

Studienrichtung Vermessungswesen
Technische Universität Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE
MITTEILUNGEN

Heft 44

**3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem
und linearen Filterverfahren**

von

Günther Retscher

Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie
Abteilung Ingenieurgeodäsie

Geowiss. Mitt.
44, 1996

Wien, im April 1996

Studienrichtung Vermessungswesen

Technische Universität Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE
MITTEILUNGEN

Heft 44

**3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem
und linearen Filterverfahren**

von

Günther Retscher

Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie
Abteilung Ingenieurgeodäsie

Geowiss. Mitt.
44, 1996

Wien, im April 1996

Herausgeber und Verleger: o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Vorstand des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie
der Technischen Universität Wien
A-1040 Wien, Gußhausstraße 27-29

Diese Arbeit wurde an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Wien zum
Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Die Kosten für den Druck wurden aus der ordentlichen Dotation und aus eigenen Einnahmen
des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie der Technischen Universität Wien getragen.

Referent: o. Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Koreferent: o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ewald Brückl
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Oktober 1995

Druck: O. Buschek
A- 3830 Waidhofen a.d. Thaya

Auflage: 500 Stück

Kurzfassung:

Große Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verfahren zur Bestimmung, Kontrolle und Absteckung von Gleisen werden insbesondere bei der Neuverlegung von Schienensträngen für Hochgeschwindigkeitsbahnen oder beim Bau der sog. „Festen Fahrbahn“ gestellt. In erster Linie führten wirtschaftliche Überlegungen zur Entwicklung eines neuen Aufnahme- und Auswertekonzepts für die Gleisvermessung, da herkömmliche Verfahren einen geringen Grad an Automation und Flexibilität aufweisen und einen relativ hohen Meßaufwand erfordern.

Das Prinzip des neuen Verfahrens beruht auf der Bestimmung des gesamten Gleisstreifens mit seinen Kenngrößen: 3D-Position der Gleisachse bzw. einer Fahrkante, Spurweite und Überhöhung. Das Meßsystem besteht im wesentlichen aus einer dreidimensionalen Positionierungseinheit und elektronischen Meßwertgebern in Verbindung mit einem Prozeßrechner. Die einzelnen Komponenten befinden sich auf einem eigens entwickelten Meßwagen, der sich in dem zu untersuchenden Gleiskörper bewegt. Der Meß- und Auswerteprozess läuft rechnergesteuert in einem Regelkreis weitgehend automatisch ab.

Die 3D-Aufmessung des Gleisstreifens ermöglicht die Durchführung der Lage- und Höhenaufnahme sowie der absoluten und relativen Gleisaufnahme in nur einem Arbeitsablauf. Neben elektronischen Meßrobotern können auch Systeme für GPS-Echtzeitvermessung (Real Time Kinematic GPS) eingesetzt werden. Aus einem Vergleich der berechneten Istlage mit der Soll-Gleislage im 3D-Raum gewinnt man absolute Verschiebewerte zur Gleiskorrektur. Mit dem Shannonschen Abtasttheorem kann ein optimales Abtastintervall gefunden werden, das durch eine Genauigkeitsanalyse von Meßergebnissen bestätigt wird.

Für die Auswertung werden Algorithmen eingesetzt, bei denen die Meßdaten wahlweise direkt während der Aufnahme (on-line) als auch im nachhinein (off-line) verarbeitet werden. Eine Anwendung der Kalman-Filterung wird für den on-line Betrieb und die Wiener-Filterung bzw. Kollokation für off-line Auswertungen vorgeschlagen. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen erfolgt eine Modifizierung und Anpassung der mathematischen Modelle an die Besonderheiten für die Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme. Die Umsetzung der Algorithmen erfolgt durch die Entwicklung einer neuen Software.

Im Zuge der Auswertung einer Reihe von Gleisaufnahmen kann die hohe Genauigkeit des modernen Aufnahmeverfahrens sowohl für die Bestimmung der absoluten als auch der relativen Gleislage bzw. Krümmung nachgewiesen werden. Das Verfahren ist universell für die Überprüfung der Gleislage von bestehenden Eisenbahntrassen sowie bei der Neuverlegung von Schienen einsetzbar. Die Methode kommt ohne kostenintensive betriebliche Sperrpausen aus und erreicht hohe Meßgeschwindigkeiten und Streckenleistungen. Im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren kann eine 3- bis 4-fache Leistungssteigerung erwartet werden. Durch den modularen Systemaufbau sind eventuellen Erweiterungs- und Ausbaumöglichkeiten keine Grenzen gesetzt.

Abstract:

Methods for surveying and monitoring railway tracks have to meet high requirements, especially for the construction of high-speed railway lines. A new surveying and evaluation concept has been developed for railway tracks mainly for economic reasons, since conventional methods are characterised by a low level of automation and flexibility and a relatively high expenditure of effort on measurement work.

This new concept aims at determining the following parameters for the track system: three-dimensional position of the centre of the track or one rail, the gauge and the banking of the track. The measurement system consists of a three-dimensional positioning unit and electronic sensors which are connected to a process computer. All the components are installed on a lightweight carriage which can be moved on the track. The measurement and evaluation is automated to a large extent by a computer which monitors and regulates the process.

With the aid of modern surveying procedures the absolute and relative position of the railway track can be determined simultaneously in three dimensions. Apart from terrestrial polar measurement systems, real-time kinematic GPS can also be used. By comparing the measured and the theoretical track positions we obtain absolute values for the shifts required to correct the track. The optimum measurement distance is estimated using Shannon's theorem and is confirmed by analysis of several series of measurements.

The evaluation uses algorithms which can be employed optionally during the measurement process (ongoing evaluation) or afterwards (post facto evaluation). For the ongoing evaluations, the use of an adaptive Kalman filter is generally recommended, and for the post facto evaluations the Wiener filter, an adapted collocation method. Following a brief exposition of the fundamentals of these techniques, the methods are modified and adapted for optimal analysis of a series of measurements of a railway track. New software was developed for this purpose.

Analysis of series of measurements has shown that the absolute and relative position of the railway track can be estimated with a high level of precision. The concept can be employed to monitor existing railway tracks, on the one hand, and to survey the rail during tracklaying on the other. There is no need to close the line during the survey and a high level of performance is achieved. By comparison with conventional methods, a threefold to fourfold increase in performance can be expected. The modular structure of the system facilitates further development and refinement.

Mein besonderer Dank gilt Herrn o.Univ. Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen für eine Vielzahl von Anregungen und die Betreuung dieser Arbeit. Herrn o.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ewald Brückl danke ich für die Übernahme des Koreferates. Herrn Dipl.-Ing. Dr. Gyula Mentés und seinen Mitarbeitern am Geodätischen und Geophysikalischen Forschungsinstitut der Ungarischen Akademie der Wissenschaften in Sopron danke ich für die Zusammenarbeit bei der Entwicklung und beim Bau des Meßwagens für die Gleisaufnahme. Dem Arbeitsgebiet 8.3, Bautechnische Verkehrsplanung, Bahnhofsanlagen und Vermessung, der Generaldirektion der Österreichischen Bundesbahnen, namentlich Herrn Dipl.-Ing. Arnold Eder, danke ich für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Gleisaufnahmen mit dem Multisensorsystem. Für interessante Gespräche und weitere Anregungen aus der Praxis danke ich den Herrn Dipl.-Ing. Paul Orth und Dipl.-Ing. Robert Miedler von der Vermessungsabteilung der Baufirma Porr.

Meinen Eltern, Herta und Josef Retscher, widme ich in Liebe und Dankbarkeit diese Arbeit.

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
Nomenklatur und Symbolverzeichnis	3
1. Einleitung und Zielsetzung	5
2. Aufnahme eines Gleiskörpers	8
2.1 Verfahren zur Bearbeitung der relativen Gleislage	9
2.1.1 Prinzip der Richtverfahren	9
2.1.2 Winkelbild- oder Nalenz-Höfer-Verfahren	10
2.1.3 Beurteilung der Richtverfahren	12
2.2 Kombinierte absolute und relative Verfahren zur Bestimmung der Gleis-Istlage	14
2.2.1 Prinzip des kombinierten Verfahrens	14
2.2.2 3D-Bestimmung des Trassenverlaufes	15
2.2.3 Geometrische Reduktionen	16
3. Mathematische Modellbildung zur Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme	19
3.1 Darstellung der Gleistrasse	19
3.2 Modellierung mit dem diskreten Kalman-Filter	22
3.2.1 Grundgleichungen der Kalman-Filterung	23
3.2.2 Abschätzung der Kovarianzmatrizen des Meß-, Systemrauschens und des geschätzten Zustandsvektors	25
3.2.3 Festlegung der Systemordnung und der Standardabweichung des Systemrauschens	27
3.2.4 Modellanpassung zur Auswertung einer Gleisaufnahme	29
3.3 Einsatz optimaler Glättungsverfahren	31
3.4 Modellierung mit dem Wiener-Filter	32
3.4.1 Funktionales und stochastisches Modell der Kollokation	32
3.4.2 Abschätzung der Kovarianzmatrizen für die Signal- und Meßgrößen	35
3.4.3 Ableitung eines Dreistufenmodells für die Kollokation	37
3.5 Zusammenfassung	42
4. Analyse und Anwendung der linearen Filterverfahren	44
4.1 Spektralanalyse von Meßreihen einer Gleisaufnahme	44
4.1.1 Diskretisierung der Gleisaufnahme	44

	Seite
4.1.2 Aufdeckung von Periodizitäten	48
4.2 Untersuchung von Filtereinstellungen anhand simulierter Meßwerte	50
4.2.1 Optimale Einstellungen beim Wiener-Filter	50
4.2.2 Optimale Einstellungen beim Kalman-Filter	52
4.3 Filterung realer Meßwertreihen	53
4.3.1 Anwendung des Wiener-Filters	53
4.3.2 Anwendung des Kalman-Filters	58
4.4 Vergleich zwischen Kalman-Filterung und Kollokation	60
4.5 Zusammenfassung	64
5. Konzeption eines Multisensorsystems für die 3D-Aufmessung der Gleis-Istlage	66
5.1 Entwicklung eines Meßwagens	66
5.2 Komponenten des Multisensorsystems	67
5.2.1 Terrestrisches dreidimensionales Polarmeßsystem	67
5.2.2 Einsatz der Satellitenmeßtechnik GPS	68
5.2.4 Elektronische Meßwertgeber	69
5.3 Beschreibung des Meß- und Auswerteprogramms	70
6. Beurteilung der Verfahren für die Gleisvermessung	73
6.1 Derzeitiger Stand der Gleisvermessung	73
6.1.1 Gleisvermarkung und trassennahe Festpunkte	73
6.1.2 Langsehnverfahren mit rechnergestützter Pfeilhöhenauswertung	77
6.1.3 Großräumige Gleisvermessung am Beispiel des neuen Oberbaumeßwagens der ÖBB	79
6.2 Gegenüberstellung der Methoden	82
6.2.1 Abbau von Gleisdeformationen	82
6.2.2 Optimale Bestimmung der Solltrasse	85
6.2.3 Zusammenstellung der Vorteile	85
7. Schlußbetrachtung und Ausblick	87
Literaturverzeichnis	90
Tafel 1 bis 4	97
Lebenslauf	101

Nomenklatur und Symbolverzeichnis:

Vektoren und Matrizen

allgemeine Bezeichnungen:

$\underline{x}$	Vektor (Kleinbuchstaben unterstrichen)
$\underline{A}$	Matrix (Großbuchstaben unterstrichen)
$\underline{x}^T, \underline{A}^T$	Transponierte eines Vektors bzw. einer Matrix
$\underline{A}^{-1}$	Inverse einer Matrix

spezielle Bezeichnungen:

$\underline{x}(k)$	Zustandsvektor
$\underline{x}'(k)$	aufdatierter bzw. verbesserter Zustandsvektor
$\underline{x}$	Parameter- oder Unbekanntenvektor
$\underline{l}(k)$ bzw. $\underline{l}$	Beobachtungsvektor
$\underline{w}(k)$	Vektor des Systemrauschens
$\underline{p}(k)$	Positionsvektor
$\underline{s}$	Signalvektor
$\underline{s}_p$	Signalvektor der prädizierten Punkte
$\underline{n}$	Vektor der zufälligen Meßfehler bzw. Meßrauschens
$\underline{v}$	Verbesserungsvektor
$\underline{E}$	Einheitsmatrix
$\underline{0}$	Nullmatrix
$\underline{A}(k)$ bzw. $\underline{A}$	Design- oder Formmatrix
$\underline{T}$	Transitionsmatrix
$\underline{K}$	Kalman-Gain- bzw. Verstärkungsmatrix
$\underline{\Sigma}_{xx}$	Kovarianzmatrix des Zustandsvektors
$\underline{\Sigma}_{ww}$	Kovarianzmatrix des Systemrauschens
$\underline{\Sigma}_{ll}$	Kovarianzmatrix des Meßrauschens
$\underline{\Sigma}'_{xx}$	Kovarianzmatrix des korrigierten Zustandsvektors
$\underline{P}$	Gewichtsmatrix
$\underline{Q}_L$	Kofaktormatrix der Beobachtungen bzw. Meßfehler
$\underline{Q}_s$	Kofaktormatrix des Signals in den Meßpunkten
$\underline{Q}_{s_p}$	Kofaktormatrix des Signals in den Prädiktionspunkten
$\underline{Q}_{s s_p}$	Kofaktormatrix des Signals, die die Korrelationen zwischen den beobachteten und den interpolierten Punkten berücksichtigt
$\underline{Q}_U$	Kofaktormatrix des Beobachtungsvektors

Statistische Größen

allgemeine Bezeichnungen:

σ	empirische Standardabweichung
μ	mittlerer Fehler
E	Erwartungswert

spezielle Bezeichnungen:

$\sigma_{w'}$	Standardabweichung des Systemrauschens
μ_0	mittlerer Gewichtseinheitsfehler

Funktionen

$\delta_{k,l}$	Dirac'sche Deltafunktion
$f_i(x)$	Trendfunktion
Ω	Langrangesche Funktion
$C(l)$ bzw. $C(\Delta l)$	Autokovarianzfunktion bzw. Kovarianzfunktion
$S(k)$	Leistungsspektrum

Koordinaten und Meßwerte

x, y, z	Gauß-Krüger-Koordinaten und Höhe
x', y', z'	Koordinaten im Standpunktsystem des Tachymeters
$x(l), y(l)$ und $z(l)$	Koordinaten von Trassenpunkten in Abhängigkeit von der Bogenlänge l
$\xi(l), \eta(l)$ und $\zeta(l)$	Koordinaten von Trassenpunkten in einem lokalen Koordinatensystem
L_i	korrelierter Meßwert
$\overline{L_i}$	ausgeglichener Meßwert

Weitere Symbole und Bezeichnungen

l	Bogenlänge
h	Pfeilhöhe
s	Sehnenlänge
R	Radius eines Kreises
e	Verschiebung bei der Gleiskorrektur
κ	Krümmung
$\Delta\kappa$	Krümmungsdifferenz
c	Krümmungsänderung
τ	Tangentenrichtungswinkel
v	Richtungswinkel einer Geraden
sw	Spurweite
h	Zielhöhe bzw. Höhenexzentrizität
q	Querabweichung
α	Neigungswinkel bzw. Querneigung
ϑ	Längsneigung
Δr	radiale Abweichung aufgrund der Krümmung
a	Parameter der Kovarianzfunktion $C_2(\Delta l)$
Δl	Meßpunktabstand bzw. Punktdichte
ω	Frequenz
t	Zeit
Δt	Abtastintervall im Zeitbereich
T	Periode
λ	Wellenlänge
k	Wellenzahl

1. Einleitung und Zielsetzung

Die vermessungstechnischen Arbeiten im Eisenbahnbau sind außerordentlich umfangreich und vielseitig. Im Laufe der Entwicklung der Gleisvermessung haben sich dafür unterschiedliche Meß- und Rechenverfahren herausgebildet. Da der Gleiskörper durch den Fahrbetrieb im Laufe der Zeit Veränderungen unterliegt, werden hohe Anforderungen an die Qualität der Eisenbahntrasse gestellt.

Die Idee zur *Entwicklung eines neuen Aufnahmekonzepts* entstand primär aus wirtschaftlichen Überlegungen. Die zur Zeit eingesetzten Verfahren für die Aufmessung eines Gleiskörpers weisen einen geringen Grad an Automation und Flexibilität auf und erfordern einen relativ hohen Meßaufwand. Große Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Meßsystems werden insbesondere bei der Neuverlegung von Schienensträngen für Hochgeschwindigkeitsbahnen oder beim Bau der sog. „Festen Fahrbahn“ gestellt. Neben der Erfüllung von besonders hohen Genauigkeitsforderungen für die Bestimmung der Gleisdeformationen ist eine Minimierung der Zeitspannen für die Vermessungsarbeiten maßgeblich.

Bei den *herkömmlichen Verfahren* zur Bestimmung, Kontrolle und Absteckung von Gleisen wird zwischen neu zu bauenden bzw. bereits bestehenden Gleisanlagen unterschieden. Bei der Bearbeitung der zuletzt genannten Gleise handelt es sich um sog. Linienverbesserungen, worunter kleine Veränderungen der vorhandenen Situation zur Verbesserung des Fahrbetriebes zu verstehen sind, oder um die Ermittlung der durch den Eisenbahnbetrieb verursachten Fehllagen (Aufmessung der Istlage) und der daraus abzuleitenden Verschiebewerte zur Soll-Gleislage, dies entspricht einer Neuabsteckung bestehender Gleise.

Das neu entwickelte universelle *3D-Aufnahmeverfahren* kann für beide Aufgabenstellungen vorteilhaft eingesetzt werden. Neben der meßtechnischen Erfassung von bestehenden Gleisanlagen liefert es auch aktuelle Positionsbestimmungen von Gleiskörpern, die sich im Produktionsprozeß befinden. Direkt während der Neuverlegung der Schienen kann eine abschnittsweise Überprüfung der Genauigkeit der absoluten Gleislage und der Formtreue vorgenommen werden.

Durch den Einsatz moderner geodätischer Meßsysteme lassen sich Arbeitsprozesse immer wieder umgestalten, um einen höheren Grad an Automation zu erreichen. Ziel ist die Erfassung des gesamten Gleisstreifens mit seinen Kenngrößen: 3D-Position der Gleisachse bzw. einer Fahrkante, Spurweite und Überhöhung. Der Meßablauf soll rechnergesteuert in einem Regelkreis weitgehend automatisch ablaufen. Das Meßkonzept sieht demnach eine Kombination von einer dreidimensionalen Positionierungseinheit mit elektronischen Meßwertgebern in Verbindung mit einem Prozeßrechner für die Steuerung des Meßablaufes und die Auswertung der Meßdaten in Form eines *Multisensorsystems* vor. Die einzelnen Komponenten befinden sich auf einem eigens entwickelten Meßwagen, der sich in dem zu untersuchenden Gleiskörper bewegt.

Die *3D-Positionsbestimmung* des Gleisstreifens ermöglicht die Durchführung der Lage- und Höhenaufnahme sowie der absoluten und relativen Gleisaufnahme in nur einem Arbeitsablauf. Neben elektronischen Tachymetersystemen mit automatischer Zielverfolgung wird in dieser Arbeit auch der Einsatz von GPS Totalstationen für diese Aufgabenstellung erprobt. Unter einer GPS Totalstation wird ein Meßsystem verstanden, das in Echtzeit durch direkte Auswer-

tung aller Meßdaten im Felde die Position der bewegten Station liefert. Beide Systeme können im Prinzip mit der gleichen Meßstrategie eingesetzt werden. Als unmittelbares Meßergebnis erhält man für den Zielpunkt dreidimensionale Koordinatendifferenzen bezogen auf den Instrumentenstandort des Tachymetersystems bzw. auf den GPS-Referenzempfänger.

Elektronische Meßwertgeber bestimmen die Überhöhung und den Abstand der Schienen. Der gesamte Meßablauf wird vom Prozeßrechner gesteuert und die Meßdaten werden vor Ort ausgewertet. Die Ist- und Sollage der Gleise können so im 3D-Raum verglichen werden und aus dem Vergleich gewinnt man schließlich absolute Korrekturwerte.

Die *Istlage der Gleise* folgt aus der aufgenommenen 3D-Meßwertreihe und läßt sich durch eine Trendfunktion beschreiben, der additiv ein näherungsweise periodisches Signal und Rauschen überlagert ist. Das näherungsweise periodische Signal charakterisiert die Korrekturwerte und die Trendfunktion die Sollage des Gleiskörpers. Das Rauschen wird durch die Meßfehler des Multisensorsystems und andere zufällige Störeinflüsse wie beispielsweise Unebenheiten der Schienen hervorgerufen. Ein Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, diese Anteile voneinander zu trennen und zu analysieren. Diese Problemstellung wird durch eine optimale Anpassung von *linearen Filter- und Glättungsverfahren* an die Besonderheiten bei der Auswertung einer Gleisaufnahme gelöst.

Für die *Auswertung* der Meßdaten kommen Algorithmen in Betracht, die sowohl eine direkte (*on-line*) als auch eine nachträgliche (*off-line*) Verarbeitung der Meßwerte im Zuge der Aufnahme ermöglichen. Durch eine on-line Auswertung wird die Wirtschaftlichkeit und Produktivität des Absteckvorgangs bei der Neuverlegung von Schienen wesentlich erhöht. Aufgrund seiner rekursiven Berechnungsweise nach der Methode der kleinsten Quadrate bietet sich die *Kalman-Filterung* zur Lösung dieser Aufgabenstellung an. Bei der Überprüfung bestehender Eisenbahntrassen setzt man bevorzugt off-line Auswertelgorithmen ein. Die *Wiener-Filterung* bzw. *Kollokation* stellt dazu ein universell einsetzbares Auswerteverfahren dar, welches eine gemeinsame Ausführung von Filterung, Ausgleichung und Prädiktion ermöglicht.

In dieser Arbeit werden unterschiedliche Bezeichnungen für die Differenzierung verschiedener Eisenbahntrassen verwendet, die zur besseren Verständlichkeit nachfolgend kurz erläutert werden. Der Begriff „*Trasse*“ stammt aus dem Französischen und kann mit „Spur“ oder „Fährte“ übersetzt werden. Die Trasse beschreibt die Achse eines linienförmigen Objekts im Raum. Für bestimmte Aufgaben und für graphische Darstellungen wird sie in eine horizontale und eine vertikale Komponente zerlegt. Sie setzt sich aus einer Folge von Trassierungselementen zusammen.

Unter der *Solltrasse* sei der unter vorgegebenen Bedingungen erwartete bzw. gewünschte Trassenverlauf verstanden. Die *neue Solltrasse* bzw. die *künftige Soll-Gleislage* ist die bei der Gleiskorrektur in der Natur erzeugte bzw. abgesteckte Trasse.

Mit *Isttrasse* wird jene Trasse bezeichnet, die tatsächlich in der Natur vorhanden ist und aufgenommen wurde.

Durch die Einrechnung des Trassenverlaufes bei der Trassierung eines Verkehrsweges erhält man die *projektierte Trasse*.

Für verschiedene Berechnungen werden Trassen benötigt, auf die die Meßwerte bezogen werden. Wir bezeichnen diese Trassen als *Referenztrassen*.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen der bislang zur Verfügung stehenden *Verfahren zur Bearbeitung der relativen Gleislage*, der sog. Richtverfahren, beschrieben und analysiert. Anschließend wird das Prinzip des neuen „*Kombinierten absoluten und relativen Verfahrens*“ zur Bestimmung der Gleis-Istlage vorgestellt.

Kapitel 3 beschäftigt sich eingehend mit der *mathematischen Modellbildung* zur Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme mit *linearen Filterverfahren*. Zu Beginn dieses Abschnitts erfolgt eine Analyse der diskreten dreidimensionalen Meßreihe einer Gleisaufnahme. Im Anschluß daran werden ausgehend von den Grundgleichungen der *Kalman-Filterung* wichtige Gesichtspunkte für die Aufstellung des stochastischen Modells erläutert und der Algorithmus optimal zur Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme angepaßt. Weiters wird auf die mögliche Durchführung einer *kombinierten Vorwärts- und Rückwärts-Kalman-Filterung* zur Erhöhung der Genauigkeit der Schätzwerte verwiesen. Nach einer Zusammenstellung des funktionalen und stochastischen Modells des *Wiener-Filters* bzw. der *Kollokation* wird ein dreistufiges Auswertemodell für die Gleisaufnahme basierend auf dem gewohnten Ansatz der Kollokation abgeleitet.

Die *Anwendung der linearen Filterverfahren* wird ausführlich in Kapitel 4 behandelt. Hauptziele der Untersuchungen bilden die Bestimmung von *Richtwerten für die optimalen Filtereinstellungen* bei beiden Auswerteverfahren sowie die *Ermittlung eines optimalen Abtastintervalls* für die Gleisaufnahme. Die Richtwerte können zur objektiveren Beurteilung der Filterergebnisse mit Hilfe von simulierten Meßwertreihen gewonnen werden. Die Einsetzbarkeit dieser Filtereinstellungen auf reale Messungen wird anschließend unter Beweis gestellt. Neben Meßdaten des elektronischen Tachymetersystems werden auch GPS-Messungen analysiert und verglichen. Zur Ableitung eines optimalen Abtastintervalls wird vom *Shannonschen Abtasttheorem* ausgegangen. Die empirische Analyse der Leistungsspektren von Meßreihen liefert ein Maximum für das Diskretisierungsintervall. Der Maximalwert findet durch eine Untersuchung der Genauigkeit für die relative Gleislage bzw. Krümmung der Schätzwerte für die Isttrasse in Abhängigkeit des Meßpunktabstandes seine Bestätigung. Mit Hilfe der Spektren können auch Periodizitäten in den Meßwertreihen aufgedeckt werden. Abschließend werden Vorschläge für die Vorgangsweise bei der on-line Überprüfung der Gleislage im Zuge der Neuverlegung von Schienen und der off-line Überprüfung von bereits bestehenden Eisenbahntrassen erarbeitet.

Das *neue Aufnahmekonzept* wird im Detail in Kapitel 5 beschrieben. Für die Aufnahme des Gleiskörpers wurde ein Meßwagen entwickelt, der die Komponenten des Multisensorsystems aufnimmt. Neben den Anforderungen für die 3D-Positionierung werden die Besonderheiten der eingesetzten Meßsysteme erläutert. Weiters wird der Aufbau des Meß- und Auswerteprogramms skizziert. Das Konzept zeichnet sich durch einen hohen Grad an Flexibilität aus und stellt ein ausbaufähiges System für die moderne Gleisvermessung dar.

Kapitel 6 nimmt eine *Gesamtbeurteilung der Verfahren für die Gleisvermessung* vor. Zuvor wird der derzeitige Stand der Gleisvermessung bei den Österreichischen Bundesbahnen und im Vergleich dazu die Situation bei den Deutschen und Schweizer Bundesbahnen beleuchtet. Bei der *Gegenüberstellung der Methoden* werden als Hauptkriterium die Tendenzen zum Abbau von Gleisdeformationen betrachtet. Hierbei zeigen sich die Stärken des modernen Aufnahme- und Auswertekonzepts bei der Überprüfung der absoluten Gleislage und der Formtreue und bei der Bestimmung der optimalen Solltrasse.

Eine Zusammenfassung und ein Ausblick (Kapitel 7) schließen diese Arbeit ab.

2. Aufnahme eines Gleiskörpers

Für die Beurteilung der Qualität einer Eisenbahntrasse sind verschiedene Kriterien maßgeblich. Aus der Sicht des Verkehrsministeriums ist vor allem die Gewährleistung einer hohen *Sicherheit* für den Fahrbetrieb entscheidend, d.h. ein spurgebundener Verkehrsweg muß hinsichtlich Material und Linienführung so beschaffen sein, daß ein Schienenfahrzeug nicht entgleist. Aus der Sicht eines Fahrgastes ist das aber zu wenig. Die Passagiere wollen nicht nur sicher, sondern auch *komfortabel* reisen. Aber das Verkehrsunternehmen stellt selbst die höchsten Qualitätsansprüche an die Gleise. Für eine Bahnverwaltung spielt in erster Linie die *Wirtschaftlichkeit* im Hinblick auf den Erhaltungsaufwand eine bedeutende Rolle. Daraus folgt, daß neben einer Maximierung von Sicherheit und Komfort auch die Minimierung des Unterhaltungsaufwandes erreicht werden muß. Man ist also daran interessiert, den Verschleiß der Gleise möglichst klein zu halten, um eine möglichst lange Lebensdauer des Oberbaues zu erreichen.

Für die Sicherstellung dieser Anforderungen ist in hohem Maße die Trassengeometrie verantwortlich. Die Trassengeometrie und damit die Qualität eines Gleises wird stark von den Kräften, die durch Fahrzeuge auf die Schienen einwirken, beeinflusst. Diese durch den Fahrbetrieb verursachten Kräfte werden bei der Eisenbahn im Gegensatz zum Straßenverkehr in wesentlich größerem Umfang auf den Gleisrost übertragen. Durch entsprechende konstruktive, geometrische und betriebstechnische Festlegungen können nicht alle auf den Schienenstrang einwirkenden Kräfte unbeschadet vom Oberbau aufgenommen werden. Aufgrund der begrenzten Bau- und betriebsstechnischen Genauigkeit und der tatsächlichen Betriebsbelastung kommt es zu einer Überschreitung der bei der Projektierung angenommenen Gleisbeanspruchung. Die Folge sind Deformationen der Gleisgeometrie, die ihrerseits einen unruhigen Fahrzeugverlauf, einen größeren Verschleiß und sogar Sicherheitseinschränkungen hervorrufen können. Diese Gleislageveränderungen beeinträchtigen somit erheblich die vorhin angeführten drei Qualitätsmerkmale eines Gleises (Sicherheit - Komfort - Wirtschaftlichkeit). Es werden deshalb große Anstrengungen unternommen, diese Deformationen von vornherein zu minimieren bzw. bereits vorhandene Abweichungen der Gleise von ihrer Sollage zu korrigieren.

Bei der sog. *Gleisinstandhaltung* soll das vorhandene Gleis in seine theoretisch richtige Lage gebracht werden. Die Grundlage für die Beseitigung bzw. Verringerung der Deformationen muß einer Aufnahme der Ist-Gleislage entnommen werden. Eine weitere Strategie hat das Ziel, die Gleisdeformationen von Anfang an nach Möglichkeit zu verhindern. In diesem Zusammenhang sei an den Einsatz der „*Festen Fahrbahn*“ verwiesen (Gillich 1993; Hilliges 1993; Kopp 1993).

Die Feststellung der Größe und der Richtung der Gleisdeformationen bzw. die Kontrolle der Gleislage muß vor allem für Hochleistungsstrecken im Hinblick auf die höheren Fahrgeschwindigkeiten mit größter Präzision erfolgen. Hierzu wurden im Laufe der Zeit eine Reihe von Verfahren entwickelt. Besonders wichtig in diesem Zusammenhang ist, daß hier zwischen absoluter und relativer Gleislage unterschieden werden muß. Man benötigt deshalb zur Beurteilung der Gleislage *zwei Gruppen von Genauigkeitsmaßen*:

- Genauigkeitsmaße zur Beurteilung der *absoluten Gleislage* (horizontal und vertikal),
- Genauigkeitsmaße zur Beurteilung der *relativen Gleislage* bzw. *Krümmung*.

Diese beiden Maße sind voneinander unabhängig, da die Herstellung der theoretisch richtigen Krümmung von der absoluten Lage des Schienenstranges nicht abhängig ist. Für einen ruhigen Fahrzeugverlauf und einen geringen Verschleiß der Gleise ist in erster Linie die exakt hergestellte Krümmung verantwortlich. Zur Vermeidung bzw. Verringerung von Gleisdeformationen ist deshalb die Einhaltung einer bestimmten Krümmungsgenauigkeit erforderlich. Es soll ein *harmonischer Krümmungsverlauf* erzielt werden. Besonders wichtig ist die Größe und das Vorzeichen des Krümmungsfehlers in bezug auf die unmittelbare Nachbarschaft. Die Krümmungsfehler beeinträchtigen vor allem im höheren Geschwindigkeitsbereich sehr nachteilig das dynamische Verhalten der Fahrzeuge und gleichzeitig auch die Stabilität des lückenlos verschweißten Gleises. Die absolute Gleislage ist hingegen nicht so entscheidend für den Fahrzeugverlauf. Die Herstellung einer genauen absoluten Lage dient in erster Linie der Gewährleistung der projektierten Gleislage in bezug auf Punkte der unmittelbaren Umgebung. Dazu gehört u.a. die Einhaltung von Mindestabständen zu den Zwangspunkten eines Trassenverlaufes, wie z.B. Signalen, Fahrleitungsmasten, Gebäuden, Brücken, Tunnelwänden, Bahnsteigkanten, usw. Man spricht in diesem Zusammenhang von der *Einhaltung der Lichtraumungrenzungsline* (Fiedler 1991; Hennecke, Müller, Werner 1991).

Will man den Gleiskörper in seine absolute Lage bringen, so ist die meßtechnische Erfassung der Ist-Lage und -Höhe und deren Bearbeitung erforderlich. Früher beschränkte man sich eher auf die Herstellung einer gleichbleibenden oder sich stetig monoton ändernden Krümmung. Die Methoden, die der Erzeugung eines harmonischen Krümmungsverlaufes dienen, werden als *Richtverfahren* (Abschnitt 2.1) bezeichnet. Mit modernen Verfahren (Abschnitt 2.2) soll hingegen sowohl eine hohe absolute als auch eine hohe relative Genauigkeit für den Gleiskörper in einem Arbeitsgang erzielt werden (*Kombinierte Verfahren*).

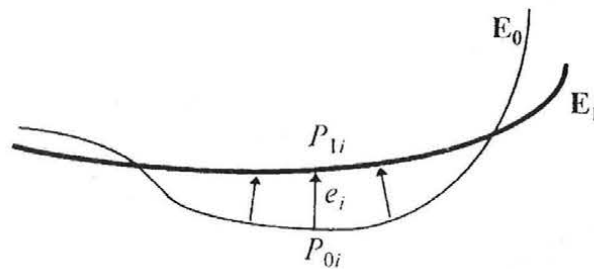
2.1 Verfahren zur Bearbeitung der relativen Gleislage

2.1.1 Prinzip der Richtverfahren

Bei den Richtverfahren wird das mit Lagefehlern behaftete Gleis selbst als Grundlage für die Messung und Absteckung benutzt (Abb. 2.1). Ein vorhandenes deformiertes Gleis soll von der Lage E_0 (Standlinie) in die Lage E_1 (Entwurf) übergeführt werden. Unter der relativen Gleislage versteht man die Lage und Höhe von Gleispunkten bezogen auf benachbarte Punkte desselben Gleises bzw. zwischen verschiedenen Linienzügen E_0 und E_1 . Die relative Gleislage sagt hingegen nichts über die Lage und Höhe der Gleispunkte in bezug auf Punkte außerhalb des Gleises, den sog. Zwangspunkten, aus. Die mathematischen Zusammenhänge der Linien E_0 und E_1 in horizontaler Richtung finden in den Verfahren zur Bearbeitung der relativen Gleislage ihren Niederschlag.

Die Verfahren zur Korrektur der Gleislage gliedern sich in die sog. *Hand- und Maschinenrichtverfahren*. Es sind grundsätzlich die folgenden zwei Arbeitsschritte notwendig:

- Feststellen der Größe und Richtung der Verschiebung e_i zwischen Standlinie und Entwurf,
- Verschieben des Gleises in die theoretisch richtige Lage durch Richten (horizontal) und Heben und Stopfen (vertikal).

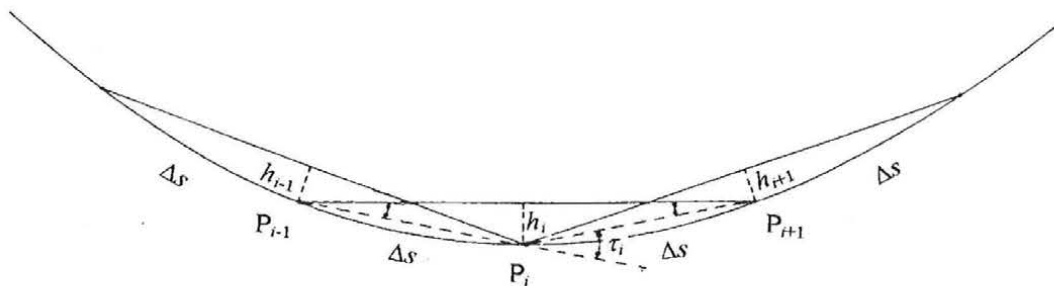
Abb. 2.1: Relative Lage zweier Gleisachsen E_0 und E_1

Diese beiden Arbeitsschritte werden in kleinen lokalen Bereichen noch immer manuell durchgeführt. Erstrecken sich aber die notwendigen Arbeiten über einen großräumigen Bereich, so stehen dafür moderne Meßwagen in Kombination mit Richt- und Stopfmaschinen zur Verfügung. Bezeichnend für diese Verfahren ist, daß die Bestimmung der horizontalen Lageverschiebungen unabhängig von der Bestimmung der vertikalen Abweichungen vorgenommen wird. Es erfolgt somit eine strenge Trennung zwischen der Lage- und Höhenbestimmung des Ist-Gleiskörpers (Hennecke, Müller, Werner 1991; Müller 1984 b).

2.1.2 Winkelbild- oder Nalenz-Höfer-Verfahren

Der Eisenbahnlandmesser *Nalenz* hat das Verfahren gegen Ende des 19. Jahrhunderts zur „Wiederherrichtung ausgefahrener Gleise“ entwickelt. Um dabei nicht wie bei der Erstabsteckung auf die oftmals weitabliegenden Tangenten zurückgehen zu müssen, benutzte er das vorhandene Gleis als Standlinie, von der aus die verbesserte Gleislage ohne Hilfslinien mit einfachen Stichmaßen abgesetzt werden kann. Das Winkelbildverfahren wurde später von *Höfer* weiterentwickelt und theoretisch verbessert.

Beim Winkelbildverfahren werden aus gemessenen Pfeilhöhen die Richtungswinkel der Tangenten in den einzelnen Punkten abgeleitet und graphisch aufgetragen (*Winkelbild*). Aus der Gegenüberstellung der theoretisch richtigen Winkelgrößen mit denen aus der Messung erhaltenen können dann auf graphischem Wege die Verschiebungsbeträge in normaler Richtung abgeleitet werden (*Abstandsbild*). Somit kann die erforderliche Verschiebung der Gleislage an jedem gemessenen Punkt angegeben und in die Natur übertragen werden.

Abb. 2.2: Pfeilhöhe h_i und Tangentenrichtungswinkel τ_i

Aus der Abb. 2.2 kann der Zusammenhang zwischen der gemessenen Pfeilhöhe h_i und dem Tangentenrichtungswinkel τ_i abgeleitet werden:

$$\tau_i = \frac{2}{\Delta s} \cdot \sum_1^i h_i \quad (2.1)$$

mit Δs ... Sehnenlänge.

Man erhält somit nach Glg. (2.1) die auf die Anfangstangente bezogenen Richtungswinkel τ_i durch fortlaufende Addition der gemessenen Pfeilhöhen h_i (Müller 1984 b).

Die graphische Auftragung der Tangentenrichtungswinkel τ_i in Abhängigkeit von der Bogenlänge l liefert das *Winkelbild* der Standlinie (Abb. 2.3). Die Neigung des Winkelbildes ist gleich der Krümmung κ des Gleisbogens.

$$\frac{d\tau}{dl} = \frac{1}{R} = \kappa \quad (2.2)$$

mit R ... Kreisradius.

Aus der Krümmungsgleichung (2.2) folgt, daß das Winkelbild gleichzeitig die *Integralkurve des Krümmungsbildes* (Auftragung der Krümmung κ in Abhängigkeit der Bogenlänge l) ist.

Aus den Messungsdaten wird zunächst das Winkelbild der Standlinie E_0 abgeleitet und graphisch dargestellt. Die Winkelbilddarstellung einer Geraden ist eine Parallele zur Abszissenachse, eines Kreises bei einem Rechtsbogen eine fallende und bei einem Linksbogen eine ansteigende Gerade und für eine Klotoide eine quadratische Parabel. In dieses Winkelbild wird der Entwurf E_1 , der die theoretisch richtige bzw. eine ideale relative Gleislage darstellt, eingetragen (Abb. 2.3). Der Entwurf E_1 wird unter Berücksichtigung folgender Bedingungen eingetragen:

- Die Anfangs- und die Endtangente sollen durch den Entwurf nicht verändert werden.
- Die Abstände bzw. die Verschiebungsbeträge e_i sollen am Bogenende gleich Null sein.
- Der Entwurf soll sich der Standlinie so anschmiegen, daß die Verschiebungen e_i möglichst klein sind.

Diese Festlegungen wurden mehr oder weniger willkürlich getroffen. Sie ergeben eine Gleislage, die sich der bestehenden optimal anschmiegt. Aufgrund der ersten Bedingung hat der Entwurf E_1 den gleichen Richtungswinkel τ_e am Endpunkt wie die Standlinie E_0 . Durch die zweite Festlegung wird ein Ausgleich der zwischen E_0 und E_1 liegenden Flächen erreicht und durch die dritte Bedingung werden diese Flächen minimiert.

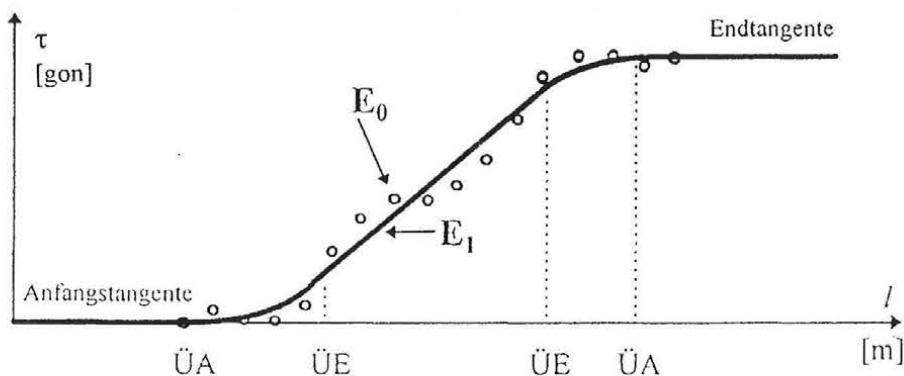


Abb. 2.3: Eintragen des Entwurfes E_1 in das Winkelbild der Standlinie E_0

Die optimale Einpassung des Entwurfes in das Winkelbild der Standlinie wird unter Berücksichtigung der vorhin angeführten Randbedingungen nach Augenmaß vorgenommen. Die Ordinatenunterschiede im Winkelbild zwischen E_0 und E_1 entsprechen den Differenzen der Richtungswinkel an den Meßpunkten. Die Abb. 2.4 zeigt den Zusammenhang zwischen den Verschiebungsbeträgen e_i und den Richtungswinkeldifferenzen $\tau_{i+1} - \tau_i$.

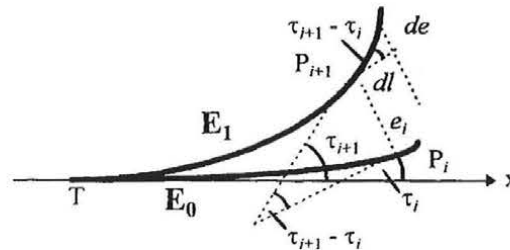


Abb. 2.4: Verschiebungsbeträge e_i und Richtungswinkeldifferenz $\tau_{i+1} - \tau_i$

Unter der Voraussetzung, daß die Richtungswinkeldifferenzen klein sind, ändert sich der Abstand e_i zwischen zwei benachbarten Punkten um das Maß

$$de = e_{i+1} - e_i \approx (\tau_{i+1} - \tau_i) \cdot dl = d\tau \cdot dl. \quad (2.3)$$

Man erhält somit die gesuchten Verschiebungsbeträge e_i durch einfache Integration der Glg. (2.3). Trägt man die Werte in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf, so erhält man das „Evolventenbild“, das man mit guter Näherung als Abstandsbild, bei dem die Größen e_i als Normalabstände definiert werden, ansehen kann. Das *Abstandsbild* ist somit genähert die *Integralkurve zum Winkelbild*. Da die Standlinie jedoch nur in endlichen Abständen erfaßt wurde, kann vom Integral auf die Summation übergegangen werden. Für das Abstandsbild wird daher auch der Begriff „Summenbild“ verwendet. Die Abszissenachse stellt im Abstandsbild den Entwurf E_1 dar. Damit handelt es sich, wenn die Standlinie E_0 über dem Entwurf E_1 liegt, um positive, d.h. nach rechts gerichtete, wenn E_0 unter E_1 liegt, um negative, d.h. nach links gerichtete, Verschiebungen.

Aufgrund der begrenzten Genauigkeit, den Entwurf E_1 in das Winkelbild so einzutragen, daß er allen Anforderungen, die an die abzusteckende Linie gestellt werden müssen, entspricht, werden oft Änderungen notwendig. Diese können ohne Zuhilfenahme des Winkelbildes im Abstandsbild, z.B. mit dem *Parabel- bzw. Sinus-Abstandsbildverfahren*, durchgeführt werden (Müller 1984 b). Bei kleineren Restverschiebungen kann man die obigen Randbedingungen durch die Einführung einer *Bezugslinie* hinreichend genau herbeiführen.

2.1.3 Beurteilung der Richtverfahren

Die *Genauigkeit*, die bei der Aufmessung und Absteckung eines Gleiskörpers mit dem *Nalenz-Höfer-Verfahren* erreicht werden kann, hängt im wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Fehler der Theorie (Winkelbildverfahren ist Näherungsverfahren),
- Standardabweichung der Pfeilhöhenmessung,
- Standardabweichung der Winkelbildbearbeitung,
- Standardabweichung der Absteckung,
- systematisch wirkende Fehler der Pfeilhöhenmessung.

Auf die Lagefehler wirken vor allem die Fehler der Theorie und die systematischen Fehler der Standlinienaufnahme. Die Theorie des Winkelbildverfahrens setzt voraus, daß die Längen der alten und der neuen Gleistrasse etwa gleich groß sind. Der Gesamtlagefehler ist somit im wesentlichen von der Bogenlänge, den Krümmungsverhältnissen und der relativen Lage zwischen Standlinie und Entwurf abhängig. Die Genauigkeit der aus dem Winkelbildverfahren abgeleiteten absoluten Gleislage ist wesentlich geringer als die für die relative Lage. Deshalb wird zur Ableitung absoluter Absteckungselemente niemals das Winkelbildverfahren verwendet. Es kann jedoch eine hervorragende Genauigkeit für die *Krümmung* erzielt werden. Da die Krümmung ein abstrakter Begriff ist, wird in der Literatur meist an ihrer Stelle die *Standardabweichung für die Pfeilhöhenmessung* betrachtet. Den größten Anteil hat in vielen Untersuchungen dabei der Fehler der Absteckung. Läßt man diesen Fehleranteil außer acht, so reduziert sich der Gesamtfehler auf bis zu 2 mm (Großmann, Kahmen 1988; Müller 1984 b; Schramm 1949).

Das Nalenz-Höfer-Verfahren in seiner dargestellten Form wird zweckmäßigerweise nur dort angewandt, wo die geometrischen Kenngrößen des vorhandenen Gleises nicht oder sehr ungenau bekannt sind. Diese werden im Ergebnis einer solchen Bearbeitung von einer Linie gefunden, die sich der bestehenden Gleislage gut anschmiegt. Im Abstandsbild kann aber auch überprüft werden, ob bestimmte Mindestabstände zu Zwangspunkten eingehalten oder eventuell vorgeschriebene Mindestradien nicht unterschritten wurden. Infolge der fortschreitenden Gleiserneuerung sind die geometrischen Kenngrößen der Strecken meist mit genügender Genauigkeit bekannt und damit hat das Winkelbildverfahren in den industriell hochentwickelten Ländern an Bedeutung verloren.

Im Laufe der Zeit wurden noch eine ganze Reihe von Verfahren zur Bearbeitung der relativen Gleislage, die im Prinzip alle auf Pfeilhöhenmessungen beruhen, entwickelt. Zu diesen Verfahren zählt u.a. das *Vierpunktverfahren*, das *Dreipunktverfahren*, das *Zweisehnenverfahren* und das *Wandersehnenverfahren*. Für die Auswertung der Pfeilhöhenmessungen wurden computergerechte Berechnungsverfahren entwickelt, welche das relativ aufwendige graphische Auswerteverfahren ersetzen können (z.B. „digitalisiertes Winkelbildverfahren“; Abendroth, Frey 1986; Schuhr 1987 a). Bei den Österreichischen Bundesbahnen wird derzeit das *Langsehnenverfahren mit rechnergestützter Pfeilhöhenauswertung* eingesetzt. Die Besonderheiten dieses Verfahrens werden ausführlich in Abschnitt 6.1.2 dargestellt. Zur Korrektur der Gleishöhenlage wurden auch spezielle Verfahren entwickelt, wie z.B. das *Differenzhöhenverfahren* zur Festlegung von Gleisgradienten. Für nähere Informationen sei auf die Literatur verwiesen (z.B. Allmann 1989; Hennecke, Müller, Werner 1991; Schramm 1962).

Mit einem Richtverfahren ist man in der Lage, *kurzwellige Gleislagefehler* gut abzubauen, so daß eine hohe Krümmungsgenauigkeit im Nahbereich erzielt wird (Abschnitt 6.2.1). Mit steigender Wellenlänge vermindert sich jedoch der Fehlerabbau. Im Extremfall einer parallelen Gleislage zur Sollage ist der Fehlerabbau gleich Null (Hennecke, Müller, Werner 1991). Bei Fahrgeschwindigkeiten größer 160 km/h haben langwellige Gleislagefehler im Abstandsbereich von 50-100 m negative Auswirkungen auf die Fahrdynamik. Da mit der Zunahme des Punktabstandes nur mehr ein Teil dieser Fehler abgebaut werden kann, kann es zu systematischen Gleisfehlagen kommen. Periodische Fehllagen sind typisch für eine Durcharbeitung mit dem Langsehnenverfahren, da die Nulldurchgänge der fehlerhaften Lage in der Regel sehr stark mit den Quersfeldern der Gleisvermarkung (Abschnitt 6.1.1) korreliert sind (Wübbena 1993).

Die Bearbeitung des Gleiskörpers nach diesen Verfahren erfolgt in der Regel in zwei voneinander unabhängigen und verschiedenartigen Arbeitsschritten. Auch beim Einsatz moderner Oberbaumaschinen wird im ersten Arbeitsgang die relative Gleislage durch Messung von Pfeilhöhen in zwei orthogonalen Richtungen (horizontal und vertikal) bestimmt und nach Berechnung der Korrekturwerte durch Richt- und Stopfmaschinen in seine theoretisch richtige Position gebracht. Die Pfeilhöhen werden hierbei in der Regel nicht normal auf die Sehne sondern tangential auf die Bogenaußenschiene eingemessen. Die absolute Gleislage wird nur in bestimmten Abständen und bei Zwangspunkten des Trassenverlaufes überprüft (Abschnitt 6.1.2). Vielfach ist ein automatischer Datenfluß zwischen Aufnahme und Absteckung nicht realisiert und die erforderlichen Verschiebungen werden nach wie vor auf den Schienen angeschrieben und manuell in die Gleisbaumaschine eingegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsabläufe sind diese Verfahren zur Gleiskorrektur keine homogenen Meßsysteme und daher auch wirtschaftlich gesehen im Vergleich zu modernen Methoden unterlegen. Da der Meßaufwand relativ hoch ist, lassen sich beim Langsehnenverfahren betrieblichen Sperrpausen nicht vermeiden (Siems 1993), insbesondere wenn die Ist-Gleislage mit maschinellen Verfahren erfaßt werden soll.

2.2 Kombinierte absolute und relative Verfahren zur Bestimmung der Gleis-Istlage

Die Nachteile der herkömmlichen Gleisaufnahme führten zur Entwicklung eines modernen Verfahrens für Deformationsmessungen an Gleisen und die Absteckung von Eisenbahntrassen. Insbesondere bei modernen Verlegeverfahren muß in kurzer Zeit die Geometrie langer Schienenstränge sehr genau überprüft werden. Aufgrund moderner geodätischer Meßsysteme lassen sich Arbeitsprozesse immer wieder umgestalten, um einen höheren Grad an Automation zu erreichen. Sie ermöglichen die Kombination der absoluten und relativen Gleisaufnahme in nur einem Arbeitsablauf. Im Gegensatz zur Pfeilhöhenmessung erfolgt auch keine Trennung in Lage- und Höhenaufnahme, sondern die vorhandene Isttrasse wird dreidimensional aufgenommen. Die Ist- und Sollage der Gleise können so im 3D-Raum verglichen werden und aus dem Vergleich gewinnt man schließlich absolute Korrekturwerte. Mit der Entwicklung dieses neuen Meßkonzepts beschäftigt sich ausführlich das Kapitel 5, hier soll zunächst auf das Prinzip des „Kombinierten Verfahrens“ zur Bestimmung der Gleis-Istlage eingegangen werden.

2.2.1 Prinzip des kombinierten Verfahrens

Aufgrund von Überhöhungen kann ein Gleis nicht nur durch den Verlauf der Gleisachse beschrieben werden, sondern jedem Punkt der Gleisachse muß ein Wert der Querneigung zugeordnet werden. Die Beschreibung des Gleises erfolgt somit nicht alleine durch eine Kurve im Raum sondern durch einen „Streifen“ (Heindl 1993). Beim Kombinierten Aufnahmeverfahren wird dieser Streifen erfaßt. Die Aufmessung erfolgt geodätisch in Verbindung mit elektronischen Meßwertgebern. Mit einer dreidimensionalen Positionierungseinheit wird der Trassenverlauf in Form einer Raumkurve approximiert und zusätzlich mit einer elektronischen Libelle bzw. einem Neigungsgeber die Stellung des Gleiskörpers im Raum und damit die Überhöhung der Schienen bestimmt. Durch die Raumkurve und die Neigung wird eine Fläche im Raum festgelegt. Die Begrenzung dieser Verwindungsfläche liefert ein elektronischer Abstandsgeber, der die Spurweite des Gleises mißt.

Geometrisch betrachtet ist dieses Verwindungsband eine *Regelfläche*. Eine Regelfläche wird meist durch drei Leitkurven festgelegt, wobei jede Erzeugende der Fläche die drei Leitkurven trifft. Kegel und Zylinder sind spezielle Regelflächen, bei denen die Angabe einer Leitkurve genügt, wenn man die Spitze bzw. die Richtung der Erzeugenden kennt. Der Streifen ist durch zwei Raumkurven begrenzt, die Bogenaußen- bzw. Bogeninnenschiene. Die dritte Leitkurve kann geradlinig angenommen werden, nämlich die Verbindungsgerade der beiden Schienen. Da längs einer Erzeugenden dieselbe Tangentialebene die Fläche berührt, bezeichnet man diese Fläche auch als torsale Regelfläche (Brauner, Kicking 1977).

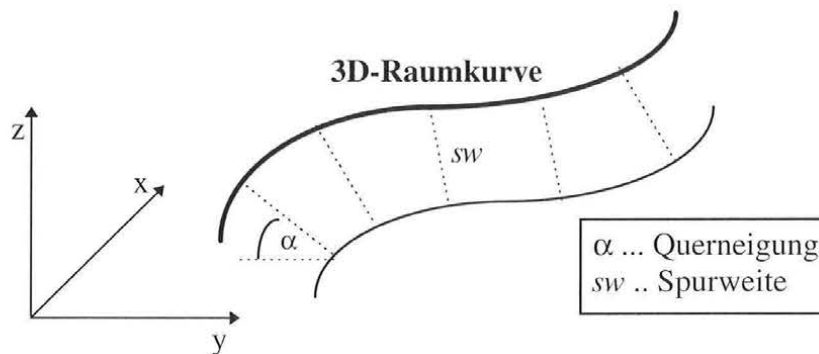


Abb. 2.5: 3D-Bestimmung des Gleiskörpers

In Abb. 2.5 ist das Prinzip der räumlichen Erfassung des Gleiskörpers schematisch dargestellt. Die Bestimmung des Streifens kann beispielsweise mit einem Fahrgestell, welches entlang der Eisenbahntrasse bewegt wird, erfolgen (Abschnitt 5.1). Auf dem Fahrgestell befindet sich die Komponente einer Positionierungseinheit und Sensoren für die Messung der Querneigung α und des Schienenabstandes sw (Spurweite) als Bestandteile eines Multisensorsystems.

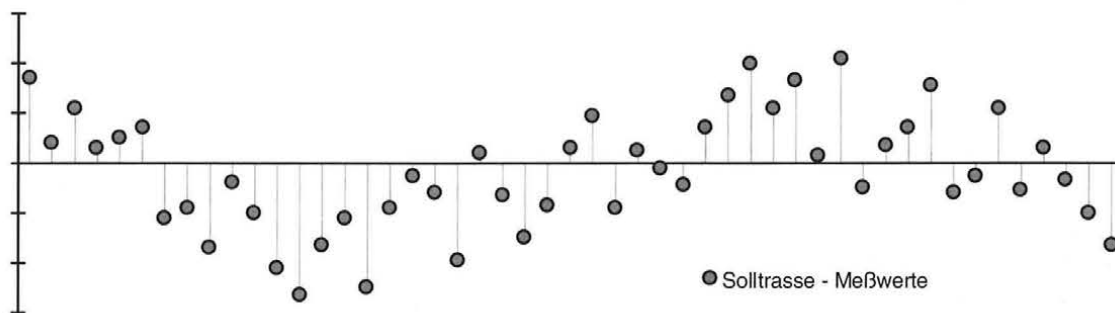
2.2.2 3D-Bestimmung des Trassenverlaufes

Eine Begrenzungslinie des Gleisstreifens wird durch polare Aufnahme dreidimensional in einem kartesischen Koordinatensystem absolut festgelegt. Die Grundlage dafür bildet ein Festpunktfeld längs der Eisenbahntrasse (Abschnitt 6.1.1). In diesem Bezugsrahmen kann die 3D-Bestimmung der Raumkurve sowohl mit klassischen tachymetrischen Meßverfahren als auch mit dem satellitengestützten Positionierungsverfahren GPS erfolgen.

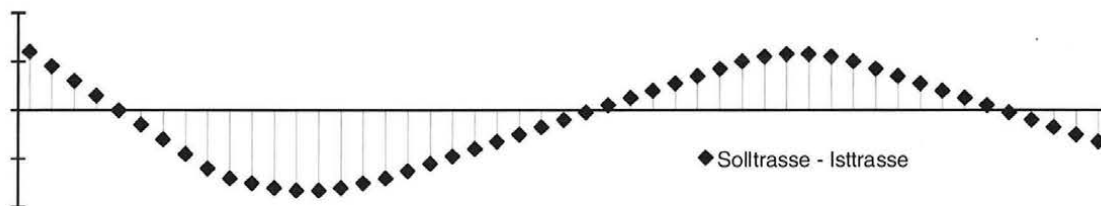
Elektronische Tachymeter und GPS Totalstationen sind heutzutage gleichwertige Meßsysteme. Unter einer GPS Totalstation sei ein Meßsystem verstanden, das aus zwei GPS-Empfängern (Referenz- und Rover-Station) und einer Telemetrieverbinding besteht und in Echtzeit durch direkte Auswertung aller Meßdaten im Felde die Koordinaten der bewegten Station liefert (*Real Time Kinematic GPS* bzw. *Echtzeitvermessung mit GPS*, Abschnitt 5.2.2). Trotz der Verschiedenartigkeit der Verfahren - vor allem der Auswertung - können die Systeme mit gleicher Meßstrategie eingesetzt werden. Beide liefern dreidimensionale Koordinatendifferenzen bezogen auf einen Gerätestandort bzw. eine Referenzstation, d.h. der Raumvektor zwischen den Stationen wird bestimmt. Die Messungen können gleichartig im System der trassennahen Festpunkte eingebunden bzw. orientiert werden. Eine Komponente des Polarmeßsystems wird im übergeordneten Festpunktfeld frei stationiert oder befindet sich auf einem bekannten Punkt, mit der zweiten Komponente wird die Gleislage polar aufgenommen. Der ausschließliche Ein-

Meßwertreihe läßt sich auch eine Trasse einrechnen, die sich aus den üblichen Trassierungselementen, wie Geraden, Übergangs- und Kreisbögen, zusammensetzt. Diese Trasse wird in der Abb. 3.1 als *Solltrasse* bezeichnet. Die Solltrasse weicht in der Regel absolut von der *projektierten Gleistrasse* ab.

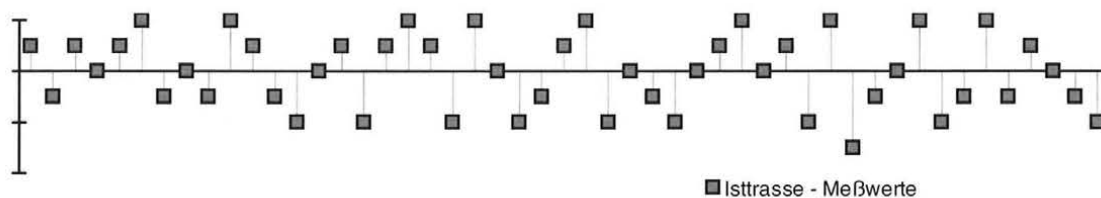
Ziel einer Gleiskorrektur ist die Bestimmung der Differenzen zwischen der Solltrasse und der in der Natur vorhandenen Isttrasse. Die Solltrasse muß einen harmonischen Krümmungsverlauf aufweisen und absolut in einem vorgegebenen Korridor liegen, d.h. sie darf nur innerhalb dieses Bereiches von der projektierten Trasse abweichen. Es ist jedoch nicht erforderlich, die projektierte Gleistrasse direkt in der Natur zu übertragen. Die Breite des Korridors hängt im wesentlichen vom Typus der Eisenbahnstrecke (Hochgeschwindigkeitsstrecke bzw. Nebenbahn) ab. Die Verschiebungen für die Gleiskorrektur erhält man durch Berechnung der Lotabstände von der Ist- zur Sollage (vgl. Abb. 2.1, Abschnitt 2.1.1).



a) Differenz von Solltrasse und Meßwertreihe: *Signal* und *Noise*



b) Differenz von Soll- und Isttrasse: *Signal*



c) Differenz von Isttrasse und Meßwertreihe: *Noise*

Abb. 3.2: Abweichungen zwischen den Trassen

In Abb. 3.2 sind die Differenzen zwischen der Soll- bzw. Isttrasse und der Meßwertreihe dargestellt. Die Solltrasse erfaßt den systematischen Anteil der Meßwertreihe. Die gemessenen Werte setzen sich neben diesem funktional beschreibbaren, regelmäßig-systematischen Anteil noch aus einem gegenseitig abhängigen, unregelmäßig-systematischen Anteil, dem *Signal*, und den zufälligen Fehlern, dem *Noise* bzw. *Rauschen*, zusammen. Reduziert man die Meßwertreihe

he um die Solltrasse, so erhält man eine Folge von Werten, die aus einem näherungsweise periodischen Signal besteht, das mit zufälligen Schwankungen überlagert ist (Abb. 3.2 a). Das Signal ergibt sich aus der Differenz zwischen Soll- und Isttrasse (Abb. 3.2 b). Die überlagerten Störeinflüsse, die das Meßrauschen und andere zufällige Anteile wie beispielsweise Unebenheiten der Schienen beinhalten, sind in Abb. 3.2 c dargestellt. Sie ergeben sich aus der Differenz zwischen Isttrasse und Meßwertreihe. Die Istlage der Gleise läßt sich somit durch eine Trendfunktion beschreiben, der additiv ein näherungsweise periodisches Signal und Rauschen überlagert ist.

Zur genaueren Analyse einer Zeitreihe wird häufig ein Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich vorgenommen (Engelbrecht 1987; Mecklenbräuker 1990; Meier, Keller 1990; Koch, Schmidt 1994; Schlittgen, Streitberg 1994; Taubenheim 1969). Eine Reihe von Eigenschaften sind im Frequenzbereich wesentlich leichter zu erkennen als an der Meßwertreihe selbst. Die spektrale Betrachtungsweise hat beispielsweise den Vorteil, daß eventuell vorhandene Periodizitäten aufgedeckt werden können. Im Gegensatz zur Theorie der Zeitreihenanalyse betrachten wir hier Meßreihen in Abhängigkeit eines von der Zeit unabhängigen Parameters k . Dieser Parameter k kann z.B. die laufende Bogenlänge l sein (Abschnitt 3.2.4).

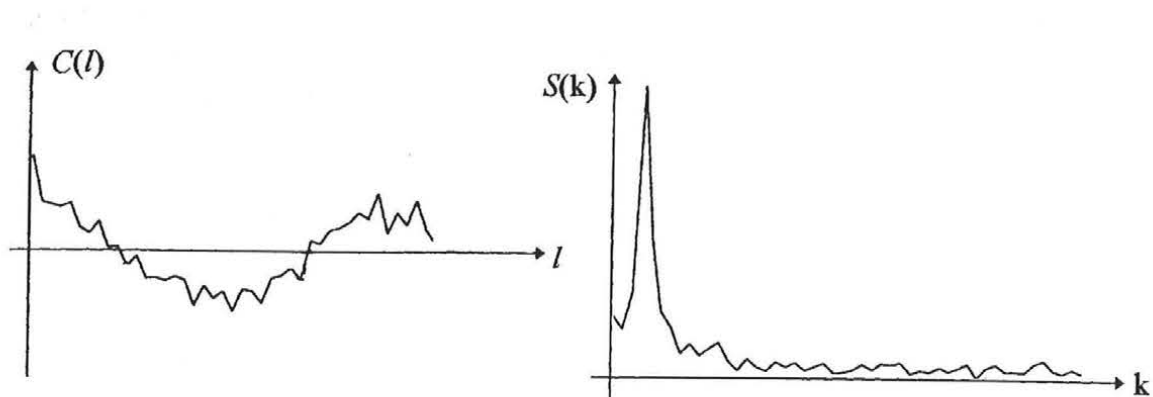
Die Darstellung im Spektralbereich erhält man nach dem Wiener-Chintschin-Theorem durch eine Fouriertransformation der Autokovarianzfunktion $C(l)$. Für jeden stationären Gauß'schen Zufallsprozeß mit kontinuierlichem Spektrum existiert die Fouriertransformierte der Autokovarianzfunktion. Diese Funktion stellt das *Leistungsspektrum* $S(k)$ des Zufallsprozesses dar. Der Parameter k beschreibt die Wellenzahl und ist gleich dem Kehrwert der Wellenlänge λ (Hatton, Worthington, Makin 1994; Abschnitt 4.1.1). Das Leistungsspektrum $S(k)$ des weißen Rauschens nimmt im gesamten Spektralbereich einen konstanten Wert an. Die Autokovarianzfunktion dieses Zufallsprozesses ist eine Dirac'sche Deltafunktion $\delta_{k,l}$ (Abschnitt 3.2.2).

Die Abb. 3.3 zeigt die Autokovarianzfunktionen $C(l)$ und Leistungsspektren $S(k)$ für die in Abb. 3.2 dargestellten Differenzen zwischen der Soll- bzw. Isttrasse und der Meßwertreihe. Das Spektrum wurde durch numerische Fouriertransformation aus der empirischen Autokovarianzfunktion des Prozesses bestimmt. Die Autokovarianzfunktion des näherungsweise periodischen Signalanteils hat die Form einer gedämpften Cosinusschwingung und das zugehörige Leistungsspektrum zeigt ein eindeutiges Maximum an Energiedichte (Spitze bzw. „peak“ in Abb. 3.3 b) und fällt steil sowohl nach kleinen als auch großen Wellenzahlen k ab. Hingegen weist das Rauschen ein breites Leistungsspektrum auf, dessen Intensität wesentlich kleiner ist. Die zugehörige Autokovarianzfunktion fällt steil ab und ist sehr unregelmäßig (Abb. 3.3 c). Ein aus beiden Anteilen zusammengesetztes Spektrum erhält man für das näherungsweise periodische Signal mit stochastischen Überlagerungen (Abb. 3.3 a).

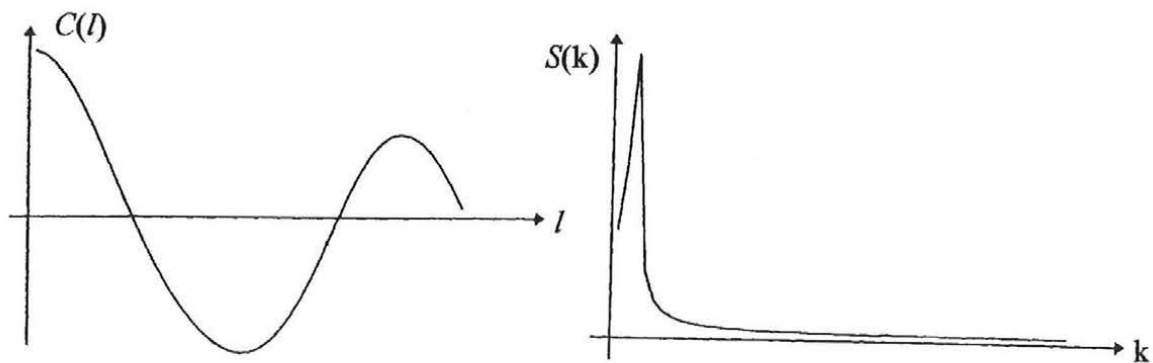
Reale dreidimensionale Meßserien werden noch genauer mit Hilfe der spektralen Betrachtungsweise im Abschnitt 4.1 analysiert.

Ziel ist die Abtrennung des Rauschens vom Signalanteil. Das Signal ist um so leichter und zuverlässiger zu bestimmen, je günstiger das Signal-Rauschverhältnis ist, d.h. je stärker seine Leistung gegenüber der Leistung des Rauschens dominiert. Meß- und Störsignale können in sich überlappenden oder in voneinander getrennten Spektralbereichen vorkommen. Im zweiten Fall setzt man *Hoch-, Tief- und Bandpaßfilter* ein, um die beiden Anteile voneinander zu trennen. Liegen aber die Stör- und Nutzsignale im gleichen Frequenzbereich, so kann man den Zufallsprozeß und die Signale durch *Schätz- bzw. Optimalfilter* analysieren. Bei der Anwen-

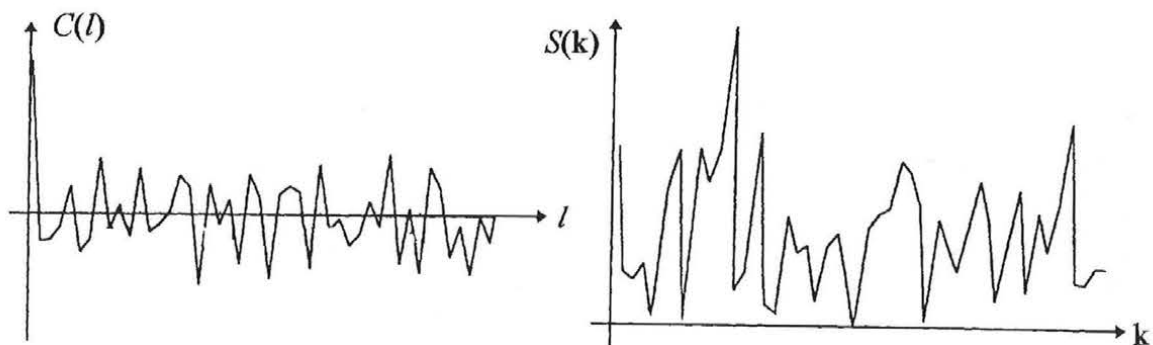
derung von linearen optimalen Filter- und Glättungsverfahren wird vorausgesetzt, daß sich das zu untersuchende Problem in der Form eines linearen dynamischen Systems mit weißem Rauschen als Eingang darstellen läßt.



a) Differenz von Solltrasse und Meßwertreihe: *Signal* und *Noise*



b) Differenz von Soll- und Isttrasse: *Signal*



c) Differenz von Isttrasse und Meßwertreihe: *Noise*

Abb. 3.3: Autokovarianzfunktionen $C(l)$ und Leistungsspektren $S(k)$

3.2 Modellierung mit dem diskreten Kalman-Filter

Der Kalman-Filter ist ein rekursiver Schätzalgorithmus nach der Methode der kleinsten Quadrate und kann deshalb für on-line Auswertungen optimal eingesetzt werden. Die Bezeichnung „Filter“ mag zunächst für ein mathematisches Verfahren befremdend erscheinen. Genau genommen versteht man unter der *Filterung* neben der Unterdrückung von Störungen die Zu-

standsschätzung bei Meßwerten bis zur Gegenwart, d.h. aller bereits vorliegenden Messungen. Sollen jedoch Schätzungen zukünftiger Zustände vorgenommen werden, dann spricht man von *Prädiktion*. Auch die Schätzung von gegenüber dem letzten Meßwert zurückliegenden Zustandswerten kann von Interesse sein. Diese wird als *Glättung* bezeichnet. Außer den Beobachtungen werden beim Kalman-Filter a priori Kenntnisse über das dynamische Verhalten des behandelten Systems sowie statistische Kenngrößen des System- und Meßrauschens einbezogen. Er verbindet die Prädiktion eines Zustandsvektors mit den diskreten Beobachtungen über eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen.

3.2.1 Grundgleichungen der Kalman-Filterung

Man unterscheidet zwischen dem kontinuierlichen und dem diskreten Kalman-Filter. Da hier die Meßwerte an diskreten Punkten vorliegen, wird eine diskrete Formulierung vorgenommen. Eine ausführliche mathematische Ableitung der Grundgleichungen findet man z.B. in (Brammer, Siffing 1975; Engelbrecht 1987; Ruymgaart, Soong 1985; Schrick 1977).

Der Kalman-Filter dient der optimalen Schätzung des Zustandes dynamischer Systeme. Das dynamische Verhalten des betrachteten Systems wird in der Regel durch Differentialgleichungen n -ter Ordnung beschrieben. Die Ordnung der Differentialgleichung hängt von der Komplexität des zu beschreibenden dynamischen Verhaltens ab. In der Praxis werden vorwiegend lineare vektorielle Differentialgleichungen erster Ordnung eingesetzt:

$$\dot{\underline{x}}(k) = \underline{F}(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{z}(k) \quad (3.1)$$

mit $\underline{x}(k)$... Zustandsvektor,
 $\dot{\underline{x}}(k)$... erste Ableitung des Zustandsvektors,
 $\underline{F}(k)$... System- oder Dynamikmatrix,
 $\underline{z}(k)$... Störvektor.

Die Modellierung des dynamischen Systems gelingt in der Regel nicht fehlerfrei. Abweichungen vom Systemmodell werden durch den in Glg. (3.1) enthaltenen Störvektor $\underline{z}(k)$ beschrieben.

Mit Hilfe des Kalman-Filters können nun die Lösungen dieser Differentialgleichung optimal geschätzt werden. Betrachtet man ein lineares System in diskreten Intervallen k , so erhält man Glg. (3.2) für das Systemmodell:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{T} \cdot \underline{x}(k) + \underline{w}(k) \quad (3.2)$$

mit $\underline{T}$... Transitionsmatrix,
 $\underline{w}(k)$... Vektor des Systemrauschens.

Die *Systemgleichung* (3.2) gibt die rekursive Beziehung zwischen den Zustandsvektoren $\underline{x}(k)$ und $\underline{x}(k+1)$ an. Die Transitionsmatrix $\underline{T}$ enthält die physikalischen Gesetze des dynamischen Vorgangs. Der stochastische Vektor $\underline{w}(k)$ beschreibt die Modellfehler. Er bestimmt somit die Genauigkeit der Prädiktion. Bei einem großen Systemrauschen wird die Prädiktion des Zustandsvektors bald zu ungenau sein. Durch die Hinzunahme von Beobachtungen kann eine

Aufdatierung erfolgen. Glg. (3.3) beschreibt ein lineares Modell für die Beobachtungen (*Meßgleichung*):

$$\underline{l}(k) = \underline{A}(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{\varepsilon}(k) \quad (3.3)$$

mit $\underline{l}(k)$... Beobachtungsvektor,
 $\underline{A}(k)$... Designmatrix,
 $\underline{\varepsilon}(k)$... Vektor des Meßrauschens.

In einem Kalman-Filter werden die System- und die Meßgleichung (3.2) und (3.3) miteinander kombiniert. In den Filtergleichungen werden die momentanen Meßwerte $\underline{l}(k)$ mit den entsprechenden prädizierten $\underline{A}(k) \cdot \underline{x}(k)$ verglichen und es wird unter Berücksichtigung der Kovarianzmatrizen des Meß-, Systemrauschens und des geschätzten Zustandsvektors durch Minimierung der Fehlervarianz ein optimaler Schätzwert für den Zustandsvektor ermittelt. Hierbei wird angenommen, daß zwischen den System- und den Meßfehlern keine Korrelationen vorliegen.

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Gruppen von Filtergleichungen:

1. Prädiktionsgleichungen:

Ausgehend von einem Anfangszustand erfolgt eine Vorhersage (*Prädiktion*) eines neuen Zustandsvektors mit seiner zugehörigen Kovarianzmatrix.

$$\underline{x}(k+1) = \underline{T} \cdot \underline{x}(k) \quad (3.4)$$

$$\underline{\Sigma}_{xx}(k+1) = \underline{T} \cdot \underline{\Sigma}_{xx}(k) \cdot \underline{T}^T + \underline{\Sigma}_{ww}(k+1, k) \quad (3.5)$$

mit $\underline{\Sigma}_{xx}$... Kovarianzmatrix des Zustandsvektors,
 $\underline{\Sigma}_{ww}$... Kovarianzmatrix des Systemrauschens.

2. Gleichungen für die Korrektur des Prädiktionswertes (Aufdatierung):

Mit neuen Meßwerten erfolgt eine Verbesserung bzw. Aufdatierung des prädizierten Zustandsvektors und seiner Kovarianzmatrix.

$$\underline{x}'(k+1) = \underline{x}(k+1) + \underline{K}(k+1) \cdot [\underline{l}(k+1) - \underline{A} \cdot \underline{x}(k+1)] \quad (3.6)$$

$$\underline{K}(k+1) = \underline{\Sigma}_{xx}(k+1) \cdot \underline{A}^T \cdot [\underline{\Sigma}_{ll}(k+1) + \underline{A} \cdot \underline{\Sigma}_{xx}(k+1) \cdot \underline{A}^T]^{-1} \quad (3.7)$$

$$\underline{\Sigma}'_{xx}(k+1) = \underline{\Sigma}_{xx}(k+1) - \underline{K}(k+1) \cdot \underline{A}(k+1) \cdot \underline{\Sigma}_{xx}(k+1) \quad (3.8)$$

mit $\underline{x}'(k+1)$... aufdatierter (verbesserter) Zustandsvektor,
 $\underline{K}$... Gain-Matrix (Verstärkungsmatrix),
 $\underline{\Sigma}_{ll}$... Kovarianzmatrix des Meßrauschens,
 $\underline{\Sigma}'_{xx}$... Kovarianzmatrix des korrigierten, neuen Zustandsvektors.

Der Berechnung der unbekannten Größen der Kalman-Filterung kann in folgenden Schritten vorgenommen werden:

- Prädiktion des Zustandsvektors $\underline{x}(k+1)$ und seiner Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{xx}(k+1)$ mit den Glg. (3.4) und (3.5),
- Berechnung der Gain-Matrix $\underline{K}(k+1)$ nach Glg. (3.7),
- Verbesserung des Zustandsvektors (Aufdatierung) $\underline{x}'(k+1)$ nach Glg. (3.6),
- Berechnung der Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}'_{xx}(k+1)$ des korrigierten, neuen Schätzwertes für den Zustandsvektor mit Glg. (3.8).

Die Prädiktionsgleichungen werden dann genutzt, wenn keine Meßwerte zur Verfügung stehen. Wenn Meßwerte vorliegen, kann der prädizierte Zustandsvektor mit den Gleichungen (3.6) bis (3.8) verbessert werden. Der Einfluß der Messungen auf die Korrektur des Zustandsvektors hängt von der *Kalman-Gain-Matrix* $\underline{K}$ ab. Diese Matrix wird nach Glg. (3.7) aus den Kovarianzmatrizen des Meß-, Systemrauschens und des geschätzten Zustandsvektors berechnet. Durch entsprechende Abschätzung dieser Kovarianzmatrizen kann das Gewicht der Meßwerte bzw. des vorgegebenen Systemmodells festgelegt werden (Abschnitt 3.2.2). Die Differenz zwischen dem wirklichen und dem prädizierten Meßwert $\underline{l}(k+1) - \underline{A} \cdot \underline{x}(k+1)$ wird auch als *Innovation* (Erneuerung) bezeichnet.

Die sog. *Varianzgleichungen* (Glg. (3.5), (3.7) und (3.8)) sind unabhängig von den aktuellen Beobachtungen $\underline{l}(k)$ und den Schätzungen $\underline{x}'(k)$. Wenn die Matrizen vorliegen, kann dieser Teil zeitlich vor den eigentlichen *Filtergleichungen* (Glg. (3.4) und (3.6)) ausgewertet werden.

3.2.2 Abschätzung der Kovarianzmatrizen des Meß-, Systemrauschens und des geschätzten Zustandsvektors

Die Kovarianzmatrizen des Meß-, Systemrauschens und des geschätzten Zustandsvektors müssen a priori abgeschätzt werden. Wie in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, kann durch geeignete Festlegung dieser Matrizen der Einfluß eines neuen Meßwertes auf den neuen Zustand bzw. das Gewicht der Prädiktion definiert werden. Dadurch wird die Größe der Verstärkungsmatrix $\underline{K}$ bestimmt. Ergibt sich eine kleine Gain-Matrix, so erfolgt die Schätzung des Zustandsvektors in erster Linie aus der Prädiktion. Im Extremfall wird die Innovation nicht mehr berücksichtigt. Dieser Fall tritt ein, wenn entweder das Meßrauschen sehr groß ist oder wenn das Systemrauschen sehr klein oder gar Null ist. Ergibt sich dagegen eine große Verstärkungsmatrix $\underline{K}$, so wird die Innovation in voller Größe berücksichtigt. Der aufdatierte Zustandsvektor würde im Extremfall nur von den Beobachtungen bestimmt, d.h. es findet keine Filterung mehr statt. Hierbei ist entweder das Meßrauschen sehr klein oder das Systemrauschen wurde sehr groß angenommen. Dadurch sieht man, daß die Filterqualität nicht nur von der richtigen Beschreibung der deterministischen Zusammenhänge, sondern auch von der richtigen Festlegung des System- und Meßrauschens samt ihrer Kovarianzmatrizen abhängt.

Für die Kalman-Filterung sind in der System- und Meßgleichung nur *weiße Rauschprozesse* mit dem Erwartungswert 0 zugelassen. Unter weißem Rauschen versteht man unregelmäßige zufällige Fluktuationen, d.h. es sind in einem Zufallsprozeß nur zufällige und keine systematischen Fehleranteile enthalten. Das Leistungsspektrum ist für alle Frequenzen gleich groß. Weißes Rauschen entspricht im Frequenzbereich einer konstanten Leistungsdichte über eine unendliche Bandbreite. Für die Entscheidung, ob die Rauschprozesse als „weiß“ angenommen werden können, sind diese in Relation zum eigentlichen System zu sehen. Wenn nun das Leistungsspektrum der vorherrschenden Rauschprozesse innerhalb einer Systembandgrenze hinreichend konstant ist, kann näherungsweise weißes Rauschen angenommen werden. Nachdem

sichergestellt ist, daß im betrachteten Zufallsprozeß weißes Rauschen vorherrscht, können die Kovarianzmatrizen abgeschätzt werden.

Der Meßfehlervektor $\underline{\varepsilon}(k)$ beinhaltet nur die zufälligen Meßunsicherheiten, die durch a priori Varianzen modelliert werden. Die *Kovarianzmatrix des Meßrauschens* $\underline{\Sigma}_{ll}$ ist in der Regel eine Diagonalmatrix, da die physikalischen Korrelationen zwischen den Beobachtungen vernachlässigt werden.

Komplexer gestaltet sich im allgemeinen die analytische Aufstellung der diskreten *System- rauschmatrix* $\underline{\Sigma}_{ww}$. Der Vektor des Systemrauschens $\underline{w}(k)$ in Glg. (3.2) hat folgende Form:

$$\underline{w}(k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \underline{T}(t_{k+1}, \tau) \cdot \underline{D}(\tau) \cdot \underline{w}'(\tau) d\tau = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \underline{T}(t_{k+1}, \tau) \cdot \underline{v}(\tau) d\tau \quad (3.9)$$

mit einem Erwartungswert von

$$E\{\underline{w}(k) \underline{w}^T(l)\} = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \int_{t_l}^{t_{l+1}} \underline{T}(t_{k+1}, \tau) \cdot E\{\underline{v}(\tau) \underline{v}^T(\sigma)\} \cdot \underline{T}^T(t_{k+1}, \sigma) d\sigma d\tau. \quad (3.10)$$

Der Parameter $\underline{w}'(\tau)$ in Glg. (3.9) enthält die Störungen, die das Systemmodell beeinflussen. Ihre Auswirkungen auf den Systemzustand werden durch das Produkt $\underline{D}(\tau) \cdot \underline{w}'(\tau) = \underline{v}(\tau)$ beschrieben. Mit der Transitionsmatrix $\underline{T}$ erfolgt eine Extrapolation für die folgende Epoche t_{k+1} . Durch die Integration erhält man den Gesamteinfluß aller kontinuierlich auftretenden Störeinflüsse im Intervall $[t_k, t_{k+1}]$.

Zwischen dem Erwartungswert $E\{\underline{w}(k) \underline{w}^T(l)\}$ und der Kovarianzmatrix des Systemrauschens $\underline{\Sigma}_{ww}$ besteht folgender Zusammenhang:

$$E\{\underline{w}(k) \underline{w}^T(l)\} = \underline{\Sigma}_{ww}(k) \cdot \delta_{k,l} \quad (3.11)$$

mit der Dirac'schen Deltafunktion

$$\begin{aligned} \delta_{k,l} &= 1 \text{ für } k = l, \\ \delta_{k,l} &= 0 \text{ für } k \neq l. \end{aligned}$$

Für den Fall $k = l$ erhält man für die Kovarianzmatrix des Systemrauschens $\underline{\Sigma}_{ww}$ folgende Integralbeziehung:

$$\underline{\Sigma}_{ww}(k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \underline{T}(t_{k+1}, \tau) \cdot E\{\underline{v}(\tau) \underline{v}^T(\tau)\} \cdot \underline{T}^T(t_{k+1}, \sigma) d\tau \quad (3.12)$$

mit

$$E\{\underline{v}(\tau) \underline{v}^T(\tau)\} = \underline{D} \cdot E\{\underline{w}'(\tau) \underline{w}'^T(\tau)\} \cdot \underline{D}^T. \quad (3.13)$$

Wenn man für alle Parameter des Zustandsvektors ein Systemrauschen zuläßt, wird die Matrix $\underline{D}$ zur Einheitsmatrix $\underline{E}$. Wird zusätzlich die Annahme getroffen, daß die Standardabweichun-

gen σ_w für alle Parameter des Zustandsvektors konstant ist, so erhält man für den Erwartungswert

$$E\{\underline{v}(\tau)\underline{v}^T(\tau)\} = \sigma_w^2 \cdot \underline{E}. \quad (3.14)$$

Daraus folgt

$$\underline{\Sigma}_{ww}(k) = \sigma_w^2 \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} \underline{T}(t_{k+1}, \tau) \cdot \underline{T}^T(t_{k+1}, \sigma) d\tau. \quad (3.15)$$

Häufig läßt man jedoch im Systemrauschvektor nur eine Unsicherheit der jeweils höchsten Ableitung der Koordinaten zu. In diesem Fall nimmt die Matrix $\underline{D}$ in Glg. (3.13) eine spezielle Form in Abhängigkeit von der Ordnung des Kalman-Filters (Abschnitt 3.2.3) an. Sie ist dann nicht gleich der Einheitsmatrix $\underline{E}$.

Die Kovarianzmatrix des geschätzten Zustandsvektors $\underline{\Sigma}_{xx}$ kann entweder auch abgeschätzt oder nach erfolgter Aufstellung der Systemrauschmatrix mit Glg. (3.5) berechnet werden. Als Ausgangswert für $\underline{\Sigma}_{xx}(k)$ bei Beginn der Filterung kann die Einheitsmatrix $\underline{E}$ verwendet werden.

3.2.3 Festlegung der Systemordnung und der Standardabweichung des Systemrauschens

Die geeignete Wahl der Transitionsmatrix $\underline{T}$ in der Systemgleichung (Glg. (3.2)) bzw. der damit verbundenen Ordnung des Systems und der Standardabweichung des Systemrauschens hängt von verschiedenen Faktoren ab. Diese werden nachfolgend diskutiert.

Der Übergang vom Systemzustand $\underline{x}(k)$ nach $\underline{x}(k+1)$ wird nach Glg. (3.5) unter Vernachlässigung des Systemrauschens $\underline{w}(k)$ mit Hilfe der Transitionsmatrix $\underline{T}$ vorgenommen. Diese kann numerisch nach dem *Verfahren des abgebrochen Reihenansatzes* abgeschätzt werden (Schrick 1977). Allgemein erhält man für $\underline{T}$

$$\underline{T}(t_{k+1}, t_k) = \begin{pmatrix} \underline{E} & \frac{1}{1!} \cdot \Delta t \cdot \underline{E} & \frac{1}{2!} \cdot \Delta t^2 \cdot \underline{E} & \dots & \frac{1}{n!} \cdot \Delta t^n \cdot \underline{E} \\ \underline{0} & \underline{E} & \frac{1}{1!} \cdot \Delta t \cdot \underline{E} & \dots & \frac{1}{(n-1)!} \cdot \Delta t^{n-1} \cdot \underline{E} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{E} & \dots & \frac{1}{(n-2)!} \cdot \Delta t^{n-2} \cdot \underline{E} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} & \dots & \underline{E} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

mit $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Die Anzahl der Zeilen und Spalten von $\underline{T}$ entspricht der Systemordnung n des Modells. Je nach dem zu beschreibenden dynamischen Vorgang enthält der Zustandsvektor $\underline{x}(k)$ neben der Zustandsvariablen noch $n-1$ höhere Ableitungen. Die Zustandsvariable kann ihrerseits ein Vektor sein, z.B. kann sie bei der Modellierung von Bewegungsvorgängen die Veränderung der Position der Objektpunkte in Abhängigkeit von der Zeit in einem dreidimensionalen Koordinatensystem beschreiben (Kahmen, Palte 1993). Läßt man keine Ableitungen zu, so spricht man vom *Systemmodell 1. Ordnung*. Die Transitionsmatrix $\underline{T}$ ist gleich die Einheitsmatrix $\underline{E}$. Wird die erste Ableitung des Zustandsvektors in das Modell aufgenommen, so erhält man das *Systemmodell 2. Ordnung*. Die ersten Ableitungen - die Geschwindigkeiten - werden in diesem

Fall als konstant angenommen. Beim *Systemmodell 3. Ordnung* werden die ersten und die zweiten Ableitungen berücksichtigt und die Transitionsmatrix $\underline{T}$ nimmt die Form in Glg. (3.17) an:

$$\underline{T}(t_{k+1}, t_k) = \begin{pmatrix} \underline{E} & \Delta t \cdot \underline{E} & \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \underline{E} \\ \underline{0} & \underline{E} & \Delta t \cdot \underline{E} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{E} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

In diesem Modell sind die zweiten Ableitungen, d.h. die Beschleunigungen, konstant. Für die Einbeziehung höherer Ableitungen in das Zustandsmodell reicht in der Regel die Anzahl der Beobachtungen nicht mehr aus.

Die geeignete *Wahl der Systemordnung* hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Folgende Punkte sprechen gegen eine Wahl einer größeren Systemordnung:

- Je höher die Systemordnung ist, desto länger dauert das Einschwingverhalten des Filters.
- Mit steigender Ordnung nimmt der Grad der Glättung der Meßwerte ab, demgegenüber steigt aber die Sensibilität des Filters.
- Systemvariable höherer Ordnung bzw. Ableitung lassen sich nicht mehr ausreichend genau präzisieren.
- Der Speicherplatz nimmt linear mit der Systemordnung zu.

Beim Vorliegen weniger Meßwerte ist daher die Wahl einer hohen Systemordnung nicht zu empfehlen.

Wählt man ein Systemmodell 3. Ordnung und läßt man für alle Parameter des Zustandsvektors ein Systemrauschen zu, erhält man nach Glg. (3.15) durch Integration mit den Integrationsgrenzen $t_k = 0$ und $t_{k+1} = \Delta t$ konkret folgende Systemrauschmatrix

$$\underline{\Sigma}_{ww}(k) = \sigma_w^2 \cdot \begin{pmatrix} \Delta t + \frac{\Delta t^3}{3} + \frac{\Delta t^5}{20} & \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^2}{2} + \frac{\Delta t^4}{8} & \Delta t + \frac{\Delta t^3}{3} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{6} & \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

Werden hingegen nur Unsicherheiten für die höchste Ableitung des Zustandsvektors (bei 3. Ordnung nur für die Beschleunigung) zugelassen, so ist die Matrix $\underline{D}$ in Glg. (3.13) nicht gleich der Einheitsmatrix $\underline{E}$, sondern hat die Form wie in Glg. (3.19). Damit erhält man die Systemrauschmatrix in Glg. (3.20):

$$\underline{D} = \begin{pmatrix} \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{1} & \underline{0} & \underline{0} \end{pmatrix}, \quad (3.19) \quad \underline{\Sigma}_{ww}(k) = \sigma_w^2 \cdot \begin{pmatrix} \frac{\Delta t^5}{20} & \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{3} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{6} & \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{pmatrix}. \quad (3.20)$$

Ein Vergleich der beiden Systemrauschmatrizen zeigt, daß bei einer Unterdrückung der Unsicherheiten für die Zustandsvariable und seine erste Ableitung in der Systemrauschmatrix (Glg. (3.20)) nur die höchsten Potenzen von Δt auftreten. Diese Vereinfachung wird in der Praxis häufig vorgenommen.

Die *Standardabweichung des Systemrauschens* σ_w beschreibt die Genauigkeit des Prädiktors. Sie sollte so gewählt werden, daß ein ausgewogenes Verhältnis zwischen dem Einfluß der Meßwerte und der Prädiktion auf das Filterergebnis erzielt wird. Die Gewichtung kann durch einen Parameter, der aus der Kalman-Gain-Matrix $\underline{K}$ abgeleitet wird, dem sog. *Verstärkungsfaktor* k , beschrieben werden. Nimmt dieser Faktor k den Wert 1 an, so liegt das Gewicht bei den Messungen. Es erfolgt keine Filterung mehr. Geht k gegen Null, so verläßt sich das Filter rein auf die Prädiktion. Die Meßwerte haben keinen Einfluß auf das Filterergebnis (Abschnitt 3.2.2). Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Meßwerten und der Prädiktion erhält man mit $k = 0,3$.

3.2.4 Modellanpassung zur Auswertung einer Gleisaufnahme

Die vorangehenden Abschnitte haben sich allgemein mit der Theorie und den Eigenschaften des Kalman-Filters beschäftigt. Das Kalman-Filter soll nun optimal an die Erfordernisse einer Auswertung einer dreidimensionalen Gleisaufnahme unter Beachtung der Möglichkeit einer direkten rechnergestützten Auswertung im Felde angepaßt werden. Während das Kalman-Filter üblicherweise zur Bearbeitung zeitabhängiger Beobachtungen (z.B. bei der Vorhersage von Objektbewegungen; Kahmen, Palte 1993) dient, soll es hier zur Auswertung ortsabhängiger Messungen herangezogen werden, wobei die dreidimensionale Gleislage in Abhängigkeit von der laufenden Bogenlänge l betrachtet wird. Formal tritt dann an die Stelle des zeitabhängigen Parameters k im funktionalen Modell (Abschnitt 3.2.1) die Bogenlänge l_i , wobei der Index i die fortlaufende Nummer des jeweiligen Meßpunktes beschreibt. Die Prädiktion ist somit als räumliche Extrapolation aufzufassen.

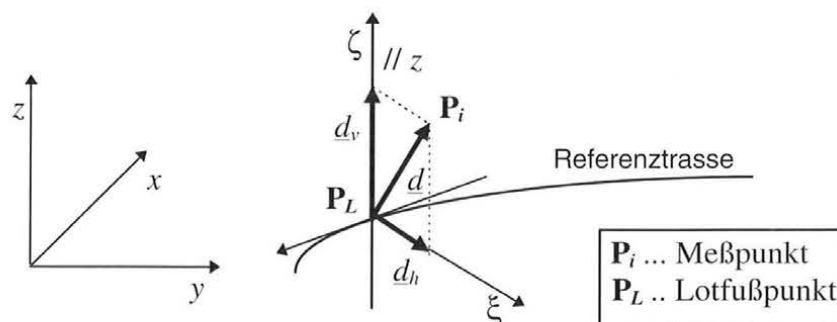


Abb. 3.4: Lotabstandsvektor $\underline{d}$ bezogen auf eine Referenztrasse

Zur Beschreibung der Gleislage müssen geeignete Zustandsvariable gefunden werden. Die direkte Bearbeitung der reduzierten 3D-Koordinaten der Meßreihe (Abschnitt 2.2.2) hat den Nachteil, daß die relativ großen Zahlenwerte der Koordinaten im Vergleich zu den Meßfehlern bei der numerischen Auswertung zu einem instabilen Gleichungssystem führen können. Besser erscheint der Ansatz, die Gleislage relativ zu einer Referenztrasse zu beschreiben. Der Zustand des Gleises in einem Meßpunkt P_i ist dann durch das Lot auf die Referenztrasse gegeben (Abb. 3.4). Verwendet man als Referenztrasse die Solltrasse (bzw. die abzusteckende Trasse), so entspricht dem Lotabstand die Abweichung des Gleises von ihrer idealen Lage. Mit Hilfe dieser

sehr anschaulichen Größe lassen sich sowohl die Gleislage als auch die Qualität der Messungen unmittelbar aus den Schätzwerten der Filterung beurteilen. Die laufende Bogenlänge l_i kann dann auch auf diese Referenztrasse bezogen werden.

Der räumliche Lotabstandsvektor $\underline{d}$ kann in zwei Komponenten aufgespalten werden (Abb. 3.4), nämlich in einen Vektor $\underline{d}_h$ für die Lage (horizontale Komponente) und in $\underline{d}_v$ in der Höhe (vertikale Komponente), da keine Korrelationen zwischen diesen beiden Komponenten bestehen. Die Trennung in eine Lage- und Höhenkomponente hat zusätzlich den Vorteil, daß die zwei Komponenten mit unterschiedlichen Filtereinstellungen bearbeitet werden können, da die horizontale Fehllage des Gleises unter Umständen eine andere Charakteristik aufweist als die vertikale. Die Systemgleichung (3.2) geht über in

$$\begin{pmatrix} \underline{x}_h(l + \Delta l) \\ \underline{x}_v(l + \Delta l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{T}_h(\Delta l) & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{T}_v(\Delta l) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{x}_h(l) \\ \underline{x}_v(l) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{w}_h(l) \\ \underline{w}_v(l) \end{pmatrix}, \quad (3.21)$$

wobei die Teilmatrizen $\underline{T}_h$ und $\underline{T}_v$ keineswegs gleiche Dimension haben müssen. Es können gegebenenfalls unterschiedliche Modellordnungen für die horizontale $\underline{d}_h$ und die vertikale Komponente $\underline{d}_v$ gewählt werden. Dadurch wird eine optimale Anpassung der Systemgleichung (3.21) an die vorliegende Situation ermöglicht.

Der ursprünglich dreidimensionale Beobachtungsvektor $\underline{l}$ in der Meßgleichung (3.3) kann durch die Wahl eines lokalen ξ, η, ζ - Koordinatensystems (Abb. 3.4) auf einen Vektor mit nur zwei von Null verschiedenen Komponenten vereinfacht werden. Die ξ -Koordinate entspricht dem Betrag des Vektors $\underline{d}_h$, die η -Koordinate ergibt sich immer zu Null und die ζ - Koordinate ist gleich der Länge von $\underline{d}_v$. Für die Beobachtungsgleichungen erhält man schließlich aus Glg. (3.3)

$$\begin{pmatrix} \xi(l) \\ \zeta(l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_h \\ d'_h \\ \vdots \\ d_h^{(n-1)} \\ d_v \\ d'_v \\ \vdots \\ d_v^{(m-1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_h(l) \\ \epsilon_v(l) \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

mit $n, m \dots$ Systemordnungen für die horizontale $\underline{d}_h$ bzw. vertikale Komponente $\underline{d}_v$,
 $d'_h, \dots, d_h^{(n-1)}$ bzw. $d'_v, \dots, d_v^{(m-1)}$... Ableitungen von $\underline{d}_h$ und $\underline{d}_v$.

Anstatt der direkten Messungen stehen nun auf der linken Seite der Glg. (3.22) abgeleitete Größen. Das zugehörige stochastische Modell kann unter Beachtung der Gesichtspunkte in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 aufgestellt werden.

Ein wichtiges Merkmal der Kalman-Filterung ist, daß zur Schätzung des Systemzustandes $\underline{x}(k)$ an der Stelle k nur Messungen verwendet werden, die bis zu diesem Punkt gemacht wurden. Sofort nach dem Einschwingen des Filters kann man nach der Messung (on-line) einen gefilterten Schätzwert für den Systemzustand erhalten. Will man alle Messungen, die in einem

zu untersuchenden Bereich gemacht wurden, also auch Meßergebnisse, die erst nach dem Punkt k vorgenommen wurden, für die Berechnung des Systemzustandes $\underline{x}(k)$ heranziehen, so müssen Verfahren eingesetzt werden, die off-line arbeiten, wie beispielsweise *optimale Glättungsverfahren* (Abschnitt 3.3) oder die *Kollokation* bzw. *Wiener-Filterung* (Abschnitt 3.4). Nachteilig ist jedoch, daß ein entscheidender Vorteil der Kalman-Filterung - die rekursive Berechnungsweise - hierbei verloren geht.

3.3 Einsatz optimaler Glättungsverfahren

Das folgende optimale Glättungsverfahren kann im Gegensatz zur Kalman-Filterung nur nachträglich (off-line) angewendet werden. Der Vorteil der Glättung gegenüber der Filterung besteht aber in der erhöhten Genauigkeit der erhaltenen Schätzwerte. Ein möglicher Ansatz ist die Durchführung einer *kombinierten Vorwärts- und Rückwärts-Kalman-Filterung* (Schrick 1977).

Zusätzlich zur gewohnten Ausführung einer Kalman-Filterung nach Abschnitt 3.2 wird hierbei eine zweite Filterung vorgenommen, die rückwärts alle nachfolgenden Meßwerte berücksichtigt. Aus den Schätzwerten $\underline{x}'_V(k)$ und $\underline{x}'_R(k)$ des Vorwärts- und des Rückwärts-Kalman-Filters erhält man dann den geglätteten Schätzwert für den Zustandsvektor auf ähnliche Weise, wie bei der Ermittlung des optimalen Schätzwertes aus dem prädizierten und den wirklichen Messungen bei der einfachen Kalman-Filterung. Man bildet die gewichtete Linearkombination

$$\underline{x}'(k, n) = \underline{D}(k, n) \cdot \underline{x}'_V(k) + [\underline{E} - \underline{D}(k, n)] \cdot \underline{x}'_R(k) \quad (3.23)$$

mit $\underline{x}'(k, n)$... optimaler Schätzwert nach kombinierter Vorwärts- und Rückwärts-Kalman-Filterung,
 $\underline{D}(k, n)$... Verstärkungsmatrix,
 n ... Anzahl der Meßwerte,

wobei k im Bereich $0 < k \leq n$ liegt.

Die Verstärkungsmatrix $\underline{D}(k, n)$ wird so gewählt, daß die Spur der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers für den geglätteten Schätzwert zum Minimum wird. Durch den Ansatz der gewichteten Linearkombination ist auch die Forderung nach der Erwartungstreue des Schätzwertes erfüllt (Abschnitt 3.2.2). Die Verstärkungsmatrix hat somit die Form

$$\underline{D}(k, n) = \underline{\Sigma}_{xx,R}(k) \cdot [\underline{\Sigma}_{xx,V}(k) + \underline{\Sigma}_{xx,R}(k)]^{-1} \quad (3.24)$$

mit $\underline{\Sigma}_{xx,V}(k)$... Kovarianzmatrix des Zustandsvektors bei der Vorwärtsfilterung,
 $\underline{\Sigma}_{xx,R}(k)$... Kovarianzmatrix des Zustandsvektors bei der Rückwärtsfilterung.

Schließlich erhält man für den optimalen Schätzwert des Zustandsvektors

$$\underline{x}'(k, n) = \underline{\Sigma}_{xx}(k, n) \cdot [\underline{\Sigma}_{xx,V}^{-1}(k) \cdot \underline{x}'_V(k) + \underline{\Sigma}_{xx,R}^{-1}(k) \cdot \underline{x}'_R(k)]^{-1} \quad (3.25)$$

mit der Kovarianzmatrix

$$\underline{\Sigma}_{xx}(k, n) = \left[\underline{\Sigma}_{xx,V}^{-1}(k) + \underline{\Sigma}_{xx,R}^{-1}(k) \right]^{-1}. \quad (3.26)$$

Damit wurden die wichtigsten Beziehungen für das optimale Glättungsverfahren abgeleitet. Für genauere Informationen sei auf die entsprechende Literatur verwiesen (z.B. *Schrick 1977*).

Mit diesem Verfahren erzielt man einen besseren Glättungsgrad. Alle Meßpunkte vor und nach dem zu bestimmenden Punkt haben den gleichen Einfluß auf das Ergebnis. Da die Berechnung des optimalen Schätzwertes sinnvollerweise erst nach Vorliegen von allen Meßwerten vorgenommen werden sollte, ist jedoch der direkte Übergang auf den Allgemeinfall der Ausgleichung, die sog. *Kollokation* bzw. *Wiener-Filterung*, naheliegend.

3.4 Modellierung mit dem Wiener-Filter

Eine Verallgemeinerung der Ausgleichungsrechnung wird durch eine *gemeinsame Ausführung von Filterung, Ausgleichung und Prädiktion* erreicht. Diese einheitliche und sehr allgemeine Methode der kleinsten Quadrate wird als *Kollokation* (lat. *collocare* für zusammen-setzen, kombinieren) bzw. *Wiener-Filter* bezeichnet. Die herkömmliche Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen bzw. bedingten Messungen sowie die Prädiktion ergeben sich umgekehrt als Sonderfälle der Kollokation (*Moritz 1973*).

Die Aufstellung eines funktionalen Modells stößt auf Schwierigkeiten, wenn die Anzahl der für die exakte Beschreibung erforderlichen Parameter des Modells zu groß wird. Durch Ergänzung eines einfachen funktionalen Modells mit wenigen Parametern mit einem zusätzlichen stochastischen Modell kann eine ausreichend genaue Darstellung des Problems vorgenommen werden. Die Modellfunktion, die *Trendfunktion*, erfaßt den systematischen Anteil des Problems. Neben diesem funktional beschreibbaren, regelmäßig-systematischen Anteilen setzen sich die gemessenen Werte noch aus einem gegenseitig abhängigen, unregelmäßig-systematischen Anteil, dem *Signal*, und den zufälligen Meßfehlern bzw. *Meßrauschen* zusammen. Die Trennung dieser Anteile ist das Hauptproblem. Es unterscheidet die Kollokation von der herkömmlichen Ausgleichung. Dazu müssen zuerst die als Störgrößen wirkenden Meßfehler durch eine Filterung abgetrennt werden. Außerdem müssen die Parameter der Trendfunktion ermittelt werden. Dies geschieht bekanntlich durch eine Ausgleichung. Aufgrund der Trendfunktion und der korrelativen Zusammenhänge zwischen den unregelmäßig-systematischen Meßwertanteilen können in Bereichen, in denen keine Meßwerte vorliegen, Werte interpoliert werden (Prädiktion). Die Kollokation ermöglicht somit eine Filterung der Meßdaten, eine Trendbestimmung durch Ausgleichung und eine Interpolation zwischen den Stützpunkten.

3.4.1 Funktionales und stochastisches Modell der Kollokation

Wie bei der Kalman-Filterung (Abschnitt 3.2) werden zunächst die Grundgleichungen der Kollokation überblicksweise zusammengestellt. Für eine ausführliche mathematische Darstellung sei auf die Literatur verwiesen (z.B. *Höpcke 1980; Kahmen 1985; Moritz 1973; Reißmann 1976*).

Bei der Methode der Kollokation können die Beobachtungsgleichungen ausgehend vom *Ausgleichungsansatz nach vermittelnden Beobachtungen* folgendermaßen verallgemeinert werden:

$$\underline{l} = \underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{s} + \underline{n} . \quad (3.27)$$

mit $\underline{l}$... Vektor der Beobachtungen,
 $\underline{A}$... Design- oder Formmatrix,
 $\underline{x}$... Vektor der Parameter oder Unbekannten,
 $\underline{s}$... Signalvektor,
 $\underline{n}$... Vektor der zufälligen Meßfehler (engl. Noise, „Rauschen“).

Die Residuen $\underline{z} = \underline{l} - \underline{A} \underline{x}$ lassen sich in zwei Bestandteile $\underline{s}$ und $\underline{n}$ aufspalten, die sich in ihrem statistischen Verhalten und auch sonst unterscheiden. Das Signal $\underline{s}$ kann aber nicht nur in den Meßpunkten, sondern auch dazwischen definiert und in benachbarten Punkten stark korreliert sein.

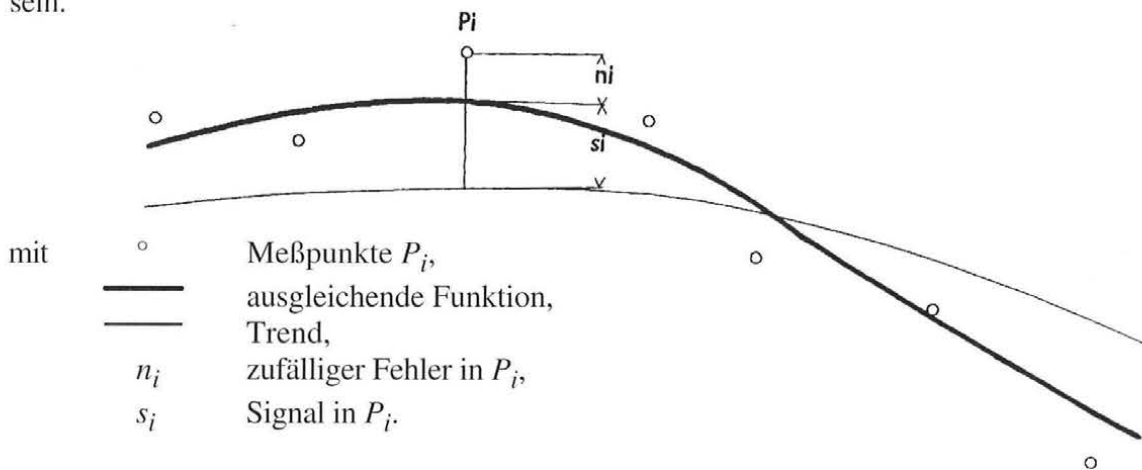


Abb. 3.5: Prinzip der Kollokation

Gemessen wurden k korrelierte Meßwerte L_i mit $i = 1, 2, \dots, k$, von denen sich jeder wie in Abbildung 3.5 aus einem regelmäßig-systematischen Anteil (Trend), einem unregelmäßig-systematischen Anteil (Signal) und dem Meßfehler zusammensetzt.

Die Aufgabe der Kollokation ist die Bestimmung einer ausgleichenden Funktion, welche den Anteil $\underline{A} \underline{x} + \underline{s}$ in Glg. (3.27) beschreibt, aus den diskreten Beobachtungen. Diese sind mit zufälligen Meßfehlern $\underline{n}$ behaftet. Die zu interpolierende Kurve ihrerseits besteht aus dem systematischen Trendanteil $\underline{A} \underline{x}$ und einem zufälligen Anteil $\underline{s}$. Die Beobachtungsgleichungen kann man dann auch im Sinne der Ausgleichsrechnung in der Form

$$L_i + v_i - s_i = \overline{L}_i = f_i(x) \quad (3.28)$$

mit $f_i(x)$... Trendfunktion,
 $\overline{L}_i$... ausgeglichene Meßwerte,
 v_i ... Verbesserungen,
wobei $v_i = -n_i$ ist, schreiben.

Glg. (3.28) kann auch als ursprüngliche *Verbesserungsgleichung* bezeichnet werden. Nach Festlegung der jeweils geeigneten Trendfunktion und Linearisierung mit Hilfe der Taylorschen

Reihe erhält man k umgeformte Verbesserungsgleichungen in Matrizenschreibweise analog zu Glg. (3.27). Zusätzlich wurde der Vektor der zufälligen Meßfehler $\underline{n}$ durch den bei der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen üblichen Verbesserungsvektor $\underline{v}$ ersetzt. Faßt man weiters die Signalgrößen und die Meßfehler (bzw. Verbesserungen) in einem Vektor $\underline{e}$ zusammen, so können die umgeformten Verbesserungsgleichungen rein formal in *Bedingungsgleichungen mit Unbekannten* umgeschrieben werden:

$$\underline{l} = \underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{B}^T \cdot \underline{e} \quad (3.29)$$

mit $\underline{e} = (\underline{v} \quad \underline{s} \quad \underline{s}_p)^T$, der als Korrelatenvektor bezeichnet wird, und der Matrix $\underline{B}^T = (\underline{-E} \quad \underline{E} \quad \underline{0})$.

Für k Meßwerte gibt es natürlich auch k Verbesserungen. Beim Signal treten neben den k Elementen für die Messungen $\underline{s}$ noch weitere Werte $\underline{s}_p$ für die zu interpolierenden bzw. prädizierenden Punkte 1, 2, ..., p zwischen den Stützstellen auf. Der erweiterte Verbesserungsvektor $\underline{e}$ hat somit $2k + p$ Komponenten. Die Matrix $\underline{B}^T$ hat deshalb k Zeilen und $2k + p$ Spalten. Sie enthält aber p Spalten, die Null sind.

Nach dem Ausgleichungsprinzip sind die Komponenten der Vektoren $\underline{e}$ und $\underline{x}$ so zu bestimmen, daß die Minimumsbedingung $\underline{e}^T \underline{P} \underline{e} = \text{Minimum}$ und die Nebenbedingung nach Glg. (3.29) erfüllt werden. Durch Multiplikation der Nebenbedingung mit dem Vektor der Lagrangeschen Faktoren $-2 \underline{k} = (k_1 \ k_2 \ \dots \ k_k)^T$ erhält man für die Hauptbedingung

$$\Omega = \underline{e}^T \underline{P} \underline{e} - 2 \underline{k}^T \cdot (\underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{B}^T \cdot \underline{e} - \underline{l}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (3.30)$$

mit der Gewichtsmatrix

$$\underline{P}^{-1} = \begin{pmatrix} \underline{Q}_L & \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{Q}_s & \underline{Q}_{s s_p} \\ \underline{0} & \underline{Q}_{s s_p}^T & \underline{Q}_{s_p} \end{pmatrix},$$

wobei $\underline{Q}_L$... Kofaktormatrix der Beobachtungen bzw. Meßfehler,
 $\underline{Q}_s$... Kofaktormatrix des Signals in den Meßpunkten,
 $\underline{Q}_{s_p}$... Kofaktormatrix des Signals in den Prädiktionspunkten,
 $\underline{Q}_{s s_p}$... Kofaktormatrix des Signals, die die Korrelationen zwischen den beobachteten und den interpolierten Punkten berücksichtigt, ist.

Durch Differentiation der Lagrangeschen Funktion Ω in Glg. (3.30) nach $\underline{e}$ und $\underline{x}$ und Anwendung des mathematischen Modells für die Ausgleichung von Bedingungsgleichungen erhält man schließlich aus den Normalgleichungen

$$\begin{aligned} \underline{Q}_U \cdot \underline{k} + \underline{A} \cdot \underline{x} - \underline{l} &= 0 \\ \underline{A}^T \cdot \underline{k} &= 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

den gesuchten Parametervektor

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \underline{Q}_U^{-1} \underline{A})^{-1} \cdot \underline{A}^T \underline{Q}_U^{-1} \underline{l}. \quad (3.32)$$

Bei Annahme von Unabhängigkeit zwischen $\underline{s}$ und $\underline{n}$ gilt für die Kofaktormatrix des Beobachtungsvektors $\underline{Q}_U = \underline{Q}_L + \underline{Q}_s$.

Anschließend ergeben sich die Verbesserungen und die Signalgrößen zu

$$\begin{aligned} \underline{v} &= -\underline{Q}_L \cdot \underline{k} = -\underline{Q}_L \underline{Q}_U^{-1} (\underline{l} - \underline{A} \cdot \underline{x}) \\ \underline{s} &= \underline{Q}_s \cdot \underline{k} = \underline{Q}_s \underline{Q}_U^{-1} (\underline{l} - \underline{A} \cdot \underline{x}). \\ \underline{s}_p &= \underline{Q}_{s s_p}^T \cdot \underline{k} = \underline{Q}_{s s_p}^T \underline{Q}_U^{-1} (\underline{l} - \underline{A} \cdot \underline{x}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Wie zu erwarten, hat die Kofaktormatrix $\underline{Q}_{s_p}$ keinen Einfluß auf die Lösung und $\underline{Q}_{s s_p}$ wirkt sich nur bei der Berechnung des Signals der prädierten Punkte s_p aus.

3.4.2 Abschätzung der Kovarianzmatrizen für die Signal- und Meßgrößen

Für die Ableitung der Hauptgleichungen wurde die Kollokation formal als Ausgleichung von bedingten Beobachtungen mit Unbekannten aufgefaßt. Tatsächlich gibt es jedoch einen wesentlichen Unterschied, der in der formalen Behandlung nicht zur Geltung kommt, aber bei der Fehlerrechnung besonders deutlich sichtbar wird. Bei Ausgleichsaufgaben verknüpfen die Bedingungsgleichungen alle Beobachtungen und das Minimumsprinzip nach Glg. (3.30) enthält nur solche Größen, die auch in den Bedingungsgleichungen auftreten. Hingegen sind bei der Kollokation wesentliche Größen, nämlich die Signale s_p in den Prädiktionspunkten, in den Bedingungsgleichungen nicht enthalten, da die den s_p entsprechenden Elemente der Matrix $\underline{B}^T$ ja Null sind. Wohl aber gehen die Signalgrößen s_p in die Minimumsbedingung ein. Das Modell der Kollokation enthält also zusätzliche zufällige Parameter, die mit den Beobachtungen nur indirekt über das stochastische Modell bzw. deren Kovarianzen verbunden sind. Daher ist die Kollokation kein Sonderfall der Ausgleichungsrechnung, sondern stellt eine echte Verallgemeinerung dar. Aufgrund der formal identischen Struktur hat sie auch bekannte günstige Eigenschaften mit der Ausgleichungsrechnung gemeinsam. Einerseits werden auch die mittleren Fehler der Ergebnisse minimal, andererseits ist sie z.B. invariant gegenüber linearen Transformationen der Meßdaten bzw. ihrer Ergebnisse (Moritz 1973).

Sowohl das Signal $\underline{s}$ als auch die Meßfehler $\underline{n}$ sind als Zufallsvektoren definiert, deren Erwartungswert der Nullvektor ist. Die Aufteilung der Gesamtresiduen $\underline{z}$ in $\underline{s}$ und $\underline{n}$ hängt entscheidend von den Kovarianzmatrizen für die Signal- und Meßgrößen ab. Verwendet man einfach für die Gewichtsmatrix $\underline{P}$ gleich die Einheitsmatrix $\underline{E}$, so erhält man das Ergebnis $\underline{s} = \underline{n} = \underline{z}/2$. Diese Kovarianzen und damit die Gewichtskoeffizienten in der Matrix $\underline{P}$ müssen vor der Ausgleichung festgelegt werden.

Die Elemente der Kofaktormatrix $\underline{Q}_L$ beschreiben die Meßgenauigkeit der Beobachtungen L_i . Die Matrix $\underline{Q}_L$ ist in der Regel eine Diagonalmatrix, da die physikalischen Korrelationen zwischen den Meßwerten vernachlässigt werden.

Die Elemente der Matrizen $\underline{Q}_s$, $\underline{Q}_{s_p}$ und $\underline{Q}_{s_s p}$ beschreiben die dem Signal eigene Streuung und Korrelation. Diese können mit Hilfe von *Kovarianzfunktionen* $C(k)$ abgeschätzt werden. Der Zusammenhang zwischen der gewohnten Kovarianz (vergl. Abschnitt 3.2.2) und den Elementen der Kofaktormatrix ist über die fundamentale Beziehung

$$\Sigma_{i,j} = \mu_0^2 \cdot \underline{Q}_{i,j} = C(k) \quad (3.34)$$

mit μ_0 ... mittlerer Gewichtseinheitsfehler,
 k ... ein zunehmender Argumentabstand, wie z.B. Zeit, Ort oder auch Funktion mehrerer Parameter, gegeben.

Für die Kovarianzfunktion verwendet man meistens folgende positiv definite Funktionen, die in Abbildung 3.6 graphisch dargestellt sind:

- lineare Abnahme: $C_1(k) = 0$ für $|k| \geq \alpha > 0$
 $C_1(k) = \frac{\alpha - |k|}{\alpha}$ für $|k| \leq \alpha$, (3.35)

- exponentielle Abnahme: $C_2(k) = e^{-\beta^2 k^2}$, (3.36)

- gedämpfte Schwingung: $C_3(k) = \frac{\sin \gamma k}{\gamma k}$, (3.37)

wobei α , β und γ entsprechend gewählte Konstanten sind.

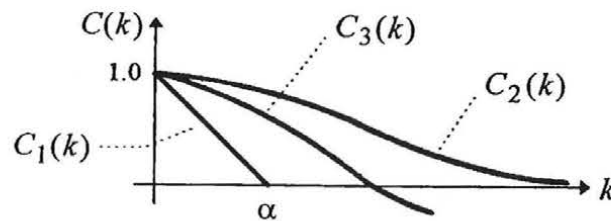


Abb. 3.6: Beispiele für positiv definite Kovarianzfunktionen

Welche Kovarianzfunktion anzuwenden ist, hängt von der Aufgabenstellung ab. Am häufigsten wird die Funktion $C_2(k)$ (Glg. (3.36)) verwendet (Moritz 1973; Reißmann 1976). Der Parameter k ist hierbei meistens der Abstand zwischen den Meßpunkten. Die Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtsansätze mit diesen Kovarianzfunktionen für diverse Anwendungsbeispiele sind u.a. ausführlich in (Aßmus, Kraus 1974; Höpcke 1980; Kraus 1973; Moritz 1973) beschrieben. Zusammenfassend können folgende Punkte angeführt werden:

- Je höher man den Scheitelwert der Signalkovarianzfunktion ansetzt, um so geringer werden die auf das Meßrauschen entfallenden Anteile der Gesamtresiduen sein, d.h. um so geringer ist der Wirkungsgrad der Filterung.

- Reine Filterung prädiziert gar nicht. Das alleinige Ziel ist hier die Glättung der ausgleichenden Trendfunktion. Für eine starke Glättung muß der Scheitelwert der Kovarianzfunktion niedrig angesetzt werden.
- Bei ausschließlicher Prädiktion (Scheitelwert 1, also ohne Meßrauschen) werden die Stützpunkte als fehlerfrei eingeführt. Die Trendfunktion verläuft dann direkt durch die Meßpunkte. Ein sehr benachbarter Interpolationspunkt erhält auch den Wert des Stützpunktes.

Nach Berechnung der Unbekannten der Trendfunktion und der Verbesserungen und Signalanteile kann, wie von der herkömmlichen Ausgleichsrechnung gewohnt, eine *Bestimmung der Standardabweichungen* vorgenommen werden. Für die Kovarianzmatrix der Unbekannten der Trendfunktion $\underline{\Sigma}_x$ erhält man durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf Glg. (3.32) und unter Berücksichtigung der Beziehung (3.34)

$$\underline{\Sigma}_x = \mu_0^2 \cdot (\underline{A}^T \underline{Q}_U^{-1} \underline{A})^{-1}. \quad (3.38)$$

Wie man aus Glg. (3.38) erkennt, hängt die Kovarianzmatrix der Unbekannten nicht nur von den Unsicherheiten der Messungen, sondern auch von der durch das Signal verursachten Streuung ab. Auf analoge Weise kann man auch die Kovarianzmatrizen der Signalgrößen nach der Ausgleichung für die Meßpunkte und die prädizierten Punkte berechnen (*Reißmann 1976*).

3.4.3 Ableitung eines Dreistufenmodells für die Kollokation

Vergleicht man das funktionale Modell des Wiener-Filters (Abschnitt 3.4.1) mit der Beschreibung des Gleiskörpers durch eine dreidimensionale Meßwertreihe nach Abschnitt 3.1, so ist aufgrund der Analogien naheliegend, die Kollokationsmethode für die Auswertung der Meßwerte heranzuziehen. Die Grundgleichungen der Kollokation dienen nun als Ausgangsmodell für die Ableitung eines dreistufigen Auswerteverfahrens. Dabei kann das mathematische Modell aber nicht direkt übernommen werden, sondern es muß optimal an die speziellen Gegebenheiten bei der Auswertung von diskreten Meßwertreihen einer Gleisaufnahme angepaßt werden. Folgende Punkte müssen bei der Neuformulierung des mathematischen Modells berücksichtigt werden:

- Der Trend ist keine durchgehende Funktion, sondern besteht im allgemeinen aus mehreren aneinandergereihten Teilstücken von Funktionen (z.B. von Geraden, Übergangsbögen und Kreisen).
- Zwischen den einzelnen Teilfunktionen müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein (wie z.B. stetiger Übergang).
- Die numerische Berechnung soll mit Hilfe eines Auswerteprogramms direkt im Felde mit einem einfachen PC möglich sein. Eine relativ kurze Berechnungsdauer bei eingeschränkt zur Verfügung stehender Speicherkapazität ist daher von großer Bedeutung.

Unter Beachtung dieser Gesichtspunkte erwies sich eine Unterteilung des gesamten Berechnungsablaufes in drei Stufen als zweckmäßig. Das *dreistufige Auswerteverfahren* kann überblicksweise folgendermaßen beschrieben werden:

- Ermittlung der Parameter der einzelnen Teilfunktionen. Das entspricht einer stückweisen Bestimmung des Trends.
- Verknüpfung der Teilstücke über geeignete Bedingungen.

- Bestmögliche Elimination bzw. Reduktion des Meßrauschens und Berechnung des Signals.

Stufe 1: Abschnittsweise Bestimmung der Trendfunktionen

Im ersten Schritt geht es um eine exakte und eindeutige mathematische Beschreibung der möglichen Trendfunktion in einem bestimmten Bereich in Abhängigkeit des jeweiligen Trassierungselements. Die Parameter dieser Funktion werden durch einen speziellen Sonderfall der Kollokation, die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, bestimmt. Im Zusammenhang mit der Trassierung von Verkehrswegen sind Funktionen wie Geraden, Übergangsbögen (im speziellen die Klotoide) und Kreise für die Lage bzw. Geraden und Kreisbögen für die Höhe besonders von Interesse. Für die Aufstellung der Trendfunktion sind verschiedene Ansätze denkbar. Aufgrund von Abhängigkeiten zwischen den Parametern und Unbekannten sind bestimmte Ansätze jedoch nicht zielführend. Weiters muß auch darauf geachtet werden, daß die Formulierung von geeigneten Bedingungen zur Verknüpfung der Kurvenstücke in Stufe 2 möglich ist und eine gute numerische Auswertbarkeit gegeben ist. Zuerst werden die Beziehungen für die Lage aufgestellt und im Anschluß daran die Besonderheiten für die Höhenkomponente betrachtet.

Ausgehend von allgemeinen Gleichungen für die Klotoide können geeignete Darstellungsformen für die Trendfunktion gefunden werden. Die *Klotoide* ist jener Übergangsbogen mit konstanter Krümmungsänderung $d\kappa$ in bezug auf die Bogenlänge l (Kahmen 1993; Kasper, Schürba, Lorenz 1968):

$$\frac{d\kappa}{dl} = \text{const} = c. \quad (3.39)$$

Dieser lineare Zusammenhang macht sich auch im Winkelbild (Abschnitt 2.1.2) bemerkbar. Die Darstellung der Klotoide im Winkelbild ist eine monoton ansteigende bzw. fallende Gerade.

Durch Integration von Glg. (3.39) mit den Grenzen l_0 und l ergibt sich für die Krümmung

$$\kappa(l) = \kappa_0 + c \cdot (l - l_0). \quad (3.40)$$

Daraus folgt unter Berücksichtigung von Glg. (2.2) der Tangentenrichtungswinkel τ durch weitere Integration

$$\tau(l) = \tau_0 + \kappa_0 \cdot (l - l_0) + \frac{c}{2} \cdot (l - l_0)^2. \quad (3.41)$$

Mit $dx = dl \cdot \cos \tau$ und $dy = dl \cdot \sin \tau$ erhält man somit für die Koordinaten eines Klotoidenpunktes in Abhängigkeit der Bogenlänge

$$\begin{aligned} x(l) &= x_0 + \int_{l_0}^l \cos \tau \, dl = x_0 + \int_{l_0}^l \cos \left(\tau_0 + \kappa_0 \cdot (l - l_0) + \frac{c}{2} \cdot (l - l_0)^2 \right) dl \\ y(l) &= y_0 + \int_{l_0}^l \sin \tau \, dl = y_0 + \int_{l_0}^l \sin \left(\tau_0 + \kappa_0 \cdot (l - l_0) + \frac{c}{2} \cdot (l - l_0)^2 \right) dl \end{aligned} \quad (3.42)$$

Die in den Glgen (3.42) enthalten Integralbeziehungen werden in der Literatur als „Fresnel’sche Integrale“ bezeichnet. Es treten insgesamt sechs unbekannte Parameter auf: die Koordinaten des Anfangspunktes x_0 und y_0 , dessen Bogenlänge l_0 und Tangentenrichtungswinkel τ_0 , die Krümmung κ_0 und die Krümmungsänderung c . Normalerweise ist die Form einer Klotoiden durch genau vier Bestimmungsstücke eindeutig festgelegt, d.h. es können hier zwei dieser Elemente als konstant angesetzt werden. Es ist jedoch entscheidend, welche Parameter dafür gewählt werden. Würde man fälschlicherweise die Krümmungsänderung $c = \text{const.}$ setzen, dann hätte man keinen Übergangsbogen mehr, sondern nur Kreise mit bestimmten Radien. Wird hingegen κ_0 und l_0 gewählt, kann mit den Glgen (3.42) jede beliebige Klotoiden beschrieben werden.

Nachfolgend wird vorausgesetzt, daß für jeden Punkt $P_0(x_0, y_0)$ die zugehörige Bogenlänge l_0 bekannt ist. Mit der Festlegung $\kappa_0 = 0$ und einigen Umformungen erhält man

$$\begin{aligned} x(l) &= x_0 + \xi(l) \cdot \cos \tau_0 - \eta(l) \cdot \sin \tau_0 \\ y(l) &= y_0 + \xi(l) \cdot \sin \tau_0 + \eta(l) \cdot \cos \tau_0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

mit den Abkürzungen $\xi(l) = \int_{l_0}^l \cos\left(\frac{c}{2} \cdot (l - l_0)^2\right) dl$ und $\eta(l) = \int_{l_0}^l \sin\left(\frac{c}{2} \cdot (l - l_0)^2\right) dl$.

Die Gleichungen für einen *Kreisbogen* erhält man aus den allgemeinen Gleichungen für die Klotoiden, indem man die Krümmungsänderung $c = 0$ setzt und integriert:

$$\begin{aligned} x(l) &= x_0 + \frac{1}{\kappa_0} \cdot \sin(\tau_0 + \kappa_0 \cdot (l - l_0)) - \frac{1}{\kappa_0} \cdot \sin \tau_0 \\ y(l) &= y_0 + \frac{1}{\kappa_0} \cdot \cos(\tau_0 + \kappa_0 \cdot (l - l_0)) - \frac{1}{\kappa_0} \cdot \cos \tau_0 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Mit $\kappa_0 = 1/R$ und $l_0 = 0$ erhält man nach entsprechender Umformung

$$\begin{aligned} x(l) &= x_0 + 2R \cdot \sin \frac{l}{2R} \cdot \cos\left(\tau_0 + \frac{l}{2R}\right) \\ y(l) &= y_0 + 2R \cdot \sin \frac{l}{2R} \cdot \sin\left(\tau_0 + \frac{l}{2R}\right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

Ein Kreis wird somit durch einen Punkt P_0 , seinen zugehörigen Tangentenrichtungswinkel τ_0 und den Kreisradius R beschrieben. Daß hier P_0 nicht der Kreismittelpunkt ist, bringt bei der Auswertung numerische Vorteile.

Die Gleichungen für eine *Gerade* ergeben sich aus Glg. (3.42) mit $c = 0$, $\kappa_0 = 0$ und der nicht einschränkenden Festlegung $l_0 = 0$:

$$\begin{aligned} x(l) &= x_0 + l \cdot \cos v \\ y(l) &= y_0 + l \cdot \sin v \end{aligned} \quad (3.46)$$

Hierbei wurde τ_0 durch den Richtungswinkel der Geraden v ersetzt.

Bei der *Längsschnittgestaltung* von Bahntrassen wird in der Regel auf den Einsatz von Übergangsbögen verzichtet. Die Trassierungselemente im Höhenverlauf (z -Koordinaten) sind die Gerade und der Kreisbogen. Bei der Verknüpfung der Elemente ergeben sich hier zwangsläufig Krümmungssprünge in den Übergangspunkten. Für Geradenstücke kann die einfache Beziehung

$$z(l) = z_0 + (l - l_0) \cdot \tan \vartheta \quad (3.47)$$

verwendet werden, wobei die Koordinate z_0 eines beliebigen Punktes P_0 und die Steigung bzw. Längsneigung ϑ unbekannt sind. Da die Längsneigung ϑ bei Eisenbahntrassen nur einige Promille beträgt, ist eine gute numerische Auswertung gesichert.

Für den Kreisbogen muß ähnlich wie bei der Lagekomponente auf eine geeignete Auswahl der Unbekannten geachtet werden, da die auftretenden Ausrundungsradien im Verhältnis zur Kreisbogenlänge sehr groß sind. Folgende Darstellungsform erwies sich als geeignet:

$$z(l) = z_0 + 2R \cdot \sin \frac{\vartheta + \vartheta_0}{2} \cdot \sin \frac{\vartheta - \vartheta_0}{2}, \quad (3.48)$$

wobei sich der Neigungswinkel ϑ ergibt aus $\sin \vartheta = \sin \vartheta_0 + \frac{l - l_0}{R}$.

Damit wurden sowohl für die Lagekoordinaten $x(l)$ und $y(l)$ als auch für die Höhe $z(l)$ für bestimmte Trendfunktionen $f_i(x)$ die ursprünglichen Verbesserungsgleichungen nach Glg. (3.28) abgeleitet. Nach der Bestimmung der Parameter der Trendfunktion müssen die verschiedenen Teilstücke im zweiten Auswerteschritt in ihren Übergangspunkten verbunden werden.

Stufe 2: Verknüpfung der einzelnen Trendfunktionen

Bei der Verbindung der einzelnen Trassenelemente müssen drei Hauptbedingungen erfüllt werden, die mathematisch in Form von Bedingungsgleichungen für den Übergangspunkt zwischen den beiden Trendfunktionen $f_1(x)$ und $f_2(x)$ formuliert werden können:

- Der gesamte Trassenverlauf darf keine Sprungstellen aufweisen:

$$\begin{aligned} x_i(l) &= x_{i+1}(l) = x \\ y_i(l) &= y_{i+1}(l) = y \\ z_i(l) &= z_{i+1}(l) = z \end{aligned} \quad (3.49)$$

- Beim Übergang dürfen keine Knicke auftreten, d.h. die Kurvenstücke berühren sich tangential:

$$\begin{aligned} \tau_i(l) &= \tau_{i+1}(l) = \tau \\ \vartheta_i(l) &= \vartheta_{i+1}(l) = \vartheta \end{aligned} \quad (3.50)$$

- Der Krümmungsverlauf der Trasse in der Lage muß stetig sein:

$$\kappa_i(l) = \kappa_{i+1}(l) = \kappa. \quad (3.51)$$

Dabei sind x_i , y_i und z_i die dreidimensionalen Koordinaten des Übergangspunktes, τ_i die Richtungswinkel im Übergangspunkt in der Lage, ϑ_i der Verlauf der Längsneigung und κ_i die Krümmung, wobei der Index i das jeweilige Trassierungselemente kennzeichnet.

Die Berechnung erfolgt hier durch eine Ausgleichung bedingter Messungen mit Unbekannten. Die Unbekannten können teilweise eliminiert werden, dies hat auf das Ergebnis des Ausgleichs jedoch keinen Einfluß. Mit diesen Bedingungsgleichungen können auch zwei gleichartige Kurvenstücke (z.B. Klotoide mit Klotoide) verbunden werden. Damit ist auch die Berechnung einer Wendelinie bzw. S-Kurve möglich.

Stufe 3: Filterung der Meßwerte und Signalberechnung

Im letzten Schritt des dreistufigen Auswerteverfahrens erfolgt die Abtrennung der als Störgrößen wirkenden Meßfehler und die Bestimmung des Signals. Durch Elimination des Trends in der dreidimensionalen Meßwertreihe wird das Problem auf eine Filterung trendfreier fehlerbehafteter Größen zurückgeführt. Der Bezug eines Meßpunktes zum Trend kann wie bei der Kalman-Filterung (Abschnitt 3.2.4) über das Lot hergestellt werden. Der Lotabstand setzt sich dann formal aus dem Signal und Meßrauschen zusammen. Das Signal $\underline{s}$ berechnet sich nach der Glg. (3.33), wobei in diesem Fall der Trend $\underline{A} \underline{x}$ gleich Null ist. Die Elemente der Kovarianzmatrizen werden mit Hilfe von Kovarianzfunktionen nach Abschnitt 3.4.2 abgeschätzt. Am besten eignen sich Kovarianzfunktionen vom Typ $C_2(k)$ nach Glg. (3.36), bei denen das Signal in Abhängigkeit des Punktabstandes $\Delta l = l_j - l_i$ beschrieben wird, wie beispielsweise mit der Funktion

$$C_2(\Delta l) = C_0 \cdot e^{-\left(\frac{\Delta l}{a}\right)^2} \quad (3.52)$$

wobei C_0 der Scheitelwert der Funktion ist und der Parameter a die Breite der Kovarianzfunktion festlegt (Abb. 3.7). Die dimensionslose Konstante β in Glg. (3.36) wurde hier durch $1/a$ in $[\text{m}^{-1}]$ ersetzt, damit wird der Meßpunktabstand Δl normiert.

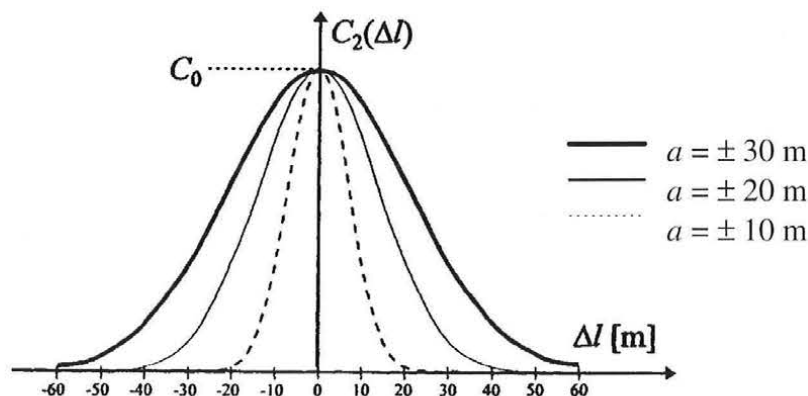


Abb. 3.7: Kovarianzfunktion in Abhängigkeit des Parameters a

Die Kovarianzfunktion hat die Form einer Glockenkurve. Der Scheitelwert C_0 ist definitionsgemäß kleiner oder gleich der Varianz. Neben der Festlegung des Scheitelwertes ist für das Ergebnis von Bedeutung, wie rasch die Kovarianzfunktion mit wachsender Entfernung Δl gegen Null absinkt (Kraus, Mikhail 1972; Åßmus, Kraus 1974). Das Maß für das Absinken bzw. die Steilheit der Funktion beschreibt der Parameter a .

Die durch den Trend repräsentierte Trasse kann auch als künftige Soll-Gleislage verwendet werden. Diese Trasse setzt sich aus den üblichen Trassenelementen (Gerade, Klotoide und Kreisbogen in Lage bzw. Gerade und Kreisbogen in Höhe) für die Trassierung einer Eisenbahnlinie zusammen. Betrachtet man den Trend als Solltrasse, so beschreibt der Signalanteil die

Abweichungen der Isttrasse von der Sollage und kann gegebenenfalls zur Gleiskorrektur herangezogen werden. Damit erfüllt die Kollokation auch einen Grundgedanken des Winkelbildverfahrens (Abschnitt 2.1). Beim Winkelbildverfahren wird eine optimale Anpassung der Standlinie (Isttrasse) an den Entwurf (Sollage) erreicht. Dieser Umstand führt zu einer Minimierung der erforderlichen Gleiskorrekturen. Da der Trend aus den Meßwerten der Gleisaufnahme berechnet wurde, ist eine optimale Anpassung an die vorhandene Gleislage gegeben. Unerwünschte Verschiebungen lassen sich leicht und schnell durch eine Neuberechnung des Trends beseitigen.

3.5 Zusammenfassung

Die Analyse der diskreten Meßwertreihe einer Gleisaufnahme hat gezeigt, daß sich die Istlage der Gleise durch eine Trendfunktion beschreiben läßt, der additiv ein näherungsweise periodisches Signal und weißes Rauschen überlagert ist. Das weiße Rauschen wird durch äußere Einflüsse wie beispielsweise Unebenheiten der Schienen und Meßfehler des Meßsystems hervorgerufen. Das näherungsweise periodische Signal beschreibt die Korrekturwerte und die Trendfunktion die Sollage. Ziel ist die Trennung dieser Signalanteile durch Filteransätze. Hierzu wurde sowohl die *Kalman-Filterung* für direkte Auswertungen während des Produktionsprozesses (on-line) als auch *optimale Glättungsverfahren* bzw. der *Wiener-Filter* (*Kollokation*) für nachträgliche Berechnungen (off-line) adaptiert.

Bei der diskreten *Kalman-Filterung* wird nach jeder Messung jeweils mit Hilfe der Differenz zwischen dem prädierten und dem tatsächlichen Meßwert eine Korrektur des Schätzwertes für den Systemzustand vorgenommen. Der verbesserte Schätzwert wird erwartungstreu und optimal durch Minimierung seiner Kovarianzmatrix bestimmt. Der Filter arbeitet rekursiv, wobei bei jeder Messung die genannten Schritte (Prädiktion und Aufdatierung) durchlaufen werden. Er eignet sich deshalb bestens für den Einsatz im *on-line Betrieb*. Das funktionale und stochastische Modell kann unter Beachtung gewisser Gesichtspunkte für die Auswertung einer Meßwertreihe einer Gleisaufnahme angepaßt werden. Die Wirkung des Kalman-Filters hängt entscheidend von seinen Startwerten, den Kovarianzmatrizen des Meß- und Systemrauschens und Wahl der Systemordnung ab. Diese Einflußgrößen müssen je nach vorliegendem Anwendungsfall durch empirische Untersuchungen entsprechend festgelegt werden.

Die *Kollokation* kann für eine Vielzahl von Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, daß alle Operationen rein numerisch in einem einheitlichen objektiven Verfahren durchgeführt werden können. Über Kovarianzfunktionen ist eine richtige Gewichtung des Einflusses benachbarter Punkte auf das Berechnungsergebnis möglich. Im Gegensatz zur einfachen Kalman-Filterung haben Punkte auf beiden Seiten des Meßpunktes meist in Abhängigkeit des Punktabstandes das gleiche Gewicht. Nachteilig in diesem Zusammenhang ist jedoch, daß keine Berechnung in Echtzeit erfolgen kann. Die Berechnungsweise ist auch nicht rekursiv, was einen erhöhten Speicherplatzbedarf bedingt. Durch eine Unterteilung des gesamten Berechnungsablaufes in drei Stufen kann jedoch die Auswertung direkt im Felde auf einem leistungsfähigen PC vorgenommen werden. Die Kollokation liefert jedoch als zusätzliches Ergebnis die Beschreibung der Gleistrasse durch Trendfunktionen, die aus den üblichen Trassenelementen (Gerade - Klotoide - Kreisbogen) für die Trassierung einer Eisenbahnlinie zusammengesetzt sind. Dieser Trend kann als künftige Soll-Gleislage verwendet werden. Das Signal beschreibt dann die Abweichungen der Isttrasse von der Sollage und entspricht somit den Verschiebungen für die Gleiskorrektur.

Die untersuchten Verfahren der Ausgleichsrechnung und Filtertechnik führen zu einer deutlichen Reduktion des Meßrauschens und können optimal zur Bestimmung von Gleiskorrekturen eingesetzt werden. Ihr Anwendung auf Testmessungen und ein Vergleich der Methoden wird ausführlich im folgenden Kapitel behandelt.

4. Analyse und Anwendung der linearen Filterverfahren

Mit dem neu entwickelten Multisensorsystem für die 3D-Aufmessung der Gleislage (Kapitel 5) wurden umfangreiche Meßserien durchgeführt. Alle Messungen wurden auf wenig befahrenen Nebenbahnlinien ausgeführt. Auf diesen Bahnlinien wurden schon seit längerer Zeit aus Kostengründen keine Gleiskorrekturen vorgenommen, deshalb weicht zum Teil die tatsächliche Istlage des Gleises bereits beträchtlich von der projektierten Trasse ab und der Zustand der Gleise ist relativ schlecht. Dadurch werden hohe Anforderungen an das Meßkonzept bei seiner Bewährungsprobe gestellt.

Erste Testmessungen mit dem terrestrischen Polarmeßsystem fanden im Mai 1994 im Bahnhofsbereich von Thaya, Niederösterreich, auf der Bahnlinie Schwarzenau - Fratres im Rahmen einer Diplomarbeit statt (*Rudorfer 1995*). Der betrachtete Gleisabschnitt beginnt etwa bei der Stationierung von 14560 m und hat eine Länge von rund 420 m. Laut Bogenverzeichnis der ÖBB besteht die projektierte Trasse aus einer Bogenfolge Gerade - Klotoide - Kreisbogen - Klotoide - Gerade. Auf diesem Gleisabschnitt wurden weitere Meßserien Ende September - Anfang Oktober 1994 ausgeführt. Gleisaufnahmen mittels GPS wurden erstmals im März 1995 im Bereich Klein Schwechat auf der Bahnlinie Oberlaa nach Wien Albern Hafen erprobt. Der betrachtete Gleisabschnitt zwischen den Stationierungen 19855 und 20165 m enthält eine Bogenfolge Gerade - Klotoide - Kreisbogen. Weitere Meßserien mit beiden Systemen wurden im Mai 1995 im Rahmen einer Diplomarbeit (*Zinschitz 1995*) und mit Studenten im Zuge einer Lehrveranstaltung wiederum in Thaya, jedoch auf einem anderen Gleisabschnitt als im Vorjahr, durchgeführt. Eine Aufnahme des Gleisabschnittes im Bahnhofsbereich war leider nicht möglich, da die GPS-Messungen wegen abgestellter Güterwaggons auf dem zweiten Gleis nur eingeschränkt möglich gewesen wären. Für einen direkten Vergleich beider Meßmethoden sollten jedoch die äußeren Bedingungen für beide Systeme etwa gleichwertig sein, um nicht von vornherein eine Methode zu benachteiligen. Der neue Gleisabschnitt liegt nördlich des Bahnhofsbereiches von Thaya. Er beginnt etwa bei der Stationierung von 15135 m und endet bei 15515 m. Die projektierte Trasse setzt sich in diesem Bereich aus einer Bogenfolge Gerade - Klotoide - Kreisbogen - Wendeklotoide (bzw. S-Kurve) zusammen.

Im Abschnitt 4.1 werden die dreidimensionalen Meßreihen einer Gleisaufnahme mit Hilfe der spektralen Betrachtungsweise analysiert. Anschließend wird die Wirkungsweise der Filtermethoden bei Veränderung von Parametern im stochastischen Modell anhand simulierter Meßwertreihen untersucht (Abschnitt 4.2). Die optimalen Filtereinstellungen werden im Abschnitt 4.3 auf reale Meßwertreihen angewendet. Durch einen Vergleich zwischen Kalman-Filter und Kollokation bzw. Wiener-Filter in Abschnitt 4.4 kann eine Beurteilung ihrer Einsatzmöglichkeiten vorgenommen werden.

4.1 Spektralanalyse von Meßreihen einer Gleisaufnahme

4.1.1 Diskretisierung der Gleisaufnahme

Zur Erfassung von Gleisdeformationen ist vorerst eine optimale Punktdichte zu ermitteln. Die Abtastung von Signalen ohne Informationsverlust ist von Shannon im Jahre 1948 präzisiert worden. Das *Shannonsche Abtasttheorem* lautet in seiner Grundform:

$$\omega_s \geq 2 \cdot \omega_g, \quad (4.1)$$

wobei ω_s die Abtastfrequenz und ω_g die Grenzfrequenz des Signals bezeichnet. In Worten besagt das Abtasttheorem, daß die Abtastfrequenz ω_s mindestens gleich der doppelten Grenzfrequenz ω_g sein muß. Da die Perioden T die Reziprokwerte der Frequenzen ω sind, kann der Zusammenhang zwischen dem Diskretisierungsintervall Δt und der größten Frequenz ω_g bzw. der kleinsten Periode T_{Min} folgendermaßen formuliert werden:

$$\Delta t < \frac{1}{2 \cdot \omega_g} = \frac{T_{Min}}{2}. \quad (4.2)$$

Bei der Berechnung des empirischen Energiespektrums aus einer Stichprobe können aufgrund des endlichen Abtastintervalls hochfrequente Variationen nicht erfaßt werden. Die obere Frequenzgrenze wird als Nyquist-Frequenz ω_N bezeichnet und ergibt sich durch Umkehrung von Glg. (4.2) zu:

$$\omega_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}. \quad (4.3)$$

Zur richtigen Erkennung einer Sinusschwingung ist es notwendig, daß in eine volle Periode 2π dieser Schwingung außer dem Anfangsmeßpunkt noch mindestens zwei weitere Meßpunkte fallen, um Amplitude und Phase der Schwingung erfassen zu können. Die höchste Frequenz einer Sinusschwingung, die so erfaßt werden kann, ist daher diejenige, deren Periode gleich dem doppelten Abtastintervall ist. Die Stichprobenentnahme in Form äquidistanter Ablesungen aus einem Zufallsprozeß bringt einen beträchtlichen Informationsverlust mit sich, der darin besteht, daß aus dem Spektrum des Prozesses nicht nur alle geradzahligen Vielfachen der Nyquist-Frequenz verlorengehen, sondern auch alle Frequenzen, die größer als die Nyquist-Frequenz sind, nicht mehr von Frequenzen unterhalb der Nyquist-Frequenz unterschieden werden können (*Alaising-Effekt*; z.B. *Taubenheim 1969*; *Schlittgen, Streitberg 1994*).

Die Ablesung einer Realisierung eines stationären Gauß'schen Zufallsprozesses in äquidistanten Intervallen Δt (bei unendlich langer Beobachtungsdauer) liefert die vollständige Information über diesen Zufallsprozeß dann und nur dann, wenn sein Energiespektrum für alle Frequenzen $\omega > \omega_N$ identisch Null ist. Das Abtasttheorem rechtfertigt grundsätzlich die Ermittlung der Eigenschaften von Zufallsprozessen aus äquidistanten Beobachtungen, auch bei endlich langer Beobachtungsdauer, als Schätzverfahren. Kennt man die praktische Obergrenze des Spektrums, so erhält man aus Glg. (4.2) das maximale Abtastintervall Δt (*Taubenheim 1969*). In der Praxis muß aber gelegentlich dichter abgetastet werden, um das Meßrauschen in den Griff zu bekommen.

Im Unterschied zur gewohnten Zeitreihenanalyse werden hier Meßwertreihen in Abhängigkeit eines Parameters l , der die laufende Bogenlänge beschreibt, mit Hilfe der spektralen Betrachtungsweise analysiert. In Analogie zu Glg. (4.2) ergibt sich für den räumlichen Punktabstand Δl :

$$\Delta l < \frac{1}{2 \cdot k_g} = \frac{\lambda_{Min}}{2}. \quad (4.4)$$

wobei k_g die größte Wellenzahl und λ_{Min} die kleinste Wellenlänge bezeichnet. Das Abtastintervall bzw. die Punktdichte Δl muß somit kleiner als die Hälfte der kleinsten zu erfassenden Wellenlänge λ_{Min} des Signals gewählt werden.

Die bei der Gleisaufnahme erforderliche Punktdichte kann nun nach Glg. (4.4) durch Abschätzung der Maxima für die Wellenzahl k_g aus empirischen Spektraldarstellungen von Meßwertreihen abgeleitet werden. Die empirische Analyse der Spektren von Meßreihen wird jedoch dadurch eingeschränkt, daß sie mit dem Abtastintervall der vorliegenden Realisierungen vorgenommen werden muß. Es kann also kein kleineres Intervall als das der Messung zugrundeliegende Intervall Δl abgeleitet werden. Aus dem umfangreich vorliegenden Datenmaterial wurden deshalb Meßwertreihen mit Punktabständen von 1.7, 2 und 2.5 m ausgewählt. Abb. 4.1 zeigt die Lotabstände der Meßwertreihe TH282.MES bezogen auf die Solltrasse TREND1.ETR. Diese Meßwertreihe enthält 131 Punkte bei einem Abstand von 1.7 m. Die Gleisaufnahme erfolgte mit dem in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen terrestrischen dreidimensionalen Polarmeißsystem.

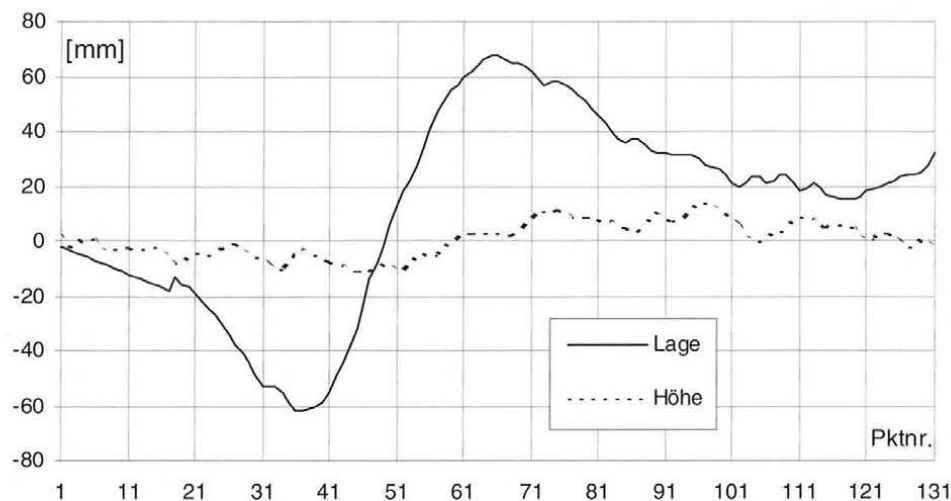


Abb. 4.1: Abweichungen der mit einem Meßroboter aufgenommenen Meßwertreihe TH282.MES in Lage und Höhe von der Solltrasse TREND1.ETR

In Abb. 4.2 sind die Leistungsspektren sowohl für die horizontale als auch die vertikale Komponente der Meßwertreihe TH282.MES dargestellt.

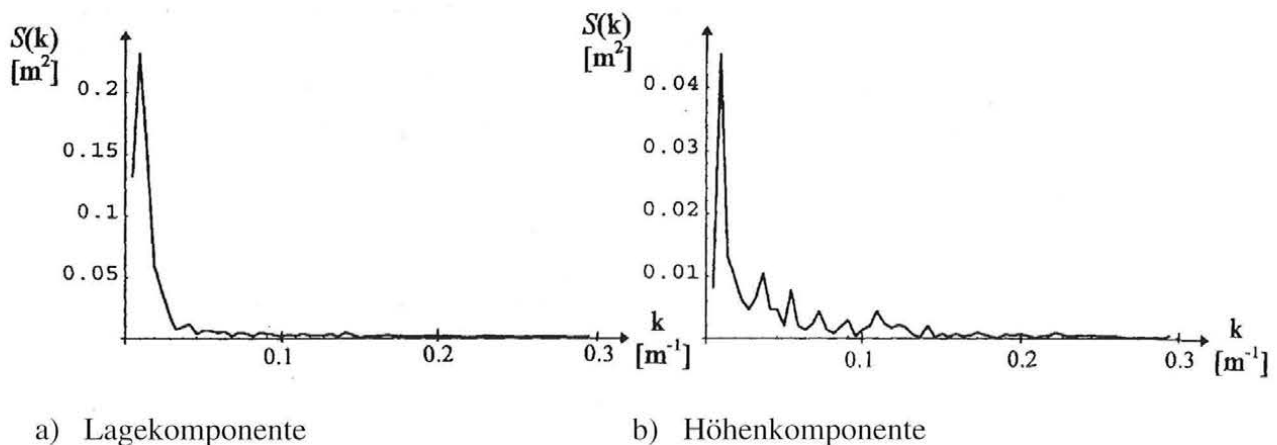


Abb. 4.2: Leistungsspektren $S(k)$ der Abweichungen aus Abb. 4.1

Die beiden Spektren weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die Funktionskurven fallen rasch gegen die Ordinatenachse ab. Bei der Höhenkomponente erfolgt das Einschwingen gegen die Ordinate jedoch etwas langsamer.

Stellvertretend für Gleisaufnahmen mittels GPS (Abschnitt 5.2.2) wurde die Meßwertreihe TH115V.MES ausgewählt. In Abb. 4.3 sind die Lotabstände bezogen auf die Solltrasse THAYA16.ETR sowohl für die horizontale als auch die vertikale Komponente dargestellt. Die Meßwertreihe enthält 155 Punkte mit einem Abstand von 2 m. Die zugehörigen Leistungsspektren enthält die Abb. 4.4.

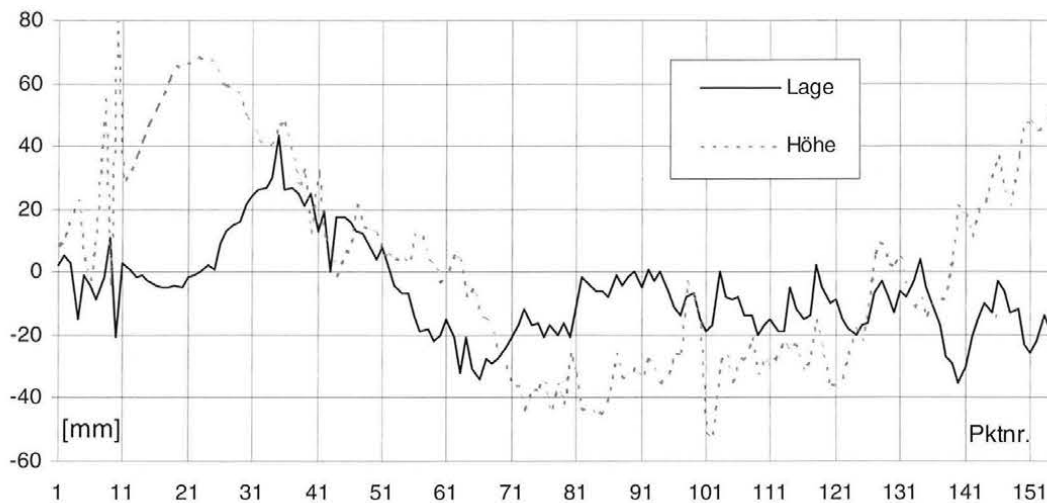


Abb. 4.3: Abweichungen der GPS-Meßwertreihe TH115V.MES in Lage und Höhe von der Solltrasse THAYA16.ETR

Im Vergleich zu den Leistungsspektren in Abb. 4.2 ist der Verlauf der Spektrallinien etwas unruhiger bei minimaler Vergrößerung der Einschwingzeit, was hauptsächlich auf das erhöhte Meßrauschen des GPS-Systems zurückzuführen ist. Auch die Abweichungen in Abb. 4.3 zeigen gegenüber denen in Abb. 4.1 größere Streuungen.

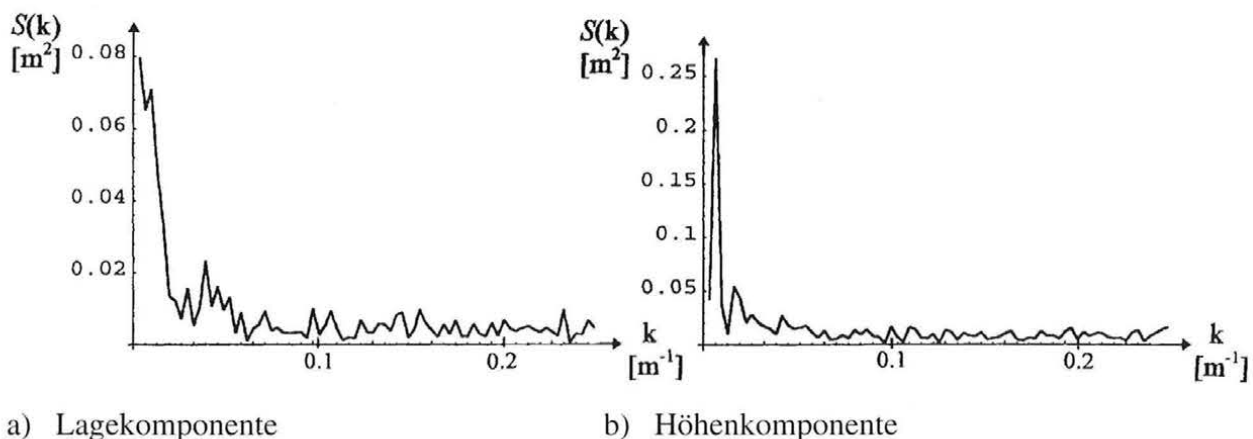


Abb. 4.4: Leistungsspektren $S(k)$ der Abweichungen aus Abb. 4.3

Aus den Leistungsspektren in Abb. 4.2 und 4.4 folgt eine maximale Wellenzahl k_g von ca. 0.1 m^{-1} . Mit Glg. (4.4) ergibt sich somit ein maximales Abtastintervall Δl von 5 m. Die Bestimmung von Spektren weiterer Meßwertreihen führte zu ähnlichen Ergebnissen. Mit den

Punktabständen von 1.7 und 2 m wurde der Gleiskörper bei den beschriebenen Meßserien gewollt zu dicht abgetastet. Eliminiert man beispielsweise jede zweite Messung in der Meßwertreihe TH282.MES, so ändert sich der Informationsgehalt der Abtastung nicht, alle wesentlichen Perioden des Signals werden erfaßt. Aus wirtschaftlichen Überlegungen wird man deshalb in der Praxis Punktabstände von knapp unter 5 m wählen. Beim derzeit eingesetzten Langsehenverfahren (Abschnitt 6.1.2) werden Pfeilhöhen ebenso im Abstand von 5 m gemessen. Durch Umkehrung der Beziehung (4.4) resultiert daraus ein Minimum für die erfaßten Wellenlängen von 10 m.

4.1.2 Aufdeckung von Periodizitäten

Ein Hauptziel der Gleiskorrektur besteht in der Elimination von in der Natur vorhandenen periodischen Gleisfehlagen, da diese nachteilig das Fahrverhalten beeinträchtigen. Mit den angewendeten Filterverfahren sollen diese periodischen Gleisfehlagen bestimmt werden. Sie sind Bestandteile des Signals und dürfen daher nicht fälschlicherweise als Rauschen interpretiert und durch die Filterung eliminiert werden. Es ist deshalb von Interesse, eventuell vorhandene Periodizitäten in der Meßwertreihe aufzudecken. Ein geeignetes Mittel hierzu ist die Schätzung von empirischen Energiespektren nach dem Wiener-Chintschin-Theorem (Taubenheim 1969; Schlittgen, Streitberg 1994).

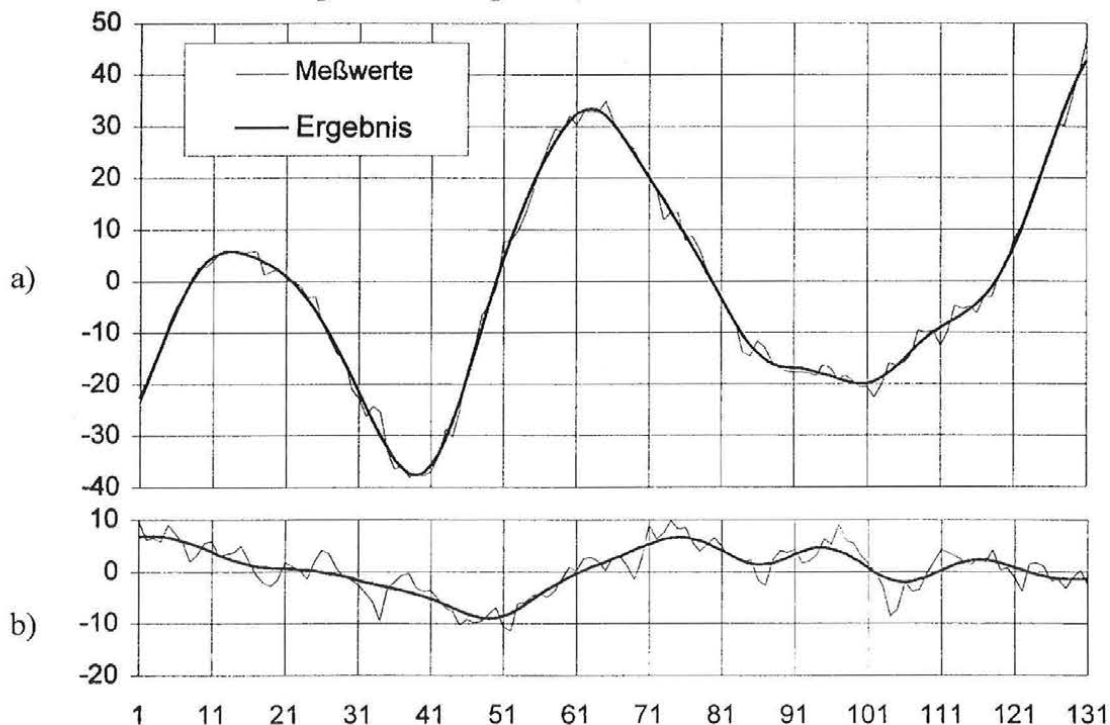


Abb. 4.5: Abweichungen der Meßwertreihe TH282.MES und des Berechnungsergebnisses der Wiener-Filterung von der Solltrasse TR2.ETR in Lage (a) und Höhe (b)

Eine reale Meßwertreihe besteht im allgemeinen jedoch nur näherungsweise aus periodischen Schwingungen mit verschiedenen Wellenlängen, denen noch Rauschen überlagert ist (Abschnitt 3.1). Exemplarisch werden die Lotabstände der Meßwertreihe TH282.MES zur Solltrasse TR2.ETR, die in Abb. 4.5 dargestellt sind, analysiert. Neben den Meßwerten ist auch das Ergebnis einer Bearbeitung mit dem Wiener-Filter (Kollokation) dargestellt. Die zugehörigen Leistungsspektren für die horizontale und die vertikale Komponente zeigen die Abb. 4.6 a bis d. In den Abweichungen in Abb. 4.5 wird bereits - vor allem in der Lagekomponente - die pe-

riodische Charakteristik des Signals ersichtlich. Genauere Aufschlüsse gewinnt man aus den Spektren in Abb. 4.6.

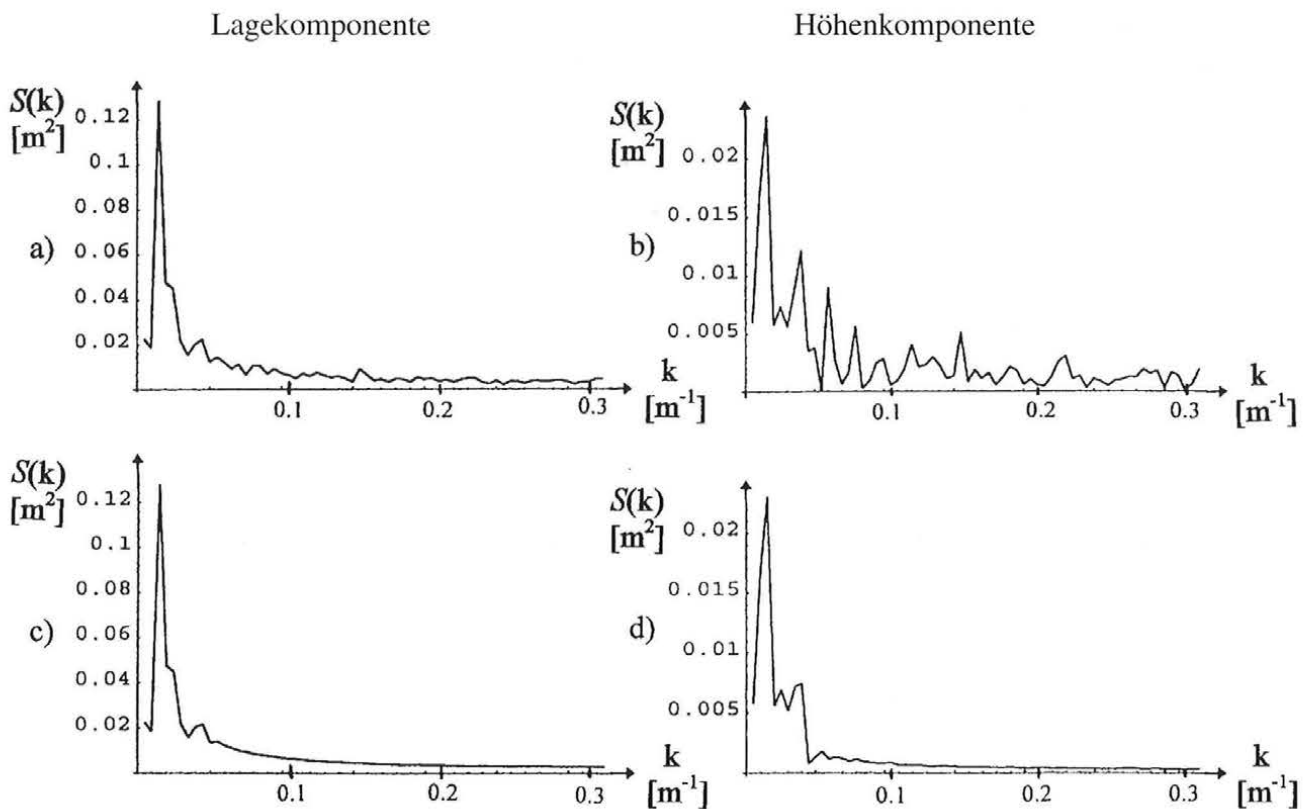


Abb. 4.6: Leistungsspektren $S(k)$ der Abweichungen aus Abb. 4.5
a) und b) Meßwertreihe; c) und d) Ergebnis der Wiener-Filterung

Die Periodizität mit der größten erfaßten Wellenlänge wird durch das Maximum an Energiedichte beschrieben. Für den betrachteten Gleisabschnitt ergibt sich eine Wellenlänge λ von ca. 74 m für die Lagekomponente (Abb. 4.6 a) und von ca. 78 m für die Höhenkomponente (Abb. 4.6 b). Weiters treten noch Schwingungen mit Wellenlängen von ungefähr 44, 24 und 18 m in Lage und 42, 27 und 18 m in Höhe auf.¹ Eine Abschätzung von kleineren Periodizitäten war in diesem Fall nicht mehr möglich. Die bestimmten Wellenlängen der Gleisfehlagen sind realistisch und physikalisch möglich, da die Existenz von periodischen Fehllagen dieser Größenordnung durch Oberbaumeßfahrten nachgewiesen werden konnte. Die spektrale Darstellung des Filterergebnisses (Abb. 4.6 c und d) erleichtert mitunter die Abgrenzung der periodischen Schwingungen mit kleinen Wellenlängen von kurzperiodischen Oberschwingungen, da diese hier gemeinsam mit dem Einfluß des Rauschens bereits zum größten Teil eliminiert wurden (Abschnitt 4.3.1). Dies wird besonders bei der Höhenkomponente in Abb. 4.6 b und d deutlich.

Für den effektiven Einsatz der in Kapitel 3 beschriebenen Filtermethoden muß die Größenordnung der periodischen Gleisfehlagen genähert bekannt sein, denn bestimmte Filtereinstellungen müssen darauf abgestimmt werden. Zur Abschätzung der in der Meßwertreihe auftretenden Wellenlängen kann die spektrale Betrachtungsweise verwendet werden.

¹ Alle Perioden gehen aus der graphischen Darstellung des Spektrums nicht so klar hervor, man erhält sie jedoch eindeutig bei der mathematischen Berechnung.

4.2 Untersuchung von Filtereinstellungen anhand simulierter Meßwerte

In diesem Abschnitt wird die Wirkungsweise der Filtermethoden bei Veränderung wesentlicher Parameter im stochastischen Modell (Abschnitt 3.2 und 3.4) vorerst anhand von simulierten Meßwertreihen näher untersucht. Eine Simulation hat gegenüber der Auswertung von realen Messungen den Vorteil, daß die einzelnen Komponenten der Meßwertreihe (Signal und Noise) bekannt sind und daher die Möglichkeit einer objektiveren Beurteilung der Filterergebnisse besteht. Anschließend wird im Abschnitt 4.3 die Einsetzbarkeit der auf diese Weise gewonnenen optimalen Filtereinstellungen für reale Messungen unter Beweis gestellt.

Für die folgenden Untersuchungen wird näherungsweise eine periodische Gleisfehlage sowohl für die horizontale als auch vertikale Komponente angenommen. Das Signal kann beispielsweise durch eine Sinusschwingung der Form

$$s(l) = A \cdot \sin \frac{2\pi \cdot l}{\lambda} \quad (4.5)$$

beschrieben werden, wobei A die Amplitude und λ die Wellenlänge ist. Abb. 4.7 a zeigt das Signal $s(l)$ für eine Amplitude von $A = 20$ mm und eine Wellenlänge von $\lambda = 60$ m. Der Anteil des Rauschens (Noise) wird bei der Simulation zur Gänze durch das Meßrauschen beschrieben. Die Standardabweichung des Meßrauschens in Abb. 4.7 b wurde mit ± 3 mm angenommen. In Abb. 4.7 c sind Signal und Noise der simulierten Meßwertreihe gemeinsam dargestellt. Der Abstand der Meßpunkte beträgt hier 2 m.

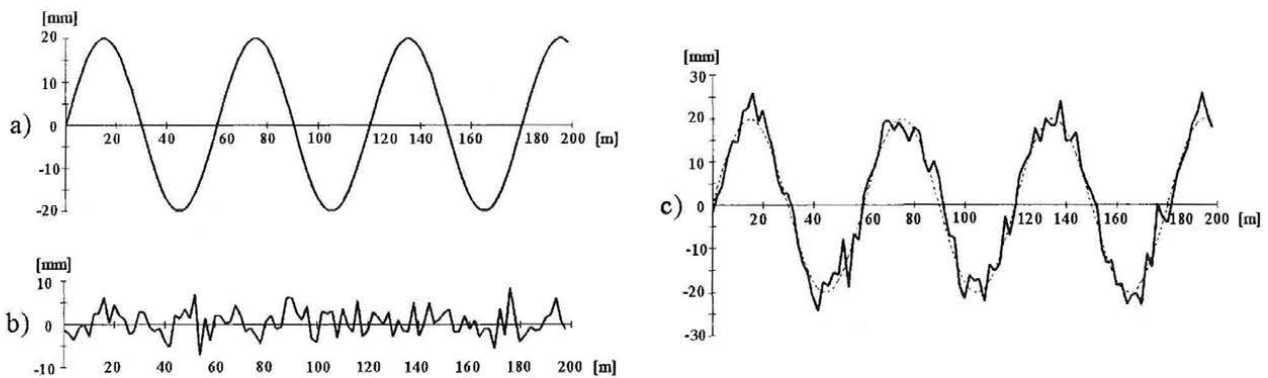


Abb. 4.7: Anteile der simulierten Meßwertreihe:
a) Signal, b) Noise und c) Signal und Noise

4.2.1 Optimale Einstellungen beim Wiener-Filter

Beim Wiener-Filter wird die Gewichtung zwischen Signal und Noise im stochastischen Modell in erster Linie von der Standardabweichung des Meßrauschens und der Form der Kovarianzfunktion für die Signalgrößen festgelegt (Abschnitt 3.4.2). Für die Kovarianzfunktionen werden Funktionen vom Typ $C_2(k)$ nach Glg. (3.52) verwendet, die in Abb. 3.7 (Abschnitt 3.4.3) dargestellt sind. Eine Variation der Parameter der Kovarianzfunktion führt zu unterschiedlichen Filterergebnissen.

Die Breite der Kovarianzfunktion und damit die Anzahl der benachbarten Meßpunkte, die bei der Berechnung berücksichtigt werden, beschreibt der Parameter a . In Abb. 4.8 sind die Filterergebnisse mit Werten von 5, 20 und 50 m für a bei Filterung der simulierten Meßwertreihe aus Abb. 4.7 dargestellt.

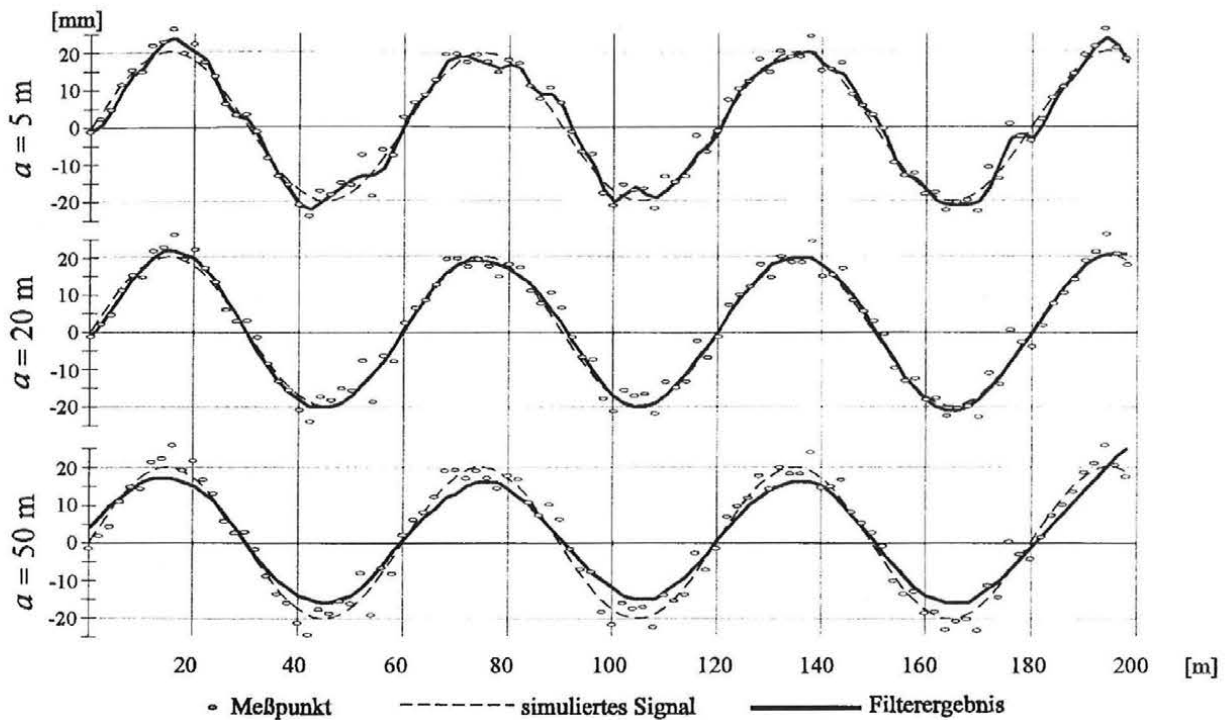


Abb. 4.8: Filterergebnisse mit unterschiedlichen Werten für den Parameter a der Kovarianzfunktion

Mit einem Parameter $a = 5$ m wird das Meßrauschen nicht zur Gänze eliminiert. Das sinusförmige Signal ist noch von unregelmäßigen Anteilen überlagert. Durch Verbreiterung der Kovarianzfunktion kann das Meßrauschen weiter reduziert und der Grad der Glättung verbessert werden. Bei $a = 50$ m werden jedoch bereits regelmäßige Anteile des Signals eliminiert. Eine zu starke Filterung reduziert also nicht nur den Noise, sondern verkleinert auch das Signal. In diesem Fall erhält man ein gutes Filterergebnis mit einem Wert von ungefähr 20 m für a . Da bei simulierten Messungen die Sollwerte vorliegen, kann ein optimaler Parameter a_{opt} über das Minimum der Standardabweichung der wahren Schätzfehler ermittelt werden. Für den vorliegenden Fall mit einer Signalwellenlänge λ von 60 m liegt a_{opt} zwischen 24 und 25 m. Im Vergleich zu $a = 20$ m führt eine Filterung mit a_{opt} zu keinen signifikanten Verbesserungen mehr, die Standardabweichung der wahren Schätzfehler bleibt bei ungefähr ± 1 mm. Kleine Veränderungen von a führen demnach zu keinen signifikanten Veränderungen des Filterergebnisses. Allgemein kann a_{opt} für verschiedene Wellenlängen λ des Signals $s(l)$ folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$a_{\text{opt}} \approx \frac{2}{5} \cdot \lambda . \quad (4.6)$$

Die Glg. (4.6) liefert auch für nicht streng periodische Signale ohne eindeutiger Wellenlänge gute Filtereinstellungen. Zur Abschätzung von a genügt in den meisten Fällen ein Mittelwert für die auftretenden Wellenlängen λ (Abschnitt 4.3.1).

Eine Veränderung des Scheitelwerts C_0 der Kovarianzfunktion beeinflusst zusätzlich den Grad der Glättung des Signals. Kleine Werte für C_0 erzeugen starke Glättungen. Der Sonderfall $C_0=0$ führt zu einer völligen Unterdrückung des Signals. Bei großen Werten für C_0 (in der Größenordnung der Varianz) wird hingegen die Wirkung des Filters nicht verstärkt.

4.2.2 Optimale Einstellungen beim Kalman-Filter

Das Ergebnis einer Kalman-Filterung wird hauptsächlich durch die gewählte Systemordnung und die Standardabweichung des Systemrauschens $\sigma_{w'}$ beeinflusst. Die Grundsätze, die bei der Wahl der Systemordnung beachtet werden sollen, wurden bereits ausführlich in Abschnitt 3.2.3 behandelt. Nachfolgend wird ausgehend von einem Systemmodell 1. Ordnung die Wirkung der Variation von $\sigma_{w'}$ auf das Filterergebnis untersucht. Abb. 4.9 enthält die Ergebnisse mit Werten von ± 0 , ± 1 und ± 10 mm für $\sigma_{w'}$ bei Filterung der simulierten Meßwertreihe aus Abb. 4.7.

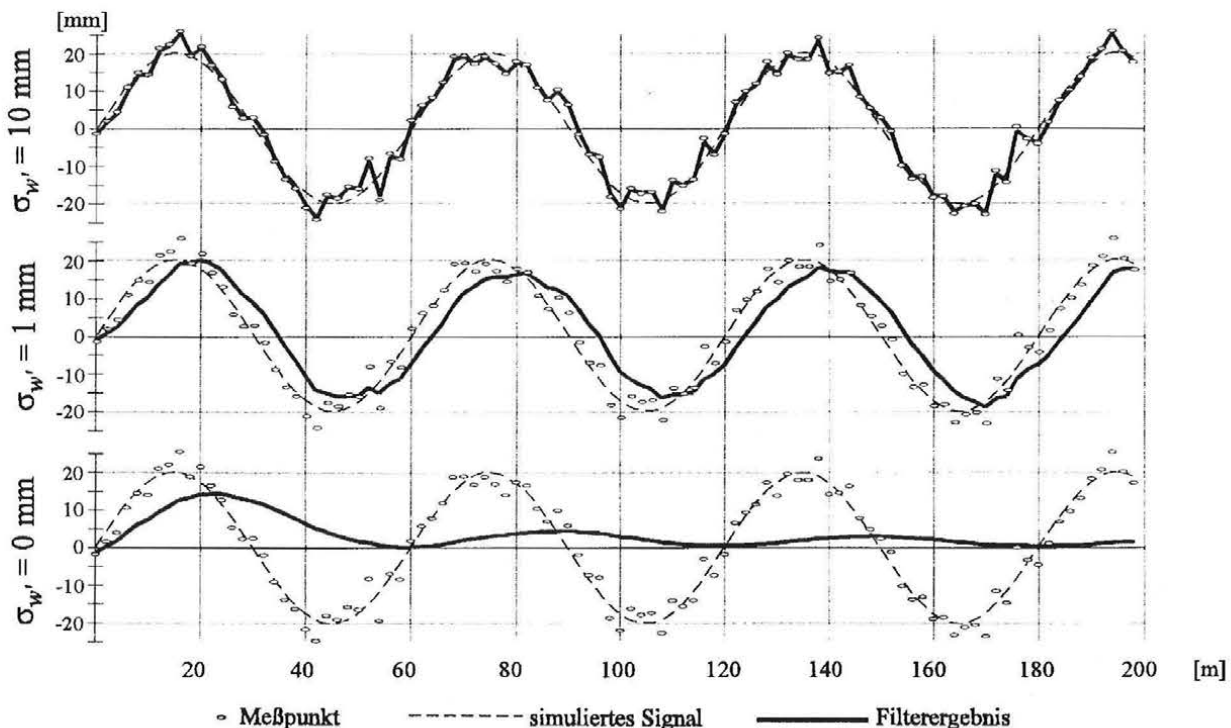


Abb. 4.9: Filterergebnisse bei einem Systemmodell 1. Ordnung und unterschiedlichen Werten für die Standardabweichung des Systemrauschens $\sigma_{w'}$

Bei einer großen Standardabweichung für das Systemrauschen $\sigma_{w'}$ von ± 10 mm stimmt das Filterergebnis nahezu mit den Meßwerten überein. Der Filter zeigt keine Wirkung. Andererseits geht durch einen zu kleinen Wert für $\sigma_{w'}$ (± 0 mm) das Gewicht der Messungen verloren und der Filter verläßt sich in erster Linie auf die Prädiktion. Wegen der ungenügenden Korrektur der Prädiktionswerte folgt der Schätzwert dem simulierten sinusförmigen Signal nicht mehr. Mit $\sigma_{w'} = \pm 1$ mm kann das Meßrauschen größtenteils eliminiert werden und es wird ein guter Glättungsgrad erreicht. Das Filterergebnis ist jedoch um nahezu 3-4 m gegenüber dem simulierten sinusförmigen Signal phasenverschoben. Dadurch erhält man einen systematischen Schätzfehler von ca. 9 mm. Die Hauptursache der Phasenverschiebung liegt darin, daß beim Kalman-Filter zur Schätzung des Systemzustandes für einen Punkt nur die Meßwerte der vor-

angehenden Punkte einbezogen werden, alle nachfolgenden Messungen bleiben unberücksichtigt (Abschnitt 3.2). Ein Minimum für den wahren Schätzfehler erhält man mit einer Standardabweichung für das Systemrauschen σ_w von ± 4 bis 5 mm. Der minimale Schätzfehler ist jedoch nur 0,3 mm kleiner als die Standardabweichung des Meßrauschens, die a priori mit ± 3 mm angenommen wurde. Der Filter ist demnach nicht in der Lage die Genauigkeit der Meßwerte signifikant zu erhöhen.

Die Wahl einer höheren Systemordnung führt zu einer geringfügigen Verbesserung, wobei sich die Ergebnisse bei einem Systemmodell 2. oder 3. Ordnung kaum unterscheiden. Eine weitere Erhöhung der Systemordnung ist aus den in Abschnitt 3.2.3 angeführten Gründen nicht sinnvoll. Bei der Auswertung von Messungen ist daher zwischen einer Minimierung des Schätzfehlers und einer optimalen Glättung des Signals abzuwägen. Aus empirischen Untersuchungen wurden die in Tab. 4.1 angeführten Standardabweichungen für das Systemrauschen σ_w in Abhängigkeit des Meßpunktabstandes Δl und der Ordnung des Modells gefunden.

Systemordnung	Abhängigkeit vom Punktabstand Δl	Punktabstand Δl in [m]			
		1.7	2.0	2.5	5.0
1. Ordnung	$\pm 3.0 / \sqrt{\Delta l}$	± 2.3	± 2.1	± 1.9	± 1.3
2. Ordnung	$\pm 0.5 / \sqrt{\Delta l^3 / 3}$	± 0.4	± 0.3	± 0.2	± 0.08
3. Ordnung	$\pm 0.07 / \sqrt{\Delta l^5 / 20}$	± 0.08	± 0.06	± 0.03	± 0.01

Tab. 4.1: Standardabweichungen für das Systemrauschen σ_w in [mm]

Wählt man einen kleineren Wert für σ_w , so erhöht sich der Grad der Glättung. Sehr hochfrequente bzw. kurzperiodische Anteile des Signals werden gemeinsam mit dem Meßrauschen eliminiert. Umgekehrt ergibt sich bei größeren Werten für σ_w ein unruhiger Verlauf für das Signal.

4.3 Filterung realer Meßwertreihen

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2 gewonnenen Richtwerte für die Parameter im stochastischen Modell wurden die durchgeführten Meßserien ausgewertet. Besonders von Interesse ist deren Anwendung auf Gleisfehlagen, die nicht unbedingt die Charakteristik des simulierten Signals aufweisen. Weiters soll untersucht werden, ob wesentliche Unterschiede bei der Auswertung von Meßwertreihen, die entweder mit dem terrestrischen Polarmeßsystem (Abschnitt 5.2.1) oder mittels GPS (Abschnitt 5.2.2) bestimmt wurden, bestehen. Nachfolgend werden ausgewählte Beispiele dargestellt.

4.3.1 Anwendung des Wiener-Filters

Bei der Bearbeitung von realen Meßwertreihen muß vorerst ein geeigneter Wert für den Parameter a der Kovarianzfunktion abgeschätzt werden (Abschnitt 4.2.1). Dazu muß die Größenordnung der Wellenlängen der periodischen Anteile in den Messungen genähert bekannt sein. Für die Meßwertreihe TH282.MES wurden die Wellenlängen bereits in Abschnitt 4.1.2 durch eine Spektralanalyse bestimmt. Mit Hilfe der Glg. (4.6) erhält man Werte von 30,

17, 10 und 7 m für den Parameter a . Abb. 4.10 (s. Tafel 1) zeigt die Berechnungsergebnisse bei Anwendung der Wiener-Filterung mit $a = 30$, 17 und 10 m stellvertretend für die Höhenkomponente bezogen auf die Solltrasse TR2.ETR. Das Filterergebnis mit $a = 7$ m unterscheidet sich kaum mehr von der Berechnungsvariante mit $a = 10$ m, deshalb wurde auf eine Darstellung verzichtet. Die Standardabweichung des Meßrauschen wurde a priori mit ± 3 mm angesetzt. In Abb. 4.5 ist das Filterergebnis mit $a = 20$ m sowohl für die Lage- als auch Höhenkomponente dargestellt.

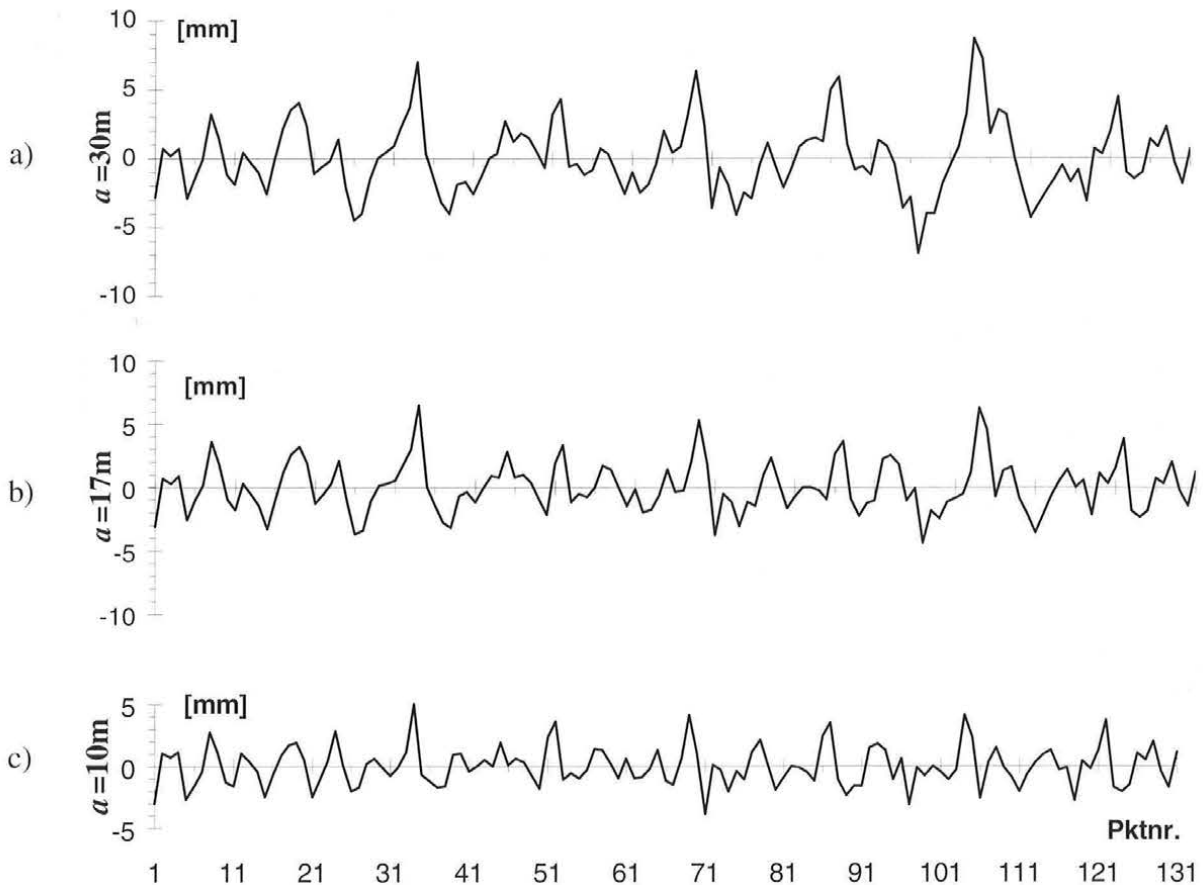


Abb. 4.11: Verbesserungen der Meßwerte in der Höhenkomponente bei Anwendung der Wiener-Filterung

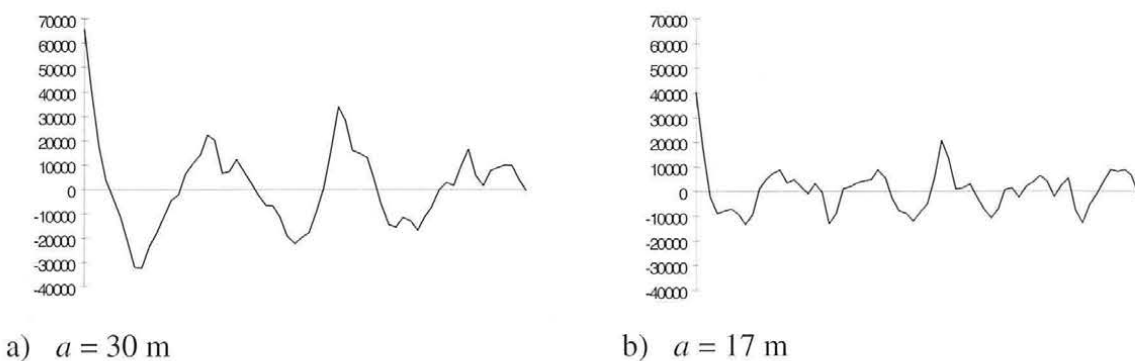


Abb. 4.12: Autokovarianzfunktionen $C(l)$ der Verbesserungen

Zwischen den einzelnen Berechnungsvarianten ergeben sich Differenzen von maximal 3 mm im Höhenverlauf. Die Variante mit $a = 30$ m, die erwartungsgemäß den höchsten Glättungsgrad erzielt, hebt sich deutlich von den anderen Ergebnissen ab. Eine genauere Bewertung der Ergebnisse kann mit den Verbesserungen an die Meßwerte durch die Filterung vorgenommen werden (Abb. 4.11). Die Differenzen zwischen den Messungen und dem Berechnungsergebnis beschreiben eine Schätzung für den Noise und sollen daher rein zufälligen Charakter besitzen und keine systematischen Anteile enthalten. Bei einer Filterung mit $a = 30$ m zeichnen sich bereits systematische Anteile in den Schätzwerten für den Noise ab (Abb. 4.11 a), was durch eine Berechnung der Autokovarianzfunktion $C(l)$ für die Verbesserungen bestätigt wird (Abb. 4.12 a). Hierbei werden auch Signalanteile der Perioden mit kleineren Wellenlängen gemeinsam mit dem Meßrauschen eliminiert. Sollen diese Anteile nicht als Rauschen interpretiert werden, so ist eine Reduktion des Parameters a vorzunehmen. Für die beiden anderen Berechnungsvarianten ergeben sich Schätzwerte für den Noise, die einen zufälligen Verlauf aufweisen (Abb. 4.11 b und c). Abb. 4.12 b zeigt die Autokovarianzfunktion $C(l)$ der Verbesserungen für $a = 17$ m. Bei dieser Berechnungsvariante werden die zufälligen Meßfehler zum größten Teil eliminiert. Die verwendete Filtereinstellung, die auch ungefähr dem Mittelwert der Parameterwerte a entspricht, erzielt einen guten Schätzwert für das Signal und scheint sich demnach gut zu eignen. Da der Filter auf geringfügige Änderungen von a nur unerheblich reagiert, kann in diesem Fall auch der Standardwert von 20 m für a (Darstellung in Abb. 4.5) verwendet werden.

In Abb. 4.13 (s. Tafel 1) sind die Filterergebnisse einer GPS-Meßwertreihe (TH115V.MES) dargestellt. Im Gegensatz zur Bearbeitung von Messungen mit dem Tachymeter muß bei der Filterung von GPS-Messungen ein größerer Wert für die Standardabweichung des Meßrauschens a priori angesetzt werden ($n = \pm 10$ mm). Die größere Streuung der Meßwerte ist eindeutig in der Abb. 4.13 sowohl für die Lage- als auch Höhenkomponente ersichtlich. Bekannterweise ist das Meßrauschen bei GPS-Messungen in der Höhe nahezu um den Faktor 1.5 bis 2 größer als in der Lage. Die Berechnungsvariante mit $a = 20$ m und $n = \pm 3$ mm liefert ein Filterergebnis, das beinahe völlig mit der Variante $a = 15$ m und $n = \pm 10$ mm übereinstimmt. Erwartungsgemäß erzielt man mit diesen Vorgaben den geringsten Glättungsgrad. Den besten Schätzwert für das Signal erhält man mit einem Wert von 20 m für den Parameter a . Bei $a = 30$ m werden wiederum systematische Anteile des Signals gemeinsam mit dem Noise durch die Filterung eliminiert.

Einen direkten Vergleich zwischen einer Gleisaufnahme mit dem terrestrischen Polarmeßsystem und mit GPS zeigt die Abb. 4.14 (s. Tafel 2). Für die Bearbeitung der Meßwertreihen mit dem Wiener-Filter wurden die vorhin bestimmten Einstellungen gewählt ($a = 20$ m, $n = \pm 3$ mm für terrestrische bzw. $n = \pm 10$ mm für GPS-Messungen). Die Solltrasse wurde aus den terrestrischen Messungen mit der Vorgabe berechnet, daß am Anfang und Ende der Aufnahme keine Abweichungen auftreten dürfen. Dadurch kann an eine bestehende Gleislage direkt angeschlossen werden, ohne daß diese einer Gleiskorrektur unterzogen werden muß. Diese Vorgabe kann durch eine höhere Gewichtung der Messungen am Anfang und Ende bei der Berechnung des Trends (Abschnitt 3.4.3) erfüllt werden.

Die Differenzen zwischen den Schätzwerten für das Signal, die aus den terrestrischen und GPS-Messungen berechnet wurden, liegen größtenteils unter 10 mm. Die maximalen Abweichungen in Lage treten in der Umgebung von Punkt 45 und 97 mit ca. 13.5 mm auf. Im Höhenverlauf ergeben sich maximale Differenzen von 31.4 mm bei Punkt 43 und ca. 19 mm am Anfang und Ende des betrachteten Gleisabschnitts, ansonsten liegen die Abweichungen auch

unter 10 mm. Zwischen den Meßpunkten 9 und 35 konnten keine GPS-Messungen durchgeführt werden, die Schätzwerte des Signals stimmen deshalb mit denen, die aus den terrestrischen Meßwerten bestimmt wurden, überein. Die Eisenbahnstrecke überquert in diesem Bereich einen Fluß auf einer Bogenbrücke, die aus einer Stahlkonstruktion besteht. Die Stahlträger verursachten so starke Multipath-Effekte (Mehrwegausbreitung), daß eine GPS-Messung nicht möglich war.

Der Vergleich zwischen den terrestrischen und GPS-Messungen zeigt, daß das terrestrische Meßsystem eine höhere innere Genauigkeit und Homogenität als das GPS-System aufweist. Das GPS-System liefert im Gegensatz zur terrestrischen Aufnahme geringere Genauigkeiten für die absolute Gleislage. Sie erreicht Standardabweichungen von ca. 10 mm in Lage und 15 mm in Höhe. Beide Meßverfahren liefern jedoch annähernd die gleiche Genauigkeit für die relative Gleislage bzw. Krümmung. Abb. 4.15 (s. Tafel 2) zeigt das Krümmungsbild der mit dem Wiener-Filter bearbeiteten Meßdaten.

Eine Einteilung der Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ benachbarter Punkte in verschiedene Klassen ergab die in Abb. 4.16 dargestellte Verteilung, wobei die Istkrümmung um die Sollkrümmung bereinigt wurde (Abschnitt 6.2.1). Der Großteil der Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ liegt in der ersten Klasse, d.h. unterhalb von $0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Nur wenige Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ überschreiten den Wert von $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (Klasse 3 und 4). Zu einer Überschreitung des Grenzwertes von $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (Klasse 4) kommt es nur in Ausnahmefällen, vor allem im Übergangsbereich zwischen unterschiedlichen Trassenelementen. In diesem Fall wird der Maximalwert von $\Delta\kappa$ im Übergangsbereich zwischen Gerade und Klotoide (bei ca. 66 m in Abb. 4.15) mit $4.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ erreicht. Die Genauigkeit in der relativen Gleislage für die gefilterten Meßdaten beider Meßverfahren unterscheidet sich nicht signifikant, wenn die Standardabweichungen des Meßrauschens n a priori entsprechend gewählt werden ($n = \pm 3 \text{ mm}$ für Messungen mit dem terrestrischen Polarmeßsystem und $n = \pm 10 \text{ mm}$ für GPS-Messungen). Wird hingegen die Standardabweichungen des Meßrauschens für die GPS-Messungen zu klein angesetzt, verschlechtert sich das Filterergebnis und damit auch die Verteilung der Krümmungsdifferenzen in den einzelnen Klassen.

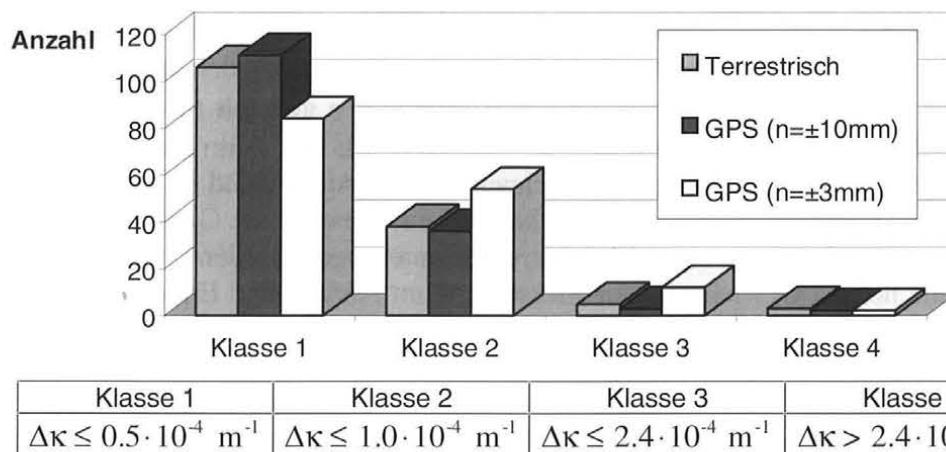


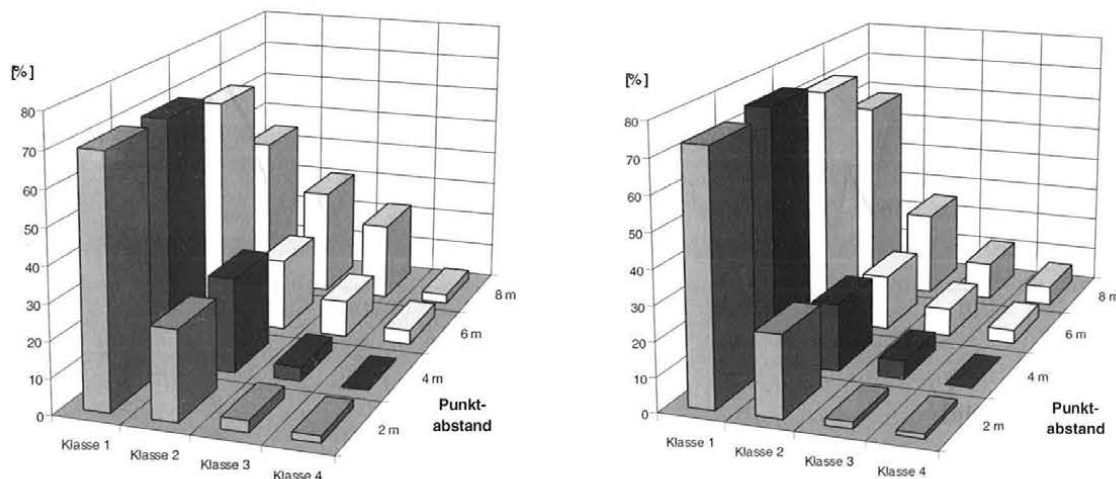
Abb. 4.16: Klassifizierung der Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ benachbarter Punkte

Eine Analyse weiterer Meßserien hinsichtlich der Genauigkeit der relativen Gleislage ergab folgendes Ergebnis:

- rund 65 % aller Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ liegen unter dem Wert von $0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$,
- maximal 10 % der Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ überschreiten den Grenzwert von $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ und
- abgesehen von einigen Ausreißern liegen alle Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ unter dem Grenzwert von $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.

Da alle untersuchten Gleisaufnahmen auf Nebenbahnlinien ausgeführt wurden, folgt aus Tab. 6.2 in Abschnitt 6.2.1 eine Toleranz von $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ für die Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$, die nicht überschritten werden darf. Das mittels Kollokation aus den Meßwertreihen bestimmte Signal erfüllt demnach bis auf wenige Ausnahmen die gestellten Anforderungen.

Die getroffenen Aussagen beziehen sich auf Meßpunktabstände von 2 m. Aus wirtschaftlichen Überlegungen wird man in der Praxis größere Punktabstände wählen (Abschnitt 4.1.1). Die Abb. 4.17 enthält eine Gegenüberstellung der klassifizierten Krümmungsdifferenzen für Punktabstände von 2, 4, 6 und 8 m sowohl für Gleisaufnahmen mit dem terrestrischen Polar-meßsystem als auch mit GPS.



a) Meßwertreihe des Tachymeters

b) GPS-Meßwertreihe

Abb. 4.17: Krümmungsgenauigkeit in Abhängigkeit des Meßpunktabstandes (Klasseneinteilung wie in Abb. 4.16)

Die besten Ergebnisse für die Genauigkeit der relativen Gleislage erhält man mit den Punktabständen 2 und 4 m, wobei keine Unterschiede sowohl für terrestrische als auch GPS-Messungen festgestellt werden können. Eine signifikante Verschlechterung der Krümmungsgenauigkeit tritt erst bei einer Verringerung des Punktabstandes auf 8 m ein. Bei beiden Meßverfahren liegen nur mehr rund 50 % aller Krümmungsdifferenzen in Klasse 1, d.h. unter dem Grenzwert von $0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Bei einem Punktabstand von 6 m nehmen ebenfalls die Werte in den Klasse 3 und 4 zu. Der größte Prozentsatz der Krümmungsdifferenzen liegt aber nach wie vor in Klasse 1 und 2 (unter $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$). Eine genauere Analyse des Krümmungsverlaufes zeigt jedoch, daß bei diesem Meßpunktabstand eine exakte Bestimmung der Übergangspunkte zwischen den einzelnen Trassierungselementen nur sehr schwer möglich ist, da der Filter zu einer Ausrundung des Krümmungsverlaufes im Übergangsbereich führt. Die Filterung der Meßdaten erreicht bei Punktabständen bis zu 5 m für beide Meßverfahren eine gute Reduktion

des Meßrauschens, so daß auch bei den GPS-Messungen trotz größerem Meßrauschen kein dichteres Abtastintervall gewählt werden muß. Für den Einsatz des Systems in der Praxis empfiehlt sich demnach ein Meßpunktabstand von 4 bis 5 m.

4.3.2 Anwendung des Kalman-Filters

Ausgehend von den Standardabweichung für das Systemrauschen σ_w in Tab. 4.1 (Abschnitt 4.2.2) erfolgt nun eine Bearbeitung von realen Meßwertreihen mit dem Kalman-Filter. Die Abb. 4.18 (s. Tafel 3) zeigt das Ergebnis einer Kalman-Filterung für die Höhenkomponente der terrestrische Meßwertreihe TH282.MES bezogen auf die Solltrasse TR2.ETR. Für die Auswertung wurde ein Systemmodell 2. Ordnung verwendet, wobei ein Systemrauschen nur für die erste Ableitung des Zustandsvektors zugelassen wird (Abschnitt 3.2.3). Aus Tab. 4.1 entnimmt man einen Wert von ± 0.4 mm für σ_w bei einem Punktabstand von 1.7 m. Zum Vergleich wurden auch Berechnungsergebnisse mit $\sigma_w = \pm 0.04$ und ± 0.2 mm dargestellt. Für das Meßrauschen wurde eine Standardabweichung von ± 3 mm vorgegeben. Die getroffenen Aussagen gelten sinngemäß für die Lagekomponente, deshalb wurde ähnlich wie bei der Wiener-Filterung auf eine Darstellung der Lageabweichungen verzichtet.

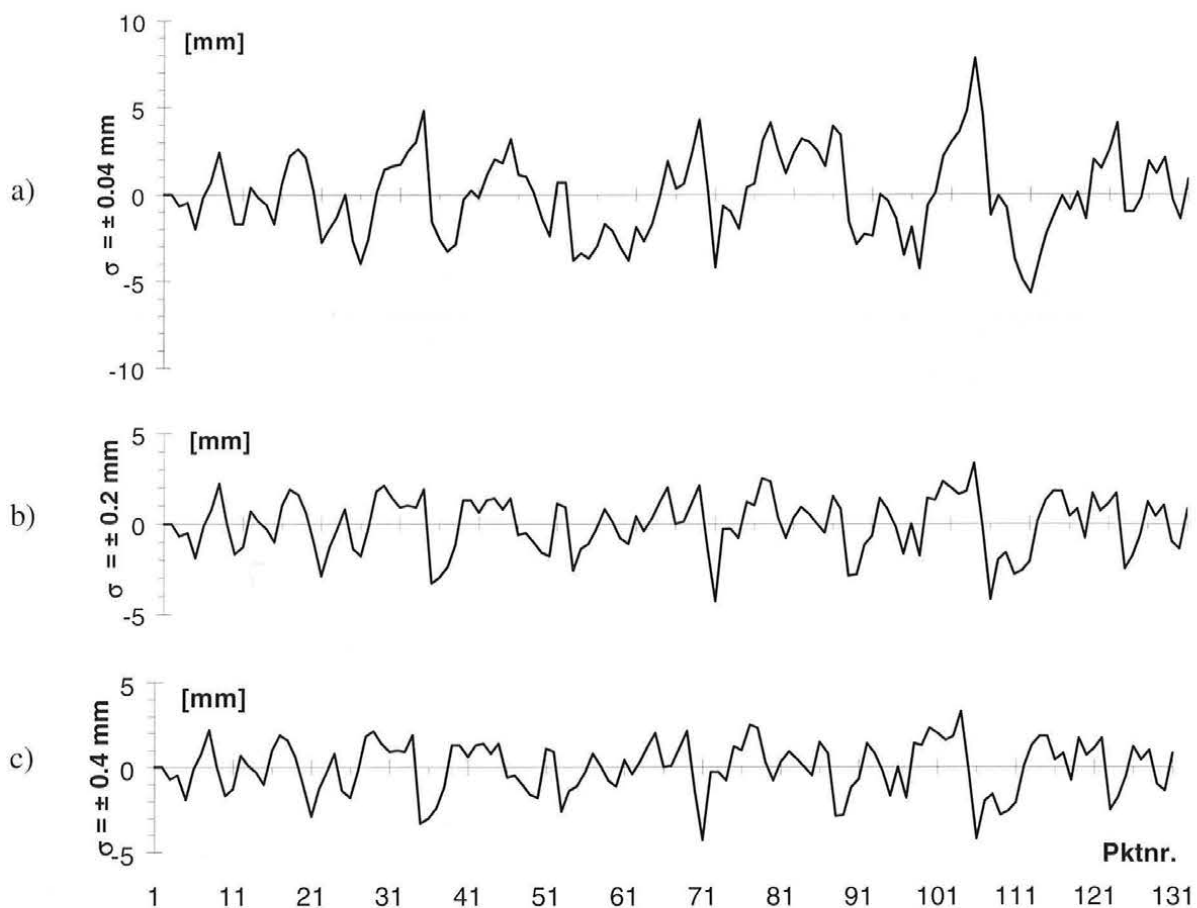


Abb. 4.19: Verbesserungen der Meßwerte in der Höhenkomponente bei Anwendung der Kalman-Filterung

Die einzelnen Berechnungsvarianten ergeben Unterschiede von bis zu 6 mm im Höhenverlauf. Die Qualität des Filterergebnisses entspricht den Erwartungen aus Abschnitt 4.2.2. Der Glätungsgrad des Filters ist geringer als bei der Bearbeitung der Meßwertreihe mit dem Wiener-Filter. Eine bessere Bewertung des Ergebnisses liefern wiederum die Differenzen zwischen den

Meßwerten und dem Berechnungsergebnis, die in Abb. 4.19 dargestellt sind. Die Verbesserungen beschreiben eine Schätzung für den Noise und sollen daher rein zufälligen Charakter besitzen und keine systematischen Anteile enthalten. Eine Verkleinerung von $\sigma_{w'}$ erhöht den Grad der Glättung. Der Noise in Abb. 4.19 a ($\sigma_{w'} = \pm 0.04$ mm) enthält bereits systematische Anteile. Dies zeigt auch die Autokovarianzfunktion $C(l)$ der Verbesserungen in Abb. 4.20 a. Eine Filterung mit einem Wert von ± 0.04 mm für $\sigma_{w'}$ führt außerdem zu einer Verzögerung bzw. Phasenverschiebung in den Perioden des geschätzten Signals (Abb. 4.15). Dadurch entsteht ein systematischer Schätzfehler (Abschnitt 4.2.2). Im Gegensatz dazu weist das Rauschen in den Abb. 4.16 b und c ($\sigma_{w'} = \pm 0.2$ und ± 0.4 mm) einen für zufällige Fluktuationen typischen Verlauf auf. In Abb. 4.20 b ist die Autokovarianzfunktion $C(l)$ der Verbesserungen für $\sigma_{w'} = \pm 0.2$ mm dargestellt. In beiden Fällen erhält man realistische Werte für den Noise, die sich geringfügig voneinander unterscheiden (maximale Differenz ca. 1.5 mm). Daraus folgt, daß die mit simulierten Messungen gewonnenen Filtereinstellungen aus Abschnitt 4.2.2 auch für die vorliegende Meßwertreihe angewendet werden können, obwohl die betrachteten Gleisfehlagen unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Die Standardabweichung des Systemrauschens kann jedoch um bis zu 50 % gegenüber dem Wert in Tab. 4.1 reduziert werden, um den Grad der Glättung zu erhöhen.

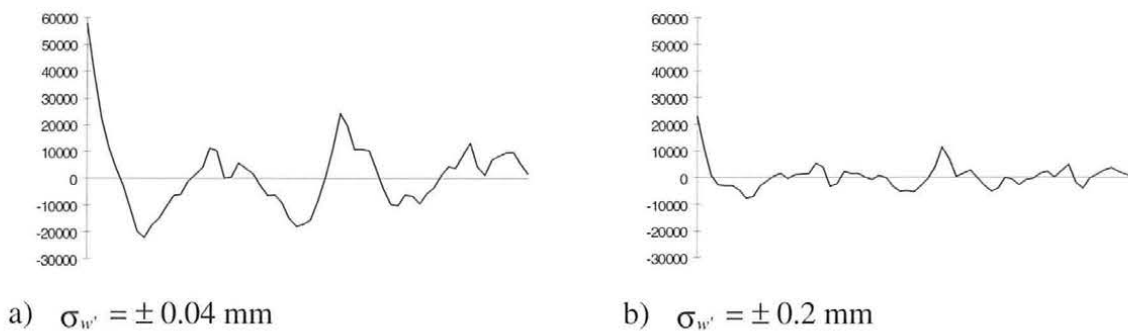


Abb. 4.20: Autokovarianzfunktionen $C(l)$ der Verbesserungen

Bei der Filterung von GPS-Messungen muß, wie in Abschnitt 4.3.1 bereits erwähnt, ein größerer Wert für die Standardabweichung des Meßrauschens a priori angesetzt werden (z.B. ± 10 mm). Die Berechnungsergebnisse der GPS-Meßwertreihe TH115V.MES mit Standardabweichungen $\sigma_{w'}$ von ± 0.3 , ± 0.03 und ± 0.17 mm sind in Abb. 4.21 (s. Tafel 3) dargestellt. Der Abstand der Meßwerte beträgt hier 2 m. Die Meßwerte werden im Gegensatz zu den terrestrischen Meßserien durch die Filterungen wesentlich stärker verbessert. Wählt man die Standardabweichung des Systemrauschens $\sigma_{w'}$ zu klein (± 0.03 mm), so tritt wie vorhin eine Phasenverschiebung zwischen Meßwertreihe und Filterergebnis auf. Die Schätzwerte für das Rauschen enthalten wiederum systematische Anteile. Die Ergebnisse mit $\sigma_{w'} = \pm 0.3$ mm (folgt aus Tab. 4.1) und $\sigma_{w'} = \pm 0.17$ mm unterscheiden sich erwartungsgemäß hinsichtlich ihres Glättungsgrades. Die Differenz zwischen beiden Berechnungsvarianten ist im Vergleich zur Auswertung der terrestrischen Meßwertreihe größer, wobei der Noise für beide Schätzung eine zufällige Charakteristik aufweist. Um einen höheren Grad an Glättung zu erhalten, sollte demnach bei GPS-Meßserien auf jeden Fall eine Reduktion der Werte für $\sigma_{w'}$ in Tab. 4.1 um 50 % vorgenommen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß ausgehend von den Untersuchungen in Abschnitt 4.2 eine geeignete Filtereinstellung für reale Messungen abgeschätzt werden kann, auch wenn die Fehllagen von Gleisen verschiedene Charakteristiken aufweisen. Beim Wiener-Filter genügt ein aus dem Mittelwert der auftretenden Wellenlängen abgeschätzter Wert für

den Parameter a der Kovarianzfunktion, zumal der Filter nicht sehr empfindlich auf kleine Änderung von a reagiert. Tab. 4.1 enthält gute Richtwerte für die Abschätzung der Standardabweichung des Systemrauschens σ_w beim Kalman-Filter. Gegebenenfalls wird eine Reduktion der Werte um bis zu 50 % empfohlen. Durch eine Analyse der Schätzungen für den Noise, kann die gewählte Filtereinstellung überprüft werden.

4.4 Vergleich zwischen Kalman-Filterung und Kollokation

Ein Vergleich der Filterergebnisse in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den gefilterten Daten. Die Kollokation erzielt im allgemeinen einen höheren Glättungsgrad als die Kalman-Filterung und es treten keine Phasenverschiebungen zwischen dem Filterergebnis und der Meßwertreihe auf (vergl. Abb. 4.10 und Abb. 4.18). Zur Dokumentation der Größenordnung der Unterschiede sind die Differenzen einer Auswertung mit dem Wiener- bzw. Kalman-Filter für die Lage- und Höhenkomponente des Signals für die terrestrische Meßwertreihe TH282.MES in Abb. 4.22 dargestellt.

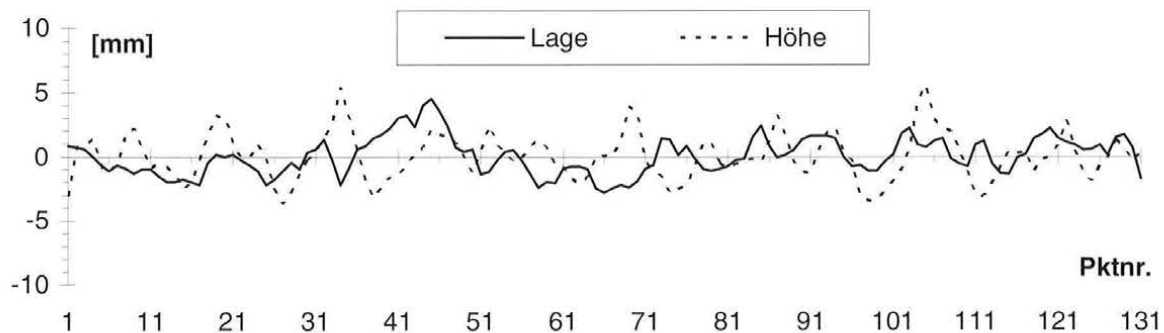


Abb. 4.22: Differenz der Filterergebnisse einer Kollokation ($a = 17$ m) und Kalman-Filterung ($\sigma_w' = \pm 0.2$ mm) der terrestrischen Meßwertreihe TH282.MES

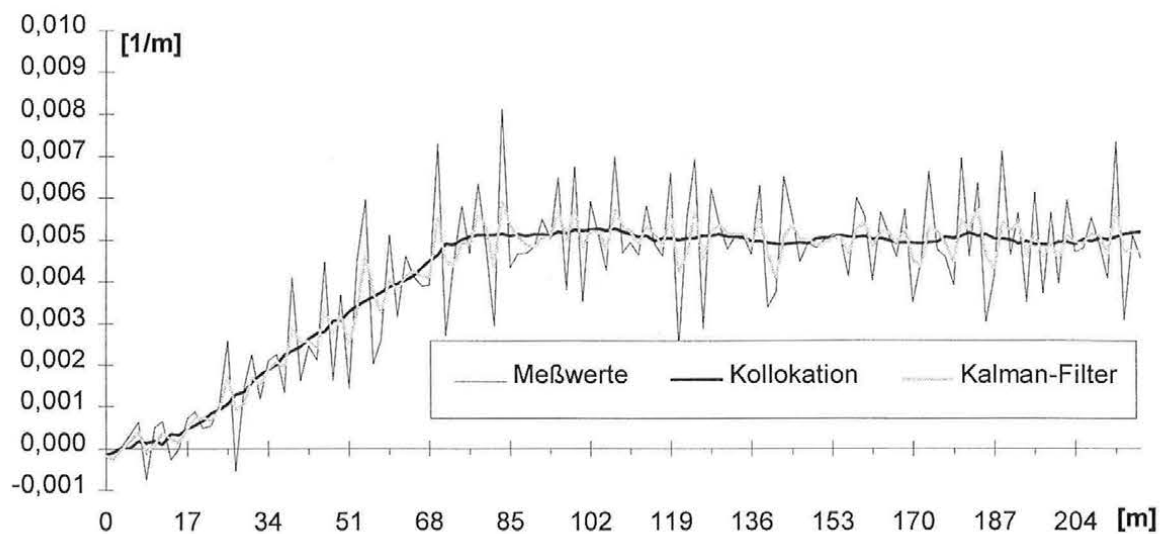


Abb. 4.23: Vergleich der Krümmungsbilder

Die maximale Differenz zwischen den beiden Ergebnissen beträgt in der Lage rund 4 mm und in der Höhe knapp über 5 mm. Ein Vergleich der Auswertungen von GPS-Meßwertreihen liefert ähnliche Ergebnisse, wobei die Maxima in den Höhendifferenzen aufgrund des erhöhten

Meßrauschens Werte bis zu 15 mm erreichen können. Die Qualität des Filterergebnisses läßt sich auch gut durch eine Darstellung des Krümmungsbildes beschreiben (Abb. 4.23). Es ist unverkennbar, daß die Kollokation eine bessere Reduktion des Meßrauschens als die Kalman-Filterung erzielt.

Sowohl der Kalman-Filter als auch die Kollokation sind optimale lineare Filterverfahren. Die Verfahren beruhen zum Teil auf unterschiedlichen a priori Kenntnissen beziehungsweise theoretischen Zusatzinformationen. Bei der Kollokation wird der Zusammenhang zwischen den einzelnen Meßpunkten durch die vorgegebene Kovarianzfunktion beschrieben. Der Kalman-Filter betrachtet die Gleislage in Abhängigkeit der laufenden Bogenlänge und verbindet die Meßwerte über die Systemgleichungen. Die Hauptursache für die unterschiedlichen Filterergebnisse liegt jedoch darin, daß beide Verfahren nicht die gleichen Meßinformationen nutzen. Beim Kalman-Filter werden zur Berechnung des Systemzustandes eines Punktes nur die Messungen der vorangehenden Punkte berücksichtigt. Sobald die Meßwerte in einem Punkt vorliegen, können die Schätzwerte für diesen Punkt quasi on-line berechnet werden. Im Gegensatz dazu werden beim Wiener-Filter auch die nachfolgenden Meßwerte verwendet. Dieses Verfahren kann deshalb nur für nachträgliche Auswertungen (off-line) eingesetzt werden. Die Filterergebnisse stimmen jedoch fast völlig überein, wenn beide Verfahren die gleichen Meßinformationen zur Verfügung gestellt bekommen.

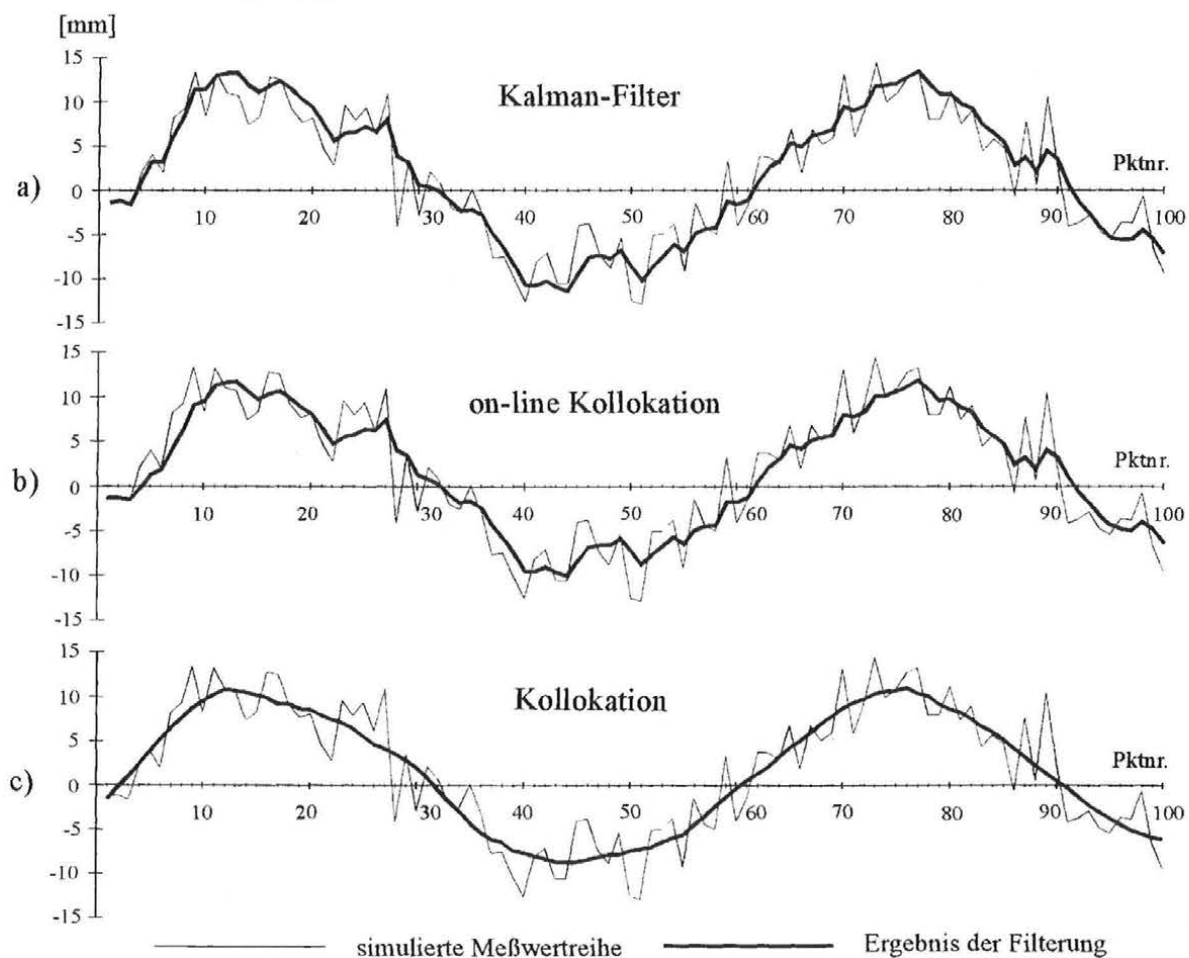


Abb. 4.24: Vergleich zwischen Kalman-Filterung und Kollokation

Abb. 4.24 zeigt die Auswertung einer simulierten Meßwertreihe (Signal: Wellenlänge $\lambda = 60$ m, Amplitude $A = 20$ mm; Noise: Standardabweichung ± 3 mm; vergl. Abb. 4.7). In Abb. 4.24

a ist das Ergebnis der Kalman-Filterung und in Abb. 4.24 c der Kollokation dargestellt. Die Kollokation in Abb. 4.24 b berücksichtigt nur jene Meßpunkte, die vor dem aktuellen Punkt liegen („on-line Kollokation“). Die maximale Differenz zwischen der on-line Kollokation und der Kalman-Filterung beträgt nur ungefähr 2 mm. Damit wird bestätigt, daß beide Verfahren die gleiche Genauigkeit für die Schätzwerte liefern, wenn sie die gleichen Meßinformationen nutzen. Umgekehrt liefert eine kombinierte Vorwärts- und Rückwärts-Kalman-Filterung (Abschnitt 3.3) ähnliche Ergebnisse wie der gewohnte Ansatz der Kollokation.

Der Kalman-Filter findet seine Anwendung bei Aufgabenstellungen, die eine on-line Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme erfordern. Zur Überprüfung der Gleislage im Produktionsprozeß empfiehlt sich eine unmittelbare Auswertung nach jeder Messung. Die Wirtschaftlichkeit und Produktivität des Verlegevorgangs kann wesentlich erhöht werden, wenn die Zeiten für die Absteck- und Kontrollvermessungen der Gleislage minimiert werden.

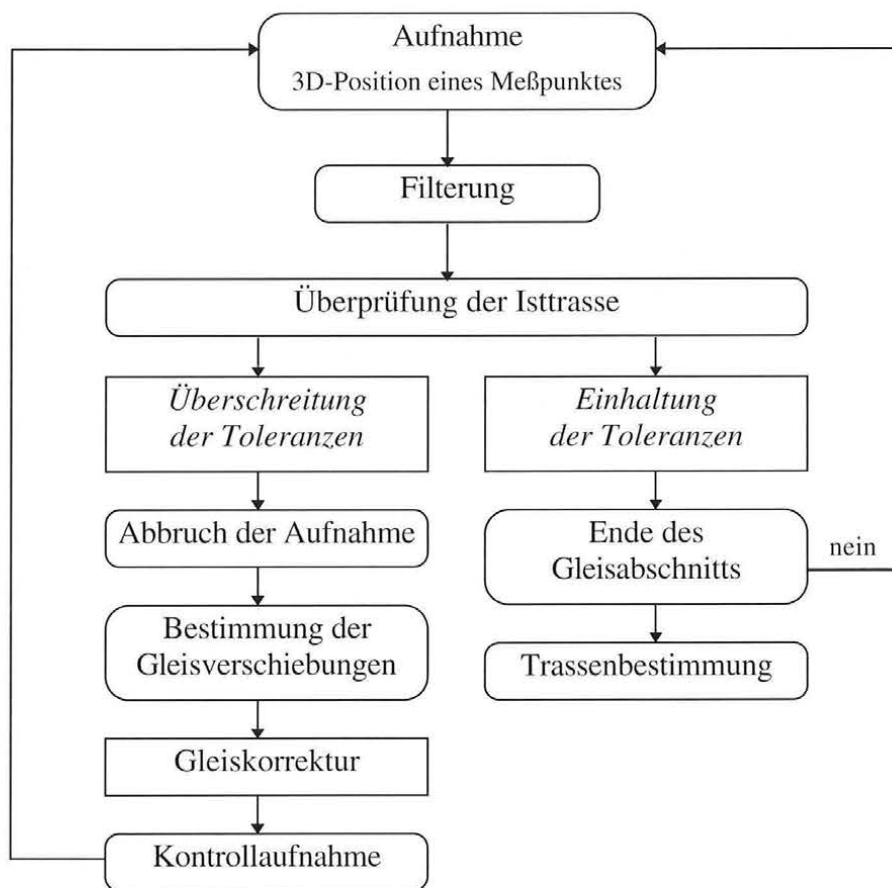


Abb. 4.25: Vorgangsweise bei der on-line Überprüfung der Gleislage

Die wichtigsten Schritte bei der on-line Überprüfung der Gleislage sind in Abb. 4.25 dargestellt. Die Schienen werden vorerst nur näherungsweise in ihre Sollposition gebracht. Anschließend wird mit der ersten Aufmessung des neu verlegten Gleisabschnitts mit dem Multi-sensorsystem begonnen. Unmittelbar nach jedem Meßwert erfolgt die Bestimmung der Isttrasse durch die Filterung und deren rechnerische Überprüfung. Bei einer Überschreitung der zulässigen Verlegetoleranzen wird die Aufnahme des Gleisabschnitts abgebrochen und es werden sofort Maßnahmen zur Korrektur der Gleislage eingeleitet. Nach erfolgter Gleiskorrektur

wird der Gleiskörper erneut aufgenommen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis man unter Einhaltung der Toleranzen am Ende des Gleisabschnitts angelangt ist. Zur Qualitätskontrolle wird eine abschließende Aufmessung vorgenommen. Anschließend können die Trasselemente in die bestehende Isttrasse eingerechnet werden.

Bei der Überprüfung einer bestehenden Eisenbahntrasse setzt man bevorzugt off-line Auswerteverfahren ein. Hierbei wird durch die Bestimmung der Isttrasse des Gleiskörpers untersucht, ob die Trasse korrigiert werden muß. Die Durchführung der Gleiskorrekturen (z.B. mit einer Richt- und Stopfmaschine) erfolgt meist nicht direkt mit der Aufnahme, sondern kann auch zu einem anderen Zeitpunkt vorgenommen werden.

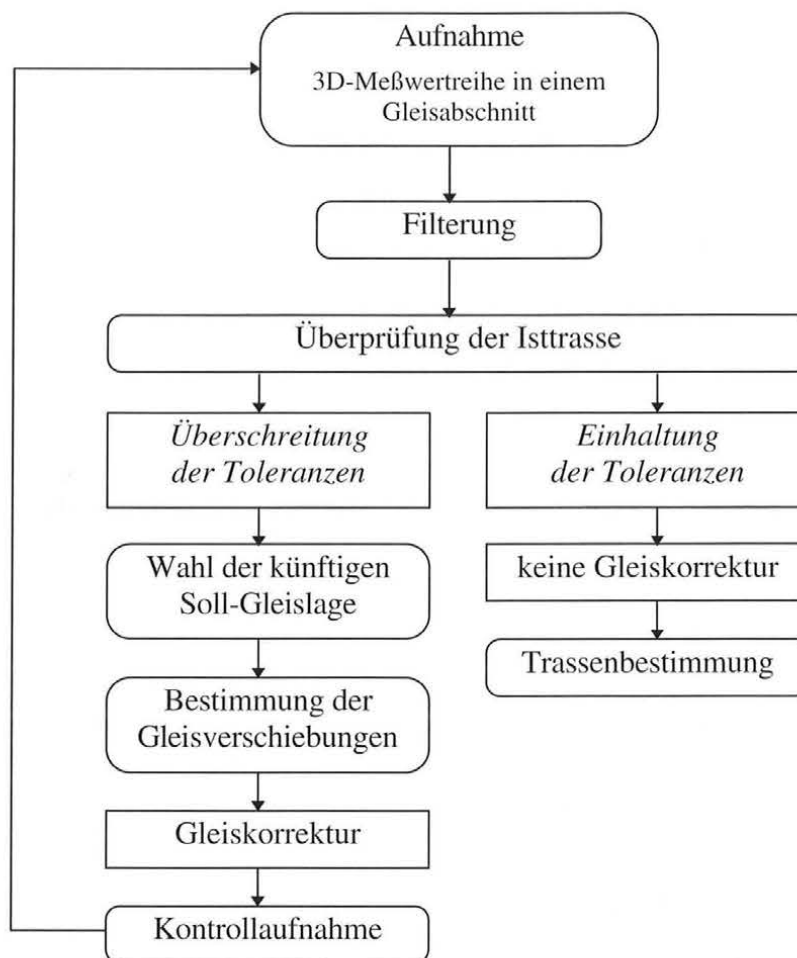


Abb. 4.26: Vorgangsweise bei der off-line Überprüfung der Gleislage

Abb. 4.26 zeigt die Vorgangsweise bei der off-line Überprüfung der Gleislage. Zu Beginn wird der gesamte Gleisabschnitt mit dem Multisensorsystem erfaßt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Isttrasse über die Filterung. Ergibt die Überprüfung der Isttrasse eine Überschreitung der Verlegetoleranzen, so muß die bestehende Trasse korrigiert werden. Für die Abstekung muß eine Solltrasse gewählt werden. Als Solltrasse wird entweder die projektierte Trasse oder der Trend der Kollokation (Abschnitt 3.4.3) verwendet. Aus den Schätzwerten des Signals erhält man die notwendigen Gleisverschiebungen. Nach erfolgter Gleiskorrektur wird die Gleislage durch eine Kontrollaufnahme überprüft. Keine Gleiskorrekturen müssen vorgenom-

men werden, wenn die Toleranzen bei der Überprüfung der Isttrasse nicht überschritten werden. Die Auswertung der Gleisaufnahme wird durch eine Einrechnung der Trassierungselemente in die bestehende Isttrasse abgeschlossen.

Auch bei der Überprüfung einer bestehenden Eisenbahntrasse kann eine zusätzliche on-line Auswertung während der Messung von Interesse sein, wenn die Gleiskorrekturen gemeinsam mit der Aufnahme durchgeführt werden. Ergeben sich im Zuge der Aufnahme des Gleiskörpers große Gleisverschiebungen, so kann durch einen Abbruch der Aufnahme und Vornahme von Gleiskorrekturen wiederum ein Zeitgewinn erzielt und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gesteigert werden.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden dreidimensionale Meßserien einer Gleisaufnahme sowohl mit dem Wiener-Filter als auch mit der Kalman-Filterung ausgewertet und analysiert. Ein Hauptziel bildet die Bestimmung von *Richtwerten für die optimalen Filtereinstellungen* bei beiden Auswerteverfahren. Zur objektiveren Beurteilung der Filterergebnisse wurden vorerst simulierte Meßwertreihen und im Anschluß daran Meßserien von realen Gleisaufnahmen analysiert. Ausgehend von den Richtwerten können geeignete Filtereinstellungen auch dann abgeschätzt werden, wenn die Gleisfehlagen verschiedenartige Charakteristiken aufweisen.

Bei der *Anwendung des Wiener-Filters* hängt das Filterergebnis im entscheidenden Maße von der Form der Kovarianzfunktion der Signalgrößen ab. Die Breite der Kovarianzfunktion wird durch einen Parameter beschrieben, der mit hinreichender Genauigkeit aus dem Mittelwert der Wellenlängen der periodischen Anteile des Signals mit Hilfe einer einfachen Faustformel abgeschätzt werden kann. Zusätzlich kann mit einer Veränderung des Scheitelwertes der Kovarianzfunktion der Grad der Glättung des Signals beeinflußt werden.

Das Ergebnis einer *Kalman-Filterung* wird hauptsächlich durch die gewählte Systemordnung und die Standardabweichung des Systemrauschens beeinflußt. Für die Auswertung empfiehlt sich ein Systemmodell 2. Ordnung, da sich die Filterergebnisse der Modelle 2. und 3. Ordnung nur geringfügig unterscheiden. Für die Abschätzung der Standardabweichung des Systemrauschens werden Richtwerte in Abhängigkeit des Meßpunktabstandes und der Systemordnung angegeben. Zur Erhöhung des Glättungsgrades des Signals ist gegebenenfalls eine Reduktion der Werte für die Standardabweichung des Systemrauschens um bis zu 50 % vorzunehmen.

Ein direkter Vergleich zwischen terrestrischen und GPS-Meßserien zeigt die höhere innere Genauigkeit und Homogenität der Meßwerte des terrestrischen Polarmeßsystems. Das GPS-System liefert geringere Genauigkeiten für die absolute Gleislage. Beide Meßverfahren erzielen bei einer entsprechenden Reduktion des Meßrauschens durch Anwendung des Wiener-Filters annähernd das gleiche Genauigkeitsniveau für die relative Gleislage in Abhängigkeit des Punktabstandes.

Ein wichtiger Aspekt ist die *Ermittlung eines optimalen Abtastintervalls* für die Gleisaufnahme. Einerseits erfordern die hohen Genauigkeitsforderungen für die relative Gleislage bzw. Krümmung eine hohe Punktdichte, andererseits darf im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz des Aufnahmeverfahrens der Punktabstand nicht zu klein gewählt werden. Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Bestimmung des Diskretisierungsintervalls bilden umfangreiche Meßserien, bei denen der Gleiskörper gewollt möglichst dicht abgetastet wurde. Aus der Spektralanalyse von Gleisaufnahmen mit dem terrestrischen Polarmeßsystem bzw. mittels GPS

resultiert ein maximales Abtastintervall von 5 m. Die Untersuchung der bei den Messungen erzielten Genauigkeiten für die relative Gleislage bzw. Krümmung mit unterschiedlichen Punktabständen liefert ein Maximum von knapp unter 5 m für das Abtastintervall. Für den Einsatz des Multisensorsystems in der Praxis kann somit ein Meßpunktabstand von 4 bis 5 m empfohlen werden.

Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einem *Vergleich* der Filterergebnisse bei Anwendung des Kalman- und des Wiener-Filters und einer Beurteilung ihrer Einsatzmöglichkeiten bei der Auswertung von dreidimensionalen Gleisaufnahmen. Sowohl die Kalman-Filterung als auch die Kollokation sind optimale lineare Filterverfahren, dennoch unterscheiden sich die Ergebnisse der Verfahren deutlich. Beide Auswerteverfahren verwenden nicht die gleichen Meßinformationen, was die Hauptursache für die unterschiedlichen Filterergebnisse bildet. Der Kalman-Filter arbeitet rekursiv und eignet sich deshalb für Aufgabenstellungen, die eine *on-line* Auswertung der 3D-Gleisaufnahme erfordern. Der Wiener-Filter berücksichtigt alle nachfolgenden Meßwerte ebenso wie die vorangegangenen Messungen und wird für *off-line* Auswertungen eingesetzt. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Produktivität des Verlegevorgangs beim Neubau eines Gleiskörpers empfiehlt sich eine unmittelbare Auswertung nach jedem aufgenommenen Meßpunkt. Für die Kontrolle von bestehenden Eisenbahntrassen setzt man in der Regel off-line Auswerteverfahren ein. Die wesentlichen Schritte für die Vorgangsweise bei einer on-line bzw. off-line Überprüfungen der Gleislage wurden ausgearbeitet und erläutert.

5. Konzeption eines Multisensorsystems für die 3D-Aufmessung der Gleis-Istlage

Die Form von Gleisen muß beim Verlegen mit einer hohen Genauigkeit realisiert werden. Im einzelnen müssen die absolute Gleislage, die Formtreue bzw. relative Lage, die Überhöhung und der Schienenabstand in der Horizontalen und in der Vertikalen überprüft werden. Elektronische Sensoren ermöglichen hier heutzutage einen weitgehenden automatischen Meßablauf. Für den Meßablauf wurde ein Meßwagen entwickelt, der sich in dem zu untersuchenden Gleiskörper bewegt. Der gesamte Meßvorgang wird von einem Computer aus gesteuert und die Meßdaten werden vor Ort ausgewertet.

5.1 Entwicklung eines Meßwagens

Um die Aufnahme des Gleis-Istlage möglichst einfach und effizient durchführen zu können, wurde vom Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie, der TU Wien in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen und Geophysikalischen Forschungsinstitut der Ungarischen Akademie der Wissenschaften in Sopron ein kleiner Meßwagen entwickelt, der in seiner ersten Ausbaustufe entlang dem zu untersuchenden Gleiskörper manuell verschoben werden kann. Ein Hauptziel bei der Entwicklung lag bei der Vereinfachung des gesamten Meßablaufes. Die Aufmessung der Isttrasse und die Bestimmung der Differenzen zur Solltrasse und deren anschließende Absteckung und Kontrolle soll in einem Regelkreis weitgehend automatisch ablaufen.

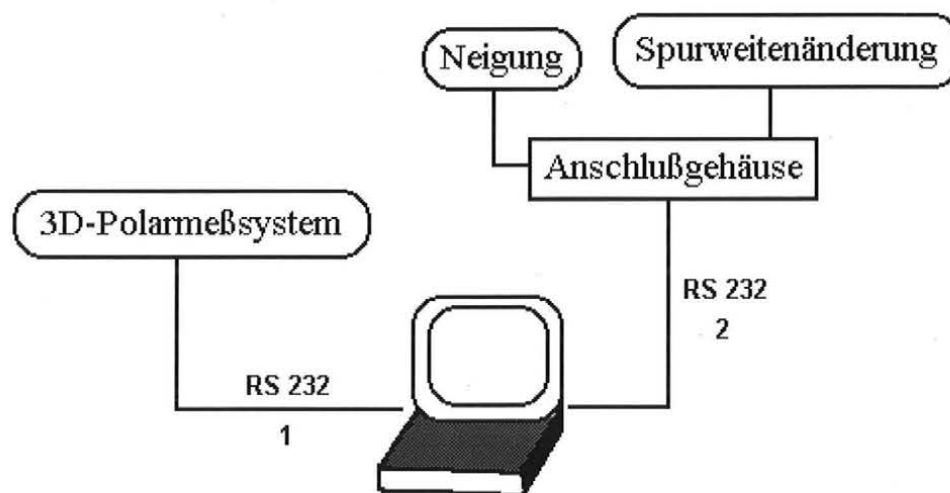


Abb. 5.1: Schematischer Aufbau des Multisensorsystems

Die absolute Position des Meßwagens bestimmt man mittels polarer Aufnahme, die vom Meßwagen direkt mit einem tragbaren Personal Computer gesteuert wird. Neben dem dreidimensionalen Polarmeßsystem beinhaltet das Meßkonzept noch elektronische Sensoren für die Bestimmung der Neigung des Meßwagens bzw. gleichbedeutend der Überhöhung der Schienen und die Änderung der Spurweite. Die Neigung liefert eine elektronische Libelle bzw. ein Neigungsgeber und der Schienenabstand wird mit einem elektronischen Abstandsgeber gemessen. Abb. 5.1 zeigt schematisiert die einzelnen Komponenten des Multisensorsystems, die in Abschnitt 5.2 näher beschrieben werden. Da der gesamte Meßablauf vom Prozeßrechner gesteuert

ert werden soll, muß dieser über mindestens zwei serielle RS 232 Schnittstellen (V 24 Ausgänge) verfügen. Abb. 5.2 (s. Tafel 4) zeigt den Meßwagen im Einsatz bei ersten Testmessungen im Bahnhofsbereich von Thaya, Niederösterreich.

5.2 Komponenten des Multisensorsystems

Das Prinzip der räumlichen Erfassung des Gleiskörpers wurde bereits in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Die Bewegung des Meßwagens im Gleiskörper beschreibt eine Fläche im Raum. Durch den Einsatz eines dreidimensionalen Polarmeßsystems und zusätzlicher Ermittlung der Überhöhung und Spurweite kann ausgehend von trassennahen Festpunkten die Gleislage absolut in einem übergeordneten Koordinatensystem (z.B. Landessystem bzw. Koordinatensystem der Verkehrsstrasse) dreidimensional bestimmt werden. In diesem Abschnitt werden nun die bei den Meßserien eingesetzten Komponenten des Multisensorsystems näher beschrieben.

5.2.1 Terrestrisches dreidimensionales Polarmeßsystem

Die dreidimensionale Aufmessung der Gleislage kann mit einem elektronischen Tachymeter durchgeführt werden. Da die Steuerung des gesamten Meßablaufes direkt vom Meßwagen aus erfolgen und der Meßablauf möglichst automatisiert sein soll, ist der Einsatz eines selbständig zielenden und nachführenden Tachymeters erforderlich. Dadurch kann der Arbeitsaufwand wesentlich reduziert und die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Meßwerte gesteigert werden. Mit der automatischen Zielerfassung hat man ein Hauptziel des Automationsprozesses erreicht (*Kahmen 1992*). Die dreidimensionale Aufnahme der Eisenbahntrasse erfolgt mittels polarer Aufnahme. Das selbstzielende Tachymeter wird dabei direkt auf einem bekannten Punkt entlang der Trasse oder auf einem frei gewählten und nicht koordinierten Standpunkt aufgestellt. Im zweiten Fall müssen vorerst die Koordinaten des Gerätestandpunkts bestimmt werden. Dies kann z.B. mit dem Verfahren der Freien Stationierung (*Kahmen 1993*) erfolgen. Man nutzt hierbei Festpunkte entlang der Eisenbahntrasse, z.B. die Gleisvermarkungspunkte (Abschnitt 6.1.1).

Bei den durchgeführten Meßserien (Abschnitt 4) wurde das *Geodimeter System 4000* eingesetzt (*Geotronics 1992*). Dieses System ermöglicht die gesamte Ausführung und Kontrolle aller vermessungstechnischen Operationen von der intelligenten Reflektorstation, kurz RPU (*Remote Positioning Unit*) genannt, aus. Das Instrument arbeitet dabei selbständig ganz ohne Beobachter. Zur automatischen horizontalen und vertikalen Anzielung verfügt das Gerät über Servomotoren. Die Grundlage für die Kommunikation zwischen Instrument und RPU bildet eine Telemetrie-Verbindung. Für die Datenkommunikation mit externen Geräten bietet das System eine Vielzahl von Möglichkeiten. Jede Geodimeter Totalstation kann über ein eingebautes seriell Interface an ein externes Gerät angeschlossen werden. Bei Vorliegen eines zweiten V 24 Ausgangs an der Tastatureinheit der RPU kann auf ähnliche Weise wie mit dem Instrument mit der Reflektoreinheit während der Messung kommuniziert werden. Nach erfolgter Durchführung der Messung kann die Steuerung vom Prozeßrechner übernommen und die Meßdaten sowohl des Polarmeßsystems als auch der Sensoren für die Neigung und Spurweitenänderung ausgelesen und gespeichert werden.

Die optimale Eignung des Geodimeter Systems 4000 für die Aufmessung eines Gleiskörpers konnte in einer Reihe von Testmessungen nachgewiesen werden (Rudorfer 1995). Aufgrund der automatischen Zielerfassung sind alle Meßwerte gleich genau, es kann kein Genauigkeitsverlust in Abhängigkeit vom Beobachter auftreten. Dieses Meßsystem kann deshalb auch besonders vorteilhaft bei der Trassenbestimmung in einem Tunnel zum Einsatz kommen. Die Abb. 5.2 (s. Tafel 4) zeigt im Vordergrund die Reflektoreinheit auf dem Meßwagen und im Hintergrund die Totalstation auf einem trassennahen Festpunkt.

5.2.2 Einsatz der Satellitenmeßtechnik GPS

Für die Positionierung kann anstelle der Reflektoreinheit des Tachymeters am Meßwagen auch die Antenneneinheit einer GPS Totalstation montiert werden. Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits erwähnt, besteht eine GPS Totalstation aus zwei GPS-Empfängern (Referenz- und Rover-Station) und einer Telemetrie Verbindung, wobei alle Meßdaten in Echtzeit direkt im Felde ausgewertet werden. Ausgehend vom Referenzempfänger erhält man wiederum dreidimensionale Koordinatendifferenzen in bezug auf einen bekannten trassennahen Festpunkt. Das eingesetzte Meßverfahren wird in der englischsprachigen Literatur mit *Real Time Kinematic (RTK) GPS* oder in Deutsch auch als *Echtzeitvermessung mit GPS* bezeichnet (z.B. Cocard 1995; Euler 1995; Sada, Takada 1994).

Die Echtzeitauswertung bildet die Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von GPS für die 3D-Aufnahme eines Gleiskörpers, auch wenn keine on-line Auswertung unmittelbar im Produktionsprozeß gefordert ist. Herkömmliche GPS-Verfahren mit besonders kurzen Beobachtungszeiten (z.B. Stop and Go) im Post Processing haben den entscheidenden Nachteil, daß eine gesicherte Auswertung mit der gewünschten Genauigkeit nicht gewährleistet ist. Bei Echtzeitvermessungen werden die Koordinaten vor Ort bestimmt. Entspricht die Genauigkeit der Lösung nicht den Erwartungen, so kann die Verweildauer auf dem Meßpunkt verlängert werden. Das eingesetzte Beobachtungsverfahren wird kinematisch-statische Methode genannt, da die Koordinaten der Station aus Messungen über mehrere Epochen abgeleitet werden. Der Zeitbedarf für die Positionsbestimmung („Time to first Solution“) bei einer Echtzeitvermessung hängt entscheidend von der Bestimmung der Ambiguities der Phasenmessungen ab. Hier kommen Verfahren in Betracht, die eine Lösung der Ambiguities ohne statische Initialisierung in der Bewegung ermöglichen (Ambiguity Resolution on the Fly AROF). Auf die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Ambiguities kann in dieser Arbeit nicht eingegangen werden; die wichtigsten Ansätze findet man u.a. in (Abidin 1994; Cocard 1995; DeLoach, Wells, Dodd 1995; Euler 1995; Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins 1993; Seeber 1993).

Zum Zeitpunkt der Durchführung der Meßserien war nur ein ausgereiftes Meßsystem für GPS-Echtzeitvermessung verfügbar. Es handelt sich hierbei um das System *Site Surveyor* der Fa. Trimble (Trimble Navigation 1994 a und b). Das eingesetzte RTK-System besteht aus zwei GPS-Zweifrequenzempfängern Trimble 4000 SSE inklusive Antennen vom Typ Compact L1/L2, einer Telemetrieinheit Sateline 1AS und einem Feldcomputer TDC1 zur Steuerung und Kontrolle des Meßablaufes (Abb. 5.3 (s. Tafel 4)). Mangels einer direkten Datenübertragungsmöglichkeit zwischen der Kontrolleinheit TDC1 und dem Prozeßrechner konnten im Gegensatz zum terrestrischen Meßsystem die Meßdaten nicht direkt während der Messung an den Prozeßrechner übergeben werden. Die GPS-Meßdaten wurden im Feldcomputer TDC1 und die Meßwerte der elektronischen Meßwertgeber im Prozeßrechner gespeichert und nachträglich zusammengeführt.

Der Basisempfänger wird auf einem trassennahen Festpunkt günstigerweise in der Mitte des aufzunehmenden Gleisabschnitts aufgestellt. Über die Telemetrieinheit werden alle Meßdaten der Basisstation zum bewegten Empfänger auf dem Meßwagen übertragen. Die Reichweite der eingesetzten Telemetrie, die selbst im freien Gelände derzeit nur knapp einen Kilometer erreicht, kann gegebenenfalls durch einen Verstärker auf 3,5 bis 4 km je nach Geländeform erhöht werden. Alle Meßdaten werden on-line im Feldcomputer TDC1, der an den Rover-Empfänger angeschlossen ist, ausgewertet. Man erhält direkt den Raumvektor im Landessystem, wenn vor Beginn der Messung die Transformationsparameter für die räumliche Ähnlichkeitstransformation zwischen dem klassischen terrestrischen Bezugsrahmen und dem globalen WGS84-Koordinatensystem (Abschnitt 6.1.1) eingegeben werden. Untersuchungen im Rahmen einer Diplomarbeit haben gezeigt (Zinschitz 1995), daß Näherungswerte für die Transformationsparameter bei kurzen Basisvektoren bis ungefähr 600 m Länge ausreichen. Auf eine genaue Bestimmung der Transformationsparameter vor der eigentlichen Gleisaufnahme kann bei Einhaltung dieses Entfernungsbereiches zwischen Referenz- und Roverstation verzichtet werden.

Seit kurzer Zeit werden von allen namhaften Herstellern leistungsfähige GPS-Echtzeitsysteme angeboten. Beim GPS-Empfänger Trimble 4000 SSI wurde die Empfangscharakteristik für die GPS-Signale verbessert, so daß dieses System laut Herstellerangabe nicht mehr so anfällig auf Multipath-Effekte (Mehrwegausbreitung) reagieren soll (Abschnitt 4.3.1).

5.2.3 Elektronische Meßwertgeber

Für die Messung der Überhöhung und Spurweite werden elektronische Meßwertgeber verwendet, die folgende Mindestanforderungen erfüllen müssen:

- Auflösungsvermögen des Neigungsgebers: $0.1 \text{ mm/m} \cong 0.0057^\circ = 0.0064 \text{ gon}$,
- Meßbereich des Neigungsgebers: $\pm 10^\circ = 11.1 \text{ gon} \cong 0.176 \text{ m/m}$,
- Auflösungsvermögen des Längengebers: 0.1 mm,
- Meßbereich des Längengebers: $\pm 5 \text{ mm}$.

Die Anforderungen für das Auflösungsvermögen und den Meßbereich bereiten in erster Linie bei der Auswahl eines geeigneten Neigungsgebers Schwierigkeiten. Einerseits sind besonders präzise Neigungsgeber für kleine Meßbereiche und andererseits elektronische Libellen mit großen Meßbereichen aber geringem Auflösungsvermögen am Markt erhältlich. Bei der Auswahl des Längengebers muß zusätzlich auf eine hohe Nullpunktsstabilität und geringe Driftraten geachtet werden. Aufgrund von induktiven Sicherungsanlagen im Bereich von Eisenbahntrassen (induktive Zugsicherung, z.B. Fiedler 1991) können keine induktiven Wegaufnehmer zur Bestimmung der Spurweitenänderung eingesetzt werden.

Das für die Messungen ausgewählte System zur Bestimmung der Änderung der Spurweite und der Neigung besteht aus folgenden Komponenten:

- Wegaufnehmer Mitutoyo „Linear Gage“ Serie 542-345,
- Neigungswinkelsensor NB 3 und Meßverstärker NV 8a,
- Anschlußgehäuse ISMO (Intelligentes Sensormodul) V 1.0 und
- Akkumulator 12 V, 6 Ah.

Der Wegaufnehmer Mitutoyo Linear Gage arbeitet mit einem berührungslosen, photoelektrischen Linear-Encoder-System. Die Verschiebung eines Glasmaßstabes ist proportional zur Wegänderung der Tastspitze des Gebers. Die Bewegung der Meßspindel wird mit Luftdämp-

fung geregelt. Die kugelförmige Tastspitze besteht aus Hartmetall. Die Auflösung des Typs Nr. 542-345 beträgt laut Produktinformation 0.01 mm (*Mitutoyo 1993*). Der Wegaufnehmer benötigt eine Versorgungsspannung von + 5 V. Die Wegmessung kann in jeder beliebigen Stellung des Wegaufnehmers auf Null gestellt werden.

Der Neigungswinkelsensor NB 3 ist ein statisch arbeitender Beschleunigungssensor und besteht aus einem gasdynamisch gedämpften Feder-Masse-System als Bestandteil eines kapazitiven Primärwandlers. Die gemessenen Neigungswinkeln sind absolute Meßwerte, d.h. der Abgleich des Sensors erfolgt bei echter waagrecht Nulllage. Laut Firmenbeschreibung (*Seitner 1993*) hat er eine Auflösung von ca. 0.005° , das entspricht ca. 0.09 mm/m. Der Sensor ist weitgehend erschütterungs- und stoßunempfindlich, hermetisch gekapselt und weist eine hohe Langzeitkonstanz, geringe Temperaturdrift, praktisch keine Hysterese und Querempfindlichkeit auf. Der Meßverstärker dient der Signalverstärkung und Offset-Spannungskompensation des Neigungssensors. Ein mehrpoliger Tiefpaß-Filter trennt signal- erfassungsbedingte, höherfrequente Störimpulse vom Nutzsignal ab. Gleichzeitig stellt der Filternormierverstärker eine hochstabile Betriebsspannung von + 5 V für den Sensor bereit. Das Ausgangssignal des Verstärkers ist zu Null symmetrisch. Für die Versorgungsspannung ist ein breiter Spannungsbereich von + 8 V bis + 30 V anwendbar. Der Meßverstärker ist gemeinsam mit dem Sensor in einem Gehäuse untergebracht, das direkt am Meßwagen montiert werden kann.

Über das Anschlußgehäuse ISMO V 1.0 wird die Verbindung von beiden Meßwertgebern zum Prozeßrechner hergestellt (Abb. 5.1). Neben der Nullstellung des Wegaufnehmers vor Beginn der Messung wird die Ausgabe der Meßdaten gesteuert. Für die Steuerung des gesamten Meßablaufes wurde ein Programm erstellt, das als ein Bestandteil in das Meß- und Auswertprogramm integriert wurde (Abschnitt 5.3). Der Anteil der Fehler der Sensormessungen am Meßrauschen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht (*Rudorfer 1995*). In einer Reihe von Testmessungen konnte die hohe Wiederholungsgenauigkeit der Meßwertgeber nachgewiesen werden.

5.3 Beschreibung des Meß- und Auswertprogramms

Ein wesentlicher Bestandteil des neuen Konzeptes bildet das Meß- und Auswertprogramm. In seiner derzeitigen Konzeption bietet das Programm für den Anwender ein hierarchisch aufgebautes Menüsystem, welches in gewissen Grenzen eine benutzergeführte Steuerung des Auswertvorgangs ermöglicht. Das Programm weist einen modularen Aufbau auf und kann einfach erweitert bzw. verändert werden. Es besteht aus zahlreichen Unterprogrammen, die wiederum nach inhaltlichen Gesichtspunkten zu logischen Einheiten (sog. Units) zusammengefaßt werden. Teile des Programms wurden im Rahmen einer Diplomarbeit erstellt (*Meisinger 1995*).

Prinzipiell können drei Hauptmodule unterschieden werden (Abb. 5.4). Das erste Modul übernimmt die Steuerung der 3D-Gleisaufnahme. Für die Aufnahme mit dem terrestrischen Polar-meßsystem (Abschnitt 5.2.1) steht ein Unterprogramm zur Verfügung, das gleichzeitig die Messung des Polarmeßsystems und der elektronischen Meßwertgeber (Abschnitt 5.2.3) steuert. Mangels einer direkten Ausgabemöglichkeit der Meßdaten des GPS-Systems während der Messung an den Prozeßrechner werden die GPS-Meßwerte und die Sensordaten vorerst noch

getrennt erfaßt. Nach der Zusammenführung erfolgt die geometrische Reduktion der Meßdaten nach den Glgen (2.4) bis (2.7) in Abschnitt 2.2.3.

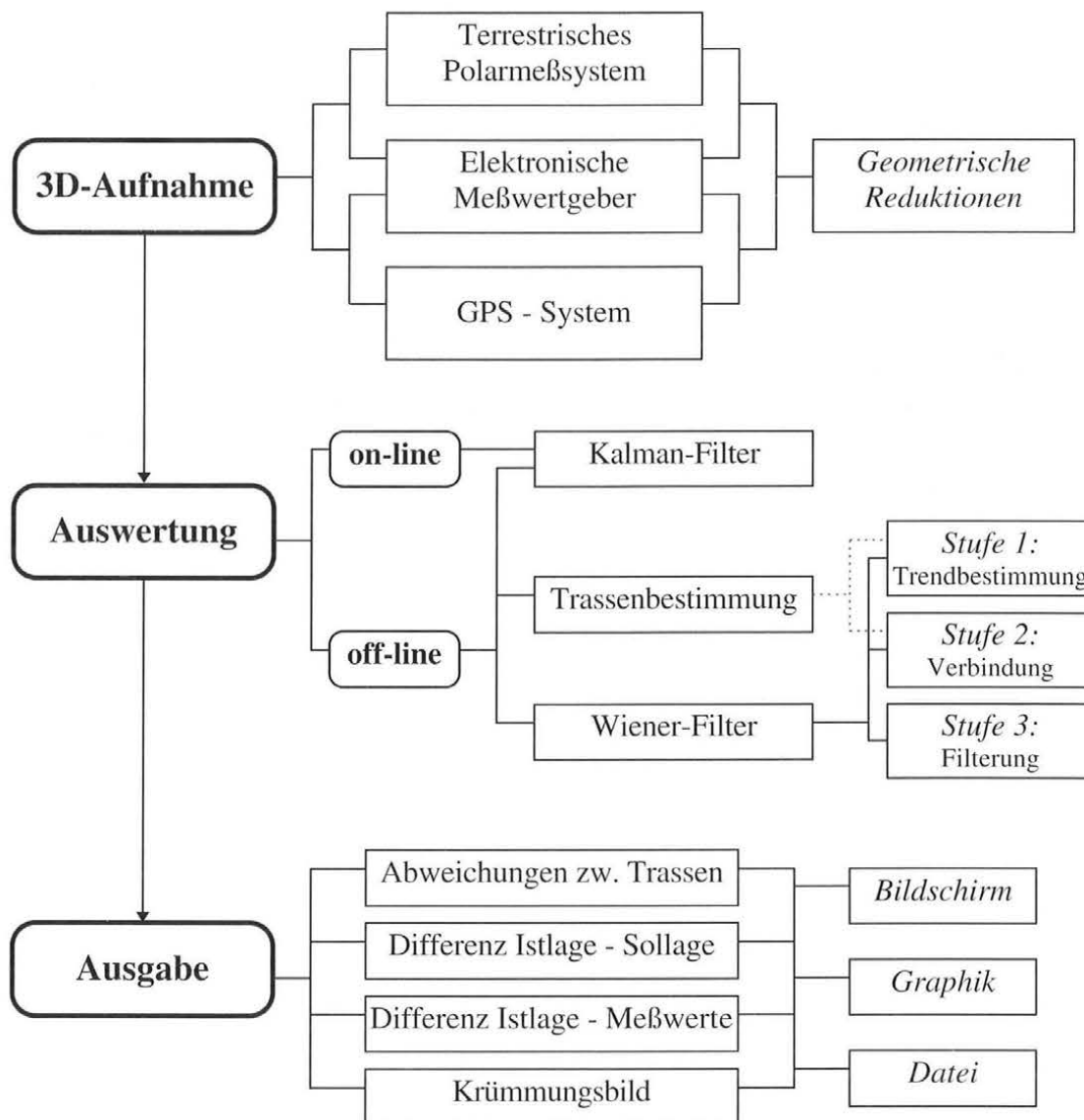


Abb. 5.4: Hauptmodule des Meß- und Auswerteprogramms

Das zweite Hauptmodul beinhaltet die Auswertung der 3D-Gleisaufnahme. Hier muß zunächst zwischen einer on-line bzw. off-line Auswertung der Meßdaten unterschieden werden. On-line Auswertungen können mittels Kalman-Filterung, off-line Auswertungen auch mit dem Wiener-Filter vorgenommen werden. Bei der Kollokation kann entweder der vollständige Berechnungsablauf (Trendbestimmung und Filterung) oder nur die Filterung ausgeführt werden. Im ersten Fall werden alle Stufen des dreistufigen Auswerteverfahrens (Abschnitt 3.4.3) durchlaufen. Hingegen beschränkt sich die Filterung auf die Ausführung von Stufe 3. Dadurch kann Rechenzeit eingespart werden, wenn die Solltrasse bereits feststeht. Neben der Filterung der Meßwerte mittels Kalman- bzw. Wiener-Filter kann mit dem Modul Trassenbestimmung, welches die Stufen 1 und 2 der vollständigen Berechnung einer Kollokation verwendet, eine Trasse (z.B. künftige Soll-Gleislage) eingerechnet werden. Die Ausgabe der Ergebnisse übernimmt das dritte Hauptmodul des Meß- und Auswerteprogramms. Neben den Abweichungen zwischen Trassen und den Differenzen zwischen Istlage und Sollage bzw. Meßwertreihe kann auch die Qualität der relativen Gleislage in Form von Krümmungsbildern beurteilt werden. Die

Ergebnisse können wahlweise am Bildschirm in Form von Tabellen oder Diagrammen bzw. in Dateien ausgegeben werden.

Die Umsetzung der Algorithmen in der Programmiersprache TURBO PASCAL Version 5.0 wurde derart vorgenommen, daß für die Anwendung keine besonderen Voraussetzungen für die Hardware notwendig sind. Um die Berechnungszeit möglichst kurz zu halten, wird jedoch der Einsatz eines leistungsfähigen Personalcomputers mit einem 80486-Prozessor und einer Taktfrequenz von mindestens 40 MHz empfohlen.

Die 3D-Gleisaufnahme mit einem Multisensorsystem führt zu einer bemerkenswerten Automation des Meßablaufes. In weiterer Folge kann die derzeitige manuelle Bewegung des Meßwagens im Gleiskörper durch die Integration einer Schrittmotorsteuerung ersetzt werden. Zur Aufmessung der Gleislage wird der Meßwagen automatisch in konstanten Abständen angehalten. Für die Positionsbestimmung wird eine sinnvolle Kombination von terrestrischen und GPS-Polarmeßsystemen eingesetzt. Damit werden die Stärken beider Systeme optimal im Sinne eines hybriden Vermessungssystems genutzt. Das Meß- und Auswerteprogramm stellt ein flexibles, ausbaufähiges Hilfsmittel im Rahmen einer modernen Gleisaufnahme dar.

6. Beurteilung der Verfahren für die Gleisvermessung

Ausgehend vom derzeitigen Stand der Gleisvermessung erfolgt in diesem Kapitel eine Beurteilung des neu entwickelten kombinierten absoluten und relativen Verfahrens zur Bestimmung der Gleis-Istlage. Die Gewährleistung der absoluten Gleislage basiert derzeit auf dem System der Gleisvermarkungspunkte. Für die Überprüfung der relativen Gleislage wird das Langsehnenverfahren eingesetzt. Großräumige Analysen des Gleiszustandes werden bei den Österreichischen Bundesbahnen mit einem neu entwickelten Oberbaumeßwagen vorgenommen. Neben dem Stand der Gleisvermessung in Österreich wird auch die Situation bei den Deutschen und Schweizer Bundesbahnen beleuchtet. Ein Vergleich mit den herkömmlichen Verfahren zeigt die Stärken des modernen Aufnahme- und Auswertekonzepts bei der Überprüfung der absoluten Gleislage, der Formtreue und bei der Bestimmung der optimalen Solltrasse. Durch eine Zusammenstellung der Vorteile wird dieses Kapitel abgeschlossen.

6.1 Derzeitiger Stand der Gleisvermessung

6.1.1 Gleisvermarkung und trassennahe Festpunkte

Die Gewährleistung der Lagegenauigkeit für den Gleiskörper erfolgte seit den Anfängen des Eisenbahnbaus bis ungefähr 1950 durch Vermarkungen im Bereich der Schienen. Auf diese Weise wurde die Gleislage relativ und absolut festgelegt und konnte sehr einfach kontrolliert werden. Etwa Anfang der 50er Jahre wurden diese Festpunkte mit der zunehmenden Mechanisierung der Oberbauarbeiten größtenteils beschädigt und zerstört, denn die Vermarkungspunkte lagen im unmittelbaren Arbeitsbereich der neuentwickelten Oberbaumaschinen. Nun kamen Richtverfahren zum Einsatz, die eine Vermarkung der Streckengleise unnötig machen sollten (Abschnitt 2.1). Um 1970 wurden auch Fahrten zur Messung von Fliehbeschleunigungen neben den üblichen Oberbaumeßfahrten durchgeführt. Dabei wurden in Gleisbögen unzulässig hohe Seitenbeschleunigungen ermittelt, so daß in einigen Fällen sogar Geschwindigkeitsbeschränkungen unerlässlich waren. Beispielsweise hat man bei den Deutschen Bundesbahnen Abweichungen von bis zu 10 cm in radialer Richtung von der Sollage des Schienenstranges festgestellt (*Siems 1980*). Somit entschloß man sich, die Wiedervermarkung der Streckengleise in Angriff zu nehmen, um eine jederzeitige Kontrolle und Herstellung der ursprünglichen Gleislage zu ermöglichen.

Dieses *Gleisversicherungs-* bzw. *Gleisvermarkungssystem* soll nach (*Eisenegger 1990*) folgende Anforderungen abdecken:

- eindeutige Umsetzung einer gerechneten Gleisgeometrie in Lage, Höhe und Überhöhung auf die Bahntrasse,
- Grundlage für die Absteckung von Gleis- und Weichenanlagen für den Einbau,
- Stabilität der Gleisversicherung und einfache Möglichkeit zur Kontrolle von außerhalb des Gleises,
- Möglichkeit der Gleiskontrolle durch das Außenpersonal alle 5 m entlang der Eisenbahnstrecke,
- rasche netzweise Realisierung,
- System, das auf die zu erwartenden technischen Entwicklungen der Vermessungstechnik und der Maschinensteuerung angepaßt werden kann,
- Wirtschaftlichkeit.

Bei diesem Gleisversicherungssystem wird die Gleislage erstmals koordinatenmäßig festgelegt. Die Lage von Gleisen wird durch die Angabe von Abstand und Höhe der Gleisachse zu bestimmten Festpunkten, den *Vermarkungspunkten*, definiert und kontrolliert (Abb. 6.1). Abhängig von den Gleisbogenradien wurden etwa alle 40-70 m zwei Vermarkungspunkte beiderseits des Gleiskörpers außerhalb des Arbeitsbereiches der Oberbaumaschinen hergestellt. Die Stabilisation erfolgt in der Regel durch kleine Eisen- oder Messingbolzen an den Fahrleitungsmasten, oder auch in Form von Boden- oder Tiefpunktvermarkungen. Die Vermarkungspunkte werden in einem örtlichen Koordinatensystem ausgehend von trassennahen Polygonzügen bestimmt. In diesem Koordinatensystem ist auch die Gleisachse in ihren Hauptpunkten koordinatenmäßig festgelegt. Der Abstand zwischen den beiden gegenüberliegenden Vermarkungspunkten wird als *Spannmaß* bezeichnet. Der Schnittpunkt der Verbindungslinie der beiden Festpunkte mit der Gleisachse legt somit die absolute Lage des Gleiskörpers im Koordinatensystem der Vermarkungspunkte fest. Verbindet man aufeinanderfolgende Schnittpunkte, so erhält man ein Sehnepolygon mit den sog. *Langsehn* als Seitenlängen.

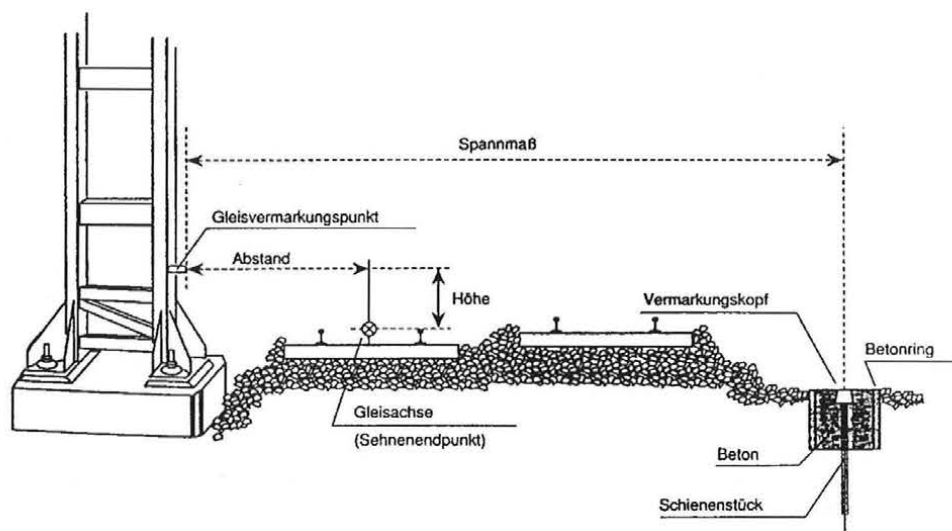


Abb. 6.1: Prinzipskizze der Gleisvermarkung (Lichtberger 1992)

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der früheren Gleisvermessung liegt darin, daß die Gleislage in bezug auf koordinatenmäßig bestimmte Punkte festgelegt wird und daher mit den üblichen vermessungstechnischen Instrumentarien gearbeitet werden kann. Das schließt auch die schnelle Kontrolle der Gleislage durch bautechnische Hilfskräfte mit ein. Beim *manuellen Gleisunterhalt* kann z.B. mit einer Meßlehre mit Steckzapfen und Schienenaufsatzstück direkt der Abstand zwischen den Vermarkungsbolzen und dem Gleis gemessen werden. Für die Bestimmung des Abstandes und der Höhe zur Gleisachse und für die Spannmaßmessung wurde ein Festpunktmeßgerät von der Fa. Plasser und Theurer entwickelt.

Nachteilig stellte sich im Laufe der Jahre heraus, daß auch die Fahrleitungsmasten auf ihren schweren Betonfundamenten in Abhängigkeit von der Topographie und Geometrie gelegentlich feststellbaren Bewegungen unterliegen. Ein weiterer Nachteil liegt darin, daß der Meßaufwand relativ hoch ist und betriebliche Sperrpausen zur Verfügung stehen müssen, insbesondere wenn die Ist-Gleislage mit maschinellen Verfahren erfaßt werden soll (Eisenegger 1990; Lichtberger 1992; Siems 1993).

Bei den Schweizer Bundesbahnen erfolgt die koordinatenmäßige Bestimmung der Punkte des Gleisvermarkungssystems in der Regel ausgehend von trassennahen Polygonzügen, die zwischen den amtlichen bzw. bahninternen Festpunkten entlang der Trasse eingebunden werden. Zur Kontrolle sind die Gleisversicherungsbolzen doppelt polar von verschiedenen Stationen aufzunehmen. Um die Nachbarschaftsgenauigkeit der Vermarkungspunkte zu verbessern und für die Kontrolle der Punkte beim Gleisunterhalt, werden die Spannmaße zwischen gegenüberliegenden Versicherungsbolzen direkt, d.h. schräg, gemessen. Diese wurden auch in die koordinatenmäßige Berechnung miteingeführt. Anschließend wurde eine gemeinsame Netzausgleichung aller Lagefixpunkte mit den Gleisversicherungspunkten zur Steigerung der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit vorgenommen. Als Toleranzwerte für die Auswertung der Gleisvermarkungspunkte gelten bei den SBB (*Eisenegger 1990*):

- die Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Spannmaß muß ≤ 10 mm,
- die Koordinatendifferenz quer zu den Gleisen muß < 5 mm sein.

Bei den Deutschen Bundesbahnen müssen die Gleisvermarkungspunkte vermessungstechnisch neu bestimmt werden, wenn eine Nachmessung im Querschnitt eine Abweichung des Spannmaßes gegenüber der ursprünglichen Länge von mehr als 20 mm ergibt (*Siems 1993*). Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten (z.B. beim ICE-Verkehr der DB) können diese Toleranzen nicht beibehalten werden, da unstete Linienführungen in diesem Bereich unter Umständen in Verbindung mit der Eigenfrequenz des Zuges eine Komfortminderung ergeben können. Entlang der DB-Neubaustrecken wurde das amtliche Lage- und Höhenfestpunktfeld durch jeweils zwei parallel geführte Polygonzüge ungefähr 30 m außerhalb des Baubereiches beiderseits der Trasse mit folgenden Zielsetzungen verdichtet:

- alle 1,5 km ein Lagefestpunkt mit einer Standardabweichung von 2-3 cm,
- alle 0,7 km ein Höhenfestpunkt mit einer Standardabweichung von 5 mm.

Um diese Zielsetzungen zu erreichen, wurden die Polygonzüge in sich frei durchgerechnet und erst anschließend über eine Koordinatentransformation in das System der Landesvermessung gebracht. Für Kunstbauten - wie z.B. Brücken und Tunnel - wurden eigene Präzisionsnetze geschaffen. Von diesen Festpunkten aus kann eine lagemäßige Bestimmung der Gleisvermarkungspunkte mit wesentlich höheren Genauigkeiten für die Koordinatendifferenzen benachbarter Punkte erreicht werden.

In Österreich wurde auf ähnliche Bestimmungen für die Überprüfung der Stabilität des Systems der Gleisvermarkungspunkte verzichtet. Laut Angabe des Arbeitsgebietes 8.2 der Generaldirektion der Österreichischen Bundesbahnen (Oberbau) kommt es nur in Ausnahmefällen zu Bewegungen der Fahrleitungsmasten (z.B. durch Rutschungen der Böschung der Bahntrasse) und damit zu einer Lageveränderung der an den Masten angebrachten Versicherungspunkte. Der Aufbau des Netzes konnte somit in Österreich wesentlich rationeller als bei den DB vorgenommen werden (in 10 Jahren wurden alle elektrifizierten Hauptstrecken vermarktet). Kommt es dennoch zu einer Bewegung der Fahrleitungsmasten, so tritt diese meist nur in Verbindung mit einer Verschiebung des Gleises auf. Diese kann durch die regelmäßig durchzuführende Gleiskontrolle (z.B. mit dem Oberbaumeßwagen, Abschnitt 6.1.3) erfaßt werden. In diesem Fall muß eine umfangreiche Durcharbeitung des Gleiskörpers vorgenommen werden. In den *Zusatzbestimmungen zur Oberbauvorschrift ZOV 54* (*Österreichische Bundesbahnen 1993*) ist lediglich angeführt, daß die Entfernung der Gleisachse von den Vermarkungspunkten um nicht mehr als 10 mm über- oder unterschritten werden darf (Abschnitt 6.1.2). In den *Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen (Hochleistungsstrecken)* ist festgelegt, welche Gleisabschnitte

bei den Österreichischen Bundesbahnen vermarktet werden müssen (*Österreichische Bundesbahnen 1992*):

„Streckengleise und durchgehende Hauptgleise sind unter voller Berücksichtigung der Erfordernisse einer automatisierten Verlegung und Durcharbeitung zu vermarken. Überholungsgleise sind im Bereich der langen Übergangsbögen und großen Radien ebenso zu vermarken.“

Die Grundlage für die Planung und die Einrechnung einer Verkehrsstrasse in einem übergeordneten Koordinatensystem bildet die *Schaffung eines Lage- und Höhenfestpunktfeldes*. Ein für die Arbeiten benötigtes geodätisches Festpunktfeld wird so angelegt, daß es das Arbeitsgebiet möglichst umschließt. Die Arbeitsgebiete für den Neubau oder die Erneuerung der Verkehrsanlagen haben in der Regel Ausdehnungen von einigen km bis zu mehr als 100 km. Die Form dieses schmalen und langgestreckten Festpunktnetzes ist daher parallel geführten Polygonzügen, die zur weiteren Stabilisierung mit Diagonalen verknüpft sind, sehr ähnlich. Insbesondere bei Hochgeschwindigkeitsbahnen muß das Gesamtnetz eine hohe Homogenität und Isotropie aufweisen.

Bei den Österreichischen Bundesbahnen wird in der Regel kein eigenes technisches Netz geschaffen, sondern direkt das österreichische Landesnetz verwendet. Dieser regionale zweidimensionale Bezugsrahmen entstand primär mit Hilfe terrestrischer Meßverfahren mit der Technologie des 19. bzw. 20. Jahrhunderts vor der Entwicklung der elektronischen Distanzmessung (*Ehrnsperger, Erker 1989; Rinner 1981*). In den meisten Fällen konnte in der Vergangenheit die Genauigkeit des österreichischen Gebrauchsnetzes die für die Bahn notwendige hohe relative Genauigkeit noch gewährleisten. Nur bei größeren Projekten - wie z.B. bei Tunnelbauten - wurde von den ÖBB ein eigenes Netz geschaffen. Ein entscheidender Vorteil bei der Verwendung des Landesnetzes ist die Einsparung der relativ hohen Kosten für die Errichtung und die Erhaltung des Festpunktnetzes. Zusätzlich ist der direkte Zusammenhang zum Kataster und den amtlichen Kartenwerken gegeben.

Die Landesnetze niedriger Ordnung können jedoch heutzutage die besonders hohen Genauigkeitsanforderungen bei der Errichtung von Hochgeschwindigkeitsbahnen bzw. bei der Adaptierung und Verbesserung von bestehenden Hochleistungsstrecken in der Regel nicht mehr erfüllen. Hier muß entweder das bestehende Punktfeld einer Analyse unterzogen bzw. verbessert oder ein eigenes Festpunktfeld aufgebaut werden.

Beim Aufbau eines neuen Festpunktfeldes kann ein Übergang vom klassischen zweidimensionalen Bezugsrahmen auf ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem vorgenommen werden. Globale erdfeste Bezugsrahmen gewinnen z.B. für die Errichtung von kontinentalen und globalen Verkehrsleitsystemen immer mehr an Bedeutung. Für den Bau und die Erhaltung der Verkehrsanlagen werden jedoch primär die konventionellen regionalen Bezugsrahmen als Basis dienen, da diese umfassend den Bezug zu allen anderen Gegebenheiten darstellen, die für die Planung und Bauausführung von Bedeutung sind. Die Messungen können sich zunächst teilweise auf globale (z.B. GPS-Messungen im WGS84), teilweise auf lokale Bezugsrahmen (klassische terrestrische Meßverfahren) beziehen. Die Verbindungen zwischen den verschiedenen Bezugsrahmen ermöglichen räumliche Koordinatentransformationen (*Retscher 1992; Schödlbauer 1993; Seeber 1993; Wolf 1986*).

Für die *Neuanlage* eines Punktfeldes ist der Einsatz von GPS prädestiniert (*Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins 1993; Seeber 1993*). Setzt man Satellitenpositionierungsverfahren für die Bestimmung der Netze ein, so ist zunächst der gleiche Aufwand für die Erkundung und Vermarkung des Netzes zu erbringen. Besondere Vorteile bestehen jedoch darin, daß - im Gegensatz zu konventionellen Verfahren der Triangulation und Trilateration - zwischen den benachbarten Punkten eines Festpunktfeldes keine Sichtverbindungen mehr erforderlich sind, und daß die Genauigkeit der Punktbestimmung von der Geometrie des Festpunktfeldes weitgehend unabhängig ist. Auch schmale, langgestreckte Netze weisen daher eine weitgehende Homogenität und Isotropie auf, wenn sie durch Satellitenpositionierungsverfahren bestimmt werden. Die relative Genauigkeit der Netze hängt somit vor allem von der gewählten Meßmethode ab.

Bei der hierarchischen Einbindung eines GPS-Netzes in das Landesnetz niedriger Ordnung unter Zwang kann aufgrund von Spannungen im regionalen zweidimensionalen Bezugsrahmen die hohe innere Genauigkeit der GPS-Messungen erheblich verringert bzw. zu einem Teil zerstört werden. Eine hohe Homogenität für ein Baustellen- bzw. ein Kontrollnetz kann jedoch erreicht werden, wenn ausgehend vom Landesnetz höherer Ordnung GPS- Positionierungsverfahren zum Einsatz kommen. Da Sichtverbindungen nicht mehr notwendig sind, kann man ohne besonderen Aufwand das Netz entlang einer Verkehrsstrasse auf das Landesnetz II. Ordnung (oder gegebenenfalls auch III. Ordnung) stützen. Diese Netze sind bei Punktabständen zwischen 5 bis 20 km so genau, daß in der Regel für nachgeordnete Spezialnetze mit Punktabständen von 300 bis 400 m entlang der Eisenbahntrasse eine Nachbarschaftsgenauigkeit erzielt werden kann, die auch bei hohen Anforderungen an die Fahrdynamik ausreicht. Der Übergang in das Landesnetz sollte hier nur mit einer Ähnlichkeitstransformation mit sechs unbekannten Parametern (3 Translationen und 3 Rotationen) vorgenommen werden, d.h. es wird keine Maßstabsänderung für das technische Netz zugelassen. Bei der Einpassung wird hier dem Prinzip der „Wahrung der Nachbarschaftstreue“ (*Schödlbauer 1993*) Rechnung getragen.

6.1.2 Langsehnungsverfahren mit rechnergestützter Pfeilhöhenauswertung

Für die Aufmessung und die Absteckung eines Gleiskörpers wird derzeit bei den Österreichischen Bundesbahnen das *Langsehnungsverfahren mit rechnergestützter Pfeilhöhenauswertung (RPA)* verwendet. Dieses Verfahren wurde vor rund 10 Jahren in der Bundesbahndirektion Linz entwickelt. Mit Hilfe der rechnergestützten Auswertung der Pfeilhöhenmessungen kann ein direkter Zusammenhang zur Gleisdatenbank (GDB) hergestellt werden. Prinzipiell kann dieses Verfahren zu den *Richtverfahren* (Abschnitt 2.1) gezählt werden. Das Hauptziel des Langsehnungsverfahrens ist die Herstellung eines harmonischen Krümmungsverlaufes, jedoch unter Einhaltung bestimmter Mindestabstände zu Zwangspunkten des Trassenverlaufes. Die Verknüpfung zwischen der relativen und der absoluten Bestimmung der Gleislage soll über das *Gleisversicherungs- bzw. Gleisvermarkungssystem* erfolgen (Abschnitt 6.1.1). Hierbei wird die Gleislage erstmals koordinatenmäßig festgelegt, indem die Lage der Gleise durch die Angabe von Abstand und Höhe der Gleisachse zu den Vermarkungspunkten definiert und kontrolliert wird (Abb. 6.1).

Beim Langsehnungsverfahren werden zwei Arbeitsschritte unterschieden. Einerseits erfolgt eine Bestimmung der Gleis-Istlage durch Messung von Pfeilhöhen in bezug auf Sehnen mit einer Länge von 40 oder 60 m, andererseits wird die Absteckung der Sollgeometrie bzw. einer idealen Gleislage in bezug auf die Langsehnen durchgeführt.

lichkeit der Erhaltungsarbeiten der Gleisabschnitte bilden. Bei den ÖBB werden diese Oberbaumeßfahrten je nach Rang und Höchstgeschwindigkeit der Strecke zwischen zweimal und fünfmal pro Jahr durchgeführt. Der neue berührungslos messende Oberbaumeßwagen ist ein üblicher vierachsiger RIC-Reisezugwagen mit einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 250 km/h. Er kann somit an jeden Reisezug angehängt werden.

Vier wichtige Kenngrößen eines Gleises - *Spurweite*, *Längshöhenlage*, *Richtungslage* und *Überhöhung* - können mit dem Oberbaumeßwagen erfaßt werden. Das Herzstück der Meßanlage ist ein VME-Buscomputersystem, das mit fünf Prozessoren die Meßwertverarbeitung durchführt. Die Abb. 6.3 zeigt die einzelnen Komponenten für die Datenerfassung und das Prinzip der Datenverarbeitung (Presle 1993).

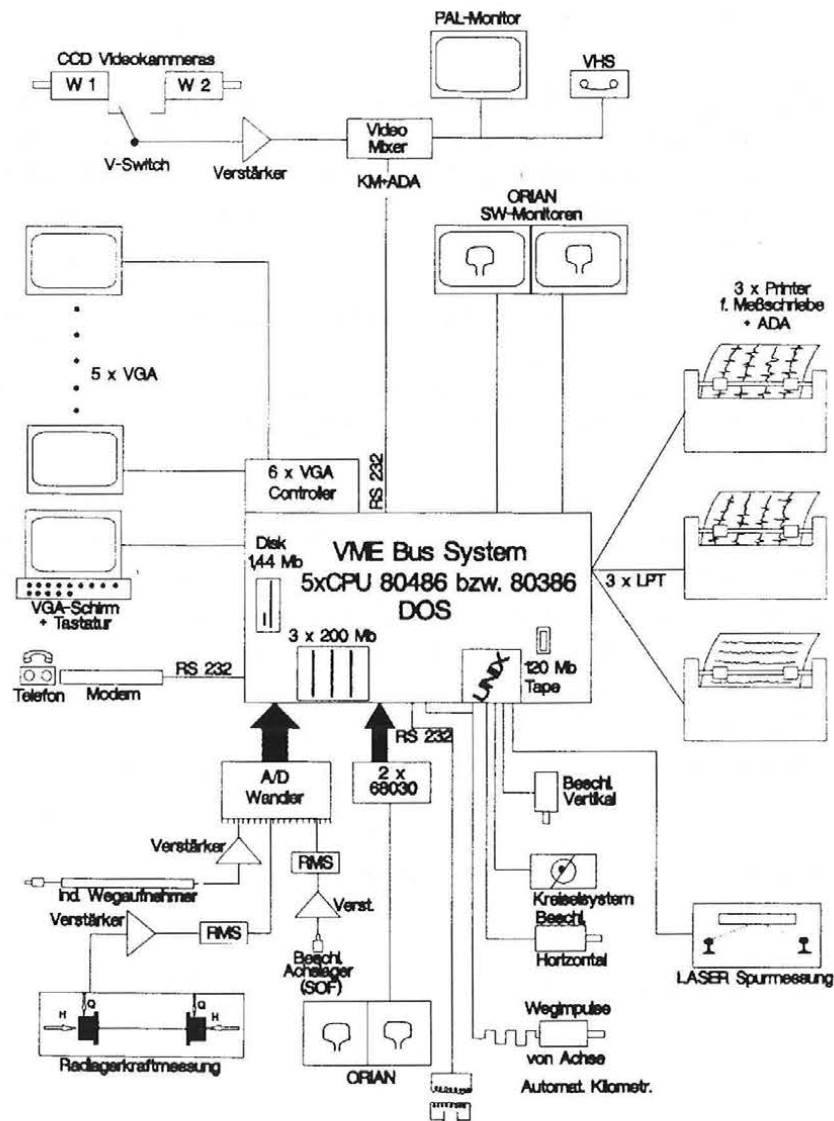


Abb. 6.3: Meßsysteme und Prinzip der Meßwertverarbeitung des Oberbaumeßwagens (Presle 1993)

Die Spurweite wird mittels zweier Laser-Meßsysteme optisch bestimmt. Auf jeder Seite des Meßwagens ist ein Laserpunkt über einen Galvanometerspiegel genau auf einen Punkt 14 mm unter der Schienenoberkante fokussiert, eine Einzeilenvideokamera mit 1024-Pixel-Auflösung

steuert über einen eigenen Rechner die exakte Lage, und die Rechnung liefert das Spurweitesignal. Die Höhenlage der rechten und der linken Schiene (Längshöhe) wird mit Hilfe von zwei Beschleunigungsaufnehmern gemessen, die im Fahrzeugboden angeordnet sind. Dieses Signal wird in einem Rechner einer digitalen doppelten Integration mit entsprechender Filterung zugeführt. Zu diesem Ergebnis werden anschließend die Meßergebnisse eines Fühlers hinzuaddiert, der jeweils den Abstand der Achse zu den Beschleunigungsaufnehmern ermittelt. Auch die Messung der Krümmung und der Seitenlage der beiden Schienen erfolgt durch die Beschleunigungsaufnehmer und ein Kreiselmeßsystem. Das Ergebnis ist eigentlich eine Raumkurve, die aber in zwei Anteile zerlegt wiedergegeben wird. Ein Anteil ist die über einen Bereich von 20 m gemittelte Krümmung. Ein zweiter Anteil gibt die Abweichung der rechten und linken Schiene von der mittleren Seitenlage über einen Bereich von 60 m wieder. Die Überhöhung wird ebenso mit dem Kreiselssystem gemessen. Neben diesen Größen erfolgt u.a. noch eine Messung des Schienenquerschnitts und der Unebenheiten der Schienenoberfläche.

Die Ergebnisse der Meßwagenfahrten sollen Anlaß zu bestimmten Maßnahmen der Gleiserhaltung sein. Bei Überschreitung von Grenzwerten sind sofort Maßnahmen zu setzen. Die Gleislage wird in Streckenabschnitten von 500 m Länge durch die *Gleiszustandszahl* (MDZ-Ziffer) allgemein beurteilt. Diese Kennziffer wird aus den Parametern Streckenhöchstgeschwindigkeit, Seitenlage und Höhenlage der beiden Schienen errechnet. Sie ist die Grundlage, um Streckenabschnitte verschiedener Höchstgeschwindigkeiten miteinander vergleichen zu können. Ist die MDZ-Zahl ihrem Betrag nach hoch, so ist der Einsatz von Richt- und Stopfmaschinen auf diesem Gleisabschnitt angebracht. Weitere Kennzahlen geben noch Aufschluß über zusätzlich durchzuführende Arbeiten, wie z.B. die Reinigung des Schotterbettes, Befestigungsmittel der Holzschwellen, Zustand der Schienenoberfläche, Tragfähigkeit des Untergrundes unterhalb des Schotterbettes, usw. (Presle 1993).

Mit diesen Meßdaten können somit die Abweichungen des Gleises zu einer idealen relativen Gleislage ermittelt werden. Um einen absoluten Bezug zur Kilometrierung herzustellen, werden zur Zeit bei den ÖBB zwei Hauptstrategien verfolgt:

- Kinematische Echtzeitvermessung mit GPS,
- Automatic location detector (ALD) - Punkte.

Für den Übergang in ein absolutes Bezugssystem, z.B. für die Steuerung einer Richt- und Stopfmaschine, ist eine absolute Lagegenauigkeit, die dem Schwellenabstand von 0.6 m entspricht, erforderlich. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten kann derzeit diese geforderte Genauigkeit mit kinematischen GPS-Meßverfahren nicht erreicht werden. Im Hinblick auf die großen Entfernungen, die mit dem Oberbaumeßwagen pro Tag untersucht werden sollen, sind bei diesem Verfahren eine Vielzahl von Referenzstationen erforderlich. Erst nach der Schaffung eines österreichweiten Netzes von Referenzstationen erscheint ein wirtschaftlicher Einsatz von GPS sinnvoll.

Der absolute Bezug zur Kilometrierung kann auch über im Gleis befindliche Magnetpunkte hergestellt werden. Diese ALD-Punkte werden etwa alle 10 km im Gleis verlegt und über zwei im Meßwagenboden befindliche Antennen angesprochen. Man erhält derzeit eine Genauigkeit in der Kilometrierung von 1.0 m. Für die absolute Lagebestimmung der ALD-Punkte kann GPS eingesetzt werden. Der Einsatz dieser ALD-Punkte und deren Stabilisierung im Gleis ist jedoch sehr kostenintensiv und daher nur für die Hauptstrecken wirtschaftlich vertretbar.

Damit der Oberbaumeßwagen in Zukunft nicht nur für die „*Diagnose*“ des bestehenden Zustandes eines Gleiskörpers eingesetzt werden kann, sondern völlig - wie vom Arbeitsgebiet 8.2 (Oberbau) der Generaldirektion der Österreichischen Bundesbahnen geplant ist - das in Abschnitt 6.1.2 beschriebene Langsehnverfahren ersetzen und somit direkt die Korrekturwerte für eine Richt- und Stopfmaschine liefern kann, ist eine erhebliche Genauigkeitssteigerung für die absolute Positionierung erforderlich.

6.2 Gegenüberstellung der Methoden

Gleisaufnahmen mit Richtverfahren bzw. modernen kombinierten absoluten und relativen Verfahren können anhand ihrer Tendenzen zum Abbau von Gleisdeformationen beurteilt werden. Die herkömmlichen Verfahren erreichen trotz einer Vielzahl von Schwächen ein hohes Genauigkeitsniveau für die relative Gleislage. Ausgehend von den Grenzwerten dieser Verfahren können Toleranzen für die Überprüfung der Formtreue bei den modernen Aufnahmekonzepten abgeleitet werden. Wichtige Vorteile und Eigenschaften des Winkelbildverfahrens finden ebenso ihre Berücksichtigung.

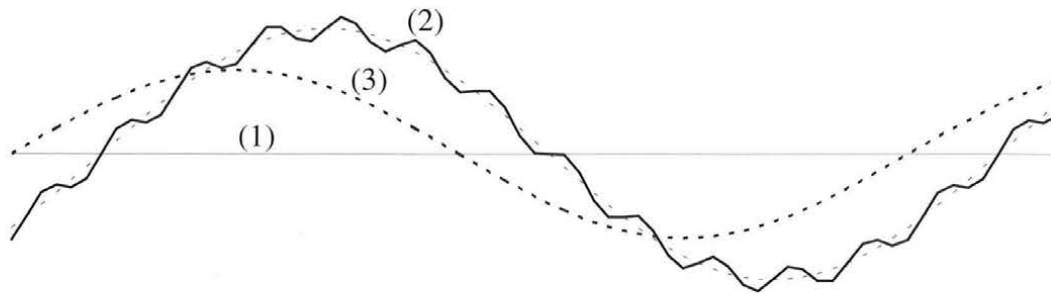
6.2.1 Abbau von Gleisdeformationen

Bei der Beurteilung des Abbaus von Gleisdeformationen muß einerseits die *Glättung des Trassenverlaufs* und andererseits die *Tendenz zur Gleisverschiebung in Richtung zur Sollage* betrachtet werden (Hennecke, Müller, Werner 1991). Wellenförmige Gleislagefehler können in Abhängigkeit von den Eigenfrequenzen des Triebkopfes von Schienenfahrzeugen Resonanzschwingungen verursachen, die unter Umständen zu einer sicherheitsrelevanten Beeinflussung des Fahrverhaltens führen. Dadurch wird der Verschleiß der Schienen erhöht und es kommt zu einer Beeinträchtigung des Fahrkomforts. Durch die Glättung des Trassenverlaufs wird eine sich kontinuierlich ändernde bzw. gleichbleibende Krümmung erreicht. Es entsteht ein ruhiger Fahrzeugverlauf und die Tendenz der Lagefehlerentstehung ist gering. Die Gleisverschiebung in Richtung zur Sollage hat im Hinblick auf einen ruhigen Fahrzeugverlauf keine Bedeutung. Daher war dieser Gesichtspunkt früher für Gleise in freier Lage unbedeutend. Heutzutage muß bei der Neuabsteckung einer Hochleistungsstrecke die Trasse absolut innerhalb eines Korridors von wenigen cm liegen. Diese Forderung kann durch moderne geodätische Methoden leicht erfüllt werden.

Zur Abschätzung von Tendenzen für die Fehlerverkleinerung in der Gleislage, die durch ein Richtverfahren (Abschnitt 2.1) erzielt werden können, sollen die in der Abb. 6.4 dargestellten Gleislagefehler dienen. Das Gleis hat einen sinusförmigen Verlauf zur Sollage und weist eine Oberschwingung in Form von kurzperiodischen Wellen auf.

Mit einem Richtverfahren können kurzperiodische Gleislagefehler gut abgebaut werden, so daß eine hohe Krümmungsgenauigkeit im Nahbereich erzielt wird. Das Kriterium der Überprüfung sind die Differenzen benachbarter Pfeilhöhen nach Tab. 6.1 in Abschnitt 6.1.2. Langperiodische Schwingungen können jedoch nicht zur Gänze abgebaut werden. Wie in Abb. 6.4 dargestellt, wird im allgemeinen durch den Richtvorgang eine geringfügige Reduktion der Amplitude der Fehllage erreicht, die Wellenlänge bleibt aber nahezu unverändert. Die Tendenz zum Abbau der langwelligen Gleislagefehler hängt vor allem von der Länge der Sehne für die Pfeilhöhenmessung im Vergleich zur Wellenlänge der Fehlereinflüsse ab. Entscheidend dabei ist das Verhält-

nis der Meßsehnenlänge s zum Richtpunktabstand Δl . Je größer das Verhältnis $s/\Delta l$ ist, um so größer wird die Fehlerverkleinerung der langwelligen Gleislagefehler sein (Hennecke, Müller, Werner 1991). Daher wurden beim Langsehnenverfahren die Sehnenlänge von ursprünglich 20 m auf 60 m (oder auch 80 m) vergrößert. Mit steigender Wellenlänge vermindert sich jedoch der Fehlerabbau. Im Extremfall einer parallelen Gleislage zur Sollage ist der Fehlerabbau gleich Null.



mit

- (1) Sollage
- (2) idealisierter Fehlerverlauf vor dem Richtvorgang
- (3) Gleislage nach dem Richtvorgang

Abb. 6.4: Idealisierter Fehlerverlauf zur Abschätzung von Tendenzen der Richtverfahren

Das Winkelbildverfahren ist nicht in der Lage, langwellige Gleislagefehler im Abstands-bereich von 50 bis 100 m, die bei Fahrgeschwindigkeiten größer als 160 km/h negative Auswirkungen auf die Fahrdynamik haben, vollständig zu eliminieren. Die systematischen Gleisfehlagen werden sogar zum Teil vom eingesetzten Absteckverfahren selbst verursacht. Dies wurde durch 3D-Gleisaufnahmen auf Streckengeleisen der DB, die vorher mit dem Langsehnenverfahren bearbeitet wurden, nachgewiesen (Wübbena 1993). Periodische Fehllagen sind typisch für eine Durcharbeitung mit dem Langsehnenverfahren, da die Nulldurchgänge der fehlerhaften Lage in der Regel sehr stark mit den Querfeldern der Gleisvermarkung (Abschnitt 6.1.1) korreliert sind. Weist beispielsweise der gegenseitige Abstand der Gleisvermarkungspunkte eine Abweichung gegenüber dem ursprünglichen Abstand auf, wobei bis zu 2 cm bei den DB noch toleriert werden, so ergibt sich eine Aneinanderreihung von Trassenelementen mit Knicken in den Endpunkten der Langsehnen. Jede Langsehne repräsentiert mit ihren Pfeilhöhen ein eigenes lokales Koordinatensystem (Lahr 1995).

Mit dem Einsatz des modernen kombinierten Verfahrens zur Bestimmung der absoluten und relativen Gleislage (Abschnitt 2.2) können diese langperiodischen Fehllagen erfaßt und vermieden werden. Sie sind Bestandteil des Signals (Abschnitt 3.1) und werden über die Filterung der Meßdaten bestimmt. Das Signal bildet die Grundlage für die Berechnung der notwendigen Gleiskorrekturen (Abschnitt 4.4). Die erzielbare Genauigkeit für die 3D-Aufmessung des Gleiskörpers mit dem Multisensorsystem reicht für den Abbau der langwelligen Gleislagefehler bei weitem aus. Entscheidend ist die Beurteilung der relativen Gleislage bzw. Krümmung im Abstandsbereich von 5 bis 20 m. In diesem Bereich war bis jetzt das Winkelbildverfahren den trigonometrischen Verfahren überlegen (z.B. Abendroth, Frey 1986; Hennecke, Müller, Werner 1991).

Zur Beurteilung des Krümmungsverlaufs im Nahbereich müssen ausgehend von den in Tab. 6.1 enthaltenen zulässigen Pfeilhöhenunterschieden die Toleranzen für die Krümmungsdifferenz

benachbarter Punkte eines Gleiskörpers sowie für die Differenz zwischen der Soll- und Istkrümmung abgeleitet werden. Unter der Voraussetzung eines flachen Bogenverlaufs besteht zwischen der Pfeilhöhe h und der Krümmung κ folgender Zusammenhang (Hennecke, Müller, Werner 1991):

$$h = \frac{\Delta l^2}{2} \cdot \kappa. \quad (6.1)$$

Ersetzt man die Bogenlänge Δl , die dem Punktabstand entspricht, durch die halbe Sehnenlänge s , so erhält man genähert für die Krümmung κ

$$\kappa \approx \frac{8h}{s^2}. \quad (6.2)$$

Die in Tab. 6.2 angegebenen Werte wurden mit Glg. (6.2) aus den zulässigen Pfeilhöhenunterschieden in Tab. 6.1 in die Krümmungsdifferenzen für einen Punktabstand von 5 und 10 m umgerechnet.

Streckengeschwindigkeit lt. Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VZG)	zul. Krümmungs- differenz $\Delta\kappa$ bei einem Punktabstand von 10 m	zul. Krümmungs- differenz $\Delta\kappa$ bei einem Punktabstand von 5 m
bei Normalspur:		
$v > 120 \text{ km/h}$ bzw. $R \text{ Kreis} > 10000 \text{ m}$	$0.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$1.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
$v \leq 120 \text{ km/h}$ und $R \text{ Kreis} \leq 10000 \text{ m}$	$1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
bei Schmalspur:	$1.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$	$2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

Tab. 6.2: Grenzwerte für die zulässigen Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ benachbarter Punkte abgeleitet aus Tab. 6.1

Ebenso wie bei den zulässigen Pfeilhöhenunterschieden in Tab. 6.1 gelten die zulässigen Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ benachbarter Punkte in Tab. 6.2 auch für Übergangsbögen, wobei die planmäßige Krümmungsdifferenz zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Will man die in der ZOV 54 (Österreichische Bundesbahnen 1993) festgelegten Genauigkeitsforderungen für die Pfeilhöhenmessung erfüllen, so müssen die Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ benachbarter Punkte in Abhängigkeit vom Punktabstand im Größenordnungsbereich von $0.5 \cdot 10^{-4}$ bis $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ genau bestimmt werden. Zur Veranschaulichung der Größenordnung der Grenzwerte für die Krümmungsdifferenz kann der abstrakte Begriff der Krümmung nach Glg. (2.2) in einen Kreisbogenradius R umgerechnet werden. Beispielsweise entspricht der Krümmungsdifferenz von $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ein Kreisbogenradius von 10000 m. Einschränkend ist zu bemerken, daß bei der Ableitung dieser Grenzwerte zwei Näherungen vorgenommen werden. Einerseits wird bei der Pfeilhöhenmessung das betrachtete Kurvenstück über der vorgegebenen Sehnenlänge durch einen Kreisbogen approximiert und andererseits wird bei der Umrechnung in die zulässigen Krümmungsdifferenzen nach Glg. (6.2) die Bogenlänge des Kurvenstückes durch die Sehnenlänge ersetzt. Trotz dieser Näherungen entspricht die relative Genauigkeit den Ansprüchen der Fahrdynamik.

Die Krümmungsgenauigkeit von gefilterten Meßserien wurde in Abschnitt 4.3.1 untersucht. Aus Tab. 6.2 folgt eine Toleranz von $2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ für die Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$, da die

ausgewerteten Gleisaufnahmen auf Nebenbahnlinien mit höchst zulässigen Fahrgeschwindigkeiten $v \leq 120$ km/h und Kreisbogenradien ≤ 10000 m ausgeführt wurden. Die mit dem Wiener-Filter ermittelten Schätzwerte für das Signal überschreiten nur in Ausnahmefällen diesen Grenzwert.

Bei Hochgeschwindigkeitsbahnen müssen die Toleranzwerte für die relative Gleislage kleiner angesetzt werden. Dem Vermessungsingenieur wird in der Regel nur ein Anteil von 20 bis 30 % der Bautoleranz, die die Herstellungs-, Montage- und Vermessungsgenauigkeit beinhaltet, für seine Arbeiten zugestanden. Beim Bau der „Festen Fahrbahn“ betragen die lateralen und vertikalen Vermessungstoleranzen ± 2 bis 3 mm, bezogen auf Sehnen von 20 m Länge (entspricht einer Krümmungsdifferenz $\Delta\kappa$ von $0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$), wobei diese als 2 σ -Werte zu verstehen sind, d.h. also mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % einzuhalten sind.

6.2.2 Optimale Bestimmung der Solltrasse

Ein wesentlicher Vorteil des Winkelbildverfahrens - im Gegensatz zu herkömmlichen trigonometrischen Verfahren - wird immer wieder darin gesehen, daß eine optimale Anpassung der eingerechneten Solltrasse an die in der Natur vorhandene Ist-Gleislage erzielt werden kann. Dieser Umstand ist durch die Anwendung des Verfahrens begründet. Ausgehend von der bestehenden Isttrasse (Standlinie) erfolgt die graphische Einpassung bzw. die Einrechnung der neuen Solltrasse (Entwurf) unter Minimierung der erforderlichen Gleisverschiebungen (Abschnitt 2.1.2). Die Trassenelemente bilden einen Linienzug, dessen Glieder tangieren. Unerwünschte Verschiebungen lassen sich beim digitalisierten Winkelbildverfahren durch eine Neuberechnung des Linienzuges beseitigen. Bei der herkömmlichen trigonometrischen Auswertung ergeben sich einzelne unabhängige Elemente, die durch Verschwenken oder Verbiegen erst zu einem Trassenzug zusammengefügt werden müssen. Wegen des wesentlich größeren Aufwandes bei der trigonometrischen Auswertung bestehe die Gefahr, daß nicht eine optimale Lösung erarbeitet wird (Abendroth, Frey 1986).

Das neu entwickelte Meß- und Auswerteprogramm (Abschnitt 5.3) bietet ebenfalls die Möglichkeit einer optimalen Trassenbestimmung. Die Trassenbestimmung erfolgt unter Verwendung der ersten beiden Stufen des vollständigen Berechnungsverfahrens einer Kollokation (Abschnitt 3.4.3). Die Solltrasse setzt sich aus den für die Trassierung von Eisenbahnanlagen üblichen Trassierungselementen Geraden, Kreis- und Übergangsbögen zusammen. Die Trassenparameter werden zuerst unabhängig für jedes Trassierungselement durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (Stufe 1) und anschließend über Bedingungsgleichungen miteinander verbunden (Stufe 2). Zum Anschluß an bestehende Gleislagen kann die Solltrasse mit der Vorgabe berechnet werden, daß am Anfang und bzw. oder am Ende der Aufnahme keine Abweichungen auftreten dürfen. Diese Vorgabe kann durch eine höhere Gewichtung der Messungen am Anfang bzw. Ende erfüllt werden.

6.2.3 Zusammenstellung der Vorteile

Die Ableitung der Toleranzwerte und die Genauigkeitsanalyse hat ergeben, daß die 3D-Gleisaufnahme mit einem Multisensorsystem in Verbindung mit einer Auswertung der Meßdaten über lineare Filterverfahren das angestrebte hohe Genauigkeitsniveau für die absolute und relative Gleislage bei Hochgeschwindigkeitsbahnen erreichen kann. Bei günstigen äußeren Be-

dingungen liefert das Verfahren in einem Abstandsbereich von bis zu 200 m von der Referenzstation (Tachymeterstandpunkt bzw. GPS-Referenzempfänger) einwandfrei das gewünschte Ergebnis. Damit ist innerhalb eines ca. 400 m langen Gleisabschnitts ein homogener Bearbeitungsabschnitt im Gegensatz zu den vielen kurzen Abschnitten der Langsehne gegeben. Die bisher auftretenden Unstetigkeitsstellen in den jeweiligen Quersfeldern der Gleisvermarkung werden vermieden. Auf das System der Gleisvermarkungspunkte kann verzichtet werden, es genügt die Schaffung eines trassennahen Festpunktfeldes mit Punktdichten von 300 bis 400 m. Die dreidimensionale Punktbestimmung ersetzt bisherige sachlich und zeitlich getrennte Vermessungsverfahren für die Lage- und Höhenbestimmung. Die jeweiligen Vorteile von GPS und elektronischer Tachymetrie führen bei einer sinnvollen Kombination im Sinne eines hybriden Vermessungssystems zu einer erheblichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Das Multisensorsystem erfaßt den gesamten Gleisstreifen mit seinen Kenngrößen 3D-Position der Gleisachse bzw. Fahrkante, Spurweite und Überhöhung. Die Gleisaufnahme kann ohne Beeinträchtigung des Fahrbetriebes erfolgen, betriebliche Sperrpausen sind nicht erforderlich.

Abschließend seien die *Vorteile des Kombinierten absoluten und relativen Verfahrens* überblicksweise zusammengestellt:

- Hoher Automationsgrad.
- Universelle Einsetzbarkeit.
- Hohe Genauigkeit für die absolute und relative Gleislage.
- Bestimmung der absoluten und relativen Gleislage in einem Arbeitsgang.
- Keine Trennung zwischen Lage- und Höhenaufnahme, sondern flächenhafte Erfassung des Gleiskörpers (Bestimmung des Gleisstreifens).
- Optimale Bestimmung der Solltrasse.
- Verfahren verursacht keine langwelligen Gleislagefehler.
- Trassennahe Festpunkte ersetzen das System der Gleisvermarkungspunkte.
- Höhere Wirtschaftlichkeit durch Wahl des optimalen Meßverfahrens (terrestrisch bzw. GPS).
- Keine betrieblichen Sperrpausen.

Die vielfältigen Vorteile des modernen Verfahrens belegen eindeutig, daß das derzeit eingesetzte Verfahren zur Gleisaufnahme nicht mehr zeitgemäß ist und daher kurz vor seiner Ablösung steht. Gegenüber dem bisherigen Langsehnenverfahren wird eine 3- bis 4-fache Leistungssteigerung unter der Voraussetzung, daß das gesamte gewonnene Informationsspektrum benötigt und verarbeitet wird, erwartet.

7. Schlußbetrachtung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein umfassendes und universelles *Aufnahme- und Auswertekonzept* für eine moderne 3D-Gleiserfassung vorgestellt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren der Gleisvermessung kann das Verfahren sowohl für die Überprüfung und Neuabsteckung bestehender Gleisanlagen als auch bei der Neuverlegung von Schienensträngen angewendet werden.

Die *3D-Aufmessung der Isttrasse* erfolgt mit einem Multisensorsystem, das im wesentlichen aus einer dreidimensionalen Positionierungseinheit und elektronischen Meßwertgebern in Verbindung mit einem Prozeßrechner besteht. Das Meßsystem erfaßt den gesamten Gleisstreifen mit seinen Kenngrößen 3D-Position der Gleisachse bzw. Fahrkante, Spurweite und Überhöhung. Die Aufnahme wird durch den Einsatz eines eigens entwickelten Meßwagens, der sich in dem zu untersuchenden Gleiskörper bewegt, erleichtert.

Insbesondere widmet sich diese Arbeit dem Aspekt der *Meßdatenverarbeitung*. Über lineare Filter- und Glättungsverfahren werden Schätzwerte für die Istlage der Gleise nach der Methode der kleinsten Quadrate aus der aufgenommenen 3D-Meßwertreihe bestimmt. Der Einsatz dieser Algorithmen führt zu einer optimalen Reduktion des Meßrauschens bzw. anderer zufälliger Störeinflüsse. Aus einem Vergleich der berechneten Istlage mit der künftigen Soll-Gleislage im 3D-Raum folgen schließlich die absoluten Verschiebewerte der Gleiskorrektur.

Für die Auswertung werden Algorithmen zur Verfügung gestellt, die sowohl eine Verarbeitung der Meßdaten direkt während der Aufnahme (on-line) als auch im nachhinein (off-line) ermöglichen. Aufgrund seiner rekursiven Berechnungsweise eignet sich der *Kalman-Filter* für den Einsatz im on-line Betrieb. Für off-line Auswertungen wird ein allgemeines Verfahren, nämlich die *Wiener-Filterung bzw. Kollokation*, vorgeschlagen. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen werden die mathematischen Modelle modifiziert und optimal für die Auswertung einer 3D-Gleisaufnahme angepaßt.

Die Umsetzung der Algorithmen erfolgt durch die Entwicklung einer neuen Software, die aufgrund ihres modularen Aufbaus jederzeit erweitert werden kann. Das Meß- und Auswerteprogramm übernimmt einerseits die Steuerung des gesamten Meßablaufs und andererseits die Auswertung der Meßdaten wahlweise im on-line bzw. off-line Modus.

Neben der Filterung der Meßwerte bietet die Wiener-Filterung bzw. Kollokation die Möglichkeit einer optimalen *Trassenbestimmung* aus den Meßdaten, wobei sich die eingerechnete Trasse aus den bei der Trassierung von Eisenbahnanlagen üblichen Trassierungselementen zusammensetzt. Bei Verwendung dieser Trasse als künftige Soll-Gleislage können die erforderlichen Gleisverschiebungen minimiert werden. Zum Anschluß an bestehende Gleislagen kann die Solltrasse auch mit der Vorgabe berechnet werden, daß an den Anschlußstellen keine Abweichungen auftreten dürfen.

Von entscheidender Bedeutung für die *Beurteilung der Qualität* der Eisenbahntrasse ist die Genauigkeit der relativen Gleislage bzw. Krümmung. Ausgehend von den Abnahmebedingun-

gen für Gleisbauarbeiten (Oberbauvorschrift der ÖBB) werden Toleranzen für die Überprüfung der Formtreue bei den modernen Aufnahmekonzepten abgeleitet. Die Herstellung einer hohen Genauigkeit für die absolute Gleislage spielte früher eine untergeordnete Rolle. Heutzutage muß bei der Neuabsteckung einer Hochleistungsstrecke zusätzlich die Trasse absolut innerhalb eines Korridors von wenigen cm liegen.

Im Zuge der Auswertung von Gleisaufnahmen von Nebenbahnlinien konnte die *hohe Genauigkeit des modernen Aufnahmeverfahrens* sowohl für die Bestimmung der absoluten als auch der relativen Gleislage bzw. Krümmung nachgewiesen werden. Die Überprüfung der Formtreue der aus den Meßwerten berechneten Isttrasse ergab abgesehen von wenigen Ausnahmefällen keine Überschreitung der vorgeschriebenen Toleranzwerte.

Bei *Hochgeschwindigkeitsbahnen* werden die besonders hohen Genauigkeitsanforderungen durch das Meßsystem im Abstandsbereich von bis zu 200 m von der Referenzstation (Tachymeterstandpunkt bzw. GPS-Referenzempfänger) gewährleistet. Das Verfahren liefert bei günstigen äußeren Bedingungen einen ca. 400 m langen homogenen Bearbeitungsabschnitt. Voraussetzung hierfür bildet die Schaffung eines homogenen und isotropen trassennahen Festpunktfeldes mit Punktdichten von 300 bis 400 m. Für die Neuanlage dieser Punktfelder ist der Einsatz des Global Positioning Systems prädestiniert.

Der Einsatz von Systemen für *GPS-Echtzeitvermessung* kann als gleichberechtigte Alternative bzw. Ergänzung zu elektronischen Tachymetern mit automatischer Zielverfolgung für die 3D-Gleisaufnahme gesehen werden. Beide Verfahren verwenden im Prinzip die gleiche Meßstrategie. Äußere Bedingungen und das Umfeld entlang der Eisenbahntrasse (z.B. Sichtbehinderungen bzw. Abschattungen) erfordern in der Regel eine sinnvolle Kombination von Tachymetrie und GPS. Damit können die Vorteile beider Systeme optimal im Sinne eines hybriden Vermessungssystems genutzt werden. Für kürzere Abschattungsbereiche bzw. Sichtbehinderungen ist auch der Einsatz von Stützsensoren denkbar, mit denen eine Interpolation mit entsprechender Genauigkeit möglich ist.

Über die Methode der Spektralanalyse kann ein *optimales Abtastintervall* nach dem Shannon-schen Abtasttheorem gefunden werden. Die Überprüfung der Formtreue von Schätzwerten für die Isttrasse bestätigt den aus der empirischen Analyse von Leistungsspektren gewonnen Maximalwert für das Diskretisierungsintervall. Für den Einsatz des Multisensorsystems in der Praxis resultiert ein Meßpunktabstand von 4 bis 5 m.

Im Vergleich zum Langsehenverfahren ergeben sich eine Reihe von Vorteilen. Aus technischer Sicht führt das Verfahren nicht zum Entstehen von systematischen Gleisfehlagen mit periodischer Charakteristik. Die wesentlichen Vorteile liegen jedoch in der *Wirtschaftlichkeit* des Verfahrens.

Die Wirtschaftlichkeit der Gleisvermessung hängt im entscheidenden Maße von der Dauer der Vermessungsarbeiten ab. On-line Auswertungen der Meßdaten führen nicht nur bei der Überprüfung der Gleislage im Zuge der Neuverlegung von Schienen, sondern auch bei der Überprüfung von bestehenden Eisenbahntrassen zu einer erheblichen Steigerung der Produktivität. Für die Vorgangsweise bei der Aufnahme und Kontrolle der Gleislage wurden Vorschläge erarbei-

tet. Die Gleisaufnahme kann ohne Beeinträchtigung des Fahrbetriebes erfolgen, betriebliche Sperrpausen sind nicht erforderlich. Durch die sehr hohen Meßgeschwindigkeiten und Streckenleistungen ist im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren eine *3- bis 4-fache Leistungssteigerung* zu erwarten.

Das neu entwickelte Aufnahme- und Auswertekonzept weist neben einem hohen Grad an *Automation* auch eine große *Flexibilität* auf. Hierbei ist das Potential mit den zur Zeit eingesetzten Meßsystemen sowie bei den Bestandteilen bzw. im konstruktiven Aufbau des Meßwagens noch lange nicht erschöpft. Den Erweiterungs- und Ausbaumöglichkeiten des Konzepts sind durch den modularen Systemaufbau keine Grenzen gesetzt.

Literaturverzeichnis:

- Abendroth H., W. Frey (1986):** *Gleiseinrechnung durch digitalisiertes Winkelbildverfahren*. Der Eisenbahningenieur 37, 7/1986, S. 309-321.
- Abidin H. Z. (1994):** *On-the-Fly Ambiguity Resolution*. GPS World, April 1994, S. 40-50.
- Allmann G.-D. (1989):** *Differenzhöhenverfahren zur Festlegung von Gleisgradienten*. Der Eisenbahningenieur 40, 1/1989, S. 26-29.
- Aßmus E., Kraus K. (1974):** *Die Interpolation nach kleinsten Quadraten: Prädiktionswerte simulierter Beispiele und ihre Genauigkeiten*. Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München 1974.
- Bagnaschi L. (1993):** *Application of an Adaptive Kalman Filter for the Estimation of Position, Velocity and Acceleration of a Moving Body from GPS Measurements*. IGP Bericht Nr. 226, ETH Zürich, 1993.
- Bahndorf J., F. Gielsdorf, L. Gründig (1994):** *The Design and Management of Three Dimensional Alignment of Rails and Switches*. Proceedings of the XX. FIG-Congress, Melbourne Australia, March 5-12 1994, p. 604.3/1-604.3/11.
- Bohn Ch. R., H. Danhauser (1987):** *Schnellvorbau von Gleisen für Neubaustrecken*. Der Eisenbahningenieur 38, 1/1987, S. 24-33.
- Brammer K., G. Siffling (1975):** *Kalman-Bucy-Filter: Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung*. Methoden der Regelungstechnik, Band 11, R. Oldenbourg Verlag, München - Wien 1975.
- Brauner H., W. Kickingier (1977):** *Baugeometrie, Band 1*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1977.
- Brockwell P. J., Davis R. A. (1991):** *Time Series: Theory and Methods*. Springer Series in Statistics, Second Edition, Springer-Verlag, New York, 1991.
- Chmelina K., M. Jobst, G. Retscher (1995):** *GPS bei extremer Abschattungssituation - Routine oder Herausforderung ?* Allgemeine Vermessungsnachrichten, 7/1995, S. 257-266.
- Cocard M. (1995):** *Neue Entwicklungen in der Positionierung mit GPS: Anwendungen im kinematischen Modus*. Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 4/95, S. 261-266.
- Damjakob H., H. Kahmen (1989):** *Steuerung des Fertigungsprozesses von Stahlbetonbauwerken durch rechnergestützte vektorielle Vermessungssysteme am Beispiel von Naturzugkühltürmen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 2/1989.
- DeLoach S., D. Wells, D. Dodd (1995):** *Why On-the-Fly ?* GPS World, May 1995, S. 53-58.
- Dittrich R., F. Hrbek, W. Kaluza (1985):** *Das Österreichische Vermessungsrecht*. Manzsche Verlags- und Universitätsbuchhandlung, Wien 1985.
- Ebneter F. (1988):** *Ein System zur Trassierungsberechnung und deren Übertragung für die automatische Steuerung von Gleisbaumaschinen - Teil I: Automatische Gleismess-technik*. in: Schnädelbach K., H. Ebner (Hrsg.): X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung in München, Ferd. Dümmlers Verlag 1988, S. D7/1-D7/11.
- Ebneter F. (1990 a):** *Zusammenarbeit SBB - RAV: Realisierungsprojekt*. Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 9/90, S. 457-461.
- Ebneter F. (1990 b):** *Vermessung und Eisenbahn*. Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/90, S. 673-681.

- Ebneter F. (1990 c):** *Die Datenbank der festen Anlagen: das geographische Informationssystem der SBB.* Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/90, S. 698-702.
- Ehrnsperger W., E. Erker (1989):** *Das Europäische Datum 1987 (ED87) und sein österreichischer Anteil.* Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft 2, 1989, S. 47-89.
- Eisenegger St. (1990):** *Das neue Gleisversicherungssystem der SBB.* Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/90, S. 686-693.
- Engelbrecht B. (1987):** *Die Erprobung digitaler Filter für 3-dimensionale Messungen mit dem System GEOROBOT.* Diplomarbeit, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1987.
- Eugster E., A. Roth (1990):** *Organisation und Aufgaben der Bahnvermessung.* Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/90, S. 705-710.
- Euler H.-J. (1995):** *Statische/Kinematische Echtzeitvermessung mit GPS.* in: Heck B., M. Illner (Hrsg.): GPS-Leistungsbilanz '94, Beiträge zum 34. DVW-Seminar vom 05.-07.10.1994 am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe, Schriftenreihe der DVW 18/1995, S. 271-286.
- Fendrich L. (1992):** *Die Oberbauinstandhaltung: Verfügbarkeit - CIR - Wechselwirkung.* Der Eisenbahningenieur 43, 5/1992, S. 274-276.
- Fiedler J. (1991):** *Grundlagen der Bahntechnik: Eisenbahnen, S-, U- und Straßenbahnen.* Werner-Verlag, Düsseldorf 1991.
- Fleury J. (1994):** *Surveying Works for High Speed Railway Lines.* Proceedings of the XX. FIG-Congress, Melbourne Australia, March 5-12 1994, p. 604.1/1-604.1/10.
- Freimann E. (1985):** *Beurteilung von Krümmungsfehlern in Gleisbögen.* Der Eisenbahningenieur 36, 9/1985, S. 419-421.
- Gebauer J. (1992):** *Oberbauinstandhaltungsmaßnahmen: Planung und Durchführung in betrieblich hochbeanspruchten Gleisen und ihre Auswirkungen auf die Produktion - Ein Beitrag zur Leistungssteigerung.* Der Eisenbahningenieur 43, 5/1992, S. 284-289.
- Geotronics (1991):** *Geodimeter System 4000.* Produktinformation, 1991.
- Geotronics (1992):** *Geodimeter System 4000.* Bedienungshandbuch, 1992.
- Geotronics (1993):** *Geodimeter - Software und Datenkommunikation.* Bedienungshandbuch, 1993.
- Gigas E., K. Ebeling (1957):** *Elektrisches Auge.* Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 51, Frankfurt 1957.
- Gillich S. (1993):** *Entwicklung der Festen Fahrbahn in Österreich.* Tagungsband Hochleistungsbahn, Bau-technische Belange, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein 1993, S. 66-82.
- Großmann W., H. Kahmen (1988):** *Vermessungskunde III.* Walter de Gruyter, Berlin - New York 1988.
- Gründig L., J. Bahndorf (1988):** *Ein System zur Trassierungsberechnung und deren Übertragung für die automatische Steuerung von Gleisbaumaschinen - Teil 2: Ein rechnergestütztes Entwurfssystem zur dreidimensionalen Trassierung.* in: Schnädelbach K., H. Ebner (Hrsg.): X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung in München, Ferd. Dümmlers Verlag 1988, S. D7/14-D7/25.
- Gründig L. (1990):** *Ein System zur Trassierungsberechnung.* Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/90, S. 694-697.
- Hainitz H., W. Heindl, G. Presle (1993):** *Neugestaltung von Übergangsbögen.* Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architektenvereines, Heft 10/1993, S. 388-395.

- Hartung J., B. Elpelt, K.-H. Klösener (1995):** *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 10. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien 1995.
- Hatton L., M. H. Worthington, J. Makin (1994):** *Seismic Data Processing: Theory and Practice*. Blackwell Scientific Publications, Oxford 1994.
- Heindl W. (1993):** *Neue Geometrie in der Gleisführung*. Tagungsband Hochleistungsbahn, Bautechnische Belange, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein 1993, S. 11-17.
- Hennecke F., G. Müller, H. Werner (1990):** *Handbuch Ingenieurvermessung, Band Verkehrsbau - Trassen*. Verlag für Bauwesen, Berlin 1990.
- Hennecke F., G. Müller, H. Werner (1991):** *Handbuch Ingenieurvermessung, Band Verkehrsbau - Eisenbahnbau*. Verlag für Bauwesen, Berlin 1991.
- Hennecke F., G. Müller, H. Werner (1993):** *Handbuch Ingenieurvermessung, Band Verkehrsbau - Eisenbahnbau, Ergänzungsband: Deutsche Bundesbahn*. Wichmann Verlag, Karlsruhe 1993.
- Hennecke F., G. Müller, H. Werner (1994):** *Handbuch Ingenieurvermessung, Band Grundlagen*. Wichmann Verlag, Heidelberg 1994.
- Hilliges D. (1987):** *Einsatz der Festen Fahrbahn auf den Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn*. Der Eisenbahningenieur 38, 7/1987, S. 347-353.
- Hilliges D. (1993):** *Feste Fahrbahn/Bauart Rheda - Entwicklung und Anwendung*. Tagungsband Hochleistungsbahn, Bautechnische Belange, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein 1993, S. 84-91.
- Höpcke W. (1980):** *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. Walter de Gruyter, Berlin - New York 1980.
- Hofmann-Wellenhof B., H. Lichtenegger, J. Collins (1993):** *GPS - Theory and Practice*. Springer-Verlag, Wien 1993.
- Hoschek J., D. Lasser (1989):** *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1989.
- Huep W. (1985):** *Positionsbestimmung im Küstenbereich*. in: Pelzer H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1985.
- Huep W. (1993):** *Das Zusammenwirken von GPS und Tachymetrie mit Blick auf die Detailaufnahme*. in: Potthoff H. (Hrsg.): *GPS - eine universelle geodätische Methode*, Beiträge zum 31. DVW-Seminars vom 22.-24.03.1993 am Institut für Planetare Geodäsie der Technischen Universität Dresden, Schriftenreihe der DVW 11/1993, S. 345-362.
- Ingensand H. (1994):** *Automatisierte polare Meßsysteme - Technik und Anwendung*. Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 2/94, S. 71-74.
- Jacobs E., H.-J. Marx (1983):** *Vermessungsarbeiten für den Betonfahrweg der Magnetschwebebahn Transrapid - Versuchsanlage Emsland - TVE*. Der Vermessungsingenieur, Heft 2/1983.
- Kahler D. (1985):** *Die Anwendung des Übergangsbogens im Ingenieurbau*. Vermessungswesen und Raumordnung 47/2, März 1985, S. 87-98.
- Kahmen H. (1985):** *Grundlagen zur Erfassung und Verarbeitung stochastischer und deterministischer Signale*. in: Pelzer H. (Hrsg.): *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1985.
- Kahmen H., J. Steudel (1988):** *Das automatisch zielende Meßsystem Georobot II*. in: Schnädelbach K., H. Ebner (Hrsg.): *X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung in München*, Ferd. Dümmlers Verlag 1988, S. A7/1-A7/14.

- Kahmen H. (1992):** *Hochpräzise Zielerfassung durch Robotertheodolite*. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich ETH-Zentrum, Ferd. Dümmlers Verlag 1992, S. II6/1-II6/13.
- Kahmen H. (1993):** *Vermessungskunde*. Walter de Gruyter, Berlin - New York 1993.
- Kahmen H., G. Palte (1993):** *Filteransätze für die Prädiktion der Bewegungen von Objektpunkten in Rutschungsgebieten*. in: Festschrift aus Anlaß des 70. Geburtstages von Prof. G. Schelling, Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 78, Graz 1993.
- Kasper H., W. Schürba, H. Lorenz (1968):** *Die Klottoide als Trassierungselement*. Ferd. Dümmlers Verlag Bonn 1968.
- Katowski O. (1992):** *Ein Präzisionspolar-Meßsystem (PPMS) im Einsatz bei Überwachungsmessungen und dynamischer Absteckung*. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich ETH-Zentrum, Ferd. Dümmlers Verlag 1992, S. II5/1-II5/10.
- Koch K.-R., M. Schmidt (1994):** *Deterministische und stochastische Signale*. Ferd. Dümmlers Verlag Bonn 1994.
- Kopp E. (1993):** *Unterschiede - Feste Fahrbahn zu Schotteroberbau*. Tagungsband Hochleistungsbahn, Bautechnische Belange, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein 1993, S. 1-10.
- Kraus K., E. M. Mikhail (1972):** *Linear Least-Squares Interpolation*. Twelfth Congress of the International Society of Photogrammetry, Ottawa, Canada, July 23 - August 5, 1972, Presented Paper, Commission III.
- Kraus K. (1973):** *Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützpunkt-Gruppen*. Zeitschrift für Vermessungswesen 1973, S. 146-153.
- Kraus K. (1987):** *Photogrammetrie, Band 2, Theorie und Praxis der Auswertesysteme*. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1987.
- Lahr B. (1995):** *Neue Möglichkeiten der Erfassung, Absteckung und Kontrolle von Gleisen*. Zeitschrift: Der Vermessungsingenieur, 3/1995, S. 118-124.
- Lichtberger B. (1992):** *Gleisvormessungen für Oberbauarbeiten*. Der Eisenbahningenieur 43, 1/1992, S. 292-297.
- Lichtberger B. (1993):** *Die mechanisierte Erstellung der Gleisanlage mit höchster Präzision*. Tagungsband Hochleistungsbahn, Bautechnische Belange, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein 1993, S. 34-42.
- Luhmann T. (1992):** *Neue Wege in der optischen Industriemessstechnik - Systeme und Anwendungen*. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich ETH-Zentrum, Ferd. Dümmlers Verlag 1992, S. II2/1-II2/4.
- Malm L. E. (1994):** *Using CAD in Railway Design*. Proceedings of the XX. FIG-Congress, Melbourne Australia, March 5-12 1994, p. 604.2/1-604.2/7.
- Marx L. (1992):** *Gleisbaumaschinen: Technologischer und wirtschaftlicher Einsatz für die Instandsetzung von Gleisen und Weichen*. Der Eisenbahningenieur 43, 5/1992, S. 278-282.
- Mecklenbräuker W. (1990):** *Signal- und Systemtheorie*. Vorlesungsmanuskript, Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik, TU Wien, 1990.
- Meier S., W. Keller (1990):** *Geostatistik: Einführung in die Theorie der Zufallsprozesse*. Springer Verlag, Wien, New York, 1990.
- Mentes G., M. Roic (1993):** *Pointing by means of a CCD camera integrated in the telescope of a motorized theodolite*. in: Gruen A., H. Kahmen (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques II, Applications*

in inspection, quality control and robotics, Papers presented to the conference organized at Zurich/Switzerland, October 4-7, Wichmann Verlag 1993, p. 106-113.

Meisinger F. (1995): *Bearbeitung von diskreten Meßreihen einer Gleisaufnahme mit optimalen linearen Schätzverfahren.* Diplomarbeit, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1995 (in Arbeit).

Mitutoyo (1993): *Digimatic Linear Gage.* Produktinformation, 1993.

Moritz H. (1973): *Neuere Ausgleichungs- und Prädiktionsverfahren.* Zeitschrift für Vermessungswesen 1973, S. 137-146.

Müller G. (1984 a): *Ingenieurgeodäsie: Verkehrsbau - Grundlagen.* Verlag für Bauwesen, Berlin 1984.

Müller G. (1984 b): *Ingenieurgeodäsie: Verkehrsbau - Eisenbahnbau.* Verlag für Bauwesen, Berlin 1984.

Österreichische Bundesbahnen (1976): *B 52 - Oberbau: Technische Grundsätze.* Dienstvorschrift, Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen 1976.

Österreichische Bundesbahnen (1992): *Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen - Hochleistungstrecken.* Dienstvorschrift, Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen 1992.

Österreichische Bundesbahnen (1993): *Zusatzbestimmungen zur Oberbauvorschrift ZOV 54: Abnahme von Oberbauarbeiten.* Dienstvorschrift, Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen 1993.

Presle G. (1993): *Grundlagen und Anwendungen des neuen Oberbaumeßwagens der ÖBB.* Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architektenvereines 1993, S. 418-423.

Reiff T. (1994): *Untersuchung der erreichbaren Lage- und Krümmungsgenauigkeit für die Gleisinstandhaltung bzw. Gleiserneuerung anhand eines Simulationsprogramms.* Diplomarbeit, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1994.

Reißmann G. (1976): *Die Ausgleichungsrechnung.* Verlag für Bauwesen, Berlin 1976.

Retscher G. (1992): *Vergleich konventioneller Methoden mit dem Real Time Differential GPS-Verfahren beim Positionieren von Vermessungsschiffen für Stromsohlenaufnahmen.* Diplomarbeit, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1992.

Retscher G. (1994): *Zukunftsaspekte und Einsatzmöglichkeiten von GPS bei den Österreichischen Bundesbahnen.* Kapitel 11 des Gutachtens „ÖBB - GPS“, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1994.

Retscher G. (1995): *Analysis of a series of measurements of a railway track using optimal linear estimation methods.* in: Gruen A., H. Kahmen (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques III, Applications in manufacturing, inspection, quality control and robotics*, Papers presented to the conference at Vienna, Austria, October 2-4, Wichmann Verlag 1995, p. 129-138.

Riebold K. (1987): *Internationale Gleisbaumaschinen- und Geräteschau 1987.* Der Eisenbahningenieur 38, 5/1987, S. 225-243.

Riessberger K. (1993): *Oberbau und Hochleistungsmechanisierung.* Tagungsband Hochleistungsbahn, Bau-technische Belange, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein 1993, S. 43-65.

Rinner K. (1981): *Über die Ergebnisse im österreichischen Anteil von DÖDOC.* Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft 3/4, 1981, S. 91-112.

Roth A. (1988): *Qualität, Wirtschaftlichkeit und Konzeption der Bauvermessung für die Zürcher S-Bahn.* in: Schnädelbach K., H. Ebner (Hrsg.): *X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung in München*, Ferd. Dümmlers Verlag 1988, S. D6/1-D6/13.

- Rudorfer Ch. (1995):** *Erprobung eines terrestrischen Polarmesssystems für die Gleisaufnahme*. Diplomarbeit, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1995.
- Ruopp M. (1971):** *Genauigkeitsbetrachtungen zur polaren Punktbestimmung mit elektronischen Tachymetern bei freier Standpunktwahl*. Allgemeine Vermessungsnachrichten 8/1971, S. 289-299.
- Ruyngaert P. A., T. T. Soong (1985):** *Mathematics of Kalman-Bucy Filtering*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985.
- Sada T., T. Takada (1994):** *Hard-Hat GPS: Real Time Kinematic Surveying on Construction Sites*. GPS World, November 1994, S. 26-58.
- Sauermann K., A. Mathes, T. Bourtzos (1993):** *Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten bei kinematischen GPS-Anwendungen*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 10/1993, S. 359-366.
- Schlittgen R., B. Streitberg (1994):** *Zeitreihenanalyse*. Lehr- und Handbücher der Statistik, R. Oldenbourg Verlag, München - Wien 1994.
- Schödlbauer A. (1993):** *Bezugssystem und Koordinatentransformation für geodätische Arbeiten mit dem Global Positioning System*. in: Institut für Geodäsie (Hrsg.): *Das Global Positioning System im praktischen Einsatz der Landes- und Ingenieurvermessung*, Beiträge zum Geodätischen Seminar 12.-14. Mai 1993, Schriftenreihe der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1993, S. 161-184.
- Schramm G. (1949):** *Bogengestaltung und Bogenabsteckung*. Schmidt Verlag, Berlin - Bielefeld - München 1949.
- Schramm G. (1962):** *Der Gleisbogen: Seine geometrische und bauliche Gestaltung*. Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt 1962.
- Schrick K.-W. (1977):** *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik*. Methoden der Regelungstechnik, R. Oldenbourg Verlag, München - Wien 1977.
- Schuhr P. (1987 a):** *Rechnergestützte Auswertung einer Nalenz-Aufnahme*. Der Eisenbahningenieur 38, 1/1987, S. 19-23.
- Schuhr P. (1987 b):** *Zur Genauigkeitsabschätzung einer Nalenz-Aufnahme*. Der Eisenbahningenieur 38, 7/1987, S. 331-334.
- Seeber G. (1993):** *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin - New York 1993.
- Seitner System- und Sensortechnik (1993):** *Neigungswinkelsensor NB 3*. Produktinformation, 1993.
- Siems E. (1980):** *Festlegung und Überwachung der Streckengleise der Deutschen Bundesbahn*. in: Conzett R., H. Matthias, H. Schmid (Hrsg.): VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung in Zürich 1980, Band 2, S. E7/1-E7/12.
- Siems E. (1993):** *Ein neues Verfahren für die Absteckung und die Kontrolle der Gleislage*. in: Gruen A., H. Kahmen (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques II, Applications in inspection, quality control and robotics*, Papers presented to the conference organized at Zurich/Switzerland, October 4-7, Wichmann Verlag 1993, p. 114-121.
- Siems E. (1994):** *Ingenieurvermessung - ein vielseitiges Aufgabenfeld für den Eisenbahn-Vermessungsingenieur*. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 11-12/1994, S. 432-438.
- Taubenheim J. (1969):** *Statistische Auswertungen geophysikalischer und meteorologischer Daten*. Akademische Verlagsanstalt, Leipzig, 1969.
- Trimble Navigation (1994 a):** *GPS-Vermessung mit Real-Time-Kinematic: Technische Übersicht*. Produktinformation, 1994.

Trimble Navigation (1994 b): *GPS Total Stations*. Produktinformation, 1994.

Wenk T. (1990): *Die Datenbank der festen Anlagen als verteiltes Informationssystem*. Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/90, S. 703-704.

Wolf H. (1977): *Die Sonderfälle der diskreten Kollokation*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft 3/4, 1977, S. 132-138.

Wolf H. (1986): *Möglichkeiten der Gestaltung geodätischer Netze mit GPS-Messungen*. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 9, Sept. 1986, S. 397-405.

Wolf H. (1994 a): *Ausgleichsrechnung I - Formeln zur praktischen Anwendung*. Ferd. Dümmlers Verlag Bonn 1994.

Wolf H. (1994 b): *Ausgleichsrechnung II - Aufgaben und Beispiele zur praktischen Anwendung*. Ferd. Dümmlers Verlag Bonn 1994.

Wübbena G. (1993): *Gleisvermessung mit GPS*. in: Potthoff H. (Hrsg.): GPS - eine universelle geodätische Methode, Beiträge zum 31. DVW-Seminars vom 22.-24.03.1993 am Institut für Planetare Geodäsie der Technischen Universität Dresden, Schriftenreihe der DVW 11/1993, S. 325-339.

Zinschitz J. (1995): *Einsatz von Real Time Kinematic GPS für die Gleisaufnahme*. Diplomarbeit, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1995 (in Arbeit).

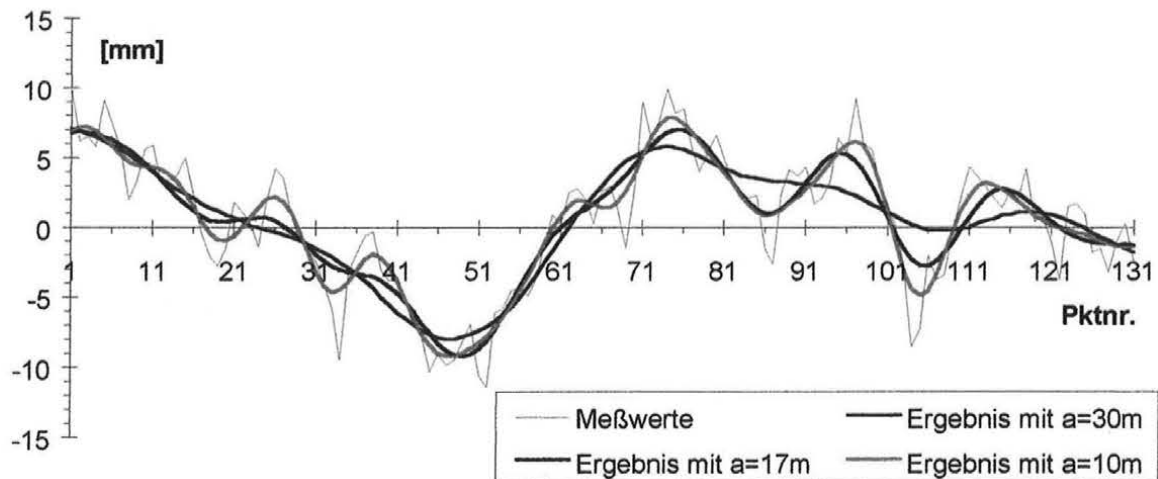


Abb. 4.10: Filterergebnisse der Höhenkomponente der terrestrischen Meßwertreihe TH282.MES bezogen auf die Solltrasse TR2.ETR

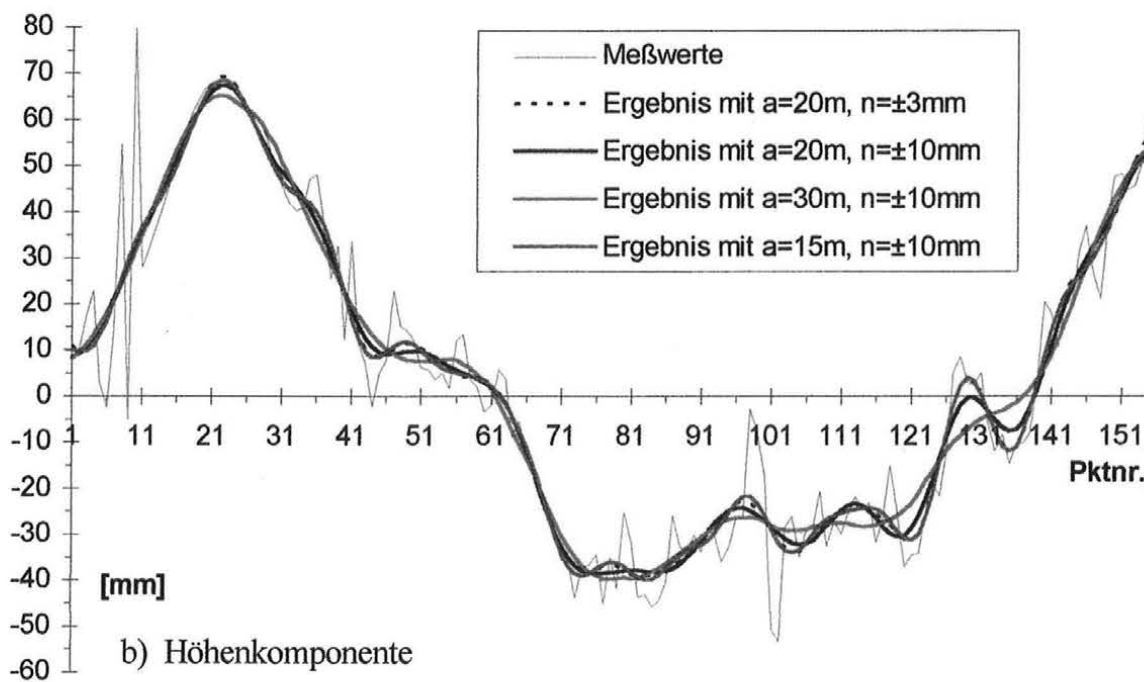
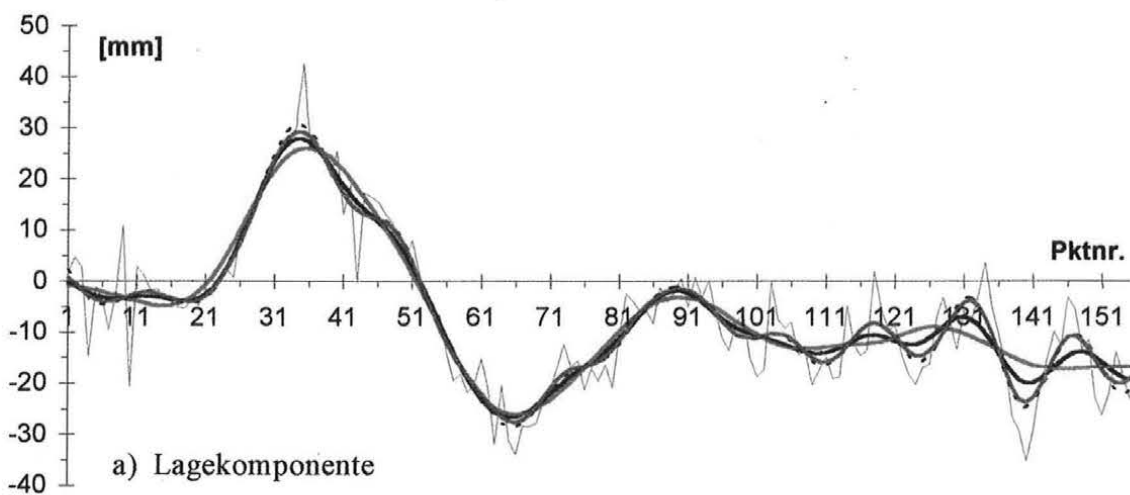


Abb. 4.13: Filterergebnisse der GPS-Meßwertreihe TH115V.MES bezogen auf die Solltrasse THAYA16.ETR

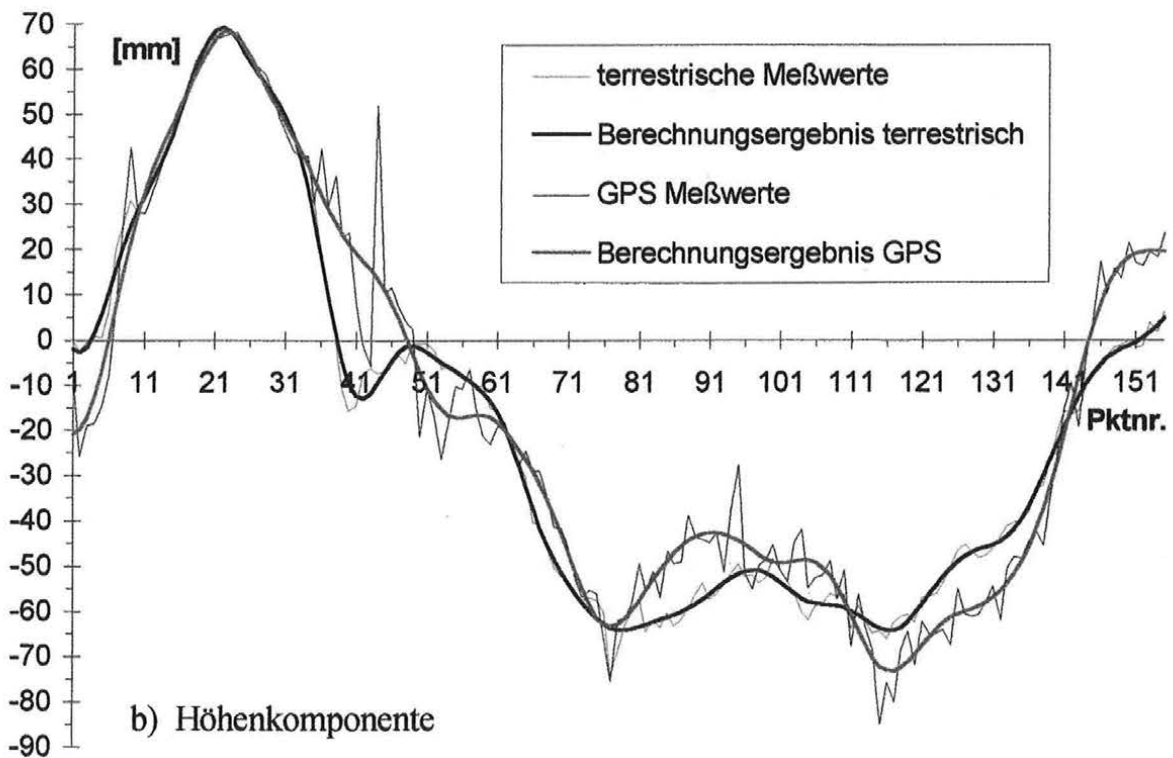
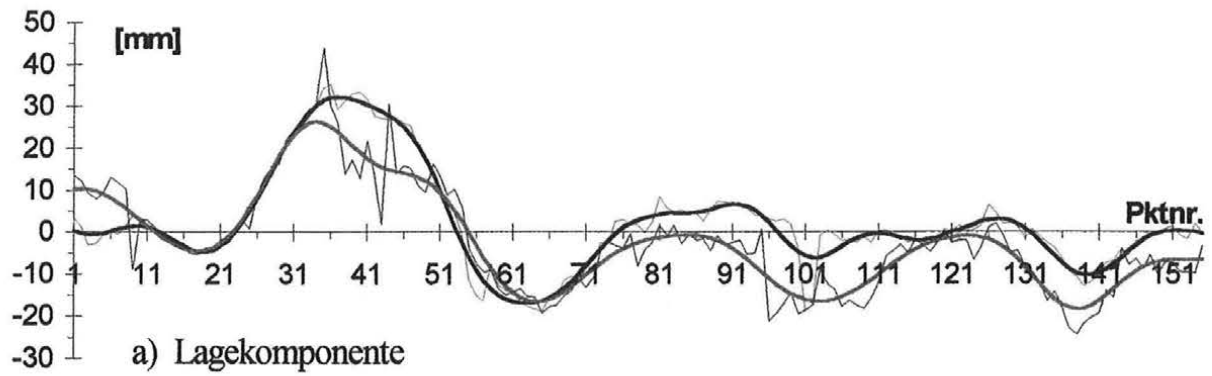


Abb. 4.14: Vergleich zwischen terrestrischen und GPS-Messungen
(TH125N.MES und TH165V.MES bezogen auf die Solltrasse THAYA16.ETR)

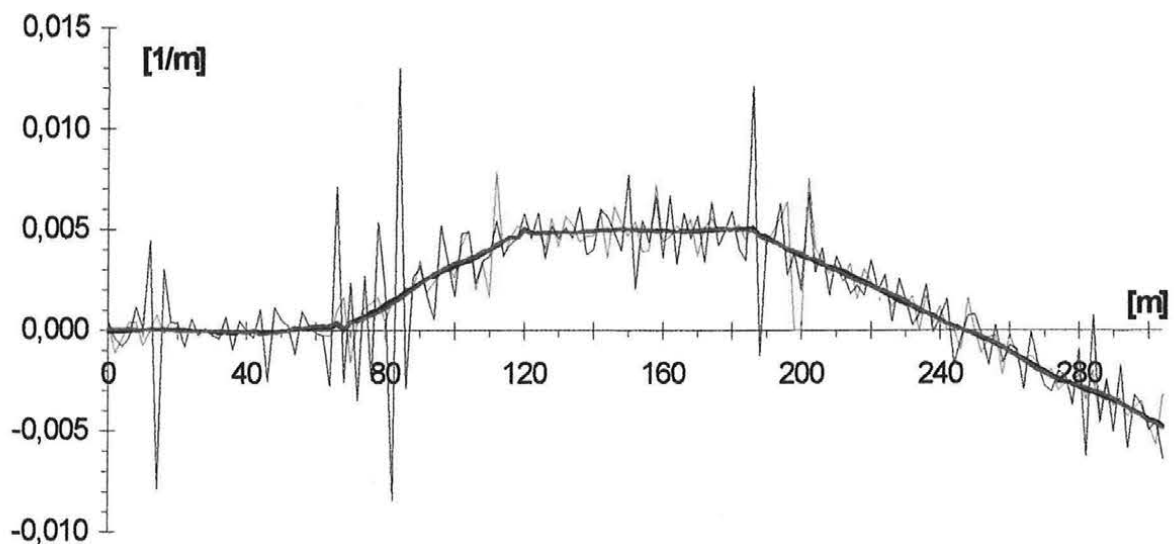


Abb. 4.15: Krümmungsbild für terrestrische und GPS-Messungen (Legende siehe Abb. 4.14)

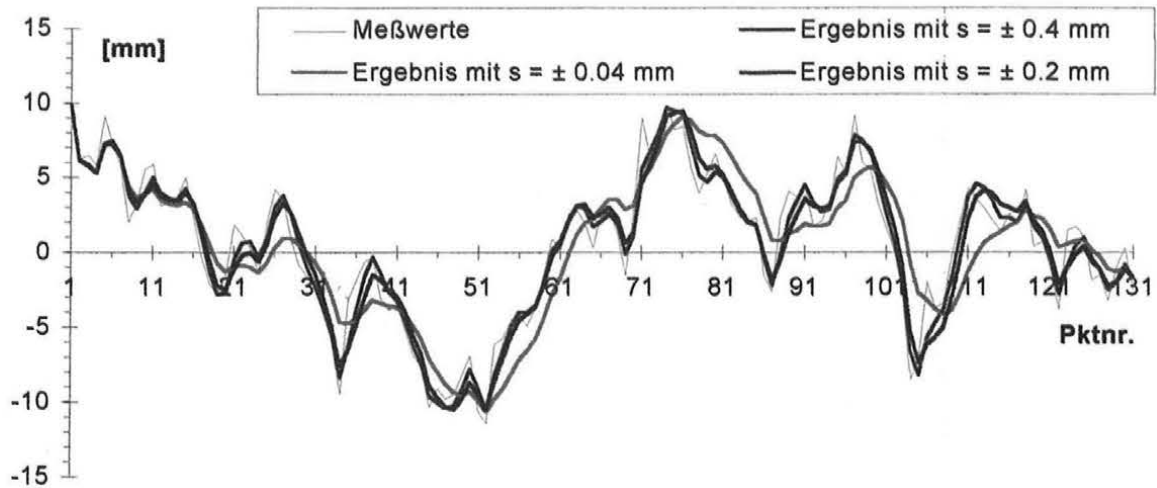


Abb. 4.18: Filterergebnisse der Höhenkomponente der terrestrischen Meßwertreihe TH282.MES bezogen auf die Solltrasse TR2.ETR

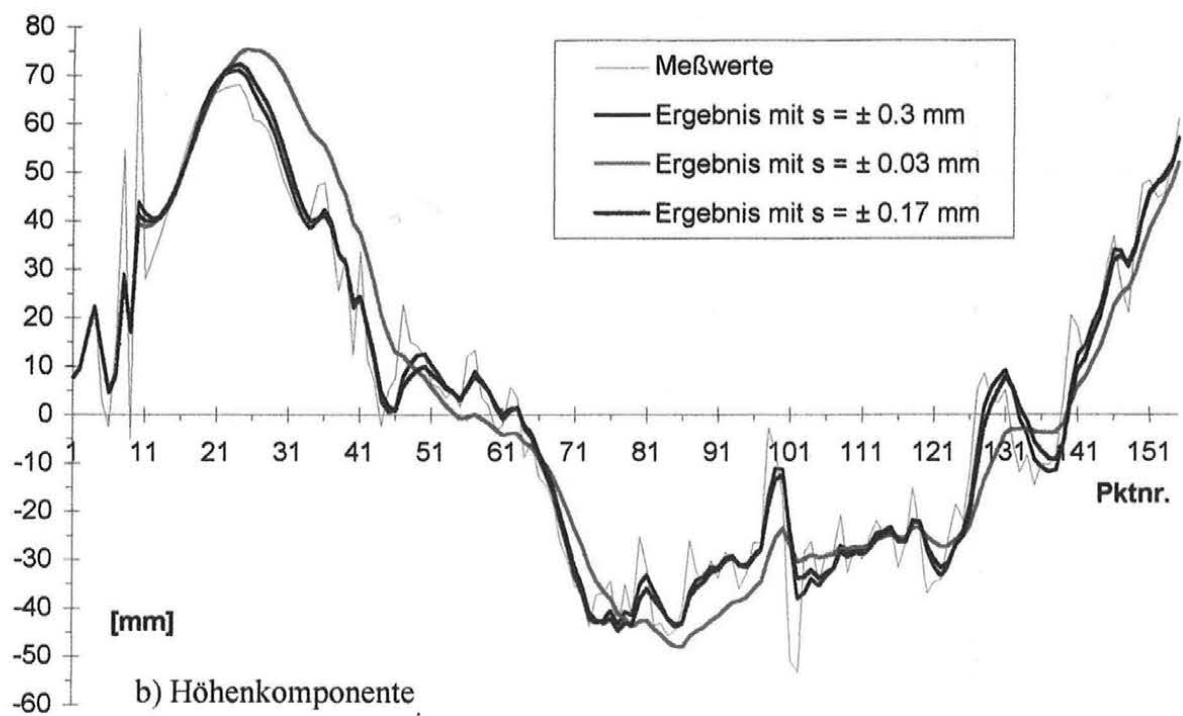
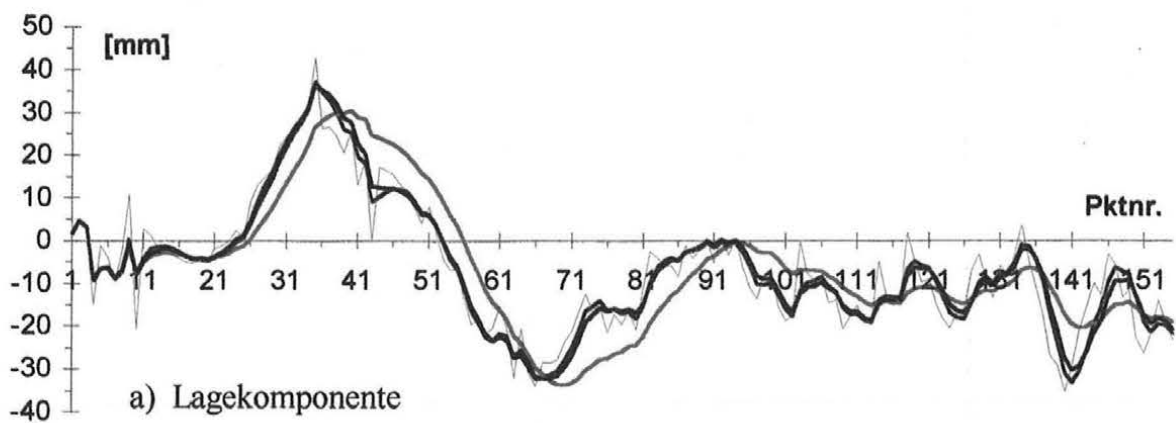


Abb. 4.21: Filterergebnisse der GPS-Meßwertreihe TH115V.MES bezogen auf die Solltrasse THAYA16.ETR



Abb. 5.2: Gleisaufnahme mit einem Meßrobotersystem



Abb. 5.3: Gleisaufnahme mit einem GPS-Echtzeitvermessungssystem

Lebenslauf:

29.05.1968	Geboren in Sierning, Bezirk Steyr-Land, Oberösterreich, als ehelicher Sohn von Josef Retscher, Bundesbahnbeamter, und Herta Retscher, geb. Larosch, Hausfrau.
September 1974 - Juli 1978	Besuch der Volksschule 1, Promenade 16, in Steyr.
September 1978 - Juli 1986	Besuch des Bundesrealgymnasiums Steyr, Michaelerplatz 6.
17.06.1986	Ablegung der Reifeprüfung am Bundesrealgymnasium Steyr.
17.09.1986	Immatrikulation und Inskription der Studienrichtung Vermessungswesen an der Technischen Universität Wien.
07.07.1988	Ablegung der ersten Diplomprüfung für Vermessungswesen.
21.09.1988	Inskription der Wahlfachgruppe Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie aus Vermessungswesen.
1988 - 1991	Zeitweise Beschäftigung am Vermessungsamt Steyr.
06.04.1992	Ablegung der zweiten Diplomprüfung für Vermessungswesen.
23.04.1992	Sponsion zum Dipl.-Ing. für Vermessungswesen.
01.06.1992	Anstellung als Universitätsassistent am Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, der Technischen Universität Wien.
22.09.1992	Inskription des Doktoratsstudiums der technischen Wissenschaften.

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1970 - 1973, Dezember 1973.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen, 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English, Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1973 - 1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik, Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1974 - 1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1977.
- Heft 13 Veröffentlichung des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1976 - 1979, Wien, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichung des Instituts für Allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.
- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.
- Heft 21 Veröffentlichung des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.
- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSÁ, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassungen der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfree Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Wien, Juni 1986.

-
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie anlässlich des 80. Ggeburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.
- Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.
- Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.
- Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.
- Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.
- Heft 36 o.Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.
- Heft 37 G. GERSTBACH, H.P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zu GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.
- Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.
- Heft 39 Kartographische Forschungen und Anwendungsorientierte Entwicklungen, herausgegeben von W. Stams und F. Kelnhofer zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. W. Pillewizer, Wien, Juli 1991.
- Heft 39a W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles, Wien, Juli 1992.
- Heft 40 K. STEINNOCHER, Methodische Erweiterungen der Landnutzungsklassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk, Wien, Juli 1994.
- Heft 41 G. FORKERT, Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente, Wien, Juli 1994.
- Heft 42 M. u. W. SCHÖNER, Photogrammetrische und glaziologische Untersuchungen am Gâsbre (Ergebnisse der Spitzbergenexpedition 1991), Wien, Februar 1996.
- Heft 43 M. ROIC, Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Wien, April 1996.
- Heft 44 G. RETSCHER, 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Wien, April 1996.