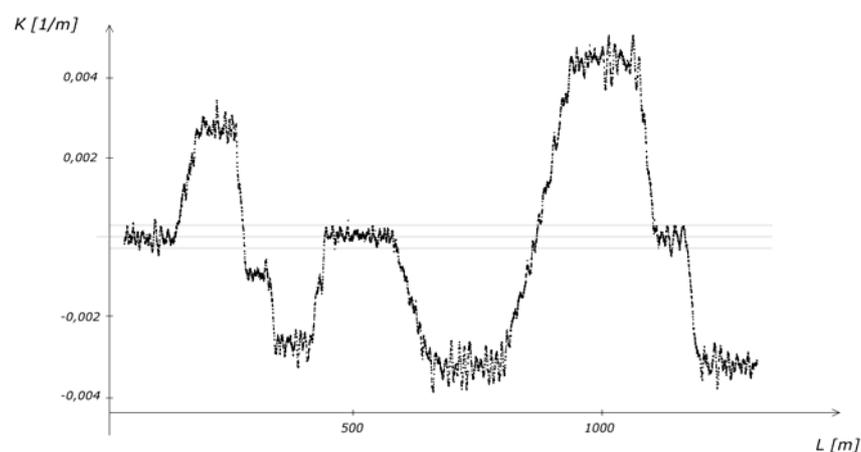


Abbildung 4.3: Eigenschwingung des Messwagens (mit zylindrischen Laufflächen)

Die Schwingungsdauer $T = \frac{1}{f}$ liefert ein relativ einfaches Unterscheidungskriterium.

Wogegen die übliche Schwingungsdauer T einer Folge von Trassierungselementen auf den Strecken der Berliner U-Bahn mindestens ca. 80 bis 90 m beträgt (siehe Abschnitt 4.4.2), weist die überlagerte Eigenschwingung eine weitaus kürzere Schwingungsdauer T zwischen ca. 5 und 12 m auf.

Die Schwingungsdauer T und die Amplitude A der Eigenschwingung variieren dabei relativ stark (unharmonische Schwingung), was den Einsatz von Filtertechniken erschwert bzw. nur mit Informationsverlust zulässt. (siehe [RETSCHER 1996])

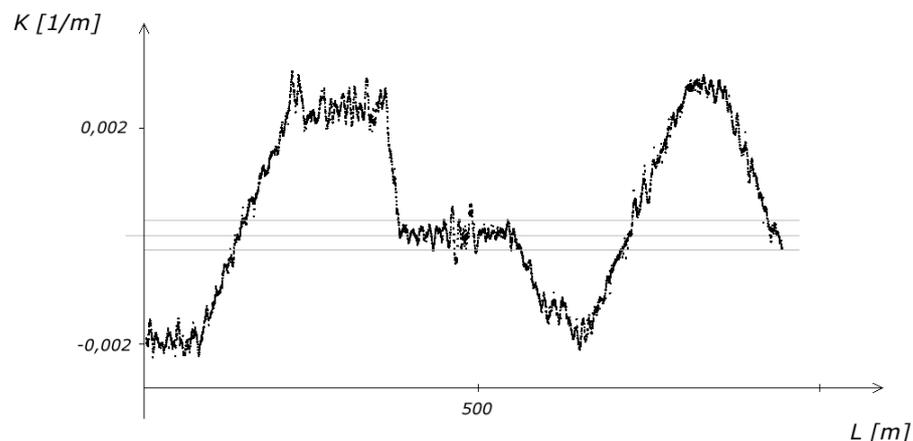


Abbildung 4.4 unharmonische Eigenschwingung des Messwagens

Zur Unterscheidung einer lokalen Schwingung von einem Trassierungselement ist die Bestimmung der Amplitude A der Eigenschwingung des Messwagens nötig. Die Schwingungsdauer T einer Elementenfolge bzw. die Elementenmindestlängen L_{min} sind in Trassierungsrichtlinien [BOStrab 1993] und [RPT 1970] festgelegt. (siehe Abschnitt 4.4.2) Durch Festlegung einer weitgesteckten Toleranz (z.B. $\Delta R = 150m$) zur Detektierung von Kreisbögen (siehe Abschnitt 4.2) ist es möglich, Kreisbögen (mit konstantem Radius) relativ unabhängig von der Amplitude der überlagerten Eigenschwingung im Radienbild zu detektieren. In den detektierten Bereichen (mit einer Mindestlänge ab ca. 20 m) wird im Krümmungsbild die überlagerte Eigenschwingung $K_{Eigenschwingung}$ eines Datensatzes bestimmt. Befinden sich nicht genügend lange Kreisbögen auf dem Gleisabschnitt, so dass die automatische Bestimmung der Amplitude der Eigenschwingung nicht gelingt, ist über die Steuerdatei der Software 'railsoft 1.0' ebenfalls eine manuelle Festlegung der Amplitude $K_{Eigenschwingung}$ möglich.

Die Amplitude A der Eigenschwingung beeinflusst das Auflösungsvermögen des Erkennungsalgorithmus. Es sind nur von Geraden abweichende Trassenelemente detektierbar, die eine größere Amplitude im Krümmungsbild aufweisen als die Amplitude der überlagerten Eigenschwingung.

$$A_{Element} > A_{Eigenschwingung} \quad \text{bzw.} \quad K_{Element} > K_{Eigenschwingung}$$

Dies führt zum Trennschärfe-Kriterium des Erkennungsalgorithmus:

$$\frac{1}{R_{\max}} > K_{Eigenschwingung} \quad (4.1)$$

R_{\max} ... maximaler Radius R der
zu detektierenden Trassenelemente

Somit ergibt sich der maximal detektierbare Kurvenradius aus:

$$R_{\max} < \frac{1}{K_{Eigenschwingung}} \quad (4.2)$$

Eine möglichst große Differenz zwischen Amplitude der Eigenschwingung und kleinster zu detektierender Krümmung des maximalen Kreisbogens ($1/R_{\max}$) begünstigt die sichere Erkennung aller vorhandenen Trassierungselemente.

In den Messdaten des Plasser & Theurer EM 80 der Berliner BVG von Strecken der Berliner U-Bahn wurden die Amplituden der überlagerten Eigenschwingung relativ konstant mit $K_{Eigenschwingung} \sim 0,0003 [1/m]$ bestimmt. Dies bedeutet nach Formel (4.2) ein ungefähres Auflösungsvermögen von Trassierungselementen mit $R < 3333 m$.

Durch Glättung* mittels eines gleitenden Mittelwertfilters (siehe Abschnitt 4.4.4) kann die Erkennungsgrenze der Trassenelemente-Roherkennung nochmals leicht verschoben werden.

Nach Glättung wurden relativ konstant die Amplituden der überlagerten Eigenschwingung mit $K_{Eigenschwingung} \sim 0,00025 [1/m]$ ermittelt. Dies bedeutet ein ungefähres Auflösungsvermögen von Trassierungselementen mit $R < 4000 m$.

In Datensätzen der DB Netz AG der Oberbaumesswageneinheit (OMWE) auf der ICE-Strecke Berlin - Hannover wurden maximale Schwingungsamplituden von $K_{Eigenschwingung} \sim 0,000055 [1/m]$ ermittelt. Dies entspricht einem Auflösungsvermögen von Trassierungselementen mit $R < 18000 m$.

*Bemerkung: Es sei darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Filtertechniken ausschließlich für die Elementen-Roherkennung empfohlen wird.

Amplitude $K_{\text{Eigenschwingung}}$ und Elementenmindestlänge L_{min} stellen die Grundlage des verwendeten Erkennungsalgorithmus zur Detektierung der Trassierungselemente des untersuchten Gleisabschnittes dar.

4.4 Trassenelemente-Roherkennung

4.4.1 Anwendung eines Differenzenfilters

Die Anwendung eines Differenzenfilters (1. Ableitung der Krümmung K nach der Bogenlänge L) liefert theoretisch ein gutes Kriterium zur Detektierung von Klothoiden. Die Übergangsbögen würden hier als ansteigende (bzw. fallende) Geraden mit einem Anstieg $m \neq 0$ erscheinen. Geraden und Kreisbögen mit ihrem konstanten Krümmungsverhalten ergeben dagegen eine Gerade ($m = 0$) auf der Null-Achse.

$$\Delta K_i = K_i - K_{i-1} \quad i = 2, 3 \dots n \quad (4.3)$$

Durch das Einwirken der teilweise großen überlagerten Eigenschwingung zeigte sich die Anwendung eines Differenzenfilters zur Elementerkennung als nicht sinnvoll. Auch der Versuch einer Glättung mittels einer Basis von 15-20 m führte nicht zum gewünschten klaren Unterscheidungsgrad der Elemente. Ähnliche Effekte sind beim Winkelbild zu erwarten.

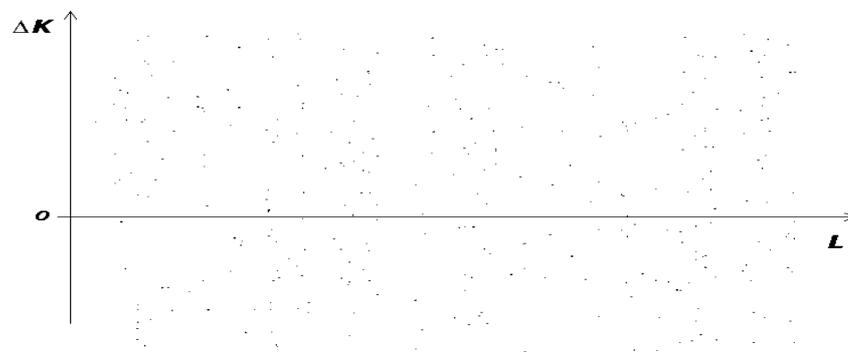


Abbildung 4.5: Ergebnis nach Anwendung eines Differenzenfilters

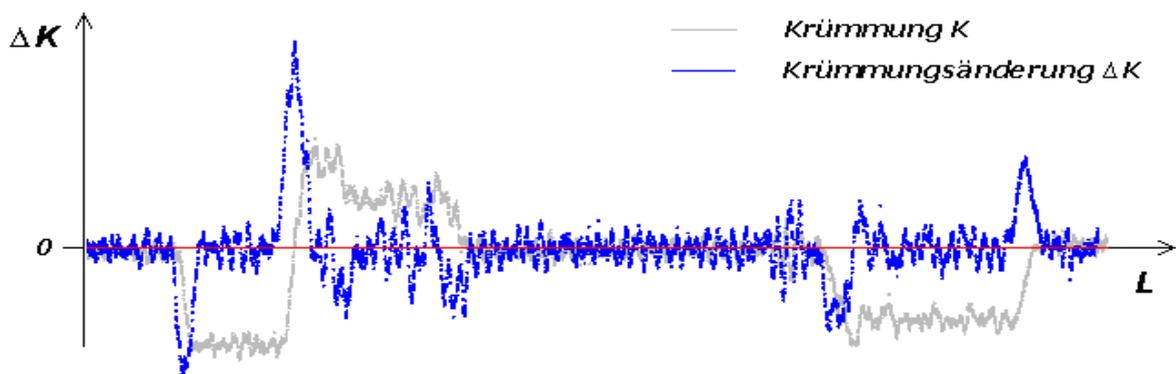


Abbildung 4.6: Ergebnis nach Anwendung eines Differenzenfilters (Basis 15 m)

4.4.2 Elementen-Mindestlängen

Elementenmindestlängen sind nach [BOStrab 1993] und [RPT 1970] für die Elemente Gerade und Übergangsbogen (Klothoide) vorgeschrieben.

Gerade

Die Mindestlänge einer Geraden $min l_g$ zwischen zwei entgegengerichteten Übergangsbögen beträgt nach [BOStrab 1993] und [RPT 1970]:

$$min l_g [m] = \frac{v_e [km/h]}{10} \quad (4.4) \quad v_e \dots \text{Entwurfsgeschwindigkeit in [km/h]}$$

Sind der Endpunkt des ersten Übergangsbogens und der Anfangspunkt des entgegengerichteten Übergangsbogens identisch, ist keine Zwischengerade einzuführen.

Nach [BOStrab 1993] ist für (straßen)unabhängige Bahnkörper eine Entwurfsgeschwindigkeit $v_e = 70 \text{ km/h}$ anzunehmen. Können Grenzwerte für Trassierungsparameter mit der Entwurfsgeschwindigkeit v_e nicht eingehalten werden, so ist für diesen Gleisabschnitt eine geringere zulässige Geschwindigkeit $zul v$ festzulegen. Dies bedeutet, die Geradenmindestlänge l_g kann im Verlaufe eines Gleises variabel sein. Sie beträgt in der Regel $l_g = 7 \text{ m}$.

Klothoide

Die Mindestlänge eines Übergangsbogens (Klothoide) $min l_u$ beträgt nach [BOStrab 1993]:

$$min l_u [mm] = \frac{v_e [km/h] \cdot \Delta a_q [m/s^2]}{2,4} \quad (4.5)$$

$$\text{mit } a_q [m/s^2] = \frac{v^2 [km/h]}{3,6^2 \cdot R [m]} - \frac{\ddot{u} [mm]}{153} \quad min \ddot{u} [mm] = \frac{11,8 \cdot v^2 [km/h]}{R [m]} - 150$$

Die Querbeschleunigung a_q resultiert aus der Wirkung der Fliehkraft in Kurven. Sie ist abhängig von der Krümmung K des Bogens ($K = 1/R$), der Fahrgeschwindigkeit v und der Überhöhung \ddot{u} des Gleises.

Laut [BOStrab 1993] wird im Regelfall der Trassierung eine leicht positive Querbeschleunigung von ca. $a_q = 0,2 \text{ m/s}^2$ angestrebt. Der Grenzwert beträgt $a_q = 0,98 \text{ m/s}^2$.

Die bautechnisch minimal umzusetzende Überhöhung beträgt nach [RPT 1970] $min \ddot{u} = 20 \text{ mm}$. Die maximale Überhöhung ist in [BOStrab 1993] mit $max \ddot{u} = 165 \text{ mm}$ und in [RPT 1970] bindend für die Berliner U-Bahn mit $max \ddot{u} = 150 \text{ mm}$ festgelegt.

In [RPT 1970] ist für die Mindestlänge eines Übergangsbogens (Klothoide) $\min l_u$ kein Grenzwert festgelegt. Es wird empfohlen:

$$\min l_u [m] = \ddot{u} [m] \cdot 10 v_e [km/h] \quad (4.6)$$

$$\text{mit} \quad \min \ddot{u} [mm] = \frac{11,8 \cdot v^2 [km/h]}{R [m]} - 90$$

Mit einer Entwurfsgeschwindigkeit von $v_e = 70 \text{ km/h}$ und der bautechnisch bedingten Mindestüberhöhung ergibt sich somit in der Regel eine Mindestlänge für Klothoiden von $l_u = 14 \text{ m}$.

Wie bereits zur Ermittlung der Geradenmindestlänge erwähnt, kann in Gleisabschnitten, auf denen die Entwurfsgeschwindigkeit v_e nicht eingehalten werden kann, eine geringere zulässige Geschwindigkeit $zul\ v$ festgelegt werden. Dies führt ebenfalls zu einer variierenden Klothoidenmindestlänge l_u im Verlaufe eines Gleises.

Umsetzung in der Software 'railsoft 1.0'

Es ist zu erkennen, dass die Mindestlänge einer Geraden l_g zwischen entgegengerichteten Kreisbögen die kürzeste zu detektierende Elementenlänge auf den Strecken der Berliner U-Bahn darstellt. Daher wird l_g als Mindestelementenlänge L_{min} in der Software 'railsoft 1.0' für alle Elementtypen verwendet.

Die Mindestelementenlänge L_{min} verhält sich wie bereits erwähnt variabel im Streckenverlauf, auf Grund von Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit $zul\ v$ in einzelnen Streckenabschnitten (Langsamfahrstellen).

4.4.3 Entwicklung von Elemente-Kriterien

Nach den BOStrab-Trassierungsrichtlinien [BOStrab 1993] wird empfohlen, als Form des Übergangsbogens bevorzugt die fahrdynamisch günstige Klothoide anzuwenden. Auf Grund großer Winkeländerungen (extrem kleine Kurvenradien bis zu 180 m) werden nach [SIEGMANN 2000] bereits seit den 1930er-Jahren Klothoiden beim Bau der Berliner U-Bahn verwendet.

Daher wird innerhalb der vorliegenden Arbeit und der Software 'railsoft 1.0' von den Trassierungselementen Gerade, Klothoide und Kreis ausgegangen.

Eine Erweiterung um weitere Element-Typen wie kubische Parabel, Blosskurve oder Sinusoide ist denkbar. Das Datenmodell ist daher sehr universell angelegt. Jedes Trassierungselement wird mit den Objekteigenschaften: Element-Typ, Bogenlänge Elementanfang, Bogenlänge Elementende, Anfangs- und Endkrümmung abgelegt, so dass weitere Übergangsbögen zwischen Gerade und Kreis beliebig im Nachhinein einbezogen

werden können. Hierzu ist lediglich das Einfügen einer Funktion zur Differenzierung der Übergangselemente in die Software 'railsoft 1.0' notwendig. Diese müsste im Anschluss an die Erkennung der Geraden- und Kreisbogenabschnitte involviert werden. (siehe Abschnitt 4.4.5)

Nach den Eigenschaften der Elemente (siehe Abschnitt 4.2) ergeben sich folgende Elemente-Kriterien:

Element-Typ	Forderung	Umsetzung
Gerade	$K = const.$ $K = 0$ $l_g \geq \min l_g$	$ K_{i-1} - K_i < K_{Eigenschwingung}$ $ K_i \leq K_{Eigenschwingung}$ $l_G \geq L_{min}$
Kreis	$R = const.$ $K = const.$ $K \neq 0$	$ R_{i-1} - R_i < R_{Eigenschwingung}$ $ K_{i-1} - K_i < K_{Eigenschwingung}$ $K_{Eigenschwingung} < K_i $ $l_R \geq L_{min}$
Klothoide	$A^2 = R L_u = const.$ $l_u \geq \min l_u$	$ \Delta R_{i-1,H} \Delta L_{i-1,H} - \Delta R_{i-1,i} \Delta L_{i-1,i} \leq \varepsilon^2$ (mit $L_H = \frac{L_{i-1} + L_i}{2}$) $l_U \geq L_{min}$

(siehe Abbildung 4.7)

Die zulässige Differenz ε für den Klothoidenparameter A bei der Klothoiden-Detektierung ist in Abhängigkeit von der Größenordnung der Amplitude der überlagerten Eigenschwingung festzulegen. Ein relativ weitgestecktes Kriterium von z.B. $\varepsilon = 100 \text{ m}$ hat zur Folge, dass auch relativ stark von einer überlagerten Eigenschwingung beeinflusste Klothoiden im Krümmungsbild detektiert werden können.

In dem Berliner U-Bahn-Netz werden nach [BOStrab 1993] und [RPT 1970] weder Blosskurven noch Spurerweiterungen in Kurven, wie etwa bei Hochgeschwindigkeitsstrecken der Deutschen Bahn üblich, zur Trassierung verwendet. Dies ist auf Grund der geringen Entwurfsgeschwindigkeit mit $v_e = 70 \text{ km/h}$ und der Verwendung von Drehgestellen (vgl. Kapitel 2.1) nicht notwendig und zu aufwendig in der praktischen Realisierung.

4.4.4 GlättungsfILTER

GlättungsfILTER (Tiefpassfilter) dienen vor allem der Minderung des Messwertrauschens, das z.B. durch die in Abschnitt 4.3 beschriebene Bewegung des Messwagens im Gleis und die Messgenauigkeit entstehen kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein lineares Filterverfahren nach der Methode 'Gleitender Mittelwert' verwendet. (siehe [LUHMANN 2000])

Dabei kann über die Basis b (Anzahl der in die Mittelwertbildung einbezogenen Messwerte) die Dimension $[1;b]$ der Glättungsmatrix und somit der Grad der Glättung beeinflusst werden. Der Glättungseffekt steigt mit zunehmender Filtergröße und führt im Extremfall zum Verschmieren der Trassierungselemente.

Die folgende Glättungsmatrix wird über den Krümmungsverlauf, welcher als eindimensionale Matrix aufgefasst werden kann, geschoben.

$$K_{b,1} = \frac{1}{b} \cdot [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1] = \left[\frac{1}{b} \ \frac{1}{b} \ \frac{1}{b} \ \dots \ \frac{1}{b} \right] \quad (4.7)$$

Daraus folgt:

$$K_i = \frac{(K + K + \dots + K)}{b} \quad \text{und} \quad R_i = \frac{1}{K_i} \quad (4.8) \quad (4.9)$$

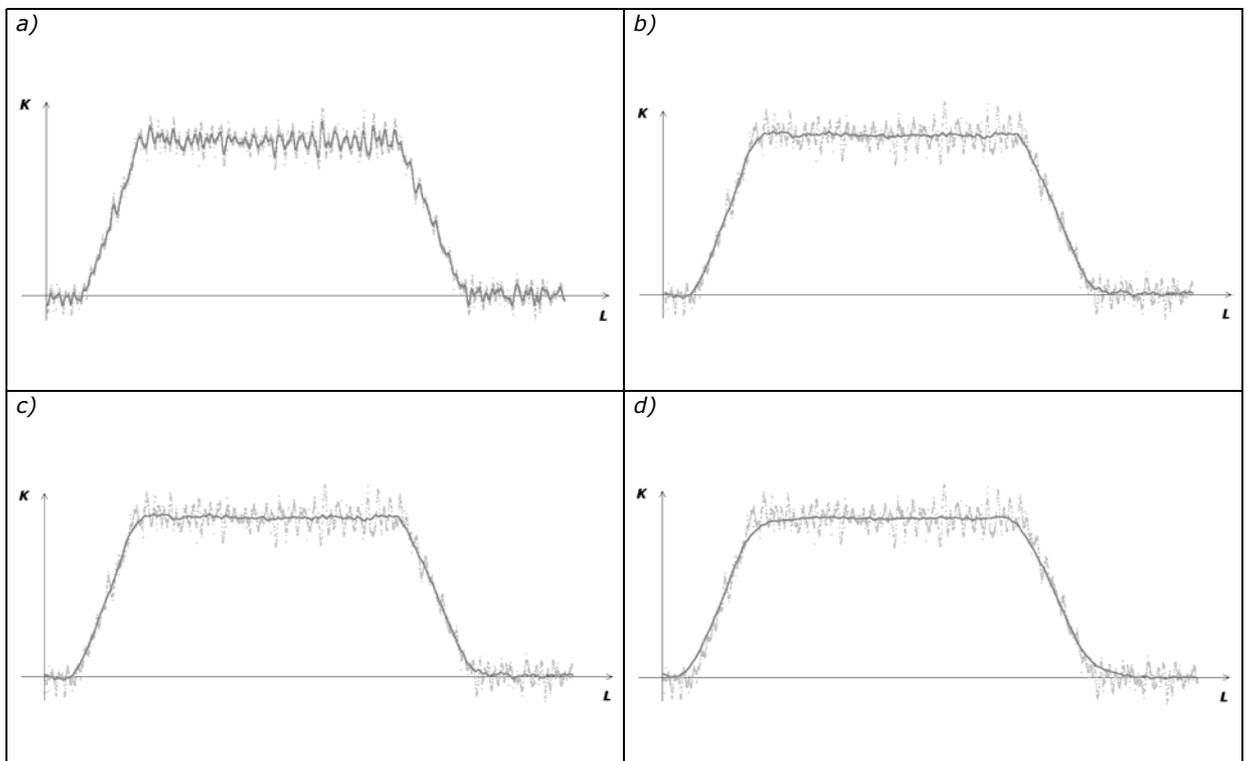


Abbildung 4.6: Wirkungweise eines Mittelwertfilters mit einer Basis von

a) L_{min} b) $2 L_{min}$ c) $5 L_{min}$ d) $10 L_{min}$ mit $L_{min} = 7 \text{ m}$

Mit Wahl der Basis von $b = 2 L_{min}$ wird einerseits ein guter Glättungseffekt erzielt und andererseits sichergestellt, dass kein Element durch den Filtervorgang 'verschluckt' wird.

Zu empfehlen wäre die versuchsweise Verwendung eines aufwendigeren Glättungsfilters wie z.B. die in [RETSCHER 1996] untersuchten Kalman- und Wiener Filterverfahren, um den Einfluss der Eigenschwingungserscheinungen auf die Roherkennung gering zu halten.

Auf Grund der variierenden Amplitude der überlagerten Eigenschwingung $A_{Eigenschwingung}$ und der variierenden Schwingungsdauer $T_{Eigenschwingung}$ verfälscht ein auf eine Frequenz eingestelltes Filterverfahren die normalverteilten Messwerte systematisch. Diese Beeinflussung durch Filtervorgänge wird mit der Verwendung der normalverteilten ungefilterten Messgrößen (Krümmungen) zur Bestimmung der Trassierungsparameter (siehe Abschnitt 5.1) vermieden.

4.4.5 Vorgehen zur Roherkennung

Der Krümmungsverlauf wird sukzessive mit einer Schrittweite von $\frac{L_{min}}{5}$ unter

Verwendung der Elemente-Kriterien (Abschnitt 4.4.3) abgetastet. So wird gewährleistet, dass jedes Trassierungselement an mindestens 4 Punkten angetastet und der rechentechnische Aufwand (Prozessierzeit) begrenzt wird. Nach dem Nyquist-Theorem* sind zur Erkennung eines Elementes mindestens 2 Abtastpunkte notwendig.

Hierbei ist zu beachten, dass die Elementenmindestlänge L_{min} und somit auch die Abtastschrittweite im Verlaufe von Gleisabschnitten mit unterschiedlichen zulässigen Fahrgeschwindigkeiten variiert. (siehe Abschnitt 4.4.2)

Als Eingangswerte für die Elemente-Kriterien von Gerade und Kreisbogen (Abschnitt 4.4.2) fungieren jeweils ein Mittelwert (K_{i-1} bzw. R_{i-1}) aus j Abtastintervallen und ein einzelner Abtastwert (K_i bzw. R_i) im Abstand der Abtastschrittweite. Startwert für jedes Kriterium ist $j = 5$ (Elementenmindestlänge).

Das Klothoidenkriterium ist nicht erfüllt, wenn am Übergang der Klothoide zum folgenden Kreisbogen das Kreiskriterium bereits erfüllt ist.

*Das Nyquist-Theorem besagt, die Abtastfrequenz möge mindestens doppelt so groß sein wie die höchste abzutastende Frequenz.

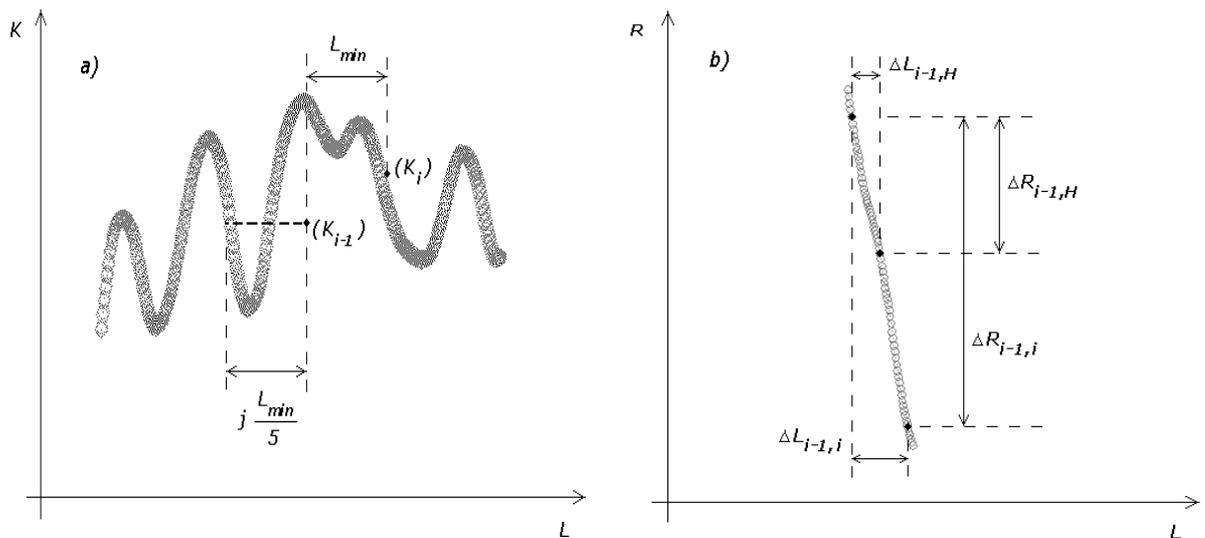


Abbildung 4.7: Eingangswerte für Elemente-Kriterien zur Roherkennung von
 a) Gerade, Kreisbogen b) Klothoide

Ist innerhalb des Bereiches der j Abtastintervalle eines der Elementekriterien erfüllt, wird das untersuchte Intervall so lange erweitert, bis das Kriterium nicht mehr erfüllt wird. Beträgt die Bogenlänge L des Bereiches in dem ein Kriterium erfüllt ist Werte größer der Elementenmindestlänge L_{min} , wird das Element als Objekt mit den Eigenschaften 'Element-Typ', 'Anfangsbogenlänge', 'Endbogenlänge', 'Anfangskrümmung' und 'Endkrümmung' im Arbeitsspeicher des Rechners abgelegt.

Im Ergebnis der Roherkennung der Trassierungselemente ist die Gleisgeometrie in den Testdatensätzen meist auf über 90 % des Gleisabschnittes bereits korrekt erkannt. Kleinere Fehldeutungen werden im folgenden Abschnitt der *Nachbereitung der Trassenelemente-Roherkennung* behandelt.

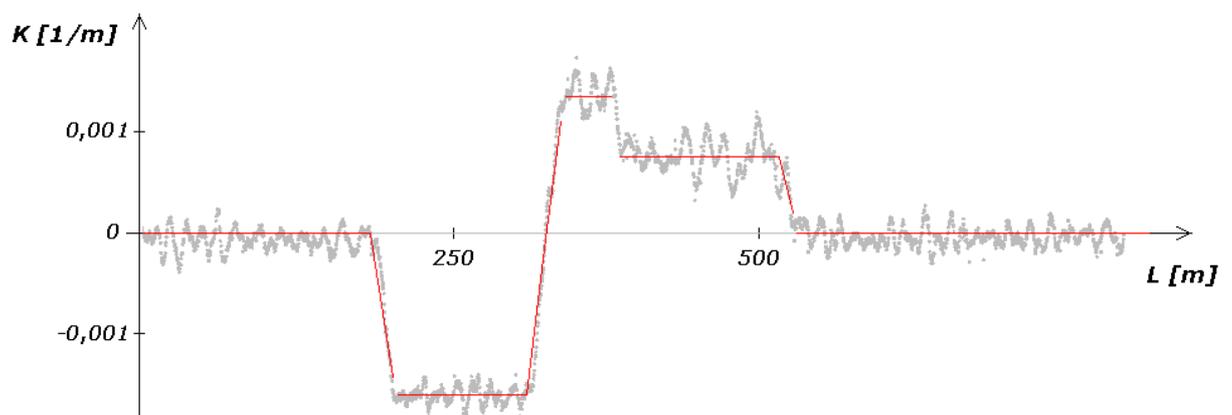


Abbildung 4.8: Ergebnis der Element-Roherkennung

4.5 Nachbereitung der Trassenelemente-Roherkennung

Einen wesentlichen Bestandteil der Elementerkennung stellt die Nachbereitung der Ersterkennung dar. In dieser werden aus dem Wissen über Abfolge der Elemente Fehldetektierungen erkannt und weitestgehend beseitigt.

Fehl-Erkennungen resultieren häufig aus einem ungünstigen Verhältnis der Elementenmindestlänge zur Messwagenlänge sowie aus falscher bzw. ungenauer Schätzung oder Ermittlung der Amplitude der Eigenschwingung.

Der Anteil fehlerkannter Abschnitte beträgt in den Testdatensätzen meist unter 10 %.

Auf Grund der Verwendung sehr kurzer Trassierungselemente bei U-Bahnen (*siehe Abschnitt 4.4.2*) kommt dem Verhältnis der Länge des Messwagens bzw. der Pfeilhöhenbasis zur Elementenmindestlänge der verwendeten Trassierungselemente eine große Bedeutung zu. Anhand der speziellen Situation der Berliner U-Bahn ist es theoretisch möglich, dass sich jede der 3 Messachsen (*Basis der Pfeilhöhenmessung* ~ 10 m) über einem anderen Trassierungselement (*Elementenmindestlänge* ~ 7 m) befindet.

Dies führt zu unerwünschten Verfälschungen des Krümmungsverlaufes und somit auch zu Fehldetektierungen bei Vorwärtsfahrt des Messwagens in Bereichen - 6 m (Abstand zwischen Achse 2 und Achse 3) und + 4 m (Abstand zwischen Achse 1 und Achse 2) von Elementübergängen. Diese Fehldeutungen müssen bei der Nachbereitung automatisiert erkannt und korrigiert werden.

Des Weiteren wird die Abfolge der erkannten Trassenelemente dahingehend geprüft, ob eine übliche Anordnung von Übergangsbögen (Klothoiden) zwischen Kreisbögen und Geraden vorliegt. Dies ist in den Testdatensätzen auf über 99 % der Gesamtstrecke der Fall.

Trifft dies nicht zu, z.B. durch Nichterkennung eines Elementes auf Grund einer größeren lokalen Störerscheinung, wird die Elementenabfolge dorthingehend ergänzt bzw. korrigiert.

Im Falle einer Wendeklothoide wird als Bedingung für die Endkrümmung der ersten Klothoide K_{E_i} und die Anfangskrümmung der zweiten Klothoide $K_{A_{i+1}}$ eingeführt:

$$K_{E_i} = K_{A_{i+1}} = 0$$

Weiterhin können Anfangspunkte $[L_{A_i}; K_{A_i}]$ und Endpunkte $[L_{E_i}; K_{E_i}]$ jeder Klothoide auf Grund der Funktion als Übergangsbogen mit dem Endpunkt des Vorgänger-Elementes $[L_{E_{i-1}}; K_{E_{i-1}}]$ und dem Anfangspunkt des Nachfolge-Elementes $[L_{A_{i+1}}; K_{A_{i+1}}]$ festgelegt werden.

$$[L_{A_i} = L_{E_{i-1}}]; \quad [K_{A_i} = K_{E_{i-1}}]$$

$$[L_{E_i} = L_{A_{i+1}}]; \quad [K_{E_i} = K_{A_{i+1}}]$$

Das Ergebnis der Roherkennung mit Nachbereitung stellt die Grundlage für alle weiteren Genauigkeitssteigerungen in der Parameterbestimmung der Trassierungselemente dar (siehe Kapitel 5). Elemente, die in diesem Stadium der Bearbeitung nicht detektiert wurden, werden mit Ausnahme von Geraden zwischen entgegengerichteten Klothoiden unerkannt bleiben. In den Testdatensätzen (siehe Kapitel 6) wurde überwiegend (in ca. 99 % der Gleisabschnitte) eine fehlerfreie detektierte Abfolge der vorhandenen Trassierungselemente erreicht.

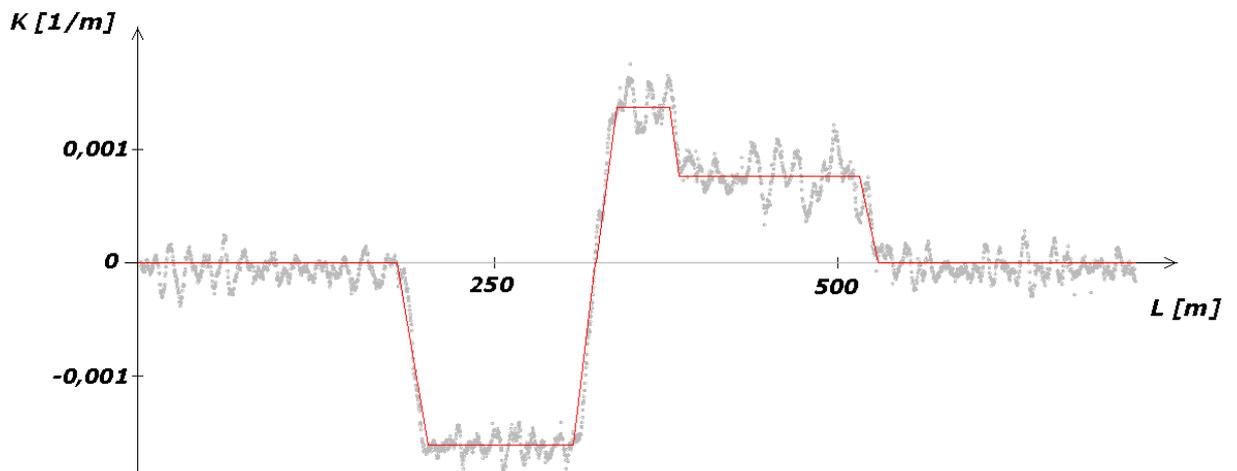


Abbildung 4.9: Zustand nach Nachbereitung der Element-Roherkennung

5 Bestimmung der Trassierungsparameter

5.1 Bestimmung der Elementübergangskordinaten

Das Bestreben der in Abschnitt 5.1 aufgezeigten Methoden geht dahin, die Näherungswerte für die Elementübergangskordinaten $[L,K]$ aus der Roherkennung zu verbessern. Daher werden die linearen Krümmungsverläufe der Trassenelemente unter Zuhilfenahme der Methoden der vermittelnden Ausgleichung mit Regressionsgeraden (ausgleichenden Geraden) approximiert. Durch Schnitt der Regressionsgeraden erhält man weitaus genauere Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der Trassierungselemente.

5.1.1 Die vermittelnde Ausgleichung

Aufgabe der Ausgleichungsrechnung ist es, mathematische Modelle an empirische Daten (Messungen, Beobachtungen) optimal anzupassen. [Grafarend,Schaffrin 1993]

Die Methoden der Ausgleichungsrechnung stellen Verfahren zur Lösung überbestimmter linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme dar. Im allgemeinen besteht die Aufgabe darin, aus n beobachteten (z.B. gemessenen) Größen l_i u unbekannte Parameter x_i zu bestimmen, die in einem funktionalen Zusammenhang mit den Beobachtungen stehen. Liegen mehr Beobachtungen vor als zur Bestimmung der Unbekannten notwendig sind ($n > u$), kann keine eindeutige Lösung mehr bestimmt werden und es erfolgt eine Schätzung der Parameter in funktionalen und stochastischen Modellen für die Ausgleichung des überbestimmten Systems.

Das funktionale Modell (auch teilweise als mathematisches Modell bezeichnet) beschreibt den Zusammenhang zwischen den 'wahren' Werten der Beobachtungen und den 'wahren' Werten der Unbekannten. Dabei werden die Beobachtungen durch Funktionen f der Unbekannten ausgedrückt.

Da wahre Werte in der Regel nicht bekannt sind, wird der Beobachtungsvektor durch die tatsächlichen Beobachtungen l und Verbesserungen v und der Unbekanntenvektor durch die ausgeglichenen Unbekannten x ersetzt.

Daraus ergeben sich die Verbesserungsgleichungen:

$$l + v = A x \quad \text{mit} \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \end{bmatrix} = J \quad (5.1)$$

Mit Hilfe einer Taylor-Reihenentwicklung, welche nach dem 1. Grad abgebrochen wird, werden die funktionalen Zusammenhänge linearisiert. Die A-Matrix (auch Koeffizientenmatrix genannt) entspricht somit der Jacobimatrix J und beinhaltet den linearen Anteil (Glieder 1. Ordnung) der Taylor-Reihenentwicklung.

Die Ermittlungen der Regressionsgeraden für Klothoiden und Kreisbögen im Krümmungsbild stellen lineare Ausgleichsprobleme dar.

Das stochastische Modell beinhaltet die Genauigkeitsinformationen des funktionalen Modells im Ausgleichsprozess.

Die stochastischen Eigenschaften der Beobachtungen l werden in der Kovarianzmatrix C_{ll} beschrieben.

$$C_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_{l_1}^2 & \text{cov}_{l_1 l_2} & \dots \\ \text{cov}_{l_2 l_1} & \sigma_{l_2}^2 & \\ \vdots & & \sigma_{l_n}^2 \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \text{cov}_{l_i l_j} = \rho_{l_i l_j} \sigma_{l_i} \sigma_{l_j} \quad (5.2)$$

$$i \neq j, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots n$$

$$-1 \leq \rho \leq 1$$

σ_{l_i} ... Standardabweichung der Beobachtung l_i

$\rho_{l_i l_j}$... Korrelationskoeffizient zwischen l_i und l_j

Die Korrelationskoeffizienten ρ geben die Abhängigkeiten der Beobachtungen untereinander an. Werden Korrelationskoeffizienten zu Null, sind diese Beobachtungen voneinander unabhängig. Der Korrelationskoeffizient 1 bedeutet lineare Abhängigkeit der Beobachtungen.

Mit Festlegung der Standardabweichung der Gewichtseinheit $\sigma_{0 \text{ a priori}}$ ergibt sich die Kofaktorenmatrix der Beobachtungen aus:

$$Q_{ll} = P^{-1} = \frac{1}{\sigma_{0 \text{ a priori}}^2} C_{ll} \quad (5.3)$$

Für praktische Ausgleichungsprobleme ist die wahre Standardabweichung σ in der Regel nicht bekannt und wird durch die empirische Standardabweichung s ersetzt.

Rechenschema zur vermittelnden Ausgleichung

Die Methode der kleinsten Quadrate wurde von C.F. Gauß 1794 entwickelt. Nach dieser Methode werden alle (überschüssigen) Beobachtungen zur Ermittlung der Unbekannten gleichmäßig und frei von Willkür berücksichtigt.

Aus der Methode der kleinsten Quadrate folgt die Forderung:

$$v^T P v \rightarrow \min!$$

Die notwendige Bedingung für ein relatives Minimum ist:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x_i^2} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Die Kofaktorenmatrix der Unbekannten Q_{xx} ergibt sich zu:

$$Q_{xx} = N^{-1} = (A^T P A)^{-1} \quad (5.4) \quad N \dots \text{Normalgleichungsmatrix}$$

Der Unbekanntenvektor x wird ermittelt über:

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (5.5)$$

Die Verbesserungen v ergeben sich aus:

$$v = A x - l \quad (5.6)$$

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit $\sigma_{0 \text{ a posteriori}}$ beträgt:

$$\sigma_{0 \text{ a posteriori}} = \sqrt{\frac{v^T P v}{r}} \quad \text{mit} \quad r = n - u \quad (r \dots \text{Redundanz}) \quad (5.7)$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten C_{xx} wird ermittelt:

$$C_{xx} = \sigma_{0a \text{ posteriori}}^2 Q_{xx} \quad (5.8)$$

5.1.2 Ermittlung von Regressionsgeraden

Die Näherungswerte für Anfangs- und Endpunkte der Trassierungselemente wurden bereits in der Elemente-Roherkennung mit Nachbereitung gewonnen. Diese werden durch iteratives Ausgleichen der Regressionsgeraden von Geraden, Klothoiden und Kreisbögen und Berechnen der Schnittpunkte der Regressionsgeraden verbessert.

Um die Ausgleichung bei teilweise noch auftretenden Modellfehlern (ungenaue Elementgrenzen) zu stabilisieren, werden die ersten 3 Iterationen mit den geglätteten Krümmungen K_i als Beobachtungen durchgeführt. Danach werden wie beschrieben die ungefilterten Messwerte benutzt.

5.1.2.1 Trassierungselement: Gerade

Geraden werden in ihrem Krümmungsverhalten als fehlerfrei angesetzt. Daraus folgt, dass auch die Parameter $m = 0$ und $c = 0$ der Geraden $K = m L + c$ im Krümmungsbild als fehlerfrei betrachtet werden.

5.1.2.2 Ausgleichung von Klothoiden im L,K-System

Im folgenden wird die Ausgleichung anhand eines Trassierungselementes dargestellt. Die Ermittlung der Regressionsgeraden der weiteren Elemente erfolgt analog zu diesem Beispiel.

Funktionales Modell:

$$K_i = m L_i + c \quad \begin{array}{l} K \dots \text{Krümmung [1/m]} \\ L \dots \text{Bogenlänge [m]} \end{array} \quad (5.9)$$

Beobachtungen: K_i (fehlerbehaftet) $i = 1, 2, \dots, n$

Unbekannte: m, c

Anzahl Beobachtungen: n

Unbekannte: 2

Redundanz: $n - 2$

Eine ausgleichende Gerade verläuft durch den Schwerpunkt.

Die Verbesserungsgleichungen lauten:

$$K_i + v_i = L_i m + c \quad (5.10)$$

Daraus folgt:

$$l + v = A x \quad \text{mit} \quad A = \begin{bmatrix} L_1 & 1 \\ L_2 & 1 \\ \dots & \dots \\ L_n & 1 \end{bmatrix} = J \quad (5.11)$$

Der Beobachtungsvektor l ergibt sich zu

$$l = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n]^T \quad (5.12)$$

Die Unbekannten x_i werden im Unbekanntenvektor x zusammengefasst:

$$x = \begin{bmatrix} m \\ c \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Stochastisches Modell:

Die Beobachtungen K_i sind stochastisch unabhängige normalverteilte Größen. Bei unkorrelierten Beobachtungen ist die Kovarianzmatrix lediglich auf der Hauptdiagonalen besetzt. Die Werte der Kovarianzen cov_{l_i, l_j} betragen Null.

$$C_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_{l_1}^2 & & \dots & 0 \\ & \sigma_{l_2}^2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & \sigma_{l_n}^2 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Daraus folgt die Gewichtsmatrix P als Einheitsmatrix E :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & & \dots & 0 \\ & 1 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & & 1 \end{bmatrix} = E \quad (5.15)$$

Die Parameter der ausgleichenden Geraden (Unbekanntenvektor x) ergeben sich nach Formel (5.5).

Die Standardabweichungen der Parameter und deren Kovarianzen (Kovarianzmatrix C_{xx}) werden nach (5.4), (5.7) und (5.8) ermittelt.

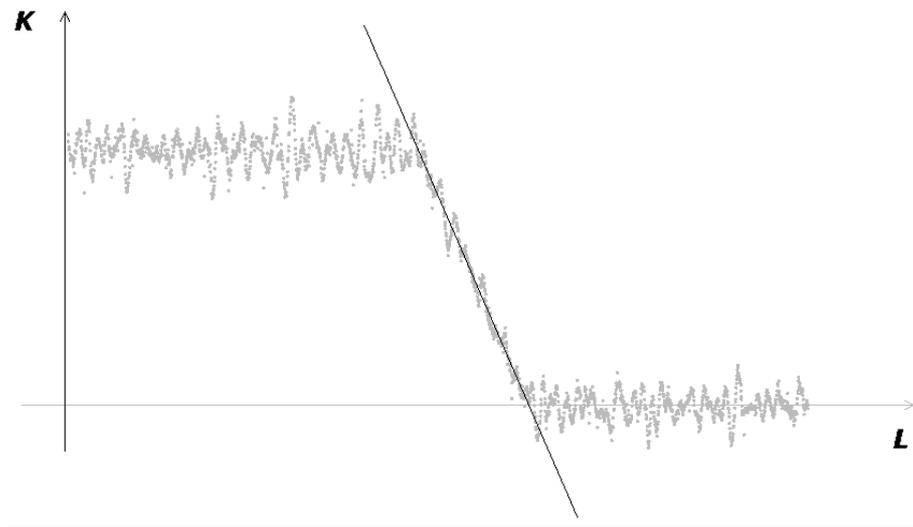


Abbildung 5.1: Regressionsgerade im Krümmungsbild einer Klothoide

5.1.2.3 Ausgleichung von Kreisbögen im L,K-System

Aus dem funktionalen Zusammenhang $K = c$ zwischen der unbekanntem Krümmung c des Kreisbogens und den Beobachtungen (Krümmungen K_i) ließe sich eine Ausgleichung nach dem Schema der Regressionsgeraden für Klothoiden im Krümmungsbild mit dem Anstieg $m=0$ durchführen.

Die A-Matrix sieht dementsprechend wie folgt aus:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Das funktionale Modell vereinfacht sich so, dass die Unbekannte c als gewogener Mittelwert der Beobachtungen angegeben werden kann.

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i K_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad \text{mit} \quad P_i = \frac{s_0^2}{s_i^2} \quad (5.17)$$

s_0 ... empirische a priori Standardabweichung der Gewichtseinheit

s_i ... empirische Standardabweichung der Beobachtungen K_i

Für den Fall gleichgenauer Beobachtungen wird $P_i = 1$ gesetzt.

Die Verbesserung v_i der Beobachtung K_i lautet : $v_i = c - K_i$ (5.18)

Nach der Ausgleichung ergibt sich die a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit zu :

$$\sigma_{\text{a posteriori}} = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum P v^2}{n-1}} \quad (5.19)$$

Die Standardabweichung der Unbekannten c beträgt :

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{\text{a posteriori}}}{\sqrt{[P]}} \quad (5.20)$$

Zusammenfassend für das Kapitel 'Ermittlung von Regressionsgeraden' der Trassierungselemente im Krümmungsbild zeigt die folgende Abbildung das Ergebnis der Ausgleichung, die Regressionsgeraden.

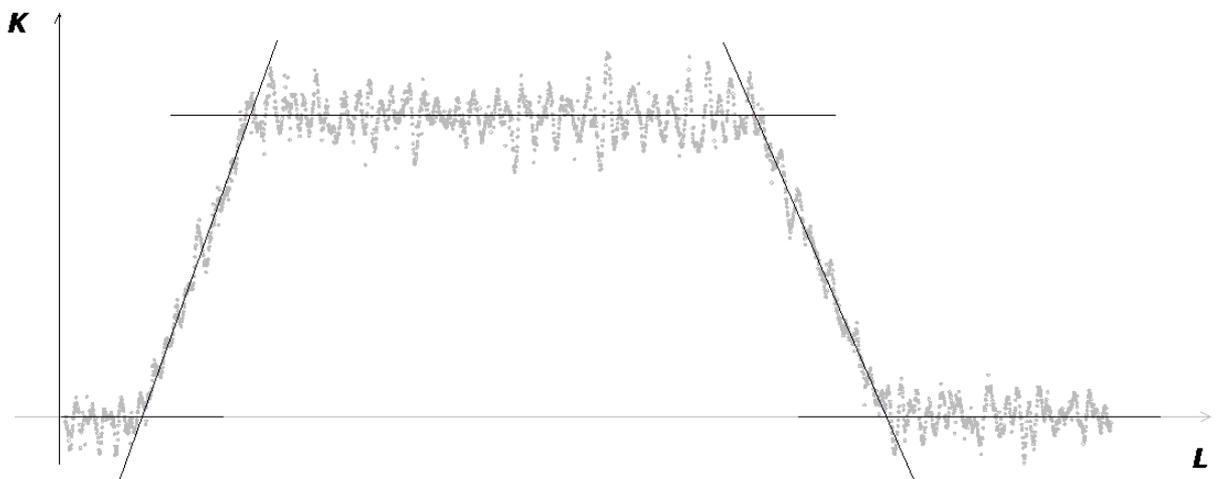


Abbildung 5.2: Regressionsgeraden der Trassierungselemente im Krümmungsbild

Ein Signifikanztest (T-Test) der ausgeglichenen Größen Anstieg m und Versatz in K -Richtung c ist nicht nötig, da bereits mit den Kriterien der Roherkennung die Signifikanz gesichert ist.

5.1.3 Gewichtsansätze

Gewichtung mit Einheitsmatrix E

Alle Messwerte (Krümmungen K_i) gehen mit gleichen Gewichten in die Ausgleichung ein. Die Gewichtsmatrix P entspricht der Einheitsmatrix E .

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} = 1 \quad i = 1, 2 \dots n$$

Diese Methode verhält sich auch sehr stabil, wenn die Näherungswerte für die Elementgrenzen relativ ungenau in der Ersterfassung bestimmt wurden. Daher werden die ersten 3 Iterationsschritte (Ausgleichung der Regressionsgeraden und Schnittpunktberechnung) mit diesem Gewichtsansatz durchgeführt.

Die Normalgleichungsmatrix $N=A^T P A$ ergibt eine symmetrische Matrix. Somit kann nach [LENK 2001] die obere Dreiecksmatrix berechnet und entsprechend der Symmetrie zur Hauptdiagonalen für die untere Dreiecksmatrix übernommen werden.

Nach mehreren Iterationen (in der Praxis nach ca. 2-3 Iterationen) der Ermittlung der Regressionsgeraden und anschließender Festlegung neuer Elementgrenzen durch Schnittpunktberechnung stellt sich ein stabiler Zustand ein, und die Übergangskordinaten erfahren keine nennenswerten Veränderungen mehr.

Gewichtsansatz unter Beachtung der Messwagenlänge

Wie bereits in Kapitel 4.5 geschildert gibt es Bereiche, in denen der Messwagen (bzw. die Basis der Pfeilhöhenmessung) sich über mehreren Trassenelementen befindet. Ideal wäre, den Bereich völlig außer Acht zu lassen und nicht in die ausgleichenden Geraden einzubeziehen. Dies ist auf Grund der sehr kurzen Trassenelemente nicht möglich. Daher stellt der folgende Ansatz einen Mittelweg zwischen stabiler Bestimmung der Regressionsgeraden und Beachtung der oben genannten Bereiche dar.

In den Bereichen am Anfang ($L_i + 6 \text{ m}$) und Ende ($L_{i+1} - 4 \text{ m}$) des Elementes werden die Gewichte mit $P = 0,5$ (bzw. $P = 0,5 P_i$) festgelegt.

$$P = \begin{bmatrix} 0,5 & & & & \dots & & 0 \\ & \dots & & & & & \vdots \\ & & 0,5 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & \dots & & \\ & & & & & \dots & \\ & & & & & & 1 \\ \vdots & & & & & & 0,5 \\ & & & & & \dots & \\ 0 & \dots & & & & & 0,5 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Dieser Gewichtsansatz wird in der Software 'railsoft 1.0' ab dem 4. Iterationsschritt verwendet. Insgesamt hat sich ein Wiederholen des Ausgleichs- und Schnittermittlungsvorganges von ca. 8-mal als sinnvoll erwiesen. Üblicherweise wird ein Abbruchkriterium ε für die Differenz zwischen den Koordinaten der Elementübergänge aus den aufeinanderfolgenden Ausgleichungen als Kriterium für die Anzahl der Iterationen festgelegt.

Die Festlegung pauschaler Genauigkeitsgrenzen erscheint in diesem Fall sehr schwierig, da sich die Werte für Krümmung und Bogenlänge in sehr unterschiedlichen Größenordnungen bewegen.

5.1.4 Schnittberechnung der Regressionsgeraden im Krümmungsbild

Generell gibt es zwei Möglichkeiten, die Schnittpunkte der Regressionsgeraden im Krümmungsbild zu ermitteln.

Zum Einen können die Koordinaten der Elementübergangspunkte $[L_i ; K_i]$ über geometrische Winkelbeziehungen im Dreieck bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist häufig in der Geodäsie anzutreffen.

Eine weitere Möglichkeit stellt das in der Mathematik häufig verwendete Lösen eines Gleichungssystems dar. In diesem Fall können die Funktionen aufeinanderfolgender Regressionsgeraden an den gemeinsamen Punkten gleichgesetzt werden.

$$K_i = m_i L_i + c_i = m_{i+1} L_i + c_{i+1} \quad (5.22)$$

Daraus folgt allgemeingültig für den Normalfall:

$$L_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{m_i - m_{i+1}} \quad \text{und} \quad K_i = m_i L_i + c_i \quad (5.23) \quad (5.24)$$

Einzelne Terme können beim Schnitt mit Geraden ($m=0, c=0$) und Kreisbögen ($m=0$) wegfallen.

Die folgende Abbildung 5.3 zeigt die Verbesserung der Koordinaten der Elementübergangspunkte in Folge der Schnittberechnung.

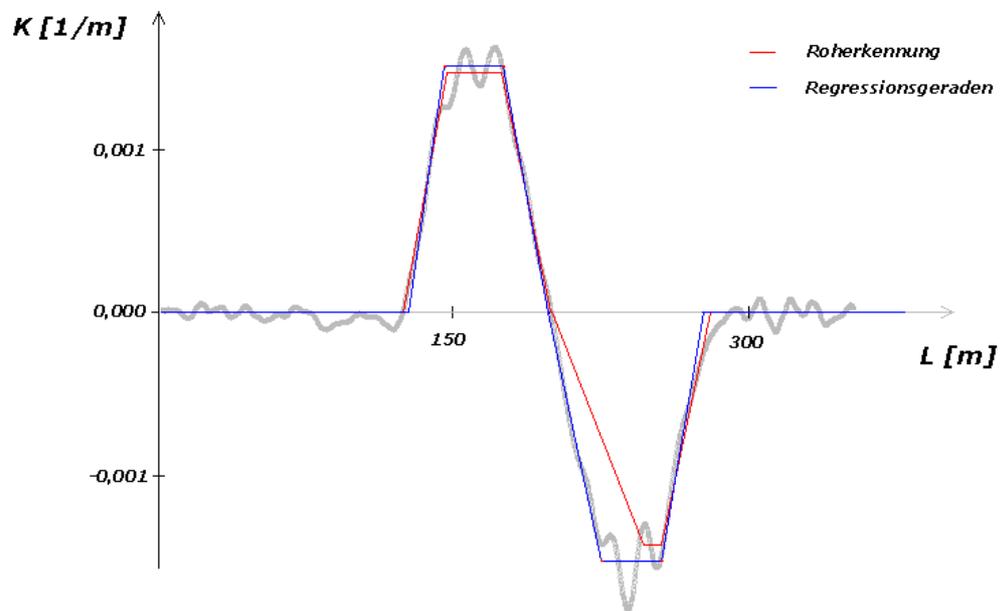


Abbildung 5.3: Verbesserung der Koordinaten der Elementübergangspunkte durch Schnitt der Regressionsgeraden

Ein wichtiger Aspekt für die softwareseitige Umsetzung der Schnittermittlungen ist das Zulassen des Entfernens von Elementen, die nach der Bestimmung neuer Elementgrenzen kürzer als die Elementenmindestlänge L_{min} sind. Dieses kann vereinzelt auf Grund lokaler Schwankungen im Krümmungsverlauf vorkommen.

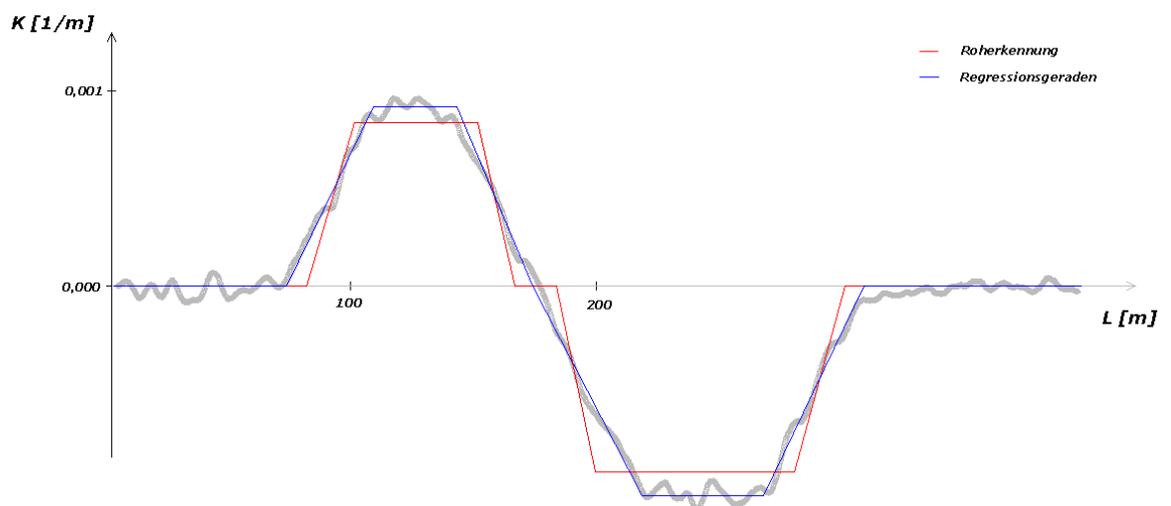


Abbildung 5.4: Entfernen eines Elementes nach Ermittlung neuer Elementgrenzen durch Schnitt der Regressionsgeraden

Sonderfälle:*- Wendeklothoide:*

Bei dem Sonderfall der Wendeklothoide werden ein bzw. zwei Schnittpunkt(e) auf der Null-Achse der Krümmung ($K = 0$) erzwungen. Dazu wird für die Regressionsgerade jeder Klothoidenhälfte ein Schnittpunkt mit der Achse $K = 0$ ermittelt:

$$L_{H1} = \frac{-c_i}{m_i} \quad \text{und} \quad K_{H1} = 0 \quad (5.25) \quad (5.26)$$

$$L_{H2} = \frac{c_{i+1}}{-m_{i+1}} \quad \text{und} \quad K_{H2} = 0 \quad (5.27) \quad (5.28)$$

Im Falle $|L_{H2} - L_{H1}| < L_{min}$ erfolgt eine Mittelung der beiden Koordinaten:

$$L_i = \frac{-c_i}{2m_i} - \frac{c_{i+1}}{2m_{i+1}} \quad \text{und} \quad K_i = 0 \quad (5.29)$$

Im Falle $|L_{H2} - L_{H1}| \geq L_{min}$ wird zusätzlich zwischen die Klothoidenäste eine Zwischengerade eingeführt. Die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes der eingefügten Geraden entsprechen den Schnittpunkten der Klothoiden $[L_{H1} ; K_{H1}]$ und $[L_{H2} ; K_{H2}]$ mit der Achse $K = 0$.

- Korbbogen:

Ein Korbbogen stellt eine Abfolge von Kreisbögen unterschiedlicher Radien ohne Übergangsbögen dar. Dies führt zu Sprüngen (Unstetigkeitsstellen) im Krümmungsbild (L,K-System). Demzufolge ist mit den parallel verlaufenden Regressionsgeraden der verschiedenen Kreisbögen eine Schnittberechnung nicht möglich.

Der Krümmungsverlauf von Korbbögen wird in der Praxis der Aufmessung mit Gleismesswagen jedoch auf Grund der Messwagenlänge und der Anpassung des Gleises an die auftretenden Kräfte geglättet. Daher werden in der Regel Unstetigkeitsstellen in der Realität nicht vorkommen oder im gemessenen Krümmungsbild nicht zu detektieren sein.

5.2 Nachdetektierung sehr kurzer Kreisbögen

Auf Grund sehr kurzer Elementenmindestlängen und einer relativ langen Basis der Pfeilhöhenmessung am Messwagen (10 m) (siehe Abschnitt 4.5) können sehr kurze Kreisbögen zum Teil nicht erkannt werden. In diesen Fällen liegt häufig kein den Elemente-Kriterien genügender Bereich konstanter Krümmung vor.

Die Probleme, die aus dem ungünstigen Verhältnis der Messwagenlänge zur Elementenmindestlänge der Trassierungsparameter resultieren, konnten im Rahmen des zeitlich begrenzten Projektes nicht weiter verfolgt und restlos beseitigt werden. Hier wären in der geplanten Fortsetzung des Projektes am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin weiterführende Lösungsmöglichkeiten zu finden und zu implementieren.

Daher werden vorerst aus Kenntnis der Elementenabfolge aus RPT und BOStrab zwischen Klothoiden, deren Anstieg im Krümmungsbild entgegengesetzt ausgerichtet ist, Kreisbögen mit der Messwagenlänge festgelegt.

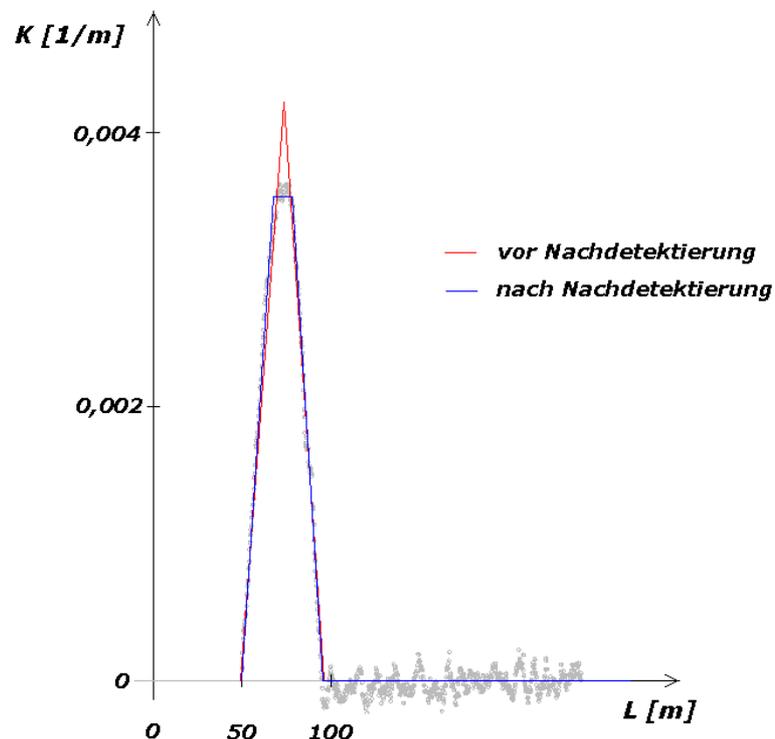


Abbildung 5.4: Einfügen von Kreisbögen zwischen entgegengerichteten Klothoiden

Im Anschluss erfolgt letztmalig ein Ausgleichungs-Iterationsvorgang mit dem 'Gewichtsansatz unter Beachtung des Verhältnisses der Elementenmindestlänge zur Messwagenlänge'. (siehe Abschnitt 5.1.3)

5.3 Fehlerfortpflanzung für Koordinaten der Elementübergänge im L,K-System

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur Bestimmung der Varianzen und Kovarianzen der Elementübergangskordinaten aufgezeigt.

Diese vermitteln einen Einblick in die Größenordnung der Genauigkeit der bestimmten Näherungskordinaten der Elementübergänge und sind zur weiteren Verwendung für Optimierungsverfahren mittels anderweitiger Software notwendig.

5.3.1 Allgemeines Fehlerfortpflanzungsgesetz (FFG)

Gehen n gemessene Größen l_i über eine funktionale Abhängigkeit $f(l)$ in ein Endresultat x ein, kann für kleine Fehler eine Taylor-Entwicklung nach den Fehlern durchgeführt werden. Nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz kann die Funktion durch den Linearanteil ihrer Taylor-Entwicklung, den partiellen Ableitungen $\frac{\partial f}{\partial l_i}$ an der Stelle $(l_1, l_2 \dots l_n)$, approximiert werden. [BRONSTEIN 1999]

Daraus ergibt sich die Matrix F (funktionales Modell) zu :

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial l_1} & \frac{\partial f_1}{\partial l_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial l_1} & \frac{\partial f_2}{\partial l_2} & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Analog zu den Ausführungen der Methoden der Ausgleichsrechnung (*Kapitel 5.1.1*) wird das stochastische Modell mit dem Aufbau der C_{ll} - Matrix festgelegt. In ihr sind die Varianzen und Kovarianzen der Beobachtungen l_i enthalten.

$$C_{ll} = \begin{bmatrix} s_{l_1}^2 & \text{COV}_{l_1 l_2} & \dots & \text{COV}_{l_1 l_n} \\ \text{COV}_{l_2 l_1} & s_{l_2}^2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \text{COV}_{l_n l_1} & & & s_{l_n}^2 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten C_{xx} wird wie folgt bestimmt:

$$C_{xx} = F C_{ll} F^T \quad (5.32)$$

5.3.2 FFG für Schnittberechnung

5.3.2.1 Normalfall

Die aus der Ausgleichung hervorgegangenen Größen m und c sind miteinander korreliert (stochastisch abhängig voneinander). Beweis dafür sind die Kovarianzen $cov_{mc} \neq 0$.

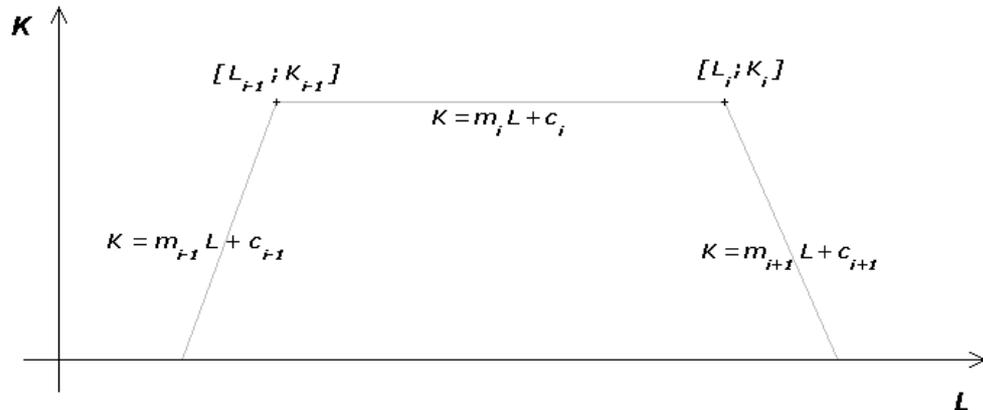


Abbildung 5.5: Bezeichnungen der Trassierungselemente in der Fehlerfortpflanzung

Die Koordinaten jeweils zweier benachbarter Elementübergangspunkte werden mit einem identischen Element ermittelt und sind somit miteinander korreliert. Daher werden jeweils 3 aufeinanderfolgende Regressionsgeraden in die Fehlerfortpflanzung zur Schnittberechnung einbezogen und fortlaufend für alle Schnittpunkte berechnet. Dies hat eine Verringerung des Rechenaufwandes zur Folge, da dieser sich mit zunehmender Dimension der F -Matrix und der C_{II} -Matrix potenziert.

Der funktionale Zusammenhang zwischen den unbekanntem Schnittpunkten $[L_{i-1}; K_{i-1}]$, $[L_i; K_i]$ und Beobachtungen $(m_{i-1}, c_{i-1}, m_i, c_i, m_{i+1}, c_{i+1})$ sieht wie folgt aus :

$$L_{i-1} = \frac{c_i - c_{i-1}}{m_{i-1} - m_i} \quad \text{und} \quad K_{i-1} = m_i L_{i-1} + c_i = m_i \left[\frac{c_i - c_{i-1}}{m_{i-1} - m_i} \right] + c_i \quad (5.33)$$

$$L_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{m_i - m_{i+1}} \quad \text{und} \quad K_i = m_i L_i + c_i = m_i \left[\frac{c_{i+1} - c_i}{m_i - m_{i+1}} \right] + c_i \quad (5.34)$$

Die Belegung der F -Matrix ist abhängig von den Element-Typen (Gerade, Klothoide, Kreis) der in die Schnittberechnung einbezogenen Elemente. So vereinfachen sich einige Terme auf Grund der Eigenschaften von Kreisbögen ($m = 0$) und Geraden ($m = 0, c = 0$).

Daraus ergibt sich die F -Matrix allgemein folgendermaßen :

$$F = \begin{bmatrix} \frac{c_{i-1}-c_i}{(m_{i-1}-m_i)^2} & -\frac{1}{m_{i-1}-m_i} & \frac{c_i-c_{i-1}}{(m_{i-1}-m_i)^2} & \frac{1}{m_{i-1}-m_i} & 0 & 0 \\ \frac{m_i(c_{i-1}-c_i)}{(m_{i-1}-m_i)^2} & \frac{-m_i}{m_{i-1}-m_i} & \frac{m_{i-1}(c_i-c_{i-1})}{(m_{i-1}-m_i)^2} & 1+\frac{m_i}{m_{i-1}-m_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_i-c_{i+1}}{(m_i-m_{i+1})^2} & -\frac{1}{m_i-m_{i+1}} & \frac{c_{i+1}-c_i}{(m_i-m_{i+1})^2} & \frac{1}{m_i-m_{i+1}} \\ 0 & 0 & \frac{-m_{i+1}(c_{i+1}-c_i)}{(m_i-m_{i+1})^2} & 1-\frac{m_i}{m_i-m_{i+1}} & \frac{m_i(c_{i+1}-c_i)}{(m_i-m_{i+1})^2} & \frac{m_i}{m_i-m_{i+1}} \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

und die C_{ll} -Matrix zu :

$$C_{ll} = \begin{bmatrix} s_{m_{i-1}}^2 & \text{COV}_{m_{i-1} c_{i-1}} & \dots & 0 \\ \text{COV}_{c_{i-1} m_{i-1}} & s_{c_{i-1}}^2 & & \vdots \\ & & s_{m_i}^2 & \text{COV}_{m_i c_i} \\ & & \text{COV}_{c_i m_i} & s_{c_i}^2 \\ \vdots & & & & s_{m_{i+1}}^2 & \text{COV}_{m_{i+1} c_{i+1}} \\ 0 & \dots & & \text{COV}_{c_{i+1} m_{i+1}} & s_{c_{i+1}}^2 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten C_{xx} ergibt sich nach (5.32).

$$C_{xx} = \begin{bmatrix} s_{L_{i-1}}^2 & \text{COV}_{L_{i-1}K_{i-1}} & \text{COV}_{L_{i-1}L_i} & \text{COV}_{L_{i-1}K_i} \\ \text{COV}_{K_{i-1}L_{i-1}} & s_{K_{i-1}}^2 & \text{COV}_{K_{i-1}L_i} & \text{COV}_{K_{i-1}K_i} \\ \text{COV}_{L_iL_{i-1}} & \text{COV}_{L_iK_{i-1}} & s_{L_i}^2 & \text{COV}_{L_iK_i} \\ \text{COV}_{K_iL_{i-1}} & \text{COV}_{K_iK_{i-1}} & \text{COV}_{K_iL_i} & s_{K_i}^2 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

5.4 Maßstab in der Bogenlängenmessung

Werden die ermittelten Trassenelemente und der im Trassenentwurf* geplante Verlauf eines Gleisabschnittes in ein Krümmungsbild gebracht ergibt sich folgende Darstellung:

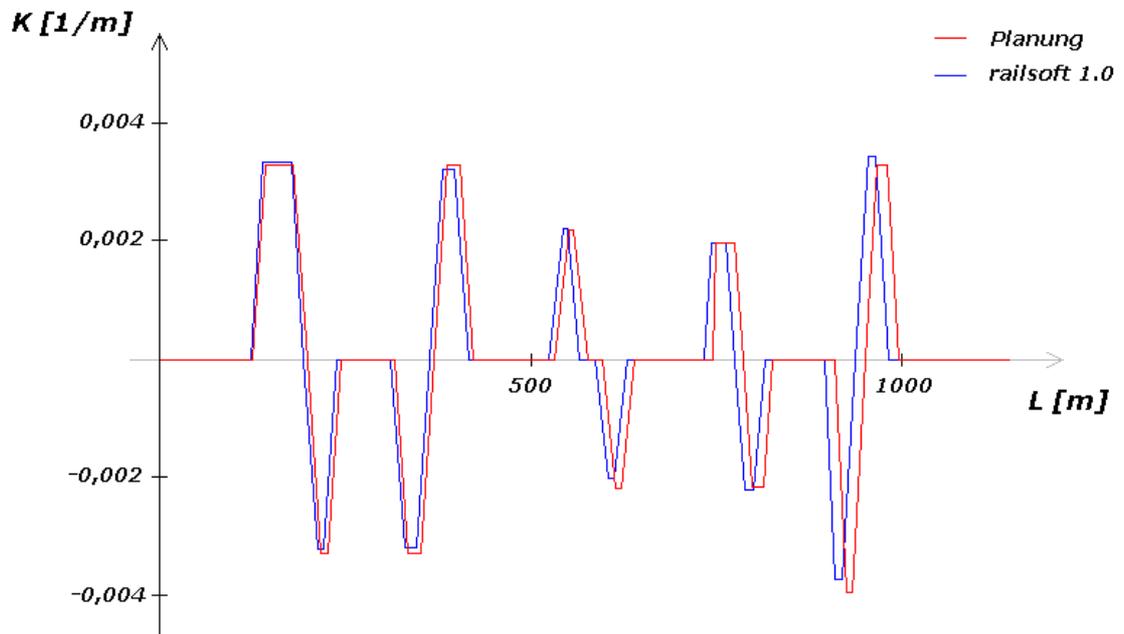


Abbildung 5.6: Darstellung der Entwurfselemente und der ermittelten Elemente unter Einfluss des Maßstabes der Bogenlängenmessung M_L

Eindeutig ist ein Maßstab in der Bogenlänge L zu erkennen. Dieser rührt vermutlich aus einer systematischen Verfälschung am ermittelnden Messrad. Der Maßstab M_L kann durch Ausgleichung einer Geraden (nach dem Prinzip in Kapitel 5.1.2) durch die Ist-Bogenlängen (mathematische x-Achse) und die Soll-Bogenlängen (y-Achse) bestimmt werden.

Hierbei werden mit dem funktionalen Ansatz $L_{soll} = m L_{ist} + c$ die Unbekannten m (Anstieg der Geraden = Maßstab M_L zwischen Ist- und Soll-Bogenlänge) und c (Versatz des Krümmungsverlaufes in L -Richtung) als Funktion der Beobachtungen L_{soll} formuliert. Damit der Versatz c nicht zu groß und fehlertheoretisch ungünstig extrapoliert wird, sollte der erste Elementübergang von Entwurf und ermittelten Elementen in einen Punkt geschoben werden.

* Die Soll-Lagen der Gleise der Berliner U-Bahn sind im Gleisfestpunktverzeichnis der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) festgehalten.

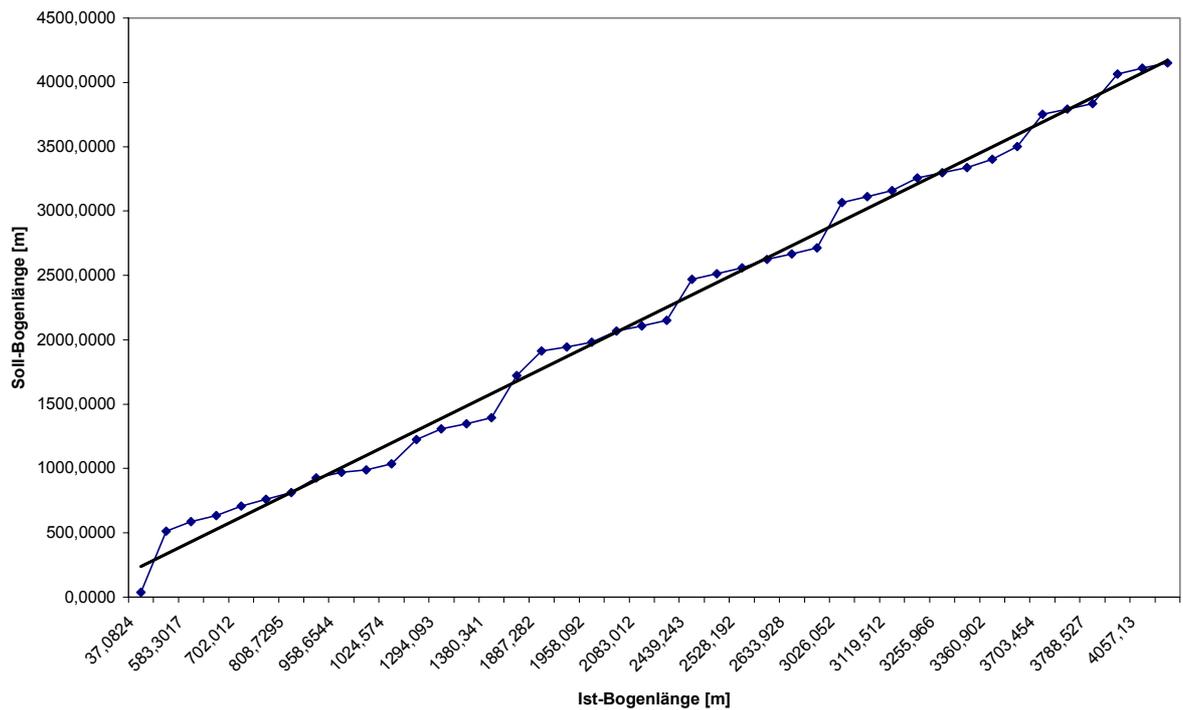


Abbildung 5.7: Darstellung der Regressionsgeraden zur Bestimmung des Maßstabes M_L

Die Ergebnisse der Ausgleichung sind:

$$m = 1,0139$$

$$c = -4,2 \text{ m}$$

Die Ermittlung des Maßstabes erfolgte mit Gleismessdaten eines ca. 4 km langen Gleisabschnittes und mit 42 Elementübergängen (von Geraden und Klothoiden). Die Standardabweichung des ausgeglichenen Maßstabes beträgt $\sigma_{M_L} = 0,00017$ und die des Versatzes $\sigma_c = 0,43 \text{ m}$.

Der ermittelte Maßstab entspricht einer systematischen Verfälschung der ermittelten Bogenlänge um 1,4 %. In absoluten Zahlen bedeutet dies, eine um $-0,139 \text{ m} / 10 \text{ m}$ (bzw. $-1,39 \text{ m} / 100 \text{ m}$) zu kurz gemessene Bogenlänge.

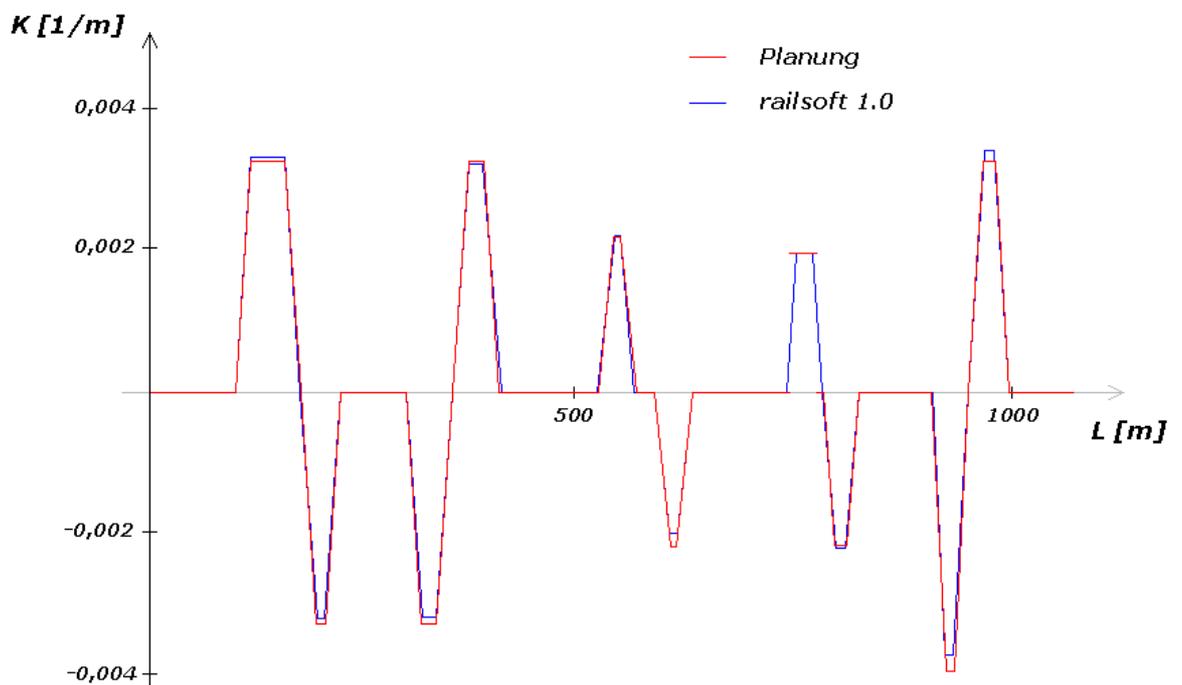


Abbildung 5.8: Darstellung der Entwurfselemente und der ermittelten Elemente nach Anbringen des Maßstabes der Bogenlängenmessung M_L und des Versatzes c

Wie in Abbildung 5.8 erkennbar ist, sind die Elementeparameter der Entwurfsplanung und die in 'railsoft 1.0' ermittelten Trassierungsparameter nach Anbringen des Maßstabes M_L und des Versatzes c nahezu identisch.

Die maximale Differenz zwischen den zur Bestimmung des Maßstabes (M_L) benutzten Elementübergängen (nach Korrektur) und den Elementübergängen der Planung beträgt $\Delta L \approx 3 \text{ m}$.

6 Erprobung und Analyse

Die Ergebnisse der Auswertung von Messdaten des EM 80 der BVG sollen in diesem Kapitel exemplarisch für Strecken der Berliner U-Bahn analysiert werden.

Der Übersichtsplan (*Abbildung 6.1*) zu Entstehungszeiten des Berliner U-Bahn-Netzes zeigt, dass der Kernbereich des heutigen Netzes bereits in den Jahren 1902 - 1930 erbaut worden ist. Wie bereits im Kapitel 4 (*Elementfindung*) erwähnt, verfügt das im Jahre 2002 teilweise bereits 100 Jahre bestehende Gleisnetz über eine Vielzahl verwendeter teils dokumentierter und teils undokumentierter Trassierungselemente. Teilweise kam beim Gleisbau das Nalenz-Höfer-Verfahren zur Anwendung. Bei diesem Verfahren wurden damals unter Verwendung von Wandersehnern im 5m-Abstand Punkte über Pfeilhöhen abgesetzt. Der Gleisverlauf zwischen den Absatzpunkten ist daher relativ ungewiss.

Um einen Vergleich der nach RPT und BOStrab ermittelten Trassierungsparameter mit den Planungsdaten des Gleisfestpunktverzeichnisses der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) zu ermöglichen, kommt der Wahl der Testdatensätze eine wichtige Rolle zu.

Zu diesem Zweck wurde eine Aufteilung des Berliner U-Bahn-Netzes in vor und nach 1970* errichtete Streckenabschnitte vorgenommen.



Abbildung 6.1: Entstehungszeiten der Gleisabschnitte der Berliner U-Bahn

* Die Richtlinien für Planung und Trassierung der Berliner U-Bahn (RPT) wurden 1970 veröffentlicht.

Vergleichbare Datensätze wurden in den nach dem Mauerfall 1989 neu trassierten und gebauten Gleisabschnitten der U-Bahn-Linie 6 zwischen Reinickendorfer Straße und Kochstraße gefunden (*ca. 2 x 4 km mit je ca. 15000 Messpunkten*).

Weitere Messdaten standen von der U-Bahn-Linie 7 zwischen Rathaus Spandau und Fehrbelliner Platz zu Testzwecken (ohne Planungsvergleich) zur Verfügung (*ca. 2 x 12 km mit je ca. 50000 Messpunkten*).

Weiterhin wurden zur Untermauerung der allgemeinen Verwendbarkeit der Software 'railsoft 1.0' Daten der DB Netz AG der ICE-Strecke Berlin-Hannover (*2 x 160 km*) und der ICE-Strecke Mannheim-Karlsruhe (*2 x 60 km*) ausgewertet.

6.1 Bewertung der Ergebnisse

Ergebnisse im Überblick

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Prüfung der durch die Software 'railsoft 1.0' ermittelten Trassierungselemente durch eine Gegenüberstellung mit der Entwurfsplanung aus dem Gleisfestpunktverzeichnis der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Es sei angemerkt, dass sicher nicht von einer fehlerfreien Umsetzung der Planung in die Wirklichkeit ausgegangen werden kann. Insofern kann dieser Vergleich lediglich ein ungefähres Genauigkeitsmaß der detektierten Elementparameter liefern.

Die sicherlich spannendste Frage - Wurden alle Elemente erkannt? - kann mit einem eindeutigen JA beantwortet werden. Die einzige Einschränkung dieser Aussage ist in dem Trennschärfekriterium (Auflösungsvermögen, vgl. Kapitel 4.3.2) begründet. Nicht detektierte Kreisbögen mit für U-Bahnen ungewöhnlichen Radien von *8000 - 10000 m* und einer Länge von *5 - 30 m* sind sicher nicht als Versagen des Verfahrens oder der Software zu werten, sondern in der Realität der Messung mit Gleismesswagen auf Grund der Eigenschwingung und der Länge der Messbasis kaum deutbar. Auf einer Länge von *10 m* weicht der Endpunkt eines Kreisbogens des Radius $R = 10000 m$ lediglich um *10 mm* quer von der Geraden ab. Die Änderung der Krümmung ist dementsprechend gering ($\Delta K = 0,0001 [1/m]$).

Ein Auszug der Gegenüberstellung der Trassierungsparameter des Gleisfestpunktverzeichnisses der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) mit den ermittelten Trassierungsparametern aus Daten des Gleismesswagens EM 80 unter Anwendung der Software 'railsoft 1.0' ist als Anhang A zu finden.

Anhang A zeigt ebenfalls, dass Übergänge von Geraden zu Kreisbögen ohne (entworfene) Übergangsbögen im Krümmungsbild nicht als solche detektiert werden. Es wirft sich die Frage auf, inwieweit ein solcher entworfener Sprung im Krümmungsverlauf des Gleises in der Realität der Wirkung der Kräfte fahrender Züge Bestand hält. Meine Vermutung geht

eher in die Richtung der Aussage eines Fachkundigen: "Ein Gleis ist anpassungsfähig.", so dass sich der reale Krümmungsverlauf sicher im Laufe des Gebrauches des Gleises dem eines Übergangsbogens anpasst.

Ergebnisse im Detail

Im Folgenden wird ein detaillierter Vergleich von Planung und ermittelten Trassierungselementen angestrebt.

Im Nachhinein ist daher ein Absolut-Vergleich der Trassierungsparameter der Elemente (Soll – Ist) für einen ca. 550 m langen Gleisabschnitt aufgeführt.

Soll-Elemente (Planung)			Ist-Elemente (railsoft 1.0)		
Typ	Länge [m]	Radius [m]	Typ	Länge [m]	Radius [m]
G	326,256	250	G	327,398	252,668
K	34,854		K	30,991	
R	118,766		R	123,272	
K	37,848		K	32,193	
G	31,371		G	33,938	

Differenzen Soll-Ist		
Typ	Länge [m]	Radius [m]
G	- 1,14	- 2,67
K	3,86	
R	- 4,51	
K	5,66	
G	- 2,57	

G ... Gerade
K ... Klothoide
R ... Kreisbogen

Es ist zu erkennen (*siehe auch Anhang A*), dass bei Elementenlängen größer ca. 15 m sehr gute absolute Genauigkeiten in der Bogenlänge von < 1 - 6 m und des Radius von ca. 5 - 8 m erreichbar sind. Das Verfahren der Trassenelementen-Detektierung liefert somit auf Gleisabschnitten mit relativ langen Elementenlängen (größer als die Messwagenlänge) sehr gute Näherungswerte der Elementübergänge. Die Verwendung z. B. auf Strecken der Deutschen Bahn erscheint daher als günstig für eine genaue Detektierung.

Bei weitaus kürzeren Elementen sinkt die Genauigkeit stark. So sind bei Elementen mit einer weit kürzeren Länge als der Messbasis der Pfeilhöhe Abweichungen des Parameters R von der Planung bis zu ca. 40-50 m festzustellen (*vgl. Anhang A*). Die Gründe hierfür sind in *Kapitel 5.2* dargestellt.

Abbildung 6.3 gibt einen visuellen Einblick in den untersuchten Gleisabschnitt.

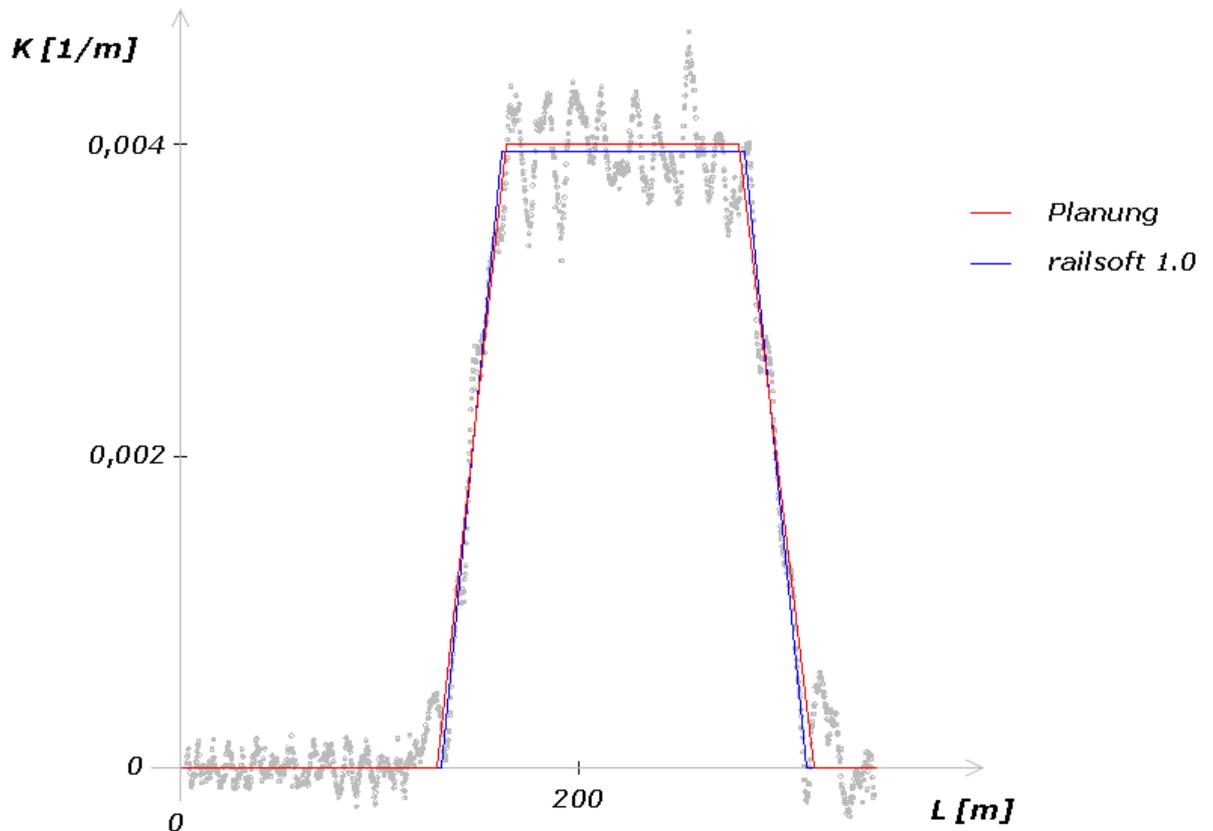


Abbildung 6.3: Vergleich von Entwurfsdaten und detektierten Trassierungsparametern

Die innere Genauigkeit kann den Fehlern der Element-Übergangspunkte (im L, K -System) der Fehlerfortpflanzung entnommen werden. (Kapitel 5.3) Die Koordinaten der Elementübergänge weisen in den Testdatensätzen Fehler im Bereich $\sigma_L < 0,4 [m]$ bzw. $\sigma_K < 0,00005 [1/m]$ auf.

Mit zunehmendem Radius R der Kreisbögen sinkt die Genauigkeit der bestimmten Trassenparameter $R_{\text{Kreisbogen}_i}$, da die Varianz der reziproken Schnittpunktcoordinate $1/K_i$ im Radienbild S_{R_i} abhängig vom Radius $R_{\text{Kreisbogen}}$ ist (siehe Kapitel 4.2). Dies trifft jedoch nicht für die Varianz im Krümmungsverhalten S_{K_i} zu.

6.2 Vielfältige Möglichkeiten zur Darstellung der Ergebnisse

Die gewonnenen Daten (Trassenelemente und Trassierungsparameter) stellen die Grundlage für eine Vielzahl weiterer praxisrelevanter Visualisierungs- und Analysemöglichkeiten dar. In Folge der computergestützten Verarbeitung der Messdaten sind themenbezogene grafische und textliche Darstellungen und Auswertungen der untersuchten Trasse problemlos durch Erweitern der Software um Schnittstellen-Tools möglich.

Zum Beispiel sind schnelle Analysen und eine Aufschlüsselung von akuten Gleislagefehlern durch Darstellung der Krümmungsdifferenzen der gemessenen Punkte zu den ausgleichenden Geraden denkbar. Somit ist bei Einhaltung festzulegender Grenzwerte ein stetiger Krümmungsverlauf in den Bereichen der Elemente gewährleistet.

Einige Möglichkeiten sind die Darstellung von:

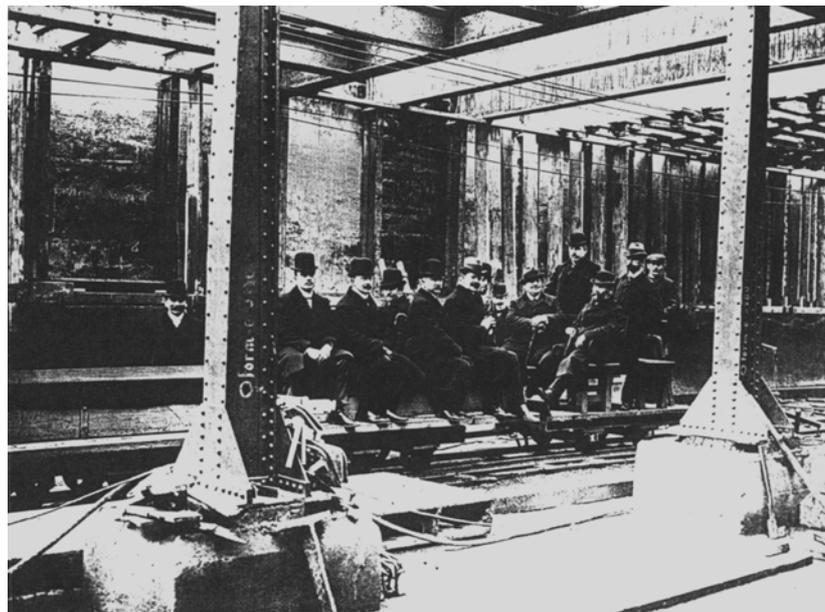
- Radienbild
- Krümmungsbild
- Gradientenverlauf
- XY-Lagebild (auch mit benachbarten Gleisen)
- Soll-Ist-Vergleichen
- Protokollen im Textformat
- maximalen Gleislagefehlern
- Verwindung
- Spurweite
- Überhöhung

7 Zusammenfassung

7.1 Fazit

Mit diesem Vorstoß zur automatisierten Bestimmung der absoluten Gleislage mittels Daten von Gleismesswagen werden neue Möglichkeiten in der Gleismessung eröffnet. Eine automatisierte Ersterfassung von unbekanntem Gleisverläufen ist ebenso möglich, wie die Feststellung von Abweichungen (Gleislagefehlern) zu einer Soll-Lage. Erstmals sind so auch langwellige Gleislagefehler detektierbar, was zu einer erheblichen Verbesserung der Fahrdynamik und Verringerung des Verschleißes an Rad und Schiene beiträgt.

Die Zeiten subjektiver Einschätzungen des Gleiszustandes, wie etwa in Abbildung 7.1 dargestellt, sind wohl endgültig vorüber.



*Abbildung 7.1: Bauabnahmefahrt 1901 auf der Berliner U-Bahnlinie 1
(Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz)*

Der Einsatz von Gleismesswagen zur objektiven, automatisierten, schnellen und zuverlässigen Feststellung der Gleisgeometrie wird sich auch in der Zukunft sicher gegen alternative Messmethoden durchsetzen.

Die aufgezeigte Bestimmungsmethode zur Detektierung der momentanen, von Deformationen beeinflussten und von den Planungsparametern abweichenden Trassierungselemente mit ihren zugehörigen Parametern ermöglicht den Aufwand zur Wartung (Richtung) der Gleise zu minimieren. Zum Beispiel kann unter dem Gesichtspunkt 'Minimierung der zu richtenden Gleisabschnitte' ein optimierter Gleisverlauf wiederhergestellt werden. Grundlage hierfür können die im Laufe dieser Diplom-Arbeit entstandenen Parameter der Trassierungselemente sein.

Diese dynamische Festlegung des Gleis-Sollverlaufes wird effektiv (und überhaupt erst wirtschaftlich) gestaltet, wenn alle Nutzer der Gleisdaten (Gleisbauer, Richtmaschinen und deren Steuerungen) auf diese schnell und ständig zugreifen können. Da die Gleisparameter nach der Auswertung mit 'railsoft 1.0' bereits in digitaler Form vorliegen, bietet es sich an, diese in einer Datenbank abzulegen und über Intra- oder Internet den berechtigten Nutzern Zugriffe und Abfragen zu ermöglichen.

Der Alterszustand (*siehe Abschnitt 6*) des Berliner U-Bahn-Netzes zeigt auch die Notwendigkeit der Wartung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten, die auf die Betreiber zukommt. Auch hier kann die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur kostengünstigen Umgestaltung des Gleisverlaufes nach modernen Trassierungsrichtlinien liefern. Es besteht die Möglichkeit, die erfasste Gleisgeometrie unter dem Gesichtspunkt minimaler Anpassungen nach modernen Richtlinien zu optimieren.

Eine sinnvolle Erweiterung des bestehenden Programm-Paketes wäre die Detektierung der Trassierungselemente der Höhe (Gradienten). Der prinzipielle Berechnungsweg wäre analog zur gezeigten Ermittlung der Trassierungselemente der Lage.

Bereits implementiert in das Programm ist die Umsetzung von Spuraufweitungen in Kurven. Diese gewollten Abweichungen von der Sollspurweite 1435 mm werden beim Gleisnetz der Deutschen Bahn verwendet. Bei der BVG finden diese Elemente keine Verwendung. (*siehe Kapitel 4.4.3*)

7.2 Grenzen des Verfahrens zur Detektierung

Das Auflösungsvermögen (*siehe Kapitel 4.3.2*) beeinflusst die Erkennbarkeit großer Kurvenradien auf Grund der überlagerten Eigenschwingung des Messwagens. Somit sind der Detektierung großer Radien Grenzen gesetzt.

Die Robustheit des Verfahrens hängt stark von der Bewegtheit des Krümmungsverlaufes ab. Mit zunehmender Amplitude der überlagerten Eigenschwingung sind Fehldetektierungen in der Roherkennung unumgänglich und stellen hohe Anforderungen an eine aufwendige automatisierte Nachbereitung.

Werden 2-3 aufeinanderfolgende Elemente auf Grund des Auflösungsvermögens nicht erkannt, ist auch in der Nachbereitung der Roherkennung die Korrektur auf Grund der bekannten Abfolge der Trassierungselemente nicht möglich. (*Kapitel 4.5*)

Unerheblich sind dagegen lokale Unterbrechungen in den erkannten Elementen auf Grund kurzzeitiger Überschreitungen der ermittelten Amplitude der Eigenschwingung $K_{Eigenschwingung}$. Diese geteilten Elemente werden von der Software 'railsoft 1.0' zusammengeführt und problemlos ausgewertet.

Wesentlicher Bestandteil weiterer Untersuchungen in der Fortführung des Projektes wird die Forschung nach alternativen Möglichkeiten des Umganges mit sehr kurzen Trassenelementen sein. Hier besteht eindeutig noch Handlungsbedarf.

7.3 Ausblick

Der Gleismesswagen ermöglicht die Durchführung einer streifenförmigen Vermessung. Hier kann ein Gleichnis zu einem langgestreckten Polygonzug vorgenommen werden. Nachteil dieser streifenförmigen Vermessung ist die hohe Anfälligkeit gegen Verschwenkungen, die sich bekanntermaßen bei solchen Messverfahren sehr schnell aufsummieren. Um eine geforderte hohe absolute Genauigkeit zu erreichen, ist es notwendig, Stützstellen zu schaffen. Diese werden in der Regel durch Positionsbestimmung über ein Tachymeter (für den automatisierten Ablauf am besten mit automatischer Zielverfolgung) durch Bezug zum Gleisvermarkungssystem oder über ein Differential-GPS System hergestellt.

Absolute Genauigkeitsangaben des Verfahrens können an dieser Stelle nur näherungsweise gemacht werden, da eine Ausgleichung mit Passpunkten unter Beachtung der Korrelationen zwischen benachbarten Elementübergangspunkten noch aussteht und das Verfahren noch verbessert wird. Diese Arbeit stellt insofern eine erste erfolgreiche Machbarkeitsstudie dar.

Bisher wurden Probleme in der Ermittlung der Gleisgeometrie wie folgt dargestellt:

"Langwellige Richtungsfehler können anhand geringer Schwankungen der Krümmungslinie zwar erkannt, aber nicht im Sinne einer Inspektion bewertet werden."
[DB OMWE 1998]

Entgegen dieser Aussage aus dem Jahre 1998 ist mit dem Ansatz der vorliegenden Arbeit innerhalb eines gewissen Trennschärfe-Kriteriums (*siehe Abschnitt 4.3.2*) und den aufgezeigten Grenzen des Verfahrens eine Erkennung erstmalig möglich.

"Die vom GPS nicht erreichbare Nachbargenauigkeit der *5m* Punkte schafft die Lasersehne, deren Endpunkte werden aber frei wählbar mit GPS absolut positioniert. Damit wird man von Mastbolzen unabhängig. (...) Damit erhält das Meßsystem EM-Sat, das bisher nur 'abstecken' kann, auch die Möglichkeit 'aufzunehmen', also Sollgeometrie zu erzeugen und auszuwerten - weltweit eine berauschende Vision, da selbst viele Industrienationen nicht flächendeckend über Sollgeometrien ihrer Hauptgleise Bescheid wissen." [Presle 1999]

Ein grundlegender Schritt zur Gewinnung der Gleisgeometrie ist mit dem Ergebnis der vorliegenden Diplomarbeit getan und die 'berauschende Vision' des Gerard Presle nimmt reale Formen an.

Literaturverzeichnis

- [BAUMANN 1998] Eberhard Baumann : Vermessungskunde Band 2; Dümmler Verlag, Bonn, 1998
- [BOStrab 1993] BOStrab-Trassierungsrichtlinien : Richtlinien für die Trassierung von Bahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab), Bonn, 18.05.1993
- [BRONSTEIN 1999] Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig: Taschenbuch der Mathematik; 4. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt / Main, 1999
- [DB OMWE 1997] Deutsche Bahn Sonderdruck: Prüfbedingungen für die Inspektion der Gleisgeometrie mit der Oberbaumeßwageneinheit (OMWE), 1997
- [DB OMWE 1998] Deutsche Bahn Sonderdruck : Erläuterungen zum OMWE - Beurteilungsverfahren, 01.03.1998
- [FIEDLER 1999] Fiedler : Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen; 4.Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 1999
- [FÜRMETZ 1985] Reinhard Fürmetz : Der Gleisplan – Geometrische Grundlagen im Schienenverkehrswesen mit Beispielen; Bauverlag GmbH , Wiesbaden und Berlin, 1985
- [GIELSDORF 1967] Dr. Frank Gielsdorf : Datenmodellierung für Gleisnetze und Schaffung eines einheitlichen Raumbezugssystems; Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften , Stuttgart, 1967
- [Grafarend,Schaffrin 1993] Grafarend, Schaffrin : Ausgleichsrechnung in linearen Modellen; Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1993
- [GRÜNDIG] Prof. Dr. L. Gründig : Statistische Testverfahren; Skript zur Lehrveranstaltung Statistische Testverfahren, TU Berlin
- [HENNECKE 1990] Hennecke, Müller, Werner : Handbuch Ingenieurvermessung – Verkehrsbau-Trassen; Verlag für Bauwesen , Berlin, 1990
- [HENNECKE 1993] Hennecke, Müller, Werner : Handbuch Ingenieurvermessung Band 5 Verkehrsbau-Eisenbahnbau (Ergänzungsband: Deutsche Bundesbahn); Herbert Wichmann Verlag GmbH , Karlsruhe, 1993
- [HENNECKE 1994] Hennecke, Müller, Werner : Handbuch Ingenieurvermessung Band 1; Herbert Wichmann Verlag GmbH , Karlsruhe, 1994

-
- [HEUWOLD 2000] Niels Heuwold : Erzeugung eines digitalen, geometrisch korrigierten Krümmungsbildes einer Gleisachse aus den Messdaten des Gleismesswagens EM80 der BVG, Seminararbeit, TU Berlin, 2000
- [LENK 2001] U. Lenk : Schnellere Multiplikation großer Matrizen durch Verringerung der Speicherzugriffe und ihr Einsatz in der Ausgleichsrechnung; ZfV, 126. Jahrgang, Heft 4, Wittwer Verlag, August 2001
- [LUHMANN 2000] T. Luhmann : Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen; Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000
- [MÜLLER 1984] Müller : Ingenieurgeodäsie – Verkehrsbau (Grundlagen); Verlag für Bauwesen , Berlin, 1984
- [MÜLLERII 1984] Müller : Ingenieurgeodäsie – Verkehrsbau (Eisenbahnbau); Verlag für Bauwesen , Berlin, 1984
- [MÜLLER, KRÜGER 1999] Müller, Krüger : Kinematische Aufnahme und Auswertung von Gleisgeometrie und Gleiszustand am Beispiel des Gleismesswagens EM 80-A, Seminararbeit, TU Berlin, 1999
- [NRec 1994] Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery : Numerical Recipes in C, 2nd edition, Cambridge University Press, 1994
- [NRecExample 1994] Vetterling, Teukolsky, Press, Flannery : Numerical recipes in C (example book), 2nd edition, Cambridge University Press, 1994
- [PLASSER&THEURER 1996] PLasser & Theurer : Betriebsanleitung des EM 80; 1996
- [PRESLE 1999] Gerard Presle : Gleislagequalität und Gleisvermessung; Vortrag im Rahmen der 10. internat. geodätischen Woche in Obergurgl, 1999
- [RETSCHER 1996] Dr. Günther Retscher : 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren; Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Wien 1996
- [RPT 1970] RPT : Richtlinien für Planung und Trassierung der Berliner U-Bahn, Senator für Bau- und Wohnungswesen, 1970
- [SIEGMANN 2000] Prof. Dr.-Ing. Jürgen Siegmann : Skript ‚Entwurf‘ am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 2000
- [VDV 1995] VDV-Schriftenreihe Band 10 : Gleisbau - Planung und Vermessung; Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden, 1995

Vielen Dank für die freundliche Unterstützung möchte ich aussprechen an:

- Herrn Dr. Frank Gielsdorf (Betreuer der vorliegenden Diplom-Arbeit, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Geodäsie und Ausgleichsrechnung an der TU Berlin)
- Herrn Gustav Gößling (Mitarbeiter der Abteilung Zentrale Fahrwegmessung der DB Netz AG, Minden)
- Herrn Prof. Dr. Gründig (Leiter des Fachgebietes Geodäsie und Ausgleichsrechnung an der TU Berlin)
- Frau Janet Heller (TU Berlin)
- Herrn Lutz Hübner (Assistent am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb an der TU Berlin)
- Herrn Theodor Langohr (Leiter der Abteilung U-Bahn-Vermessung der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG))
- Herrn Ludwig (Bildarchiv Stiftung Preussischer Kulturbesitz)
- Herrn Ernst Neumann (Verein Berliner U-Bahn Museum)
- Dr. Günther Retscher (TU Wien)
- Herrn Volker Rodehorst (Mitarbeiter am Fachgebiet für Photogrammetrie und Kartographie an der TU Berlin)
- Herrn Gerhard Setzkorn (Mitarbeiter der Abteilung U-Bahn-Vermessung der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG))
- Herrn Herbert Zück (Mitarbeiter der Abteilung Zentrale Fahrwegmessung der DB Netz AG, Minden)

(alphabetisch geordnet)

Anhang A

Genauigkeit der Detektierung mittels 'railsoft 1.0'

Absolute Genauigkeit

Nach Kapitel 6 ist die Gegenüberstellung der Trassierungsparameter des Gleisfestpunktverzeichnisses der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) und der ermittelten Trassierungsparameter aus Daten des Gleismesswagens EM 80 und Anwendung der Software 'railsoft 1.0' Bestandteil der Einschätzung der Qualität des Verfahrens.

Die Gegenüberstellung erfolgt hier exemplarisch für einen Auszug des ausgewerteten Gleisabschnittes der U-Bahn-Linie 6 zwischen Reinickendorfer Straße und Kochstraße (Gleis 1).

Soll-Elemente (Planung)			Ist-Elemente (railsoft 1.0)		
Typ	Länge [m]	Radius [m]	Typ	Länge [m]	Radius [m]
K	18,000		K	16,932	
R	38,506	301	R	39,061	295,913
K	18,000		K	17,420	
K	18,000		K	19,410	
R	9,587	-301	R	8,412	-307,183
K	18,003		K	18,617	
G	73,935		G	73,919	
K	18,002		K	18,661	
R	17,221	-301	R	15,994	-309,647
K	18,000		K	18,785	
K	18,000		K	17,668	
R	17,241	301	R	16,657	306,160
K	18,000		K	20,433	
G	112,371		G	109,827	
K	18,000		K	19,656	
R	6,991	450	R	5,961	445,264
K	18,893		K	16,562	
G	20,000		G	22,493	
K	18,893		K	17,040	
R	6,988	-450	R	9,518	-491,082
K	18,005		K	17,783	
G	110,878		G	106,604	
R	30,426	500	K	10,339	
G	7,337		R	19,647	503,718
K	12,600		K	10,719	
R	15,135	-456	K	15,513	
K	12,600		R	11,129	-446,442
G	83,749		K	15,486	
			G	83,823	

Daraus ergeben sich folgende Differenzen zum Vergleichswert des Gleisfestpunktverzeichnisses:

Differenzen Soll-Ist		
Typ	ΔL [m]	ΔR [m]
K	1,07	
R	-0,56	5,09
K	0,58	
K	-1,41	
R	1,18	6,18
K	-0,61	
G	0,02	
K	-0,66	
R	1,23	8,65
K	-0,79	
K	0,33	
R	0,58	-5,16
K	-2,43	
G	2,54	
K	-1,66	
R	1,03	4,74
K	2,33	
G	-2,49	
K	1,85	
R	-2,53	41,08
K	0,22	
G	4,27	
K		
R	10,78	-3,72
K		
K	-2,91	-9,56
R	4,01	
K	-2,89	
G	-0,07	

G ... Gerade

K ... Klothoide

R ... Kreisbogen

Innere Genauigkeit

Zur Beurteilung der inneren Genauigkeit werden die Varianzen s der Schnittpunktkoordinaten der Regressionsgeraden, welche mittels einer Fehlerfortpflanzung unter Beachtung bestehender Korrelationen der Parameter der ausgleichenden Geraden in Kapitel 5 ermittelt worden sind, herangezogen.

	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 510.894 (s=0.334 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 0 + 527.594 (s=0.357 m)$	$K [1/m]: 0.00338 (s=0.000017 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 566.120 (s=0.199 m)$	$K [1/m]: 0.00338 (s=0.000017 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 583.302 (s=0.123 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 0 + 602.446 (s=0.250 m)$	$K [1/m]: -0.00326 (s=0.000027 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 610.743 (s=0.250 m)$	$K [1/m]: -0.00326 (s=0.000027 [1/m])$
Gerade:	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 629.105 (s=0.197 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 702.012 (s=0.203 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 0 + 720.418 (s=0.222 m)$	$K [1/m]: -0.00323 (s=0.000011 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 736.193 (s=0.087 m)$	$K [1/m]: -0.00323 (s=0.000011 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 754.721 (s=0.093 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 0 + 772.147 (s=0.195 m)$	$K [1/m]: 0.00327 (s=0.000015 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 788.576 (s=0.196 m)$	$K [1/m]: 0.00327 (s=0.000015 [1/m])$
Gerade:	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 808.729 (s=0.180 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 917.053 (s=0.220 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 0 + 936.440 (s=0.329 m)$	$K [1/m]: 0.00225 (s=0.000021 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 942.319 (s=0.418 m)$	$K [1/m]: 0.00225 (s=0.000021 [1/m])$
Gerade:	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 958.654 (s=0.316 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 0 + 980.839 (s=0.171 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 0 + 997.646 (s=0.238 m)$	$K [1/m]: -0.00204 (s=0.000012 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 7.035 (s=0.302 m)$	$K [1/m]: -0.00204 (s=0.000012 [1/m])$
Gerade:	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 24.574 (s=0.295 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 129.719 (s=0.186 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 1 + 139.917 (s=0.202 m)$	$K [1/m]: 0.00199 (s=0.000012 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 159.294 (s=0.188 m)$	$K [1/m]: 0.00199 (s=0.000012 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 169.866 (s=0.107 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Kreis:	$L [km+m]: 1 + 185.167 (s=0.113 m)$	$K [1/m]: -0.00224 (s=0.000009 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 196.143 (s=0.143 m)$	$K [1/m]: -0.00224 (s=0.000009 [1/m])$
Gerade:	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 211.417 (s=0.140 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$
	Klothoide:	$L [km+m]: 1 + 294.093 (s=0.125 m)$	$K [1/m]: 0.00000 (s=0.000000 [1/m])$

Anhang B

Bedienungsanleitung 'railsoft 1.0'

Prinzipiell wird in der Software 'railsoft 1.0' das innerhalb der vorliegenden Arbeit vorgestellte Verfahren zur Bestimmung einer momentanen Gleisgeometrie umgesetzt. Zu diesem Zweck werden Trassierungselemente und -parameter automatisiert bestimmt. Die Grundlage stellen Daten des Gleismesswagens Plasser & Theurer EM 80 und die geltenden Richtlinien (RPT und BOStrab) für die Trassierung der Strecken des Berliner U-Bahnnetzes dar.

Messdaten des Gleismesswagens

Die Messdaten liegen zur Auswertung in Dateien in binärer Form im Ordner */Messdaten/* vor. Informationen zum Schnittstellenformat können [HEUWOLD 2000] entnommen werden.

Die Bezeichnung der Messdaten-Dateien ist wie folgt festgelegt:

z.B. 61T9812.dat

6 ... U-Bahn-Linie 6

1 ... Gleis 1

98 ... Jahr der Messfahrt (1998)

12 ... Monat der Messfahrt (Dezember)

Protokoll- und Ergebnisdateien

Wird 'railsoft 1.0' mit den Standardeinstellungen gestartet, werden im Ordner */Protokolle/* folgende Ergebnis- und Protokolldateien erstellt:

im Textformat:

- | | |
|---------|--|
| *.prt : | Berechnungs- und Detektierungsprotokoll, Ergebnisprotokoll einschließlich der Koordinaten der Elementübergänge und deren Varianzen |
| *.elm : | detektierte Trassenelemente und deren Parameter |
| *.out : | Messdaten im ASCII-Format (für jeden Editor lesbar) |

An Stelle des * ist jeweils die Bezeichnung des untersuchten Messdatensatzes zu verwenden.

im DXF-Format:

*_K.dxf : Krümmungsbild (L,K-System) der Gleisachse,
Protokoll der Detektierungszustände:

<i>Dargestellte Größen</i>	<i>Layer</i>
Bereiche zur Kalibrierung	-1
geglättete Krümmungen K_i	0
Amplitude der Eigenschwingung	1
Messwerte K_i	2
Varianz σ_L des Elementüberganges	3
Varianz σ_K des Elementüberganges	4
Ausgleichung, Schnittberechnung	10
Soll-Elemente	11
Roherkennung (Geraden)	12
Roherkennung (Kreisbögen)	13
Roherkennung (Klothoiden)	14

*_R.dxf : Radienbild (L,R-System) der Gleisachse

<i>Dargestellte Größen</i>	<i>Layer</i>
geglättete Radien R_i	0
Messwerte R_i	2

*_Soll_Ist.dxf : Darstellung von Soll- und Ist-Elementen im
Krümmungsbild unter Beachtung eines extern
ermittelten Maßstabes der Bogenlänge (in *.ini-Datei)

Die erstellten Dateien im DXF-Format sind u.a. in der Software AutoCad der Firma Autodesk darstellbar.

Solldaten

Zur Darstellung von Solldaten im '*_Soll_Ist.dxf' - File (z.B. aus dem Gleisfestpunktverzeichnis) ist im Ordner /Solldaten/ eine Datei mit der Bezeichnung 'Soll_*.dat' zu erstellen.

Das Format dieser Datei ist folgendermaßen festzulegen:

<G> <Länge [m]>	(Gerade)
<K> < Länge [m]>	(Klothoide)
<R> < Länge [m]> <Radius [m]>	(Kreisbogen)

Steuerdateien

Viele der softwareinternen Module sind in ihrem Ablauf und ihrer Wirkungsweise durch Festlegungen in folgenden Steuerdateien (im Ordner */railsoft 1.0/*) vom Anwender beeinflussbar:

railsoft.ini	Schalter für die Verwendung der Standard- oder benutzerspezifischen Steuerdatei
railsoft_std.ini	Standard-Steuerdatei, enthält alle Standardeinstellungen, (Diese Steuerdatei sollte vom Anwender nicht geändert werden.)
railsoft_user.ini	benutzerspezifische Steuerdatei, (Diese Datei bietet dem Anwender die Möglichkeit, diverse Voreinstellungen zu treffen.)

Voreinstellungen

Alle spezifischen Voreinstellungen können vom Anwender in der Steuerdatei *'railsoft_user.ini'* mit einem üblichen Texteditor (z.B. UltraEdit, Txxpad, Notepad) verändert werden. Bei der erstmaligen Änderung der benutzerspezifischen Steuerdatei ist in der Datei *'railsoft.ini'* bei der zu verwendenden Steuerdatei eine *1* anzugeben.

Folgende Schwerpunkte sind detailliert beeinflussbar:

- Steuerung des Programm-Ablaufs der Software 'railsoft 1.0'

Hinweis: Wird ein Modul des Erkennungsverfahrens mit dem Parameter *0* ausgeschaltet, sollten alle folgenden Module ebenfalls mit dem Parameter *0* deaktiviert werden.

Ist eine automatisierte Ermittlung der Amplitude der überlagerten Eigenschwingung des Messwagens oder des Kalibrierversatzes der Pfeilhöhen- und Spurweitensensoren nicht möglich, wird empfohlen, lediglich das Krümmungsbild *'*_K.dxf'* zu erstellen, und die gewünschten Parameter zu schätzen. Diese können in der benutzerspezifischen Steuerdatei eingetragen werden.

- Trassierungs-Grundlagen

Hier sind u.a. Voreinstellungen für die Entwurfsgeschwindigkeit und die Elementenmindestlänge möglich.

- Qualität der Messdaten

Die Kalibrierung der Sensoren zur Pfeilhöhen- und Spurweitenmessung kann sowohl automatisch als auch manuell erfolgen. Es kann weiterhin die Amplitude der überlagerten Eigenschwingung geschätzt und ein Maßstab der Bogenlängenmessung eingeführt werden.

- Mess-Anordnung am Gleismesswagen

Weiterhin sind die Festlegungen der Fahrtrichtung, des Messpunkt-
abstandes und der Länge der Pfeilhöhenbasis möglich.

Die Steuerdateien sind mit Kommentaren versehen und selbsterklärend.