

# Statistische Ästuardatenanalyse – einige Methoden und ihre Grenzen

Marko Kastens

## Zusammenfassung

Anhand der Leitfrage, wie der Einfluss des Menschen auf ein komplexes natürliches System, wie dem Ästuar, beurteilt werden kann, werden die Methoden der mathematischen Modellierung und der Messdatenanalyse mit ihren Vor- und Nachteilen kurz dargestellt. Anhand des Parameters Wasserstand, der stellvertretend für ein aus harmonischen und nicht harmonischen Anteilen gemischtes Zeitreihensignal steht, werden statistische Methoden zur Zeitreihenanalyse behandelt. Aus der Fülle der Methoden werden einige Spektralmethoden und das Regressionsverfahren ausgewählt und ihre Limitierungen und Voraussetzungen besprochen. Ein aus beiden Methoden kombiniertes Verfahren wird vorgestellt und am Beispiel des Elbepegel Hamburg-St. Pauli angewendet. Im Vordergrund steht die Methode mit ihrer Begrenzung; die Ergebnisse sind sekundär und werden nicht weiter diskutiert. Eine relativ neue Analyseverfahren für nichtstationäre und nichtlineare Phänomene wird erwähnt (Hilbert-Huang-Transformation), die jedoch die Aufgabe der klassischen Sicht der Tidewelle bestehend aus Partialtiden bedeutet. Die Fülle und Breite der vorhandenen Analysemethoden, die weder ein Mensch noch eine Institution kaum mehr überblicken oder anwenden kann, fordert zukünftig ein kooperatives Vorgehen in der Analyse und Erforschung komplexer Systeme.

## Schlagwörter

Statistische Methoden, Regressionsverfahren, Spektrale Methoden, FFT, LSSA, Waveletanalyse, Neuronale Netze, Wasserstandsentwicklung, Ästuar, Elbe, Hamburg-St. Pauli

## Summary

*This paper considers the impact of people on a complex natural system like an estuary and how this influence can be assessed. The methods of mathematical modelling and analysis of measured data are briefly introduced and their advantages and shortcomings highlighted. The paper looks into statistical methods for time series analysis, using the example of the water level - a parameter that represents a mixed times series signal consisting of harmonic and non-harmonic components. Some spectral methods and the regression method are then chosen from the wide selection of methods available and their limitations and prerequisites are discussed. A procedure combining both methods is presented and applied to the example of the Elbe gauge in Hamburg-St. Pauli. The focus is on the method and its limitations; the results obtained are of secondary importance and are not discussed here. Reference is made to a relatively recent method of analysing nonstationary and nonlinear phenomena (Hilbert Huang Transform). The application of this method would, however, imply abandoning the classical view of the tidal wave as consisting of partial tides. Since it is hardly possible any more for one single person or institution to be familiar with the vast selection of*

*analytical methods or to apply them, the analysis of and research into complex systems will require cooperative approaches in the future.*

## Keywords

*statistical methods, regression method, spectral methods, FFT, LSSA, wavelet analysis, neural networks, water level development, estuary, Elbe, Hamburg-St. Pauli*

## Inhalt

1	Einleitung.....	202
1.1	Numerische Simulationsmodelle: .....	203
1.2	Datenanalyse von Naturmessungen: .....	203
2	Analyse von Modellergebnissen.....	204
3	Analyse von Naturmessungen.....	204
4	Leitparameter Wasserstand.....	205
5	Analysemethoden für Zeitreihen .....	205
5.1	Harmonische Analyse .....	206
5.1.1	Fast Fourier Transformation (FFT).....	206
5.1.2	Least-squares spectral analysis (LSSA):.....	210
5.1.3	Waveletanalyse.....	211
5.2	Regressionsanalysen .....	211
5.2.1	Ergebnisse .....	213
5.2.2	Bewertung der Ergebnisse.....	214
5.3	Neuronale Netze.....	215
5.4	Andere Methoden.....	216
6	Schlussfolgerung.....	216
7	Schriftenverzeichnis .....	217

## 1 Einleitung

Die Leitfrage, die im Hintergrund des folgenden Artikels steht lautet: Wie kann man den vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Einfluss des Menschen auf ein natürliches System, wie beispielsweise eines Ästuars, beurteilen oder noch besser quantifizieren? Um diese Frage beantworten zu können, muss ein möglichst umfassendes Systemverständnis, in diesem Fall über das Ästuar, vorhanden sein.

Ein Ästuar ist ein hochdynamisches und hochkomplexes System, das in zahllosen Fachbüchern ausführlich dargestellt wird (z. B. PUGH (2004), NIELSEN (2009) oder MALCHEREK (2010)). Es reagiert immer wieder auf äußere Einflüsse, wie Oberwasserwellen oder Änderungen des angeschlossenen Meeres aber auch auf Einflüsse des Menschen und unterliegt einer ständigen Änderung bzw. Anpassung. Wie können nun Phänomene,

wie beispielsweise der Anstieg des Tidenhubes an einem Punkt kausal und möglichst noch quantitativ auf gewisse Ereignisse zurückgeführt werden?

Diese Frage kann zumindest in Teilen durch die Anwendung von zwei Methoden beantwortet werden. Eine Methode ist das numerische Simulationsmodell, das die maßgeblichen physikalischen Gesetze beinhaltet und damit versucht, die Ästuardynamik am Computer zu simulieren. Die andere Methode ist die Datenanalyse von Naturmessungen. Beide Methoden haben große Vorteile aber auch beträchtliche Defizite. Einige dieser Vor- und Nachteile sind in den folgenden zwei Listen aufgeführt.

### 1.1 Numerische Simulationsmodelle:

- + sind ein in sich konsistentes System, das dem Benutzer erlaubt nur einen einzigen Parameter zu variieren und zu beobachten, wie sich diese Änderung auf das Gesamtsystem auswirkt (Systemstudien).
- + erlauben Vorhersagen des Systemverhaltens aufgrund komplexer Änderungen von Anfangs-/ und Randwerten.
- + erlauben einen synoptischen Blick auf das Gesamtsystem Ästuar
- beinhalten eine unvollständige, modellhafte Abbildung der natürlichen Prozesse. Daraus resultieren Unschärfen in den Berechnungen und deren Aussagen.
- verwenden eine Diskretisierung und auf diese angepasste Parameter. Wird die Diskretisierung erhöht, meistens mit dem Wunsch die Unschärfen zu verringern, so passen evtl. beide Skalen nicht mehr zusammen (Stichwort up-/downscaling) und das Modell muss mit Aufwand neu kalibriert werden. Hier ist viel Erfahrungswissen und auch ggf. viel Zeit notwendig.
- verwenden stets Anfangs-(z. B. Sedimentbelegung der Sohle) und Randwerte (z. B. der Wasserstand am seeseitigen Rand). Diese sind unvollständig bzw. ungenau. Das kann ebenfalls zu einer erhöhten Unschärfe in den Berechnungen und Aussagen führen.

### 1.2 Datenanalyse von Naturmessungen:

- + verwendet real aufgetretene Zustände. Im Gegensatz dazu sind Modellzustände entweder rein hypothetischer Natur oder als hind- oder nowcast mit Unschärfen belastet.
- beinhalten eine Unschärfe in den Messwerten.
- können Datenlücken durch technische Ausfälle oder andere Widrigkeiten enthalten und es kann dadurch zu Zeitspannen kommen, an denen keine Aussage möglich ist.
- liegen oft nur an Einzelpunkten vor. Eine Einschätzung der räumlichen Repräsentativität ist notwendig und beschränkt oftmals die Aussagekraft.
- können nicht trennen zwischen natürlichen und anthropogenen Einflüssen, sondern zeigen lediglich Veränderungen.
- sind nicht prognosefähig. Aus Messungen in die Zukunft zu extrapolieren ist nur über kurze Zeitspannen mit Unsicherheiten möglich.

Aus der Auflistung wird deutlich, dass es keinen klaren Gewinner geben kann, sondern dass vielmehr beide Methoden mit ihren unterschiedlichen Sichtweisen – ähnlich dem stereoskopischen Sehen unserer beiden Augen - sich ergänzen und eine neue Dimension eröffnen können.

Beide Methoden setzen ein gewisses Systemverständnis voraus. Beide Methoden können aber auch das Systemverständnis weiter erhöhen.

## 2 Analyse von Modellergebnissen

Die weitaus meisten mathematischen Simulationsmodelle produzieren große Datenmengen, die im Anschluss analysiert werden. Ziel ist oftmals das Aggregieren der Daten, um die Datenmenge zu reduzieren bzw. auch um spezielle Charakteristiken herauszuarbeiten, die den Modelllauf von anderen unterscheidet. Ganz allgemein kann von Kennzahlen gesprochen werden. Diese Kennzahlen haben einen Zeit- und Raumbezug. Letzterer z. B. an Punkten, Linien, Flächen und/oder Volumen. Einige Beispiele sind:

- Spezielle Ereignisse in einer Zeitreihe: Tideniedrig-, Tidehochwasser, Kenterpunkte der Strömungsgeschwindigkeit, ...
- Statistische Größen: Mittelwerte, Globale Minima und Maxima, Standardabweichung, Varianz
- Spektrale Kennwerte: Amplituden und Phasen von Partialtiden, Seegangsspektrum, Periodogramme
- Integrative Größen: Summen, Teilsummen und Bilanzen
- Differentielle Größen: Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Neben diesen Kennzahlen spielt auch die Visualisierung eine wichtige Rolle, da viele Menschen einen besseren Zugang zu komplexen Sachverhalten haben, wenn das Medium eine Abbildung oder eine Animation ist.

Einen Katalog der von der BAW verwendeten Kennzahlen ist im BAWIKI ausführlich beschrieben. Für Morphologische Parameter s. MILBRADT (2011).

## 3 Analyse von Naturmessungen

Für Naturmessungen gelten prinzipiell dieselben oben aufgeführten Beispiele der Aggregation. Zusätzlicher erheblicher Aufwand entsteht durch die Schritte der Aufbereitung und Homogenisierung von Messungen.

Zur Aufbereitung gehört die Plausibilisierung. Hier muss anhand eines individuellen Fehlerkataloges für einen Parameter (evtl. auch eines Messgerätes) jede Messung überprüft und bei Beanstandung der Messung die Stelle entsprechend markiert werden, z. B. mit einem Flagsystem. Manche Parameter erfordern zusätzlich eine Umrechnung, da lediglich eine Proxyinformation gemessen wurde, wie beispielsweise der Wasserstand, der aus Druckmessungen nach vorheriger Atmosphärenkorrektur errechnet wird oder die Sedimentkonzentration, die aus der Trübung nach erfolgter Kalibrierung durch Messproben errechnet wird.

Bei der anschließenden Homogenisierung werden Messdaten aus unterschiedlichen Datenquellen (Messgeräten, Firmen, Behörden) mit ihren jeweiligen Metainformationen in ein einheitliches Datenformat (ASCII, XML, NetCDF, ...) überführt. Diese homogenisierten und damit auch meistens bereits standardisierten Naturmessdaten können dann der weiteren Analyse zugeführt werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass die Messungen im Gegensatz zu den Modellergebnissen mit Datenlücken behaftet sein können.

## 4 Leitparameter Wasserstand

Nach diesem allgemeinen Überblick, sollen die vorgestellten Methoden zur Datenanalyse mit konkreten Beispielen verwendet werden. Als Beispielparameter wird hier der Wasserstand gewählt. Zum einen liegt die Wahl in der Bedeutung dieses Parameters als Leitparameter für zahlreiche Umweltgutachten begründet, zum anderen unterhält die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) in Deutschland seit vielen Jahren ein Pegelmessnetz nebst Datenbanken und Systemen zur Ablage und Bearbeitung, so dass an vielen Pegeln somit lange Zeitreihen vorliegen, die von gleichbleibender Qualität, gut plausibilisiert und dokumentiert sind.

Als Beispielästuar wird die Tideelbe und der an ihr liegende Pegel Hamburg-St. Pauli verwendet (für mehr Information siehe: (TIDE - TIDAL RIVER DEVELOPMENT)). Um im späteren Verlauf die äußeren Einflussfaktoren des Meeresinflusses und des Oberwassers zu kompensieren, finden zusätzlich die Pegel Helgoland und Neu Darchau Verwendung.

## 5 Analysemethoden für Zeitreihen

Sehr viele Modellergebnisse und Naturmessungen liegen in Form von Zeitreihen vor. Die Zeitreihenanalyse ist ein Instrument, das in sehr vielen Bereichen nahezu tägliche Anwendung findet. Sie kann zu den statistischen Methoden gezählt werden, die omnipräsent sind: Angefangen mit einfacher deskriptiver Statistik (z. B. Mittelwerte) über Wahrscheinlichkeiten (z. B. Erwartungswert und Konfidenzen), Statistische Test und Verteilungen, Regressionen und eben die Zeitreihenanalyse bietet die Statistik (z. B. HARTUNG et al. (2005)) eine umfangreiche Sammlung von Methoden zur Auswertung und Beschreibung von Zeitreihen. Selbst die Spektralanalyse kann als Teil der Statistik betrachtet werden, obwohl sie heute eher als eigenständige Disziplin auftritt. Da das Feld der Statistik viel zu groß für einen so kleinen Artikel ist, soll der Fokus hier auf harmonischen und Regressionsanalysen liegen.

Am Anfang der Analyse steht oft die Phänomenologie oder die qualitative Analyse: welche Zusammenhänge bestehen zwischen den Parametern, gibt es Korrelationen, werden sie durch weitere Faktoren verstärkt oder geschwächt usw. Als weiterer Schritt kann sich die quantitative Analyse anschließen. Die weiter unten beschriebene Regression setzt den ersten Schritt der qualitativen Analyse voraus und hat als Ergebnis eine Modellfunktion. In der folgenden Regressionsanalyse werden dann die einzelnen Parameter einschließlich ihrer Konfidenzintervalle bestimmt.

Essentiell zur Überprüfung aller Methoden sind Benchmarks. Mit ihnen kann geprüft werden, ob die Methode überhaupt für den zu untersuchenden Zweck geeignet ist, welche Analysen evtl. nicht funktionieren und welche Unsicherheiten die Methode birgt. Für die hier verwendete Analyse von Zeitreihen können als Benchmark eine oder mehrere vollsynthetische Zeitreihen generiert werden, deren Zusammensetzung (beispielsweise welche Partialtiden mit welchen Amplituden und Phasen, welcher Offset und ggf. welcher lineare Trend) zu 100 Prozent bekannt sind. Ein Vergleich der Analyseergebnisse der verschiedenen Methoden kann großen Aufschluss darüber geben, ob eine Methode geeignet ist oder nicht.

## 5.1 Harmonische Analyse

Eine Wasserstandsmessung in einem Ästuar ist beeinflusst durch die Gezeiten und die Meteorologie. Die Gezeiten lassen sich als Partialtiden mit festen Frequenzen darstellen, wobei jede Partialtide eine Linearkombination aus den fünf Grundfrequenzen des Systems Erde-Mond-Sonne ist (z. B. GODIN (1988) und BAW (2007)). Ein Tidesignal muss also einen gewissen harmonischen Anteil aufweisen.

Die Harmonische Analyse des Wasserstands hat eine lange Tradition (CARTWRIGHT 2000) während spektrale Methoden eher in jüngeren Publikationen anzutreffen sind. Beispiele für Spektralanalysen in der deutschsprachigen Literatur sind zu finden bei GÖNNERT et al. (2004) oder LIEBIG (1994). Letzterer verwendet das Verfahren zum Schließen von Lücken in Wasserstandsaufzeichnungen.

Auf eine methodische Einführung wird hier verzichtet und auf umfangreiche Literatur verwiesen. Vielmehr sollen hier die Besonderheiten hervorgehoben werden, wenn diese Methoden zur Analyse von Tidesignalen verwendet werden. Es folgen Voraussetzungen, Beschränkungen und Empfehlungen zu einigen harmonischen Analysemethoden.

### 5.1.1 Fast Fourier Transformation (FFT)

Eine weit verbreitete Spektralmethode ist die (schnelle) Fouriertransformation (FFT). Die FFT ist sehr weit verbreitet und es gibt viele Lehr- und Fachbücher über die Methode und ihre Anwendung (z. B. BUTZ (2003) und OPPENHEIM et al. (2004)).

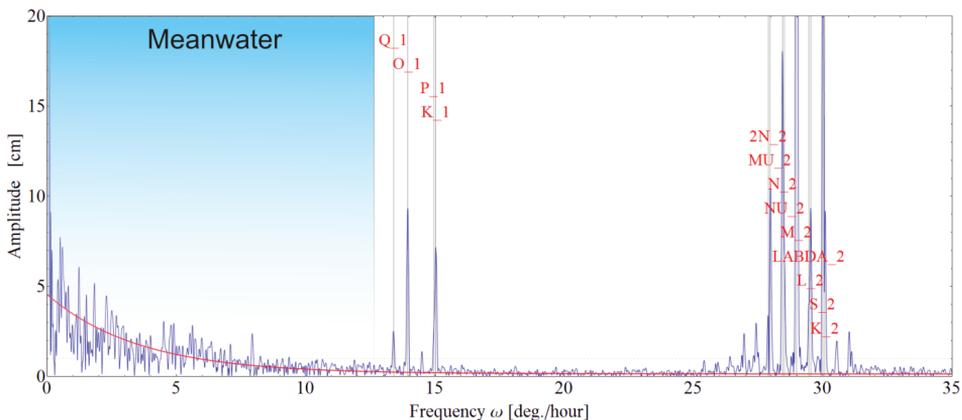


Abbildung 1: Anfang eines Amplitudenspektrums eines gemessenen Wasserstandes. Der Bereich des Mittelwassers (0-13 Grad/h) und einzelnen Partialtiden.

In der spektralen Darstellung werden die Partialtiden in einem Amplitudenspektrum als Linien, die sich deutlich von der Umgebung abheben sichtbar (Abb. 1). Neben dem harmonischen Anteil, der sich in den dominanten Spektrallinien äußert, gibt es noch einen aperiodischen Anteil. Dieser bewegt sich etwa entlang einer abklingenden Exponentialfunktion (rote Linie). Der größte Teil der Energie des aperiodischen Signals liegt im langwelligen Bereich (0-13 Grad/h) vor der ersten Partialtide – hier Q1.

Im Hinblick auf die Anwendung der FFT zur Analyse von (Tidewasserstands-)zeitreihen ist folgendes zu beachten:

Generelle Aussagen:

- Die Meteorologie *sendet* hauptsächlich auf den niedrigen Frequenzen (s. Abb. 1). Ihre Sendeleistung nimmt mit zunehmender Frequenz ab. Betrachtet man eine zeitliche Entwicklung eines Spektrums, so variieren die Peaks im niederen Frequenzbereich, sie sind also eher stochastischer Natur. Partialtiden bilden über die Zeit einen nahezu konstanten Peak im Amplitudenspektrum aus.
- Durch einen Tiefpassfilter lässt sich der hauptsächliche aperiodische Anteil vom Rest des Signals trennen. Dieser Anteil stellt eine Art Basislinie für das Tidesignal oder ein Mittelwasser dar. Der Rest entspricht dem hauptsächlichen Tidesignal, das auf der Basislinie variiert. Diese Trennung ist aus physikalischer Sicht nicht vollständig, da die Meteorologie auch auf den Frequenzen der Partialtiden sendet und es langwellige Partialtiden gibt, die im Rauschen der Meteorologie im Bereich von 0-13 Grad/h untergehen (beispielsweise die Partialtiden SA und SSA).
- Anhand der fest stehenden Peaks im Amplitudenspektrum können die Frequenzen und damit die Partialtiden bestimmt werden. Nicht klassifizierte Peaks/Partialtiden können über eine Linearkombination der fünf astronomischen Grundfrequenzen bestimmt werden.
- Da auch die Meteorologie auf den Frequenzen der Partialtiden *sendet*, unterliegen diese auch einer natürlichen Variation. Über das spektrale Umfeld kann der Betrag dieser Variation abgeschätzt werden.

Voraussetzungen:

- Notwendig sind äquidistante Zeitreihen ohne Lücken. Eine lückenbehaftete Zeitreihe kann dann verwendet werden, wenn das Zeitraster äquidistant ist und die fehlenden Werte mit Nullen aufgefüllt werden. Aus Sicht der Partialtide bedeutet das, dass die Amplitude gegenüber der realen Amplitude verringert und die Phaseninformation falsch ist. Sind die Lücken klein, kann trotzdem eine *qualitative* Aussage getroffen werden.
- Der Zeitabstand der Samples bestimmt die höchste Frequenz (Grenzfrequenz  $\Omega_{Nyq}$ ), die dargestellt werden kann (abgeleitet aus dem Abtasttheorem nach Shannon/Nyquist aus BUTZ (2003)). Sie beträgt beispielsweise für einen Zeitabstand  $dt = 600s$ :

$$\Omega_{Nyq} = \frac{180 \text{ Grad} \cdot 3600 \text{ s/h}}{600 \text{ s}} = 1080 \text{ Grad/h}$$

Damit ist es theoretisch noch möglich eine M74 (1072,41 Grad/h) zu erfassen.

- Die Auflösbarkeit von Partialtiden - oder allgemeiner Frequenzen - wird von der Länge der Zeitreihe bestimmt. Beispielhaft beträgt die Auflösung  $f_n$  einer einjährigen Zeitreihe:

$$f_n = \frac{360 \text{ Grad}}{365 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ h}} \sim 0,041 \text{ Grad/h}$$

Die zentralen Peaks der Partialtiden M2 (~28,984 Grad/h) und S2 (30 Grad/h) liegen damit  $(30 \text{ Grad/h} - 28,984 \text{ Grad/h})/0,041 \text{ Grad/h} \sim 25$  Stützstellen auf dem diskreten Spektrum auseinander und können damit gut aufgelöst bzw. voneinander getrennt werden.

- Die Auflösbarkeit wird ebenfalls von der verwendeten Fensterfunktion bestimmt (s.u.).

Empfehlungen:

- **Fensterfunktionen verwenden, um *sidelobes* zu dämpfen** (s. Abb. 2). Eine Fensterfunktion wird immer verwendet, da immer nur ein Ausschnitt der Daten vorliegt. Das Rechteckfenster, das ohne explizite Angabe verwendet wird hat keine sehr guten Eigenschaften (weniger als 100 % der Energie im zentralen Peak, ungünstiges Abklingverhalten der *sidelobes*, ...). Das hier im Beispiel verwendete Hanning-Fenster hat bereits deutlich bessere Eigenschaften im zentralen Peak und im Abklingverhalten (s. Abb. 2). Eine generelle Empfehlung kann nicht gegeben werden, vielmehr bestimmt die spektrale Zusammensetzung des Signals und auch die Fragestellung welche Fensterfunktionen verwendet werden sollten.

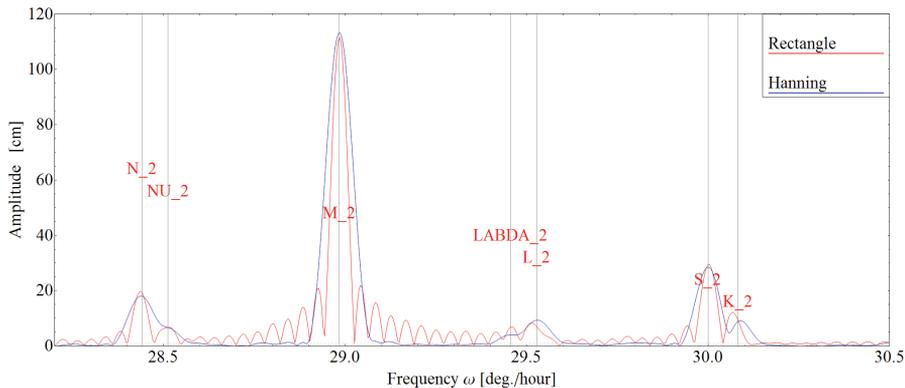


Abbildung 2: Amplitudenspektrum ohne (Rechteck) und mit (Hanning) Fensterfunktion – das Rechteck-Fenster hat ein sehr ungünstiges Abklingverhalten und beeinflusst die Nachbaramplituden wesentlich.

- **Zero padding verwenden, um den zentralen Peak zu treffen.** Aus einer diskreten Datenreihe resultiert ein diskretes Spektrum, deren Frequenzen auf einem bestimmten Raster liegen (s.o.). Selten liegen die Frequenzen der Partialtiden genau auf dem Raster des diskreten Spektrums. Durch anhängen von Nullen (*zero padding*) in der Datenreihe fügt man keine Information hinzu, verändert aber das Frequenzraster (s.o.). Fügt man beispielsweise das zehnfache an Nullen den Daten am Ende hinzu, erhält man ein zehnfach feineres Raster in der Frequenzdomäne (Interpolation, s. Abb. 3). Schließlich kann man die Zahl der anzuhängenden Nullen vorausberechnen, um möglichst genau eine gesuchte Frequenz aufzulösen.

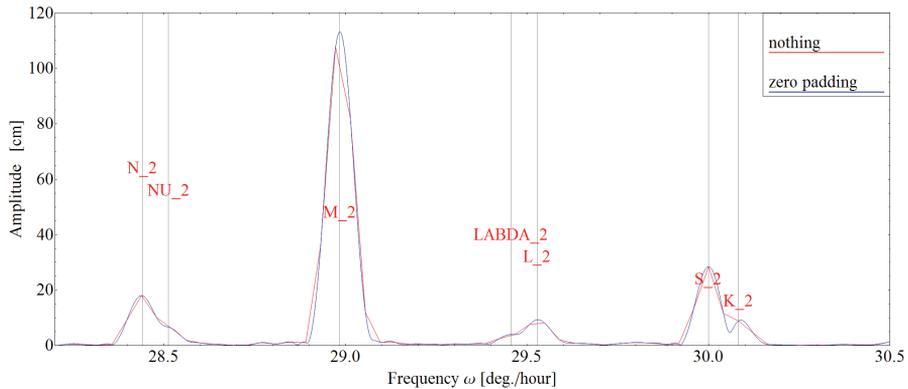


Abbildung 3: Amplitudenspektrum mit und ohne *zero padding*: Letzteres erhöht die Anzahl der Stützstellen im Spektrum, fügt jedoch keine Information hinzu.

**Analysezeitspanne: 1 Jahr.** Die Länge der Zeitreihe bestimmt das Auflösungsvermögen(s.o.). Liegen die Frequenzen von zwei Partialtiden in einer Wasserstandsmessung so eng beieinander, dass sie nicht mehr getrennt aufgelöst werden, passiert folgendes: werden die Amplituden über die Zeit aufgetragen (beispielsweise durch eine Analysezeitspanne von einem Monat, dass um jeweils einen Tag verschoben wird), so bekommt man eine Modulation der Partialtiden, die nicht aufgelöst werden. Aufgelöste Partialtiden variieren über die Zeit nur sehr gering. Für die Pegel in der Deutschen Bucht sowie in den Ästuaren hat sich eine Analysezeitspanne von einem Jahr durchgesetzt, um alle Partialtiden gut voneinander zu trennen.

Einschränkungen/Szenarien:

- Wie reagiert die FFT auf einen linearen Trend (beispielsweise einen Anstieg des Mittelwassers (MSL))? Die Frage lässt sich gut mit dem Linearitätstheorem beantworten: Lässt sich eine Funktion in einzelne Summanden zerlegen, so ist die fouriertransformierte die (komplexe!) Summe der fouriertransformierten Summanden. In dem folgenden konkreten Beispiel gibt es eine Datenreihe, die sich unterteilen lässt in einen linearen Anstieg (Trend des Mittelwassers) und einer Sinusschwingung (M2). Das Amplitudenspektrum setzt sich zusammen aus der Überlagerung der fouriertransformierten Geraden und dem fouriertransformierten Sinus (s. Abb. 4). Der Trend liegt im unteren Teil des Spektrums und lässt sich gut von den Partialtiden trennen (s.o.).
- Was passiert bei der FFT, wenn die Amplitude einer Partialtide variiert oder trendbehaftet ist? Das Ergebnis spiegelt den Mittelwert der Amplitude über die analysierte Zeitspanne wider. Sehr langfristige Trends können über Jahresanalysen aufgelöst werden, wie beispielsweise die Nodaltide, die sich in einem etwa 18,6-jährigen Zyklus äußert. Kurzfristige Schwankungen innerhalb eines Jahres sind nicht darstellbar und werden herausgemittelt.
- Dilemma: um die zeitliche Auflösung der Partialtiden zu erhöhen, muss das Analysezeitfenster verkleinert werden. Durch die Verkleinerung sinkt aber die spektrale Auflösung (s.o.) und die Partialtiden selber werden durch ihre Nachbarpartialtiden

moduliert. Zeitliche und spektrale Auflösung schließen sich bis zu einem gewissen Punkt aus, ähnlich der *Heisenberg'schen Unschärferelation* (BLATTER 2003).

- Was ergibt sich daraus für die Güte der Vorhersagbarkeit eines Tidepegels aus Partialtiden? Ist die Dynamik von Störgrößen wie Mittel- und/oder Oberwasserzufluss gering oder ihr Einfluss auf den Standort gering, dann liefert eine Vorhersage aufgrund von Partialtiden geringe Fehler. So etwa im Sommer, wo die Dynamik des Mittelwassers gering ist. Ist der Ort des Pegels durch große Oberwasserwellen beeinflusst, ist die Vorhersage des Signals mit größeren Fehlern behaftet.

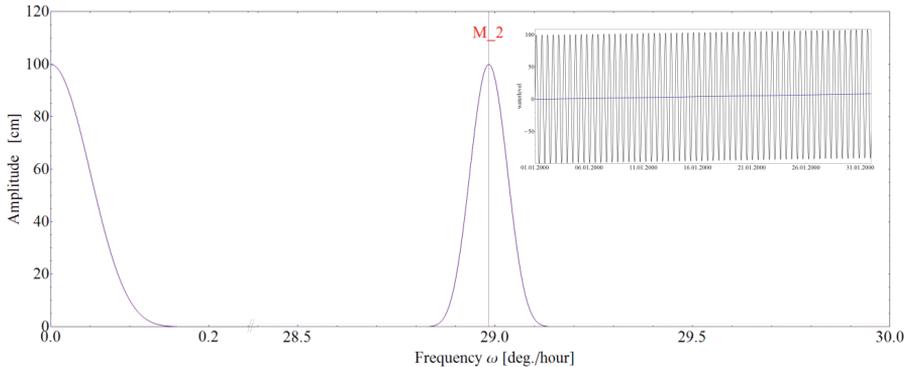


Abbildung 4: Amplitudenspektrum eines linearen Trends mit einer Sinusschwingung (M2) – oben rechts die Zeitreihendarstellung.

### 5.1.2 Least-squares spectral analysis (LSSA):

Größter technischer Nachteil der FFT ist die Voraussetzung der äquidistanten Zeitreihen. Sehr häufig sind Zeitreihen nach der Plausibilisierung mit zahlreichen Lücken versehen, so dass die Methode nicht mehr anwendbar ist. Um trotzdem einen Einblick in die Amplituden und Phasen der Partialtiden zu bekommen kann eine Modellfunktion mit den zu untersuchenden Partialtiden aufgestellt und die Daten an diese Modellfunktion gefittet werden (LSSA-Methode). Ebenso wie für die FFT gilt auch hier die Voraussetzung zur Auflösung von Partialtiden. Wird diese übersehen, so bekommt man extrem hoch korrelierte Amplituden und Phasen, die, abhängig vom Startwert des Gleichungslösers bei einer zweiten Analyse unterschiedlich ausfallen können. Eine Ausgabe der Korrelationen ggf. mit Varianzanalyse und statistischen Tests ist zur Interpretation sehr hilfreich und kann strukturelle Analysefehler durch Überparametrisierung der Modellfunktion vermeiden.

Neben der Anwendung auf äquidistante Zeitreihen mit Datenlücken kann die LSSA-Methode auf langjährige nicht-äquidistante Zeitreihen, wie z. B. Tidehoch- und Tideniedrigwasser angewendet werden. Diese wurden für die folgende Abb. 5 verwendet, um die Amplitude der Nodaltide am Pegel Helgoland (hier etwa 2,8 cm) abzuschätzen.

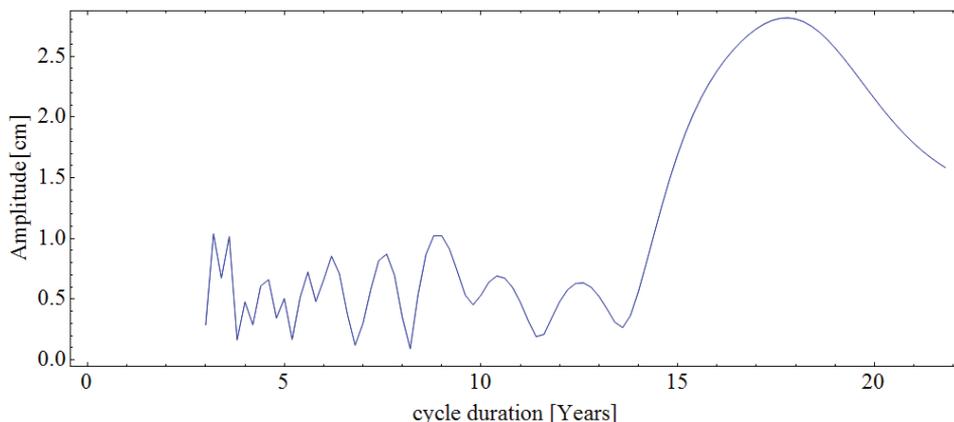


Abbildung 5: Amplitudenspektrum abgeleitet aus einer ca. 61-jährigen Zeitreihe des Tidenhubes.

### 5.1.3 Waveletanalyse

Eine Waveletanalyse hat den Vorteil, dass eine bessere Lokalisierung im Zeitbereich möglich ist, sie kann also Amplituden zeitlich besser auflösen. Die Fouriertransformation liefert hingegen nur eine komplexe Zahl für eine Frequenz (Amplitude und Phase) für die analysierte Zeitspanne. Leider spielt auch hier die *Heisenberg'sche Unschärferelation* eine Rolle (BLATTER (2003) und BERGH et al. (2007)). Die Lokalisierung in der Zeitdomäne kostet Auflösungsvermögen in der Frequenzdomäne. Die Spektrale Repräsentation der einzelnen Partiaaltiden kann also verloren gehen. Bei Messungen in den Ästuaren, wo sehr viele Partiaaltiden vorkommen, deren Frequenzen oft sehr eng aneinander liegen (s. Abb. 1) ist das der Fall. Als Resultat einer Waveletanalyse kann man in den einzelnen Frequenzbereichen/Bändern eine Schwebung der beteiligten Partiaaltiden, erkennen, die oftmals selber ein sehr komplexes Signal sind, das schwer zu interpretieren ist.

Ist keine Zerlegung in einzelne Partiaaltiden notwendig, sondern ist eine Betrachtung von Spektralbereichen ausreichend, so kann eine Waveletanalyse oder auch die *short-time fourier analysis* oder Filterbänke verwendet werden.

## 5.2 Regressionsanalysen

Regressionsanalysen sind im deutschsprachigen Raum weiter verbreitet als spektrale Methoden. Zum einen ist die Methode der Regression mit weniger Aufwand durchzuführen, zum anderen ist die Voraussetzungen für spektrale Verfahren – eine äquidistante Zeitreihe ohne Datenlücken - deutlich schwieriger zu erfüllen.

In Deutschland ermittelten SIEFERT und JENSEN (1993) und SIEFERT (1998) im Rahmen von Voruntersuchungen zum weiteren Ausbau der Elbe Zusammenhänge von Elbepegeln mit dem Oberwasserzufluss und dem Nordseepegel Helgoland. Anschließend versuchen sie die per Regression ermittelten Zusammenhänge aus den Wasserstands Signalen herauszufiltern, um eine bessere Sicht auf die verbleibende Dynamik des Signals zu erhalten. Ihre Untersuchungen basieren auf im wesentlichen Jahresmittelwerten von Oberwasserzufluss und Tideniedrig- und Tidehochwasser.

NIEMEYER (2001) erweitert diesen Ansatz und beschreibt eine Modellfunktion für den Tideniedrig- bzw. Tidehochwasser des Pegels: Letztere sind proportional zum Tideniedrig- bzw. Tidehochwasser des Pegels Helgoland, proportional zum Tidenhub am Pegel Helgoland und proportional zum Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau. Für die Regression kommen Monatsmittelwerte zum Einsatz. Erwähnt wird der Einfluss des Mittelwassers bei Ausbauten, der Parameter selber findet jedoch noch keinen Eingang in die Berechnung.

Das Verfahren nach NIEMEYER (2001) wurde weiter verfeinert von KASTENS (2007), KASTENS (2009) und BAW (2007). Es verwendet keine Montasmittelwerte mehr, sondern die einzelnen aus der Wasserstandszeitreihe abgeleiteten Tideniedrigwasser- und Tidehochwasserwerte. Das Mittelwasser findet Verwendung in den Modellfunktionen.

Erkenntnisse und die Modellfunktionen des Verfahrens werden kurz aufgeführt:

- Tideniedrig- und Tidehochwasser sind eine Kombination aus Mittelwasser und Tidenhub. Ihre Entwicklung lässt deshalb nicht auf die ursprünglichen Einflüsse schließen. Im Folgenden werden nur die primären Größen Mittelwasser (Potenzial) und Tidenhub (Energie) verwendet.
- Das Mittelwasser lässt sich als Schwerelinie aus dem gemessenen Wasserstandssignal mit einem Tiefpassfilter ableiten (s. Kapitel 5.1.1). Aus der verbleibenden Zeitreihe (hauptsächlich das Tidesignal) werden die Tidekennwerte (*tcv*, *tidal characteristic value*) abgeleitet. Das Messsignal wird also in zwei Teile getrennt und getrennt analysiert. Diese Trennung ermöglicht den Einfluss des Mittelwassers auf den Tidenhub zu bestimmen. Das Gesamtsignal besitzt eine autokorrelative Komponente.
- Das Oberwasser beeinflusst das Tideniedrig- und Tidehochwasser. Primär dämpft der Oberwasserzufluss den von See einlaufenden Impuls der Tidewelle und damit den Tidenhub. Das Mittelwasser wird durch erhöhten Oberwasserzufluss angehoben.
- Ein erhöhtes Mittelwasser erhöht die Wassertiefe, verringert deshalb die Energiedissipation und führt zu einem erhöhten Tidenhub. Das Mittelwasser ist also ambivalent: eine Erhöhung vom Meer führt zu größerem Tidenhub, während eine Erhöhung aufgrund des Oberwasserzuflusses in Summe zu einer Verringerung führt.
- Die Dichte des Wassers bleibt hier unberücksichtigt. Die Veränderung des Wasserstands  $dh$  aufgrund einer in der Zeit veränderten Dichte am Ort kann errechnet werden aus dem Verhältnis der Dichten zu den Zeitpunkten  $t1$  und  $t2$  und der Wassertiefe  $h$  am Ort ( $dh = \frac{\rho t1}{\rho t2} \cdot h$ ).

Aus den Beobachtungen lassen sich zwei Modellfunktionen aufstellen. Der Kennwert (*tcv*) und das Mittelwasser am Pegel setzen sich zusammen aus:

$$tcv_{Gauge} = a \cdot tcv_{Heligoland} + b \cdot Discharge_{NeuDarchau}^n + c \cdot mean\ water_{Gauge} + offset$$

*tcv*: tidal characteristic value (tidal range, high water, low water)

$$MW_{Gauge}(t) = d \cdot MW_{Heligoland}(t + dt) + e \cdot Discharge_{NeuDarchau}^{n2}(t) + offsetmw$$

Die Laufzeitverschiebung ( $dt$ ) des Mittelwassers von Helgoland zum Pegel wird einmalig über eine Kreuzkorrelation der beiden Zeitreihen bestimmt. Das erste Maximum

bestimmt die Zeitverschiebung. Eine Laufzeitverschiebung für den Pegel Neu Darchau wurde nicht vorgenommen, da nur tägliche Werte zur Verfügung standen.

### 5.2.1 Ergebnisse

Aus dem beschriebenen Verfahren soll zusammenfassend ein Ergebnis für den Elbe-Pegel Hamburg-St. Pauli dargestellt werden.

Als Referenzzeitspanne wird das Kalenderjahr 1997 bestimmt, in der die Parameter der beiden oben aufgeführten Modellfunktionen mit einer Regression ermittelt werden. Die Zeitverschiebung des Mittelwassers für den Pegel Hamburg-St. Pauli beträgt ab Helgoland 331 Minuten. Es ergeben sich folgende Werte für die Parameter der Funktionen (s. Tab. 1):

Tabelle 1: Regressionsparameter für das Kalenderjahr 1997; \*: Confidence Interval; \*\*: für den Pegel Hamburg St. Pauli wurde  $n = n_2 = 1$  gesetzt.

tidal range St. Pauli 1997	Wert	CI* low (95 %)	CI* high (95 %)
a (Influence of tidal range Heligoland)	0,737	0,715	0,760
b (Influence of Discharge Neu Darchau)	0,007	0,005	0,009
c (Influence of mean water St. Pauli)	0,092	0,074	0,110
Offset	123,752	112,836	134,667
$n^{**}$	1		
mean water St. Pauli 1997			
d (Influence of mean water Heligoland)	1,268	1,264	1,271
e (Influence of Discharge Neu Darchau)	0,033	0,033	0,033
Offsetmw	-111,983	-113,757	-110,209
$n_2^{**}$	1		

Die Potenzen  $n$  bzw.  $n_2$  werden in beiden Modellfunktionen auf Eins gesetzt, da aufgrund des geringen Oberwassereinflusses auf den Pegel St. Pauli der Algorithmus nicht konvergiert, bzw. sich die Varianz des Residuums – als Gütemaß – kaum unterscheidet. Die Parameter weisen untereinander eine geringe Korrelation auf. Der Offset ist höher korreliert, da alle Einzelkomponenten einen Offset aufweisen. Eine Modellfunktion ohne Offset ist auch denkbar, sie würde jedoch weniger vom gemessenen Signal erklären.

Im Nachgang werden mit diesen Funktionen *hindcast*-Berechnungen durchgeführt. Diese implizieren, dass das gesamte System Tidelbe in einem stabilen dynamischen Zustand ist und sich die Einflüsse von Mittel- und Oberwasserzufluss auf den Tidenhub über die Zeit nicht ändern. Die Differenz aus der Messung und dem *hindcast* ergibt jeweils die um äußere Einflüsse (hier den Meereseinfluss und Oberwasserzufluss) gefilterte Zeitreihe, hier dargestellt als Jahresmittelwerte des Tidenhubes (s. Abb. 6) und des Mittelwassers (s. Abb. 7).

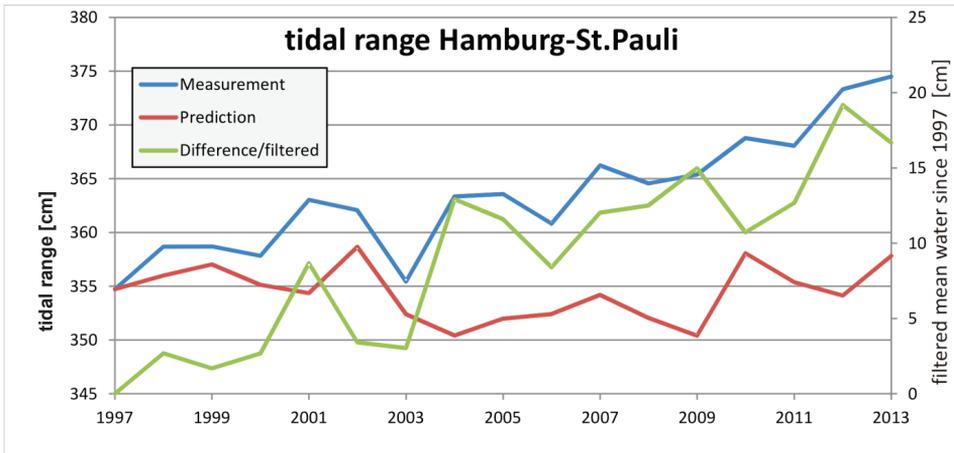


Abbildung 6: mittlerer jährlicher Tidenhub am Pegel Hamburg-St. Pauli aus Messungen und aus Vorhersagen sowie deren Differenz, die das um äußere Einflüsse bereinigte Signal darstellen.

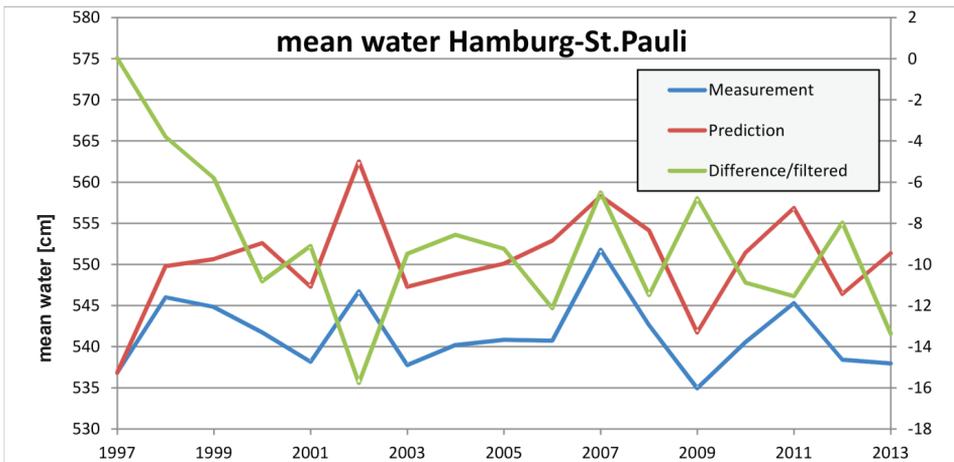


Abbildung 7: Mittleres jährliche Mittelwasser am Pegel Hamburg-St. Pauli aus Messungen und aus Vorhersagen sowie deren Differenz, die das um äußere Einflüsse bereinigte Signal darstellen.

### 5.2.2 Bewertung der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Ergebnisse (Abb. 6 und Abb. 7) fallen zwei Dinge deutlich auf.

- Der Tidenhub ist in Hamburg-St. Pauli seit mindestens 1997 deutlich angestiegen.
- Das Mittelwasser ist in den ersten Jahren nach 1997 um etwa 10 cm gefallen und hat sich dann stabilisiert.

Beide Beobachtungen lassen sich nun nicht mehr nur auf äußere Ereignisse zurückführen, vielmehr sind es innere Gegebenheiten, die zu diesen Veränderungen geführt haben. Wesentliche Veränderungen prägen das Elbeästuar in dieser Zeit: das ist zum einen eine Vertiefung der Fahrrinne von 13,5 m auf 14,4 m, erhebliche morphologische Veränderungen im Elbmündungsbereich, anthropogene Veränderung im Hamburger Hafen und

Veränderungen in den Seitenbereichen der Elbe und in den Nebelben, die meistens mit einer Volumenabnahme einhergehen.

In NIEMEYER (2001) wurden bereits die Veränderungen von Ausbauten auf das Mittelwasser theoretisch dargestellt. Der hier gezeigte Absink des Mittelwassers und die Vertiefung der Fahrrinne fallen zeitlich sehr genau aufeinander, so dass ein kausaler Zusammenhang sehr wahrscheinlich ist. Anders sieht es mit der Entwicklung des Tidenhubes aus. Dieser steigt allmählich an, was ursächlich auf die Vertiefung aber auch auf die oben erwähnten weiteren Einflüsse (anthropogene und natürliche) zurückzuführen ist. Hier zeigt sich sehr deutlich die Grenze des Verfahrens: es zeigt zwar Änderungen in Bezug auf eine Referenzzeitspanne an, die im Wesentlichen um äußere Einflüsse bereinigt sind aber ob diese Änderungen anthropogenen oder natürlichen Ursprungs sind, kann das Verfahren nicht erkennen.

Ein weiteres Defizit des Verfahrens sind langanhaltende Trends. Das Verfahren impliziert Stationarität. Wird es trotzdem auf ein trendbehaftetes System angewendet, erlernt es den Zustand der Referenzzeitspanne, nicht aber seinen Trend. Zur Beurteilung ist es also wichtig die Gesamthistorie und der ihnen zu Grunde liegenden Prozesse und Trends zu kennen. In diesem Fall ist der trendhafte Anstieg des Tidenhubes am Pegel Hamburg-St. Pauli auch kein neuer, sondern er besteht schon seit längerem (s. WSV & HPA (2011) oder auch FICKERT und STROTMANN (2009)). Seine Ursachen sind sehr vielfältig und teilweise noch ungeklärt. Sie sollen nicht Gegenstand dieses Artikels sein.

Abschließend ist anzumerken, dass sich die Belastbarkeit solcher Verfahren erhöht, wenn längere Zeitreihen zur Verfügung stehen. So kann nach der Filterung auch die restliche natürliche Variabilität erkannt werden, die immer noch in den gefilterten Zeitreihen enthalten ist.

### 5.3 Neuronale Netze

Neuronale Netze bestehen im Kern aus einem Regressionsverfahren. Die Topologie des Netzes bestimmt die Modellfunktion, deren Parameter anhand der zur Verfügung gestellten Daten gefittet (trainiert) werden. Wie bei allen Regressionsverfahren besteht die Gefahr der Überparametrisierung, wenn mehrere Eingangsparameter stark miteinander korreliert sind. Der bei Neuronalen Netzen verwendete Lernalgorithmus kann dazu führen, dass die gefitteten Parameter (Wichtungsmatrix) von Training zu Training mit gleichem Datensatz variieren, da der Eingangsvektor oft zufällig zusammengestellt wird und dann nicht mehr reproduziert werden kann. Mit steigender Komplexität der Modellfunktion kann es vorkommen, dass der Lösungsraum zunehmend mehr Extrema aufweist, in die ein Lösungsalgorithmus hineinläuft. Zusammen mit einem zufällig generierten Eingangsvektor zum Trainieren kann so die Reproduzierbarkeit der Lösung zum Glücksspiel werden.

Ein gutes Systemverständnis hilft, die wesentlichen Prozesse in der Netztopologie abzubilden und ein überparametrisiertes Modell mit den oben beschriebenen Unzulänglichkeiten zu vermeiden. Ebenfalls muss die Korrelation der Eingangsparameter geprüft und ggf. diese dekorreliert werden. Um den oben benannten Problemen aus dem Weg zu gehen, sollten die Parameter der Modellfunktion möglichst linear unabhängig sein.

## 5.4 Andere Methoden

In Kapitel 4.1.3 wurde das Dilemma von Fourier- und Waveletanalysen angesprochen: eine sehr genaue Frequenzlokalisierung benötigt lange Zeitreihen oder: bei genauerer Zeitauflösung verliert man die gewünschte hohe Frequenzauflösung. Eine relativ neue Methode, die Hilbert-Huang-Transformation (HHT) bietet eine Alternative. Sie kann bei Signalen aus nichtlinearen und nichtstationären Systemen angewendet werden. Im Kern besteht sie aus der *empirical mode decomposition* und einer Spektralanalyse nach *Hilbert* und proklamiert das Prinzip der instantanen Frequenz (HUANG 2006). Ausgangsgrößen sind die Amplitude und die Frequenz. Beide ändern sich über die Zeit. Mit dem Einsatz dieser Methode wird das altbekannte Bild der Tide bestehend aus Partialtiden (die auch nur eine Theorie darstellt) verlassen.

## 6 Schlussfolgerung

Zurückkommend auf die Eingangsfrage wurde hier ein kleines Beispiel der Zeitreihenanalyse des Wasserstandes dargestellt, das eine Spektralmethode (Tiefpassfilter) mit einer einfachen statistischen Regression verbindet. Um keine falschen Schlussfolgerungen zu ziehen, müssen die verwendet Methoden kritisch vor dem Licht ihrer Grenzen betrachtet werden. In dem dargestellten Beispiel ist die Grenze der Trend, den die Regression nicht berücksichtigen kann, da sie von Stationarität ausgeht.

Das hier vorgestellte Beispiel bedeutet keine Limitierung auf den Parameter Wasserstand. Nahezu alle Parameterzeitreihen im Ästuarbereich beinhalten einen harmonischen Anteil aufgrund der Gezeiten und einen stochastischen Anteil aufgrund der Meteorologie. Welche Methoden oder Kombinationen von Methoden sich am besten zur Zeitreihenanalyse einsetzen lassen, bestimmt das Signal sowie die Fragestellung.

Eine gute Methode, um sich bezüglich der gewählten Analyseverfahren rückzuversichern ist der Einsatz von Benchmarks. In diesem Fall von vollsynthetischen Zeitreihen, deren Inhalt und Zusammensetzung zu 100 % bekannt ist. Anhand ihres Einsatzes kann leicht überprüft werden, welche Schlüsse eine eingesetzte Methode zulässt und wo ihre Grenzen liegen.

Bei nicht eindeutiger Sachlage können auch mehreren Methoden zum Einsatz kommen: beispielsweise der Einsatz von Analyseverfahren und numerischem Simulationsmodell. Letzteres kann die Einflussfaktoren einzelner Komponenten herausarbeiten, wie beispielsweise den Einfluss der natürlichen Dynamik auf den Tidenhub am Pegel Hamburg-St. Pauli.

Verallgemeinert man noch weiter und betrachtet die Methoden der mathematischen Modellierung und die Methoden der Signalanalyse so wird deutlich, dass ein Einzelner bei der Größe des Themenfeldes kaum mehr die Übersicht über alle Methoden behält, geschweige denn sie alle beherrscht. Notwendig ist daher eine kooperative Vorgehensweise mit anderen Institutionen um Informationen aus den unterschiedlichsten Methoden zu erhalten und diese zu bewerten. Für eine Weiterentwicklung der Methoden sind kooperative Forschungsverbände unumgänglich.

## 7 Schriftenverzeichnis

- BAW: Tidewasserstandsanalysen in Ästuaren am Beispiel der Unter- und Außenelbe, 2007.
- BAWIKI Stand 27.03.2014: [http://www.baw.de/methoden\\_en/index.php5/Hydraulic\\_Engineering\\_Methods](http://www.baw.de/methoden_en/index.php5/Hydraulic_Engineering_Methods)
- BERGH, J.; EKSTEDT, F. und LINDBERG, M.: Wavelets mit Anwendungen in Signal- und Bildbearbeitung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Online-Ressource p., 2007.
- BLATTER, C.: Wavelets. Eine Einführung; [für Mathematiker, Ingenieure und Informatiker]. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, x, 178 S., 2003.
- BUTZ, T.: Fouriertransformation für Fußgänger. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 183 S., 2003.
- CARTWRIGHT, D. E.: Tides. A scientific history. Cambridge University Press, Cambridge, New York, xii, 292 p., 2000.
- FICKERT, M. und STROTMANN, T.: Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren. HTG-Kongress Lübeck, 2009.
- GÖNNERT, G.; ISERT, K.; GIESE, H. und PLÜß, A.: Charakterisierung der Tidekurve. In: Die Küste, 68, 2004.
- HUANG, N. E.: Compact Course in The Hilbert-Huang-Transformation (HHT) for Non-linear and Non-Stationary Time Series Analysis. Braunschweig, 2006.
- KASTENS, M.: Tidewasserstandsanalyse in Ästuaren am Beispiel der Elbe. In: Die Küste, 72, 2007.
- KASTENS, M.: Analyses of time series and model hindcast of water levels after the last deepening of the Elbe estuary - a comparison. In: Poster Proceedings - ICCE 2008 : 31st International Conference on Coastal Engineering, 31. August bis 5. September 2008 Hamburg, Germany. Stolberg, 6-14, 2009.
- LIEBIG, W.: Schließen von Lücken in Pegelaufzeichnungen, Die Küste, 56, 1994.
- MALCHEREK, A.: Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, IX, 301 S., 2010.
- MILBRADT, P.: Analyse morphodynamischer Veränderungen auf der Basis zeitvarianter digitaler Bathymetrien. In: Die Küste, 78, 33-57, 2011.
- NIELSEN, P.: Coastal and estuarine processes. World Scientific, Singapore, 343 p., 2009.
- NIEMEYER, H. D.: Change of mean tidal peaks and range due to estuarine waterway deepening. In: Coastal Engineering Proceedings; No 26 (1998): Proceedings of 26th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 1998, 2001.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W. und BUCK, J. R.: Zeitdiskrete Signalverarbeitung. Pearson Studium, München, Boston [u. a.], 1031 S., 2004.
- PUGH, D.: Changing sea levels. Effects of tides, weather, and climate. Cambridge University Press, Cambridge, U.K, New York, xiii, 265 p., 2004.
- SIEFERT, W.: Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen. Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen. In: Die Küste, 60, 1998.
- SIEFERT, W. und JENSEN, J.: Fahrinnenvertiefung und Tidewasserstände in der Elbe. In: Hansa, Vol. 130, 10, 1993.

TIDE - TIDAL RIVER DEVELOPMENT. Stand 27.03.2014: [http://www.tide-project.eu/index.php5?node\\_id=Reports-and-Publications;83&lang\\_id=1](http://www.tide-project.eu/index.php5?node_id=Reports-and-Publications;83&lang_id=1)

WSV & HPA: Abschlußbericht der Beweissicherung zur Anpassung der Fahrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Hamburg, 2011.