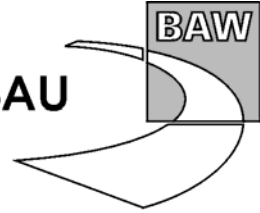
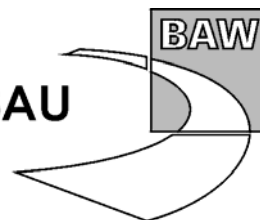




BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau



Gutachten
Tidewasserstandsanalysen in
Ästuaren am Beispiel der
Unter- und Außenelbe



Gutachten
Tidewasserstandsanalysen in Ästuaren am
Beispiel der Unter- und Außenelbe

Auftraggeber: WSD Nord

Auftrag vom: 1.9.2003

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A 3955 03 10009

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: Ästuarsysteme II (K3)
 Bearbeiter: Marko Kastens

Hamburg, im März 2007

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Einleitung	2
3	Grundlagen	3
3.1	Der Wasserstand	3
3.2	Die spektrale Repräsentation des Wasserstands	3
3.3	Tidekennwerte	5
3.4	Die Nodaltide	6
4	Das harmonische Verfahren – Partialtiden(PT)-Verfahren	7
4.1	Voraussetzungen	7
4.2	Auswahl der Partialtiden	7
4.3	Bedingungen und Annahmen	8
4.3.1	Die Auflösung der Wasserstandszeitreihen – die Abtastfrequenz	8
4.3.2	Länge des Analysesignals	9
4.3.3	Intrinsische Annahmen	10
4.4	Bestimmung von Partialtiden	11
4.4.1	Regressionsverfahren zur Bestimmung von Partialtiden	11
4.4.2	Schnelle Fouriertransformation (FFT)	12
4.4.3	Spezielle FFT	15
4.5	Synthese aus Partialtiden	16
4.6	Ergebnisse des Partialtiden- (PT-)Verfahrens	18
4.7	Interpretation der Ergebnisse	20
4.8	Das PT-Verfahren unter besonderen Umständen	21
4.8.1	Einfluss des Oberwasserzuflusses	21
4.8.2	Trendbehaftete Zeitreihen	25
4.8.3	Nodaltide	26
4.9	Zusammenfassung	27
5	Statistische Analyse	29
5.1	Einleitung	29
5.2	Voraussetzungen	29
5.3	Messbare Phänomene	29
5.4	Modelle / Modellfunktionen	32
5.5	Ergebnisse	38
5.6	Das statistische Verfahren unter besonderen Umständen	40
5.6.1	Oberwasserzufluss	40
5.6.2	Trendbehaftete Zeitreihen	40



5.6.3	Nodaltide	40
5.6.4	Verschiedene Referenzzeiträume	42
6	Mittelwasseranalyse	44
7	Zusammenfassung und Empfehlung	48
7.1	Methodische Zusammenfassung	48
7.2	Inhaltliche Zusammenfassung	48
7.3	Empfehlung	49
8	Ausblick	50
9	Literatur	52
Anhang		
I.	Verfahren zum Schließen von lückenbehafteten Zeitreihen	53
II.	Bestimmung des stetigen Mittelwassers	54
III.	Frequenzen der Partialtiden	55
IV.	Spektrum des Pegels St.Pauli für das Kalenderjahr 2000	57
V.	Amplituden und Phasen des Pegels St.Pauli	63
VI.	Zeitlich-räumlicher Verlauf der Partialtide M2	65
VII.	Koeffizienten aus der Regression von Modell 7	66
VIII.	Entwicklung der Kennwerte seit 1998 bereinigt durch das Modell 7	67
IX.	Nodaltide	70
X.	Entwicklung des Oberwasserzuflusses am Pegel NeuDarchau	71
XI.	Schema zum Vergleich von gemessenen und synthetischen Kennwerten	72

Bildverzeichnis

Seite

<i>Bild 1 Standorte der untersuchten Pegel</i>	2
<i>Bild 2 Das Wasserstandssignal aufgenommen am Pegel St.Pauli</i>	3
<i>Bild 3 Oben: Logarithmische Darstellung des Amplitudenspektrums des Pegels Helgoland (2000-2005). Unten: Ein kleiner Ausschnitt des oberen Spektrums in linearer Darstellung. In der Vergrößerung sind die Spitzen (Peaks), die jeweils eine Partialtide repräsentieren deutlich erkennbar. Zusätzlich sind die Namen der Partialtiden eingetragen.</i>	4
<i>Bild 4 Schema der Tidekennwerte des Wasserstands</i>	5
<i>Bild 5 Schematische Darstellung der Beeinflussung des Wasserstands / Tidehubs durch die Nodaltide</i>	6
<i>Bild 6 Die roten Linien in diesem Spektrum entsprechen bekannten langwelligen Partialtiden. Erkennbar sind viele Peaks, jedoch keine Spitzen an den Positionen der roten Linien. Die Amplituden der Partialtiden sind hier zu klein gegenüber dem sie umgebenden Rauschen in diesem Spektrum aus einer einjährigen Zeitreihe.</i>	8
<i>Bild 7 Einfluss der Länge der Zeitreihe auf die Frequenzauflösung. Hier sind beispielhaft zwei Partialtiden M2 und S2 dargestellt mit jeweils Zeitreihenlängen von 15, 30 und 365 Tagen</i>	10
<i>Bild 8 Die diskrete Abtastung des Wasserstandssignals erzeugt ein diskretes Spektrum(rot) im Vergleich zum kontinuierlichen Spektrum (blau). Die Punkte des Spektrums liegen selten an den Frequenzen der Partialtiden. Die Folge sind Abtastfehler.</i>	14
<i>Bild 9 Durch große Nähe von Partialtiden und die zeitliche Begrenzung auf ein Jahr kommt es zu Überlagerung der Peaks der Partialtiden.</i>	14
<i>Bild 10 Durch sukzessives Entfernen der größten Partialtiden wird ein vorher nicht sichtbarer Peak (grün) sichtbar.</i>	15
<i>Bild 11 Vergleich zwischen Messsignal ohne stetiges Mittelwasser und Synthesesignal aus Partialtiden am Pegel St.Pauli. Das Messsignal kann beträchtlich vom mittleren Synthesesignal abweichen.</i>	17
<i>Bild 12 Vergleich zwischen Messsignal ohne stetiges Mittelwasser und Synthesesignal aus Partialtiden am Pegel St.Pauli. Sehr gute Übereinstimmung zwischen Synthesesignal und Messung. Dieser Zeitraum entspricht dem mittleren Schwingungszustand.</i>	17
<i>Bild 13 Vergleich des Tidehubs zwischen Synthese und Messung.</i>	18
<i>Bild 14 Tideniedrigwasserentwicklung aus Partialtiden seit 1998</i>	19
<i>Bild 15 Tidehochwasserentwicklung aus Partialtiden seit 1998</i>	19
<i>Bild 16 Tidehubentwicklung aus Partialtiden seit 1998</i>	20
<i>Bild 17 Einfluss des Oberwasserzuflusses NeuDarchau auf den Wasserstand bei Geesthacht (oben) und Bunthaus (unten)</i>	21
<i>Bild 18 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei mittleren Oberwasserzuflüssen</i>	22
<i>Bild 19 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei hohen Oberwasserzuflüssen</i>	22

<i>Bild 20 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei niedrigen Oberwasserzuflüssen</i>	23
<i>Bild 21 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei mittleren Oberwasserzuflüssen</i>	24
<i>Bild 22 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei hohen Oberwasserzuflüssen</i>	24
<i>Bild 23 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei niedrigen Oberwasserzuflüssen</i>	25
<i>Bild 24 Amplitudenspektrum eines linearen Trends mit -50 cm / Jahr</i>	25
<i>Bild 25 Spektrum einer künstlich erzeugten Zeitreihe (50 Jahre) mit einer Nodalvariation von ± 10 cm der M2. Gerade erkennbar sind die zwei Seitenpeaks neben der M2 Partialtide. Diese Seitenpeaks modulieren die M2.</i>	26
<i>Bild 26 Verlauf der M2-Partialtide bei der Analyse vieler einjähriger Zeitreihen eines theoretischen nodalbeeinflussten Signals</i>	27
<i>Bild 27 Scatterplot des mittleren jährlichen Tidehubs zwischen St.Pauli und Helgoland</i>	28
<i>Bild 28 Scatterplot vom Tidehub St.Pauli (links) / Geesthacht (rechts) zum Tidehub Helgoland</i>	29
<i>Bild 29 Scatterplot vom Tidehub St.Pauli (links) / Geesthacht (rechts) zum Oberwasserzufluss</i>	30
<i>Bild 30 Der Tidehub in Geesthacht in Abhängigkeit vom Tidehub am Pegel Helgoland und dem Oberwasserzufluss in NeuDarchau in drei Dimensionen. Um den großen Wertebereich des Oberwasserzuflusses darzustellen, wurde dieser zuvor geviertelt.</i>	31
<i>Bild 31 Tidehubabhängigkeit St.Paulis vom Mittelwasser und Oberwasserzufluss. Der Differenztidehub bezeichnet die Änderung des Tidehubs am Pegel St.Pauli hervorgerufen durch das Mittelwasser und/oder den Oberwasserzufluss. Der Oberwasserzufluss ist der besseren Darstellung halber auf ein Zehntel skaliert.</i>	32
<i>Bild 32 Messungen und Modellfunktion (Modell 1)</i>	34
<i>Bild 33 Messungen und Modellfunktion (Modell 2)</i>	34
<i>Bild 34 Messungen und Modellfunktion (Modell 3)</i>	35
<i>Bild 35 Messungen und Modellfunktion (Modell 4)</i>	35
<i>Bild 36 Messungen und Modellfunktion (Modell 7). Die korrekte Darstellung fordert genau vier Dimensionen. Um die Lösung trotzdem in perspektivischen drei Dimensionen zu zeigen, wurde zuvor mit dem Modell 1 der äußere Tidehub eliminiert. Der verbleibende Resttidehub, der nicht durch das Modell1 erklärt werden kann, wird hier in Abhängigkeit von Oberwasserzufluss und Mittelwasser dargestellt.</i>	36
<i>Bild 37 Entwicklung der Varianz des Residuums aller sieben Modelle entlang von Pegelstandorten in der Elbe</i>	37
<i>Bild 38 Entwicklung der Varianz des Residuums aller sieben Modelle von BakeA bis St.Pauli</i>	37
<i>Bild 39 Entwicklung des MTnw seit 1998 nach Modell 7 ohne stetiges Mittelwasser</i>	38
<i>Bild 40 Entwicklung des MThw seit 1998 nach Modell 7 ohne stetiges Mittelwasser</i>	39
<i>Bild 41 Entwicklung des MThb seit 1998 nach Modell 7</i>	39
<i>Bild 42 Scatterplot des Tidehubs über einen Nodalzyklus zweier theoretischer Pegel</i>	41



<i>Bild 43 Differenz zwischen der Berechnung und der Messung bei Verwendung eines linearen Ansatzes zur Berücksichtigung des äußeren Tidehubs (Modelle 1-7)</i>	41
<i>Bild 44 Entwicklung des Tidehubs am Pegel St.Pauli berechnet mit dem Modell 7 unter Verwendung verschiedener Referenzzeiträume.</i>	42
<i>Bild 45 Das Mittelwasser in Geesthacht(blau) in Abhängigkeit vom Mittelwasser in Helgoland und dem Oberwasserzufluss in NeuDarchau.</i>	44
<i>Bild 46 Entwicklung der Varianz des Residuums nach dem Bereinigen durch das Modell</i>	46
<i>Bild 47 Mittelwasserentwicklung an ausgewählten Pegeln - bereinigt durch das Modell</i>	47
<i>Bild 48 95%-Konfidenzellipse von zwei von fünf Parametern des Modells 7. Hier für den nichtlinearen Oberwassereinfluss am Pegel Geesthacht. 95 Prozent aller möglichen Parameterkombinationen aus b und n liegen innerhalb der Ellipse.</i>	51
<i>Bild 49 Messsignal und stetiges Mittelwasser (<13 Grad/h) am Pegel St.Pauli</i>	54
<i>Bild 50 harmonisches Tidesignal (> 13 Grad/h) am Pegel St.Pauli</i>	55
<i>Bild 51 Die Amplitude der Partialtide M2 im zeitlich räumlichen Verlauf</i>	65
<i>Bild 52 Die Phase der Partialtide M2 im zeitlich räumlichen Verlauf</i>	65
<i>Bild 53 Spektrum des mittleren jährlichen Tidehubs am Pegel Helgoland erzeugt durch eine Regression mit einer Sinusfunktion. Koeffizienten sind dabei Amplitude und Phase. Die Frequenz wurde variiert.</i>	70
<i>Bild 54 Nodaltidesignal im Tidehub am Pegel Helgoland mit 95%-Konfidenzband. Weiterhin zu sehen sind der gemessene mittlere jährliche Tidehub und der um die Nodaltide bereinigte mittlere jährliche Tidehub.</i>	71
<i>Bild 55 Kalenderjahresmittel des Oberwasserzuflusses am Pegel NeuDarchau</i>	71
<i>Bild 56 Schematische Darstellung der Kennwerte Tidehub (Thb), Tideniedrigwasser (Tnw), Tidehochwasser (Thw) und Tidemittelwasser (Tmw) sowie der Kennwerte Tnw(syn) und Thw(syn) aus der synthetischen Zeitreihe.</i>	72



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Tidewasserstände der Außen- und Unterelbe sind für den Wirtschafts- und Lebensraum des Menschen, die Natur und die Umwelt von elementarer Bedeutung. Die Tidewasserstände bilden die Schlüsselparameter, mit denen die mittel- bis langfristigen Entwicklungen im System der Tideelbe am sichersten beurteilt werden können. Die Veränderungen der Tidewasserstände ergeben sich aus sehr komplexen Wirkungszusammenhängen, die sich in den Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten, der Salinität, der Sedimenttransporte, des Sauerstoffhaushaltes, der morphodynamischen Entwicklung und der Grundwasserverhältnisse des Gesamtsystems manifestieren.

Im „Planfeststellungsbeschluss für die Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt“ vom 22.2.1999 werden die Tidewasserstände deshalb als die primären Parameter eingestuft, für die eine umfassende Beweissicherung notwendig ist. Ziel der Beweissicherung ist „die maßnahmebedingten Abweichungen von dem in der UVU festgelegten Eingriffsumfang zu ermitteln“. Da das Tidegeschehen aufgrund vielfältiger astronomischer und meteorologischer Einflüsse sehr variabel ist, sind die für die Beweissicherungsaufgaben einzusetzenden Methoden und Verfahren noch umstritten, weil heute gefordert wird, die ausbaubedingten Änderungen mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich zu bestimmen. Deshalb wurde die Bundesanstalt für Wasserbau von der WSD Nord beauftragt, zunächst die zeitliche Entwicklung der Wasserstände mit aktuellen wissenschaftlichen Methoden zu analysieren und die maßgebenden Einflussgrößen zu charakterisieren und zu quantifizieren.

In diesem Zusammenhang sollen auch die der Aufgabe gerecht werdenden Methoden und Verfahren verglichen werden, um schließlich ein verbessertes Verfahren für die aktuell laufende Beweissicherung zu empfehlen, das auch für zukünftige Ausbauprojekte praktikabel verwendet werden kann.

Da sich die aktuellen Änderungen der Wasserstände in der Tideelbe nur zum Teil auf den Ausbau im Jahre 1999 zurückführen lassen, besteht eine weiterführende sehr komplexe Aufgabe darin, Methoden zu erarbeiten, mit denen natürliche Einflüsse und Einflüsse aus anderen Maßnahmen des Menschen auf die Tidewasserstände quantifiziert werden können, die entweder vor 1999 oder danach in der Tideelbe durchgeführt wurden. Diese Aufgabe ist aus wissenschaftlicher Sicht sehr schwierig, da es viele Einflussgrößen gibt, die auf den Wasserstand in unterschiedlicher Größenordnung einwirken und sich auch untereinander beeinflussen. Im vorliegenden Bericht wird der Aspekt der Ursachentrennung nicht behandelt, sodass man in der Praxis die heute festgestellten Änderungen der Tidewasserstände der zuletzt durchgeführten Fahrrinnenanpassung zuschreiben wird, wenn für andere bekannte Ursachen keine gesicherten Prognosen vorliegen.

2 Einleitung

Vorgestellt werden zwei Verfahren zur Bestimmung von Veränderungen von Wasserständen am Beispiel des Elbe-Ästuars. Das Erste ist ein harmonisches Verfahren und basiert auf der Zerlegung des Tidesignals in Partialtiden. Das Zweite ist ein statistisches Verfahren, das bekannten physikalischen Phänomenen Rechnung trägt und als Regressionsverfahren fungiert.

Ein Blick in die Geschichte zur Ermittlung von Wasserstandsveränderungen zeigt, dass viele Veröffentlichungen als Analysekerne ein Regressionsverfahren benutzen, um damit äußere Einflüsse weitgehend zu eliminieren. Nach dieser Eliminierung (oder Filterung oder Normierung) wird das verbleibende Signal hinsichtlich seiner Veränderungen gedeutet. Für die Regression kommen sowohl Jahresmittel (s. Siefert, W. (1992), Siefert, W. & Jensen, J. (1993), Siefert, W. (1998)) als auch Monatsmittelwerte (s. Niemeyer, H.D. (1998)) zum Einsatz.

Spektrale Methoden im Zusammenhang mit Wasserstandszeitreihen wurden beispielsweise eingesetzt von Liebig, W. (1994) zum Schließen von Datenlücken oder zur Charakterisierung der Tidekurve (s. Gönnert, G. et al, 2004).

Die Pegelstandorte, die in dieser Untersuchung Eingang gefunden haben, sind in *Bild 1* zu sehen.

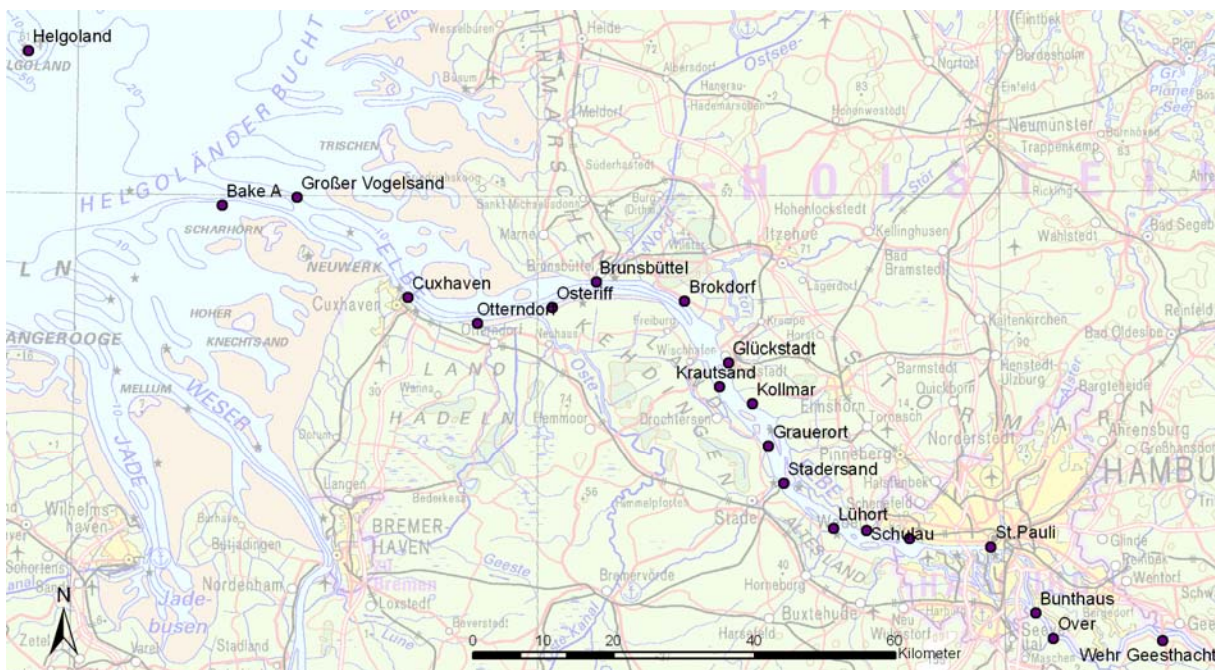


Bild 1 Standorte der untersuchten Pegel

3 Grundlagen

3.1 Der Wasserstand

Die Aufzeichnung eines Wasserstandssignals (oder synonym: einer Tidekurve) zeigt beispielhaft das *Bild 2*.

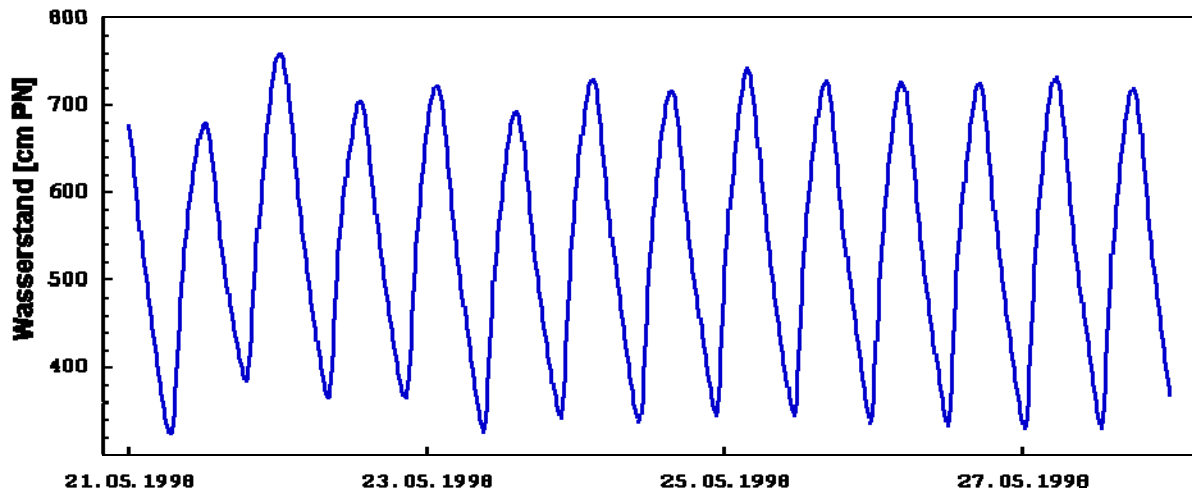


Bild 2 Das Wasserstandssignal aufgenommen am Pegel St.Pauli

Ein Großteil der Schwankungen einer Wasserstandsmessung in einem tidebeeinflussten Gewässer geht auf die astronomische Konstellation von Erde, Mond und Sonne zurück. Ferner unterliegt der Wasserstand den Einflüssen der Meteorologie, wie dem Wind und dem Luftdruck (s. Pugh, 2004).

Der Oberwasserzufluss spielt bei weiter stromauf gelegenen Pegeln eine zunehmende Rolle. Der Impuls des Oberwasserzuflusses ist dem Impuls aus der Nordsee bei Flutstrom entgegengerichtet, so dass die resultierende Energie geringer ist. Bei großem Oberwasserzufluss ist daher der Tidehub geringer.

Eine weitere Einflussgröße ist die Topographie/Bathymetrie. Damit verbunden spiegeln sich Änderungen dieser Größe auch im Wasserstand wider, seien sie natürlichen Ursprungs, oder, wie im Falle von beispielsweise Ausbauten, menschlichen Ursprungs.

Schlussendlich hat auch die Dichte des Wassers, die ihrerseits beeinflusst wird durch Salz-, Schwebstoffgehalt und Temperatur, einen Einfluss. Sie bleibt bei den folgenden Analysen unberücksichtigt.

3.2 Die spektrale Repräsentation des Wasserstands

Da große Teile von Schwankungen einer Wasserstandsmessung ursächlich auf astronomische Konstellationen zurückgehen, also harmonisch sind, lassen sich die Schwankungen durch harmonische Funktionen, wie Sinus- und Kosinusfunktionen beschreiben.

Die bekannteste Methode zur harmonischen Analyse ist die Fourieranalyse. Dabei wird mit einer Fouriertransformation ein Signal in sein Spektrum transformiert. Wird eine Wasserstandsmessung mittels Fouriertransformation in ein Amplitudenspektrum zerlegt, sind die Harmonischen an den Spitzen (Peaks) im Amplitudenspektrum erkennbar (s. Bild 3). Jeder dieser Peaks repräsentiert eine Sinusfunktion. Ein Peak kann einer Partialtide zugeordnet werden, wenn die Spitze des Peaks genau an einer Frequenz einer Partialtide liegt. Die Höhe des Peaks entspricht dann der Amplitude einer Partialtide.

Der Aufbau, die Frequenzen und die Namen der in diesem Bericht verwendeten Partialtiden sind im Anhang III dokumentiert.

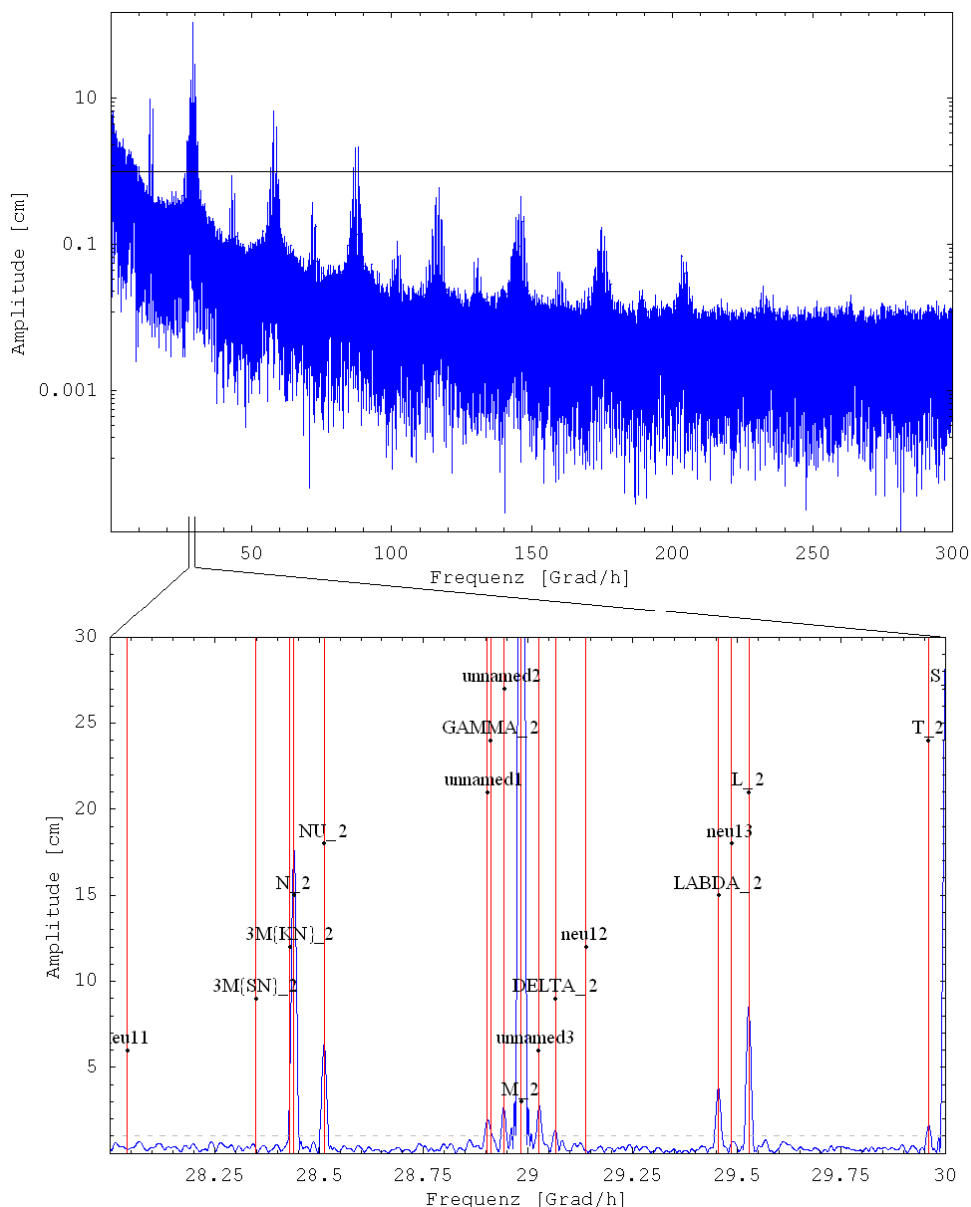


Bild 3 Oben: Logarithmische Darstellung des Amplitudenspektrums des Pegels Helgoland (2000-2005). Unten: Ein kleiner Ausschnitt des oberen Spektrums in linearer Darstellung. In der Vergrößerung sind die Spitzen (Peaks), die jeweils eine Partialtide repräsentieren deutlich erkennbar. Zusätzlich sind die Namen der Partialtiden eingetragen.

Der nicht-harmonische Teil des Wasserstands, der hauptsächlich durch die Meteorologie generiert wird, wird im weiteren Verlauf schlicht (meteorologisch-stochastisches) Rauschen genannt, um ihn vom harmonischen Signal abzugrenzen.

Dieses Rauschen ist im oberen Teil von *Bild 3* jenes breite Band, aus dem sich die Partialtiden hervorheben. Die Werte des Bandes nehmen im Mittel mit zunehmender Frequenz ab. Das meteorologische Rauschen wirkt auf allen Frequenzen und stört damit auch die Amplituden und Phasen der Partialtiden.

3.3 Tidekennwerte

Um der Komplexität der Tidekurve zu entgehen, wird versucht sie mit wenigen abgeleiteten charakteristischen Werten (Kennwerten) zu beschreiben. Die Vergleichbarkeit dieser Kennwerte ist deutlich einfacher als ein Vergleich zweier Tidekurven. Die wichtigsten Kennwerte sind der Tidehub (entspricht etwa der Energie) und das Mittelwasser (entspricht dem Schwerpunkt). Weiterhin das Tidehoch- und Tideniedrigwasser als die beiden lokalen Scheitelpunkte. Eine Übersicht der Kennwerte zeigt *Bild 4*.

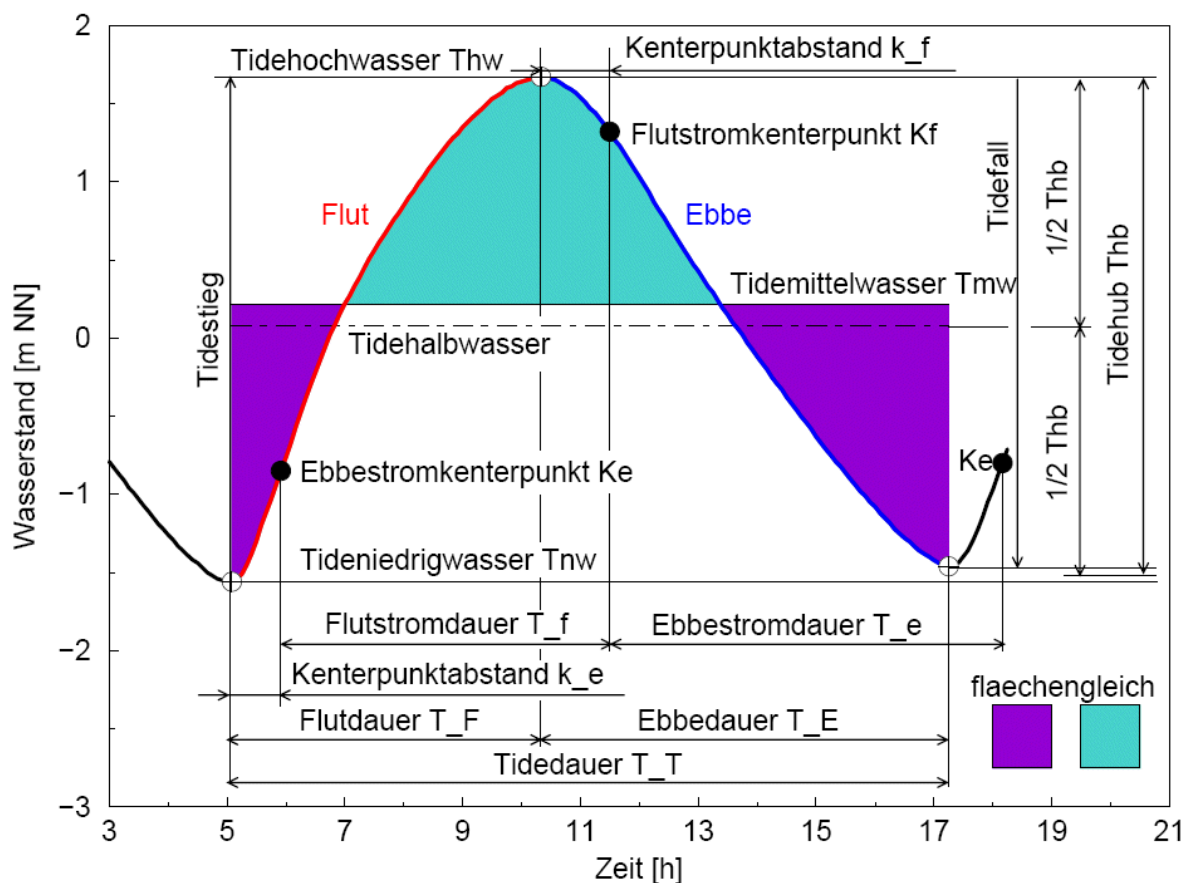


Bild 4 Schema der Tidekennwerte des Wasserstands

3.4 Die Nodaltide

Neben den in Kapitel 3.2 erwähnten Partialtiden gibt es noch sehr langwellige Phänomene wie beispielsweise die Nodaltide. Sie ist ein 18,61 jähriger Zyklus verursacht durch die Rotation des aufsteigenden Knotens der Mondbahn. Die Tide, die durch die Konstellation des Mond-Erde-Sonne-Systems geprägt ist, verändert sich folglich auch in einem Rhythmus von 18,61 Jahren. Die Nodaltide äußert sich in einer Modulation des Tidehubs: Der Tidehub variiert dann um einen Betrag - beispielsweise um 10 cm – um den mittleren Tidehub (s. Bild 5).

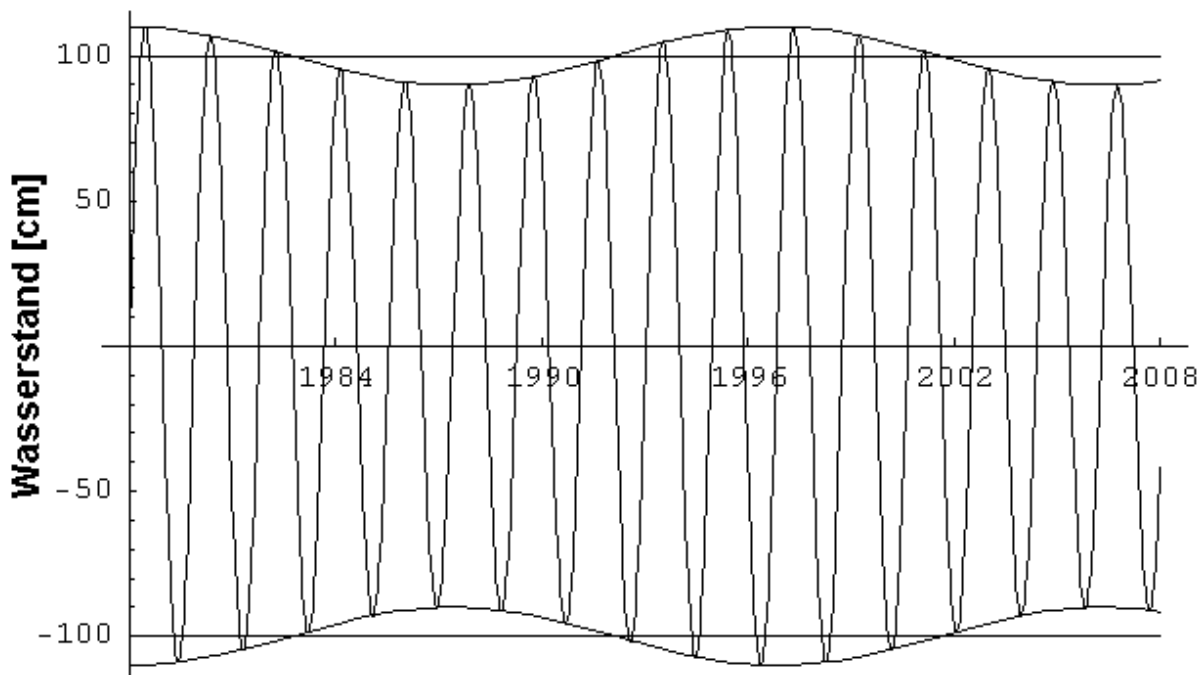


Bild 5 Schematische Darstellung der Beeinflussung des Wasserstands / Tidehubs durch die Nodaltide



4 Das harmonische Verfahren – Partialtiden(PT)-Verfahren

Inspiziert durch die Arbeiten von Cartwright (1999) und Godin (1988), die Wasserstände auf Basis von Partialtiden beschreiben, sollen in den vorliegenden Wasserstandszeitreihen die Partialtiden analysiert werden.

4.1 Voraussetzungen

Um eine harmonische Analyse mit Fouriertransformationen durchführen zu können, bedarf es hochaufgelöster Wasserstandszeitreihen mit äquidistanten Zeitintervallen. Die zum Teil sehr langen Wasserstandszeitreihen, die etliche Jahrzehnte in die Vergangenheit reichen, bestehen fast ausschließlich aus Scheitelwerten, die auf einem nicht äquidistanten Zeitraster liegen und damit der Fourieranalyse nicht zugänglich sind. Mit Einzug der digitalen Messwertaufzeichnung, die ab dem 1.11.1997 im Bereich der WSD-Nord offiziell begann, stehen hochaufgelöste äquidistante Zeitreihen zur Verfügung, die auch Analysen mit Fouriermethoden zulassen. Leider weisen diese Zeitreihen teilweise mehr oder weniger lange Lücken auf, bedingt durch Ausfälle des Messwertgebers. Um trotzdem Fouriermethoden einsetzen zu können, bedürfen diese Zeitreihen der Vervollständigung. Näheres zur verwendeten Methode zum Schließen von Lücken in Wasserstandszeitreihen ist im Anhang (s. Anhang I) beschrieben.

4.2 Auswahl der Partialtiden

Zu Beginn des Spektrums (Frequenzen kleiner 13 Grad/h) ist das Rauschen groß. Partialtiden mit Frequenzen kleiner 13 Grad/h können nicht mehr klar erkannt werden, was *Bild 6* deutlich zeigt.

Zwar können an den Frequenzen der langwelligen Partialtiden (Frequenzen < 13 Grad/h) Amplituden und Phasen ermittelt werden, sie geben aber nur zu einem unbekanntem Teil die tatsächlichen Amplituden und Phasen der Partialtiden wieder. Erst bei sehr langen Zeitreihen, wenn sich das Rauschen gegenseitig aufhebt, können deutliche Peaks erkennbar werden.

In Bereichen geringeren Rauschens (Frequenzen größer 13 Grad/h) kann die Detektierbarkeit von Amplituden und Phasen ebenso erschwert sein, wenn die Amplitude der Partialtide selber sehr klein ist. Wichtig für die Detektierbarkeit ist das Verhältnis von Umgebungsrauschen und dem eigentlichen Signal (*signal to noise ratio* oder S/N-Verhältnis).

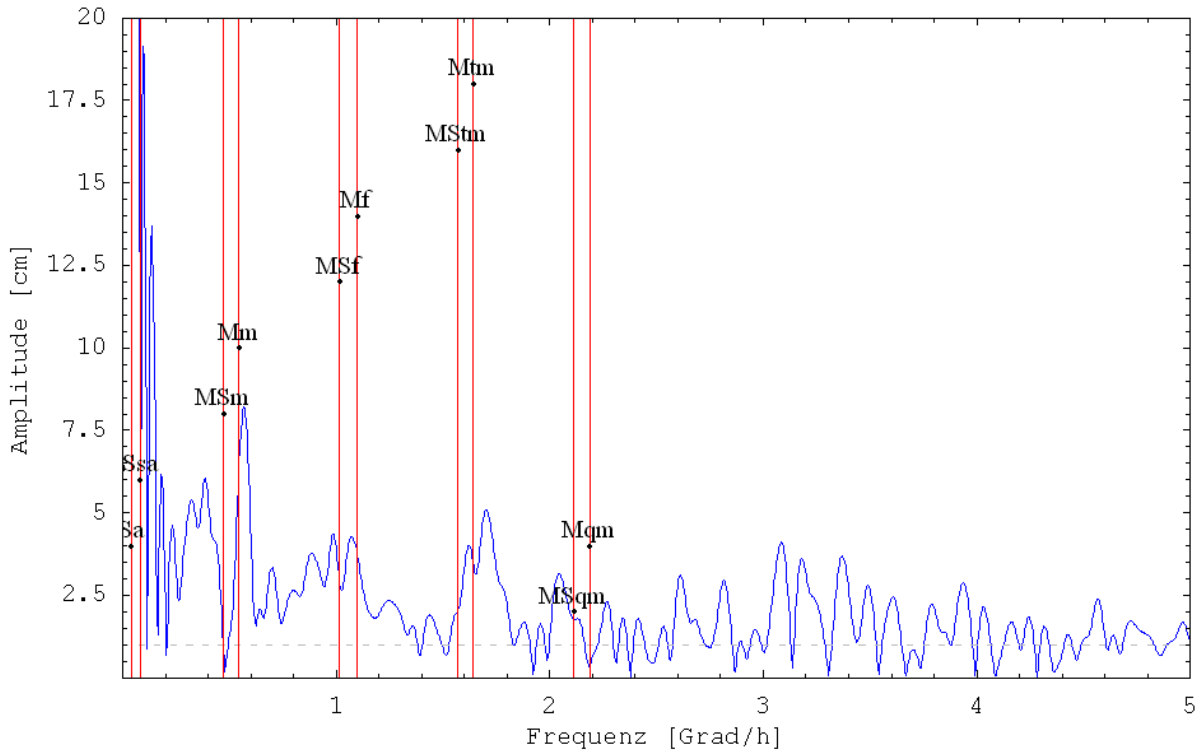


Bild 6 Die roten Linien in diesem Spektrum entsprechen bekannten langwelligen Partialtiden. Erkennbar sind viele Peaks, jedoch keine Spitzen an den Positionen der roten Linien. Die Amplituden der Partialtiden sind hier zu klein gegenüber dem sie umgebenden Rauschen in diesem Spektrum aus einer einjährigen Zeitreihe.

Im Umgang mit Spektren aus einjährigen Wasserstandszeitreihen hat sich folgendes herausgestellt:

- Die erste signifikante Partialtide mit einer Frequenz von ca. 13,4 Grad/h trägt den Namen Q_1.
- Das Umgebungsrauschen liegt bei Frequenzen größer 13 Grad/h unter einem Zentimeter.
- In langwelligen Bereichen (< 13 Grad/h) nimmt das Rauschen zu und zwar so stark, dass Peaks von langwelligen Partialtiden (< 13 Grad/h) nicht erkennbar sind.
- Kurzwellige Partialtiden (> 13 Grad/h) können gut detektiert werden, wenn die Amplitude größer als ein Zentimeter ist.

4.3 Bedingungen und Annahmen

4.3.1 Die Auflösung der Wasserstandszeitreihen – die Abtastfrequenz

Die Zeitreihen der Wasserstände eines Pegels liegen in einminütiger Auflösung vor. Diese Auflösung scheint viel zu hoch und die Datenmengen wachsen mit der Zeit schnell an. Beispielsweise besteht eine einjährige Zeitreihe aus mehr als einer halben Million Datenpunkten. Viele Algorithmen sind von der Ordnung N^2 oder $N \ln N$ (N := Anzahl der Datenpunk-



te). Das heißt, dass eine Verdopplung der Datenpunkte im ungünstigen Fall eine Vervierfachung der Prozessierungszeit bedeutet.

Auch der Speicherbedarf ist enorm und stößt beim Regressionsverfahren zur Bestimmung von Partialtiden (s. Kapitel 4.4.1) schon an die Grenze heutiger 32Bit-PC-Systeme. Eine wesentliche Vereinfachung wäre ein Ausdünnen der Zeitreihen ohne Informationsverlust. Wie groß darf der Messwertabstand maximal werden, so dass noch alle relevanten Frequenzen im Signal vorhanden bleiben? Eine Antwort liefert das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem (Butz, 2003 und Oppenheim et al, 2004).

Die Grenzfrequenz Ω_{Ny} für die einminütige Zeitreihe ($dt = 60s$) beträgt:

$$\Omega_{Ny} = \frac{N}{2} \cdot \frac{360[Grad] \cdot 3600[s/h]}{dt[s] \cdot N} = \frac{180[Grad] \cdot 3600[s/h]}{dt[s]} = 10800 \text{ Grad/h}$$

Das heißt, dass Zeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute Informationen bis Frequenzen von 10800 Grad/h beinhalten. Eine zehnmündige Auflösung lässt noch Informationen bis 1080 Grad/h zu. Selbst in einer halbstündigen Auflösung können noch Informationen - also auch Partialtiden - bis 360 Grad/h detektiert werden.

Beim Betrachten eines Spektrums einer Zeitreihe (s. Anhang IV) wird ersichtlich, dass die meiste Energie und damit Information im Anfangsbereich des Spektrums liegt. Ab 180 Grad/h ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering Partialtiden mit einer Amplitudengröße von über einem Zentimeter anzutreffen.

Für die folgende Untersuchung kann also ohne nennenswerte Einbußen an Information die Wasserstandszeitreihe auf halbstündige Werte ausgedünnt werden. Die Analysezeit sinkt dadurch in den Minutenbereich und damit auf handhabbare Dimensionen. Extremwerte, die nicht auf dem halbstündigen Raster liegen, gehen nicht verloren, da genügend Informationen/Punkte vorhanden sind, um sie zu rekonstruieren.

4.3.2 Länge des Analysesignals

Die Länge des Analysesignals, genauer die Anzahl der Messwerte, hat ebenfalls einen Einfluss auf das Ergebnis. So wie bei der Fouriertransformation die Zeit zur Frequenz wird und der Zeitabstand die maximale Frequenz bestimmt, so bestimmt die maximale Zeit (Länge der Zeitreihe) den Frequenzabstand bzw. die Frequenzauflösung. Dieser Umstand ist wie folgt zu verstehen: zwei Wellen lassen sich trennen (auflösen), wenn sie sich etwa zweimal überholt haben. Spektral anschaulich wird das in *Bild 7* gezeigt. Die Differenz der Partialtide M2 und S2 beträgt etwa 1.0159 Grad/h, was einer Periodendauer von knapp 15 Tagen entspricht. Folglich lassen sich die beiden Frequenzen ab etwa 30 Tagen trennen.

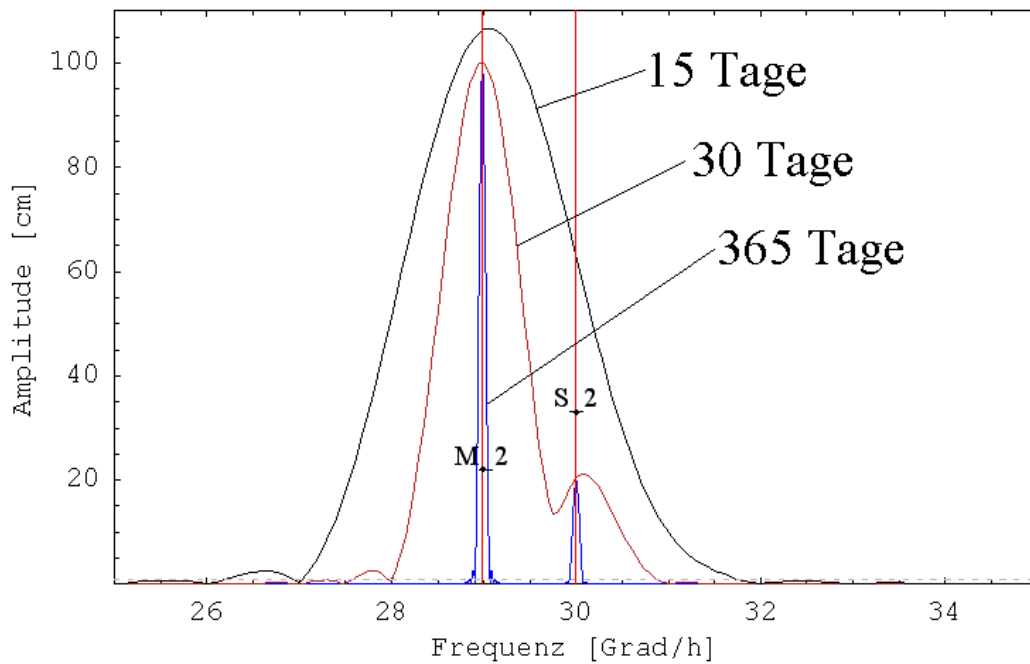


Bild 7 Einfluss der Länge der Zeitreihe auf die Frequenzauflösung. Hier sind beispielhaft zwei Partialtiden M2 und S2 dargestellt mit jeweils Zeitreihenlängen von 15, 30 und 365 Tagen

Einen weiteren Einfluss auf die Auflösbarkeit von Partialtiden hat die verwendete Fensterfunktion. Die Fensterfunktionen werden in Kapitel 4.4.2 näher vorgestellt. Sie kommen immer vor der Fouriertransformation zur Anwendung und haben gewisse Eigenschaften. Zu dem Thema Fensterfunktionen findet sich weiteres bei Butz (2003), Oppenheim et al. (2004) oder Antoniou (1993). Das Problem wird hier nur in Kürze dargestellt: Der Peak der fouriertransformierten Fensterfunktion hat eine gewisse Breite (3dB Bandbreite). Je breiter dieser Peak ist, desto schwerer ist das Auseinanderhalten von Partialtiden, da sich zwei sehr nahe, breite Peaks anfangen zu überlagern, während zwei schlankere Peaks noch voneinander zu trennen sind. Werden Funktionen mit geringerer 3dB-Bandbreite verwendet, so besitzen diese die unangenehme Eigenschaft, dass sie höhere Seitenstörungen (*sidelobes*) produzieren und auch keine 100% der Amplitude im Zentrum des Peaks liefern. Letztlich gilt es einen guten Kompromiss zu finden zwischen der Länge der Zeitreihe, der verwendeten Fensterfunktion und der spektralen Auflösung. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Partialtiden in Jahreszeitreihen gut detektiert werden können.

4.3.3 Intrinsische Annahmen

Intrinsische Annahmen sind Annahmen, die gemacht werden ohne sich dieser Annahmen bewusst sein zu müssen. Für den hier vorliegenden Fall bedeutet das folgendes: wird eine Jahreszeitreihe des Wasserstands in sein Spektrum zerlegt und Amplitude und Phase einiger spezieller Frequenzen (Partialtiden) bestimmt, so ist das Ergebnis ein Mittelwert von Amplituden und Phasen über den analysierten Zeitraum, in diesem Fall eines Jahres. Davon ausgehend, dass sich Amplituden und Phasen innerhalb eines Jahres ändern, gibt es keine Chance diese Änderungen mit Fouriermethoden zu ermitteln. Eine Verkürzung der Zeitreihe,

um die zeitliche Auflösung der Amplituden und Phasen der Partialtiden zu erhöhen, geht auf Kosten der spektralen Auflösung, wie in Kapitel 4.3.2 gezeigt. Wird der Analysezeitraum dennoch verringert und Amplituden und Phasen von Partialtiden bestimmt, so beginnen die Partialtiden selber in einem harmonischen Muster zu oszillieren. Diese Oszillationen können weitestgehend vermieden werden, wenn die Länge der Zeitreihe ein Jahr beträgt.

Weitere Annahmen werden bei der Wahl der schon erwähnten Fensterfunktion getroffen. Ihre Eigenschaften bzw. die Eigenschaften der fouriertransformierten Fensterfunktion können maßgeblich die Ergebnisse beeinflussen. Dieser Einflüsse sollte sich der Anwender stets bewusst sein, um die Ergebnisse richtig zu interpretieren. Die Behandlung der Eigenschaften von Fensterfunktionen ist sehr gut beschrieben in Butz (2003), Oppenheim et al. (2004) oder Antoniou (1993).

4.4 Bestimmung von Partialtiden

Die Erkenntnis, dass das Tidesignal zu einem Großteil aus Partialtiden aufgebaut ist, weckt die Begehrlichkeit diese Partialtiden zu bestimmen. Eine Partialtide ist nichts Weiteres als eine Sinusfunktion, die über Frequenz (f), Amplitude (A) und Phase (φ) beschrieben werden kann. Die Frequenzen sind durch die Astronomie vorgegeben (s. Anhang III). Amplitude und Phase müssen bestimmt werden. Die folgenden Absätze zeigen in Kürze drei unterschiedliche Methoden: das Regressionsverfahren zur Bestimmung von Partialtiden, die schnelle Fouriertransformation und eine spezielle Fouriertransformation.

Die weiter oben beschriebenen Bedingungen und Annahmen treffen für alle drei folgenden Verfahren zu und es gilt sie zu berücksichtigen.

4.4.1 Regressionsverfahren zur Bestimmung von Partialtiden

Das Regressionsverfahren besteht im Kern aus einer Annahme bzw. einer Modellfunktion. In diesem Fall liegt die Annahme zugrunde, dass sich eine Wasserstandszeitreihe in Partialtiden zerlegen lässt. Eine Partialtide lässt sich beschreiben aus

$$f_{\text{Partialtide}}(A, \omega, \varphi, t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

Da in Wasserstandszeitreihen viele Partialtiden vorkommen, wird die Überlagerung (Summe) verwendet. Die Modellfunktion lautet also:

$$f_{\text{Modell}} = \sum_i^N A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)$$

Die Bestimmung von A_i und φ_i erledigt ein Algorithmus zur Minimierung der Fehlerquadrate. Die abgeleiteten Phasen φ_i haben als Bezugszeitpunkt den ersten Punkt der Zeitreihe. Um Phasen abgeleitet aus verschiedenen Zeiträumen vergleichen zu können, empfiehlt sich ein Referenzzeitpunkt, auf den alle Phasen bezogen werden. Die relativen Phasen müssen



dann auf einen Referenzzeitpunkt umgerechnet werden. Der Referenzzeitpunkt sollte dabei nicht zu weit entfernt vom ersten Datenpunkt der Zeitreihe liegen oder aber, die Frequenz einer Partialtide, die für die Umrechnung benötigt wird, muss sehr genau angegeben werden. Wenn die Frequenz der M2-Partialtide mit nur sechs anstelle von zwölf Nachkommastellen angegeben wird, so entspricht der Phasenfehler etwas mehr als 2 Minuten pro Jahr.

Vor- und Nachteile

Die Analyse einer Zeitreihe der Länge eines Jahres mit einem Messwertabstand von 30 Minuten mit 97 Partialtiden dauert etwa 2-3 Minuten. Die Qualität der Analyse ist sehr stark abhängig von der Wahl der Modellfunktion. Enthält diese weniger Partialtiden, als in der Messzeitreihe tatsächlich enthalten, so kann es passieren, dass Energie von einer tatsächlich vorhandenen, aber nicht in der Modellfunktion aufgenommenen Partialtide, teilweise auf die Nächstliegende übergeht. Auch das spektral gesehene nahe Rauschen kann Energie auf eine analysierte Partialtide übertragen. Ebenso kann bei der Wahl von zu vielen Partialtiden in der Modellfunktion Energie aus dem umliegenden Rauschen detektiert werden. Eine Synthese aus den analysierten Partialtiden ergibt möglicherweise eine völlig unplausible synthetische Zeitreihe. Die Wahl der Modellfunktion ist daher eine sehr sensitive und zeitaufwendige Arbeit.

Der größte Nachteil dieses Verfahrens liegt im Schätzen der beteiligten Partialtiden: Vor Beginn der Analyse muss bekannt sein welche Partialtiden am Aufbau des Signals beteiligt sind, was *a priori* nicht bekannt ist. Des Weiteren ist die Größe des Rauschens in der Nähe von Partialtiden unbekannt und es gibt auch keine Anhaltspunkte, ob nicht etwa das Signal vom Rauschen stark überdeckt ist.

4.4.2 Schnelle Fouriertransformation (FFT)

Unter Zuhilfenahme der FFT können auch Amplituden und Phasen von Partialtiden bestimmt werden. Dazu wird die Wasserstandszeitreihe mit einer Fensterfunktion gewichtet und dann fouriertransformiert. Das Ergebnis ist eine Liste mit komplexen Zahlen. Die Projektion auf den Realteil (Betrag) entspricht der Amplitude, der Winkel zwischen Real- und Imaginärteil ist der Phasenwinkel. Folgende Fensterfunktionen wurden implementiert und untersucht:

- Rechteck
- Fejer
- Hanning
- Hamming
- Flat Top
- Gauss
- Kaiser-Bessel
- Blackman-Harris

Die Familie der Fensterfunktionen ist noch größer, hier wurden nur die gängigsten Funktionen verwendet. Als sehr gut hat sich die Hanning Funktion erwiesen. Sie ist ein optimaler



Kompromiss zwischen Dämpfung von Seitenstörungen, Auflösbarkeit bei den verwendeten Spektren und der Berechnungsgeschwindigkeit.

Ein weiteres Problem, das bei der Fouriertransformation auftreten kann, ist das so genannte Auslaufen des Spektrums (*leakage*), das auftritt wenn Zeitreihen nicht an Vielfachen der sie enthaltenden Frequenzen geschnitten werden. Da in den Wasserstandszeitreihen viele Frequenzen/Partialtiden enthalten und diese selber keine Vielfachen von einander sind, tritt das Auslaufen praktisch immer auf. Dieses Auslaufen führt zu einer Verfälschung des Spektrums und ist weiterhin abhängig von der Anzahl der Punkte einer Zeitreihe. Um dem Auslaufen des Spektrums entgegenzuwirken, gibt es neben dem Einsatz von Fensterfunktionen auch eine Technik mit Namen *zero padding* oder „Auffüllen von Nullen“. Das Auffüllen kann vom Benutzer kontrolliert werden. Es vergrößert die Genauigkeit, geht aber stark zu Lasten der Berechnungsgeschwindigkeit und des Arbeitsspeichers. Nähere Erläuterungen finden sich beispielsweise in Butz (2003).

Vor- und Nachteile

Die Analyse einer Zeitreihe der Länge eines Jahres mit einem Messwertabstand von 30 Minuten mit 97 Partialtiden dauert etwa 9 Sekunden, damit ist diese Methode die Schnellste. Ein weiterer großer Vorteil ist die Möglichkeit der Ausgabe des gesamten Spektrums. So ist sehr einfach erkennbar welche Partialtiden mit welcher Amplitude etwa beteiligt sind und wie groß das sie umgebende Rauschen ist.

Der größte Nachteil liegt im diskreten (aus Einzelpunkten bestehenden) Spektrum: Die diskreten Frequenzen aus der FFT stimmen in den seltensten Fällen mit den Analysefrequenzen der Partialtiden überein. Das kann dazu führen, dass Peaks nicht im Zentrum abgetastet werden (Abtastfehler) und damit die Analyse der Amplitude kleiner oder bestenfalls gleich der tatsächlichen Partialtide ist (s. *Bild 8*). Abhilfe kann hier das bereits erwähnte *zero padding* leisten. Die Zeitreihe wird mit Nullen künstlich verlängert (Null bedeutet keine Information), was einer Interpolation im Spektrum entspricht. Je mehr Nullen angefügt werden, desto mehr nähert sich die Transformation dem kontinuierlichen Spektrum. Ein kontinuierliches Spektrum würde bedeuten, dass keine Abtastfehler mehr auftreten. Es stellt das Optimum dar.

Ein weiteres Problem ist in *Bild 9* zu erkennen. Obwohl die beteiligten Partialtiden theoretisch zu trennen sind, zeigt sich hier eine Überlagerung, die nicht mehr zu trennen ist. Geschuldet ist diese mangelnde Auflösung den Eigenschaften der Hanning-Fensterfunktion, die bei der Wichtung zum Einsatz kommt. Andere Funktionen lösen zwar evtl. besser auf, geben dann jedoch die Amplitude nicht mehr einhundertprozentig wieder. Ferner erzeugen sie große Seitenstörungen (*sidelobes*), die das Spektrum verzerren und unerwünscht sind.

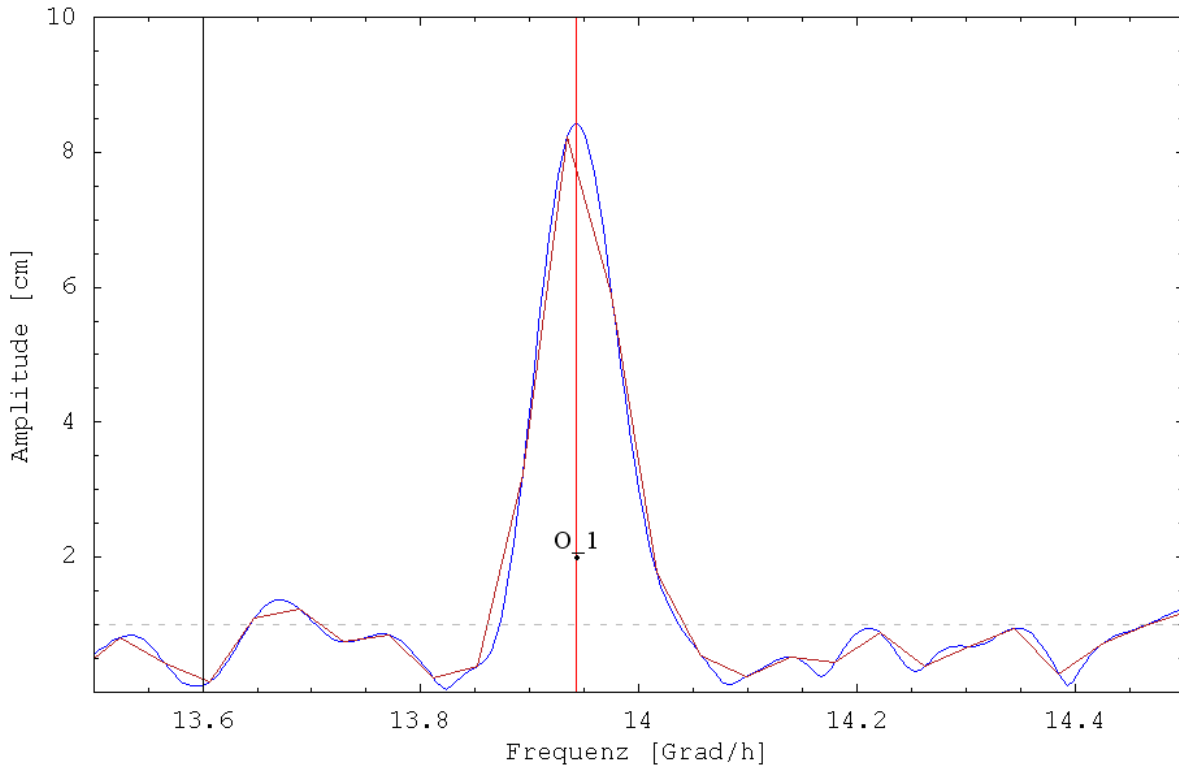


Bild 8 Die diskrete Abtastung des Wasserstandssignals erzeugt ein diskretes Spektrum(rot) im Vergleich zum kontinuierlichen Spektrum (blau). Die Punkte des Spektrums liegen selten an den Frequenzen der Partialtiden. Die Folge sind Abtastfehler.

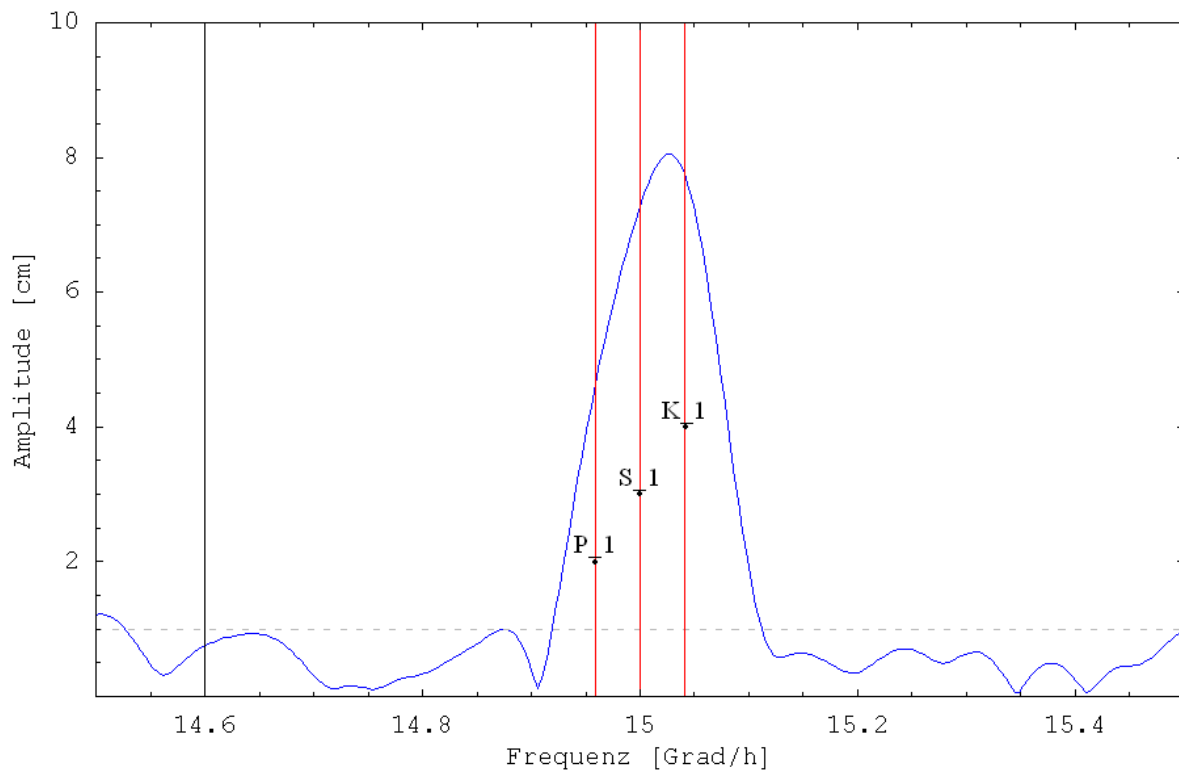


Bild 9 Durch große Nähe von Partialtiden und die zeitliche Begrenzung auf ein Jahr kommt es zu Überlagerung der Peaks der Partialtiden.

4.4.3 Spezielle FFT

Die Nachteile der FFT wiegen stark, können aber zum Teil aufgehoben werden. Die hier verwendete spezielle FFT minimiert den Abtastfehler (s. *Bild 8*) des zu analysierenden Peaks. Dieses geschieht durch Berechnung der einzufügenden Nullen (*adaptive zero padding*). Dadurch ist es möglich, die Frequenz unter Vorgaben optimal zu treffen. Der Fehler der Abtastung liegt im Mittel unter $3 \cdot 10^{-6}$ Grad/h. Die Berechnung geschieht für jede Partialtide, anschließend folgt die Analyse. Damit entspricht die Anzahl der Fouriertransformationen der Anzahl der Partialtiden, was die gesamte Berechnungsgeschwindigkeit stark verlangsamt.

Eine weitere Verbesserung liegt in der Auflösung. Durch sukzessives Entfernen schon analysierter Partialtiden aus der Zeitreihe werden die kleineren Partialtiden, die evtl. vorher überstrahlt wurden, sichtbar (s. *Bild 10*). Dieses Verfahren beginnt mit der Analyse und Elimination von Partialtiden der größten Amplitude und arbeitet sich weiter vor bis zu der kleinsten Amplitude. Dieser Vorgang benötigt jedoch viel Rechenzeit, da er hunderte von zeitaufwändigen Fouriertransformationen durchführen muss.

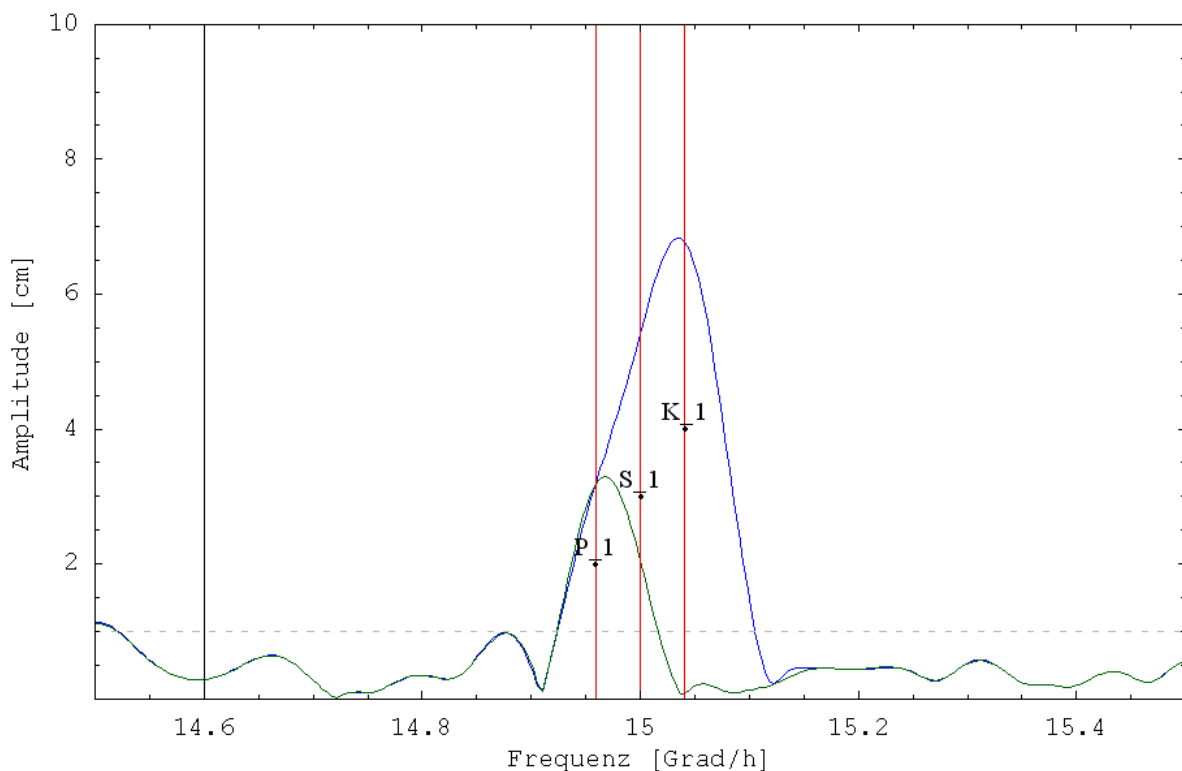


Bild 10 Durch sukzessives Entfernen der größten Partialtiden wird ein vorher nicht sichtbarer Peak (grün) sichtbar.

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass das Vorhandensein von weit entfernten Partialtiden auf die zu analysierende Partialtide kaum Einfluss hat. Eine Eigenschaft des Spektrums ist hier von Vorteil: Bei Jahreszeitreihen kann davon ausgegangen werden, dass sich Gruppen (tägliche, halbtägige, vierteltägige, ...) von Partialtiden in der Analyse nicht gegenseitig be-



einflussen bzw. die Beeinflussung vernachlässigbar ist. Folglich können Partialtiden, die nahe beieinander liegen, zu *clustern* gebündelt werden. Innerhalb eines *clusters* wird die beschriebene Elimination durchgeführt. Außerhalb eines *clusters* kann darauf verzichtet werden. Damit sinkt die gesamte Berechnungszeit wieder deutlich.

Vor- und Nachteile

Die Analyse einer Zeitreihe der Länge eines Jahres mit einem Messabstand von 30 Minuten mit 97 Partialtiden dauert etwa 2-3 Minuten und ist in etwa so schnell wie das Regressionsverfahren.

Die beschriebene Methode kann jedoch nicht das oben beschriebene Kriterium der Auflösung von Partialtiden umgehen (s. Kapitel 4.3.2). Die letztendliche Auflösbarkeit von Partialtiden unterliegt der Länge der Zeitreihe, der vorhandenen Partialtiden und der Wahl der Fensterfunktion. Hier wird lediglich versucht, die durch die Wichtung mit der Hanning-Funktion hervorgerufene Überlagerung aufzulösen, was jedoch auf Kosten der Genauigkeit geht. D.h., Partialtiden, die sich mit ihren Nachbarn überlagern aber theoretisch noch trennbar sind, können nur ungenau analysiert werden. Die Ungenauigkeit bezieht sich nur auf die Teilung, nicht auf die Summe der Partialtiden. Das Problem der spektralen Zerlegung wird an dieser Stelle uneindeutig.

Da dieses Verfahren die geringsten Schwächen besitzt und noch akzeptabel in der Rechenzeit ist, wird es für die weiteren Analysen eingesetzt.

4.5 Synthese aus Partialtiden

Nach der Analyse der Partialtiden können die Amplituden und Phasen miteinander verglichen und zeitliche Änderungen festgestellt werden (s. Anhang VI), was Aufschluss über den einen oder anderen Effekt geben kann. Im Pantheon der Partialtiden kann sich der Anwender leicht verzetteln und letztendlich interessiert nur die Änderung von Kennwerten des Wasserstands. Also werden die Partialtiden zu einer synthetischen Wasserstandszeitreihe zusammengesetzt.

Eine erste Kontrolle, ob die Analyse plausible Werte geliefert hat, zeigt der Vergleich zwischen der synthetischen und gemessenen Wasserstandszeitreihe. Ist die synthetische Zeitreihe vollständig anders als die gemessene, ist offensichtlich etwas falsch gelaufen. Vor dem Vergleichen der beiden Zeitreihen, sollte der Mittelwert, der bei allen drei Methoden zur Partialtidenbestimmung verloren gegangen ist, von der gemessenen Zeitreihe abgezogen werden, damit beide auf gleichem Niveau liegen. Noch besser wird die Vergleichbarkeit, wenn das *stetige Mittelwasser* aus der gemessenen Zeitreihe herausgerechnet wird (s. Anhang VIII). Beispiele für den Vergleich beider Zeitreihen zeigen *Bild 11* und *Bild 12*. Ein Schema zum Interpretieren und vergleichen der Kennwerte ist im Anhang XI zu sehen.

Bei dem Vergleich kommt die intrinsische Annahme (s. Kapitel 4.3.3) wieder zum Tragen: Es handelt sich um das mittlere jährliche Tidesignal (s. rote Kurve in *Bild 11* und *Bild 12*). Der Vergleich zur Messung kann beträchtliche Abweichungen zeigen.

Die Tatsache, dass es Zeiträume gibt, die nicht dem mittleren Tidesignal entsprechen zeigt, dass die Partialtiden auch in zeitlich höherer Auflösung schwanken.

StPauli

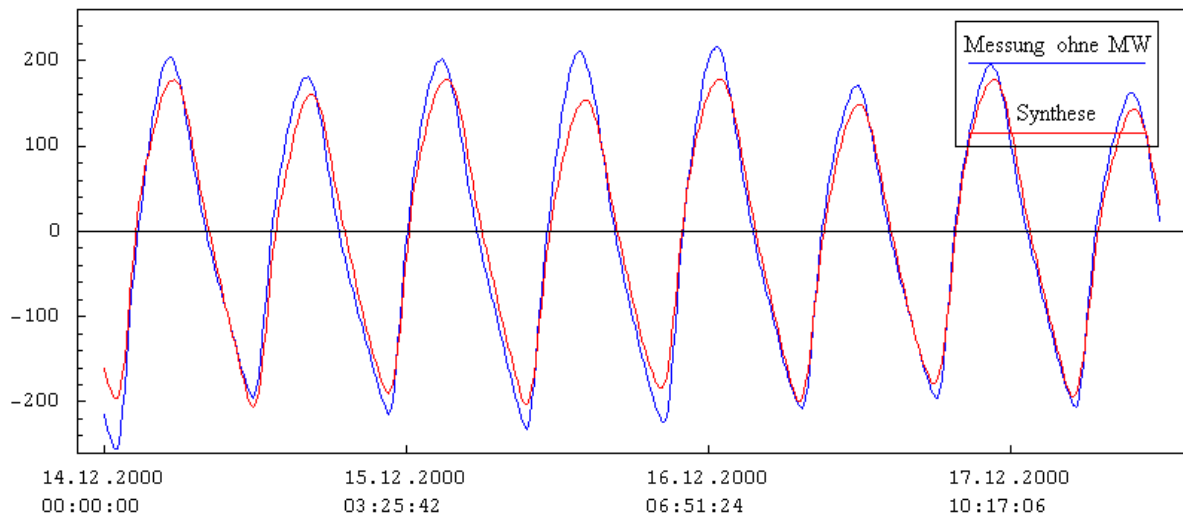


Bild 11 Vergleich zwischen Messsignal ohne stetiges Mittelwasser und Synthesesignal aus Partialtiden am Pegel St.Pauli. Das Messsignal kann beträchtlich vom mittleren Synthesesignal abweichen.

StPauli

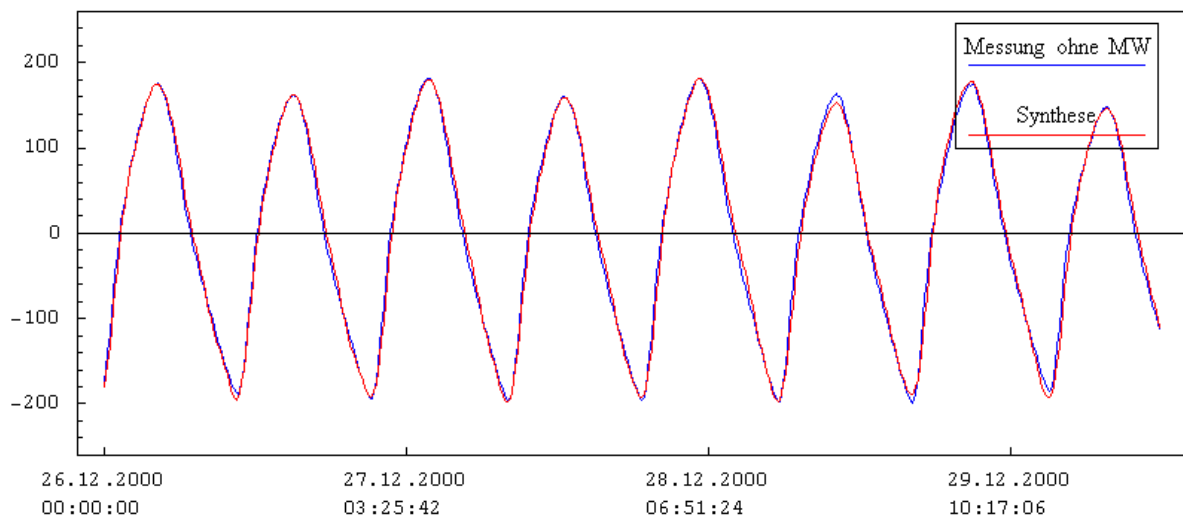


Bild 12 Vergleich zwischen Messsignal ohne stetiges Mittelwasser und Synthesesignal aus Partialtiden am Pegel St.Pauli. Sehr gute Übereinstimmung zwischen Synthesesignal und Messung. Dieser Zeitraum entspricht dem mittleren Schwingungszustand.

Zusätzlich werden noch die Kennwerte (Th_w , Tn_w , Th_b) aus der gemessenen und synthetischen Zeitreihe ermittelt und verglichen. Bei dem Vergleich fällt auf, dass der Tidehub nicht ganz getroffen wird (s. Bild 13), was u.a. an der Nichtberücksichtigung der Partialtiden kleiner einem Zentimeter liegt. Theoretisch existieren unendlich viele Partialtiden. Für die Analyse wurden aber nur die Partialtiden verwendet, die eine Amplitude größer gleich einem Zentimeter besitzen und deren Frequenzen > 13 Grad/h sind.

Des Weiteren verbleibt ein meteorologisches Restrauschen. Zwar sind die meteorologischen Störungen weitestgehend herausgefiltert, da die Meteorologie aber auf allen Frequenzen wirkt, so bleiben die Störungen an den Frequenzen der Partialtiden.

Der unterschiedliche Tidehub zwischen gemessener und synthetischer Zeitreihe lässt sich damit zweierlei erklären: Es liegen viele kleine Partialtiden vor, die nicht mit analysiert werden oder aber es handelt sich um Reste meteorologischen Einflusses. Hier liegt die Grauzone der Analyse.

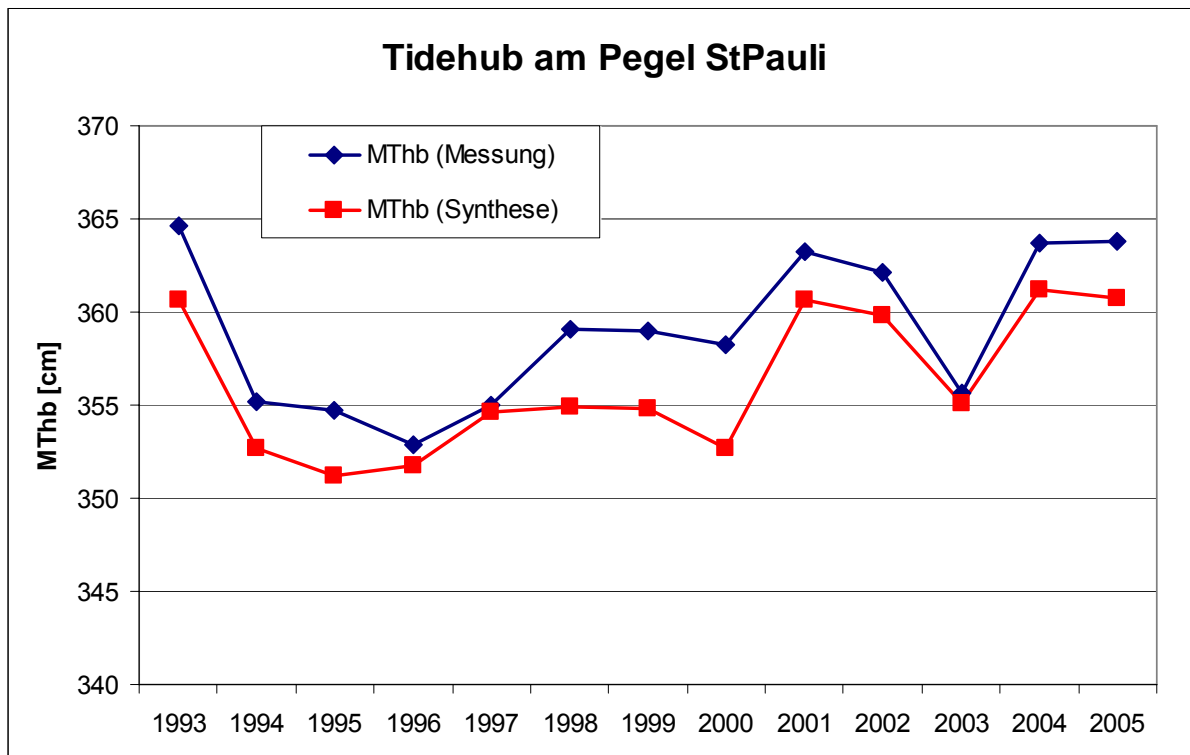


Bild 13 Vergleich des Tidehubs zwischen Synthese und Messung.

Für die Interpretation ist wichtig, dass ein Großteil des Einflusses der Meteorologie oder generell äußerer Einflüsse weggefiltert wurde.

4.6 Ergebnisse des Partialtiden- (PT-)Verfahrens

Für die nachfolgenden Pegel entlang der Elbe wurden die signifikanten Partialtiden (Amplitude > 1 cm, Frequenz > 13 Grad/h) analysiert (ein Beispielergebnis für den Pegel St.Pauli ist im Anhang V dokumentiert). Auf die Veränderung der Partialtiden selber soll hier nicht weiter eingegangen werden. Vielmehr werden die analysierten Partialtiden wieder zu einem synthetischen Signal zusammengesetzt, anschließend die Scheitelwerte bestimmt und über ein Kalenderjahr gemittelt. Die Entwicklung der Kennwerte aus der synthetischen Zeitreihe zeigen *Bild 14 bis Bild 16*.

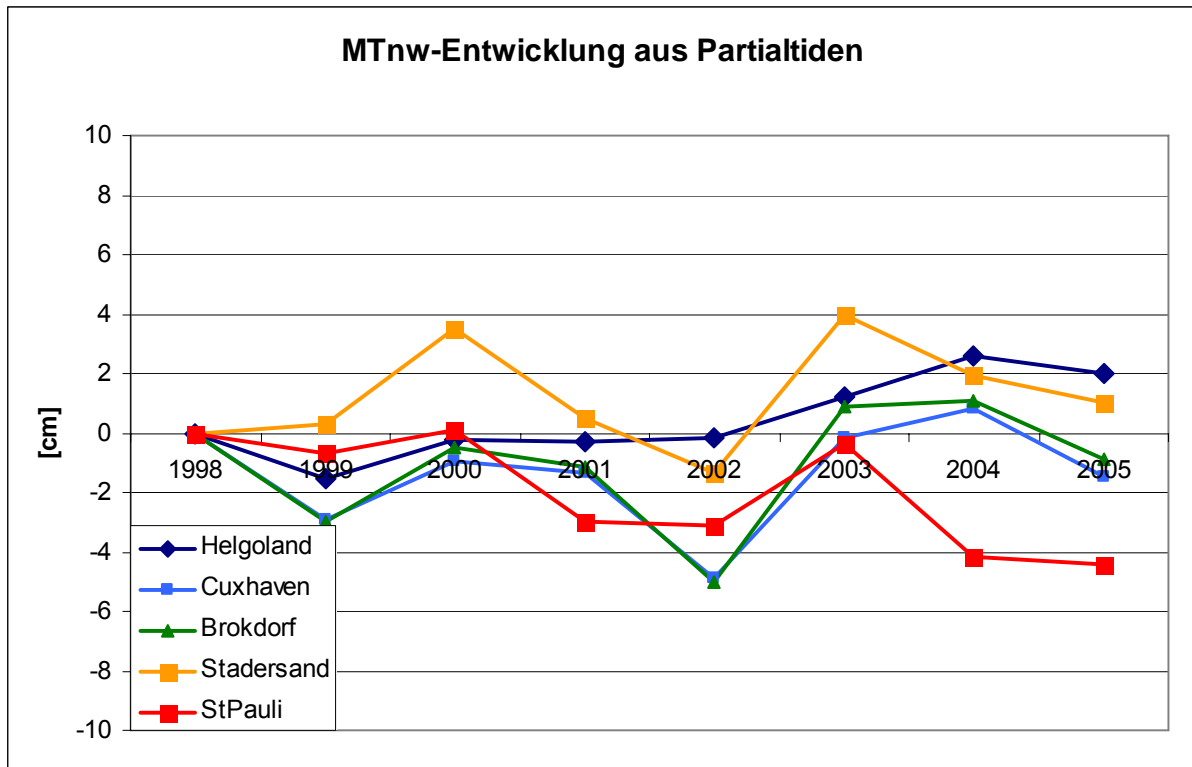


Bild 14 Tideniedrigwasserentwicklung aus Partialtiden seit 1998

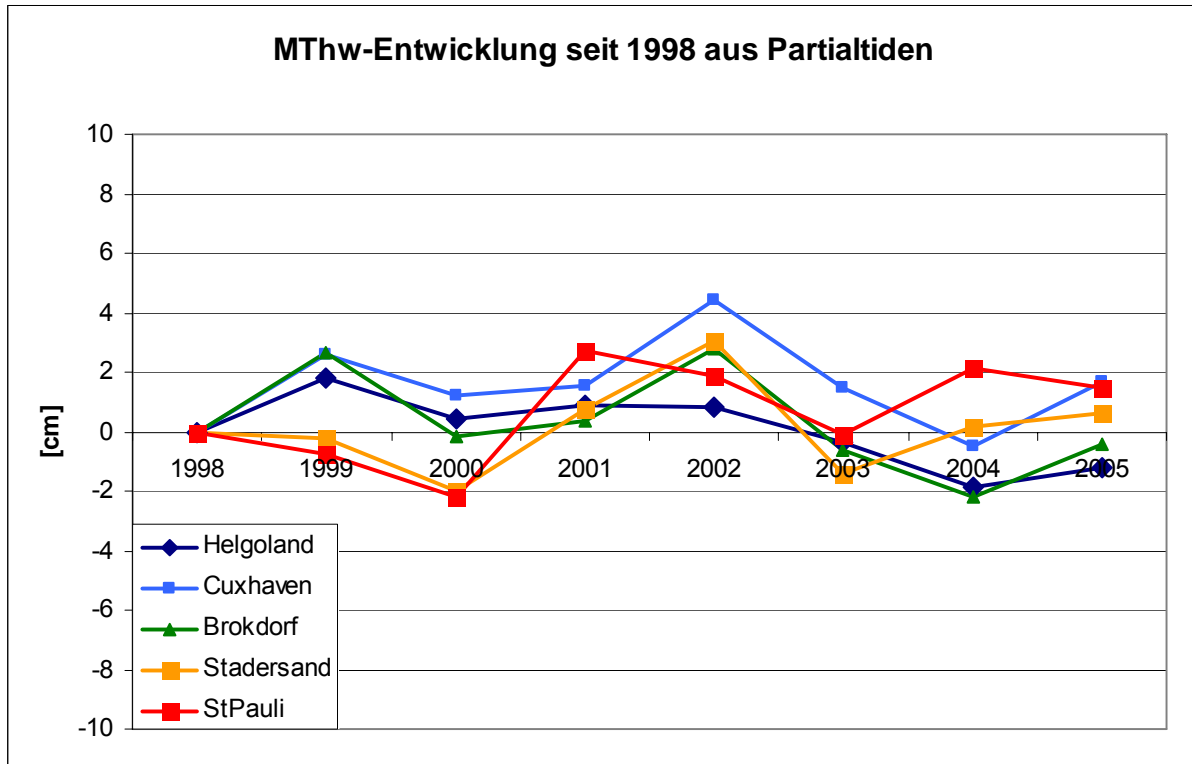


Bild 15 Tidehochwasserentwicklung aus Partialtiden seit 1998

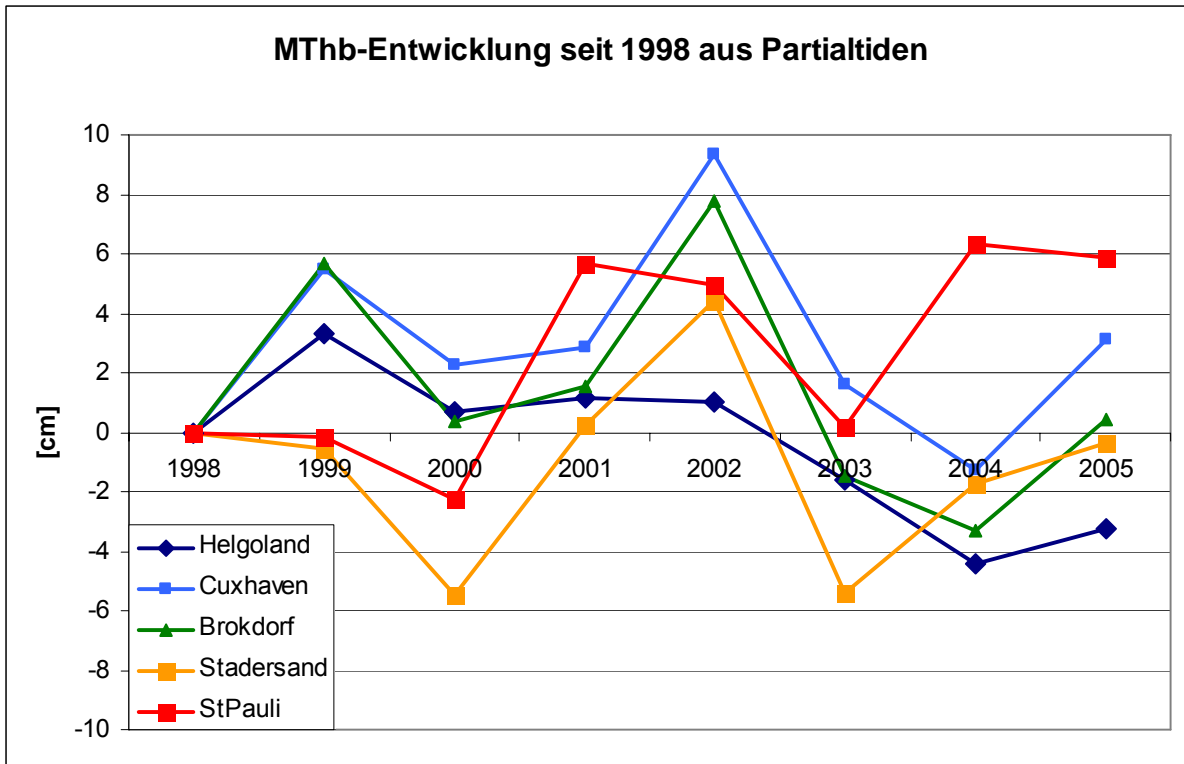


Bild 16 Tidehubentwicklung aus Partialtiden seit 1998

4.7 Interpretation der Ergebnisse

Auf den ersten Blick sind keine klaren Signale oder Trends erkennbar. Die Kennwerte springen um den Nullpunkt. Lediglich am Pegel Helgoland ist eine leichte Abnahme des Tidehubs und damit verbunden eine Abnahme des Tidehochwassers und eine Zunahme des Tideniedrigwassers auszumachen. Eine kleine Auffälligkeit für die anderen Pegel zeigt das Jahr 2002. In diesem Jahr steigt der Tidehub an (das Tideniedrigwasser nimmt leicht ab; das Tidehochwasser leicht zu), jedoch schon im Jahr 2003 fällt der Tidehub wieder ab. Zurückzuführen ist der kurzzeitige Anstieg wohl auf den sehr hohen mittleren Oberwasserzufluss in diesem Jahr (s. Anhang X).

Aus den Abbildungen kann die Information gezogen werden, dass es kein deutliches Signal gibt oder im Umkehrschluss: Wenn es ein Signal gibt und dieses mit einem natürlichen Rauschen beaufschlagt ist, so ist es kleiner als das Rauschen.

Die Standardabweichung - als ein Maß des Rauschens - der Werte ab dem Kalenderjahr 2000 liegt für Tideniedrigwasser und Tidehochwasser bei etwa 2 cm, entsprechend für den Tidehub bei ca. 4 cm. Da die Standardabweichung jedoch nur über sechs Punkte gebildet wurde, kann sie nur die Größenordnung angeben; sie ist keinesfalls belastbar.

4.8 Das PT-Verfahren unter besonderen Umständen

4.8.1 Einfluss des Oberwasserzuflusses

Wie verhält sich das PT-Verfahren bei Pegeln, die stark vom Oberwasserzufluss geprägt sind, wie die Pegel Geesthacht, Zollenspieker, Over und Bunthaus?

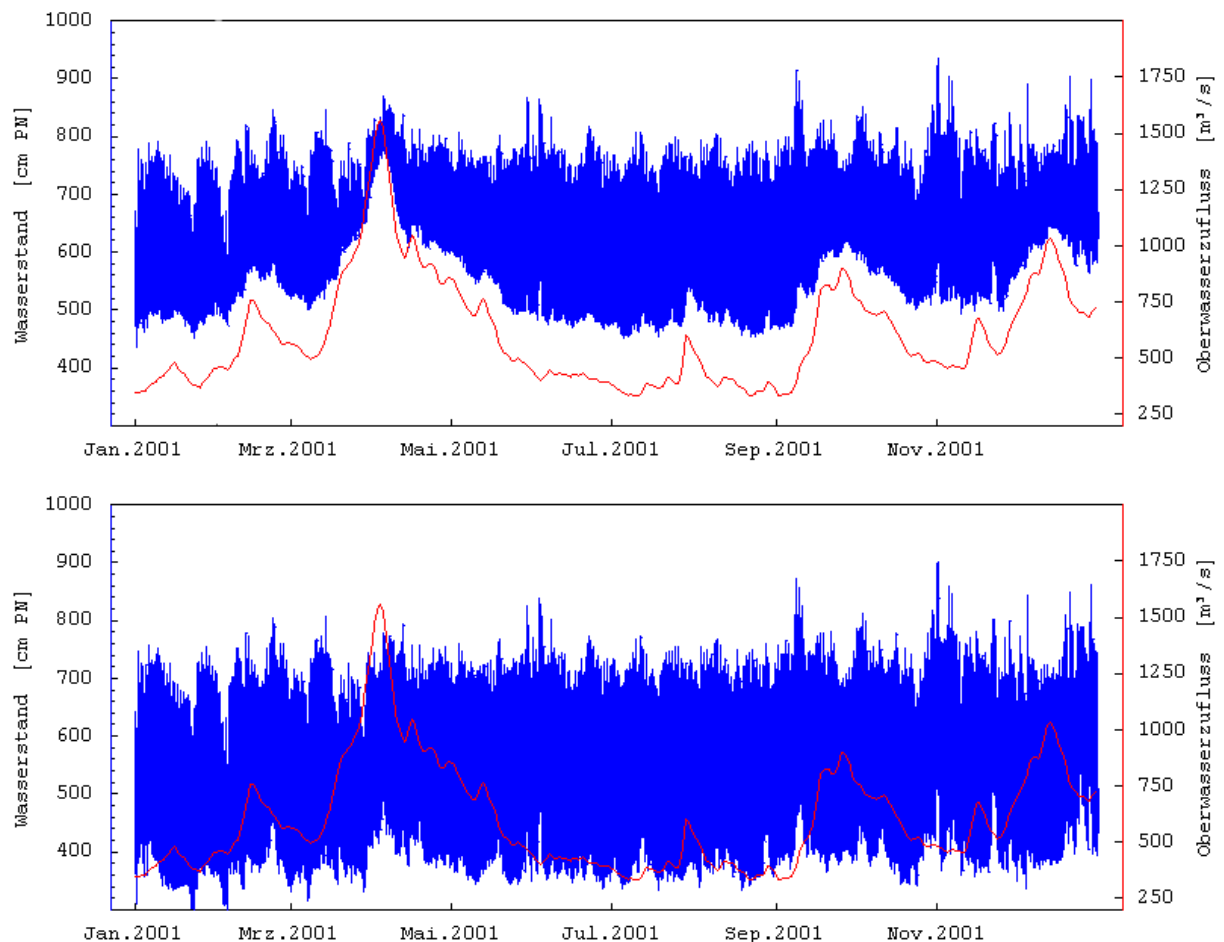


Bild 17 Einfluss des Oberwasserzuflusses NeuDarchau auf den Wasserstand bei Geesthacht (oben) und Bunthaus (unten)

Der Pegel Geesthacht weist die stärkste Beeinflussung durch den Oberwasserzufluss aus. Sehr gut erkennbar ist die Ganglinie der Abflussmessstation NeuDarchau in der Zeitreihe des Pegels Geesthacht. Am Pegel Bunthaus ist die Ganglinie NeuDarchaus nur noch sehr undeutlich zu erkennen (s. Bild 17), der Pegel Bunthaus ist deutlich weniger vom Oberwasserzufluss geprägt.

Die Partialtiden eines Jahres geben den mittleren Zustand wieder. Der Oberwasserzufluss variiert jedoch innerhalb eines Jahres stark. Wie fällt der Vergleich zwischen dem synthetischen und dem gemessenen Wasserstand aus? Diesen Vergleich zeigen Bild 18 bis Bild 20 für den Pegel Geesthacht bzw. Bild 21 bis Bild 23 für den Pegel Bunthaus.



Geesthacht

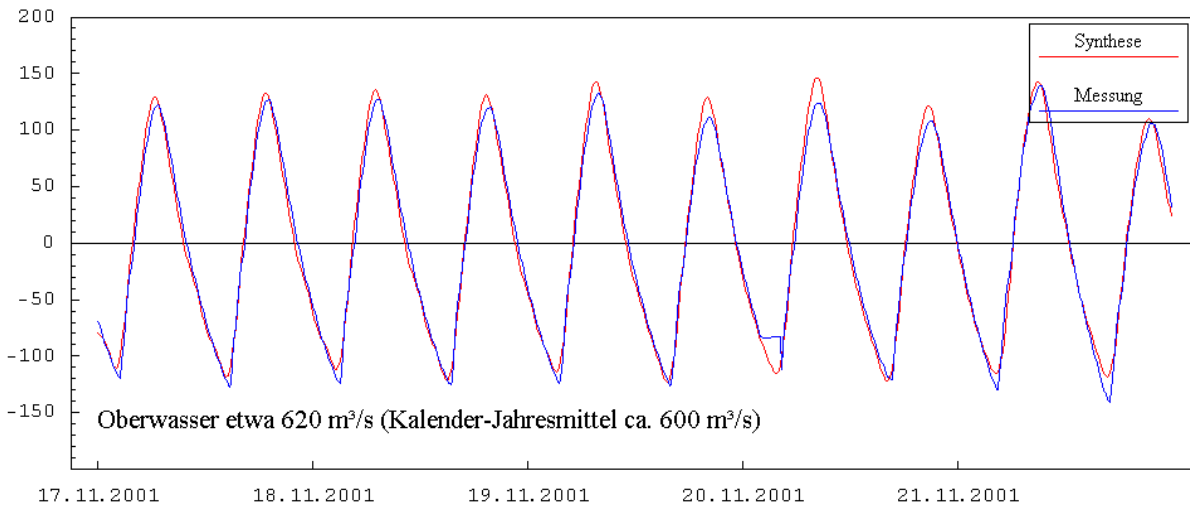


Bild 18 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei mittleren Oberwasserzuflüssen

Geesthacht

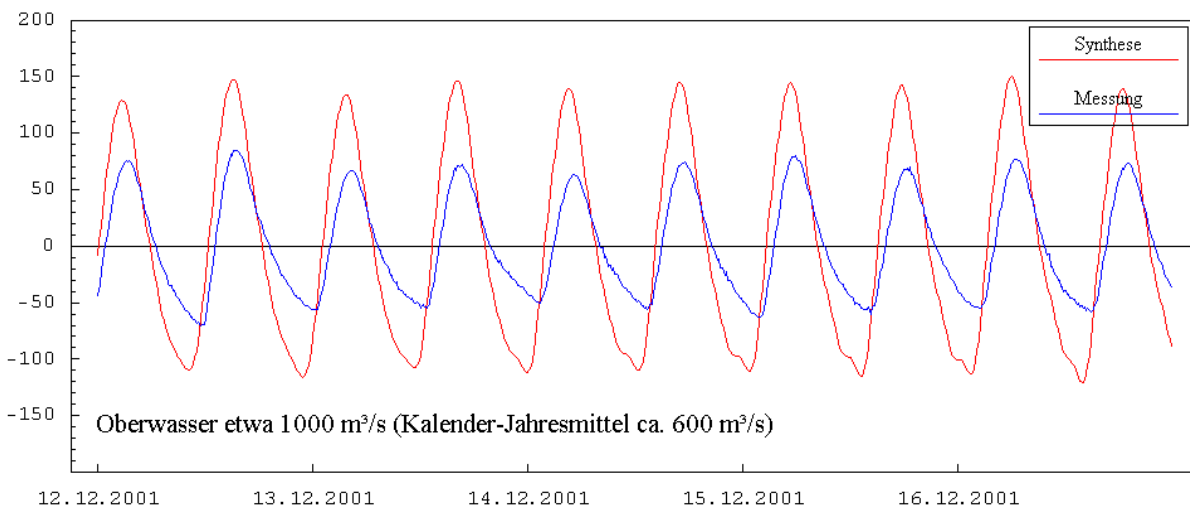


Bild 19 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei hohen Oberwasserzuflüssen

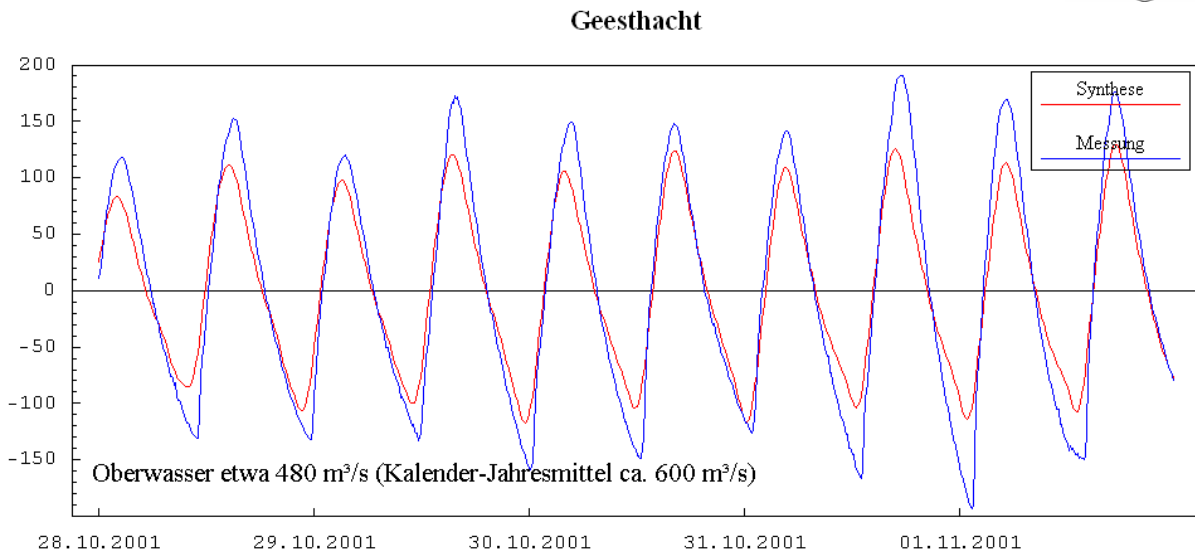


Bild 20 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei niedrigen Oberwasserzuflüssen

Sehr gut erkennbar ist die höhere Dämpfung des über dem Jahresmittel liegenden Oberwasserzuflusses: Der Tidehub ist deutlich geringer als der des synthetischen Wasserstands. Das Tideniedrigwasser liegt höher, das Tidehochwasser entsprechend niedriger. Umgekehrt ist es bei dem unter dem Jahresmittel liegenden Oberwasserzuflusses. Der Tidehub ist aufgrund der fehlenden Dämpfung höher als im Mittel. Das Tideniedrigwasser entsprechend geringer, das Tidehochwasser liegt über dem synthetischen Wasserstand.

Ein Umstand wird hier sehr deutlich: Bei stark oberwasserabhängigen Pegeln entspricht der synthetische Wasserstand nicht unbedingt dem gemessenen Wasserstand. Der synthetische Wasserstand beschreibt lediglich die mittlere Dynamik des Jahres und kann bei starken Variationen nicht als Vorhersage von Einzelwerten dienen.

Wie weit sich dieser Oberwassereffekt fortsetzt, zeigen die folgenden Abbildungen (s. *Bild 21* bis *Bild 23*) am Pegel Bunthaus. Hier ist die Abweichung des synthetischen Wasserstands deutlich geringer als am Pegel Geesthacht.



Bunthaus

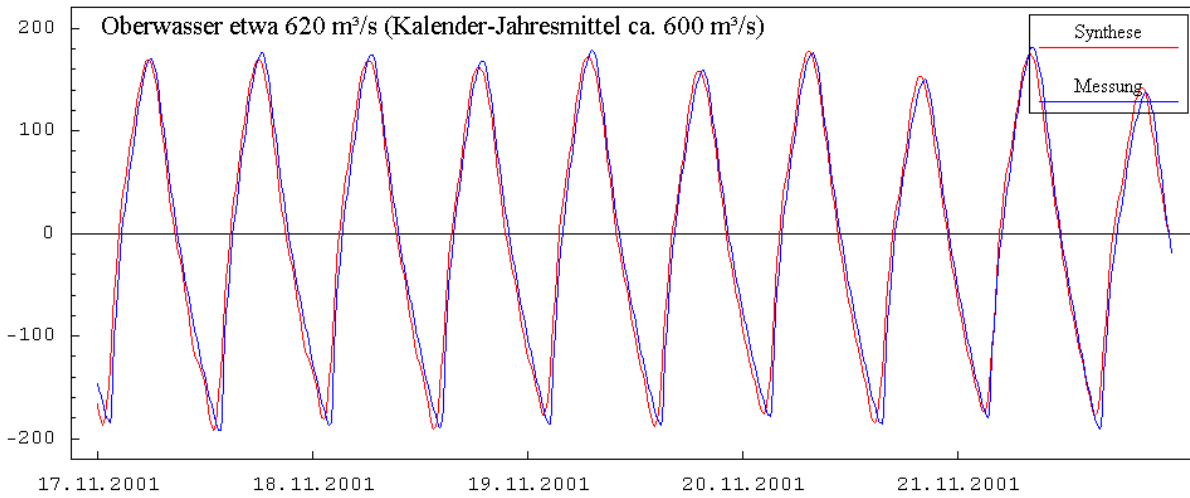


Bild 21 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei mittleren Oberwasserzuflüssen

Bunthaus

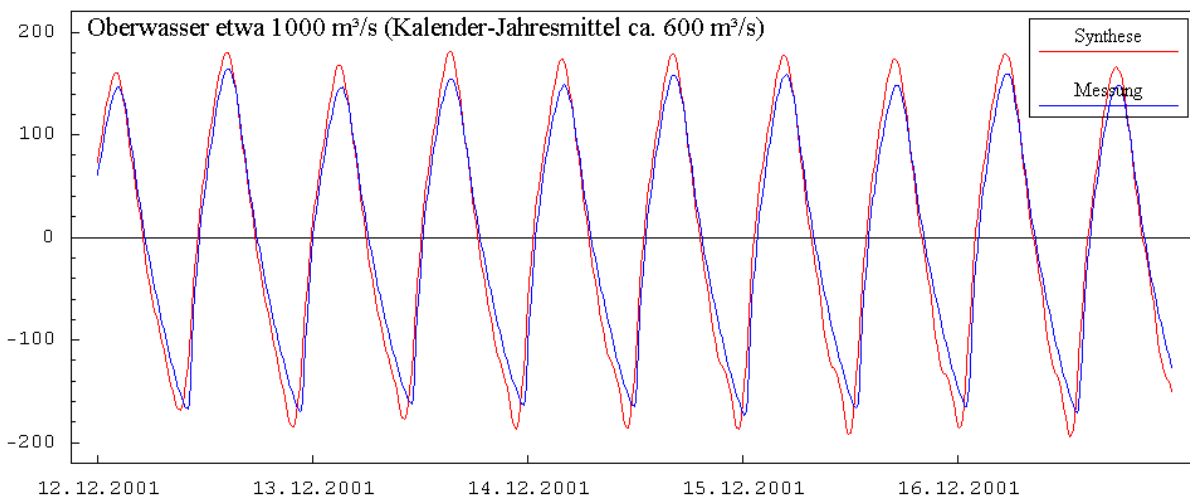


Bild 22 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei hohen Oberwasserzuflüssen

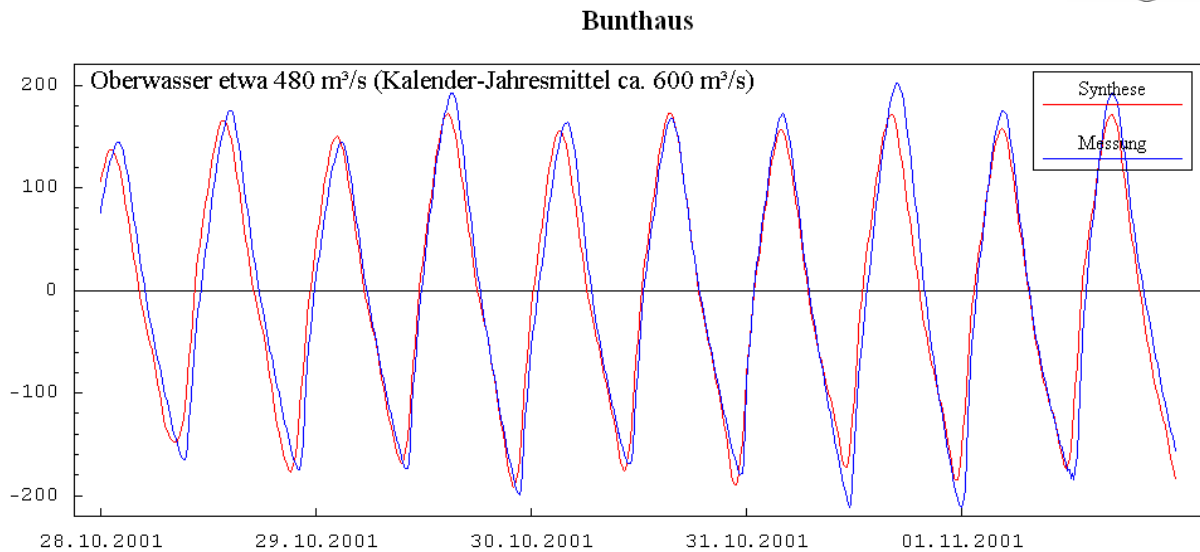


Bild 23 Messung ohne stetiges Mittelwasser und synthetischer Wasserstand bei niedrigen Oberwasserzuflüssen

Fazit

Der synthetische Wasserstand entspricht einem mittleren dynamischen Zustand. Ist der Oberwassereinfluss gering, entspricht er etwa dem gemessenen Wasserstand und zwar unabhängig vom Oberwasserzufluss. Spielt der Oberwassereinfluss eine größere Rolle, so ist der synthetische Wasserstand nicht vergleichbar mit dem gemessenen Wasserstand. Lediglich bei mittleren Oberwasserverhältnissen lassen sich beide Signale direkt vergleichen.

4.8.2 Trendbehaftete Zeitreihen

Trends können allgemein als sehr lange Wellen aufgefasst werden. Ein linearer Trend wird schon mit wenig Fourierkoeffizienten zu Beginn des Spektrums erreicht (s. *Bild 24*).

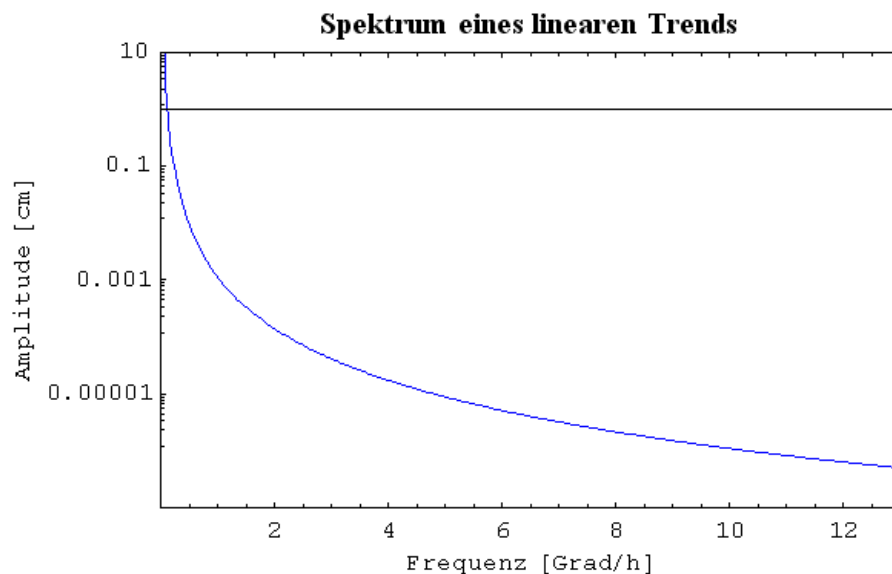


Bild 24 Amplitudenspektrum eines linearen Trends mit -50 cm / Jahr

Damit wird deutlich, dass Trends in einer Zeitreihe bei der Partialtidenbestimmung einen vernachlässigbaren Einfluss haben: Die Amplitudengröße des Trends ab einer Frequenz von 13 Grad/h ist kleiner als 10^{-6} cm. Trends können nur zu Beginn des Spektrums dieses verändern. Da die Frequenzen der hier verwendeten Partialtiden einer Jahreszeitreihe alle über 13 Grad/h liegen, ist im Wesentlichen keine Beeinflussung bemerkbar.

4.8.3 Nodaltide

Um die etwa 19 jährige Modulation des Tidehubs durch die Nodaltide spektral aufzulösen, bedarf es einer Zeitreihe von theoretisch mindestens $2 \cdot 19$ Jahren (abgeleitet aus dem Nyquist-Shannon-Kriterium) oder aber praktisch - bei Einsatz der Hanning-Fensterfunktion - von 43 Jahren. Danach erscheint auch die Modulation als ein *Peak* im Spektrum und kann sofort abgelesen werden. Ein Beispiel mit einem künstlich erzeugten Pegel zeigt den Fall anschaulich (s. *Bild 25*).

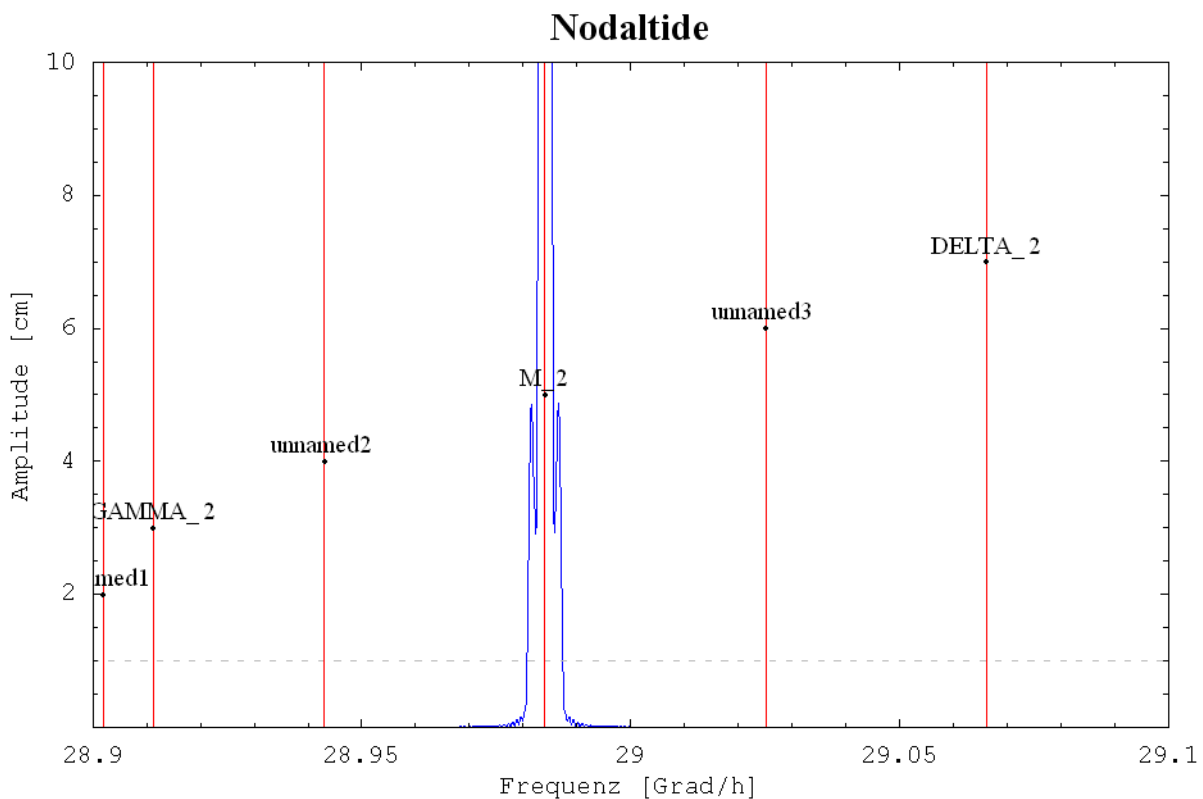


Bild 25 Spektrum einer künstlich erzeugten Zeitreihe (50 Jahre) mit einer Nodalvariation von ± 10 cm der M2. Gerade erkennbar sind die zwei Seitenpeaks neben der M2 Partialtide. Diese Seitenpeaks modulieren die M2.

Was passiert aber, wenn die Länge der Zeitreihe zu gering ist für die Auflösung der Nodaltide? Die Analyse der M2 in jährlichen Zeitreihen zeigt *Bild 26*.

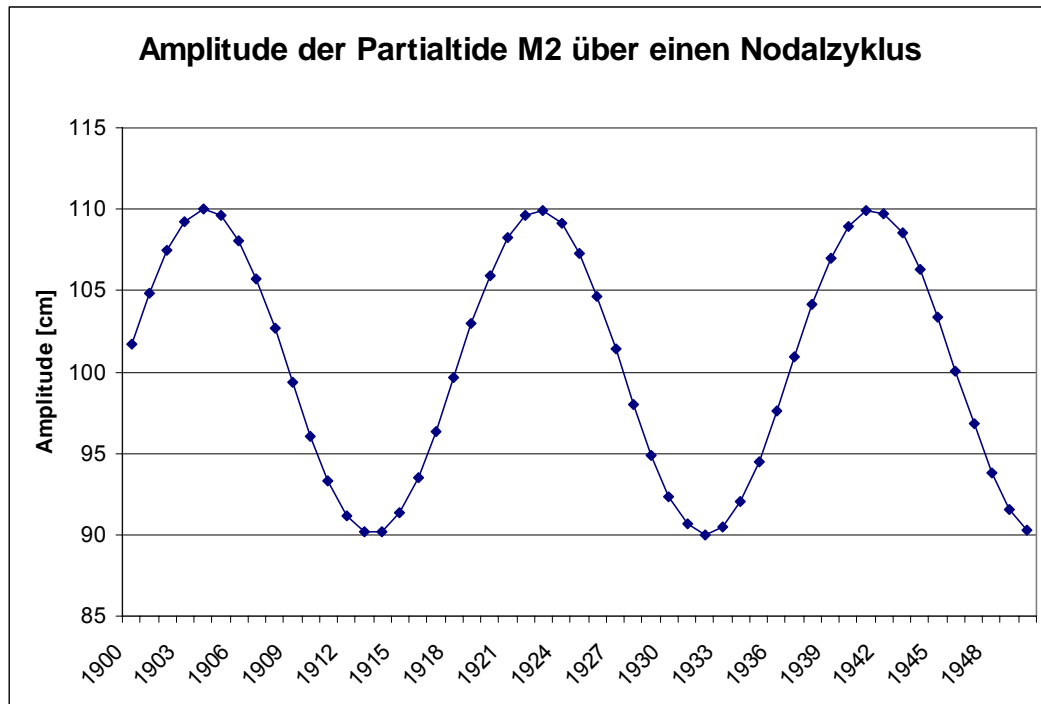


Bild 26 Verlauf der M2-Partialtide bei der Analyse vieler einjähriger Zeitreihen eines theoretischen nodalbeeinflussten Signals

Durch die Unmöglichkeit der Auflösung der Nodalperiode als eigenständige Peaks schwankt bei der Analyse von einjährigen Zeitreihen nunmehr die Partialtide selber.

Das lässt den folgenden Umkehrschluss zu. Ein Schwanken von Partialtiden kann folgendes bedeuten: Folgt die Schwankung einem harmonischen Muster (wie in *Bild 26*), kann davon ausgegangen werden, dass noch weitere periodische Phänomene vorhanden sind. Folgt sie keinem erkennbaren Muster, so ist ein stochastischer oder anthropogener Anteil vorhanden oder aber das Muster ist zu komplex, um es als solches zu erkennen. Um entscheiden zu können, ob ein Muster zugrunde liegt oder ein stochastischer oder anthropogener Prozess bedarf es mehr Informationen in Form einer längeren Zeitreihe.

4.9 Zusammenfassung

Wie eingangs dargestellt, besteht das Wasserstandsmesssignal aus einem stochastischen und einem harmonischen Anteil. Mit der Partialtidenanalyse wird lediglich der harmonische Teil betrachtet. Dieses zeigt als Beispiel (s. *Bild 14 - Bild 16*) für den Pegel St.Pauli eine Zunahme des Tidehubs von etwa 6 cm (von 1998 bis 2005). Entsprechend für das Tideniedrigwasser eine Abnahme von 4 cm und eine Erhöhung des Tidehochwassers von 2 cm. Ein deutliches Signal im Sinne eines starken Trends oder eines Sprungs ist nicht zu erkennen. Der mittlere jährliche Tidehub schwankt vielmehr etwa im Bereich von 4 cm. Um ein klares Signal detektieren zu können, muss es deutlich über dieser Schwankung liegen.

Prinzipiell sollten die Partialtiden oder Kennwerte eines Pegels mit den Partialtiden bzw. Kennwerten eines Referenzpegels verglichen und u.U. auch bereinigt werden. In diesem Fall liegen jedoch zu wenige Punkte (Jahre) vor, als dass eine Korrelation und damit eine Über-



tragungsfunktionen und eine Bereinigung durchgeführt werden kann. Ein Vergleich des Tidehubs am Pegel Helgoland mit dem Tidehub am Pegel St.Pauli abgeleitet aus dem synthetischen Wasserstand, lässt noch keine Ordnung erkennen (s. *Bild 27*). Folglich bleibt der Vergleich auf Einzeljahre beschränkt, wohl wissend, dass noch natürliche Schwankungen auf dem Signal liegen.

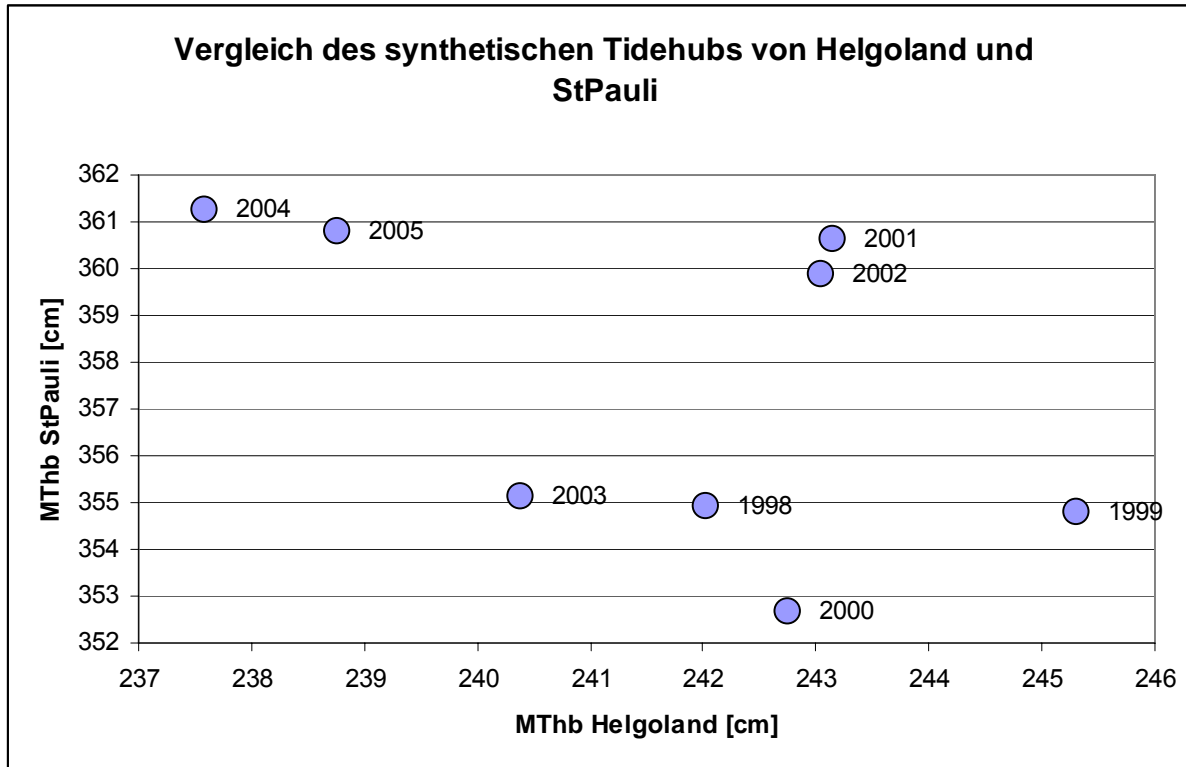


Bild 27 Scatterplot des mittleren jährlichen Tidehubs zwischen St.Pauli und Helgoland

Der Vorteil des PT-Verfahrens liegt im Verringern des stochastischen Anteils. Weiterhin spielen Trends keine Rolle. Langfristige harmonische Zyklen, wie beispielsweise die Nodaltide, lassen sich noch nicht auflösen. Ebenso wenig lässt sich eine gesicherte Statistik mit diesen kurzen Zeitreihen betreiben.

5 Statistische Analyse

5.1 Einleitung

Bei der folgenden Analyse geht es darum, die äußeren Einflüsse, wie das Tidesignal aus der Nordsee und den Oberwasserzufluss, aus den Messungen herauszurechnen. Über ein Regressionsverfahren werden Koeffizienten einer Modellfunktion bestimmt, die den Einfluss der Randwerte auf den Wasserstand bzw. die Kennwerte widerspiegeln. Anschließend wird mit dieser Funktion die Messung um den Einfluss der Randwerte bereinigt, so dass die Messungen nunmehr in der Hauptsache von lokalen Veränderungen geprägt sind.

Das Verfahren wird angewendet auf die Kennwerte Tideniedrig- und Tidehochwasser sowie auf den Tidehub.

5.2 Voraussetzungen

Aus dem Aufbau des gemessenen Signals des Wasserstands (s. Kapitel 3.1) ist bekannt, dass es sich in einen weitgehend harmonischen und einen stochastischen Teil (*stetiges Mittelwasser*) trennen lässt. Über einen Tiefpassfilter wird das *stetige Mittelwasser* entfernt (s. Anhang II). Dieser Teil wird separat in der Mittelwasseranalyse (s. Kapitel 6) betrachtet. Im Folgenden wird nur der Teil > 13 Grad/h verwendet. Voraussetzung für diese Trennung ist eine hoch aufgelöste Wasserstandszeitreihe (s. Kapitel 4.1).

5.3 Messbare Phänomene

Zur Veranschaulichung soll im Folgenden die Abhängigkeit eines Kennwertes von diversen Größen dargestellt werden. Beispielhaft wird der Kennwert Tidehub verwendet.

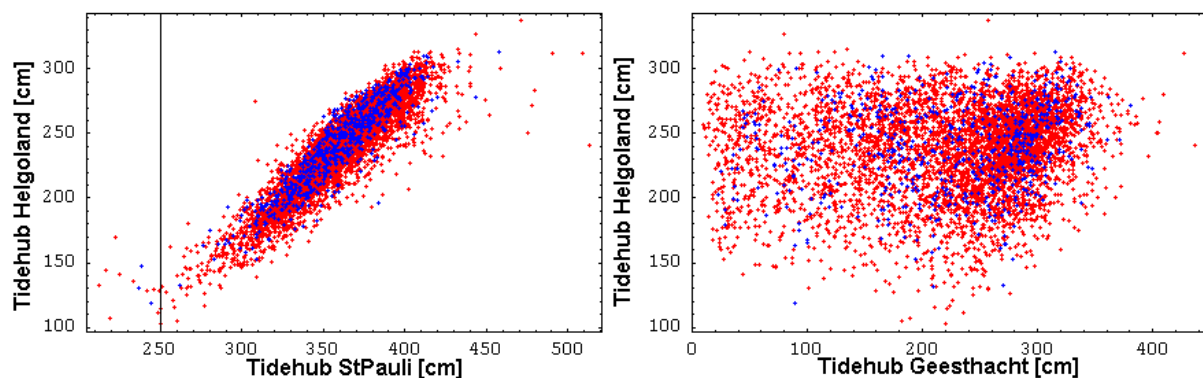


Bild 28 Scatterplot vom Tidehub St.Pauli (links) / Geesthacht (rechts) zum Tidehub Helgoland

Das Bild 28 zeigt den Tidehub am Pegel Helgoland im Vergleich zum Tidehub am Pegel St.Pauli (links) bzw. am Pegel Geesthacht (rechts). In der linken Abbildung ist ganz deutlich ein linearer Zusammenhang erkennbar, während die rechte Abbildung überhaupt keinen Zusammenhang darzustellen scheint. Die blauen Punkte liegen im Kalenderjahr 1998 wäh-

rend die roten Punkte die Kalenderjahre von 1999 – 2005 repräsentieren. Die linke Abbildung erscheint im Einklang mit dem physikalischen Bild: Mehr Energie/Tidehub in der Nordsee bedeutet (linear) mehr Energie/Tidehub in St.Pauli. Für die rechte Abbildung, in der kein linearer Zusammenhang erkennbar ist, kann das nur bedeuten, dass dieser durch einen anderen Prozess, der viel stärker den Tidehub beeinflusst, überdeckt wird.

Am Pegel Geesthacht ist ein großer Oberwassereinfluss sehr wahrscheinlich. Wie in Kapitel 3.1 dargelegt, ist zu erwarten, dass bei hohem Oberwasserzufluss der Tidehub sinkt. Die Messungen belegen dieses Phänomen sehr deutlich (s. *Bild 29*).

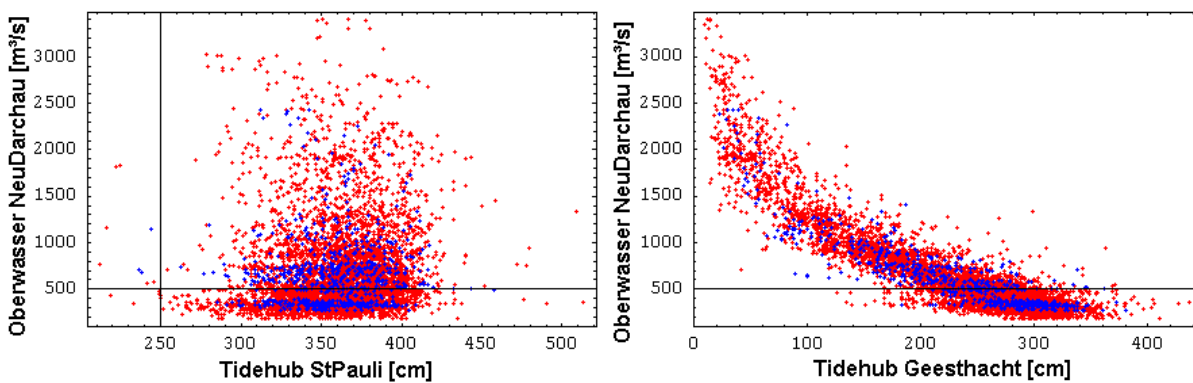


Bild 29 Scatterplot vom Tidehub St.Pauli (links) / Geesthacht (rechts) zum Oberwasserzufluss

Da die Punkte nicht auf einer Geraden liegen ist dieser Einfluss nicht linear. Im linken Bild ist jedoch kein Einfluss des Oberwasserzuflusses erkennbar. Möglicherweise ist er aber nur durch die Dominanz des Tidehubs von Helgoland verdeckt.

Viel deutlicher darstellbar ist die beschriebene Abhängigkeit des Tidehubs durch die Hinzunahme einer weiteren Dimension (s. *Bild 30*): Jetzt kann die Abhängigkeit des Tidehubs von beiden Parametern (Oberwasserzufluss und Tidehub am Pegel Helgoland) gleichzeitig dargestellt werden.

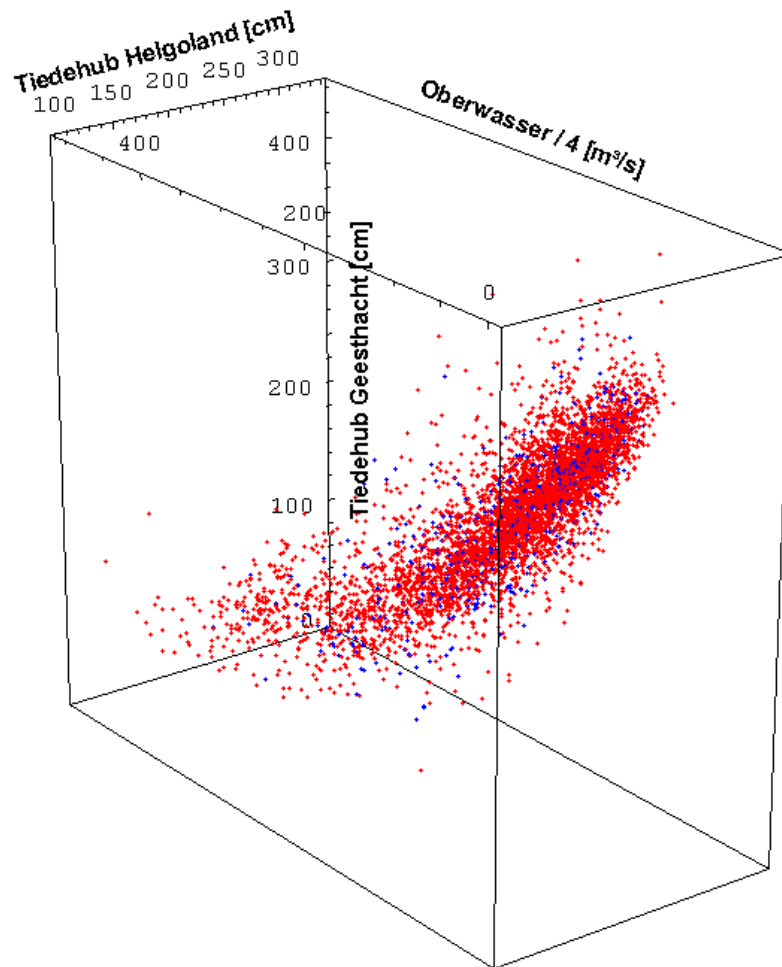


Bild 30 Der Tidehub in Geesthacht in Abhängigkeit vom Tidehub am Pegel Helgoland und dem Oberwasserzufluss in NeuDarchau in drei Dimensionen. Um den großen Wertebereich des Oberwasserzuflusses darzustellen, wurde dieser zuvor geviertelt.

Deutlich erkennbar ist der nichtlineare Einfluss des Oberwasserzuflusses aber auch der nahezu lineare Einfluss des Tidehubs am Pegel Helgoland ist - wenn auch nur schwach - zu erkennen.

Eine weitere wichtige Größe, die einen Einfluss auf den Tidehub ausübt, ist das Mittelwasser. Die Reibung und damit der Energieverlust verhält sich etwa reziprok zur Wassertiefe. Das muss bedeuten, dass bei einem höheren Mittelwasser auch der Tidehub ansteigt, da über die geringere Reibung weniger Energie verloren geht. Ferner ist bekannt, dass bei einer Erhöhung des Durchflusses das Mittelwasser ansteigt. Ein erhöhter Durchfluss wirkt aber wie in *Bild 29* und *Bild 30* gezeigt auch dämpfend auf den Tidehub. Damit ist der Einfluss des Mittelwassers nicht mehr eindeutig: Die Erhöhung des Mittelwassers bewirkt eine Erhöhung des Tidehubs, wenn die Mittelwassererhöhung von See kommt. Liegt die Erhöhung des Mittelwassers ursächlich an einem höheren Oberwasserzufluss, so wirkt es sich dämpfend auf den Tidehub aus. Dieses Phänomen ist in den obigen Abbildungen nicht erkennbar. Um diesen Effekt sichtbar zu machen, wird der dominante Einfluss des äußeren Tidehubs (Helgoland) zuvor mit dem Modell1 (s. das folgende Kapitel 5.4) herausgerechnet.

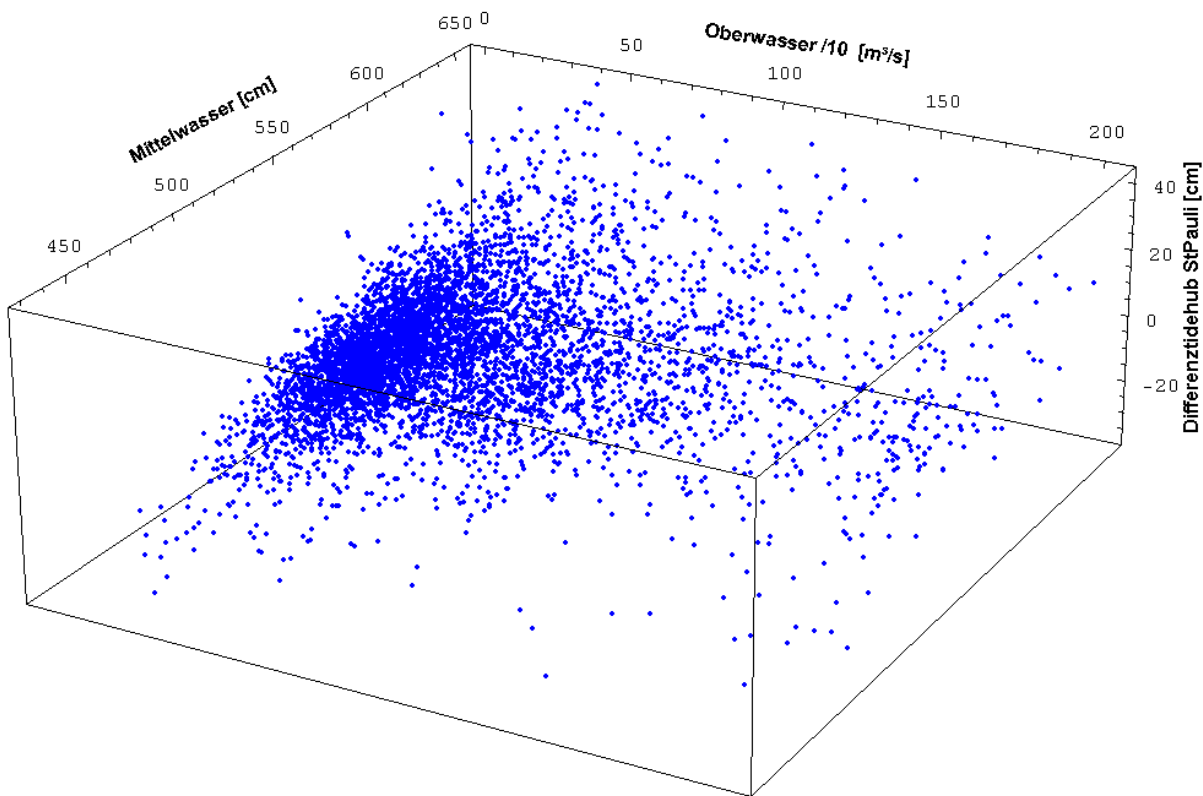


Bild 31 Tidehubabhängigkeit St.Paulis vom Mittelwasser und Oberwasserzufluss. Der Differenzidehub bezeichnet die Änderung des Tidehubs am Pegel St.Pauli hervorgerufen durch das Mittelwasser und/oder den Oberwasserzufluss. Der Oberwasserzufluss ist der besseren Darstellung halber auf ein Zehntel skaliert.

In dem *Bild 31* ist sehr gut die oben beschriebene Abhängigkeit des Tidehubs vom Oberwasserzufluss und vom Mittelwasser zu erkennen. Nicht mehr ganz so deutlich, aber durch näheres Betrachten erkennbar, ist die Lage der Punkte: Alle Punkte liegen etwa in einer Ebene. Für andere Pegel entlang der Elbe gilt ähnliches. Der einzige Unterschied besteht in den unterschiedlichen Steigungen der Fläche in X und/oder Y-Richtung, was einem unterschiedlichen Einfluss der Parameter Oberwasserzufluss und Mittelwasser charakterisiert.

Mit den Abbildungen wurde anhand von Messwerten gezeigt, dass der Tidehub abhängt von den drei Größen äußerer Tidehub, Oberwasserzufluss und Mittelwasser. Entsprechendes gilt für die Kennwerte Tideniedrig- und -hochwasser.

5.4 Modelle / Modellfunktionen

Die oben beschriebenen Phänomene können direkt für ein oder mehrere Modelle/Modellfunktionen benutzt werden. Die folgenden sieben Modelle können aufgestellt werden.



Modell 1: der Kennwert am Pegel hängt linear vom Kennwert an einer Referenzstation ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + z$$

Modell 2: der Kennwert am Pegel hängt zusätzlich linear vom Oberwasserzufluss ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + b \cdot \text{Oberwasser}_{\text{NeuDarchau}} + z$$

Modell 3: der Kennwert am Pegel hängt linear vom Mittelwasser und Referenzkennwert ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + c \cdot \text{Mittelwasser}_{\text{Pegel}} + z$$

Modell 4: der Kennwert am Pegel hängt linear von einem Referenzkennwert und nicht linear vom Oberwasserzufluss ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + b \cdot \text{Oberwasser}^n + z$$

Modell 5: der Kennwert am Pegel hängt linear von einem Referenzkennwert und nicht linear vom Mittelwasser ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + c \cdot \text{Mittelwasser}_{\text{Pegel}}^n + z$$

Modell 6: der Kennwert am Pegel hängt linear von einem Referenzkennwert, vom Mittelwasser und Oberwasserzufluss ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + b \cdot \text{Oberwasser}_{\text{NeuDarchau}} + c \cdot \text{Mittelwasser}_{\text{Pegel}} + z$$

Modell 7: der Kennwert am Pegel hängt linear von einem Referenzkennwert und vom Mittelwasser und nicht linear vom Oberwasserzufluss ab

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + b \cdot \text{Oberwasser}_{\text{NeuDarchau}}^n + c \cdot \text{Mittelwasser}_{\text{Pegel}} + z$$

Die Koeffizienten dieser sieben Modelle werden über ein Regressionsverfahren bestimmt. Wichtig für eine stabile und belastbare Regression ist u.a. eine ausreichende Anzahl von Datenpunkten. Verwendung finden hier alle Einzelereignisse, also beispielsweise jedes Tideniedrigwasser im Jahr. Es wird keine Mittelung der Einzelereignisse vorgenommen, damit findet auch kein Informationsverlust statt. Für einen Regressionszeitraum von einem Jahr stehen damit etwa um die 700 Datenpunkte zur Verfügung.

Die folgenden Abbildungen (s. *Bild 32* bis *Bild 36*) zeigen Lösungsfunktionen der verschiedenen Modelle. Die Koeffizienten wurden aus dem Kalenderjahr 1998 ermittelt.

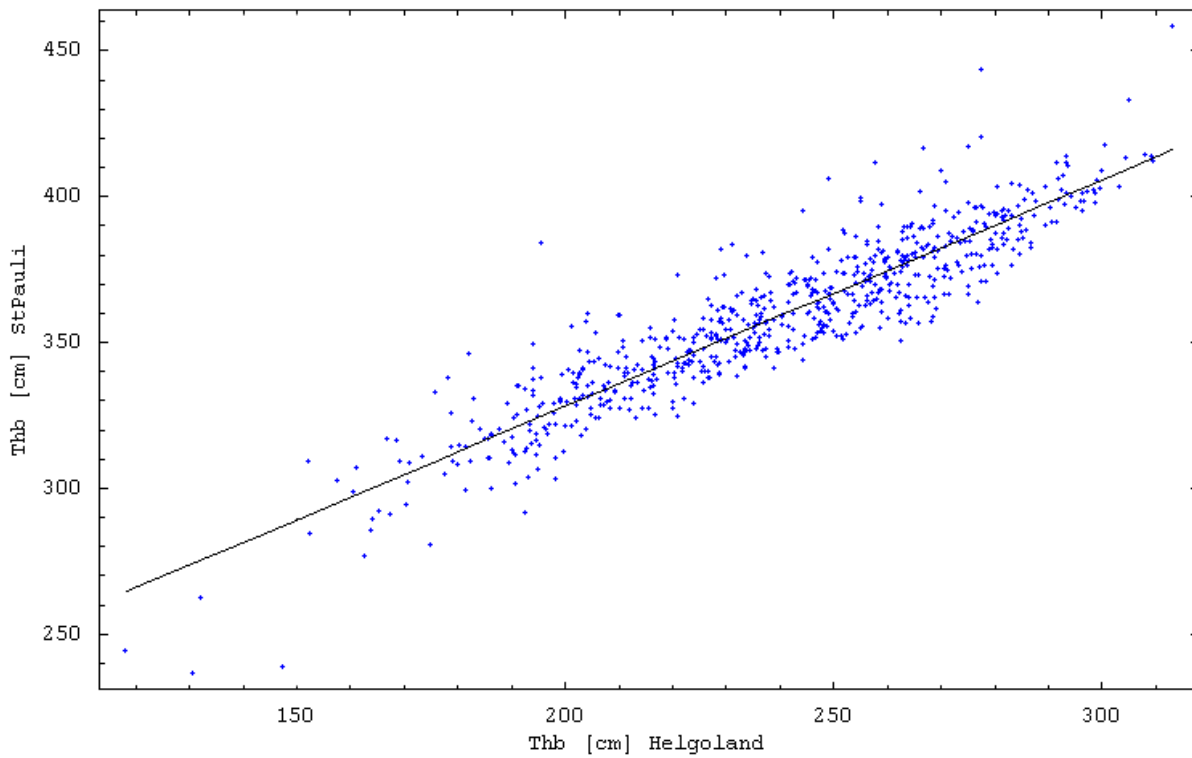


Bild 32 Messungen und Modellfunktion (Modell 1)

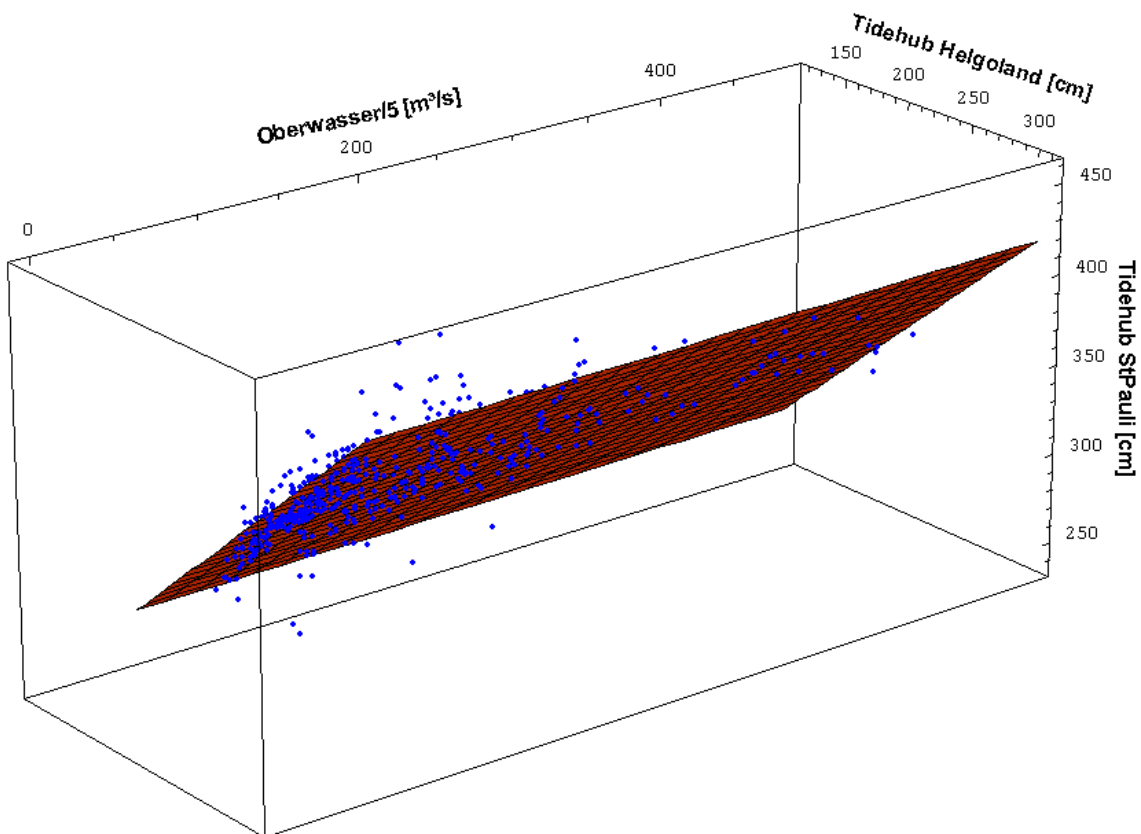


Bild 33 Messungen und Modellfunktion (Modell 2)

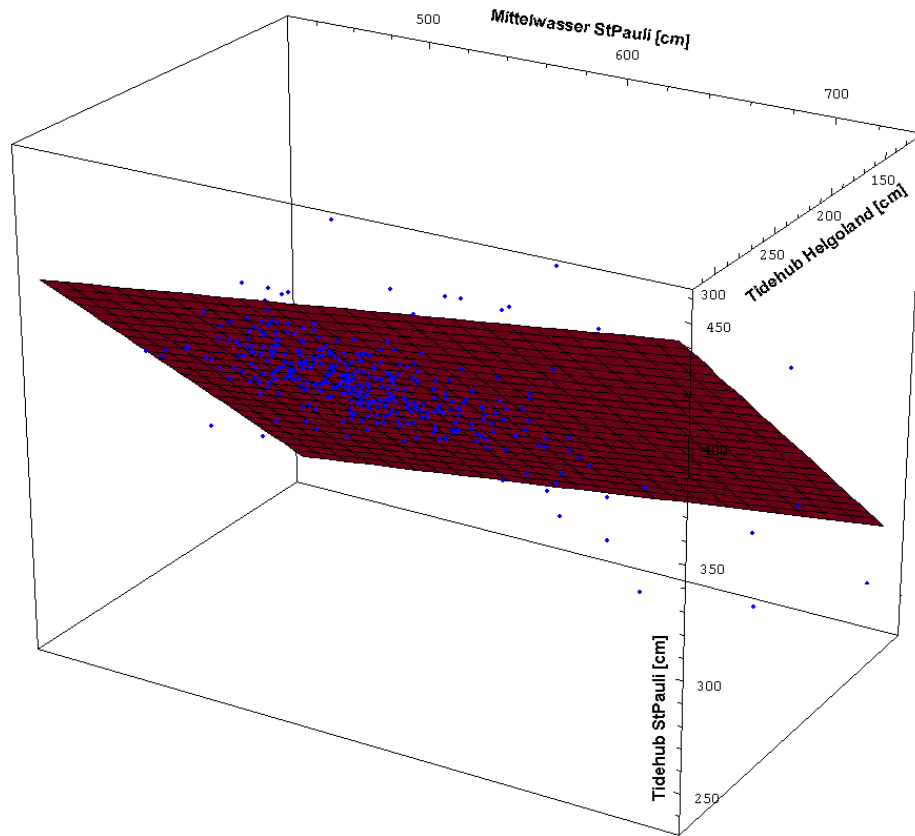


Bild 34 Messungen und Modellfunktion (Modell 3)

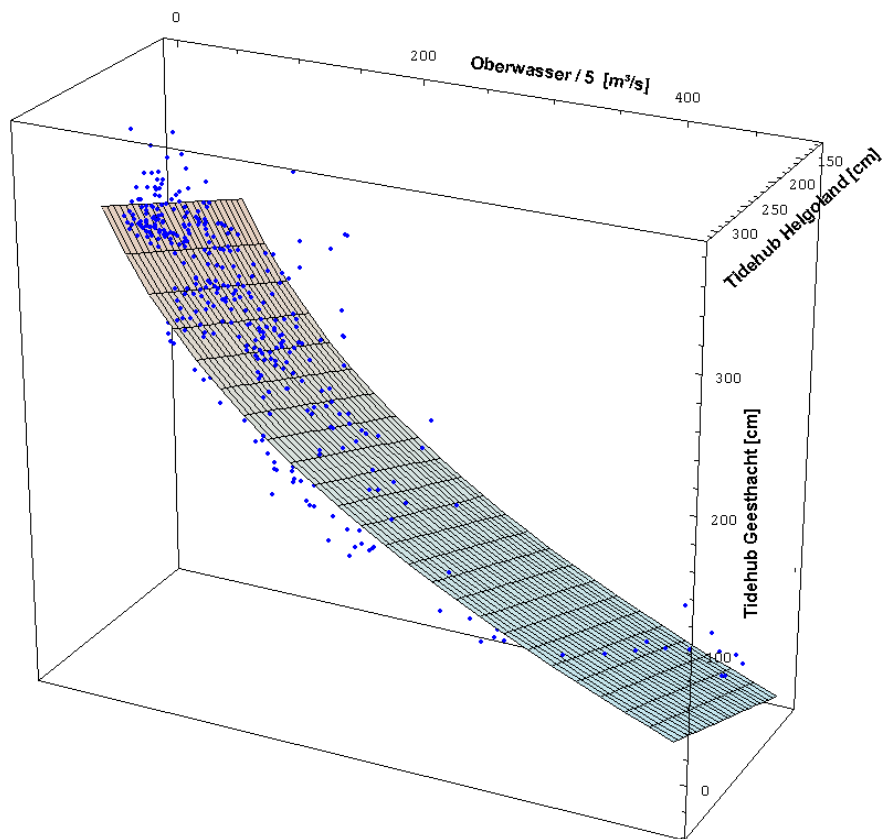


Bild 35 Messungen und Modellfunktion (Modell 4)

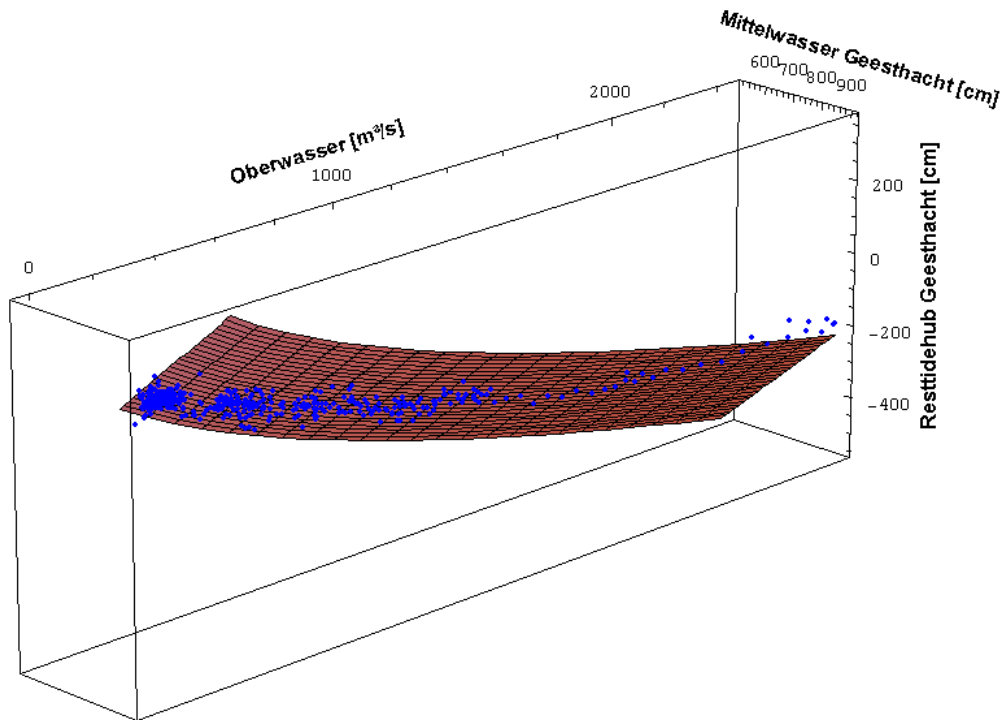


Bild 36 Messungen und Modellfunktion (Modell 7). Die korrekte Darstellung fordert genau vier Dimensionen. Um die Lösung trotzdem in perspektivischen drei Dimensionen zu zeigen, wurde zuvor mit dem Modell 1 der äußere Tidehub eliminiert. Der verbleibende Resttidehub, der nicht durch das Modell 1 erklärt werden kann, wird hier in Abhängigkeit von Oberwasserzufluss und Mittelwasser dargestellt.

Die Abweichungen der Punkte (Messungen) von den Modellen/Modellfunktionen (Gerade bzw. Ebene) zeigen, dass bei dem Modell 7 die Messungen sehr dicht an der Fläche liegen, die Streuung also gering ist.

Um die Güte der Modelle beschreiben zu können, wird die Varianz des Residuums verwendet. Das Residuum ist der Rest bzw. die Abweichung des Modells von den Messwerten: Der Teil, der nicht vom Modell erklärt werden kann. Die Varianz ist eine Art Streumaß: Große Varianzen bedeuten dabei große Streuung und kleine Varianzen entsprechend kleine Streuung. Je kleiner die Streuung des Rests, desto mehr kann ein Modell erklären, desto besser ist das Modell. Ist die Streuung Null, so kann ein Modell alles erklären.

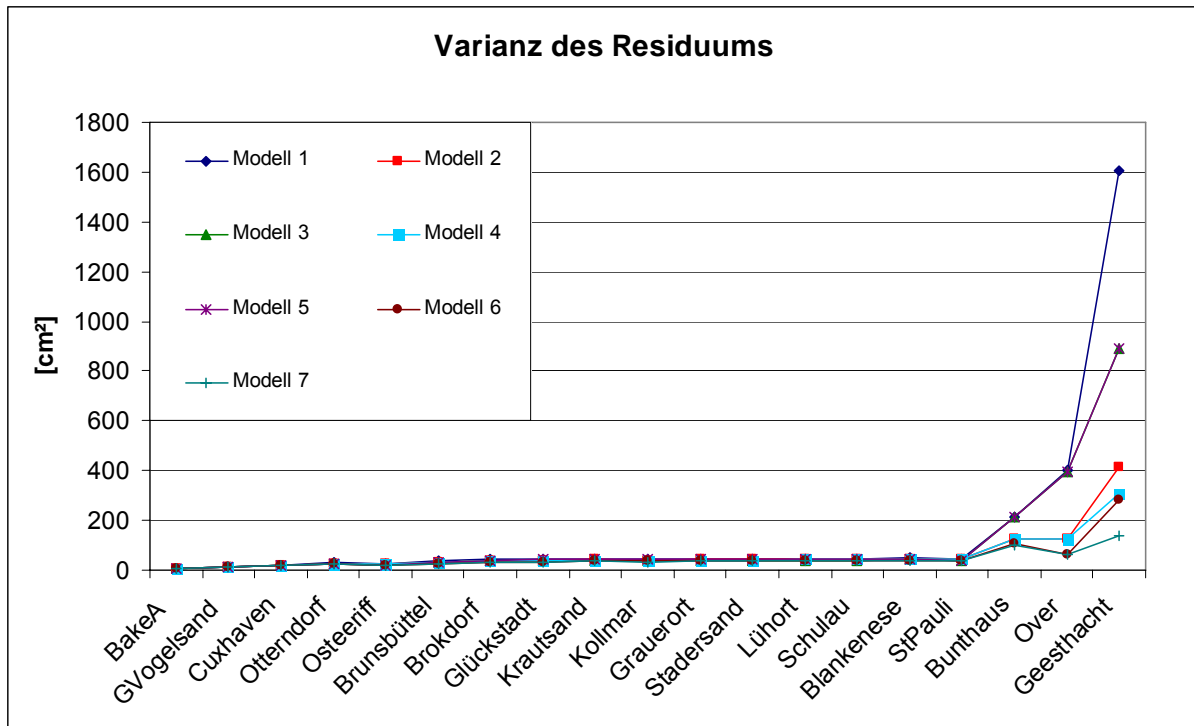


Bild 37 Entwicklung der Varianz des Residuums aller sieben Modelle entlang von Pegelstandorten in der Elbe

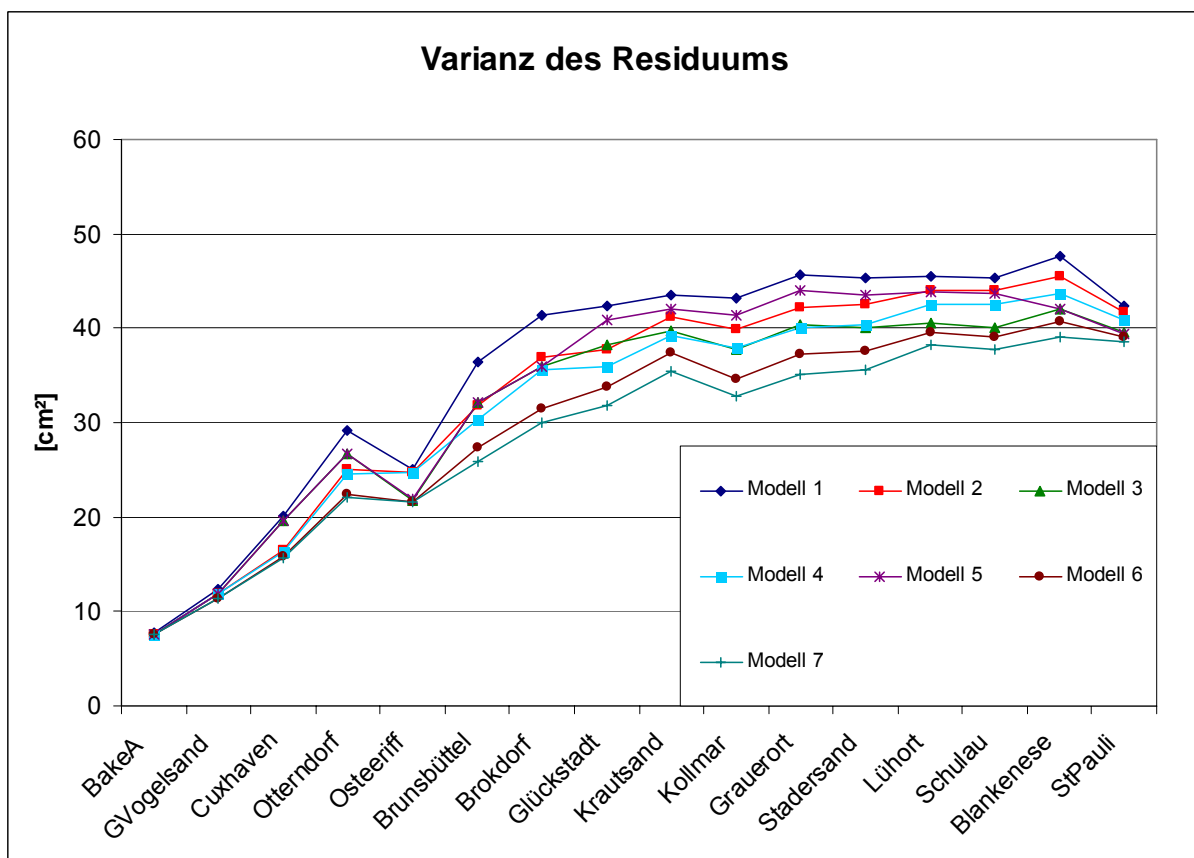


Bild 38 Entwicklung der Varianz des Residuums aller sieben Modelle von BakeA bis St.Pauli

Die *Bilder 34* und *35* zeigen die Varianzen der Residuen für ausgewählte Pegel und alle sieben Modelle. Auffällig ist der Bereich der Pegel von Bunthaus bis Geesthacht. Die Oberwasserdominanz ist sehr groß und entsprechend groß ist die Varianz der Modelle. Hier schlagen die nichtlinearen Prozesse deutlich zu: Selbst das beste Modell (Modell 7) hat hier trotz nichtlinearer Berücksichtigung noch den größten Fehler. Modelle, die den Oberwasserzufluss nicht berücksichtigen oder nur linear, sind deutlich schlechter.

Ferner ist interessant, dass sich die Modelle 6 und 7 im Bereich von BakeA bis Osteriff kaum in ihrer Güte unterscheiden. Im Außenbereich kann ebenso gut nur mit einem linearen Ansatz für den Oberwasserzufluss gerechnet werden.

Das Modell 7 hat an allen Pegelpositionen von Brunsbüttel bis Geesthacht die geringste Varianz, kann also das Meiste erklären und ist damit das beste Modell. Es kommt im Folgenden zum Einsatz, wenn die Kennwerte von den Randwerten bereinigt werden.

5.5 Ergebnisse

Das beste Modell (Modell 7) wird benutzt, um die Kennwerte Tidehub, Tideniedrig- und Tidehochwasser um die Randwerte (Pegel Helgoland und Oberwasserzufluss NeuDarchau) zu bereinigen. Nach dieser Bereinigung weisen sie in der Hauptsache nur noch lokale Entwicklungen auf. Diese lokalen Entwicklungen zeigen die folgenden Abbildungen (s. *Bild 39* bis *Bild 41*) für die Kennwerte ausgewählter Pegel ab 1998. Die Koeffizienten der Modelle sind im Anhang dokumentiert (s. Anhang VII), sowie auch die Veränderungen in Tabellenform für alle Pegel (s. Anhang VIII).

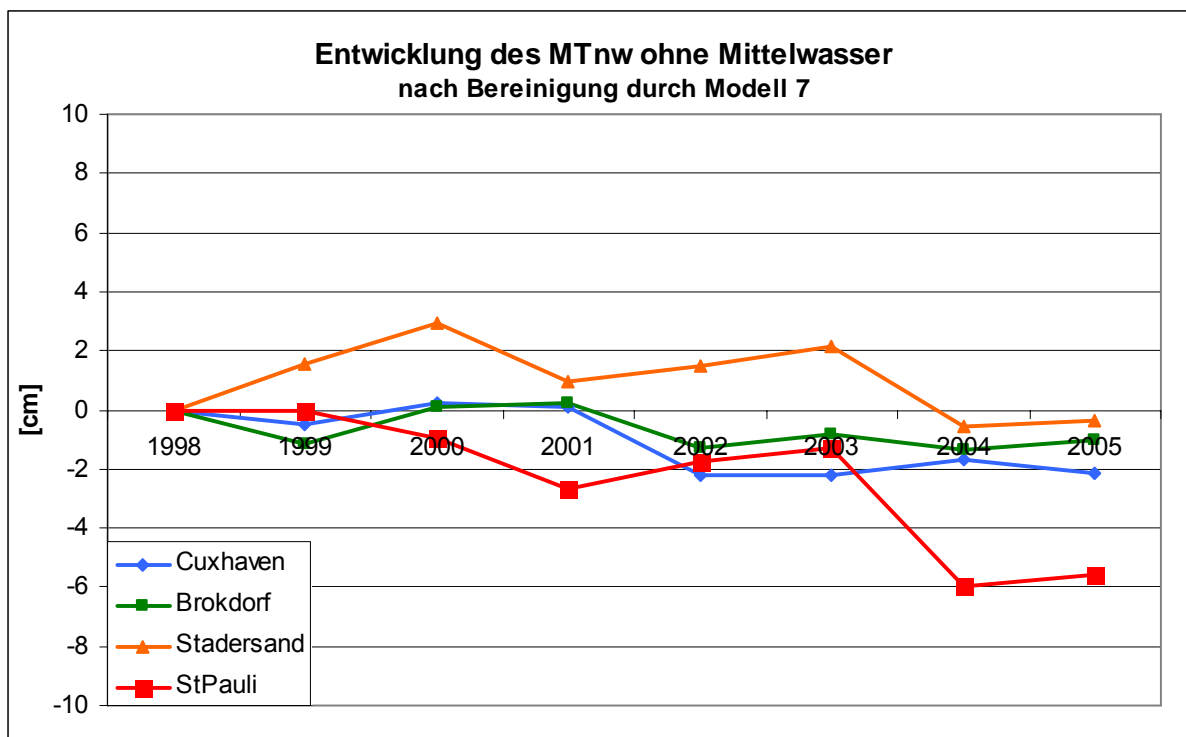


Bild 39 Entwicklung des MTnw seit 1998 nach Modell 7 ohne stetiges Mittelwasser

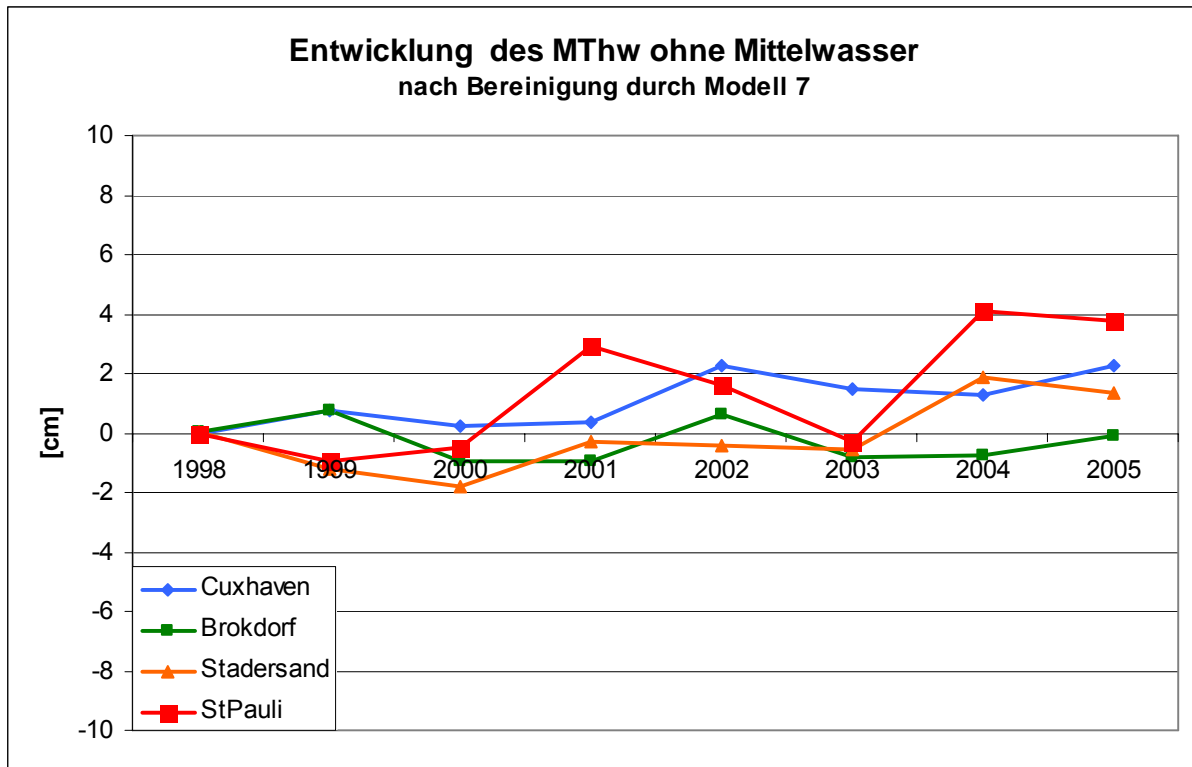


Bild 40 Entwicklung des MThw seit 1998 nach Modell 7 ohne stetiges Mittelwasser

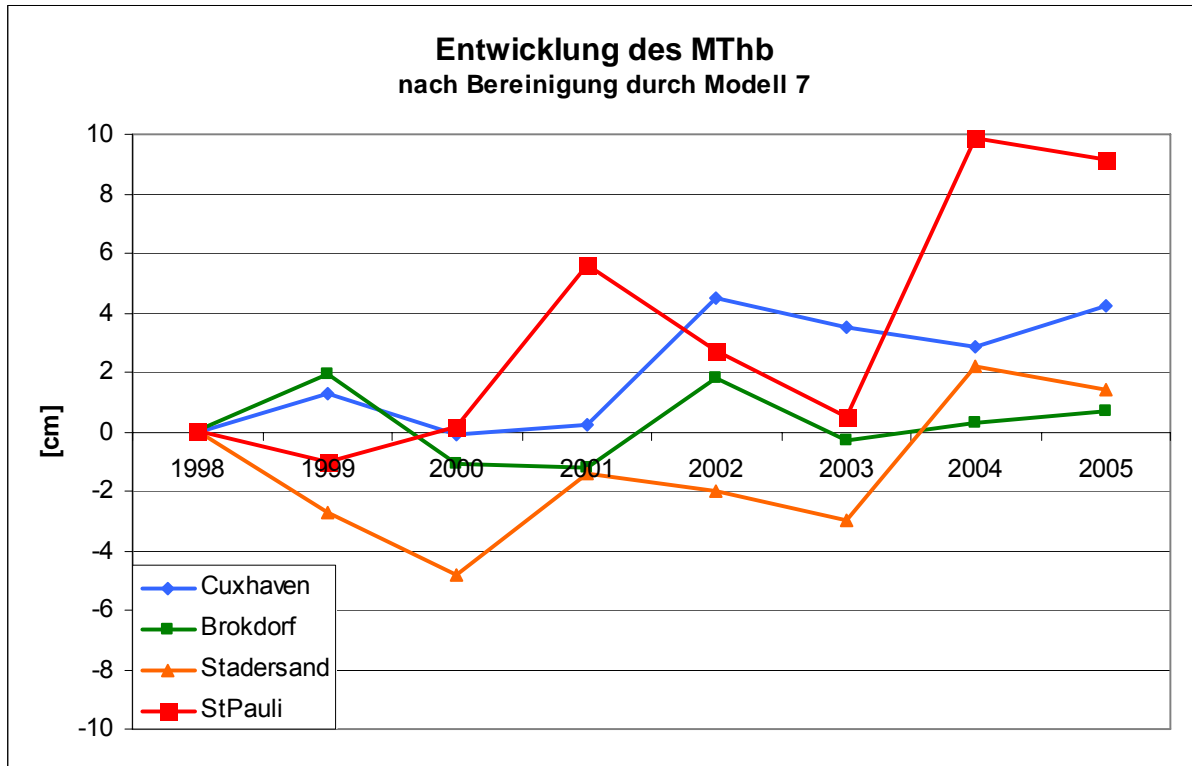


Bild 41 Entwicklung des MThb seit 1998 nach Modell 7



5.6 Das statistische Verfahren unter besonderen Umständen

5.6.1 Oberwasserzufluss

Die hier angegebenen sieben Modelle reagieren unterschiedlich auf spezielle Oberwassersituationen, je nachdem ob der Oberwasserzufluss berücksichtigt wurde (Modelle 2, 4, 6 & 7) und wie es berücksichtigt wurde (linear oder nichtlinear). Das Beste der sieben Modelle (Modell 7) berücksichtigt den Oberwasserzufluss nichtlinear.

5.6.2 Trendbehaftete Zeitreihen

Durch die Entfernung des *stetigen Mittelwassers* (s. Anhang II) wurde auch der Trend entfernt. Entsprechend spielt er hier keine Rolle mehr (s. Kapitel 4.8.2).

5.6.3 Nodaltide

Eine Vorhersage, wie die oben erwähnten Modelle unter Beeinflussung der Nodaltide reagieren ist nicht so einfach. Wenn bekannt wäre, wie welche Partialtide in Amplitude und Phase von der Nodaltide beeinflusst wird, so könnte das Verhalten von statistischen Verfahren daran studieren werden. Da aber keine etwa 43-jährige äquidistante Zeitreihe vorliegt, können diese Einflüsse auch nicht ermittelt werden. In dieser Situation können nur gewisse Annahmen weiter helfen.

Im Folgenden werden nodal beeinflusste Zeitreihen künstlich erzeugt. Diese Zeitreihen bestehen aus drei lunaren, also auch nodal beeinflussten Komponenten M2, M4 und M6 und einer solaren Komponente S2. Die angenommene Nodalvariation dieser Komponenten beträgt 3 % ihrer Amplitude. Als Vorlage dienen die Amplituden und Phasen von Helgoland bzw. St.Pauli. Nach Erzeugung einer zwanzigjährigen Zeitreihe und Bestimmung der Scheitelwerte, werden die Scheitelwerte der beiden synthetischen Pegel Helgoland und St.Pauli miteinander verglichen. Diesen Vergleich zeigt der Scatterplot in *Bild 42*.

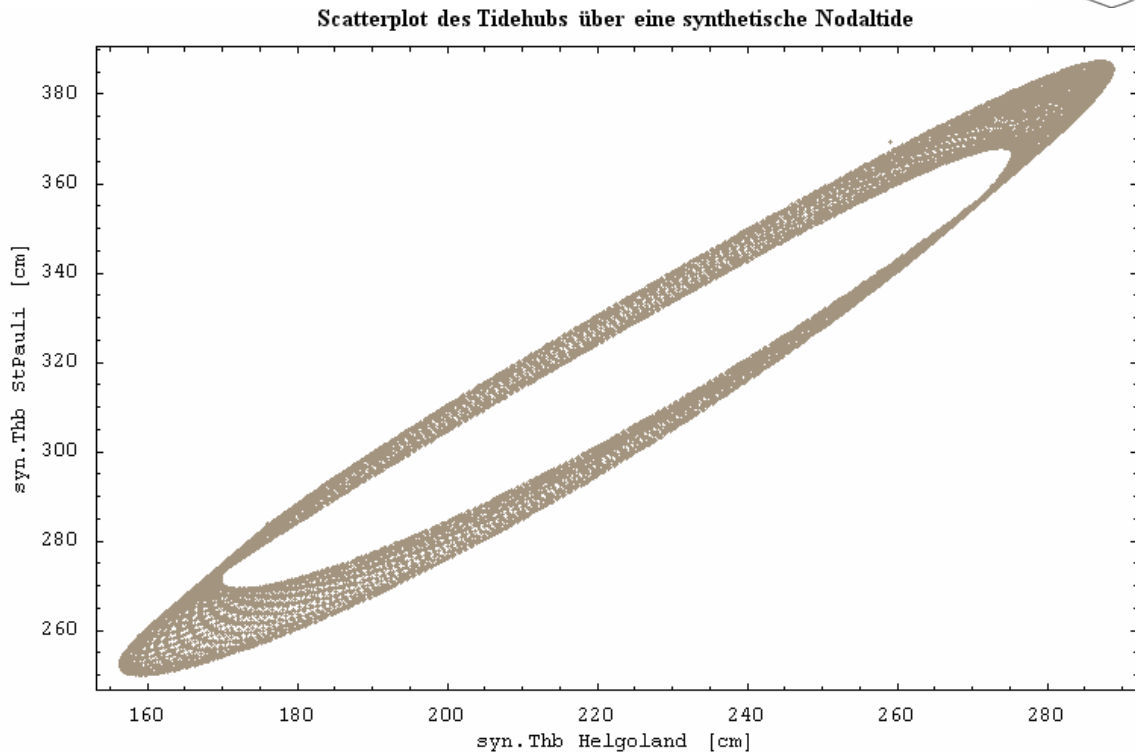


Bild 42 Scatterplot des Tidehubs über einen Nodalzyklus zweier theoretischer Pegel

Da die Punkte des Scatterplots nicht auf einer Geraden liegen, wird sofort ersichtlich, dass mit einem linearen Modell zur Berücksichtigung des äußeren Tidehubs (was einer Gerade entspricht, s. *Bild 32*) nicht der genaue Verlauf abbildet werden kann. Mit dem linearen Modell entsteht ein Fehler. Die Größe dieses Fehlers, wenn dennoch ein lineares Modell eingesetzt wird, zeigt das *Bild 43*.

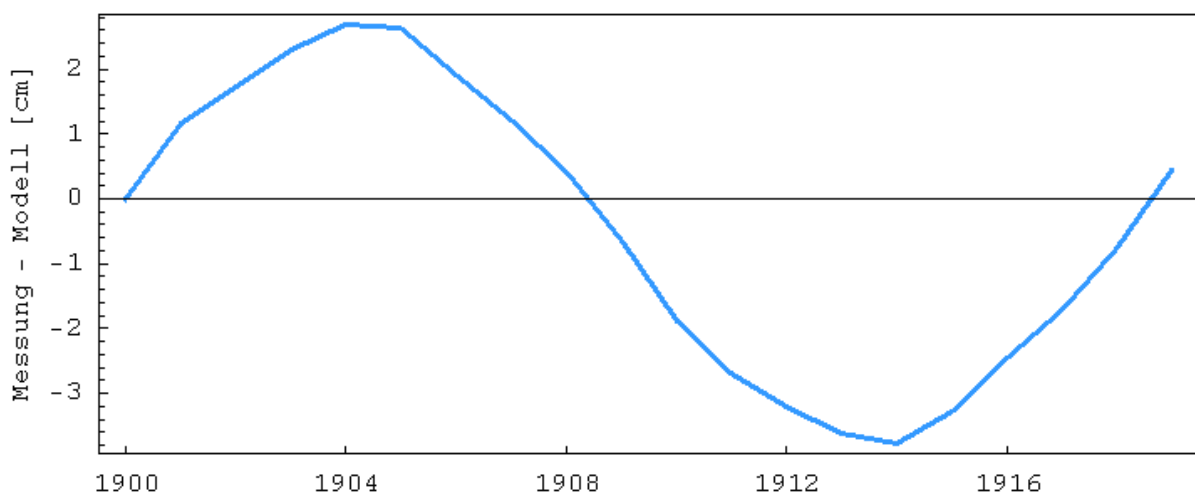


Bild 43 Differenz zwischen der Berechnung und der Messung bei Verwendung eines linearen Ansatzes zur Berücksichtigung des äußeren Tidehubs (Modelle 1-7)

In diesem konkreten Beispiel bedeutet das folgendes: Im Jahr 1900 würde eine Berechnung des Pegels St. Pauli aus dem Pegel Helgoland eine exakte Vorhersage liefern. Der Fehler

wäre Null. Im Jahr 1904 würde die Berechnung zwei Zentimeter weniger ergeben als die Messung. Als Folge könnte man auf die Idee kommen, dass der Tidehub in St.Pauli um 2 cm zugenommen habe. Im Jahr 1914 würde die Berechnung etwa 4 cm zuviel Tidehub ergeben, also eine Absenkung des Tidehubs in St.Pauli um 4 cm. Letztlich aber hat sich das dynamische System nicht verändert und es hat überhaupt keine Änderungen gegeben. Die durch das Modell berechneten Änderungen, sind auf die Nichtberücksichtigung der Nodaltide zurückzuführen.

Der Fehler durch das Modell (s. Bild 43) schwankt zyklisch mit der Periode der Nodaltide. In diesem Beispiel mit einem Signal mit vier Partialtiden ist der Fehler +3 bzw. -4 cm groß.

Die Größe des tatsächlichen Fehlers hängt von der Nodalmodulation der Partialtiden ab und kann heute noch nicht exakt bestimmt werden, da die vorhandenen äquidistanten Zeitreihen zu kurz sind.

5.6.4 Verschiedene Referenzzeiträume

Eine wichtige Frage für die Bestimmung der Koeffizienten der Modellfunktionen ist die Frage nach dem Regressionszeitraum. In diesem Zeitraum *lernt* das Modell gewissermaßen, wie die Ausgangsgröße (Kennwert) durch die Eingangsgrößen (Kennwerte, Mittel- und Oberwasserzufluss) beeinflusst wird. Wie sensitiv ist nun die Wahl des Regressionszeitraums? Was passiert bei der Wahl von anderen Regressionszeiträumen?

Die hier vorgestellten Modelle implizieren eine gewisse Stationarität, die vom Benutzer gewährleistet sein muss. In diesem Fall wurden eventuell langfristige Trends bereits durch das Entfernen des *stetigen Mittelwassers* herausgefiltert. Des Weiteren werden die Koeffizienten über etwa 700 Punkte/Tiden bestimmt: eine akzeptable Datenbasis.

Im Folgenden werden verschiedene Referenzzeiträume und ihre Auswirkungen auf das Ergebnis betrachtet. Das Resultat zeigt Bild 44.

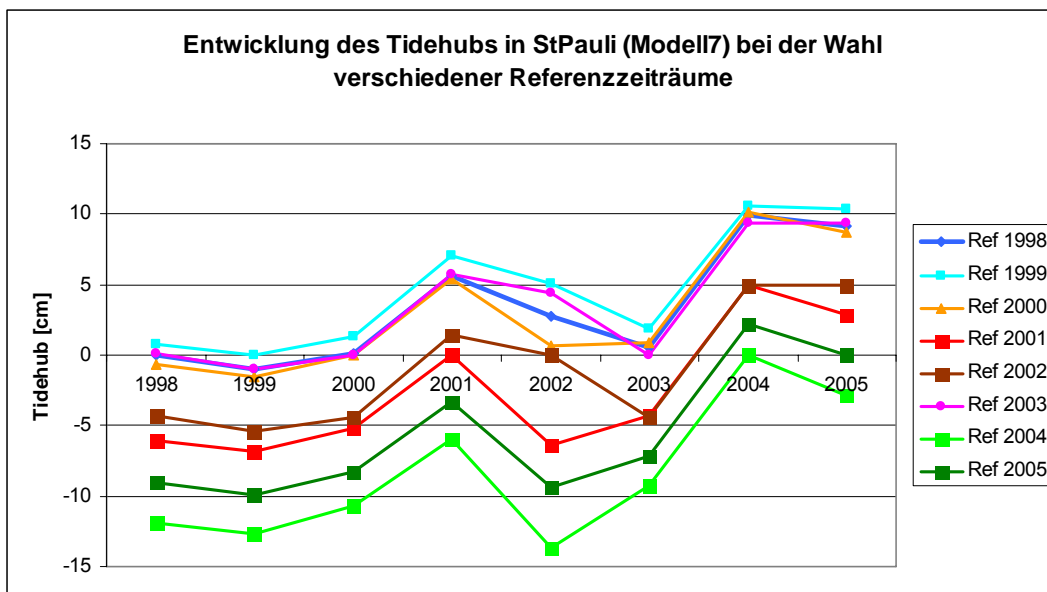


Bild 44 Entwicklung des Tidehubs am Pegel St.Pauli berechnet mit dem Modell 7 unter Verwendung verschiedener Referenzzeiträume.



Wie zu erwarten, verschiebt sich die Kurve des Referenzjahres 1998 um etwa die Differenz zwischen 1998 und einem anderen Jahr. Die Form bleibt in etwa gleich, was bedeutet, dass sich das Systemverhalten nicht grundsätzlich verändert hat.

Auffällig ist lediglich das Jahr 2002 mit dem sehr hohen Augusthochwasser. Die Dynamik oder der Wertebereich des Oberwasserzuflusses ist in jedem Jahr verschieden. Die *erlernten* Koeffizienten geben aber nur das Verhalten des Hochwassers des Referenzjahres wider. Ist die Dynamik größer (der Wertebereich größer), so extrapoliert das Modell. Diese Extrapolation ist unterschiedlich gut, daher kommt es im Jahr 2002 mit dem extremen Hochwasser zu leicht unterschiedlichen Werten.

Inhaltlich interessant ist, dass der Tidehub in St.Pauli von 2003 auf 2004 unabhängig vom Referenzzeitraum um etwa 10 cm ansteigt.

6 Mittelwasseranalyse

Bei beiden oben dargestellten Verfahren wurde das *stetige Mittelwasser* zuvor entfernt. Damit wurde nur der weitgehend harmonische Teil des Signals betrachtet. An dieser Stelle soll nun die Entwicklung des überwiegend stochastischen Anteils des gemessenen Wasserstands betrachtet werden.

Wie bereits erwähnt, hängt der Tidehub sowohl ab vom äußeren Tidehub als auch von den lokalen Bedingungen wie Mittelwasser und Oberwasserzufluss. Genauso hängt auch das lokale Mittelwasser ab vom Mittelwasser, wie es von außen kommt sowie vom Oberwasserzufluss (s. *Bild 31*). Ähnlich wie die Modellfunktionen für die Kennwerte T_{nw} , T_{hw} und T_{hb} , lässt sich ein Modell bzw. eine Modellfunktion für das Mittelwasser aufstellen. Es sei:

$$Mittelwasser_{Pegel} = a \cdot Mittelwasser_{Helgoland} + b \cdot Oberwasser_{NeuDarchau}^n + z$$

Die Koeffizienten a , b und z und der Exponent n werden mittels Regression ermittelt. Eine Lösung dieser Gleichung für den Pegel Geesthacht zeigt das *Bild 45*.

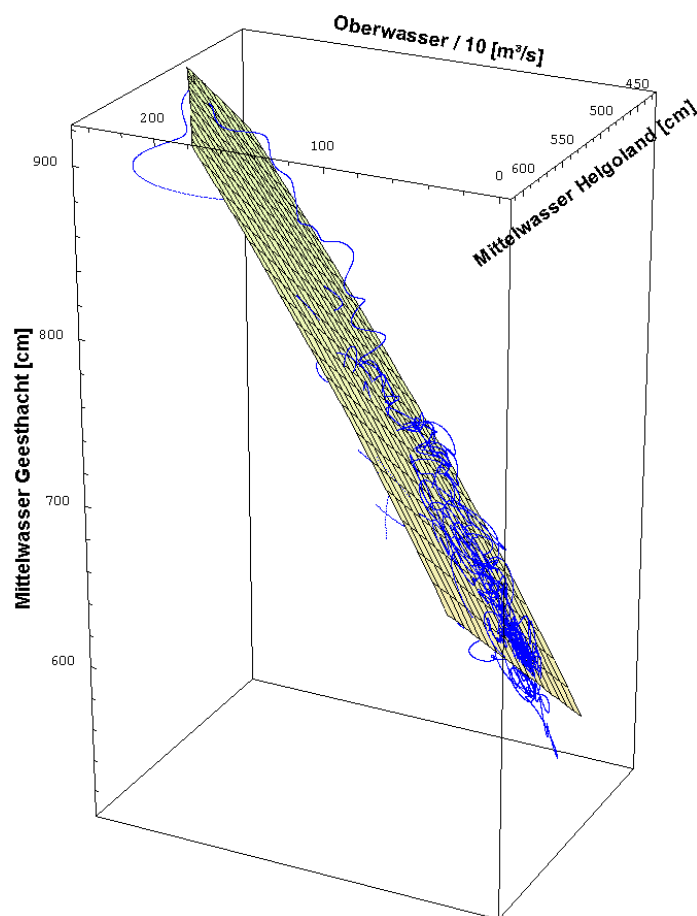


Bild 45 Das Mittelwasser in Geesthacht (blau) in Abhängigkeit vom Mittelwasser in Helgoland und dem Oberwasserzufluss in NeuDarchau.

An der geringen Krümmung der Fläche in *Bild 45* ist gut erkennbar, dass selbst am Pegel mit dem stärksten Oberwassereinfluss (Geesthacht) die Nichtlinearität nicht besonders ausgeprägt ist. Ab dem Pegel Bunthaus weiter stromab wird deshalb das lineare Modell eingesetzt (der Exponent n wird damit zu Eins).

Die *Tabelle 1* enthält alle Koeffizienten der Pegel sowie die Varianz des Residuums, also die Maßzahl, die die Nichterklärbarkeit (das Rauschen des Residuums) des Modells beschreibt. Die Varianz nimmt zu, mit zunehmender Entfernung zum Referenzpegel Helgoland (s. *Bild 46*). Grund dafür ist, dass sich mit zunehmender Entfernung zu dem Referenzpunkt die lokalen Einflüsse aufsummieren. Lokale Einflüsse sind beispielsweise Luftdruckschwankungen, Wind oder Dichte (Salz- und Schwebstoffgehalt).

*Tabelle 1 Koeffizienten der einzelnen Pegelstandorte für das Mittelwassermodell; mit * gekennzeichnete Pegel benutzen das nichtlineare Modell*

Pegelort	Koeffizienten [-]				Varianz des Residuums [cm ²]
	a	b	z	n	
GVogelsand	1.097468	0.001672	-43.589739	1	6.7
Cuxhaven	1.124731	0.001006	-49.593414	1	26.0
Otterndorf	1.155954	0.001559	-65.251344	1	36.1
Brunsbüttel	1.204845	0.001110	-81.592792	1	53.4
Brokdorf	1.224660	0.002502	-82.062160	1	70.3
Glückstadt	1.212969	0.004444	-78.072038	1	77.4
Krautsand	1.190626	0.003236	-65.315205	1	86.5
Kollmar	1.208056	0.005920	-74.427354	1	82.4
Grauerort	1.199013	0.006212	-67.154468	1	89.3
Stadersand	1.179490	0.006767	-57.160148	1	97.5
Lühort	1.151825	0.010923	-46.886372	1	95.9
Schulau	1.182943	0.012036	-60.936889	1	98.1
Blankenese	1.211405	0.016233	-77.985918	1	104.3
St.Pauli	1.183431	0.016706	-62.595400	1	113.0
Bunthaus*	1.091416	0.057543	-8.170904	0.950890	121.6
Over*	1.052217	0.128688	21.753472	0.895894	142.2
Zollenspieker*	0.948729	0.311742	67.780132	0.842488	153.9
Geesthacht*	0.804803	0.603153	125.151451	0.831418	196.4

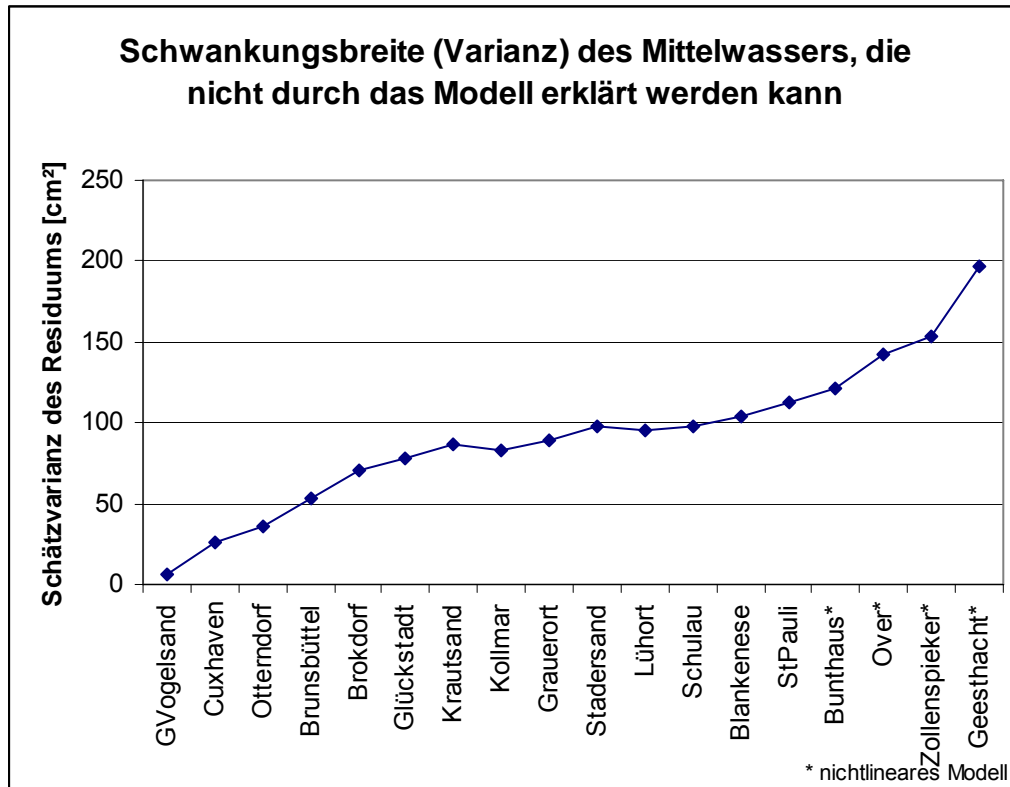


Bild 46 Entwicklung der Varianz des Residuums nach dem Bereinigen durch das Modell

Wird die Modellfunktion mit den zuvor ermittelten Koeffizienten (und Exponenten) auf das Mittelwasser eines Pegels angewendet, so wird ein Großteil der äußeren Einflüsse entfernt und nur noch lokale Einflüsse dominieren. Diese Vorgehensweise stellt eine Art Bereinigung dar. Beispielhaft soll die um äußere Einflüsse bereinigte Entwicklung an vier Pegeln dargestellt werden (s. Bild 47).

In der Tabelle 2 ist die bereinigte Mittelwasserentwicklung seit 1998 für alle verfügbaren Pegel aufgelistet.

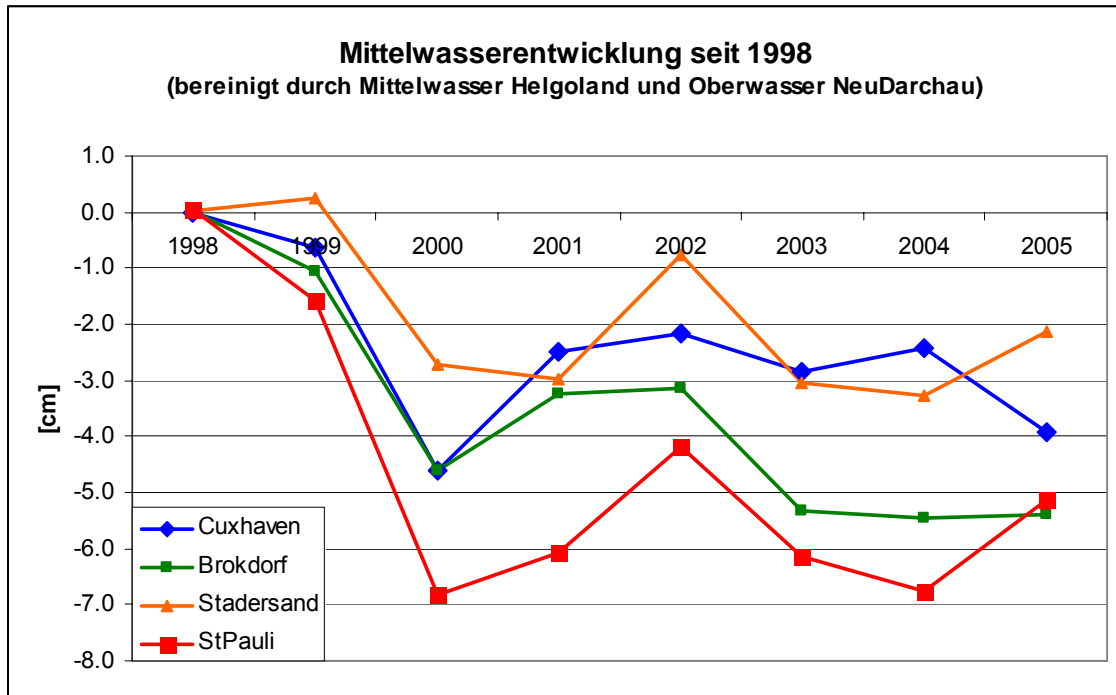


Bild 47 Mittelwasserentwicklung an ausgewählten Pegeln - bereinigt durch das Modell

Tabelle 2 Entwicklung des um äußere Einflüsse weitgehend bereinigten Mittelwassers; mit * gekennzeichnete Pegel benutzen das nichtlineare Modell

Pegelort	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
GVogelsand	0.0	-1.0	-3.2	-1.7	-7.0	-8.4	-8.7	-8.9
Cuxhaven	0.0	-0.6	-4.6	-2.5	-2.2	-2.8	-2.4	-3.9
Otterndorf	0.0	-2.0	-4.8	-3.0	-2.6	-3.3	-2.9	-3.1
Brunsbüttel	0.0	-1.2	-4.6	-3.1	-1.5	-3.9	-3.5	-2.3
Brokdorf	0.0	-1.1	-4.6	-3.2	-3.1	-5.3	-5.5	-5.4
Glückstadt	0.0	-0.8	-4.4	-3.7	-2.5	-6.6	-5.8	-4.7
Krautsand	0.0	0.2	-4.2	-4.1	-3.5	-4.6	-4.9	-3.7
Kollmar	0.0	-0.3	-3.7	-1.6	-1.8	-5.7	-4.9	-4.1
Grauerort	0.0	-0.4	-4.6	-4.0	-1.7	-2.6	-5.1	-3.8
Stadersand	0.0	0.2	-2.7	-3.0	-0.8	-3.0	-3.3	-2.1
Lühort	0.0	1.4	-2.6	-1.4	-2.3	-3.1	-2.3	-4.4
Schulau	0.0	-1.7	-7.1	-4.5	-2.7	-5.5	-5.9	-6.7
Blankenese	0.0	-0.5	-3.9	-3.8	-4.1	-4.9	-5.6	-4.1
St.Pauli	0.1	-1.6	-6.8	-6.1	-4.2	-6.1	-6.8	-5.1
Bunthaus*	0.0	-1.9	-6.7	-5.9	-5.0	-5.4	-4.8	-4.7
Over*	0.1	-1.6	-6.2	-5.4	-4.0	-5.4	-5.5	-5.6
Zollenspieker*	0.1	-	-6.1	-5.0	-4.9	-4.4	-2.9	-6.0
Geesthacht*	0.0	-3.6	-5.7	-5.0	-7.8	0.5	8.4	2.6



7 Zusammenfassung und Empfehlung

Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Dabei wird getrennt nach Ergebnissen, die Methoden und Verfahren betreffen sowie Ergebnissen, die sich auf die Inhalte, also Wasserstände bzw. Kennwerte, beziehen.

7.1 Methodische Zusammenfassung

- Die Aufteilung des gemessenen Wasserstands in ein *stetiges Mittelwasser* und ein weitgehend harmonisches Signal stellt sich als sehr positiv dar. Trends im Mittelwasser werden eliminiert und es wird ein klarer Blick auf Zusammenhänge gewonnen. Die Hinzunahme des Parameters Mittelwasser bei den statistischen Modellen bewirkt eine deutlich höhere Erklärbarkeit von Kennwerten. Um die Gesamtauswirkungen zu erhalten, müssen nur beide Ergebnisse (Mittelwasser und harmonischer Anteil) addiert werden (s. Schema in *Bild 56*).
- Die Partialtidenanalyse kann möglicherweise einzelne Entwicklungen erklären. Die Aufteilung des gemessenen Wasserstands in Partialtiden ist jedoch defizitär, da es theoretisch unendlich viele Partialtiden gibt, hier jedoch nur die Partialtiden größer einem Zentimeter berücksichtigt werden. Um Partialtiden, deren Veränderungen und Zusammenwirken zu interpretieren, bedarf einer gewissen Erfahrung im Umgang mit der harmonischen Analyse.
- Das statistische Verfahren ist in der Einzelvorhersage und damit auch in der Gesamtvorhersage genauer. Das liegt an der weitgehenden Elimination des nichtlinearen Oberwassereinflusses.
- Die Nodaltide kann im gegenwärtigen Zustand nur abgeschätzt werden. Beide Verfahren berücksichtigen sie nicht.
- Es wäre denkbar das statistische Modell auch auf andere Parameter anzuwenden, um sie von äußeren Einflüssen zu befreien. Andere Parameter könnten beispielsweise Salzgehalt, Sauerstoff, evtl. auch Strömung, Durchfluss oder Schwebstoffe sein.

7.2 Inhaltliche Zusammenfassung

- Das bereinigte Mittelwasser zeigt ein deutliches Signal zwischen 1998 und 2000: Ein Absinken des Mittelwassers über die gesamte Tideelbe, der im Betrag jedoch regional unterschiedlich ist. Im Bereich St.Pauli beispielsweise sinkt das Mittelwasser um etwa 7 cm ab. Ein Teil dieses Absinkens kann dem Ausbau zugeordnet werden, der die Leistungsfähigkeit der Fahrrinne erhöht hat.
- Das Hin- und Herspringen der bereinigten Mittelwasserwerte (also das Rauschen) beträgt nach dem Jahr 2000 über alle Pegel etwa 1,5 cm (Standardabweichung). Werden ca. 95 % aller möglichen Änderungsfälle betrachtet, so beträgt die Änderung des Mittelwassers ± 3 cm ($2 \cdot$ Standardabweichung, Normalverteilung impliziert (Hartung et al, 2005). Es kann also mit 95 prozentiger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass das bereinigte Mittelwasser noch um 3 cm schwankt. Wenn die

Schwankung 3 cm beträgt, dann kann erst ab einer Änderung von mehr als 3 cm von einer signifikanten Veränderung ausgegangen werden.

- Die bereinigten Kennwerte MTnw, MThw und MThb aus dem statistischen Verfahren zeigen kein so deutliches Signal, wie das bereinigte Mittelwasser. Es hilft hier eine Ministatistik über alle Pegel ab dem Jahr 2000 (s. Anhang VIII und *Tabelle 3*). Zwar ist eine solche Statistik über sechs Punkte fragwürdig, dennoch gibt sie einen ersten Hinweis. Die trendbereinigte Streuung nach der Bereinigung der Kennwerte mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt für den Tidehub bei ca. 4-5 cm (2 * Standardabweichung, Normalverteilung impliziert (Hartung et al, 2005)); für das Tideniedrig- bzw. Tidehochwasser bei etwa 2-3 cm. Das bedeutet, dass Tidehubänderungen erst ab mehr als 5 cm als signifikant bezeichnet werden können, für das Tidehoch- und -niedrigwasser sind Änderungen ab 3 cm signifikant.
- Das PT-Verfahren und das statistische Modell zeigen im Wesentlichen dieselben Trends (vgl. Pegel St.Pauli 2003/2004 in *Bild 41* und *Bild 16*)

Tabelle 3 Offset, Steigung des Trends und die geschätzte Standardabweichung nach dem Entfernen des Trends über alle Pegel ab dem Jahr 2000

	Steigung [cm/Jahr]	Offset [cm]	gesch.Standardabweichung [cm]
MTnw	-0,4	0,6	1,3
MThw	0,4	-0,9	1,1
MThb	0,8	-1,5	2,4

7.3 Empfehlung

Folgende Vorgehensweise und Verfahren können empfohlen werden:

- Das Wasserstandssignal muss mindestens mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Minuten aufgenommen werden.
- Datenlücken durch Ausfälle der Messwertgeber sind über Nachbarpegel zu schließen und zu dokumentieren.
- Das gemessene Wasserstandssignal wird aufgeteilt in ein *stetiges Mittelwasser* und ein Tidesignal ohne *stetiges Mittelwasser*.
- Die Kennwerte (Tnw, Thw und Thb) werden für das Tidesignal ohne *stetiges Mittelwasser* bestimmt.
- Ein Referenz- oder Vergleichszeitraum muss festgelegt und zur Qualitätssicherung auch variiert werden. Die analysierten Veränderungen beziehen sich auf diesen Zeitraum.
- Die Analyse des *stetigen Mittelwassers* erfolgt wie in Kapitel 5 beschrieben.
- Die Kennwerte werden mit dem statistischen Modell 7 bereinigt.



Die berechneten Kennwerte für die Tidewasserstände sind jetzt um äußere Einflüsse (Oberwasserzufluss und Einfluss der Nordsee) weitestgehend bereinigt und spiegeln im Wesentlichen den Einfluss der Änderungen der Bathymetrie in der Tideelbe wider.

Um sehr langwellige natürliche Phänomene wie die Nodaltide künftig besser abschätzen zu können, müssen die Beobachtungszeitreihen verlängert werden.

8 Ausblick

Ein Nachteil von Fourieranalysen wird in Kapitel 4.3.3 erläutert: Schwankungen von Amplituden und Phasen *innerhalb* des Analysezeitraums können nicht analysiert werden. Die Fourieranalyse liefert für eine Frequenz immer nur ein Wertepaar für Amplitude und Phase. Wird der Analysezeitraum verringert, lassen sich Partialtiden z.T. nicht mehr analysieren. Die *wavelet*-Analyse kann unter bestimmten Voraussetzungen auch die Schwankung der Amplituden darstellen. Ob es gelingt diese Analyse auf die hier dargestellte spektrale Konfiguration anzuwenden, kann *a priori* nicht entschieden werden – es müsste untersucht werden. Möglicherweise ließe sich eine Modellfunktion konstruieren, ähnlich den hier vorgestellten statistischen Modellfunktionen, jedoch nicht für Kennwerte, sondern für Partialtiden.

Noch einen Schritt weiter geht die Hilbert- bzw. Hilbert-Huang-Transformation (Huang et al, 1999). Hier wird auch die Voraussetzung der konstanten Frequenz aufgehoben. Diese Analyseverfahren erfordert jedoch ein Umdenken mit wellentheoretischen Annahmen, die im Moment noch sehr schwer zu vermitteln sind.

Nur noch eines kleinen Schrittes bedarf es, wenn die Unsicherheiten aus den dargestellten statistischen Modellen abgeleitet werden sollen. Bei der Regression können auch die Konfidenzintervalle der Koeffizienten/Exponenten ermittelt werden. Innerhalb dieser Konfidenzintervalle haben die geschätzten Koeffizienten eine gewisse Wahrscheinlichkeit. Einen zweiparametrischen Raum stellt die unten abgebildete Ellipse dar (s. *Bild 48*). Sind mehrere Parameter beteiligt, wird allgemein von einem Hyperellipsoid gesprochen. Dieses Hyperellipsoid könnte für eine Vorhersage von intrinsischen Modellunsicherheiten genutzt werden.

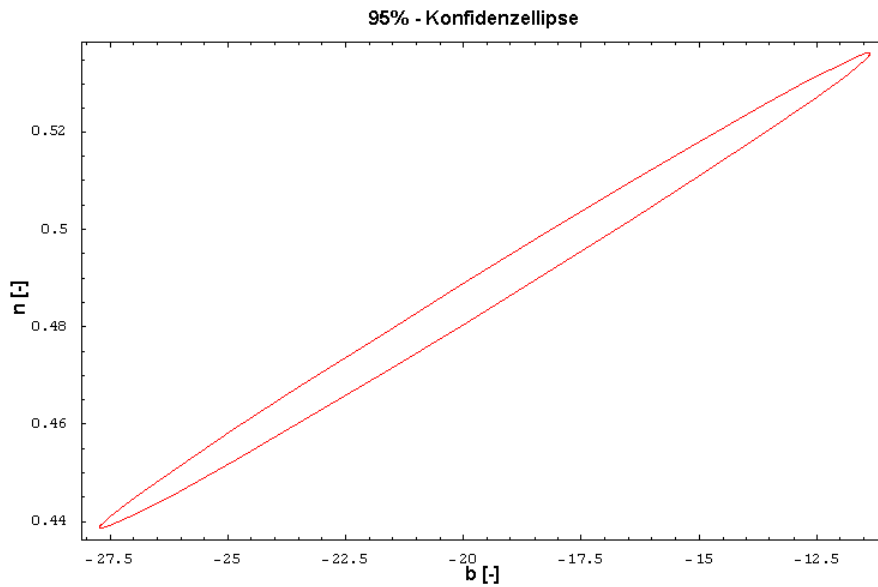


Bild 48 95%-Konfidenzellipse von zwei von fünf Parametern des Modells 7. Hier für den nichtlinearen Oberwassereinfluss am Pegel Geesthacht. 95 Prozent aller möglichen Parameterkombinationen aus b und n liegen innerhalb der Ellipse.

Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Hamburg, 22. März 2007

Im Auftrag

Bearbeiter

Dr. N. Winkel
(Regierungsdirektor)

Dipl. geoökol. Marko Kastens
(Wiss. Angestellter)



9 Literatur

Antoniou, A. (1993): Digital Filters: Analysis, Design and Applications; McGraw-Hill; NewYork

Butz, T. (2003): Fouriertransformation für Fußgänger, 3.Auflage; B.G. Teubner Verlag; Wiesbaden

Cartwright, D.E. (1999): Tides – A Scientific History; Cambridge University Press; Cambridge

Godin, G. (1988): Tides; ANADYOMENE Edition; Ottawa

Gönnert, G., Isert, K., Giese, H. und Plüß, A. (2004): Charakterisierung der Tidekurve; Die Küste, Heft 68; Hamburg

Hartung, J. et al (2005): Statistik, 14.Auflage; Oldenbourg Verlag; München

Huang, N.E., Shen, Z. & Long, S.R. (1999): A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum; Annu. Rev. Fluid Mech. 1999, 31:417-57

Liebig, W. (1994): Schließen von Lücken in Pegelaufzeichnungen; Die Küste, Heft 56; Hamburg

Niemeyer, H.D. (1998): Change of tidal peaks and range due to estuarine waterway deepening; Proceedings of Coastal Engineering, Vol.3, p.3307-3317; Copenhagen;

Oppenheim, A.V. et al (2004): Zeitdiskrete Signalverarbeitung, 2.Auflage; Pearson Studium; München

Pugh, D.T. (2004): Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate; Cambridge University Press; Cambridge

Siefert, W. (1992): Über die Veränderungen der Tidewasserstände in der Elbe als Folge der Fahrrinnen-Vertiefungen; Strom- und Hafenbau Studie Nr.70; Hamburg (unveröffentlicht)

Siefert, W. & Jensen, J. (1993): Fahrrinnenvertiefung und Tidewasserstände in der Elbe; Hansa, 130.Jahrgang Nr.10; Hamburg

Siefert, W. (1998): Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen - Die Entwicklung von 1950 bis 1997 und ihre Ursachen; Die Küste, Heft 60; Hamburg

Anhang

I. Verfahren zum Schließen von lückenbehafteten Zeitreihen

Um Lücken innerhalb von Zeitreihen schließen zu können, bedarf es der Kenntnis des Aufbaus dieser Zeitreihen. Bei den hier vorliegenden Zeitreihen des Wasserstands ist bekannt, wie es sich zusammensetzt: Es ist eine Überlagerung eines harmonischen Signals (astronomisch bedingt) mit einem meteorologisch stochastischen Signal (s. Kapitel 3.1).

Um eine Lücke zu schließen, können Informationen aus einem Nachbarpegel verwendet werden. Dazu wird als erster Ansatz eine lineare Funktion aufgestellt:

$$\text{Lückenpegel} = m \cdot \text{Nachbarpegel} + b$$

Zu Beginn wird die Laufzeit der Tidewelle vom Lückenpegel zum Nachbarpegel ermittelt und die Zeitreihe des Lückenpegels mit der ermittelten Laufzeit verschoben. In einer anschließenden Regression über einen Zeitraum von etwa sieben Tagen, der unmittelbar vor der Lücke liegt, werden die Parameter m und b bestimmt. Die Funktion ist jetzt parametrisiert und wird auf den Lückenzeitraum angewendet. Die für die Lücke berechneten Werte werden um die Laufzeit zurück verschoben, so dass die Lücke jetzt gefüllt ist. Fazit: Die Information wird vom Nachbarpegel linear transformiert und auf den Lückenpegel übertragen.

Liegen beide Orte (Lückenpegel und Nachbarpegel) nahe beieinander und ist der Charakter der Tidewelle ähnlich, so reicht die beschriebene Prozedur aus. Anders verhält es sich, wenn der Charakter der Tidewelle des Lückenpegels sich deutlich von dem Charakter des Nachbarpegels unterscheidet. Das ist beispielsweise der Fall, wenn die Tidewelle auf Grund der Veränderungen des Untergrundes (oder allgemein der Bathymetrie) höhere Harmonische erzeugt und deformiert wird. Hier reicht eine einfache lineare Transferfunktion, wie sie oben beschrieben ist, nicht mehr aus. In diesem Fall werden *zunächst* alle Lücken mit einer linearen Transferfunktion geschlossen. Anschließend werden alle Hauptpartialtiden (Frequenz > 13 Grad/h und Amplitude > 1 cm) analysiert und anschließend wieder zusammen gefügt. Diesem Signal wird das *stetige Mittelwasser* der Lückenzeitreihe, das linear übertragen wurde, addiert. Die Lücke wird dann mit dieser neuen Zeitreihe geschlossen. Über dieses Verfahren erhält die Zeitreihe auch in den ehemaligen Lücken ihren Charakter zurück. Die Information des Lückenpegels wird je nach Größe der Lücke mit der Information des Nachbarpegels vermischt. Ist die Vermischung klein, was bei kleinen Lücken der Fall ist, ist dieses Verfahren vertretbar. Bei größeren Lücken sollte von diesem Verfahren jedoch kein Gebrauch gemacht werden, da sonst der Charakter des Pegels durch zuviel Fremdinformati-on verloren geht. Eine Möglichkeit die Fremdinformati-on des Nachbarpegels zu verdrängen besteht in der iterativen Anwendung der letzten Schritte: Partialtidenbestimmung, Addition des stetigen Mittelwassers, einsetzen in die Lücke, Partialtidenbestimmung, [...]. Fazit:

Letztendlich wird die stochastische Information des Nachbarpegels mit der linearen Transferfunktion übertragen und die dem Pegel eigene Information der Harmonischen hinzugefügt. Das Verfahren ist nicht für stark oberwasserbeeinflusste Pegel geeignet, da sich die Schwingungszustände zu schnell ändern, die Partialtidenanalyse aber von einem mittleren Schwingungszustand ausgeht (s. Kapitel 4.5).

Abschließend muss sich folgender Zustand vergegenwärtigt werden: Wie ausgeklügelt auch das Verfahren zum Schließen von Lücken ist, es erzeugt letztendlich nur Redundanz und keine Information. Informationen, die ein unverfälschter Spiegel der Realität sind, können nur durch Messungen gewonnen werden.

II. Bestimmung des stetigen Mittelwassers

Wie in Kapitel 4.2 erläutert wird, besteht der Anfang des Spektrums einer Jahreszeitreihe aus überwiegend meteorologisch stochastischen Anteilen. Die erste signifikante Partialtide in dieser Untersuchung ist Q_1 mit einer Frequenz von 13,4 Grad/h. Mit dem Wissen, dass alle Frequenzen der signifikanten Partialtiden in Jahreszeitreihen größer als 13,4 Grad/h sind, kann mit einer Tiefpassfilterung das signifikante harmonische Signal abtrennt werden. Übrig bleibt ein langwelliges überwiegend stochastisch-meteorologisch beeinflusstes Signal. Da Tiefpassfilter nur eine begrenzte Flankensteilheit aufweisen, wird die Grenzfrequenz auf 13 Grad/h vorverlegt.

Das langwellige Signal entspricht einem Schwerpunkt (Mittelwasser) und ist darüber hinaus stetig. Um sich von dem Begriff des (unstetigen) Mittelwassers in der DIN 4049 abzugrenzen wird deshalb der Begriff des *stetigen Mittelwassers* eingeführt.

Die folgenden Abbildungen (s. *Bild 49* und *Bild 50*) zeigen den gemessenen Wasserstand, das *stetige Mittelwasser* und das abgetrennte harmonische Signal.

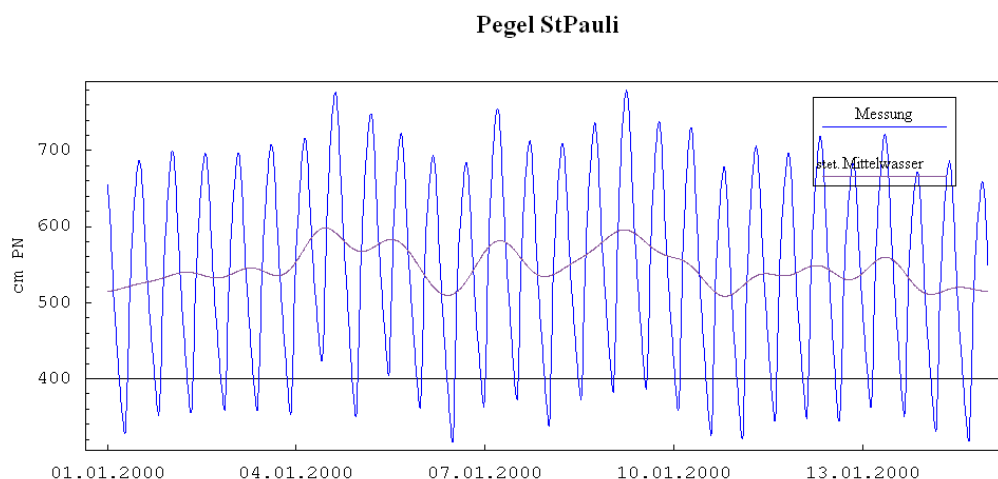


Bild 49 Messsignal und stetiges Mittelwasser (<13 Grad/h) am Pegel St.Pauli

Pegel StPauli – Tidesignal > 13 Grad/h

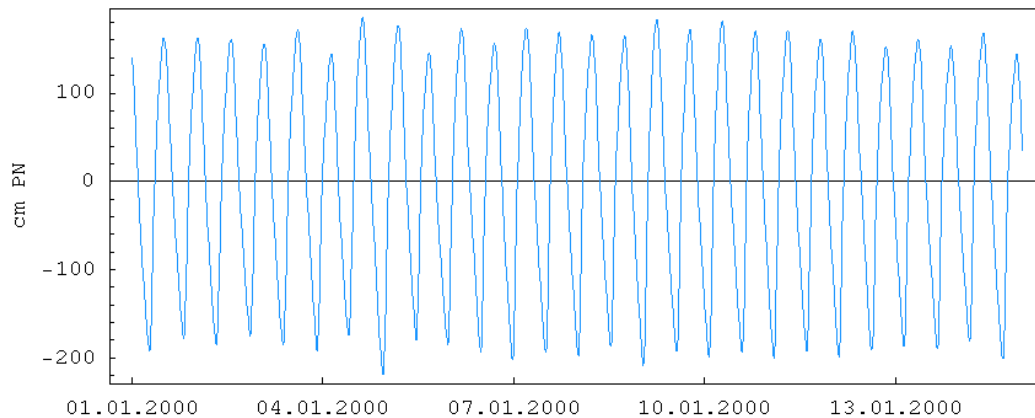


Bild 50 harmonisches Tidesignal (> 13 Grad/h) am Pegel St.Pauli

Das Verfahren zur Bestimmung des *stetigen Mittelwassers* ist ein Butterworth-Tiefpassfilter zwanzigster Ordnung (hohe Flankensteilheit um Q_1 möglichst gut zu trennen) angewendet im Fourierraum.

III. Frequenzen der Partialtiden

Die Frequenzen der einzelnen Partialtiden sind Linearkombinationen aus den fünf folgenden astronomischen Konstanten:

$\tau = 14.492053523984348$ Grad/h – mittlerer Montag

$s = 0.5490165247385749$ Grad/h – tropischer Monat

$h = 0.04106863883746183$ Grad/h – tropisches Jahr

$p = 0.004640524162425066$ Grad/h – Rotation des erdnächsten Punktes auf der Erdbahn

$N = 0.002206804881110254$ Grad/h – Rotation des aufsteigenden Mondbahnknotens

So besteht die prominenteste Partialtide M2 aus $2\tau = 28.98410424036$ Grad/h. Die in diesem Bericht verwendeten Partialtiden sind in der unten stehenden Tabelle dokumentiert.

Name	Zusammensetzung	Frequenz [Grad/h]	Name	Zusammensetzung	Frequenz [Grad/h]
Sa	$h - q$	0.04106667840	MO_3	$-s + 3*\tau$	42.92713984081
Ssa	$2*h$	0.08213727982	M_3	$3*\tau$	43.47615636054
MSm	$-2*h + p + s$	0.47152105332	NK_3	$p + 3*\tau$	43.48079817395
Mm	$-p + s$	0.54437470632	MP_3	$-2*h + s + 3*\tau$	43.94303560045
MSf	$-2*h + 2*s$	1.01589575964	MK_3	$s + 3*\tau$	44.02517288027
Mf	$2*s$	1.09803303946	SP_3	$-4*h + 3*s + 3*\tau$	44.95893136009
MStm	$-2*h + p + 3*s$	1.56955409278	SK_3	$-2*h + 3*s + 3*\tau$	45.04106863991
Mtm	$-p + 3*s$	1.64240774578	K_3	$3*s + 3*\tau$	45.12320591973
MSqm	$-2*h + 4*s$	2.11392879910	neu15	$2*h - 4*s + 4*\tau$	55.85427968162
Mqm	$-2*p + 4*s$	2.18678245210	neu16	$4*h - 4*s + 4*\tau$	55.93641696144

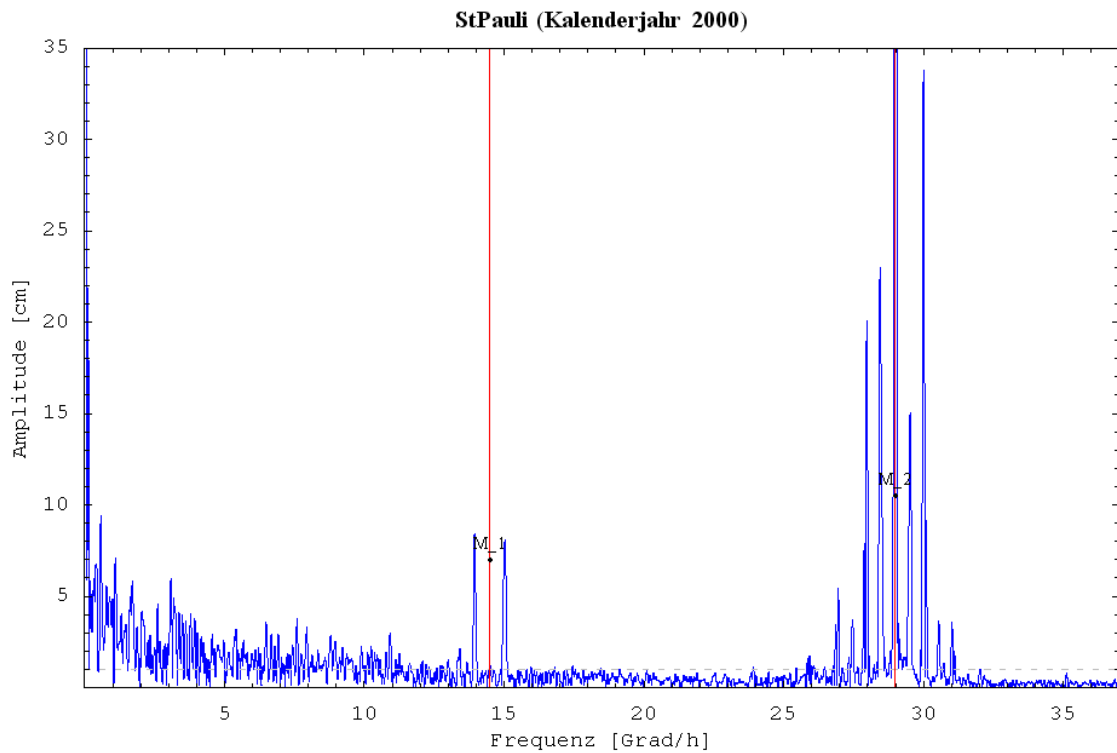


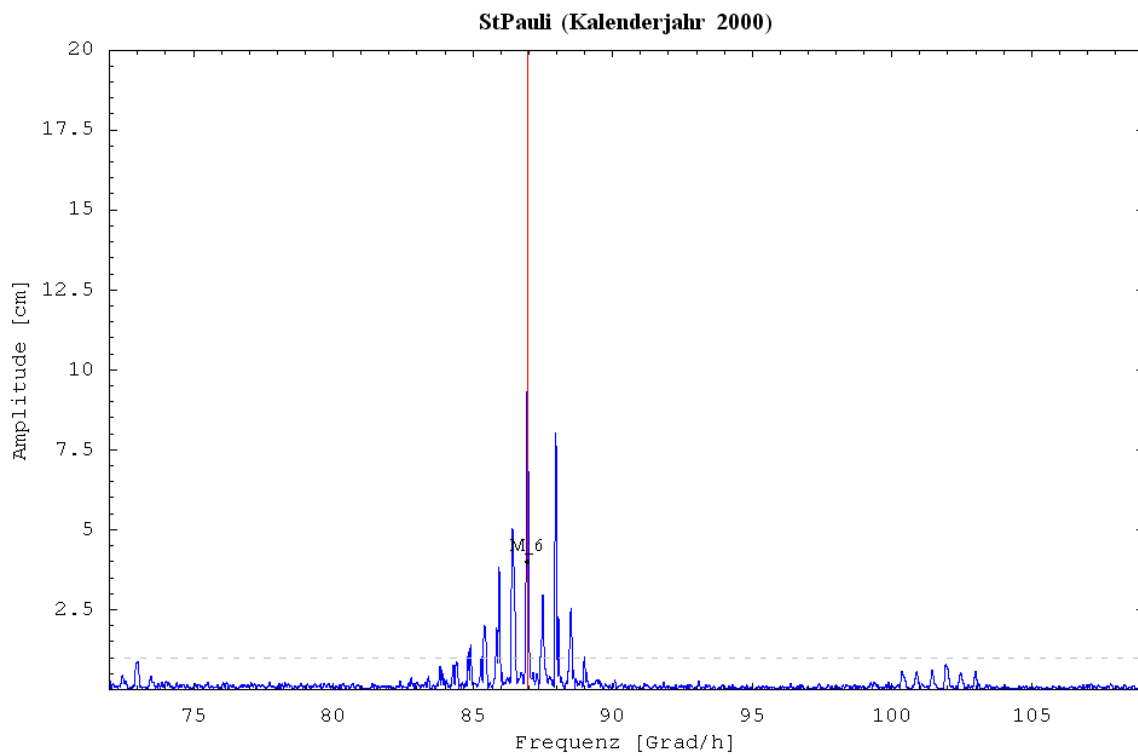
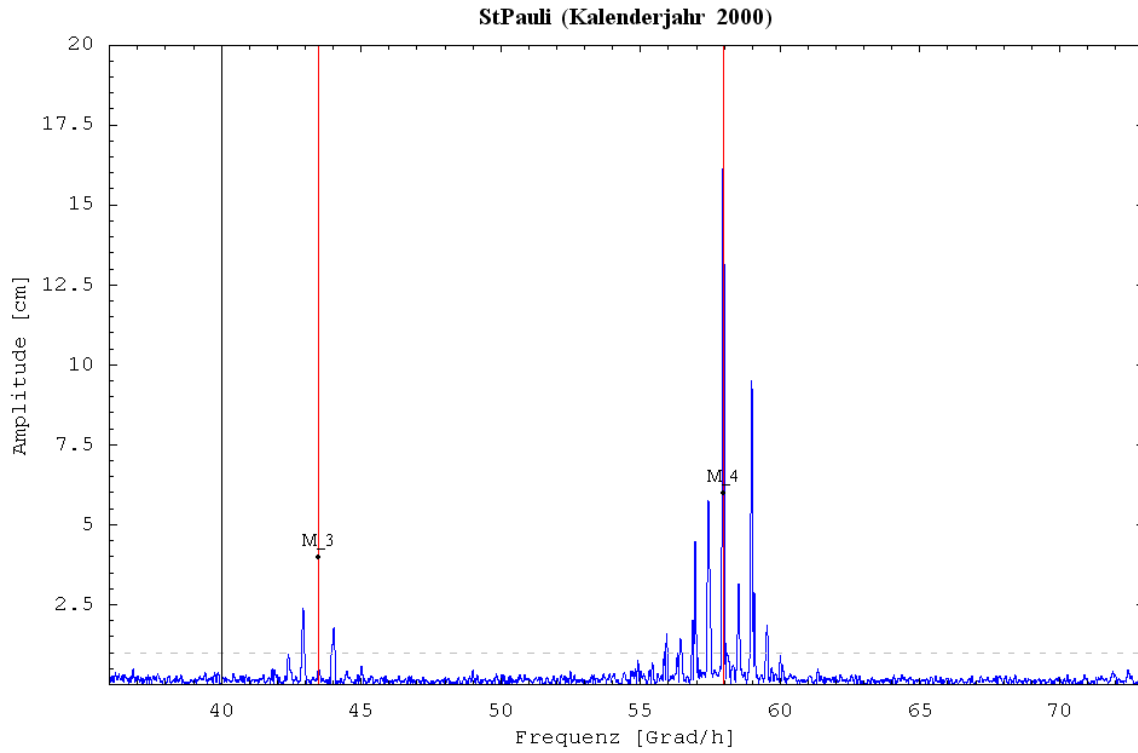
2Q_1	$2^*p - 3^*s + \tau$	12.85428618781	2MNS_4	$2^*h + p - 3^*s + 4^*\tau$	56.40793801476
SIGMA_1	$2^*h - 3^*s + \tau$	12.92713984081	neu17	$4^*h - p - 3^*s + 4^*\tau$	56.48079166776
neu01	$-h - p - 2^*s + \tau$	13.34830862740	3MK_4	$-2^*s + 4^*\tau$	56.87017544126
Q_1	$p - 2^*s + \tau$	13.39866089413	3MS_4	$2^*h - 2^*s + 4^*\tau$	56.95231272108
RHO_1	$2^*h - p - 2^*s + \tau$	13.47151454713	MN_4	$p - s + 4^*\tau$	57.42383377440
neu02	$-4^*h + 2^*p - s + \tau$	13.78804466763	neu18	$2^*h - p - s + 4^*\tau$	57.49668742740
O_1	$-s + \tau$	13.94303560045	neu19	$-h + 4^*\tau$	57.92713984081
TAU_1	$2^*h - s + \tau$	14.02517288027	M_4	$4^*\tau$	57.96820848072
M_1	τ	14.49205212018	2MKS_4	$2^*h + 4^*\tau$	58.05034576054
NO_1	$p + \tau$	14.49669393359	SN_4	$-2^*h + p + s + 4^*\tau$	58.43972953404
KAPPA_1	$2^*h - p + \tau$	14.56954758659	3MN_4	$-p + s + 4^*\tau$	58.51258318704
PI_1	$-3^*h + q + s + \tau$	14.91786468169	neu20	$-3^*h + 2^*s + 4^*\tau$	58.94303560045
P_1	$-2^*h + s + \tau$	14.95893136009	MS_4	$-2^*h + 2^*s + 4^*\tau$	58.98410424036
S_1	$-h + q + s + \tau$	15.00000196151	MK_4	$2^*s + 4^*\tau$	59.06624152018
K_1	$s + \tau$	15.04106863991	2MSN_4	$-2^*h - p + 3^*s + 4^*\tau$	59.52847894668
PSI_1	$h - q + s + \tau$	15.08213531831	S_4	$-4^*h + 4^*s + 4^*\tau$	60.00000000000
PHI_1	$2^*h + s + \tau$	15.12320591973	SK_4	$-2^*h + 4^*s + 4^*\tau$	60.08213727982
THETA_1	$-2^*h + p + 2^*s + \tau$	15.51258969323	3MO_5	$s + 5^*\tau$	73.00927712063
J_1	$-p + 2^*s + \tau$	15.58544334623	neu22	$4^*h - 4^*s + 6^*\tau$	84.92052120180
SO_1	$-2^*h + 3^*s + \tau$	16.05696439955	neu23	$2^*h + p - 3^*s + 6^*\tau$	85.39204225512
OO_1	$3^*s + \tau$	16.13910167937	neu24	$4^*h - p - 3^*s + 6^*\tau$	85.46489590812
NU_1	$-p + 4^*s + \tau$	16.68347638569	4MK_6	$-2^*s + 6^*\tau$	85.85427968162
neu04	$6^*h - 6^*s + 2^*\tau$	25.93641696144	2NM_6	$2^*p - 2^*s + 6^*\tau$	85.86356330844
neu05	$2^*h + p - 5^*s + 2^*\tau$	26.32580073494	4MS_6	$2^*h - 2^*s + 6^*\tau$	85.93641696144
neu07	$6^*h - p - 5^*s + 2^*\tau$	26.48079166776	2MN_6	$p - s + 6^*\tau$	86.40793801476
3M2K_2	$-4^*s + 2^*\tau$	26.78803816144	neu25	$2^*h - p - s + 6^*\tau$	86.48079166776
neu08	$h - 4^*s + 2^*\tau$	26.82910680135	M_6	$6^*\tau$	86.95231272108
3M{SK}_2	$2^*h - 4^*s + 2^*\tau$	26.87017544126	MSN_6	$-2^*h + p + s + 6^*\tau$	87.42383377440
3M2S_2	$4^*h - 4^*s + 2^*\tau$	26.95231272108	4MN_6	$-p + s + 6^*\tau$	87.49668742740
MVS_2	$-p - 3^*s + 2^*\tau$	27.33241286776	MNK_6	$p + s + 6^*\tau$	87.50597105422
OQ_2	$p - 3^*s + 2^*\tau$	27.34169649458	2MS_6	$-2^*h + 2^*s + 6^*\tau$	87.96820848072
EPS_2	$2^*h + p - 3^*s + 2^*\tau$	27.42383377440	2MK_6	$2^*s + 6^*\tau$	88.05034576054
neu09	$4^*h - p - 3^*s + 2^*\tau$	27.49668742740	2SN_6	$-4^*h + p + 3^*s + 6^*\tau$	88.43972953404
O_2	$-2^*s + 2^*\tau$	27.88607120090	3MSN_6	$-2^*h - p + 3^*s + 6^*\tau$	88.51258318704
2N_2	$2^*p - 2^*s + 2^*\tau$	27.89535482772	2SM_6	$-4^*h + 4^*s + 6^*\tau$	88.98410424036
MU_2	$2^*h - 2^*s + 2^*\tau$	27.96820848072	MSK_6	$-2^*h + 4^*s + 6^*\tau$	89.06624152018
neu11	$4^*h - 2^*p - 2^*s + 2^*\tau$	28.04106213372	S_6	$-6^*h + 6^*s + 6^*\tau$	90.00000000000
3M{SN}_2	$-2^*h - p - s + 2^*\tau$	28.34830862740	neu26	$2^*h + p - 3^*s + 8^*\tau$	114.37614649548
3M{KN}_2	$-p - s + 2^*\tau$	28.43044590722	5MK_8	$-2^*s + 8^*\tau$	114.83838392198
N_2	$p - s + 2^*\tau$	28.43972953404	5MS_8	$2^*h - 2^*s + 8^*\tau$	114.92052120180
NU_2	$2^*h - p - s + 2^*\tau$	28.51258318704	3MN_8	$p - s + 8^*\tau$	115.39204225512
unnamed1	$-2^*h + 2^*\tau$	28.90196696054	neu27	$2^*h - p - s + 8^*\tau$	115.46489590812
GAMMA_2	$-2^*h + 2^*p + 2^*\tau$	28.91125058736	M_8	$8^*\tau$	115.93641696144
unnamed2	$-h + 2^*\tau$	28.94303560045	2MSN_8	$-2^*h + p + s + 8^*\tau$	116.40793801476
M_2	$2^*\tau$	28.98410424036	5MN_8	$-p + s + 8^*\tau$	116.48079166776
unnamed3	$h + 2^*\tau$	29.02517288027	3MS_8	$-2^*h + 2^*s + 8^*\tau$	116.95231272108
DELTA_2	$2^*h + 2^*\tau$	29.06624152018	3MK_8	$2^*s + 8^*\tau$	117.03445000090
neu12	$4^*h - 2^*p + 2^*\tau$	29.13909517318	neu28	$-2^*h - p + 3^*s + 8^*\tau$	117.49668742740
LABDA_2	$-2^*h + p + s + 2^*\tau$	29.45562529368	2{MS}_8	$-4^*h + 4^*s + 8^*\tau$	117.96820848072
neu13	$-h - p + s + 2^*\tau$	29.48741030677	2MSK_8	$-2^*h + 4^*s + 8^*\tau$	118.05034576054
L_2	$-p + s + 2^*\tau$	29.52847894668	4MN_10	$p - s + 10^*\tau$	144.37614649548



T_2	$-3*h + q + 2*s + 2*\tau$	29.95893332160	M_10	$10*\tau$	144.92052120180
S_2	$-2*h + 2*s + 2*\tau$	30.00000000000	neu29	$-2*h + p + s + 10*\tau$	145.39204225512
R_2	$-h - q + 2*s + 2*\tau$	30.04106667840	4MS_10	$-2*h + 2*s + 10*\tau$	145.93641696144
3M2N_2	$-2*p + 2*s + 2*\tau$	30.07285365300	4MK_10	$2*s + 10*\tau$	146.01855424126
K_2	$2*s + 2*\tau$	30.08213727982	neu30	$-2*h - p + 3*s + 10*\tau$	146.48079166776
MSN_2	$-2*h - p + 3*s + 2*\tau$	30.54437470632	neu31	$-4*h + 4*s + 10*\tau$	146.95231272108
ZETA_2	$-2*h + p + 3*s + 2*\tau$	30.55365833314	M_12	$12*\tau$	173.90462544216
ETA_2	$-p + 3*s + 2*\tau$	30.62651198614	5MS_12	$-2*h + 2*s + 12*\tau$	174.92052120180
2SM_2	$-4*h + 4*s + 2*\tau$	31.01589575964	5MN_12	$-h + p + 2*s + 12*\tau$	174.96623165512
neu14	$-2*h + 4*s + 2*\tau$	31.09803303946	5MK_12	$2*s + 12*\tau$	175.00265848162
2KM_2	$4*s + 2*\tau$	31.18017031928	M_14	$14*\tau$	202.88872968252
NO_3	$p - 2*s + 3*\tau$	42.38276513449	6MS_14	$-2*h + 2*s + 14*\tau$	203.90462544216

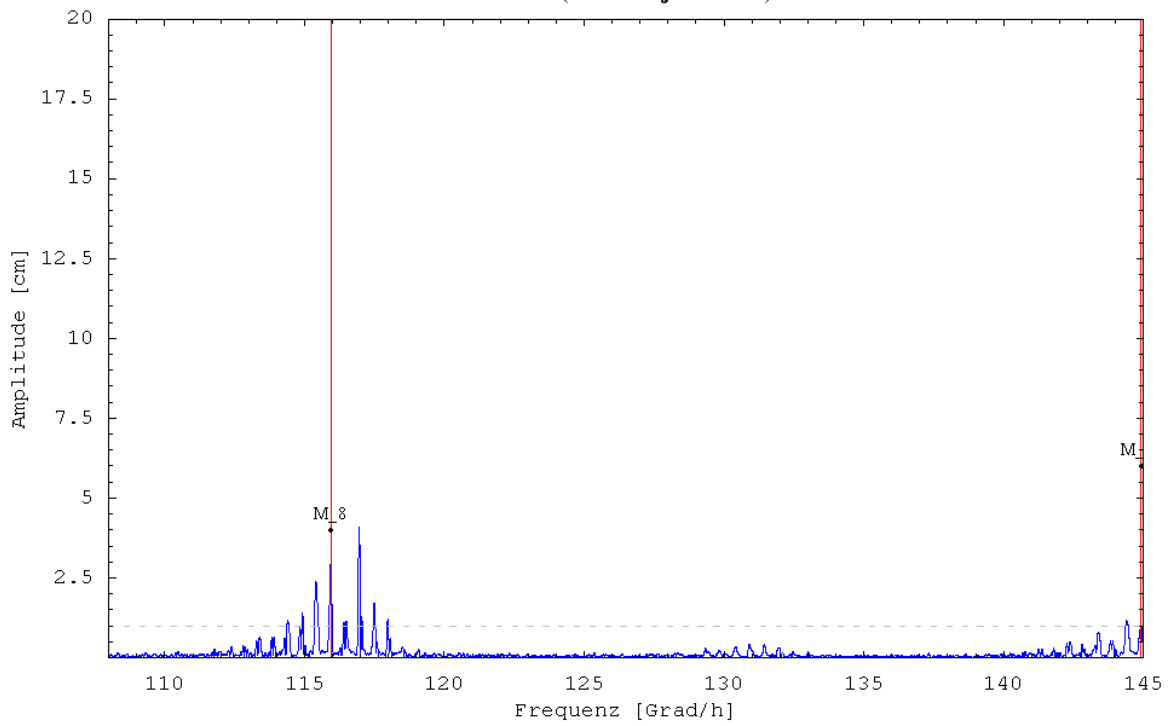
IV. Spektrum des Pegels St.Pauli für das Kalenderjahr 2000



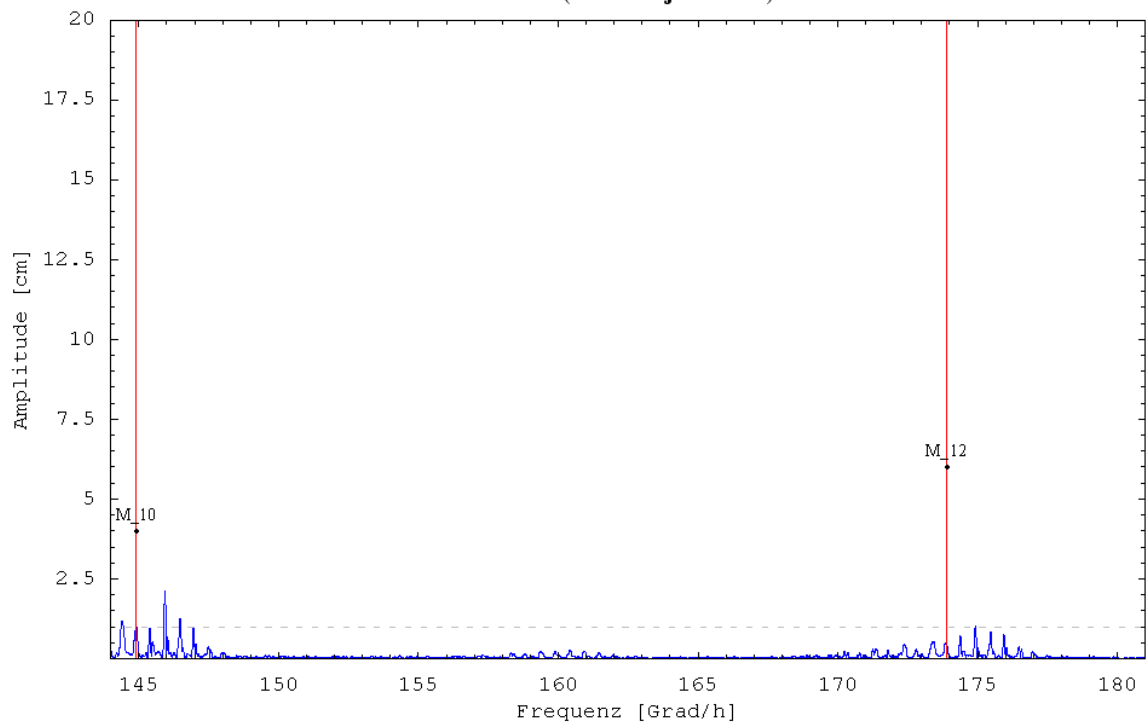


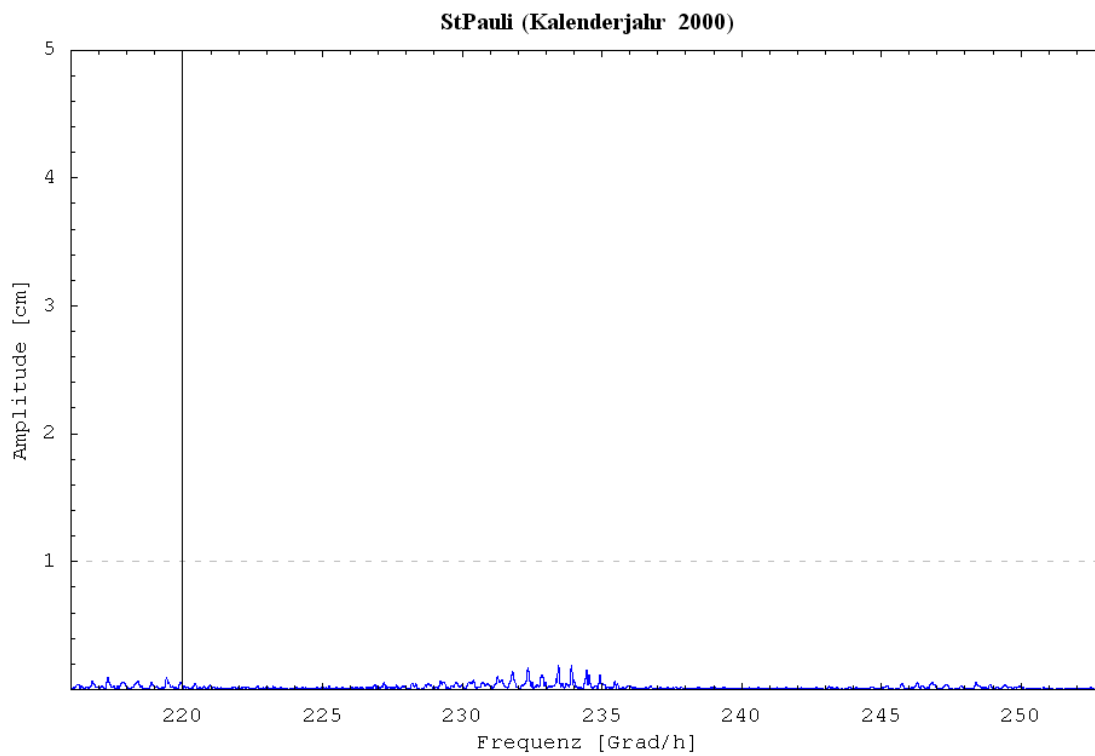
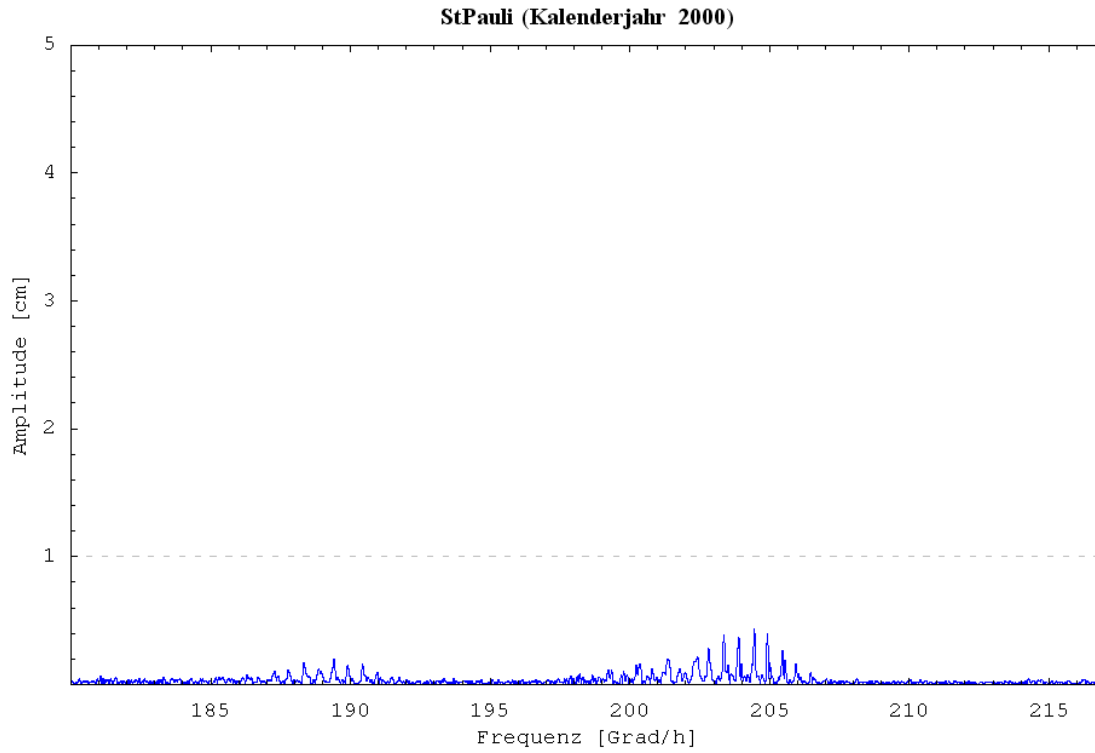


StPauli (Kalenderjahr 2000)



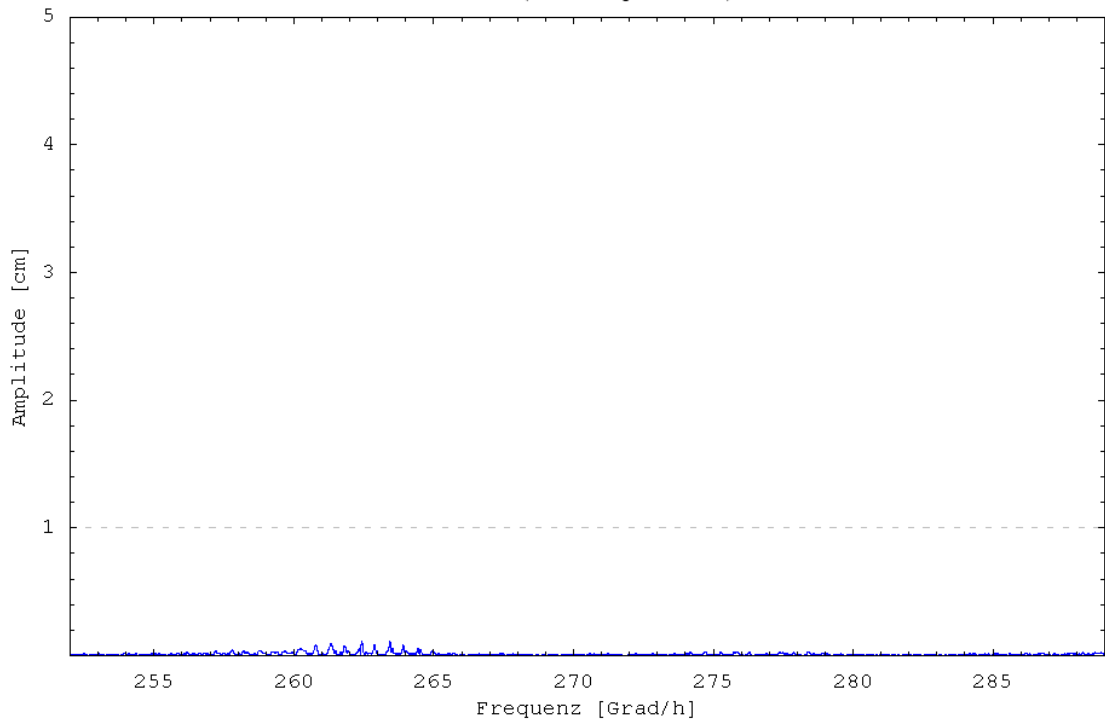
StPauli (Kalenderjahr 2000)



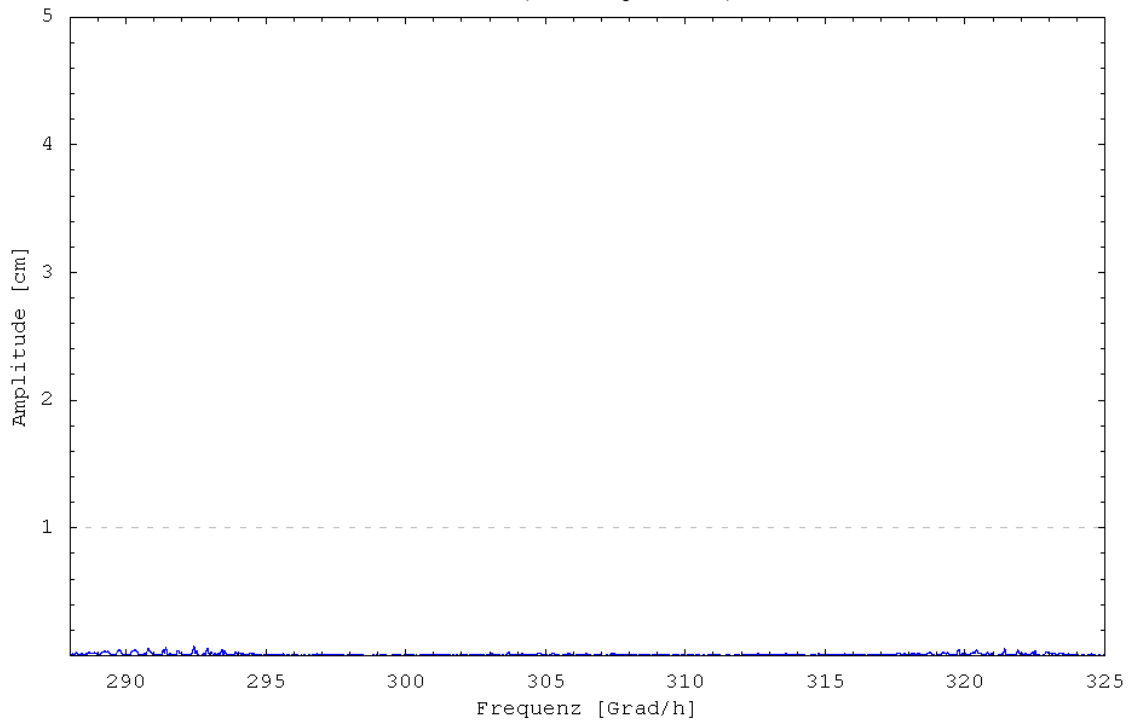


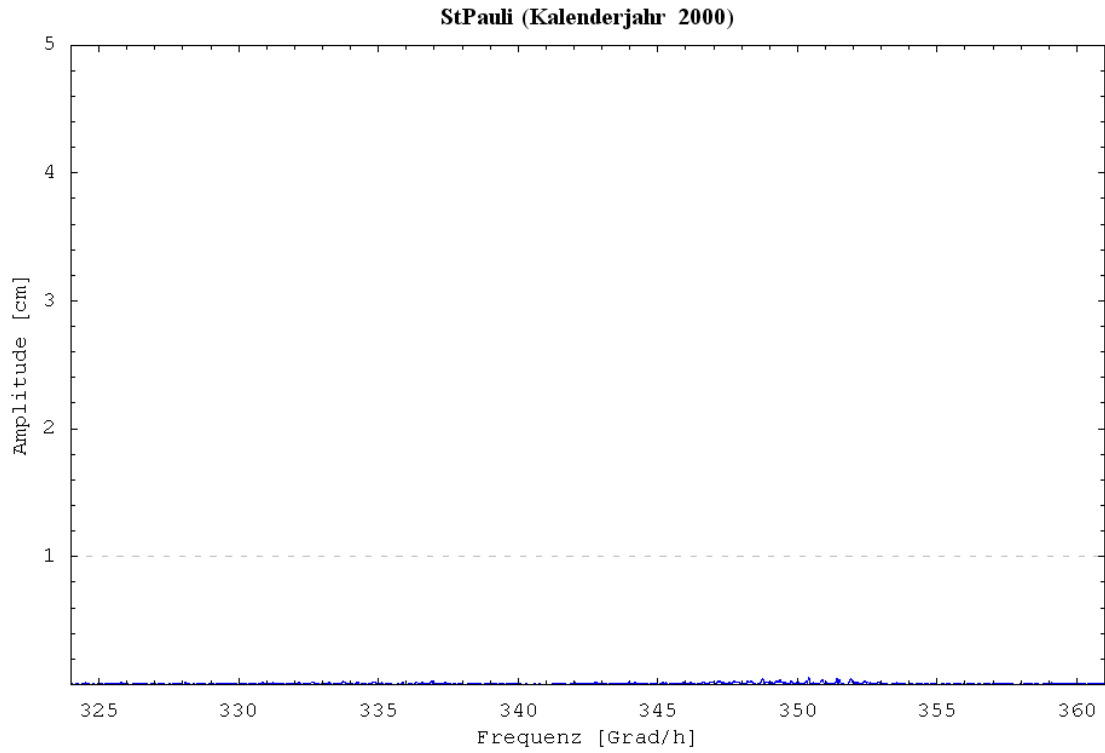


StPauli (Kalenderjahr 2000)



StPauli (Kalenderjahr 2000)





V. Amplituden und Phasen des Pegels St.Pauli

		Amplituden der Partialtiden StPauli [cm]												
Name	Frequenz [Grad/h]	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Q_1	13.39866089	2.7	2.1	2.1	2.2	3.6	2.5	2.4	1.9	2.9	2.2	4.1	3.6	3.3
O_1	13.9430356	8.6	7.2	7.0	6.6	6.8	6.6	8.1	8.4	8.6	9.8	9.6	10.5	10.5
M_1	14.49205212	2.1	1.5	1.0	1.0	0.9	0.6	0.7	1.2	1.3	1.8	1.8	1.7	1.7
K_1	15.04106864	8.5	8.2	7.2	7.3	3.6	7.4	7.6	7.7	7.3	7.5	8.8	9.1	8.7
P_1	14.95893136	4.0	3.8	3.5	4.4	0.5	3.9	4.4	4.6	4.2	3.9	3.9	3.9	4.0
S_1	15.00000196	1.4	1.7	1.5	1.3	7.8	1.8	1.5	1.1	1.2	1.1	1.3	1.0	1.1
neu04	25.93641696	1.6	1.6	1.5	1.2	1.7	1.8	1.5	1.7	2.0	1.3	1.8	2.5	2.0
neu05	26.32580073	1.2	0.3	1.2	0.8	0.7	1.3	1.1	0.6	1.3	1.6	1.0	1.3	1.3
neu07	26.48079167	1.1	0.9	0.9	1.5	1.3	1.8	1.3	1.0	1.9	1.9	1.2	1.9	1.5
3M2S_2	26.95231272	5.1	4.9	5.1	5.7	4.8	5.2	5.7	5.4	5.7	6.1	5.6	6.5	6.3
3M(SK)_2	26.87017544	2.1	2.2	2.3	2.3	2.1	1.2	2.8	3.2	3.6	3.0	3.8	4.3	4.3
EPS_2	27.42383377	5.7	3.7	2.0	3.2	4.5	4.4	4.3	2.7	4.4	5.5	5.2	2.7	3.1
neu09	27.49668743	3.8	3.4	3.6	3.3	3.8	3.4	2.8	2.5	4.0	4.0	4.5	4.2	4.4
OO_2	27.34169649	1.8	1.5	1.1	1.0	1.4	1.0	1.6	1.6	2.3	2.2	1.6	2.0	2.8
MU_2	27.96820848	20.5	19.9	19.9	19.4	19.6	20.3	20.7	20.0	21.5	21.8	21.5	22.2	22.0
O_2	27.8860712	3.9	4.2	5.9	6.2	4.5	2.0	4.1	7.7	6.5	5.4	5.3	9.1	10.8
neu11	28.04106213	1.4	1.3	1.2	0.7	1.2	1.3	1.7	1.7	0.9	1.1	1.1	0.5	1.2
N_2	28.43972953	24.1	22.1	21.5	21.8	22.7	23.1	23.7	22.8	23.4	23.5	23.3	23.4	22.5
NU_2	28.51258319	10.3	9.7	9.3	11.4	10.8	9.4	9.6	9.5	12.1	11.0	10.2	11.7	11.2
M_2	28.98410424	157.9	153.3	152.8	153.5	155.1	155.5	154.5	155.1	158.3	157.1	154.9	158.4	158.0
DELTA_2	29.06624152	6.3	2.8	1.6	0.8	3.3	1.5	4.3	2.6	0.7	3.6	4.5	2.5	2.6
unnamed2	28.9430356	4.2	5.3	4.1	2.2	3.4	5.0	2.4	5.7	2.2	4.9	1.8	5.8	5.8
unnamed3	29.02517288	2.5	1.6	0.5	1.8	1.0	1.5	0.4	1.6	0.9	0.6	1.3	2.0	2.2
neu12	29.13909517	1.6	0.2	1.1	0.9	0.0	1.0	1.5	1.7	1.1	1.6	1.0	0.7	1.3
unnamed1	28.90196696	1.1	1.8	1.7	1.0	0.6	1.7	5.2	0.8	6.1	2.3	4.3	2.5	2.0
L_2	29.52847895	15.8	14.0	14.7	15.4	15.2	15.0	15.5	14.9	15.8	15.6	14.8	16.1	16.0
LABDA_2	29.45562529	6.1	6.3	6.3	5.9	5.9	5.4	6.7	5.8	6.4	6.0	6.9	7.2	6.2
neu13	29.48741031	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	0.5	0.2	0.1	0.4	0.5	0.2	0.4	0.4
S_2	30	34.6	33.0	32.3	32.8	32.3	33.3	34.1	33.8	35.1	35.0	36.3	36.7	37.4
K_2	30.08213728	9.0	8.9	7.8	6.8	7.8	8.2	8.1	8.7	10.3	11.7	12.3	13.7	14.9
T_2	29.95893332	2.7	1.9	1.6	1.5	1.4	1.6	2.0	1.7	1.4	1.6	1.9	1.7	1.4
R_2	30.04106668	0.9	0.3	0.5	1.0	0.8	0.2	0.9	0.4	0.6	0.4	1.2	0.5	0.2
MSN_2	30.54437471	3.0	2.9	2.8	2.8	2.5	2.3	2.5	3.6	2.9	3.4	3.2	3.8	3.9
2SM_2	31.01589576	3.9	2.8	3.4	3.5	3.5	3.6	3.7	3.6	3.8	3.7	3.9	4.4	4.3
neu14	31.09803304	1.3	1.2	1.5	1.1	1.3	1.5	1.2	1.9	1.5	1.4	2.7	2.6	3.0
NO_3	42.38276513	0.8	0.9	0.8	1.0	0.8	1.0	0.9	0.9	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1
MO_3	42.92713984	2.8	2.2	2.0	2.1	2.2	2.2	2.4	2.4	2.6	2.8	2.8	3.0	3.0
M_3	43.47615636	0.6	0.9	0.9	0.7	0.4	0.5	0.8	0.5	0.3	0.8	1.0	1.1	0.7
MK_3	44.02517288	2.0	1.8	1.5	1.6	1.9	1.6	1.6	1.8	1.8	1.9	1.9	2.3	2.1
MP_3	43.9430356	1.1	1.2	1.3	1.0	1.0	0.7	0.7	1.1	0.9	1.1	1.1	1.1	1.3
neu16	55.93641696	1.3	1.4	1.6	1.6	1.3	1.2	1.5	1.6	1.7	1.6	1.2	1.5	1.6
neu15	55.85427968	0.3	0.5	0.8	0.8	0.6	0.4	0.8	1.0	1.0	0.7	0.8	0.9	1.2
2MNS_4	56.40793801	2.2	2.1	1.4	1.4	1.9	1.9	2.1	1.2	1.9	2.5	2.2	1.3	1.4
neu17	56.48079167	1.5	1.7	1.6	1.3	1.3	1.4	1.4	0.9	1.5	1.6	1.4	1.2	1.5
3MS_4	56.95231272	4.5	4.9	5.1	4.3	4.5	4.3	4.6	4.5	4.4	5.1	4.2	4.4	4.9
3MK_4	56.87017544	0.6	0.8	1.5	1.9	1.3	0.5	0.8	2.0	2.0	1.1	0.5	2.1	2.7
MN_4	57.42383377	6.1	6.7	6.7	5.8	6.0	5.9	6.3	5.7	5.8	6.5	5.7	5.9	5.4
neu18	57.49668743	2.5	3.4	3.0	3.4	2.8	2.6	2.7	2.4	2.9	3.4	2.3	2.6	2.4
M_4	57.96820848	18.0	19.8	20.5	19.0	18.8	17.7	17.7	17.7	17.3	19.0	16.5	16.5	17.2
neu19	57.92713984	1.1	2.7	2.5	1.5	1.6	1.0	2.2	2.6	1.5	1.1	1.3	1.5	2.2
3MN_4	58.51258319	2.8	2.9	3.8	3.6	3.1	3.0	3.2	3.2	3.2	3.7	2.4	3.6	3.6
SN_4	58.43972953	1.3	1.4	1.3	0.6	1.0	0.9	1.3	0.5	0.6	0.7	1.4	0.8	0.6
MS_4	58.98410424	9.6	10.0	10.0	9.7	9.3	9.0	9.4	9.5	9.5	10.3	9.4	9.3	10.2
MK_4	59.06624152	2.5	3.1	2.5	1.8	2.3	2.7	2.7	2.7	3.0	4.1	3.4	3.5	4.2
neu20	58.9430356	1.2	1.5	1.1	0.6	0.6	0.5	1.3	1.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9
2MSN_4	59.52847895	2.0	1.8	1.7	2.0	1.8	1.6	1.7	1.8	1.4	2.4	1.9	1.9	2.0
S_4	60	1.0	0.1	0.7	0.8	0.7	0.8	1.1	0.9	0.5	0.8	0.8	1.0	1.1
SK_4	60.08213728	0.3	0.2	0.6	0.3	0.1	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.7	0.7	0.8
3MO_5	73.00927712	1.0	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.9	1.0	0.7	0.9	1.0	0.8
neu22	84.9205212	1.0	1.2	1.3	1.4	1.1	1.4	1.5	1.4	1.2	1.2	1.5	1.6	1.5
neu23	85.39204226	2.8	2.0	1.5	1.9	2.3	2.4	2.5	1.8	2.2	2.6	2.7	1.9	1.9
neu24	85.46489591	1.4	1.3	1.3	1.8	1.6	1.5	1.6	1.5	2.0	1.5	1.6	2.1	2.0
4MS_6	85.93641696	3.7	3.7	3.3	3.5	3.4	4.0	3.9	3.8	3.8	3.7	3.9	4.1	3.9
4MK_6	85.85427968	0.1	1.2	1.6	1.7	0.7	0.6	1.3	1.9	1.7	0.6	1.0	2.3	2.2
2MN_6	86.40793801	5.0	4.1	4.0	4.5	4.7	4.6	4.7	4.9	4.8	4.6	4.8	5.3	4.8
neu25	86.48079167	2.4	2.4	2.7	3.4	2.9	2.5	2.7	3.2	3.4	2.5	2.4	3.5	3.2
M_6	86.95231272	9.5	8.6	8.3	9.1	9.6	9.9	9.3	9.8	9.7	9.2	9.3	9.6	9.2
4MN_6	87.49668743	2.0	2.2	2.6	2.7	2.6	2.2	2.6	2.9	3.0	1.7	1.5	3.3	3.1
MSN_6	87.42383377	1.6	1.5	1.1	0.8	1.0	1.6	1.6	1.1	0.7	1.9	2.2	1.3	0.7
2MS_6	87.96820848	7.6	6.8	6.9	7.5	7.3	7.7	7.9	8.0	8.4	7.6	8.6	9.3	9.2
2MK_6	88.05034576	1.8	1.7	1.5	1.2	1.4	2.0	2.2	2.1	2.2	2.8	3.0	3.5	3.5
3MSN_6	88.51258319	2.7	2.3	2.1	2.5	2.6	2.5	2.6	2.5	2.8	2.8	2.8	2.8	3.1
2SN_6	88.43972953	0.9	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.8	0.8	0.4	0.6	0.7	1.0	0.6
2SM_6	88.98410424	1.1	1.1	0.7	0.9	1.0	0.9	1.2	1.0	1.1	1.1	1.4	1.4	1.4
MSK_6	89.06624152	0.9	0.9	0.5	0.2	0.6	0.8	0.8	0.5	0.5	1.2	1.1	1.1	0.8
neu26	114.3761465	1.7	1.5	1.2	1.1	1.5	1.4	1.6	1.1	1.2	1.7	1.4	1.1	1.0
5MS_8	114.9205212	1.4	1.6	1.5	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.2	1.4	1.4	1.2	1.2
5MK_8	114.8383839	0.5	0.9	1.0	1.0	0.5	0.6	0.8	1.0	1.0	0.6	0.6	1.2	0.9
3MN_8	115.3920423	2.3	2.3	2.5	2.4	2.4	2.2	2.3	2.3	2.1	2.2	2.0	2.2	2.1
neu27	115.4648959	0.9	1.3	1.7	1.9	1.3	1.1	1.3	1.5	1.4	1.2	0.9	1.6	1.4
M_8	115.936417	3.2	3.2	3.1	3.2	3.3	3.1	2.9	2.9	2.7	2.9	2.7	2.4	2.5
2MSN_8	116.407938	1.6	1.6	1.1	0.9	1.3	1.5	1.4	1.1	1.1	1.7	1.7	1.1	1.1
5MN_8	116.4807917	0.3	0.7	1.2	1.0	0.8	0.4	0.9	1.1	1.1	0.4	0.5	1.2	1.0
3MS_8	116.9523127	3.8	4.0	4.2	4.2	3.9	3.9	4.0	4.1	3.9	3.8	3.9	4.0	4.2
3MK_8	117.03445	0.6	0.9	0.8	0.6	0.6	0.9	1.1	1.2	1.0	1.5	1.2	1.3	1.6
neu28	117.4966874	1.7	1.6	1.7	1.8	1.7	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.5	1.7	1.9
2(MS)_8	117.9682085	1.2	1.2	1.0	1.2	1.0	1.0	1.3	1.2	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4
2MSK_8	118.0503458	0.8	0.8	0.5	0.2	0.6	0.8	0.8	0.6	0.5	1.1	1.0	1.0	0.8
4MN_10	144.3761465	1.0	0.9	1.0	1.1	1.1	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.7	1.0	1.1
M_														



Name	Frequenz [Grad/h]	Phasen der Partialtiden StPauli in Grad (Bezugsjahr 1990) [Grad]												
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Q_1	13.39866089	138	159	129	146	151	139	132	136	142	149	175	150	162
O_1	13.9430356	2	4	1	7	12	20	22	27	28	27	21	18	18
M_1	14.49205212	293	297	278	274	280	259	317	323	307	299	290	273	281
K_1	15.04106864	356	354	347	345	344	339	338	333	333	337	338	336	344
P_1	14.95893136	332	316	320	340	284	330	323	326	325	324	330	336	326
S_1	15.00000196	155	146	156	155	159	136	152	144	149	158	171	141	157
neu04	25.93641696	12	8	341	330	324	341	329	337	330	332	333	337	331
neu05	26.32580073	59	81	48	98	54	68	92	93	108	85	99	112	96
neu07	26.48079167	54	51	84	50	51	56	54	87	46	47	42	46	43
3MS_2	26.95231272	196	200	190	188	183	184	180	180	184	188	189	188	185
3M(SK)_2	26.87017544	343	323	338	356	7	22	347	354	25	9	351	2	354
EPS_2	27.42383377	131	111	124	147	136	123	114	128	146	125	114	111	157
neu09	27.49668743	270	278	262	263	253	271	271	262	267	267	258	260	271
OQ_2	27.34169649	269	276	247	313	306	311	296	308	316	315	294	301	299
MU_2	27.96820848	43	40	36	35	37	37	36	35	33	36	37	41	41
O_2	27.8860712	191	149	167	200	223	212	177	204	228	228	197	194	209
neu11	28.04106213	23	307	306	307	319	293	319	355	12	359	357	13	9
N_2	28.43972953	320	319	320	321	321	320	319	318	320	323	319	324	325
NU_2	28.51258319	110	110	103	108	101	103	107	106	100	105	106	101	106
M_2	28.98410424	229	227	226	227	227	227	227	228	227	229	229	231	231
DELTA_2	29.06624152	262	190	128	289	241	198	144	159	181	208	220	196	219
unnamed2	28.9430356	306	353	330	327	340	350	315	337	355	7	317	357	354
unnamed3	29.02517288	99	187	354	83	127	175	135	164	241	231	83	174	179
neu12	29.13909517	205	281	112	355	1	130	129	33	119	58	189	209	35
unnamed1	28.90196696	181	151	168	200	149	182	169	150	175	216	188	187	162
L_2	29.52847895	326	322	319	320	323	320	322	321	323	327	326	322	325
LABDA_2	29.45625229	204	194	194	189	197	196	196	186	187	207	203	195	193
neu13	29.48741031	46	48	49	264	177	314	140	38	30	18	168	135	36
S_2	30	249	248	250	251	250	251	253	255	253	254	255	256	257
K_2	30.08213728	117	110	102	97	94	86	82	78	77	86	84	90	95
T_2	29.95893332	268	294	286	266	262	279	288	301	296	295	274	293	286
R_2	30.04106668	91	158	55	66	62	45	105	156	32	86	60	91	86
MSN_2	30.54437471	344	338	338	355	337	340	344	350	350	348	347	354	358
2SM_2	31.01589576	121	116	116	117	126	129	132	131	123	136	128	138	132
neu14	31.09803304	335	333	343	316	297	301	309	309	299	317	309	320	332
NO_3	42.38276513	338	345	351	340	3	1	359	348	1	13	17	8	2
MO_3	42.92713984	238	244	239	243	247	256	255	259	261	266	260	256	255
M_3	43.47615636	130	130	118	117	97	26	356	3	31	138	138	143	129
MK_3	44.02517288	240	228	228	229	217	215	214	217	225	219	220	224	230
MP_3	43.9430356	234	214	219	222	238	224	241	244	227	248	251	258	246
neu16	55.93641696	86	90	75	76	73	72	69	76	63	79	98	84	83
neu15	55.85427968	277	194	223	256	268	307	216	249	280	267	222	258	265
2MNS_4	56.40793801	18	1	3	22	17	8	0	5	17	16	3	10	44
neu17	56.48079167	161	169	140	159	144	159	166	162	155	156	146	159	170
3MS_4	56.95231272	292	287	275	282	281	283	286	286	277	281	289	298	296
3MK_4	56.87017544	144	355	41	90	120	185	20	85	131	125	77	68	101
MN_4	57.42383377	195	194	191	192	193	193	192	190	189	202	197	200	204
neu18	57.49668743	1	353	350	352	346	350	358	354	338	356	354	350	356
M_4	57.96820848	102	101	97	101	99	100	100	104	100	103	104	109	111
neu19	57.92713984	199	207	197	224	217	220	191	196	239	241	216	229	237
3MN_4	58.51258319	210	200	198	202	213	201	200	201	212	220	204	205	216
SN_4	58.43972953	143	130	101	106	132	143	133	131	121	130	154	114	165
MS_4	58.98410424	126	123	124	126	125	127	130	133	129	132	134	138	140
MK_4	59.06624152	358	340	328	334	330	323	319	319	308	334	326	335	342
neu20	58.9430356	174	205	195	224	186	195	199	206	246	210	198	221	223
2MSN_4	59.52847895	230	228	225	225	222	229	239	237	227	233	243	243	235
S_4	60	101	106	82	93	76	95	107	101	87	99	117	101	112
SK_4	60.08213728	356	334	292	354	12	305	294	296	349	1	313	312	302
3MO_5	73.00927712	227	234	218	217	214	208	207	208	191	186	212	199	217
neu22	84.9205212	44	56	40	32	29	30	31	27	13	35	51	43	38
neu23	85.39204226	333	316	322	342	335	323	315	322	326	327	313	320	351
neu24	85.46489591	125	121	101	116	114	114	112	100	105	112	109	105	124
4MS_6	85.93641696	242	245	239	236	233	234	236	234	229	232	237	244	241
4MK_6	85.85427968	158	297	354	48	105	243	324	27	89	185	329	10	59
2MN_6	86.40793801	161	159	158	164	160	158	159	156	152	159	161	163	167
neu25	86.48079167	328	312	305	319	320	309	308	305	305	314	311	305	324
M_6	86.95231272	65	66	62	65	62	61	61	61	58	61	64	66	68
4MN_6	87.49668743	172	158	159	170	178	159	150	157	174	178	149	151	178
MSN_6	87.42383377	147	132	117	132	150	155	125	130	161	174	142	122	167
2MS_6	87.96820848	87	86	87	90	88	87	90	86	90	94	97	96	96
2MK_6	88.05034576	329	312	300	293	298	287	280	277	274	278	286	287	295
3MSN_6	88.51258319	185	181	177	179	182	182	186	181	179	182	196	185	184
2SN_6	88.43972953	67	40	33	33	53	75	53	51	37	85	57	51	57
2SM_6	88.98410424	77	97	82	76	77	72	79	87	92	81	90	97	88
MSK_6	89.06624152	326	302	246	269	327	286	260	236	284	301	275	268	291
neu26	114.3761465	222	204	204	219	218	210	206	207	205	211	204	215	235
5MS_8	114.9205212	129	133	119	116	113	122	128	125	114	113	128	146	127
5MK_8	114.8383839	72	164	230	295	11	112	192	263	340	78	186	245	310
3MN_8	115.3920423	41	43	38	40	37	40	41	36	29	37	46	47	50
neu27	115.4648959	221	185	185	204	208	189	188	193	195	201	180	193	222
M_8	115.936417	302	302	294	299	297	299	295	298	291	296	301	304	302
2MSN_8	116.407938	55	37	32	55	58	56	39	46	59	69	50	56	82
5MN_8	116.4807917	60	14	35	52	77	45	6	33	75	116	326	25	71
3MS_8	116.9523127	336	330	331	333	332	334	336	337	331	334	341	347	346
3MK_8	117.03445	211	200	187	174	162	169	167	160	137	159	177	180	179
neu28	117.4966874	79	65	61	67	70	71	75	71	73	74	86	73	78
2(MS)_8	117.9682085	352	354	346	344	344	345	349	354	355	348	359	1	358
2MSK_8	118.0503458	227	199	157	229	223	179	164	156	182	199	182	178	199
4MN_10	144.3761465	320	330	322	328	316	319	325	318	300	310	327	333	326
M_10	144.9205212	219	221	202	213	213	213	200	204	193	213	211	203	200
neu29	145.3920423	347	327	324	349	347	342	328	335	345	355	344	345	10
4MS_10	145.936417	257	255	258	263	256	254	257	258	252	257	263	273	271
4MK_10	146.0185542	193	152	125	94	52	107							

VI. Zeitlich-räumlicher Verlauf der Partialtide M2

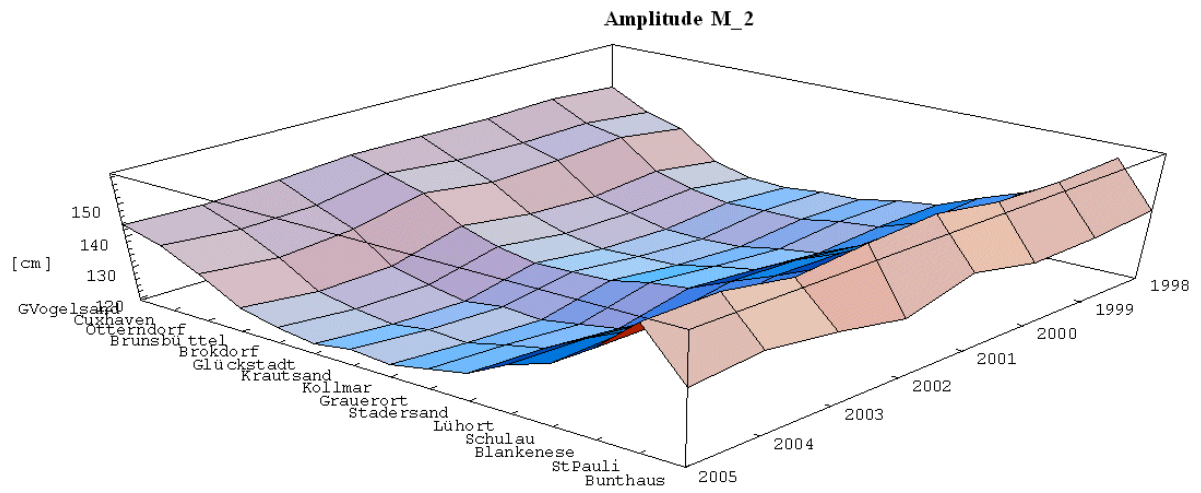


Bild 51 Die Amplitude der Partialtide M2 im zeitlich räumlichen Verlauf

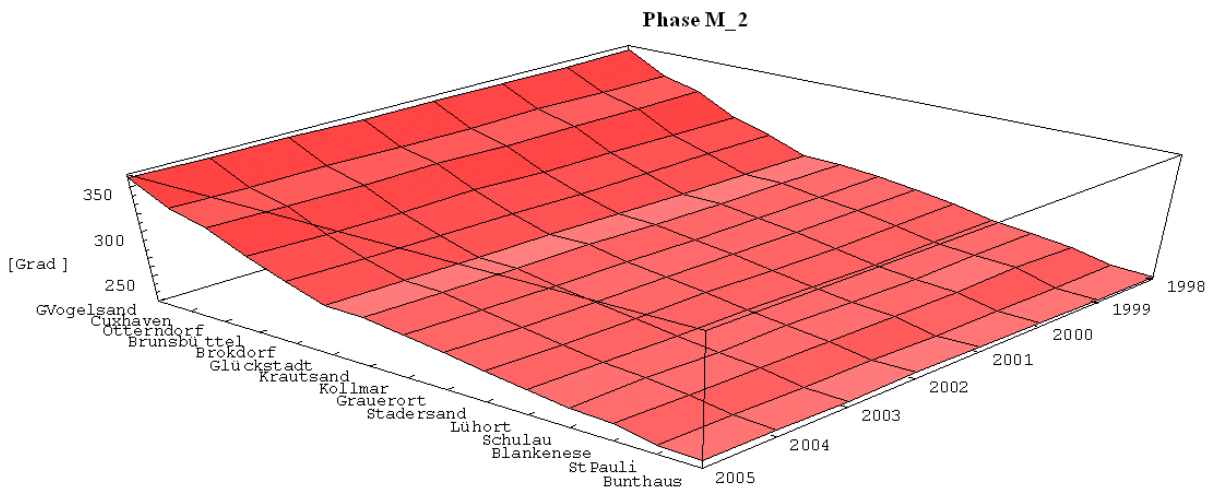


Bild 52 Die Phase der Partialtide M2 im zeitlich räumlichen Verlauf



VII. Koeffizienten aus der Regression von Modell 7

Für das Modell 7 (Kennwert Tidehub) wurden folgende Koeffizienten über den Zeitraum des Kalenderjahres 1998 ermittelt.

Modell 7:

$$\text{Kennwert}_{\text{Pegel}} = a \cdot \text{Kennwert}_{\text{Helgoland}} + b \cdot \text{Oberwasser}_{\text{NeuDarchau}}^n + c \cdot \text{Mittelwasser}_{\text{Pegel}} + z$$

Tabelle 4 Koeffizienten des Modells 7 (Kennwert Tidehub)

Koeffizienten des Modells 7 - Kennwert Tidehub					
Pegelort	z	a	c	b	n
BakeA	-11.395	1.168	0.043	2.27E-7	2.0476
GVogelsand	36.763	1.179	0.048	-0.019	0.0225
Cuxhaven	-6.365	1.058	0.082	0.028	0.8294
Otterndorf	-16.293	0.998	0.111	0.775	0.4357
Osteriff	-24.988	0.950	0.097	19.567	0.0702
Brunsbüttel	-97.002	0.904	0.105	68.270	0.0682
Brokdorf	-156.627	0.824	0.103	145.385	0.0355
Glückstadt	-195.919	0.768	0.107	190.851	0.0334
Krautsand	-268.309	0.771	0.106	271.481	0.0224
Kollmar	-197.642	0.762	0.112	197.372	0.0341
Grauerort	-233.528	0.766	0.120	230.214	0.0333
Stadersand	-264.334	0.758	0.131	261.365	0.0299
Lühort	-225.700	0.758	0.134	240.793	0.0275
Schulau	-228.998	0.775	0.138	250.906	0.0247
Blankenese	-213.355	0.778	0.142	252.189	0.0205
St.Pauli	-115.631	0.798	0.117	208.789	0.0076
Bunthaus	41.498	0.671	0.273	0.003	1.3653
Over	-36.806	0.520	0.472	0.044	1.1066
Geesthacht	43.049	0.316	0.832	19.549	0.4874

VIII. Entwicklung der Kennwerte seit 1998 bereinigt durch das Modell 7

Entwicklung des mittleren Tidehubs nach Bereinigung durch Modell 7								
MThb [cm]	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
BakeA	0.0	0.9	0.3	-0.7	0.0	0.2	0.3	0.1
GVogelsand	0.0	0.4	0.3	-0.4	1.3	2.5	1.7	1.7
Cuxhaven	0.0	1.3	-0.1	0.3	4.5	3.5	2.8	4.2
Otterndorf	0.0	2.3	-0.8	-2.3	3.3	0.3	-2.1	-1.3
Osteriff	0.0	3.8	1.4	-0.3	8.4	2.6	1.0	2.7
Brunsbüttel	0.0	2.6	-0.8	-1.1	3.7	-0.1	-0.4	0.4
Brokdorf	0.0	1.9	-1.1	-1.2	1.8	-0.3	0.3	0.7
Glückstadt	0.0	0.5	-2.7	-1.0	1.5	0.0	1.6	1.5
Krautsand	0.0	-1.0	-6.4	-3.9	-0.7	-0.4	3.1	3.1
Kollmar	0.0	-1.6	-4.7	-3.3	-1.5	-2.8	0.2	-0.2
Grauerort	0.0	-2.2	-4.9	-2.2	-2.0	-3.6	0.8	0.2
Stadersand	0.0	-2.7	-4.8	-1.4	-2.0	-3.0	2.2	1.4
Lühort	0.0	-3.0	-3.5	0.9	-0.6	-2.2	4.7	4.4
Schulau	0.0	-2.7	-2.6	1.3	-0.2	-1.5	6.1	4.4
Blankenese	0.0	-1.4	-0.8	3.7	-0.9	-0.4	7.0	5.6
St.Pauli	0.0	-1.0	0.2	5.6	2.8	0.5	9.9	9.1
Bunthaus	0.0	1.5	1.6	7.7	6.2	1.9	9.2	9.9
Over	0.0	1.0	1.0	6.3	6.9	1.0	7.6	10.5
Geesthacht	0.0	4.6	1.1	5.2	12.5	-8.2	-8.9	7.2

MThb	linearer Trend nach 2000		Schätzstandardabweichung nach Trendbereinigung [cm]
	Offset [cm]	Steigung [cm/a]	
BakeA	-0.2	0.1	0.4
GVogelsand	-0.3	0.4	0.8
Cuxhaven	-0.3	0.8	1.4
Otterndorf	0.0	-0.1	2.3
Osteriff	2.2	0.1	3.4
Brunsbüttel	-0.1	0.1	1.9
Brokdorf	-1.1	0.3	1.1
Glückstadt	-2.6	0.8	1.1
Krautsand	-7.7	2.0	1.0
Kollmar	-5.2	0.9	0.9
Grauerort	-5.2	0.9	1.4
Stadersand	-5.3	1.2	1.7
Lühort	-4.3	1.4	2.4
Schulau	-3.6	1.4	2.5
Blankenese	-1.9	1.2	3.0
St.Pauli	-0.8	1.6	3.4
Bunthaus	1.9	1.2	3.1
Over	1.0	1.3	3.3
Geesthacht	4.7	-0.9	9.4



Entwicklung des mittleren Tidehochwassers nach Bereinigung durch Modell 7								
MThw [cm]	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
BakeA	0.0	0.2	0.2	-0.6	0.0	-0.2	0.0	0.1
GVogelsand	0.0	-0.4	-0.6	-0.6	0.9	1.0	1.1	1.5
Cuxhaven	0.0	0.8	0.2	0.3	2.3	1.5	1.3	2.2
Otterndorf	0.0	1.0	-0.5	-0.9	1.5	-0.1	-0.8	0.0
Osteriff	0.0	1.3	-0.1	-0.4	2.6	0.8	0.2	0.9
Brunsbüttel	0.0	1.6	-0.2	-0.5	1.6	-0.6	-0.5	0.3
Brokdorf	0.0	0.7	-0.9	-0.9	0.6	-0.9	-0.8	-0.1
Glückstadt	0.0	0.2	-1.3	-0.5	1.0	0.3	0.8	1.0
Krautsand	0.0	-0.8	-3.4	-2.0	-0.2	0.2	1.3	1.4
Kollmar	0.0	-0.8	-1.9	-1.5	-0.4	-0.8	0.5	0.3
Grauerort	0.0	-1.2	-2.0	-0.8	-0.6	-1.1	0.9	0.5
Stadersand	0.0	-1.2	-1.8	-0.3	-0.5	-0.6	1.9	1.3
Lühort	0.0	-1.4	-1.3	0.4	-0.1	-0.1	2.9	2.6
Schulau	0.0	-1.2	-0.9	0.7	0.2	0.0	3.6	3.5
Blankenese	0.0	-1.2	-0.8	1.2	-0.7	-0.8	2.8	2.0
St.Pauli	0.0	-1.0	-0.5	2.9	1.6	-0.3	4.1	3.8
Bunthaus	0.0	0.3	0.2	3.4	2.7	-0.4	3.8	4.4
Over	0.0	0.1	-0.2	2.4	3.1	-0.5	3.2	4.6
Geesthacht	0.0	2.2	-0.1	1.9	6.1	-4.3	-5.1	2.0

MThw	linearer Trend nach 2000		Schätzstandardabweichung nach Trendbereinigung [cm]
	Offset [cm]	Steigung [cm/a]	
BakeA	-0.2	0.0	0.3
GVogelsand	-1.0	0.4	0.4
Cuxhaven	0.1	0.3	0.7
Otterndorf	-0.3	0.0	1.0
Osteriff	0.2	0.1	1.2
Brunsbüttel	0.0	0.0	0.9
Brokdorf	-0.8	0.1	0.7
Glückstadt	-1.3	0.4	0.6
Krautsand	-3.9	1.0	0.6
Kollmar	-2.3	0.5	0.4
Grauerort	-2.2	0.5	0.6
Stadersand	-2.2	0.6	0.8
Lühort	-2.0	0.8	0.9
Schulau	-1.9	0.9	1.1
Blankenese	-1.3	0.5	1.4
St.Pauli	-0.4	0.7	1.8
Bunthaus	0.4	0.5	1.9
Over	-0.2	0.7	1.8
Geesthacht	2.2	-0.6	4.6



Entwicklung des mittleren Tideniedrigwassers nach Bereinigung durch Modell 7								
MTnw [cm]	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
BakeA	0.0	-0.7	-0.2	0.2	0.0	-0.4	-0.3	0.1
GVogelsand	0.0	-0.7	-0.7	-0.3	-0.2	-1.1	-0.6	-0.3
Cuxhaven	0.0	-0.5	0.2	0.1	-2.2	-2.2	-1.7	-2.1
Otterndorf	0.0	-1.3	0.2	1.4	-1.8	-0.6	1.2	1.1
Osteeriff	0.0	-2.4	-1.5	-0.2	-6.0	-1.9	-1.0	-2.0
Brunsbüttel	0.0	-0.8	0.7	0.5	-1.9	-0.4	-0.2	-0.4
Brokdorf	0.0	-1.1	0.1	0.2	-1.3	-0.8	-1.3	-1.1
Glückstadt	0.0	-0.2	1.4	0.4	-0.6	0.0	-1.1	-0.8
Krautsand	0.0	0.2	2.9	1.8	0.4	0.3	-2.1	-2.0
Kollmar	0.0	0.9	2.7	1.7	1.0	1.8	0.1	0.2
Grauerort	0.0	1.1	2.9	1.3	1.4	2.2	-0.2	0.0
Stadersand	0.0	1.5	3.0	1.0	1.5	2.2	-0.6	-0.3
Lühort	0.0	1.7	2.1	-0.6	0.5	1.8	-2.0	-2.1
Schulau	0.0	1.6	1.6	-0.7	0.4	1.3	-2.7	-1.2
Blankenese	0.0	0.3	0.0	-2.6	0.2	-0.6	-4.5	-3.9
St.Pauli	0.0	0.0	-0.9	-2.7	-1.8	-1.3	-6.0	-5.6
Bunthaus	0.0	-1.0	-1.7	-4.2	-3.3	-2.1	-5.5	-5.4
Over	0.0	-0.9	-1.5	-4.0	-3.8	-1.7	-4.7	-6.1
Geesthacht	0.0	-2.4	-1.5	-3.4	-6.6	4.0	4.1	-5.0

MTnw	linearer Trend nach 2000		Schätzstandardabweichung nach Trendbereinigung [cm]
	Offset [cm]	Steigung [cm/a]	
BakeA	-0.1	0.0	0.3
GVogelsand	-0.6	0.0	0.4
Cuxhaven	0.4	-0.5	0.8
Otterndorf	-0.3	0.1	1.4
Osteeriff	-2.0	0.0	2.3
Brunsbüttel	0.3	-0.2	1.0
Brokdorf	0.3	-0.3	0.5
Glückstadt	1.4	-0.4	0.5
Krautsand	3.8	-1.0	0.5
Kollmar	2.9	-0.5	0.5
Grauerort	3.1	-0.5	0.8
Stadersand	3.2	-0.6	1.0
Lühort	2.3	-0.7	1.5
Schulau	1.7	-0.5	1.4
Blankenese	0.7	-0.7	1.7
St.Pauli	0.2	-0.9	1.5
Bunthaus	-1.6	-0.6	1.3
Over	-1.3	-0.7	1.4
Geesthacht	-3.0	0.4	5.0

IX. Nodaltide

Ist es möglich das in Kapitel 3.4 beschriebene Nodaltidesignal sichtbar zu machen bzw. sogar zu quantifizieren?

Informationen über langperiodische Phänomene finden sich in den langjährigen Aufzeichnungen der Scheitelwerte. Der Tidehub ist hierfür am Besten geeignet, da er bereits um das Mittelwasser bereinigt ist. Eine Regression mit einer Sinusfunktion variabler Frequenz zeigt auf, an welchen Frequenzen wie viel Energie (Amplitudenquadrate) vorhanden ist. Für den Pegel Helgoland sieht diese Art Amplitudenspektrum wie folgt aus (s. *Bild 53*).

Das größte Maximum, mit etwas über 3 cm, ist bei einer Periodendauer von 18,6 Jahren zu finden – was genau der Periodendauer der Nodaltide entspricht.

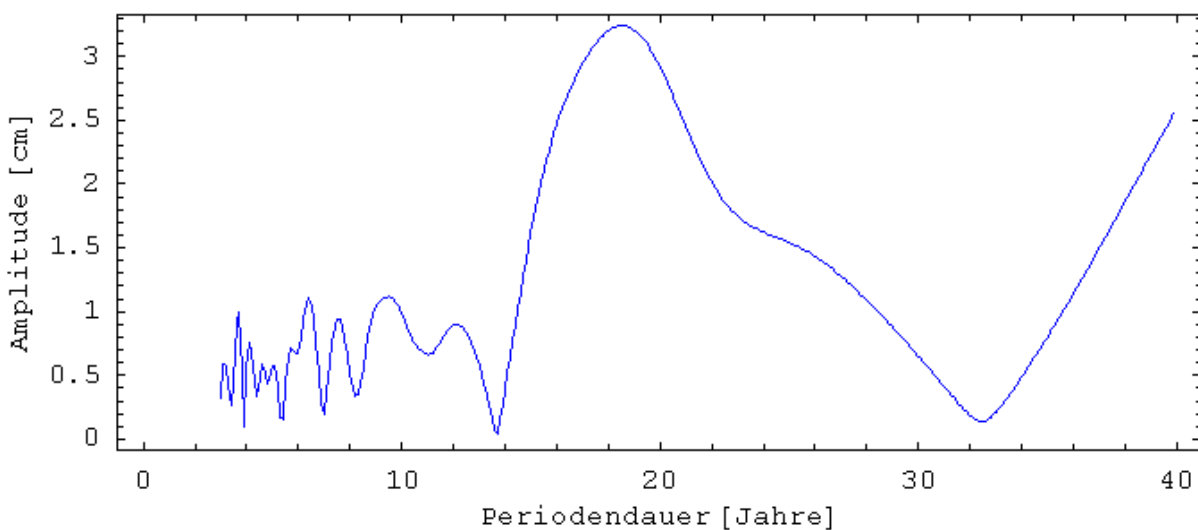


Bild 53 Spektrum des mittleren jährlichen Tidehubs am Pegel Helgoland erzeugt durch eine Regression mit einer Sinusfunktion. Koeffizienten sind dabei Amplitude und Phase. Die Frequenz wurde variiert.

Eine genauere Analyse ergibt neben der Amplitude von ca. 3 cm auch eine Phase und ein 95 prozentiges Konfidenzintervall, also eine 95 prozentige Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Nodalsignals (s. *Bild 54*). Die größte Wahrscheinlichkeit für das letzte Nodalmaximum ergibt sich damit aus den Daten des mittleren jährlichen Tidehubs am Pegel Helgoland für das Jahr 1997. Folglich ist mit dem Nodalminimum im Jahr 2006 zu rechnen.

Ferner ist noch der um die Nodaltide bereinigte mittlere jährliche Tidehub (orange) aufgetragen. Die Streuung dieses bereinigten Signals ist immer noch beträchtlich und liegt trendbereinigt etwa im Bereich von ± 6 cm.

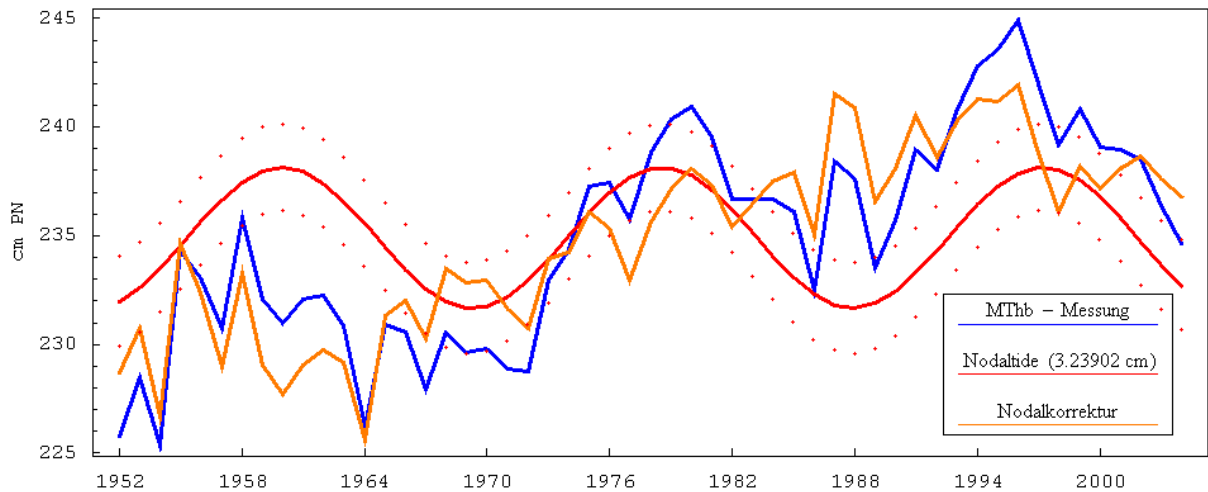


Bild 54 Nodaltidesignal im Tidehub am Pegel Helgoland mit 95%-Konfidenzband. Weiterhin zu sehen sind der gemessene mittlere jährliche Tidehub und der um die Nodalide bereinigte mittlere jährliche Tidehub.

X. Entwicklung des Oberwasserzuflusses am Pegel NeuDarchau

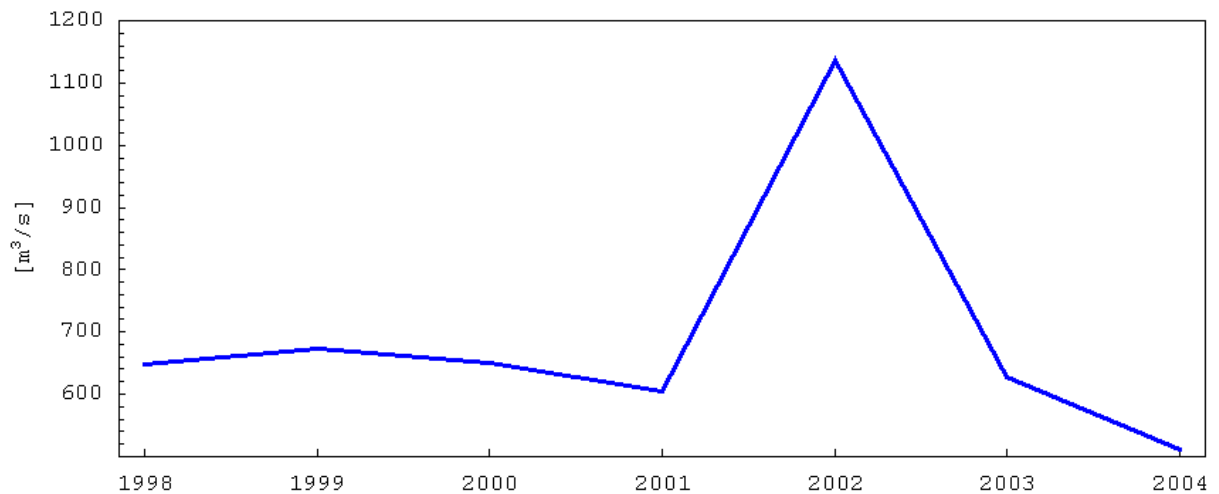


Bild 55 Kalenderjahresmittel des Oberwasserzuflusses am Pegel NeuDarchau

XI. Schema zum Vergleich von gemessenen und synthetischen Kennwerten

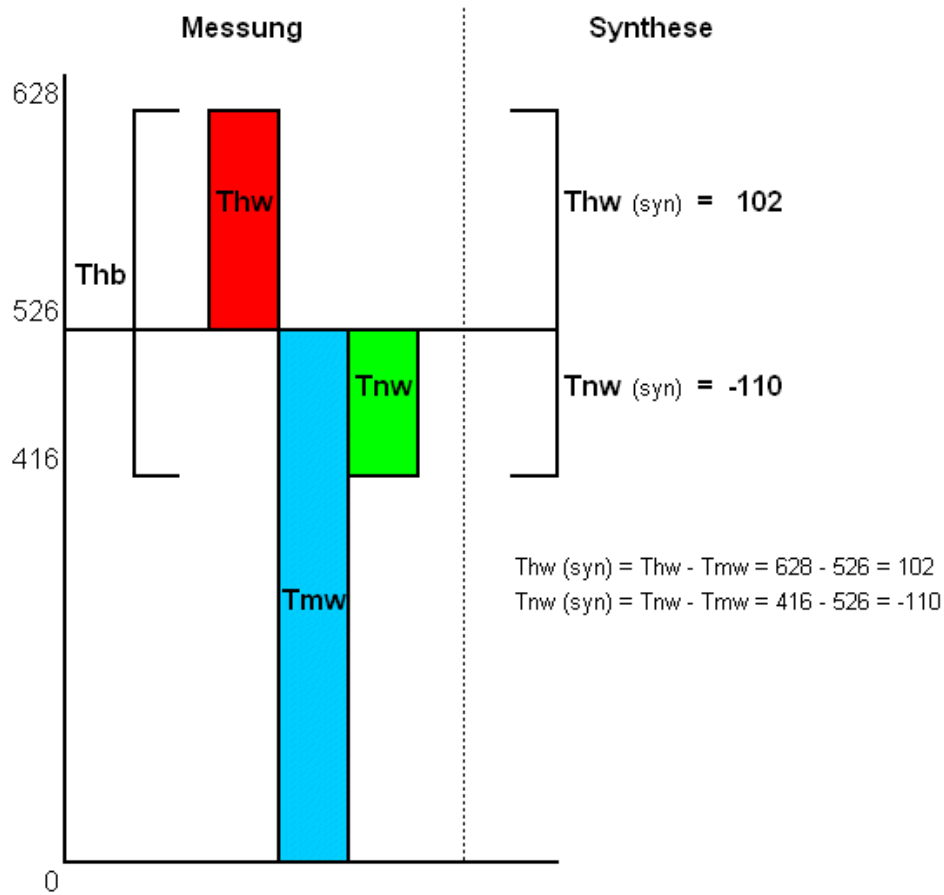


Bild 56 Schematische Darstellung der Kennwerte Tidehub (Thb), Tideniedrigwasser (Tnw), Tidehochwasser (Thw) und Tidemittelwasser (Tmw) sowie der Kennwerte Tnw(syn) und Thw(syn) aus der synthetischen Zeitreihe.