

Filterung geodätischer Daten bei der Ems-Überführung von Kreuzfahrtschiffen

Rüdiger Lehmann
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fakultät Geoinformation
PF 120701
D-01008 Dresden
r.lehmann@htw-dresden.de

1 Einleitung

Die Geodäsie hat – hauptsächlich im vergangenen Jahrhundert – die Dimension der Zeit hinzugewonnen. Heute haben wir fast alle denkbaren Zeitintervalle im Blick: von erdgeschichtlichen Zeiträumen, die einige Millionen Jahre betragen, bis hin zu Sekundenbruchteilen, z.B. bei der Erfassung des Schwingungsverhaltens von Maschinen. Die Geodäten haben seither das Spektrum ihrer Dienstleistungen um solche erweitert, denen die Dimension der Zeit immanent ist. Hierzu zählt die Geodätische Navigation, worunter wir diejenigen Teilbereiche der Navigation verstehen, die sich auf geodätische Sensoren und Auswertemethoden stützen.

Im Folgenden betrachten wir Aufgaben der Geodätischen Navigation. Als Sensoren werden vorrangig GNSS-Antennen und –Empfänger sowie in speziellen Anwendungen auch Sensoren zur Trägheitsnavigation (IMU = inertial measuring unit) eingesetzt. Letztere Sensoren untergliedern sich in solche zur Messung von translatorischen Beschleunigungen (Akzelerometer) und von Drehraten (Gyroskope) und bilden ein Sensorsystem mit bis zu sechs Sensoren, je zwei für jede Raumdimension. Aus den gemessenen Drehraten und Beschleunigungen lassen sich durch zweimalige Integration über die Zeit zusammen mit der Anfangsposition und –geschwindigkeit als Integrationskonstanten die aktuelle Position und Geschwindigkeit des zu navigierenden Fahrzeugs bestimmen.

Da sowohl GNSS- als auch IMU-Daten von verschiedenen Fehlerprozessen (Rauschen) überlagert werden, müssen Filter entwickelt werden, um die eigentlich gewünschte Information aus den Daten bestmöglich zu extrahieren. Neben den bekannten Standardverfahren der Signalverarbeitung (Fourier- oder Wave-

let-Analyse und -Synthese) wird in der Geodätischen Navigation vor allem die Methode der *Kalman-Filterung* angewendet. Die Besonderheit liegt darin, dass das Verhalten des zu navigierenden Fahrzeuges als dynamisches System zu beschreiben ist, normalerweise als System gewöhnlicher Differenzialgleichungen mit Ableitungen nach der Zeit. Dieses wird zu einem System sogenannter *Zustandsgleichungen* diskretisiert, das noch unbekannte Systemparameter enthält. In einem zweiten System werden die *Beobachtungsgleichungen* hinzugenommen. Die stochastischen Eigenschaften der Fehlerprozesse werden als bekannt vorausgesetzt. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich ein Optimalfilter konstruieren, der die Varianz der zu schätzenden Systemparameter minimiert. Dem Geodäten zur vertiefenden Lektüre empfehlen wir Grewall u.a. (2007).

Die moderne Geodätische Navigation profitiert sehr von den entgegengesetzten Eigenschaften der GNSS- und Inertialnavigationssysteme (INS), sodass sich in der Kopplung von GNSS+INS geradezu ideale Synergie-Effekte ergeben. Bei besonders fester Kopplung fließen beide Messdaten in ein und denselben Kalman-Filter ein. Systemparameter sind die Elemente der Positions- und Geschwindigkeitsvektoren sowie zahlreiche das Messsystem beschreibende Zusatzparameter.

2 Ems-Überführung von Kreuzfahrtschiffen

Die Meyer-Werft in Papenburg (Ems) hat sich seit Jahren auf den Bau großer luxuriöser Kreuzfahrtschiffe für den internationalen Markt spezialisiert. Etwa zwei solche „schwimmende Hotels“ verlassen jährlich das Werftgelände an der Ems. Zuletzt wurde im Juni 2009 die *Celebrity Equinox* fertiggestellt und ihrer Bestimmung übergeben. Dieser neue und besonders energiesparende Schiffstyp für die Reederei *Celebrity Cruises* hat eine Länge von 315 Metern, die Breite beträgt 37 Meter. Insgesamt wird die Schiffsgröße mit 122.000 BRZ (Bruttoreaumzahl) angegeben. Diese Maße entsprechen ihrem Schwesterschiff, der *Celebrity Solstice*, die im September 2008 die Werft in Papenburg verließ. Beide sind die bisher größten in Deutschland gebauten Kreuzfahrtschiffe. Das für 2010 geplante Kreuzfahrtschiff *Celebrity Eclipse* wird dieselben Dimensionen aufweisen. Bis 2012 liegen bei der Meyer-Werft jetzt schon Bestellungen für weitere sehr große Schiffe vor, so dass die 2500 Arbeitsplätze in Papenburg und viele weitere in der Zulieferindustrie langfristig gesichert sind (Meyer Werft 2009).

Leider liegt Papenburg etwa 36 km von der Nordsee entfernt, eine Strecke, die die großen Schiffe auf dem kleinen Flösschen Ems zurücklegen müssen. Damit

Schiffe mit einem Tiefgang von über 8 Metern überhaupt auf der Ems fahren können, erweist es sich als notwendig, eine Fahrrinne regelmäßig zu vertiefen. Darüber hinaus muss der Fluss am Tag der Überführung angestaut werden, wozu extra ein Sperrwerk in Gandersum gebaut wurde. Beides stößt auf Ablehnung bei Umweltschützern, die den Unterlauf der Ems als *Meyer-Kanal* bezeichnen. Tatsächlich ist der Fluss durch den geringen Sauerstoffgehalt im Wasser ökologisch schwer geschädigt. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Geodätischen Navigation ist Voraussetzung, um das notwendige Ausbaggern und Anstauen auf ein Mindestmaß zu begrenzen.

3 Geodätische Navigationaufgabe

Die Aufgabe besteht darin, diese großen Schiffe auf den ersten 36 km ihrer Reise, auf denen mehrere Schleusen und Brücken zu passieren sind (siehe Abb. 1) sicher in die Nordsee zu navigieren. Hierzu werden auf zwei sehr hohen Punkten der Schiffe an Bug und Heck GNSS-Antennen installiert und mit SAPOS-Korrekturdaten hochpräzise 1Hz-Echtzeitlösungen gerechnet. Diese Aufgabe nimmt seit 1991 das Amt für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen wahr. Um mögliche Datenlücken zu überbrücken, sendet der GNSS-Empfänger am Bug seine Daten an ein INS, welches zusammen mit IMU-Messdaten auf der Basis eines Kalman-Filters eine integrierte GNSS+INS-Lösung berechnet (vgl. Grewall u.a. 2007). Bei den einzelnen Überführungen wurden verschiedene faseroptische INS eingesetzt und auch untersucht (Röttger 2008), zuletzt benutzte man einen HYDRINS der Firma iXSea (2008). Somit erreicht man etwa Zentimetergenauigkeit für die Position der Antenne und eine Standardabweichung von $0,01^\circ$ für die räumliche Orientierung der Schiffsachsen. Laufend werden die Abweichungen der Schiffsposition von der Mitte der Fahrrinne berechnet und dem Lotsen angezeigt, wonach er entsprechende Manöver einleitet.

Da die Schiffe entsprechend ihrer Größe auf Manöver nur mit langer Verzögerung reagieren, muss die Bahnkurve des Schiffes so genau wie möglich vorausberechnet (prädiziert) werden, normalerweise über einen Zeitraum von 1 bis 2 Minuten. Dieses Problem erweist sich als schwierig, denn die Antennenpositionen sind wegen ihrer Höhe über der Wasserfläche durch das sogenannte *Rollen* beeinflusst. Das Schiff dreht sich infolge angreifender Kräfte (hauptsächlich Wind und Manöver) um eine horizontale Längsachse, Rollachse genannt. (Man

sagt: „Es rollt.“, siehe Abb. 2.) Dadurch wird der glatten Kurve der Vorausfahrt eine schwer beschreibbare Bewegung überlagert, die die Prädiktion erschwert.



Abb. 1: Überführung der AIDAluna am 22. Februar 2009, Passage der Jann-Berghaus-Brücke bei Leer (Foto: Heiner Unkel, Leer).

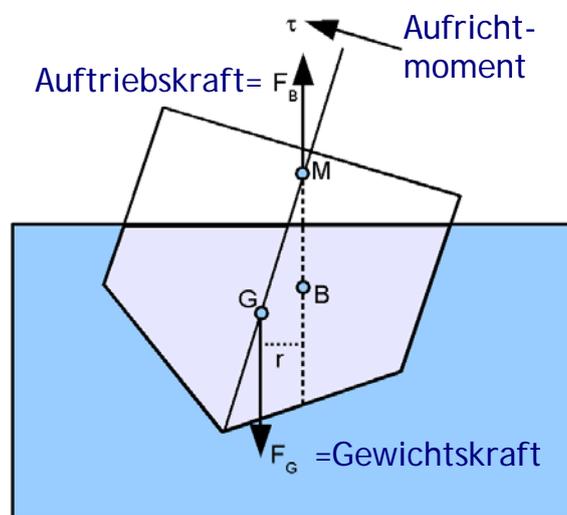


Abb. 2: Hydrostatik des Rollens

Diesem Problem wenden wir uns im Weiteren zu und versuchen, es mit Methoden der Filterung zeitabhängiger Daten zu lösen. Dabei können wir uns kaum auf Vorarbeiten in der geodätischen oder nautischen Fachliteratur stützen, denn

die Genauigkeitsforderung liegt einige Größenordnungen höher als bei vergleichbaren Anwendungen. Allenfalls bei hydrographischen Vermessungsarbeiten (Böder 2002, 2006) oder bei Manövern in Häfen (Benedict 2008) treten ähnliche Problemstellungen auf.

4 Verwendete Daten

Alle im Folgenden verwendeten Daten wurden während der Überführung der Celebrity Solstice am 28. September 2008 aufgezeichnet.

In Abb. 3 wurde die Bewegung der Bugantenne durch einen Gauß-Filter mit der Standardabweichung (halber Abstand der Wendepunkte der Fensterfunktion) von 10 s geglättet. Dargestellt sind die Residuen während eines einstündigen Intervalls mit wenig Wind. Diese können an windigen Überführungstagen mehrere Meter betragen.

Eine einfache Lösung des Problems, den vom INS berechneten Rollwinkel zu benutzen, um die Position der Antenne auf die Wasseroberfläche zu übertragen, scheitert daran, dass nicht bekannt ist, wo die Rollachse liegt. Dies hängt sehr von der Art der angreifenden Kräfte ab. Tatsächlich erkennt man in Abb. 4 nur geringe Ähnlichkeiten mit Abb. 3: Die extreme Auslenkung der Antenne von 0,7 m ist im Rollwinkel nicht in dieser Deutlichkeit zu erkennen. Andererseits verursacht das Rollen gegen 13:45 Uhr fast keine Auslenkung der Antenne.

Der Grund hierfür ist, dass das Filter dem Problem nicht optimal angepasst wurde. Außerdem muss es sich praktisch um ein kausales Filter handeln, das also nur Daten aus der Vergangenheit benutzt. Das trifft beim Gauß-Filter aus Abb. 3 nicht zu.

5 Methoden der Filterung

Die Auswahl einer Filtermethode erweist sich als besonders heikel, denn eine Methode, die bei einem Schiff funktioniert, versagt möglicherweise beim nächsten Schiff wegen abweichender Eigenschaften oder geänderter Windverhältnisse. Es gibt keine Möglichkeit, das vorher zu untersuchen. Es gibt auch keine Möglichkeit, vorher spezielle Parameter einzustellen. Die Methode muss möglichst ohne Eingriff von außen 100% sicher vom Verlassen der Werft an funktionieren.

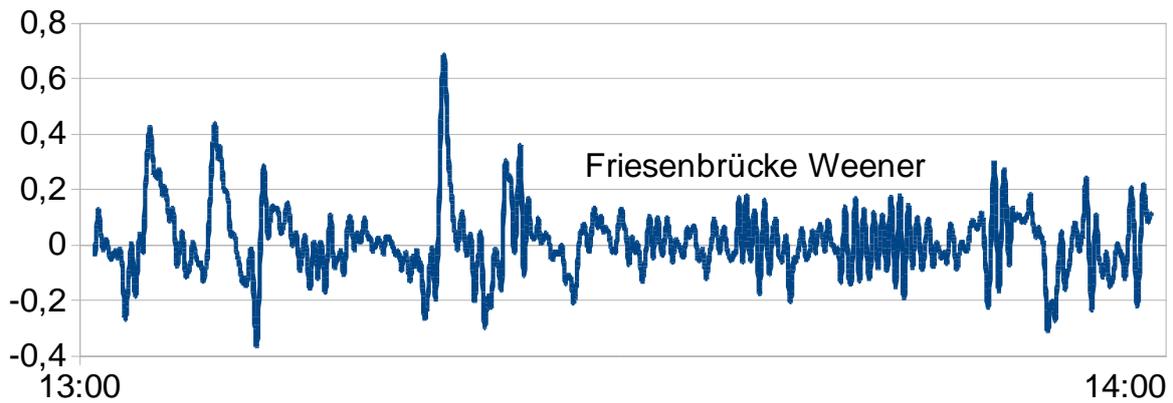


Abb. 3: Überführung der Celebrity Solstice, Querabweichung [m] der Bugantenne von einer geglätteten Bewegung während einer Brückendurchfahrt

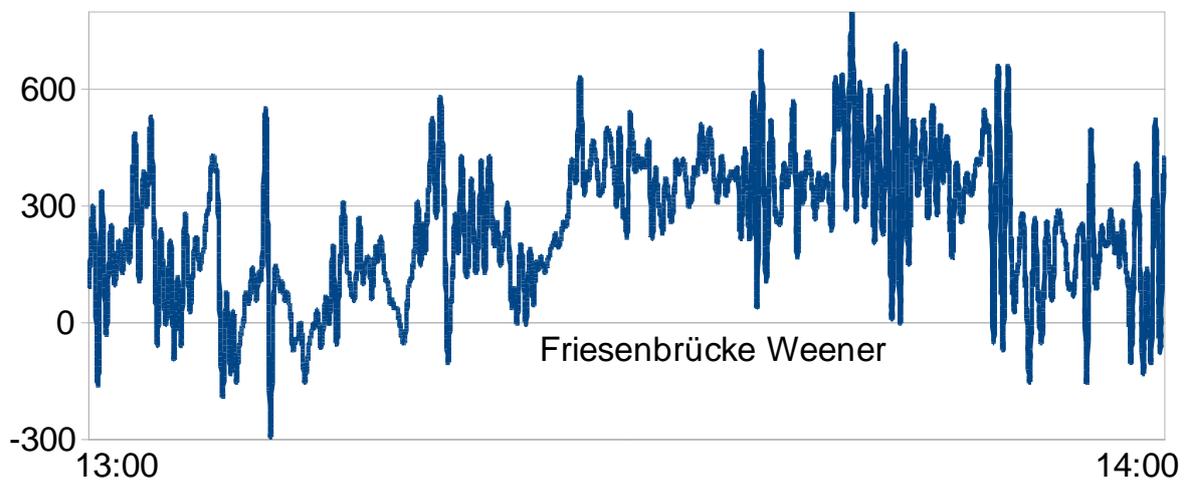


Abb. 4: Überführung der Celebrity Solstice, Rollwinkel [mGrad] während einer Brückendurchfahrt

Folgende Methoden kommen prinzipiell in Betracht:

1. Filter basierend auf der *Fourier-Transformation* sind wenig erfolgversprechend, denn das Hauptinteresse liegt hier stets am Rand des Intervalls der aufgezeichneten Daten. Die Fourier-Analyse leidet in diesem Fall besonders unter dem bekannten Leck-Effekt.
2. Filter basierend auf der *Wavelet-Transformation* versprechen hier mehr Erfolg, aber die Vielfalt der möglichen Wavelets ist so groß, dass man ein sicheres Auswahlkriterium benötigt.

3. Die eingangs erwähnte Methode der *Kalman-Filterung* kommt zur Lösung der Aufgabe in Betracht. Als System fungiert das Schiff mit seinen relevanten Parametern: Position, Geschwindigkeit, Orientierung, Lage der Rollachse, Frequenz und Amplitude des Rollens. Diese werden zum Zustandsvektor zusammengefasst. Die GNSS+INS-Daten stellen den Messwertvektor dar. Das Messrauschen ist stochastisch grob beschreibbar. Wichtig wäre nun ein System von Differenzialgleichungen, nach denen sich das dynamische System „Schiff“ in der Zeit entwickelt. Leider können solche Gleichungen die Komplexität des realen Systems nur unzureichend beschreiben. Zudem sind die Stellgrößen „Wind- und Manöverkräfte“ nur ungenau bekannt. Erste Schritte auf diesem Weg (Lehmann und Koop 2008) führten deshalb noch nicht zum Ziel.

4. Eine aus dem Gebiet der Physikalischen Geodäsie vertraute Denkweise ist die Folgende: Ein stationärer stochastischer Prozess $x(t)$ wird in einen (glatten) deterministischen Trend, ein stochastisches Signal mit einer zu schätzenden Kovarianzfunktion und ein stochastisches (weißes) Rauschen zerlegt. Das Rauschen identifizieren wir mit den unvermeidlichen Messabweichungen der GNSS- und IMU-Sensoren. Das Signal ist der Effekt des Rollens in den zeitabhängigen Prozessen. Somit verbleibt als Trend die zu extrapolierende Vorfahrt. Auf der Basis der Kovarianzfunktion des Signals können dann Schätzungen vorgenommen werden, hier sind dies Schätzungen der Frequenz des Rollens und der Lage der Rollachse. Diese Filter- und Prädiktionsmethode liegt dem Konzept der Kollokation nach kleinsten Quadraten zu Grunde und geht auf Moritz (1973) zurück.

In diesem Beitrag widmen wir uns nur der 4. Methode. Stationäre stochastische Prozesse sind die Querabweichung x der Bugantenne von einer geglätteten Bewegung und der Rollwinkel ξ . Als Trendfunktion wählen wir nur Polynome in der Zeit t , wobei nach praktischen Untersuchungen für ξ der Grad 0 ausreicht:

$$x(t) = \sum a_i t^i + s_x(t) + n_x(t) \quad (1)$$

$$\xi(t) = \xi_0 + s_\xi(t) + n_\xi(t) \quad (2)$$

Die Anteile s und n identifizieren wir mit dem jeweiligen Signal und Rauschen. Die beiden Signalanteile s_x und s_ξ werden beide vom selben Prozess ψ , dem Rollen, erzeugt und müssten eigentlich in einer einfachen Beziehung zueinander stehen (siehe Abb. 5):

$$s_x(t) = e(t) \cdot (\psi(t) - \bar{\psi}) \quad (3)$$

$$s_\xi(t) = \psi(t - \tau) - \bar{\psi} \quad (4)$$

Die Berücksichtigung einer Zeitverschiebung τ ist notwendig, weil die digitalen Daten der Prozesse x und ξ verschiedene Wege durchlaufen und am Navigationscomputer, der die Prädiktion der Bahnkurve vornimmt, nicht exakt synchron einlaufen. Der empirische Kreuzkorrelationskoeffizient beider Signale

$$\rho(\tau) = \rho_{s_x s_\xi}(\tau) = \frac{\sum_k (x_k - \sum_{i=0}^n a_i t_k^i) (\xi_{k+\tau/\Delta t} - \xi_0)}{\sqrt{\left(\sum_k (x_k - \sum_{i=0}^n a_i t_k^i)^2\right) \sum_k (\xi_k - \xi_0)^2}} \quad (5)$$

müsste also, wenn e zeitlich nicht zu stark variiert, nahezu 1 betragen.

Hinweis: In Gleichung (5) scheint das Rauschen vernachlässigt zu sein. Das ist nicht der Fall, denn das Rauschen ist für $\tau \neq 0$ weder mit sich selbst (weißes Rauschen) noch mit dem Signal zeitlich korreliert, so dass die entsprechenden, das Rauschen enthaltenden Terme wegfallen.

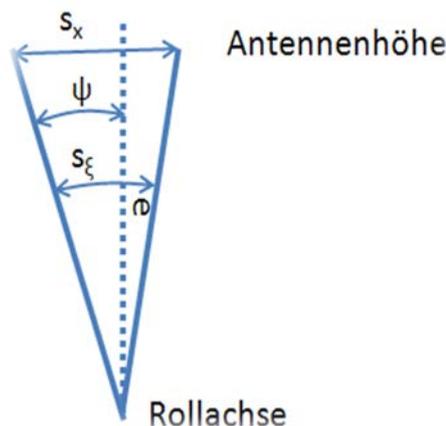


Abb.5: Beziehung zwischen Rollen und Querabweichung der Antenne

Noch offen ist, welchen Entwicklungsgrad n der Trend von x haben soll und über welches zurückliegende Intervall t_1-t_0 er den Daten optimal angepasst werden soll. Insbesondere eignet sich hier nicht das gesamte Intervall verfügbarer Daten, denn die sich ergebenden hohen Polynomgrade haben numerisch ungünstige Eigenschaften. Zudem beeinflussen länger zurückliegende Daten die Prädiktion wegen abklingender Korrelation praktisch kaum noch.

Werden Signal- und Trendanteile der Prozesse falsch aufgespalten, so kann ρ in (5) für kein τ nahe 1 liegen, denn dem Signal wird Trend beigemischt oder umgekehrt. Wir verwenden dieses Kriterium, um die Aufspaltung in folgendem

Sinne optimal vorzunehmen:

$$(\tau; n, t_0)_{\text{opt}} = \operatorname{argmax} \rho_{s_x s_\xi}(\tau; n, t_0) \quad (6)$$

Für weitere Einzelheiten und mathematische Ableitungen verweisen wir auf (Lehmann und Koop 2009).

6 Ausgewählte Ergebnisse

Wir untersuchen die Situation während der Durchfahrt durch die Friesenbrücke bei Weener zum Zeitpunkt $t_I=13:46$ Uhr. Hier ist wegen vieler Manöver ein besonders starkes Rollen zu verzeichnen, gleichzeitig wird an die Zuverlässigkeit der Prädiktion die höchste Anforderung gestellt. Wir berechnen zur Maximum-Bestimmung den Kreuzkorrelationskoeffizient in (5) auf einem Raster von Werten (n, t_0) . Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Maximalwerte für den Kreuzkorrelationskoeffizient (5) [Prozent]. („*“ bedeutet keine signifikante Korrelation.)

t_I-t_0 [s]	30	60	90	120	150	180	210	240
n=2	49	97	96	92	91	83	69	64
n=3	27	97	96	97	94	85	82	83
n=4	10	65	90	96	95	94	86	84
n=5	*	64	90	96	96	94	89	88

Daraus erkennt man, dass tatsächlich die Trendabspaltung so vorgenommen werden kann, dass eine hohe Korrelation zwischen den Signalen erreicht wird. Dabei zeichnet sich kein eindeutiges Optimum im Sinne von (6) ab. Mit höheren Polynomgraden lassen sich offenbar längere Datensequenzen genauso verarbeiten. Das bedeutet natürlich nicht, dass sich dabei auch die Prädiktion der Bahnkurve verbessert.

Tab. 2: Zeitverschiebung τ [s] für die der Maximalwert in Tab. 1 angenommen wird.

t_I-t_0 [s]	30	60	90	120	150	180	210	240
n=2	3	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	1.1	1.2
n=3	-2.2	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
n=4	2.0	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8
n=5	*	-1.3	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9

Tab. 2 zeigt, für welche Zeitverschiebungen τ der Maximalwert der Kreuzkorrelation jeweils angenommen wird. Dort, wo die Filterung erfolgreich war ($\rho > 0.95$), wird τ konstant zu 0.6...0.8 s erhalten. Der Rollwinkel ξ trifft um diesen Wert verzögert am Navigationscomputer ein.

Die Prädiktion der Bahnkurve

$$x_{\text{präd}}(t) = \sum a_i t^i \quad (7)$$

stellt sich als Extrapolation des Trends dar. Es bleibt zu ermitteln, welcher Polynomgrad hierfür optimal ist. Dies kann anhand des Vergleiches mit der tatsächlichen Bahn ermittelt werden. Allerdings wird diese Übereinstimmung durch nach dem Zeitpunkt t_I durchgeführte Manöver beeinträchtigt. Somit ist die Prädiktion wahrscheinlich besser, als dieser Vergleich anzeigt. In Tab. 3 scheint der Polynomgrad 4 das beste Ergebnis zu liefern. Das ist aber keineswegs immer so (Lehmann und Koop 2009), wonach wir die Methode der Kreuzvalidierung empfehlen (siehe nächster Abschnitt).

Tab. 3: Abweichung der tatsächlichen Bahn des Schiffes von der prädizierten Bahn während der nächsten 60 s.

Polynomgrad	$t_I - t_0$ [s]	ρ_{max} [%]	Δx_{voraus} [m]
n=2	60	97	0,5
n=3	90	96	2,2
n=4	120	96	0,2
n=5	150	96	1,0

Auch in den Signalen steckt für den Nautiker wertvolle Information über das Rollen, nämlich Frequenz und Lage der Rollachse. Das dynamische Verhalten des neuen Schiffes ist ja noch unbekannt. Wir ermitteln die Höhe der GNSS-Antenne über der Rollachse aus (3) und (4) zu

$$e(t) = \frac{s_x(t)}{s_\xi(t + \tau)} \quad (8)$$

und hieraus die Lage der Rollachse bezüglich des Schiffskörpers. Wir werten diese Formel jedoch nur in den lokalen Extremwerten von $|s_\xi|$ aus, denn insbesondere nahe $s_\xi = 0$ erhalten wir kein vernünftiges Ergebnis. Abb. 6 zeigt, dass das Ergebnis trotzdem noch ungenau ist. An den Rändern des Intervalls sind die Ergebnisse sicher unzuverlässig wegen fehlender Daten an jeweils einer Seite. Die Werte schwanken aber auch im Innern um mehrere Meter. Die Ursache ist

sicher, dass das Dreieck in Abb. 5 extrem spitzwinklig ist. Man beachte, dass hier $|\mathcal{S}_{\xi}| < 0,40^\circ$ war!

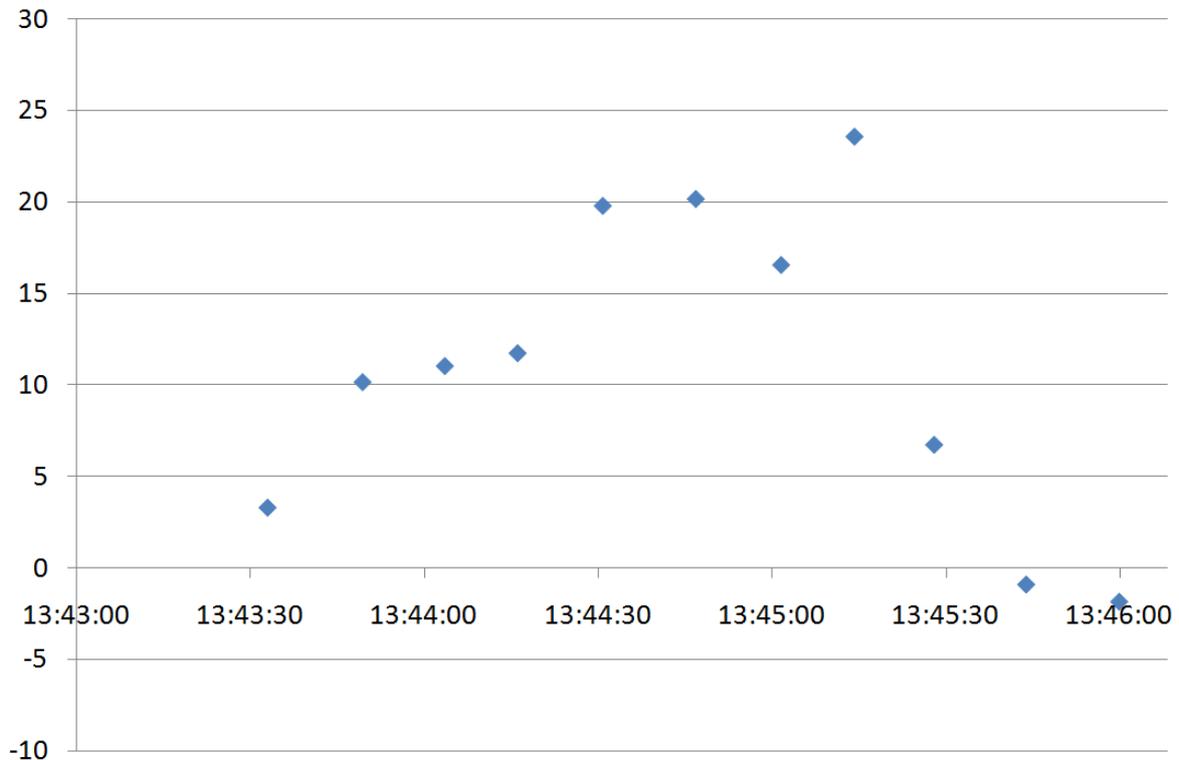


Abb.6: Berechnete Höhe der Rollachse über der Wasseroberfläche ($49\text{ m} - e$)

Weitere Ergebnisse findet man in (Lehmann und Koop 2009).

7 Schlussfolgerungen

Die Geodäsie hat sich in den letzten Jahrzehnten eine breite Palette von Werkzeugen zurechtgelegt, um zeitabhängige Daten zu analysieren und wertvolle Informationen zu extrahieren. Im vorliegenden Fall sind das die Informationen über die Vorfahrt eines Kreuzfahrtschiffes auf der Ems aus einer Zeitreihe, in der ein Störsignal (Einfluss des Rollens) sowie Messrauschen enthalten ist.

Die entwickelte Methode basiert auf der Herangehensweise der Kollokation nach kleinsten Quadraten, obwohl das ganze Potential dieser Methode gar nicht ausgeschöpft wurde. Insbesondere ist man in der Lage, das Rollen sowie dessen lineare Funktionale (z.B. Ableitungen) vorauszuberechnen und dafür auch Fehlerschätzungen anzugeben.

Die Methode arbeitet automatisch und in Echtzeit, bis auf die Wahl des Entwicklungsgrades des Trendpolynoms. Hierfür schlagen wir die Methode der *Kreuzvalidierung* vor: Aus den aktuell verfügbaren Daten werden *Testdaten* ausgeklammert, der Rest fungiert als *Trainingsdaten*. Die Filterungen und Prädiktionen mit verschiedenen Entwicklungsgraden werden auf die Trainingsdaten angewendet und mit den Testdaten verglichen. Der Entwicklungsgrad mit der höchsten Prädiktionsgenauigkeit wird dann zur Filterung aller relevanten Daten angewendet.

Danksagung

Dank gilt dem Amt für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (www.lgn.niedersachsen.de) für die Genehmigung zur Nutzung der GNSS-Daten sowie Herrn Dipl.-Ing. Bernd Koop, Fa. HydroSupport Buxtehude (www.hydrosupport.de) für die technische Unterstützung im Umgang mit den verschiedenen Datenformaten.

Literatur

- Benedict, K.: Effects of enhanced on-board prediction display functions based on actual ship conditions and manoeuvring simulation, In: POSITIONS Congress 2008, Proceedings of Symposium, Braunschweig, October 07-09, 2008.
- Böder, V.: Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 245, 2002.
- Böder, V.: Optimization of Hydrographic Positioning and Attitude Determination, "Shaping the Change", XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8-13, 2006.
- Grewall, M.S., Weill, L.R.; Andrews., A.P.: Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, Wiley-Interscience, 2007.
- iXSea: Hydrins, <http://www.ixsea.com/pdf/2008-01-ps-hyd.pdf> 2008, (Zugriff März 2009).
- Lehmann, R.; Koop, B.: Navigation of large cruise liners built by Meyer Werft, Germany, In: POSITIONS Congress 2008, Proceedings of Symposium, Braunschweig, October 07-09, 2008.
- Lehmann, R.; Koop, B.: Conveyance of large cruise liners – Geodetic investigation of rolling and track prediction. Journal of Applied Geodesy 2009 (in print).

- Meyer Werft: Presseinformation, <http://www.meyerwerft.com> (Zugriff Januar 2009).
- Moritz, H.: Least-squares collocation, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe A, Heft-Nr. 75, München, 1973.
- Röttger, M.: Untersuchung und Vergleich zweier faseroptischer Inertialsysteme mit PDGNSS zur navigatorischen Genauigkeitssteigerung für die Überführung von Kreuzfahrtschiffen auf der Ems, Diplomarbeit, Hafencity University, Hamburg, 2008.