## Charakterisierung der Tidekurve

Von Gabriele Gönnert, Katja Isert, Harald Giese u. Andreas Plüß

#### Zusammenfassung

Es werden der Tidekurvenverlauf und seine zeitliche Veränderung in der Deutschen Bucht analysiert. Vorgestellt werden die Tidekennwertanalysen und die Partialtidenanalysen anhand von Wasserstandsdaten für die Jahre 1955, 1975 und 1998. Eine Fourieranalyse der Pegeldaten hilft, den Einfluss nichtlinearer Effekte wie der Advektion, der Dissipation und der Reflexion abzuschätzen. Die flächenhafte Analyse und die Verteilung der Amplituden und Phasen der Partialtiden O1, K1, M2, S2, M4 und M6 innerhalb der Deutschen Bucht erfolgen durch das HN-Modell. Selbiges ermittelt auch den Verlauf der Stärke und der Richtung der Strömung sowie die Phasenverschiebung der maximalen Strömungen gegenüber der Phase der Wasserstandsextrema. Die Ergebnisse für die charakteristischen Gebiete werden zusammengefasst und diskutiert.

Für die Praxis erfolgt eine Charakterisierung, bei der die Abweichung der gelaufenen Tidekurve von einer Sinuskurve mithilfe der Berechnung des linear interpolierten Wasserstandes ermittelt wird.

#### Summary

Progression and transformation of the tidal curve are analysed. The tide reference value analysis as well as the partial tide analysis using water level data of 1955, 1975 and of 1988 are presented. Applying Fourier-analysis on the tide gauge data we are able to assess the influence of nonliner effects such as advection, dissipation and reflection. Spatial analysis as well as distribution of amplitudes and phases of partial tides O1, K1, M2, S2, M4 and M6 within the German Bight (Deutsche Bucht) have been carried out running a numerical tidal model. From this model we have extracted the time history of current velocity and direction as well as the phase shift between current maxima and respective extreme water levels. Results from the investigated areas are summarised and discussed. For practical applications, we show the deviation of the tidal curve from a sinus soidal curve using linearly interpolated water levels.

## Keywords

Tide, Modell, Strömung, Partialtidenanalyse, Oberwasser, Fourieranalyse, Tidekennwertanalyse, Deutsche Bucht, Nordsee

Tide, numerical model, currents, tidal analysis, fresh water discharge, Fourier analysis, tidal parameters, German Bight, North Sea

#### Inhalt

1.	Einleitung und methodisches Vorgehen	100
2.	Das Untersuchungsgebiet	102
3.	Die Tidekennwertanalyse	104
4.	Die Fourieranalyse	107
	4.1 Rekonstruktion der Tidekurve mittels der Methode der inversen	
	Fouriertransformation	108
5.	Die Partialtidenanalyse	109
6.	Analyse der Modelldaten	110
	6.1 Ánalysen an Pegelorten	110
	6.2 Flächenhafte Analyse	111

7.	Ansätze zur Korrelation von Strömung und Tidekurve	112
	7.1 Korrelation von Strömung und Tidekurve mithilfe der Partialtidenanalyse	112
	7.2 Beispielhafte Durchführung einer Korrelation von Strömung und Tidekurve	123
	7.3 Phasenverschiebung der maximalen Strömung gegenüber den	
	Wasserstandsextrema	123
	7.4 Zeitlicher Verlauf der Stärke und Richtung der Strömung	123
8.	Charakterisierung der Tidekurve	124
	8.1 Helgoland: Die Vergleichstide	124
	8.2 Übergang von See ins Ästuar	126
	8.2.1 Jade	127
	8.2.2 Elbe	128
	8.2.3 Weser	131
	8.3 Sylt	133
	8.4 Úmströmte Insel (Föhr)	134
	8.5 Übergang von der See zur Küste	134
	8.6 Eidersperrwerk	135
9.	Parameter zwecks Charakterisierung der Tidekurve zur praxisorientierten	
	Anwendung	136
10.	Zusammenfassung und Ausblick	139
11.	Dank	141
12.	Schriftenverzeichnis	141

#### 1. Einleitung und methodisches Vorgehen

Die Erkenntnisse zur Genese der Tide und ihrer Form sind wissenschaftlich fundiert und erscheinen umfassend. Namenhafte nationale und internationale Wissenschaftler wie u.a. GODIN (1972, 1988, 1996) haben sich detailliert mit diesem Thema beschäftigt. Bekannte Stichworte wie Topografie, Reibung und Reflexion beantworten bereits viele Fragen zur Tide. Dennoch wirft gerade die Tidekurvenform und ihre Änderung immer wieder Fragen zu Wechselwirkungen mit den erzeugenden physikalischen Prozessen auf.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten KFKI-Projektes "Charakterisierung der Tidekurve" werden der Tidekurvenverlauf und seine Veränderung über große Zeitabschnitte (Jahrzehnte) analysiert.

Eine Charakterisierung der Tidekurve kann nicht erreicht werden, indem nur ein einzelnes Verfahren angewendet wird (Abb. 1). Hierzu ist es notwendig, sich aus verschiedenen Perspektiven der Zielsetzung zu nähern. So bildet die mathematisch-physikalische Beschreibung der Tidekurve basierend auf der Tidekennwertanalyse und der Partialtidenanalyse anhand von Wasserstandsdaten die Grundlage der Analyse. Die Berechnung der Kennwerte erfolgt für die Untersuchungszeiträume 1955, 1975 und 1998. Mithilfe der Partialtidenanalyse wird die Tidekurve in ihre Partialtiden zerlegt. Der Vergleich der Veränderungen der Partialtiden über die Zeit lässt erkennen, welche Partialtide sich aufgrund von Änderungen im hydrologisch-morphologischen Naturregime verändert hat. Diese Ergebnisse werden durch eine Fourieranalyse der Pegeldaten vervollständigt. Der Einfluss der Reflexion auf die Form der Tidekurve und die Rolle der Impulserhaltung, bezogen auf Advektion und Dissipation, sollen dadurch abgeschätzt werden.

Gerade in Bezug auf Veränderungsprozesse durch Baumaßnahmen und Klimaänderung ist es wichtig, eine Repräsentation der Tidekurve durch möglichst wenige Partialtiden zu erreichen. Im Folgenden wird deshalb ergänzend vorgestellt, ob dies mit den angewandten Methoden möglich ist. Das HN-Modell dient der flächenhaften Analyse und Darstellung des Wasserstandes und beschreibt die Verteilung der Amplituden und Phasen der Partialtiden  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$ und  $M_6$  innerhalb der Deutschen Bucht. Für eine Charakterisierung der Tidekurve müssen die Parameter Wasserstand und Strömung herangezogen werden. Daher werden charakteristische Parameter wie der zeitliche Verlauf der Stärke und der Richtung der Strömung sowie die Phasenverschiebung der Strömungsmaxima gegenüber der Wasserstandsextreme mittels des numerischen HN-Modells ermittelt und erläutert.

Abschließend werden die Ergebnisse für die charakteristischen Gebiete zusammengefasst und diskutiert.



Abb.1: Schema zur Analyse der Tidekurve

#### 2. Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich entlang der deutschen Nordseeküste von der Insel Sylt bis nach Borkum. In Richtung Festland folgen Pegelstandorte an der Küste und in den Ästuaren Jade, Weser, Elbe und Eider (Abb. 2). Es werden 44 Pegelstandorte für den Zeitraum 1.4. bis 31.7.1998 ausgewertet, 15 Pegelstandorte für selbigen Zeitraum in den Jahren 1955 und 1975. Die Daten wurden dankenswerter Weise von verschiedenen Stellen zur Verfügung gestellt.<sup>1</sup>

Für die Analyse der Tideverläufe werden Tiden an charakteristischen Orten ausgesucht. Die charakterisierenden Parameter sind Topografie, Verhältnis Flut- zu Ebbedauer, Einfluss von Oberwasser, Advektion, Dissipation und Reflexion sowie besondere Formen bei ähnlicher Topografie und verschiedene Tideformen bei gleichem Tidehub. Die Analyse der Tideverläufe dient zudem zur Verifikation des HN-Modells.

Das Kriterium Topografie wird weiterhin unterteilt in Übergang von See zur Küste, abgeschlossene Buchten, umströmte Insel, Übergang von der Elbe bis nach Sylt, Baumaßnahmen und die Insel Sylt.

Für jeden einzelnen Themenkomplex gelten mehrere beeinflussende Kriterien: So wirkt sich in den Ästuaren natürlich auch das Oberwasservolumen auf die Tide aus. Auch die Lage des Pegelstandortes im Vergleich zur Lage der Amphidromie der Gezeiten ist zu beachten. In einer nahezu abgeschlossenen Bucht verändert sich die Form der einlaufenden Tidewelle durch Advektion, Dissipation und Reflexion. Im Bereich einer umströmten Insel unterscheiden sich die Verhältnisse hingegen durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten. Beim Übergang von der See zur Küste ist die Veränderung der Wassertiefe relevant und damit die Änderung von Flutdauer zur Ebbedauer, des Tidehubs usw.. Die vielfältigen beeinflussenden Faktoren müssen jeweils in der individuellen Analyse berücksichtigt werden.

Die Insel Sylt ist gekennzeichnet durch die besondere Lage nahe der 10-m-Tiefenlinie ohne vorgelagerte Watten und nahe des amphidromischen Punktes der M<sub>2</sub>-Gezeit. Auf Sylt wurden für das Jahr 1998 die Pegel List Hafen, List West, Westerland Messpfahl, Hörnum West und Hörnum Hafen ausgewertet.

Der Pegel Helgoland, der in jedem der Untersuchungsjahre zur Verfügung steht, wird als Vergleichspegel für die gesamte Region benutzt, da der Einfluss der Topografie auf die Form der Tidekurve an dieser Stelle verhältnismäßig gering ist.

Die Insel Föhr wird als umströmte Insel mit den Pegeln Wittdün, Wyk, Dagebüll und Hörnum Hafen ausgewählt. Die Wasserstandsdaten stehen an diesen Standorten in den Jahren '98, '75 und '55 zur Verfügung.

Als abgeschlossene Bucht wird die Region der Süderhever und des Heverstroms bis nach Husum ausgewählt. Die Pegel Südfall, Süderoogsand und Husum werden ausgewertet. In den Jahren '55 und '75 steht nur der Pegel Husum zur Verfügung.

Weiterhin von Interesse ist der Übergang von See zur Küste: Von Helgoland bis zur nordfriesischen Küste (Blauort, Büsum), bis zur ostfriesischen Küste (Borkum, Norderney, Langeoog, Wangerooge) und bis in die Weser- und Jademündung (L.T. Alte Weser, Mellumplate, Voslapp, Wilhelmshaven). Für die Jahre '75 und '55 stehen nur an den Standorten Büsum, Norderney und L.T. Alte Weser/Roter Sand Wasserstandsdaten zur Verfügung.

Ein wichtiges Untersuchungsgebiet ist begründet durch die großen Ströme. Daher werden Wasserstandsdaten in der Elbe, Weser und Ems untersucht. Dafür stehen 1998 folgende

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ALR Husum, WSA Tönning, WSA Cuxhaven, WSA Hamburg, Strom- und Hafenbau Hamburg, WSA Bremerhaven, WSA Bremen, WSA Wilhelmshaven und WSA Emden



Abb. 2: Pegelstandorte

Pegel zur Verfügung: Trischen, Großer Vogelsand, Scharhörn, Scharhörn Riff, Cuxhaven, Brunsbüttel, Glückstadt, Schulau und Hamburg St. Pauli für die Elbe; Robbensüdsteert, Bremerhaven, Brake, Vegesack, Bremen Große Weserbrücke für die Weser und Emshörn, Knock, Emden, Terborg, Leerort und Papenburg für die Ems im Jahr 2000.

Für die Jahre '75 und '55 liegen Daten an den Pegeln Cuxhaven, Glückstadt, Hamburg, Bremerhaven, Vegesack und Bremen vor.

Die Wasserstandsdaten werden generell durch Schwimmersysteme erhoben und liegen 1998 als digitale Datensätze vor. Die Daten aus den Jahren 1955 und 1975 sind nachträg-

lich digitalisiert worden. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Ungenauigkeiten: für die digital aufgezeichneten Daten von 1998 von  $\pm 2$  cm im Wasserstand und  $\pm 2$  min in der Zeit; und entsprechend für die analogen Aufzeichnungen  $\pm 2$  cm und  $\pm 5$  min (ARBEITSGRUPPE WDFÜ, 2000).

## 3. Die Tidekennwertanalyse

Bei der Tidekennwertanalyse werden für 44 Standorte entlang der Deutschen Bucht und in den Ästuaren die Kennwerte MThw, MTnw, MThb und mittlere Flut- und Ebbedauern (s. Abb. 19) ermittelt.

Die Tidekennwerte werden beeinflusst durch die Astronomie und die genannten natürlichen Faktoren der Tidedynamik (lokal und außerhalb des Untersuchungsgebietes). Diese werden ergänzt durch die astronomischen Schwankungen, meteorologische Faktoren und anthropogene Veränderungen.

Die Ergebnisse der detaillierten Analyse des Jahres 1998 sind im Abschlussbericht des KFKI-Forschungsvorhabens "Charakterisierung der Tidekurve" nachzulesen. Um die langfristige Entwicklung herauszuarbeiten, werden jeweils für die Zeit April bis Juli in den Jahren 1998, 1975 und 1955 die Tidekennwerte an 15 der oben genannten Standorte ermittelt, die in Tab. 1a und b dargestellt sind. Die Bezeichnung erfolgt mittels Index des Untersuchungsjahres, z.B. MThw<sub>55</sub>.

Pegelname	MThw <sub>55</sub> [m]	MThw <sub>75</sub> [m]	MThw <sub>98</sub> [m]	MTnw <sub>55</sub> [m]	MTnw <sub>75</sub> [m]	MTnw <sub>98</sub> [m]	MThb <sub>55</sub> [m]	MThb <sub>75</sub> [m]	MThb <sub>98</sub> [m]
Norderney Hafen	1.15	1.08	1.25	-1.29	-1.39	-1.25	2.45	2.48	2.51
Bremen Gr. Weserbrücke	2.36	2.43	2.55	-1.03	-1.39	-1.69	3.40	3.83	4.24
Vegesack	2.14	2.22	2.38	-1.18	-1.50	-1.57	3.32	3.72	3.95
L. T. Roter Sand/ Alte Weser	1.16	1.21	1.35	-1.73	-1.72	-1.59	2.91	2.93	2.95
Hamburg St. Pauli	1.87	1.92	2.06	-0.66	-1.21	-1.58	2.52	3.12	3.64
Glückstadt	1.51	1.40	1.55	-1.20	-1.37	-1.29	2.72	2.78	2.84
Cuxhaven	1.42	1.41	1.50	-1.58	-1.64	-1.51	3.00	3.05	3.01
Büsum	1.50	1.48	1.64	-1.82	-1.89	-1.66	3.33	3.36	3.31
Hundeknöll/ Eidersperrwerk AP	1.45	1.41	1.63	-1.75	-1.78	-1.48	3.20	3.19	3.10
Husum	1.50	1.52	1.72	-1.90	-2.01	-1.92	3.41	3.53	3.65
Wittdün	1.01	1.07	1.22	-1.48	-1.58	-1.49	2.50	2.65	2.71
Wyk	1.09	1.17	1.30	-1.58	-1.68	-1.57	2.67	2.85	2.88
Dagebüll	1.15	1.18	1.37	-1.56	-1.79	-1.69	2.72	2.97	3.06
Hörnum Hafen	0.78	0.72	0.95	-1.14	-1.30	-1.13	1.92	2.01	2.08
Helgoland	1.07	1.03	1.16	-1.32	-1.41	-1.31	2.40	2.44	2.47

Tab. 1a: Tidekennwerte MThw, MTnw, MThb (April–Juli) an verschiedenen Standorten in den Jahren '55, '75 und '98

Pegelname	T <sub>F55</sub> [m]	T <sub>F75</sub> [m]	T <sub>F98</sub> [m]	T <sub>E55</sub> [m]	T <sub>E75</sub> [m]	T <sub>E98</sub> [m]	$T_F/T_{E55}$	$T_F/T_{E75}$	T <sub>F</sub> /T <sub>E98</sub>
Norderney Hafen	366.411	362.028	365.369	378.823	383.161	379.711	0.97	0.94	0.96
Bremen Gr. Weserbrücke	290.497	294.616	308.850	455.149	450.535	436.159	0.64	0.65	0.71
Vegesack	317.518	324.312	333.704	428.101	420.914	411.330	0.74	0.77	0.81
L. T. Roter Sand/ Alte Weser	348.818	345.709	353.236	395.827	400.112	391.730	0.88	0.86	0.90
Hamburg St. Pauli	293.387	299.953	309.528	452.143	445.034	435.494	0.65	0.67	0.71
Hundeknöll/Eider- sperrwerk AP	346.834	323.086	314.522	399.376	421.875	430.877	0.87	0.77	0.73
Glückstadt	317.116	321.933	332.295	428.245	423.407	412.853	0.74	0.76	0.80
Cuxhaven	337.585	339.028	333.970	407.733	406.461	411.052	0.83	0.83	0.81
Büsum	393.914	387.363	388.029	351.883	357.577	357.234	1.12	1.08	1.09
Husum	367.690	355.166	360.399	377.783	389.760	384.403	0.97	0.91	0.94
Wittdün	349.766	338.777	342.414	395.336	406.193	402.674	0.88	0.83	0.85
Wyk	356.307	353.351	356.874	389.178	391.721	388.370	0.92	0.90	0.92
Dagebüll	337.542	341.343	345.143	407.736	403.605	399.943	0.83	0.85	0.86
Hörnum Hafen	358.909	374.921	380.185	386.302	370.190	364.478	0.93	1.01	1.04
Helgoland	341.979	337.983	340.030	403.485	406.944	404.957	0.85	0.83	0.84

Tab. 1b: Tidekennwerte  $T_F$ ,  $T_E$ ,  $T_F/T_E$  (April–Juli) an verschiedenen Standorten in den Jahren '55, '75 und '98

Tab. 2: Pegelstandorte mit signifikanten Tidekennwertdifferenzen bezogen auf einzelne Zeitabschnitte

Thw Differenzen 1955–1975	Tnw Differenzen 1955–1975	Thb Differenzen 1955–1975	Flutdauer Differenzen 1955–1975	Ebbedauer Differenzen 1955–1975
Keine signifikanten Differenzen	Bremen Gr. Weserbrücke Vegesack Hamburg St. Pauli	Bremen Gr. Weserbrücke Vegesack Hamburg St. Pauli Nordfriesland Dagebüll	Eidersperrwerk AP Hörnum Hafen Wittdün, Büsum Husum, Vegesack Hamburg St. Pauli	Eidersperrwerk AP Hörnum Hafen Wittdün, Büsum Husum, Vegesack Hamburg St. Pauli
Differenzen 1975–1998	Differenzen 1975–1998	Differenzen 1975–1998	Differenzen 1975–1998	Differenzen 1975–1998
Hörnum Hafen	Bremen Gr. Weserbrücke Hamburg St. Pauli Eidersperrwerk AP	Bremen Gr. Weserbrücke Hamburg St. Pauli	Bremen Gr. Weserbrücke Vegesack L. T. Alte Weser Hamburg St. Pauli Glückstadt Eidersperrwerk AP	Bremen Gr. Weserbrücke Vegesack L. T. Alte Weser Hamburg St. Pauli Glückstadt Eidersperrwerk AP

Übergreifend für die gesamte Deutsche Bucht und die Küste ist hervorzuheben: Das MTnw<sub>75</sub> ist an fast allen Pegelstandorten niedriger als das MTnw<sub>55</sub>. Die größte Differenz ist in Hamburg St. Pauli zu beobachten, sehr kleine Differenzen treten entlang der norddeutschen Küste und bei Helgoland auf. Die einzige Ausnahme bildet der Pegelstandort L.T. Alte Weser/Roter Sand. Signifikante Änderungen werden in Hamburg St. Pauli, Vegesack und Bremen Große Weserbrücke ermittelt, d.h. in Regionen, die starken natürlichen und anthropogenen Änderungen der Topografie unterliegen.

Die Pegelstandorte, an denen signifikante Unterschiede der Tidekennwerte vorliegen, sind in Tab. 2 genannt.

Zwischen den Zeitpunkten '75 und '98 sind die Vorzeichen der Differenzen der MTnw umgekehrt: Abgesehen von den Pegelstandorten im Inneren der Ästuare (Hamburg St. Pauli, Vegesack und Bremen) ist das MTnw<sub>98</sub> überall höher als das MTnw<sub>75</sub>. Die größten Unterschiede werden am Eidersperrwerk und in Büsum beobachtet. Über die gesamte Zeit betrachtet ist hervorzuheben, dass die Differenz zwischen dem MTnw<sub>55</sub> und dem MTnw<sub>98</sub> bei Helgoland, Norderney, Hörnum, Wyk, Wittdün und Husum weniger als 0.05 m beträgt. Dagegen beträgt sie in Hamburg St. Pauli, Vegesack und Bremen 0.4–0.9 m.

Im Vergleich dazu bieten die Unterschiede des MThw ('55/'75) an den verschiedenen Pegelstandorten kein einheitliches Bild für die Deutsche Bucht. Darüber hinaus sind die Differenzen nicht signifikant, da die Differenzen durchgehend weniger als 5 cm betragen.

Einheitlicher ist das Bild der Differenzen zwischen dem MThw ('75/'98). Das MThw<sub>75</sub> ist überall höher als das MThw<sub>98</sub>. Die größten Differenzen werden am Eidersperrwerk und am Pegel Hörnum Hafen berechnet.

Hervorzuheben ist ein durchgängiger Anstieg der MThw-Werte für '55, '75 und '98 in der Weser vom L.T. Alte Weser/Roter Sand bis nach Bremen. Das Gleiche gilt für den Standort Hamburg St. Pauli und die Umgebung der umströmten Insel Föhr.

Der MThb<sub>98</sub> ist an nahezu allen Standorten um wenigstens einige cm größer als der MThb<sub>55</sub>. Nur am Eidersperrwerk und in Büsum liegen gegenläufige Veränderungen vor. Darüber hinaus ist der MThb<sub>98</sub> in jedem der Untersuchungsjahre an allen Standorten vergleichsweise höher. Ausnahmen bilden die Standorte Eidersperrwerk, Cuxhaven und Büsum. In Cuxhaven und Büsum schwankt der MThb um wenige Zentimeter in diesen Jahren. Die größten Differenzen von 0.8–1.1 m treten an den Flusspegeln Hamburg St. Pauli und Bremen Große Weserbrücke mit maximalem MThb im Jahr '98 auf.

Weiterhin wird eine starke Differenz zwischen dem MThb<sub>55</sub> und dem MThb<sub>75</sub> im Bereich der umströmten Insel Föhr lokalisiert: Der MThb<sub>75</sub> ist 0.09–0.25 m höher, mit erhöhten Beträgen in Umströmungsrichtung zur Küste hin. Im Vergleich dazu sind die Veränderungen am Standort Norderney durchaus vergleichbar mit den Änderungen in der Deutschen Bucht. Möglicherweise stehen die genannten Veränderungen der Tidekurve bei Föhr im Zusammenhang mit der Umströmung oder mit der sich verringernden Wassertiefe an der Küste.

Ein nahezu einheitliches Bild lässt sich für die Unterschiede der mittleren Flutdauer zwischen den Jahren '75 und '98 gestalten. Abgesehen von den Standorten Cuxhaven und Eidersperrwerk AP ist  $T_{F98}$  an allen Standorten länger als  $T_{F75}$ .

In der inneren Deutschen Bucht ist  $T_{F75}$  überwiegend kürzer als  $T_{F55}$ . Am Eidersperrwerk vermindert sich bezüglich 1955 die Flutdauer  $T_{F75}$  um 24 min.. In den Ästuaren verlängert sich dagegen die Flutdauer  $T_{F75}$ . Im Vergleich dazu liegt zwischen '75 und '98 an allen Pegeln genau die entgegengesetzte Tendenz vor, nämlich eine Verlängerung der Flutdauer mit der Ausnahme von Cuxhaven und dem Eidersperrwerk AP. Diese beiden Pegel sind unter anderem z.T. deutlich anthropogen beeinflusst.

Es konnten bei einem Vergleich der Tidekennwerte der verschiedenen Zeitabschnitte einige einheitliche Veränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet nachgewiesen werden, die auf den meteorologischen Einfluss auf die Tidekurve hindeuten.

In diesem Kapitel werden die Veränderungen der Tidewelle an den einzelnen Standorten beschrieben. Die verschiedenen Ursachen hierfür werden mithilfe unterschiedlicher Analysemethoden in den folgenden Kapiteln erläutert.

## 4. Die Fourieranalyse

Die Tidekurve lässt sich als Überlagerung verschiedener Schwingungen unterschiedlicher Phase, Periode und Amplitude darstellen. Mithilfe der Fourieranalyse ist es möglich, die Amplituden und Frequenzen bzw. Perioden dieser Schwingungen zu ermitteln (GODIN, 1972).

In Abb. 3 wird das Amplitudenspektrum der Fouriertransformierten des Wasserstandes an den Pegelstandorten Helgoland und Hamburg während der Zeitspanne vom 1. April bis zum 31. Juli dargestellt. Dabei dominiert das Signal der halbtägigen Gezeit, insbesondere der M<sub>2</sub>-Gezeit an Standorten inmitten der Nordsee bis ins Innere der Ästuare. Unterschiede zeigen sich bei dem Signal der Seichtwassertiden. In Helgoland ist der Einfluss nichtlinearer Effekte (Advektion, Dissipation, Reflexion) geringer als im Ästuar: Signale der <sup>1</sup>/<sub>4</sub>- und <sup>1</sup>/<sub>6</sub>-tägigen Tiden sind dort signifikant, aber wesentlich schwächer als im Ästuar. In Hamburg ist der Effekt nichtlinearer Einflüsse deutlich zu erkennen: Die Amplituden der Seichtwassertiden sind größer als in Helgoland und es können Signale der Obertiden höherer Ordnung bis hin zur <sup>1</sup>/<sub>10</sub>-tägigen Tide lokalisiert werden.

Im Bereich kurzer Frequenzen lassen sich die Signale noch eindeutig der eintägigen Gezeit und dem etwa 14-tägigen Spring-Nipp-Zyklus zuordnen. Der erzeugende Mechanismus der übrigen kurzfrequenten Schwingungen lässt sich nicht eindeutig zuordnen. Die Einflüsse der Astronomie, der Meteorologie und von Fernwellen spiegeln sich hierin stark vermischt wieder.



Abb. 3: Amplitudenspektrum der Fouriertransformierten des Wasserstandes an den Pegelstandorten Helgoland (links) und Hamburg St. Pauli (rechts) während der Zeit vom 1. April '98 bis zum 31. Juli '98

## 4.1 Rekonstruktion der Tidekurve mittels der Methode der inversen Fouriertransformation

Die Rekonstruktion der Wasserstandskurve wird als inverse FFT aus einer möglichst geringen Anzahl von Schwingungen berechnet. Es werden die Schwingungen mit den größten Amplituden im Spektrum ausgewählt. Bei einem erfolgreichen Einsatz dieses Verfahrens könnten abschließend den ermittelten Perioden der Schwingungen die verursachenden physikalischen Prozesse zugeordnet werden. Beispielsweise deutet eine Verstärkung der M<sub>4</sub>bzw. der M<sub>6</sub>-Gezeit auf den zunehmenden Einfluss nichtlinearer Effekte wie der Advektion, der Dissipation und der Reflexion hin. Durch diese Methode soll der Wasserstand an verschiedenen Standorten durch wenige Schwingungen naturgetreu rekonstruiert werden.



Abb. 4: Gemessener und unter verschiedenen Kriterien (a-d) rekonstruierter Wasserstand am Pegelstandort Helgoland in der Zeit vom 5. bis zum 11. April 1998

Mithilfe der Fourieranalyse wird die Wasserstandskurve in ihre einzelnen Frequenzanteile zerlegt. Aus dem daraus resultierenden Amplitudenspektrum werden die Amplituden ausgewählt, um daraus mithilfe der inversen Fouriertransformation den Wasserstand zu rekonstruieren. Das Ergebnis für den Standort Helgoland wird in Abb. 4 für einen Zeitabschnitt von sechs Tagen (5.–11.4.98) präsentiert. Der gemessene Wasserstand ist als durchgezogene Linie dargestellt, unverändert in jeder der vier Graphiken. Der rekonstruierte Wasserstand ist gestrichelt gekennzeichnet.

In dieser Untersuchung wird die Tidekurve zunächst nur aus einer Schwingung mit maximaler Amplitude rekonstruiert, d.h. aus der M2-Gezeit. Das Ergebnis zeigt in Abb. 4.a, dass in diesem Fall die sinusförmige Schwingung der M<sub>2</sub>-Gezeit erzeugt wird. Die Extremwerte (Hoch- und Niedrigwasser) des gemessenen Wasserstandes werden nicht erfasst.

Wie in Abb. 4 dargestellt, gleicht sich der rekonstruierte Wasserstandsverlauf erheblich besser den gemessenen Verhältnissen an als in Abb. 4.a. Es wird in diesem Fall die Tidekurve aus den Schwingungen rekonstruiert, deren Amplituden mindestens so groß sind wie 1/10 der Größe der maximalen Amplitude. Die Tidekurve kann erheblich besser rekonstruiert werden als ausschließlich durch die M<sub>2</sub>-Gezeit. Aber auch in diesem Fall, in dem bereits 10 Tiden berücksichtigt werden, können Hoch- und Niedrigwasserstände nicht naturgetreu rekonstruiert werden.

In einem weiteren Schritt wird die Tidekurve aus Schwingungen rekonstruiert, deren Amplituden mindestens so groß sind wie  $1/100}$  der Größe der maximalen Amplitude (Abb. 4.c). Die gemessene Tidekurve kann nahezu identisch dargestellt werden. Es werden für diese Rekonstruktion 135 Tiden benötigt.

Erst durch das Kriterium, alle Schwingungen mit Amplitudengrößen von mindestens <sup>1</sup>/<sub>1000</sub> der Größe der maximalen Amplitude zu berücksichtigen, kann die gemessene Tidekurve exakt rekonstruiert werden (Abb. 4.c). Für diese Rekonstruktion müssen 660 Schwingungen berücksichtigt werden.

Dieses Ergebnis zeigt, dass dieses Verfahren nicht zu einer vereinfachten Beschreibung der Tidekurve führt. Ein Schwachpunkt dieses Verfahrens besteht darin, dass die Phasen nicht gesondert berücksichtigt werden. Ein weitergehender Ansatz wäre eine kombinierte Klassifizierung nach Phasen und Amplituden. Dadurch lässt sich die Anzahl der notwendigen Schwingungen für die Rekonstruktion der Tidekurve verringern und damit das Verfahren optimieren.

Die mathematische Charakterisierung der Tidekurve mithilfe des Amplitudenspektrums aus der Fourieranalyse zeigt, dass der exakte zeitliche Verlauf der Tidekurve von sehr vielen harmonischen Schwingungen abhängig ist, von denen hier nur ein Teil physikalisch erklärt werden kann.

#### 5. Die Partialtidenanalyse

Ein Ergebnis der Partialtidenanalyse wird beispielhaft in Abb. 5 dargestellt anhand des Amplitudenspektrums der ersten 14 Partialtiden von Helgoland im Vergleich zu Hamburg St. Pauli für das Jahr 1998. Hierbei gilt es, das analytische Verfahren darzustellen. Eine Detaildarstellung und alle weiteren Ergebnisse sind im Abschlussbericht (2003) und in Kapitel 8 zu finden. Insgesamt wurden 37 Partialtiden in die Analyse mit einbezogen. Davon sind nur 14 in Helgoland signifikant. Es handelt sich dabei um die Partialtiden M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,  $\mu_2$ , O<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, 2MN<sub>2</sub>, M4, Q<sub>1</sub>, 2SM<sub>2</sub>, MN<sub>4</sub>, M<sub>6</sub>und EPS<sub>2</sub>. Die Amplitude ist logarithmisch in m dargestellt.

Die Amplituden dieser Partialtiden sind in Hamburg höher als in Helgoland, abgesehen von der O<sub>1</sub>-Gezeit.

Der größte Unterschied von etwa 40 cm wird bei der  $M_2$ -Gezeit beobachtet. Herausragende lokale Maxima liegen in Hamburg im Bereich der  $M_4$  und der  $M_6$  vor. Die Amplituden dieser Partialtiden sind nahezu eine Größenordnung größer als in Helgoland. Dieses Ergebnis weist deutlich auf den Einfluss nichtlinearer physikalischer Prozesse hin. Durch Advektion, Dissipation und Reflexion werden diese Seichtwassertiden im Ästuar angeregt, bedingt durch veränderte morphologische Verhältnisse im Vergleich zur Nordsee. Dieser Effekt wird nicht nur in der Elbe, sondern auch in Weser und Ems belegt.



Abb. 5: Amplituden der ersten 14 Partialtiden von Helgoland im Vergleich zu Hamburg St. Pauli aus der Zeitspanne vom 1. April bis zum 31. Juli '98

6. Analyse der Modelldaten

In den vorangegangenen Berechnungen und Vergleichen handelt es sich um die zeitliche Analyse der Tidekurve für verschiedene Pegelorte. Ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Anwendung des mathematischen Modells der Deutschen Bucht (PLÜß, 2004) ist der Übergang von einer lokalen Betrachtung der Tidekennwerte zu der Analyse flächenhafter Parameter. Die Ergebnisse des hydrodynamischen Rechenmodells, unter Einschluss von Tideanregung und Wind, gewährleisten somit eine konsistente Darstellung der Tidekennwerte sowohl in den Mündungsbereichen der Ästuare zwischen den Pegelpositionen als auch seewärts darüber hinaus in der Deutschen Bucht.

#### 6.1 Analysen an Pegelorten

Durch Analyse der Modelldaten an den Pegelpositionen und Vergleich mit Messwerten wird zunächst die Güte der Modellergebnisse ("Naturähnlichkeit") nachgewiesen.

In der nachfolgenden Tab. 3 sind beispielhaft für eine Reihe ausgewählter Pegelpositionen die analysierten Tidekennwerte aus Pegelmessungen und Rechnungen für den Zeitraum vom 18.5. bis zum 29.6.1998 gegenübergestellt. Die Übereinstimmung bezüglich Amplitude und Phase ist für die Partialtiden O<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> und S<sub>2</sub> insgesamt zufriedenstellend. Für die Seichtwassertiden M<sub>4</sub> und M<sub>6</sub> kommt es insbesondere bei den Phasen zu leichten Abweichungen, die durch die im HN-Modell nicht exakt nachgebildete komplexe Topografie im Küstenvorfeld entstehen. Hierbei ist auch zu beachten, dass eine Phasendifferenz von 10° bei einer halbtägigen Tide (M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>) 21 Minuten, bei einer vierteltägigen Tide (M<sub>4</sub>) 10 Minuten und bei einer sechsteltägigen Tide (M<sub>6</sub>) 7 Minuten beträgt.

Astronomia	sche Koettizi	enten (	Ampli	tude [r	n]/Pha	ase [°])	in der	Deutso	chen B	ucht			
Partialtide	Quelle	C	01	K	1	M	l2	S	2	M	[4	M	[6
Ort		Amp.	Phas	Amp.	Phas	Amp.	Phas	Amp.	Phas	Amp.	Phas	Amp.	Phas
Helgoland	Messung	0,09	231	0,08	15	1,12	312	0,26	15	0,07	144	0,02	287
	Rechnung	0,09	226	0,10	17	1,07	312	0,26	18	0,09	138	0,01	6
Borkum	Messung	0,09	215	0,09	4	1,10	278	0,26	340	0,07	7	0,04	189
	Rechnung	0,09	215	0,09	3	1,11	276	0,26	342	0,06	76	0,03	170
Alte Weser	Messung	0,09	231	0,09	14	1,34	312	0,31	17	0,07	140	0,05	310
	Rechnung	0,09	224	0,10	15	1,31	309	0,32	17	0,10	144	0,04	311
Bake A	Messung	0,09	230	0,09	13	1,39	314	0,32	17	0,08	148	0,05	341
	Rechnung	0,09	226	0,10	16	1,32	313	0,33	20	0,10	147	0,04	342
Wyk	Messung	0,09	262	0,08	37	1,25	10	0,27	79	0,11	221	0,05	75
	Rechnung	0,08	251	0,09	44	1,31	5	0,31	77	0,11	224	0,05	48
List Hafen	Messung	0,08	266	0,07	48	0,81	24	0,18	88	0,06	216	0,02	93
	Rechnung	0,08	259	0,08	51	0,89	16	0,21	84	0,02	234	0,03	65

Tab. 3: Vergleich der astronomischen Konstanten zwischen Messung und Modellberechnung

#### stronomische Koeffizienten (Amplitude [m]/Phase [°]) in der Deutschen Bucht

## 6.2 Flächenhafte Analyse

Durch die flächenhafte Analyse der Modellergebnisse wird die Verteilung der Amplituden und Phasen der einzelnen Partialtiden innerhalb der Deutschen Bucht beschrieben.

Die Ausprägung einzelner Partialtiden im Gebiet der Deutschen Bucht ist anhand von Pegelmessungen nur für wenige Orte analysierbar (z. B. Helgoland). Ein flächenhafter Vergleich der im Projekt erzielten Modellergebnisse ist für wenige Partialtiden nur in Verbindung mit anderen Modellrechnungen möglich. Insbesondere die Hauptmondkomponente  $M_2$  wird in einer Reihe von Veröffentlichungen in ihrer flächenhaften Verteilung dargestellt.

Die Verteilung der Amplituden und Phasen in der Deutschen Bucht stellt sich für die untersuchten Partialtiden wie folgt dar:

- O<sub>1</sub>:

Die maximalen Amplituden weisen in einem Bereich von Borkum, ostfriesische Inseln, Jade und Weser bis Eiderstedt Werte von 8–9 cm auf. Auf der Abb. 6 sind neben der Amplitudenverteilung die Phasen in Abständen von 7,5 Grad (entsprechen 32 Minuten) angegeben.

– K<sub>1</sub>:

Die Amplituden weisen in einem Bereich von Borkum, Helgoland bis Amrum Werte von 10–11 cm auf. In der Elbmündung verringern sich die Amplituden (vgl. Abb. 7). Die Phasen verlaufen speichenförmig aus Nordwesten bis in den Bereich der Deutschen Bucht, wo sie in Küstennähe verschwenken.

- M<sub>2</sub>:

Die dominante Partialtide in der Deutschen Bucht ist die M<sub>2</sub>, deren Amplitude von Nordwesten bis in die Ästuarmündungen stetig ansteigt. Die Linien gleicher Phase in der freien See verlaufen in etwa äquidistant. In Küstennähe werden sie vorwiegend durch die kom-

plexe Tiefenstruktur verformt (Reibung) und hängen im Verlauf der linksdrehenden Tide, insbesondere zwischen Jade-, Weser- und Elbmündung, nach. In der Elbmündung verringern sich die Amplituden (vgl. Abb. 8).

- S<sub>2</sub>:

Die Verteilung der Amplituden und Phasen entspricht im Wesentlichen den Verhältnissen der  $M_2$ , wobei die Amplituden nur rund 23 % der  $M_2$  betragen und die Phasenlage um rund 63° verschoben ist (vgl. Abb. 9).

- M<sub>4</sub>:

Die Größenordnung der Partialtide  $M_4$  ist stark geprägt durch die Verformung der Tidewelle in der Deutschen Bucht infolge Reibung und Strömung und beträgt rund 7–12 cm (vgl. Abb. 10). Bei dieser ersten Oberschwingung zur  $M_2$  verändern sich auch die Anzahl und Lagepunkte der Amphidromien in der Nordsee und der Deutschen Bucht. Die Amphidromie der  $M_4$ -Partialtide in der Deutschen Bucht verschiebt sich in etwa auf die Breite von Esbjerg und die Länge von Langeoog.

– M<sub>6</sub>:

Die Amplituden der  $M_6$ , als 2. Obertide zur  $M_2$ , sind deutlich kleiner als die der  $M_4$  und betragen nur rund 1–5 cm (vgl. Abb. 11). Die Amphidromie in der Deutschen Bucht verschiebt sich weiter in den inneren Bereich (Jade-Elbmündung). Deutlich erkennbar ist die Amplitudenerhöhung vor Borkum z.B. im Vergleich zur Außenjade und -weser.

7. Ansätze zur Korrelation von Strömung und Tidekurve

## 7.1 Korrelation von Strömung und Tidekurve mithilfe der Partialtidenanalyse

Zur Beschreibung der Tidewelle wird zumeist die Form der Wasserstandsganglinie betrachtet. Der Verlauf der Tide am Ort kann jedoch hydrodynamisch vollständig nur durch Wasserstand und Strömung sowie gegebenenfalls durch die Dichte, resultierend aus Temperatur- und Salzgehalt, beschrieben werden.

Letztgenannte hydrodynamische Parameter werden hauptsächlich advektiv geändert und sind daher stark abhängig von Strömung und Wasserstand. Hinsichtlich der Charakterisierung der Tide am Ort spielen sie jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

Dagegen ist die Strömungskomponente von großer Bedeutung bei der Charakterisierung der Welle. Charakteristische Merkmale sind:

- der zeitliche Verlauf der Stärke und Richtung, der durch die Form der Stromfigur am Ort zum Ausdruck kommt und
- die Phasenverschiebung der maximalen Strömungen, gegenüber der Phase der Wasserstandsextrema.

Der erste Punkt bringt zum Ausdruck, ob es sich um ein zweidimensionales oder eindimensionales Wellenphänomen handelt (Drehwelle, Longitudinalwelle). Der zweite Punkt liefert eine Aussage darüber, wie stark die Welle einer stehenden Welle gleicht. Liegt die Phasenverschiebung zwischen den Wasserstandsextrema und den Strömungsmaxima in der Größenordnung von 90 Grad (1/4 Tideperiode), so charakterisiert dies eine stehende Welle.

Neben der Charakterisierung der Tidewelle als Überlagerung von einer Anzahl von Teilwellen, die zu Tidekennwerten wie den Kenterpunktabständen, maximalem Flut- und Ebbestrom sowie deren Eintrittszeiten führt, kann auch jede Teilwelle für sich vollständig beschrieben werden, wenn man eine Partialtidenanalyse der Strömung zusätzlich zur Analyse des Wasserstandes durchführt.



Abb. 6: Modellanalysen der Amplituden und Phasen der O<sub>1</sub>-Gezeit



Abb. 7: Modellanalysen der Amplituden und Phasen der K<sub>1</sub>-Gezeit

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

Abb. 8: Modellanalysen der Amplituden und Phasen der M2-Gezeit

![](_page_17_Figure_2.jpeg)

Abb. 9: Modellanalysen der Amplituden und Phasen der S2-Gezeit

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

Abb. 10: Modellanalysen der Amplituden und Phasen der M<sub>4</sub>-Gezeit

![](_page_19_Figure_2.jpeg)

Abb. 11: Modellanalysen der Amplituden und Phasen der  $\rm M_6\mathchar`-Gezeit$ 

Daher ist für die Charakterisierung der Tide eine parallele Harmonische Analyse von Strömung und Wasserstand sinnvoll. Dies ergibt insbesondere bei der Analyse von flächenhaft vorliegenden Daten aus Modellsimulationen ein vollständigeres Bild der Tidewelle.

Beispielhaft wurde eine flächenhafte Strömungsanalyse für die Simulation mit dem HN-Modell der Deutschen Bucht der BAW unter Einsatz des Analyseprogramms FRQWF durchgeführt. Die Partialtidenanalyse umfasst den Zeitabschnitt vom 18.5. bis zum 29.6.1998.

Abb. 12 zeigt das Verhältnis von minimalem zu maximalem Strom. Vom Betrag her kleine Werte entsprechen einer alternierenden Strömung in der Partialtide  $M_2$ . Positive Werte (rot) bedeuten, dass die Partialtidenellipse gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen wird. Negative Werte (blau) bedeuten einen Umlauf im Uhrzeigersinn. Während im Tiefwasser der Deutschen Bucht die Partialtidenellipsen der  $M_2$  linksherum durchlaufen werden, besitzen sie in den Flachwasserbereichen vor den Ästuarmündungen den entgegengesetzten Drehsinn. In den Rinnen zeigen sich wie erwartet alternierende Strömungen, d.h. die Ellipsen werden extrem schmal. Abb. 13 stellt den maximalen Anteil der  $M_2$ -Tide an der Strömung in Betrag und Richtung dar. Die durch die Pfeile angedeuteten Richtungen geben die effektive Laufrichtung der Tidewelle an. Der Wechsel der effektiven Laufrichtung im Bereich der Deutschen Bucht entlang einer von Nordwest nach Südost verlaufenden Linie ist klar zu erkennen.

Die Phasendifferenz zwischen dem Maximum der Amplitude des Wasserstandes und der maximalen Geschwindigkeit der Stromellipse einer Partialtide ist ein Maß zur Charakterisierung der Tide bezüglich fortschreitender oder stehender Welle. Dieser Zusammenhang wird auf der folgenden Abb. erläutert:

![](_page_20_Figure_6.jpeg)

Abb. 13a: Phasendifferenz zwischen dem Amplitudenmaximum und der maximalen Geschwindigkeit der Stromellipse einer Partialtide

![](_page_21_Figure_2.jpeg)

Abb. 12: Verhältnis der minimalen zur maximalen Stromellipsenachsen,  $\rm M_2\text{-}Tide$ 

![](_page_22_Figure_1.jpeg)

Abb. 13: Maximaler Anteil und Achsenlage der M2-Tide an der Strömung

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

![](_page_23_Figure_2.jpeg)

Abb. 14: Phasenverschiebung Wasserstand/Strömung der M2-Tide

Abb. 14 zeigt die Phasendifferenz zwischen Wasserstand und Strömung für die Partialtide M<sub>2</sub>. Durch diese Größe können Gebiete, in denen die Welle die Charakteristik einer fortlaufenden Welle besitzt, von denen unterschieden werden, in denen die Welle sich wie eine stehende Welle verhält. In der Deutschen Bucht besitzt die Welle überwiegend die Eigenschaften einer stehenden Welle, ebenso in der Ems und im Jade-Weser-Gebiet. Vor den ostfriesischen Inseln westlich von Spiekeroog sowie den nordfriesischen Inseln liegt sie im Übergangsbereich zu einer fortlaufenden Welle, ebenso in der Außenelbe.

## 7.2 Beispielhafte Durchführung einer Korrelation von Strömung und Tidekurve

Wie bereits erwähnt, führt die Korrelation zwischen Strömung und Tidekurve zu einem besseren Verständnis der gesamten Tidewelle und soll daher an dieser Stelle beispielhaft durchgeführt werden. Die Grundlage bilden die Ergebnisse der Partialtidenanalyse der horizontalen Geschwindigkeiten.

Es finden die zwei Verfahren Anwendung: Zum einen wird die Phasenverschiebung der Strömungsmaxima gegenüber den Wasserstandsextrema ermittelt. Zum anderen werden Querschwingungen mit Hilfe der Partialtidenanalyse der Strömung lokalisiert, die anhand der Konstruktion von Stromellipsen hervorgehoben werden.

## 7.3 Phasenverschiebung der maximalen Strömung gegenüber den Wasserstandsextrema

Dieses Verfahren wird exemplarisch an den Standorten Schulau und Scharhörn angewandt. Schulau repräsentiert einen Standort im Inneren des Ästuars der Elbe, Scharhörn liegt im seeseitigen Außenbereich der Mündung.

An beiden Standorten lässt sich für das Verfahren nur der Flutstrom verwenden. Dem Ebbstrom lässt sich kein eindeutiges Maximum der Geschwindigkeit zuordnen, da die Strömungsgeschwindigkeit über eine lange Zeitspanne konstant bleibt. Der Flutstrom hat an beiden Standorten eindeutige Maxima und kann somit zur Analyse verwendet werden.

Am Standort Schulau liegt eine Phasenverschiebung von  $\phi = 88^{\circ} \pm 15^{\circ}$  vor. Dieser Wert charakterisiert eine stehende Welle, wie anhand der Skizze in Kapitel 7.1 erkennbar ist. In Scharhörn beträgt die Phasenverschiebung  $63^{\circ} \pm 14^{\circ}$ . Hier kann also nicht von einer stehenden Welle gesprochen werden. Der Einfluss des Ästuars ist noch zu erkennen, da es sich nicht um eine fortlaufende Welle handelt ( $\phi = 0$ ).

Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass die Tidewelle im Ästuar stark verformt wird und Auswirkungen bis in den seeseitigen Außenbereich des Ästuars bestehen.

#### 7.4 Zeitlicher Verlauf der Stärke und Richtung der Strömung

Die horizontalen Geschwindigkeiten werden analysiert, um mögliche Querschwingungen zu ermitteln. Letztere lassen sich zuordnen, da die Partialtiden elliptische Stromfiguren beschreiben.

Die Stromfigur wird aus den Vektoren des minimalen und des maximalen Stroms konstruiert.

Dieses Verfahren wird wiederum beispielhaft an den Standorten Schulau und Scharhörn angewandt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 für die sechs wichtigsten Partialtiden aufgelistet.

		Schula	u		Scharhörn					
Partialtide	U <sub>i</sub> [cm/s]	u <sub>i</sub> [cm/s]	T <sub>i</sub>	U <sub>i</sub> /u <sub>i</sub>	U <sub>i</sub> [cm/s]	u <sub>i</sub> [cm/s]	$T_i$	$U_i/u_i$		
$\begin{array}{c} M_2\\S_2\\\mu_2\\N_2\\M_4\\M_6\end{array}$	81.037 18.477 10.740 10.203 13.180 9.360	-0.578 -0.030 -0.306 0.597 -1.091 0.401	-80.2 -80.4 -81.9 86.4 -85.0 -80.3	140,2 615,9 35,1 17,1 12,1 23,3	64.276 16.996 6.140 10.179 18.225 0.958	0.459 0.155 -0.247 0.556 0.671 0.358	-62.8 -63.9 -56.8 -60.5 -61.1 -25.8	140,0 109,7 24,9 18,3 27,2 2,7		

Tab. 4: Ergebnisse der Partialtidenanalyse der sechs wichtigsten Partialtiden an den Standorten Schulau und Scharhörn

U<sub>i</sub>: Maximaler Strom

u<sub>i</sub>: Minimaler Strom. Bei negativem Vorzeichen rotiert der Vektor im Uhrzeigersinn, bei positivem Vorzeichen dagegen.

T<sub>i</sub>: Inklinationswinkel. Gibt die Abweichung der Richtung des maximalen Vektors gegen die Nordrichtung an. Positive Winkel bedeuten eine Inklination nach Osten, negative Winkel eine Inklination nach Westen.

U<sub>i</sub>/u<sub>i</sub>: Betrag des Verhältnisses vom maximalen zum minimalen Vektor.

Aus Tab. 4 wird ersichtlich, dass die Längsströmungen an beiden Standorten deutlich überwiegen. Die dominierenden Partialtiden M<sub>2</sub> und S<sub>2</sub> weisen eine Schwingung parallel zum Verlauf der Elbe auf. Es handelt sich an beiden Standorten um Longitudinalwellen.

Signifikante Querschwingung sind für die Partialtide  $M_4$  am Standort Scharhörn und die Partialtide  $M_6$  am Standort Schulau zu beobachten. Der Einfluss dieser Partialtiden wird vom dominierenden Einfluss der  $M_2$  derart überlagert, dass keine Auswirkung auf die resultierende Stromfigur erkennbar ist.

## 8. Charakterisierung der Tidekurve

Um die Tidekurve in verschiedenen Regionen oder an einzelnen Standorten zu charakterisieren, werden an dieser Stelle die markanten Ergebnisse der Analysen gebietsweise zusammengefasst, parallel dargestellt und in Zusammenhang gebracht. Es wird dabei unterschieden zwischen den Regionen *Sylt, umströmte Insel* (Föhr), *Übergang von See zur Küste*, *Eidersperrwerk* und *Übergang von See ins Ästuar*. Vorangestellt wird die Charakterisierung der Tidekurve in Helgoland als Vergleichstide für die gesamte Region.

## 8.1 Helgoland: Die Vergleichstide

Die Nordsee ist ein Randmeer, in dem Gezeiten erzeugende Kräfte eine untergeordnete Rolle spielen. Die Tidewelle in der Nordsee ist durch eine Mitschwingungsgezeit geprägt, die maßgeblich durch die vom Nordatlantik und dem Englischen Kanal einschwingende Gezeit beeinflusst ist. Der Gezeitenrhythmus ist halbtägig mit einer Periode von etwa 745 min, vorwiegend als Effekt der dominanten  $M_2$ -Gezeit. In den flachen Regionen werden – topografisch bedingt – Oberschwingungen angeregt, die zu der Verformung der Tidewelle beitragen. Die Tidewelle in Helgoland wird durch die freie Insellage in der tieferen Nordsee am wenigsten durch die Topografie beeinflusst. Der Oberwassereinfluss spielt dort keine Rolle. Aus diesem Grund wird die Tidekurve in Helgoland für diese Studie als Vergleichstide herangezogen.

In der Nordsee befinden sich zwei ausgeprägte Amphidromien der  $M_2$ -Partialtide, eine im Englischen Kanal und die andere in der südöstlichen Nordsee etwa auf der Breite von Esbjerg und der Länge von Terschelling. Die Letztgenannte beeinflusst im Wesentlichen den Tideverlauf in der Deutschen Bucht. Es gilt dort in der Regel: Je größer der Abstand zu dieser  $M_2$ -Amphidromie ist, desto höher ist der Tidehub. Aus diesem Grund ist der mittlere Tidehub in Helgoland höher als in Sylt und geringer als entlang der ostfriesischen Küste. In Helgoland besteht eine Asymmetrie in der Tidekurve bedingt durch eine um 20 % längere Ebbe- als Flutdauer (Tab. 1b).

Die Unterschiede der Tidekennwerte zu den Zeitpunkten der Jahre '55, '75 und '98 sind in Helgoland eher unwesentlich (Tab. 1a und b). Nur das MTnw 1975 ist um ca. 0.1 m niedriger als 1955 und 1998. Dementsprechend ändert sich auch der MThb unwesentlich. Auch die Flut- und Ebbedauer schwankt nur um etwa 2 min.

Die Partialtidenanalyse für '55, '75, '98 ergibt (Abb. 15), dass die Amplitude der Tidekurve in Helgoland in erster Linie durch die Amplitude der M<sub>2</sub>-Gezeit (1.117 m ± 0.007 m) bestimmt wird, wie auch an den anderen Standorten im Untersuchungsgebiet. Nach der Größenordnung klassifiziert ergeben sich weitere 13 Partialtiden, deren Amplituden signifikant zur Form der Tidekurve beitragen. Es handelt sich dabei, sortiert nach der Größe der Amplituden, um die S<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>,  $\mu_2$ , O<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, 2MN<sub>2</sub>, M<sub>4</sub>, MS<sub>4</sub>, Q<sub>1</sub>, 2SM<sub>2</sub>, MN<sub>4</sub>, M<sub>6</sub> und die  $\epsilon_2$ . Weitere Obertiden, deren Amplituden an der Küste und in den Ästuaren deutlich ansteigen, sind in Helgoland nicht signifikant.

Die Änderungen der Zusammensetzung der Tidekurve zu den Zeitpunkten der Jahre '55, '75 und '98 sind folgende: Die signifikanten Amplituden der halbtägigen, vierteltägigen und eintägigen Partialtiden sind im Vergleich der drei Zeitabschnitte nahezu unverändert. Höhere Partialtiden sind in Helgoland nicht signifikant.

![](_page_26_Figure_6.jpeg)

Abb. 15: Vergleich der Partialtiden am Standort Helgoland für die Jahr '55, '75 und '98

#### 8.2 Übergang von See ins Ästuar

Die in die Ästuare eindringenden Tidewellen werden durch Reibung, Reflexion, Überlagerung, Advektion und Wechselwirkungen der einzelnen Partialtiden untereinander weiter verändert. Aufgrund nichtlinearer Effekte resultieren Verstärkung oder Dämpfung der Amplituden der Partialtiden. Die Seichtwassertiden werden mit Eintritt in das Küstenvorfeld und in die Ästuare angeregt oder zumindest verstärkt. Diese nichtlinearen Effekte führen zu einer typischen Verformung der Tidekurve und werden hier anhand der Tidekennwertanalyse und der Partialtidenanalyse dokumentiert. Zum Beispiel ist in diesem Zusammenhang die Erhöhung der Amplitude der M<sub>6</sub>-Gezeit von Helgoland nach Brunsbüttel zu nennen.

Das mittlere Thw steigt in allen Åstuaren flussaufwärts zu den drei Zeitpunkten der Jahre '55, '75 und '98 an. Das mittlere Tnw sinkt in gleicher Richtung teilweise stark ab. Gleichzeitig verschieben sich die Eintrittszeiten der Hoch- und Niedrigwasser. Betrachtungen der regionalen Veränderungen des mittleren Thb ergeben einen typischen Anstieg flussaufwärts, insbesondere in der Weser. In Helgoland ist die Tidekurve asymmetrisch mit verlängerter Ebbedauer. In Richtung der Ästuare verkürzt sich die Ebbedauer im Außenbereich der Mündungstrichter, so dass die Tidekurve symmetrischer wird ( $T_F/T_E \approx 1$ ). Weiter flussaufwärts verstärkt sich dann die Asymmetrie der Tidekurve erneut mit stark verkürztem Flutast, bis die Ebbedauer schließlich länger als in Helgoland ist.

Anhand der Partialtidenanalyse können in der Zeitspanne von April bis Juli '98 folgende Veränderungen in den Ästuaren zwischen der Mündung und dem Inneren der Ästuare nachgewiesen werden: Die Amplitude der O<sub>1</sub>-Gezeit nimmt ästuaraufwärts geringfügig ab, während die Amplitude der K<sub>1</sub>-Gezeit geringfügig zunimmt. Die Amplitude der  $\mu_2$ -Gezeit wird ästuaraufwärts nahezu durchgehend verstärkt. Dieses Phänomen ist vermutlich bedingt durch das Analyseverfahren.

An allen Standorten im Åstuar wird die Amplitude der  $M_4$ -Gezeit im Vergleich zu Helgoland verstärkt. Allerdings sind die Veränderungen der Amplitude dieser vierteltägigen Tide ästuaraufwärts zwischen den einzelnen Standorten nicht gleich groß. Die Amplitude der  $M_4$ -Gezeit ist am größten in Hamburg St. Pauli und Bremen Große Weserbrücke. Ein zweites, lokales Maximum der Amplitude der  $M_4$ -Gezeit kann in den Ästuaren an dem Ort beobachtet werden, an dem eine starke Verengung des Mündungstrichters stattfindet: In der Weser ('98) in Bremerhaven und in der Ems ('00) in Emden. Die Distanz zwischen den ermittelten Amplitudenmaxima der  $M_4$  beträgt 40 km in der Ems und 67 km in der Weser. Es findet eine Modulation der einlaufenden Welle statt. Die zwei Amplitudenmaxima geben einen Hinweis darauf, dass ein Teil der Welle reflektiert wird, so dass der stehende Anteil vergrößert wird. Die Schwingungsknoten liegen etwa an den genannten Positionen.

Dazu ein Rechenbeispiel: Es gilt für die Länge L der Schwingung: L =  $c \cdot T/4$ ,

mit der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $c = \sqrt{g} \cdot h$ , der Gravitationsbeschleunigung  $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ , der Wassertiefe h und der Periode T der Schwingung.

Für die Weser ergibt sich bei Annahme von h = 9 m und  $T_{M4}$  = 6.21 h dabei eine Länge L<sub>M4</sub> von ca. 53 km.

Analog ergibt sich für die Ems mit einer verringerten Wassertiefe von h = 6.5 m eine Länge  $L_{M4}$  von ca. 45 km. Die kürzere Länge  $L_{M4}$  in der Ems ist, verglichen mit der Weser, durch die geringere Wassertiefe in der Ems begründet. Das Rechenbeispiel zeigt, dass die Annahme eines Schwingungsknotens an diesen Positionen begründet ist. Die gemessene Distanz ist in der Weser höher als die berechnete und in der Ems geringer. Diese Abweichungen sind zum einen bedingt durch die geringe Anzahl von Pegelstandorten, die nur eine geringe räumliche Auflösung im Messgebiet ermöglichen, und zum anderen dadurch, dass die Bodenreibung durch den Ansatz nicht berücksichtigt wird.

In der Elbe ist ein vergleichbares mündungsnahes Maximum der Amplitude der M<sub>4</sub>-Gezeit im Jahr '98 nicht exakt bestimmbar, da es sich von Cuxhaven bis Glückstadt verteilt. Vermutlich liegt das daran, dass die Verengung des Ästuars am Mündungstrichter in der Elbe geringer ist als in Weser und Ems und sich der Effekt der Anregung und Verstärkung der M<sub>4</sub>-Gezeit am Mündungstrichter der Elbe von dem der anderen Ästuare unterscheidet.

Die Amplitude der  $M_6$ -Gezeit ist flussaufwärts generell höher als in Helgoland. Im Ästuar schwankt sie stark in Abhängigkeit der Lage der Schwingungsknoten und der Art der zusätzlichen Anregung. Nicht immer ist das Maximum im Innersten der Ästuare zu beobachten.

Der Einfluss des Oberwassers wird im Rahmen dieser Arbeit nur als Effekt langperiodischer physikalischer Prozesse nachgewiesen. Im Allgemeinen gilt, dass bei hoher Oberwasserabflussrate das Mittelwasser ansteigt. Mit dem erhöhten Mittelwasserstand ist eine Dämpfung der einlaufenden Tidewelle verbunden. Ein durch höheren Oberwasserabfluss bedingter erhöhter Mittelwasserstand wird meist durch langfristig steigende Niederschläge bzw. verminderte Verdunstung verursacht, die sich überwiegend langfristig bzw. saisonal entwickeln.

Veränderungen, die typischerweise nur in den einzelnen Ästuaren auftreten, werden im Folgenden getrennt für die Jade, Elbe, Weser und Ems aufgelistet.

## 8.2.1 Jade

Die Jade ist kein klassisches, sondern ein nahezu von Oberwasser unbeeinflusstes Ästuar. Da es sich hier nicht um den Mündungsbereich eines Flusses handelt, kann die Jade nicht im Idealfall als nahezu geschlossener Kanal angenommen werden. Es handelt sich um ein sehr flaches, breites Gebiet mit annähernd linearem Anstieg des Bodens.

Gestützt auf Wasserstandsmessungen an fünf Standorten (L.T. Alte Weser, Mellumplate, Voslapp, Wilhelmshaven Neuer und Alter Vorhafen) im Jahr '98 (April–Juli) wird eine geringe regionale und signifikante Veränderung der Amplitude der  $M_4$ -Gezeit beobachtet. Die Amplitude der  $M_4$ -Gezeit wird am L.T. Alte Weser im Vergleich zu den Verhältnissen in Helgoland gedämpft. Zwischen Mellumplate und Wilhelmshaven wird sie hingegen annähernd gleich stark verstärkt.

Durch einen Vergleich der Amplituden weiterer Partialtiden zeigt sich, dass deren Größen überwiegend den Verhältnissen im Gebiet zwischen Scharhörn Riff und Zehnerloch entsprechen. Dadurch unterscheidet sich die Jade deutlich von den oberwasserbeeinflussten Ästuaren.

Es wird auch bei einem Vergleich mit Jahreszeitreihen (d.h. längeren Zeitreihen und damit verbundener höherer Anzahl von Partialtiden) keine signifikante Veränderung der Amplitude der  $\mu_2$ -Gezeit zwischen den Standorten beobachtet. Im Vergleich zum Ästuar schwankt die Amplitude von O<sub>1</sub> und K<sub>1</sub> von Standort zu Standort.

Die Amplitude der  $\rm M_6\mathchar`-Gezeit$ nimmt geringfügig zwischen Mellumplate und Wilhelmshaven zu.

#### 8.2.2 Elbe

Die detaillierte Analyse für die Elbe fügt sich zu einem typischen Bild der lokalen und temporären Veränderungen in diesem Ästuar zusammen.

Die Ergebnisse in der Elbe lassen sich zusammenfassen, wobei der Standort Hamburg St. Pauli eine Ausnahme bildet. Dort sind die Auswirkungen der natürlichen und anthropogenen Veränderungen deutlich zu erkennen. Im Vergleich mit den anderen Standorten in der Elbe sind der MThb<sub>98</sub> und das MThw<sub>98</sub> wesentlich höher als in den Jahren '55 und '75. Das Gleiche gilt für die Amplituden der halbtägigen Gezeiten, der M<sub>4</sub>und der M<sub>6</sub>-Gezeit. Als besondere Lage in der Elbe zeichnet sich der Standort Glückstadt aus: Die Ergebnisse der Partialtidenanalyse deuten hier auf die Existenz eines Schwingungsknotens der halbtägigen Gezeiten hin. Die Veränderungen der Tidekennwerte zwischen den Zeitspannen in den Jahren '55, '75 und '98 sind in Cuxhaven ähnlich zu denen in Helgoland.

Für die größten Amplituden der halbtägigen Gezeiten  $(M_2, S_2, N_2)$  gilt in der Elbe für die drei Zeitabschnitte folgender Zusammenhang: Die Amplitude der  $M_2$ -Gezeit ändert sich in Helgoland näherungsweise nicht. Auch in Cuxhaven sind die Werte für '55, '75 und '98 mit 1.4 m ± 0.04 m nahezu unverändert.

In Glückstadt ist die Amplitude der  $M_2$ -Gezeit mit 1.2 m ± 0.02 m ebenso verhältnismäßig konstant. Dieser Standort bildet ein lokales Minimum der Amplitude der  $M_2$ -Gezeit im Ästuar. Die Amplitude der  $M_2$ -Gezeit in Hamburg St. Pauli in den Jahren '55, '75 und '98 erhöht sich von 1.05 m ('55) um ca. 46 % auf 1.53 m ('98) (Abb. 16). Diese starken Effekte der natürlichen und anthropogenen topografischen Veränderungen auf die Tidekurve treten hier in der Elbe erst am Pegelstandort Hamburg St. Pauli auf.

Mit größeren Wassertiefen im Ästuar ist eine Verringerung der Reibung verbunden. Dadurch wird die Dämpfung der rücklaufenden Welle geringer. Je geringer die Dämpfung ist, desto höher die Reflexion und damit die Ausbildung einer stehenden Welle. Vergleichbare Verhältnisse lassen sich für die Amplitude der S<sub>2</sub>-Gezeit für die Elbe in den Jahren ('55, '75, '98) feststellen.

Der Pegel Glückstadt zeichnet sich als besonderer Standort bezogen auf die Amplituden der halbtägigen Tiden aus. In den Jahren '75 und '98 ist dort ein Minimum dieser Partialtiden im Ästuar nachzuweisen, das sich deutlich bei einem Vergleich mit Helgoland zeigt. Die Amplitude der M<sub>2</sub>-Gezeit erhöht sich in Glückstadt deutlich geringer als an den übrigen Standorten im Ästuar. Die Amplituden der N<sub>2</sub>- und der S<sub>2</sub>-Gezeit sind während der drei Untersuchungszeitspannen in Glückstadt – im Gegensatz zu allen anderen Standorten im Ästuar – geringer als in Helgoland. Das zunehmend verstärkte Minimum der Amplitude der halbtägigen Partialtiden ist ein Anzeichen einer stehenden Welle, deren Anteil im Laufe der Zeit zunimmt. Diese Annahme wird durch Modellergebnisse (SEISS, 2001) und frühere Beobachtungen (ANNUTSCH, 2002, mündl. Mitteilg.) bestätigt. Bedingt durch die geringfügig unterschiedlichen Perioden der verschiedenen halbtägigen Tiden liegt deren Schwingungsknoten nicht immer direkt in Glückstadt. Die Veränderungen der Größe der Amplituden der halbtägigen Tiden liegen daher zwischen leichter Verstärkung und Dämpfung im Vergleich zu Helgoland.

In der Elbe werden im Vergleich zu Helgoland die signifikanten Amplituden der halbtägigen Gezeiten überwiegend leicht verstärkt. Die Amplituden der vierteltägigen Gezeiten werden im Vergleich zu Helgoland in den Jahren '55, '75 und '98 ästuaraufwärts verstärkt. Im Jahr '98 kann in Schulau ein Minimum für die vierteltägigen Tiden M<sub>4</sub>, MN<sub>4</sub> und MS<sub>4</sub> nachgewiesen werden. Es handelt sich dabei möglicherweise um einen Schwingungsknoten der vierteltägigen Gezeit. Aufgrund fehlender Daten kann dieses Phänomen in den Jahren '55 und '75 nicht belegt werden.

Die *charakteristische Form* der Tidekurve ergibt sich flussaufwärts durch einen Vergleich der gemessenen Wasserstände in Helgoland (1), dem Großen Vogelsand (2) und Cuxhaven (3) für die Zeitspanne April bis Juli '98: Die Eintrittszeiten des Thw und Tnw verschieben sich von (1) nach (3). Das Thw und das Tnw treten in Richtung Ästuar später ein. Das Thw steigt und das Tnw fällt, wobei sich die mittleren Werte bei (2) und (3) kaum voneinander unterscheiden und um 0.2–0.3 m deutlich von (1) abweichen.

Der Übergang Helgoland–Scharhörn Riff ist im Jahr '98 durch eine signifikante Zunahme der Amplituden der halb-, viertel-, sechsteltägigen Tiden gekennzeichnet. Hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Veränderungen der topografischen Verhältnisse in Richtung Küste.

Aus der Analyse der Tidekennwerte ergeben sich folgende typische Merkmale für die Elbe:

Generell werden, wie auch anhand der Partialtidenanalyse belegt, charakteristische Übereinstimmungen an den Standorten Helgoland, Cuxhaven und Glückstadt beobachtet, während sich die Entwicklung in Hamburg St. Pauli davon stark unterscheidet und eine eigene, typische Struktur aufweist (s. Tab 1a und b).

Für die zeitliche Veränderung des MTnw gilt: Von Helgoland bis nach Glückstadt ist es an jedem Standort im Jahr '75 am geringsten und nahezu übereinstimmend groß in den Jahren '55 und '98 (Tab. 1a und b). In Hamburg beträgt die Differenz zwischen dem MTnw ('55/'75) und ('75/'98) je 0.55 m.

Der MThb ändert sich an den Standorten Helgoland und Cuxhaven zwischen den Zeitpunkten der Jahre '55, '75 und '98 kaum. Wie auch die Amplitude der M<sub>2</sub>-Gezeit ist der MThb in Cuxhaven deutlich höher als in Helgoland und in Glückstadt. In Glückstadt beträgt die Differenz zwischen den drei MThb-Werten einige Zentimeter. Markante Änderungen sind nur in Hamburg St. Pauli zu beobachten, wo die Differenz zwischen '55 und '98 insgesamt 1.1 m beträgt. Die Veränderung der Zunahme des MThw und des MThb, insbesondere die Abnahme des MTnw in Hamburg St. Pauli zwischen '55 bis '98 wird auch von HEYER (2001, pers. Mitteilg.) bestätigt.

Lokale und zeitliche Veränderungen des Verhältnisses  $T_F/T_E$  lassen sich flussaufwärts beobachten. In den Jahren '55, '75 und '98 ist das Verhältnis  $T_F/T_E$  an den Standorten Helgoland und Cuxhaven nahezu gleich. In Glückstadt und Hamburg St. Pauli verändert sich dagegen die Länge der Flutdauer: Zwischen den Jahren '55 und '75 verlängert sie sich um etwa 5 min und zwischen '75 und '98 um weitere 10 min, so dass die Tidekurve symmetrischer wird. Dadurch ist die Flutdauer in Cuxhaven im Jahr '55 noch etwa 20 min länger als in Glückstadt und im Jahr '98 gleich lang.

## Vergleich der Amplituden der M2-Gezeit und deren harmonischen Obertiden in der Elbe am Standort Scharhörn Riff im Jahr '98:

Um einen Überblick über die Größenordnung der analysierten Amplituden der verschiedenen Partialtiden zu geben, sind diese Werte für den Standort Scharhörn Riff im Jahr '98 in Tab. 5 aufgelistet: Die Amplitude der M<sub>2</sub>-Gezeit liegt im Bereich von Metern, die Größenordnung der Amplitude der M<sub>4</sub> und M<sub>6</sub> im Bereich von Zentimetern. Die Amplituden der M<sub>8</sub>, M<sub>10</sub> und M<sub>12</sub> sind nur noch einige Millimeter groß und liegen damit überwiegend innerhalb des Fehlerbereichs. Die Amplitude der M<sub>14</sub> ist nicht nachweisbar.

Ästuaraufwärts sind die Amplituden der  $M_4$  bis zur  $M_{14}$  höher als in Scharhörn Riff (Abb. 15). Der Anstieg elbeaufwärts verläuft nicht stetig. Schwankungen ergeben sich

aus der Lage der Schwingungsknoten. In Hamburg St. Pauli ist die Amplitude der  $M_4$  am größten. Anzumerken ist, dass es sich hierbei um die größte Amplitude der Obertiden der  $M_2$  handelt.

Tab. 5: Größe der Amplituden [m] der Tiden in Scharhörn Riff (April–Juli '98)

$M_2$	1.390 m
$\tilde{M_4}$	0.082 m
$M_6$	0.048 m
$M_8$	0.006 m
$M_{10}$	0.003 m
$M_{12}$	0.001 m
$M_{14}$	0.000 m

![](_page_31_Figure_5.jpeg)

Abb. 16: Verhältnis der Amplitude der M2-Gezeit und ihrer Obertiden im Elbästuar zu den entsprechenden Amplituden in Scharhörn Riff

Elbaufwärts kann eine Anregung und Verstärkung der Seichtwassertiden beobachtet werden: In Scharhörn Riff sind die Amplituden der  $M_8$ ,  $M_{10}$  und  $M_{12}$  nicht messbar. Elbaufwärts werden diese Amplituden größer. Die Amplitude der  $M_6$  wird vom Standort Zehnerloch bis nach Glückstadt zunehmend größer. Der Standort Schulau zeichnet sich durch ein Minimum der Amplituden der  $M_4$  und der  $M_6$  und ein Maximum der Amplituden der  $M_{10}$ ,  $M_{12}$  und  $M_{14}$  aus. Die Amplitude der  $M_8$ -Gezeit ist in Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli am größten (0.025 m/0.030 m). Die  $M_{14}$  hat ein zweites Maximum in Brunsbüttel (0.002 m).

# Zeitliche Entwicklung der Partialtiden am Pegel Hamburg St. Pauli im April–Juli der Jahre '55, '75 und '98:

Die Veränderungen der Amplituden der Partialtiden in Helgoland lassen sich nicht in Hamburg St. Pauli beobachten (Abb. 17). Ein Vergleich zeigt keinerlei Übereinstimmungen. Die Auswirkungen der natürlichen und anthropogen (Vertiefung, Vordeichung) bedingten Veränderungen der Topografie beeinflussen die Amplituden der Partialtiden und damit auch die Form der Tidekurve in Hamburg in großem Maße, wie bereits die Unterschiede der Amplitude der M<sub>2</sub>-Gezeit zeigen.

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

Abb. 17: Vergleich der Partialtiden am Standort St. Pauli für die Jahre '55, '75 und '98

Diese Unterschiede zeigen sich auch für die Tiden  $S_2$ ,  $\mu_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$  und  $M_4$ . Abgesehen von der Amplitude der  $M_4$  und der  $MN_4$  sind die Amplituden im Jahr '98 in Hamburg am größten. Die starken Unterschiede sind in Cuxhaven und Glückstadt geringer. An diesen Standorten ist die Form der Tidekurve eher gleichbleibend. Die oben genannten Merkmale sind ortsfest.

#### 8.2.3 Weser

Die Veränderungen der Tidekurve zwischen den betrachteten Zeitabschnitten der Jahre '55, '75 und '98 sind am Standort Bremerhaven mit den entsprechenden Veränderungen in Helgoland und Cuxhaven vergleichbar. Änderungen an den Standorten Vegesack und Bremen weichen stark von diesen ab. Dort sind die Veränderungen mit geringeren Unterschieden ähnlich denen in Hamburg St. Pauli.

Die Eintrittszeiten der Hoch- und Niedrigwasser verschieben sich, vergleichbar mit den Verhältnissen in der Elbe, flussaufwärts vom L.T. Alte Weser/Roter Sand bis nach Bremen in den drei Untersuchungsperioden: Je weiter die Station ästuaraufwärts liegt, desto später treffen Hoch- oder Niedrigwasser ein. Zugleich steigt das MThw ästuaraufwärts stets bis nach Bremen an. Diese Differenz nimmt '75 und '98 zu.

Geringe lokale Unterschiede zeigen sich bei der zeitlichen Veränderung des MThw: Die Schwankungen des MThw zwischen den Zeitpunkten der Jahre '55, '75 und '98 sind in Bremerhaven mit denen in Helgoland und Cuxhaven vergleichbar. Die Differenzen (MThw<sub>98</sub>–MThw<sub>55</sub>) von 0.24 m in Vegesack und 0.19 m in Bremen sind geringer als in Hamburg.

Das niedrigste MTnw im Bereich der gesamten Weser wird in jedem der untersuchten Zeitabschnitte in Bremerhaven gemessen. Besonders starke Unterschiede zeigen sich bei zeitlichen Veränderungen des MTnw und damit verbunden auch des MThb an den verschiedenen Standorten.

Im Jahr '55 ist das MTnw in Vegesack und Bremen höher als am L.T. Alte Weser, mit Maximum in Bremen. Im Jahr '75 sind die Verhältnisse überwiegend vergleichbar. Im Jahr '98 ist das MTnw erstmals in Bremen geringer als am L.T. Alte Weser <u>und</u> in Vegesack. 1955,

1975 und 1998 steigt das MThw vom Leuchtturm Alte Weser bis nach Bremen gleichbleibend an. Damit ist ein enormer Anstieg des MThb an den Orten Vegesack und Bremen von etwa 0.6 m verbunden. Die Verhältnisse haben sich im Inneren des Ästuars der Weser im Laufe der Zeit durch natürliche und anthropogene Einflüsse vollends geändert.

Die zeitlichen Veränderungen der Flut- und Ebbedauer in Vegesack und Bremen von der Tendenz sind identisch mit den Veränderungen in Glückstadt und Hamburg St. Pauli. Die Flutdauer verlängert sich im Laufe der Zeit, ist aber auch '98 deutlich kürzer als die Ebbedauer.

*Partialtidenanalyse:* Im Gegensatz zum Pegel Glückstadt in der Elbe gibt es kein Minimum der Amplituden der halbtägigen Gezeiten im Weserästuar. Die Amplitude der M<sub>4</sub>-Gezeit wird ästuaraufwärts unregelmäßig verstärkt: Zwei Maxima in Bremerhaven und Bremen in den drei Zeitspannen deuten wie bereits erwähnt auf die Lage der Schwingungsknoten hin.

Das Maximum der Amplitude der M<sub>6</sub>-Gezeit ist in jedem Jahr in Bremen zu beobachten. Die Amplitude steigt generell flussaufwärts an mit lokalem zweiten geringen Maximum in Bremerhaven in den Jahren 1955 und 1975 (Abb. 18).

## Zeitliche Entwicklung der Partialtiden am Pegel Bremen im April–Juli der Jahre '55, '75 und '98:

Die zeitlichen Veränderungen der Amplituden der signifikanten Tiden in Bremen Große Weserbrücke der Jahre '55, '75 und '98 (Abb. 18) sind ähnlich wie in Hamburg. Es gibt nur geringe Unterschiede. Diese betreffen eher die Größe der Amplituden als die Art der Änderungen. Im Vergleich zu Hamburg kann auch in Bremen ein Zuwachs der Amplituden der dominanten halbtägigen  $M_2$ - und  $S_2$ -Gezeit beobachtet werden, wenngleich auch schwächer. Insgesamt sind die Amplituden der meisten Partialtiden höher als in Hamburg. Die zeitlichen Veränderungen der Amplituden der hochfrequenteren Tiden sind mit denen in Hamburg vergleichbar. Die Amplitude der  $M_6$  ist schon '55 relativ groß. Die ähnlichen Verhältnisse und vergleichbaren Veränderungen lassen sich durch folgende Argumente erklären: Bremen liegt wie Hamburg im Inneren eines Ästuars, das zwischen den Jahren '55 und '98 durch Vertiefungsmaßnahmen und natürliche topografische Veränderungen geprägt ist.

Wesentliche, durch die Lage im Ästuar bedingte Änderungen der Tidekurve treten in der Weser in Bremen <u>und</u> in Vegesack auf, wohingegen sie in der Elbe nur in Hamburg

![](_page_33_Figure_9.jpeg)

Abb. 18: Vergleich der Partialtiden am Standort Bremen für die Jahre '55, '75 und '98

extrem auftreten. Dieser Effekt hängt vermutlich mit der Form der Weser zusammen, die durch eine starke Verengung am Mündungstrichter geprägt ist und die in Vegesack bereits sehr schmal ist.

#### 8.3 Sylt

Die Insel Sylt gilt als Besonderheit im Untersuchungsgebiet, bedingt durch die exponierte Lage nahe der 10m-Tiefenlinie und die geringe Entfernung zur Amphidromie der M<sub>2</sub>-Gezeit.

Im Jahr '98 stehen 5 Pegel zur Verfügung, in den Jahren '75 und '55 nur einer (Hörnum Hafen). Aus diesem Grund beschränken sich die Interpretationen der zeitlichen Veränderungen der Tidekurve für die gesamte Insel auf einen Standort.

Die Nähe der M<sub>2</sub>-Amphidromie bedingt rund um die Insel Sylt den geringsten MThb des gesamten Untersuchungsgebietes. Dementsprechend ist das MTnw hoch und das MThw gering. Die zeitlichen Änderungen der Tidekurve sind sehr gering. Die Tidekurvenform ist um die ganze Insel verteilt '98 recht gleichförmig mit annähernd einheitlich hohen MThw und MTnw.

Auffälligerweise ist die mittlere Ebbedauer  $T_E$  '98 in Hörnum Hafen 22 min kürzer als '55. Im Vergleich dazu ist sie in Helgoland nahezu unverändert. Das Verhältnis  $T_F/T_E$  verändert sich dadurch von 0.93 auf 1.04., d.h. die Flutdauer wird im Laufe der Zeit länger als die Ebbedauer. Die Form der Tidekurve an den Extrempunkten ist verhältnismäßig rund, so dass Änderungen der Ebbedauer in diesem Zusammenhang vermutlich nicht von großer Bedeutung sind.

Beobachtungen zeigen eine Verzögerung der Eintrittszeit der Hoch- und Niedrigwasser im Jahr '98 in Hörnum Hafen und in List Hafen im Vergleich zur Außenküste. Beim Hochwasser ist die Verzögerung noch größer als beim Niedrigwasser. Besonders interessant ist, dass das Hochwasser zuerst am Messpfahl in Westerland eintritt und erst danach in List West und Hörnum West und später auf der dem Land zu gewandten Seite in Hörnum Hafen bzw. List Hafen (siehe Skizze).

#### Partialtidenanalyse für den Zeitabschnitt April bis Juli '98:

Vor allem die Amplituden der halbtägigen Tiden, aber auch einige der eintägigen Tiden sind geringer als in Helgoland, da die Insel Sylt nahe dem amphidromischen Knoten der M<sub>2</sub>-Gezeit liegt: Somit ist die Amplitude der M<sub>2</sub> an allen Pegeln von Sylt deutlich niedriger als in Helgoland.

An der Außenküste Sylts ist die Amplitude der  $M_4$ -Gezeit leicht verstärkt gegenüber Helgoland. Dieses Ergebnis kann nicht durch Modellrechnungen bestätigt werden, da vermutlich die Auflösung der komplexen Tiefenstruktur im Bereich der Insel zu gering ist, um die kleinskaligen Veränderungen zu erfassen. Möglicherweise wird die Verstärkung der Amplitude der  $M_4$ -Gezeit an der Außenküste durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten vor der Insel und starken horizontalen Geschwindigkeitsgradienten verursacht. Die Advektion bedingt dann lokal höhere Amplituden der  $M_4$ -Gezeit. Im Allgemeinen führen geringere Strömungsgeschwindigkeiten zu einer verminderten Amplitude der  $M_4$ .

#### 8.4 Umströmte Insel (Föhr)

In den drei Zeitabschnitten stehen jeweils vier Pegel (Standorte: Wittdün, Wyk, Dagebüll und Hörnum Hafen) zur Verfügung. Der Pegel Wittdün liegt auf ähnlicher geografischer Länge wie der Pegel Hörnum Hafen.

Im Jahr '98 (April–Juli) tritt das höchste MTnw in Hörnum Hafen auf. Es wird geringer von Wittdün über Wyk nach Dagebüll. Gleichzeitig ist das MThw am geringsten in Hörnum Hafen und steigt wiederum von Wittdün über Wyk nach Dagebüll an.

Das Tnw tritt zuerst in Wittdün, dann in Hörnum Hafen und dann in Wyk ein. Zuletzt erreicht es Dagebüll. Genauso verhält es sich mit der Eintrittszeit vom Thw mit dem Unterschied, dass es nahezu zeitgleich in Wyk und Dagebüll gemessen wird. Im Vergleich zu Hörnum Hafen weist die Tidekurve von Dagebüll und Wyk eine deutliche Asymmetrie auf, die durch eine verkürzte Flutdauer entsteht. In den Jahren '75 und '55 sind die Verhältnisse ähnlich.

Die Änderungen der Amplituden der  $M_4$ -Gezeit und der  $M_6$ -Gezeit in Richtung Dagebüll sind ähnlich wie beim Übergang von See ins Ästuar: Die Amplituden werden größer. Auch in diesem Bereich sind die Auswirkungen der Advektion, Reflexion und Dissipation auf die Tidekurve zu erkennen.

## 8.5 Übergang von der See zur Küste

Für den Übergang von der See zur Küste werden die Tidekurven an den Standorten Norderney bis Büsum mit denen in Helgoland verglichen. Daten dieser drei Pegel stehen für die drei Zeitabschnitte zur Verfügung. Der Pegel Norderney Riffgat wurde verlegt und hat im Jahr '55 noch Norderney Hafen geheißen. Die Lage der beiden Pegel ist ähnlich.

Ein Merkmal des Ubergangs von Helgoland zur nordfriesischen Küste (Büsum) ist eine höhere Amplitude der  $M_4$ -Gezeit in Richtung Küste. Neben dem Anstieg des Meeresbodens in Richtung Küste ist die Region um Büsum des Weiteren gekennzeichnet durch große Priele und Watten. SIEFERT et al. (1980) erwähnen südlich von Büsum einen Reststrom in die Dithmarscher Bucht hinein mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von 0.3–0.6 m/s. In dieser Region ist daher eine starke horizontale Advektion zu vermuten, wodurch die  $M_4$ -Gezeit angeregt wird. Dagegen ist die Lage des Pegels in Norderney auf der dem Land zugewandten Seite der Insel geprägt durch weite Wattgebiete bis zum Festland, unterbrochen von Prielen. Der Reststrom fließt dort nördlich der Insel nach Osten. Es ist anzunehmen, dass die Strömung, und damit verbunden auch die horizontalen Gradienten südlich der Insel, im Messbereich vergleichsweise gering sind. Dafür spricht die durchgehend geringe Amplitude der  $M_4$ -Gezeit.

Die Größe der Amplitude der  $M_4$ -Gezeit nimmt an den Standorten Büsum und Norderney zwischen den Zeitpunkten der Jahre '55, '75 und '98 ab. In Büsum beträgt sie im Jahr '98 nur noch 72 %, in Norderney 65 % der Amplitude im Jahr '55. Sie ist im Jahr '98 in Büsum mit 0.08 m fast dreimal so groß wie in Norderney. Im Vergleich dazu: In Helgoland schwankt die Amplitude nur geringfügig zu den drei Zeitpunkten.

Die Veränderungen der Amplitude der  $M_6$ -Gezeit sind den Veränderungen der Amplitude der  $M_4$ -Gezeit teilweise entgegengerichtet. Die Amplitude nimmt in Büsum zu und ist im Jahr '98 mit 0.054 m etwa dreimal so groß wie im Jahr '55. In Helgoland und Norderney ändert sie sich zwischen den Zeitpunkten '55 bis '98 kaum. Am Pegel Norderney ist die Amplitude stets etwa dreimal so groß wie in Helgoland. In Büsum ist sie dagegen in den Jahren '55 und '75 geringer als in Helgoland – nur im Jahr '98 ist sie etwa doppelt so groß. Im Allgemeinen hängt die Anregung der  $M_6$ -Gezeit mit veränderten Reibungs- und Reflexionsverhältnissen zusammen. Insofern ist es schwierig, die Zusammenhänge in diesem Fall in der Region Übergang von See zur Küste beurteilen zu können. Es ist lediglich festzustellen, dass die Amplitude der  $M_6$ -Gezeit entlang der Küste in der Größenordnung von wenigen Zentimetern liegt. Die erhöhte Amplitude in Büsum im Jahr '98 lässt hier auf veränderte Reibungsund Reflexionsverhältnisse im Vergleich zu den Jahren '55 und '75 schließen.

Am höchsten ist die Amplitude der M<sub>2</sub>-Gezeit an allen drei Standorten im Jahr '75. In Büsum ist die Amplitude stets um ca. 0.5 m höher als in Helgoland, in Norderney stets niedriger (0.01–0.1 m).

Bei einem Vergleich der Flutdauer  $T_F$  an verschiedenen Pegeln entlang der ostfriesischen Küste werden '98 folgende Veränderungen beobachtet: Die Flutdauer  $T_F$  wird von Borkum bis Langeoog geringer. Die Veränderungen betragen wenige Minuten. Am Leuchtturm Alte Weser ist sie etwa 10 min kürzer als auf Langeoog. Das Verhältnis  $T_F/T_E$  variiert dabei zwischen 0,99 (am Standort Borkum) und 0,96 (Norderney/Leuchtturm Alte Weser), was auf eine nahezu symmetrische Tidekurve hindeutet. Im Vergleich dazu ist die Tidekurve auf Helgoland mit einem Verhältnis von  $T_F/T_F = 0,84$  asymmetrisch.

Bei einem Vergleich im selben Jahr entlang der nordfriesischen Küste ergibt sich Folgendes: Das Verhältnis  $T_F/T_E$  wird in Richtung Norden kleiner und die Tidekurve damit asymmetrischer.  $T_F/T_E$  beträgt in Büsum 1,09, in Husum 0,94, in Dagebüll 0,86 und in Hörnum Hafen nur noch 0,79.

Betrachtet zu den Zeitpunkten in den Jahren '55, '75 und '98 schwankt das Verhältnis  $T_F/T_E$  an den Pegelstandorten Norderney, Büsum und Husum sehr geringfügig. Die Verhältnisse in den Jahren '55 und '98 stimmen an den drei Standorten nahezu überein.

#### 8.6 Eidersperrwerk

Die Interpretationsmöglichkeiten sind an diesem Ort durch den Bau und die Steuerung des Sperrwerkes stark beeinflusst. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Lage der Pegel Hundeknöll ('55) und Eidersperrwerk AP ('75/'98) nicht exakt übereinstimmt.

Eine deutliche Veränderung ergibt sich im Hinblick auf die Flutdauer an diesem Standort: Sie ist im Jahr '75 um 24 min kürzer als im Jahr '55. Insgesamt verändert sich das Verhältnis  $T_F/T_E$  von  $0.87_{('55)}$  auf  $0.73_{('98)}$ . Die Tidekurve ist im Jahr '98 wesentlich asymmetrischer als im Jahr '55. Dies kann im Zusammenhang mit der Tidesteuerung des Sperrwerks gesehen werden.

In Bezug auf die Partialtiden werden folgende Veränderungen festgestellt: Die Größe der Amplitude der  $M_2$ -Gezeit erreicht im Jahr '55 ein Maximum (ca. 1.5 m) und unterscheidet sich nur um einige Millimeter von der Größe im Jahr '75. Im Vergleich dazu ist sie im Jahr '98 um fast 10 cm geringer als in den beiden anderen Jahren.

Die Amplituden der  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$  und  $\mu_2$  sind im Jahr '98 am geringsten. Im Vergleich dazu liegen sie in diesem Jahr zwischen denen der Jahre '55 und '75.

Weiterhin sind starke Schwankungen der Amplituden der Tiden  $\mu_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $2MN_2$  und  $M_4$  zu beobachten. Auffällig ist die erhöhte Amplitude der  $K_1$  im Jahr '98. Des Weiteren sticht das Maximum der  $2MN_2$  '55 hervor. Im Vergleich dazu sind die Amplituden der Tiden  $\mu_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $2MN_2$  und  $M_4$  im Jahr '98 in Helgoland annähernd gleich groß. Ein Maximum der Amplitude der  $2NM_2$  ist dort auch im Jahr '55 zu beobachten, wenngleich es nicht so stark ausgeprägt ist wie am Pegel Eidersperrwerk AP.

Die Küste, 68 (2004), 99-141

#### 136

Der Einfluss nichtlinearer Effekte ist anhand der auffallend erhöhten Amplituden der vierteltägigen und sechsteltägigen Tiden in den drei Jahren zu erkennen. Die absolute Größe der Amplitude variiert in den drei Jahren abgesehen von der der M<sub>6</sub>-Gezeit unwesentlich.

## 9. Parameter zwecks Charakterisierung der Tidekurve zur praxisorientierten Anwendung

Für den Anwender sind nicht nur die Ergebnisse unterschiedlicher Analysen und Beschreibungen von Bedeutung. Vielmehr sollten zur detaillierten Beschreibung der charakteristischen Form einer Tidekurve noch zusätzliche Parameter zur Verfügung stehen.

Das Verfahren wird beispielhaft an einer gelaufenen Tide an den Standorten Scharhörn, Schulau, Büsum, Hörnum Hafen, Hörnum West und Helgoland vorgestellt, aus der zusätzliche Parameter für die Charakterisierung der Tidekurve entwickelt werden. Bei diesem Verfahren wird die Abweichung des linear interpolierten Wasserstandes von der Sinuskurve berechnet. Es lässt sich so die Änderung von einem gleichförmigen Tideverlauf parametrisieren. Gleichzeitig können so durch Vergleich von auf diesem Wege parametrisierten Tidekurven Änderungen an einem Ort über die Zeit definiert werden oder aber Tidekurven verschiedener Standorte verglichen werden.

Hier wird beispielhaft eine gelaufene Tide am jeweiligen Standort aus dem Monat April bzw. Mai '98 ausgewählt. Folgende Bedingungen gelten für die gewählten Tiden: Die Werte Thw, Tnw, Thb,  $T_E$  und  $T_F$  sollen mit denen des MTnw, MThw,  $MT_F$  und  $MT_E$  am besten übereinstimmen. Die Untersuchungen werden anhand der Flutäste durchgeführt. Die Abweichungen von der Sinuskurve treten dort deutlicher hervor als bei den Ebbeästen. Durch die beispielhafte Darstellung an dieser Stelle ließe sich die Anwendung des Verfahrens auf den Ebbeast bzw. auf eine mittlere Tidekurve leicht übertragen.

![](_page_37_Figure_7.jpeg)

Abb. 19: Mittlere Tidekurve und linear interpolierter Wasserstand am Pegel Schulau im April '98

Mithilfe der Abb. 19 wird das Verfahren visualisiert. Die Parameter sind wie folgt definiert:

- T<sup>1</sup>/<sub>2</sub>W: Tidehalbwasser. Es handelt sich um die Wasserstandshöhe, die der Hälfte des Tidehubs entspricht.
- t<sub>1</sub>: Zeitpunkt, an dem die Wasserstandshöhe der gelaufenen Tide (Flutast) an einem Standort der Höhe des Tidehalbwassers entspricht.
- t<sub>2</sub>: Zeitpunkt, an dem der linear interpolierte Wasserstand das Tidehalbwasser erreicht. Der linear interpolierte Wasserstand ergibt sich aus der direkten Verbindung von Tnw und dem darauf folgenden Thw (siehe gestrichelte Linie in Abb. 8.2); t<sub>2</sub> entspricht auch dem Schnittpunkt des linear interpolierten Wasserstands mit der Sinuskurve.
- h<sub>1</sub>: Wasserstandshöhe des Tidehalbwassers zum Zeitpunkt t<sub>1</sub>.
- h<sub>2</sub>: Wasserstandshöhe zum Zeitpunkt t<sub>2</sub>.
- A: Zeitintervall von der Eintrittszeit des Tnw bis t<sub>1</sub>.
- B: Zeitintervall von  $t_1$  bis  $t_2$ .
- C: Zeitintervall von t, bis zur Eintrittszeit des darauf folgenden Thw.

In der Tab. 6 werden weitere Parameter genannt. Es handelt sich dabei um:

- v<sub>A</sub>, v<sub>B</sub> und v<sub>C</sub>: Jeweilige durchschnittliche Steiggeschwindigkeiten in den entsprechenden Zeitintervallen.
- $V_F$ : Mittlere Steiggeschwindigkeit über die gesamte Flutdauer ( $T_F$ ) betrachtet.
- $dt = t_2-t_1$ : Zeitliche Differenz der realen Tidekurve und des linear interpolierten Wasserstands.

Pegelstandort	h <sub>1</sub> [cm]	h <sub>2</sub> [cm]	dh [cm]	t <sub>1</sub> [min]	t <sub>2</sub> [min]	dt [min]	v <sub>F</sub> [cm/h]	v <sub>A</sub> [cm/h]	v <sub>B</sub> [cm/h]	v <sub>C</sub> [cm/h]
Schulau	168	218	50	116	160	44	63,0	86,9	68,2	41,6
Scharhörn	122	174	52	132	177	45	42,5	55,4	69,3	30,3
Büsum	173	189	16	181	189	8	55,4	57,7	120,0	50,6
Hörnum Hafen	118	168	50	135	187	52	37,9	52,4	57,7	21,8
Hörnum West	102	110	8	155	164	9	36,7	40,0	53,3	36,0
Helgoland	116	138	22	153	174	21	40,0	45,8	62,9	30,2

Tab. 6: Ergebnisse des genannten Verfahrens in Bezug auf die Charakterisierung der Tidekurve an verschiedenen Pegelstandorten

Ein Vergleich der mittleren Steiggeschwindigkeiten der drei Zeitintervalle A, B und C mit der mittleren Steiggeschwindigkeit über die gesamte Flutdauer einer Sinuskurve zeigt, dass die Steiggeschwindigkeiten in den Intervallen A und C gleich groß sind. Die Länge des Zeitintervalls B ist gleich null (dt = 0). Denn der Zeitpunkt, an dem die Sinuskurve die Höhe des Tidehalbwassers erreicht, ist gleich dem Zeitpunkt, an dem der linear interpolierte Wasserstand die Höhe des Tidehalbwassers erreicht. Gleichzeitig ist die Steigung an diesem Punkt der Kurve am größten, so dass hier die größte Steiggeschwindigkeit vorliegt.

Bei einem Vergleich dieser Parameter an verschiedenen Standorten mit den Bedingungen, die bei der Sinuskurve vorliegen, zeigen sich erhebliche standortbedingte Abweichungen. Diese Abweichungen sind charakteristisch für die verschiedenen Regionen und letztendlich für den praktisch arbeitenden Ingenieur von besonderer Wichtigkeit.

Es treten große zeitliche Differenzen dt auf. Das Verhältnis der drei Steiggeschwindigkeiten zueinander ist an jedem Standort anders. Überwiegend ist die Steiggeschwindigkeit im

Zeitintervall B am größten, wie erwartet. Aber es gibt auch Abweichungen davon. Die Steiggeschwindigkeit ist im Zeitabschnitt A an allen Standorten höher als im Abschnitt C. Der Faktor schwankt dabei zwischen 1.1 und 2.1.

Bei der hier vorliegenden stichprobenartigen Auswahl findet sich in Bezug auf die zeitlichen Differenzen dt ein Maximum in Hörnum Hafen von 52 min. Dagegen beträgt dt in Hörnum West nur 9 min. Besonderheiten in der Umgebung der Insel Sylt werden anhand dieser Ergebnisse hervorgehoben. Auch anhand der Steiggeschwindigkeiten ergeben sich Unterschiede. An beiden Standorten sind die Steiggeschwindigkeiten im Intervall B am höchsten. In Hörnum Hafen ist die Steiggeschwindigkeit im Intervall A mehr als doppelt so hoch verglichen mit dem Intervall C. Am Pegelstandort Hörnum West hingegen sind die Steiggeschwindigkeiten in Intervall A und C annähernd gleich.

An den Standorten Schulau, Scharhörn und Hörnum West erreicht der Wasserstand die Bezugshöhe des Tidehalbwassers 44 bis 52 min früher, als es bei der Sinuskurve der Fall wäre. Das Zeitintervall A ist dort stark verkürzt, d.h. die Wasserstandshöhe des Tidehalbwassers wird schnell erreicht. Damit verbunden sind starke Strömungsgeschwindigkeiten an diesen Standorten. Deutlich geringer sind die Strömungsgeschwindigkeiten in Abschnitt C, da dieser eine längere Zeitspanne und einen geringeren Tidehub umfasst.

![](_page_39_Figure_5.jpeg)

Abb. 20: Verlauf der Flutäste an den Standorten Büsum und Schulau

In Abb. 20 ist die Wasserstandshöhe der gelaufenen Tide während der Flutdauer an den Standorten Büsum und Schulau dargestellt. Es ergeben sich dabei deutliche Unterschiede an den beiden Standorten. Die Tide verläuft in Büsum annähernd sinusförmig. Dagegen ist die Steigung des Flutastes am Pegelstandort Schulau bereits zu Beginn der Flutdauer am größten und verringert sich mit fortschreitender Zeit. Diese Form des Flutastes weicht stark von der einer Sinuskurve ab.

Durch einen Vergleich der mittleren Steiggeschwindigkeiten  $v_A$ ,  $v_B$  und  $v_C$  mit der jeweils mittleren Steiggeschwindigkeit über die gesamte Flutdauer an den verschiedenen

Standorten werden ebenfalls starke Abweichungen der gelaufenen Tiden von der Sinuskurve beobachtet: Wie zu erwarten, treten überwiegend im Zeitintervall B die höchsten Geschwindigkeiten auf. Abweichend ist am Standort Schulau die Geschwindigkeit v<sub>A</sub> deutlich höher als v<sub>B</sub> und v<sub>C</sub>. In diesem Hinblick gleicht der Flutast der Tidekurve an den Standorten Hörnum West und Büsum am ehesten dem einer Sinuskurve. Dort ist die zeitliche Differenz dt gering, ebenso wie der Unterschied der Geschwindigkeiten v<sub>A</sub> und v<sub>C</sub>. Die Abb. 21 verdeutlicht diese Ergebnisse. Dargestellt sind dort die mittleren Steiggeschwindigkeiten v<sub>A</sub>, v<sub>B</sub> und v<sub>C</sub> an den Standorten Büsum und Schulau.

![](_page_40_Figure_2.jpeg)

Abb. 21: Mittlere Steiggeschwindigkeiten v [cm/h] an den Standorten Büsum und Schulau für die Intervalle A, B und C

Im Allgemeinen kann die Steiggeschwindigkeit als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit herangezogen werden. Zu beachten ist, dass je schneller das Wasser steigt, desto höher die Strömungsgeschwindigkeit ist.

Für den Strombau ist dies beispielsweise von großer Bedeutung, da bei höherer Strömungsgeschwindigkeit eine größere Sedimentfracht mitgeführt wird. Diese lagert sich zum Teil bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten wieder ab. Dies zeigt sich besonders am Standort Schulau, ist aber auch an anderen Standorten in etwas abgeschwächter Form gegeben.

#### 10. Zusammenfassung und Ausblick

Die Form der Tidekurve an einem Ort lässt sich durch den gemessenen Wasserstand, durch Tidekennwerte, durch die Zusammensetzung der Amplituden und Phasen der harmonischen Partialtiden oder deren Spektren beschreiben. Vollenden lässt sich die Beschreibung der Tidekurve erst mithilfe der Analyse der Strömungsverhältnisse.

Großen Einfluss auf die Form und Ausprägung der Tidekurve haben die Bathymetrie und die Form der Küste, die die hydrodynamischen Gegebenheiten beeinflussen. Auswirkungen physikalischer Prozesse wie Reflexion, Reibung, Advektion und anderer nichtlinearer Wechselwirkungen sind daher an jedem Ort unterschiedlich und führen zu einer lokal oder gebietsweise charakteristischen Tidekurve.

Unter diesen Gesichtspunkten wurden im Rahmen dieser Arbeit Wasserstände an bis zu 44 verschiedenen Pegelstandorten in den Jahren '55, '75 und '98 untersucht. Die Daten wurden qualitätsgeprüft. Es wurden Datensätze aus einer 4-monatigen Zeitspanne (1. April–31. Juli) dieser Jahre gewählt, um den Einfluss der Meteorologie zu minimieren.

Morphologische Veränderungen führen entlang der Küste und in den Ästuaren dazu, dass sich dort die Form der Tidekurve ändert. Es werden Verschiebungen der Eintrittszeiten, Veränderungen der Höhe des mittleren Hoch- und Niedrigwassers und damit verbunden des Tidehubs beobachtet. Auch die Dauer der Flut und der Ebbe verändert sich.

Eine ausführliche Beschreibung der aus diesen Datensätzen berechneten Tidekennwerte liegt vor. Am Standort Helgoland unterscheiden sich die Tidekennwerte verschiedener Jahre kaum voneinander. Im Vergleich dazu sind die Unterschiede an den Standorten im Inneren der Ästuare (Hamburg, Bremen) sehr groß und lassen auf einen starken Einfluss anthropogener und natürlich bedingter morphologischer Veränderungen schließen.

Weiterhin bestätigt sich anhand der Veränderungen der Tidekennwerte bei gleichem Vorzeichen die Vermutung, dass sich Veränderungen der Tidekurve in der inneren Deutschen Bucht teilweise bis in Küstennähe und bis in die Ästuare fortsetzen.

Mittels Fourier- und Partialtidenanalyse der Wasserstände wird verdeutlicht, dass Obertiden in Küstennähe angeregt und verstärkt werden. Dieses Phänomen tritt besonders deutlich in den Ästuaren auf, was mit der Reflexion der Tidewelle in Zusammenhang steht. Auch die Reibung und die Advektion spielen dort eine große Rolle. Detailliert wird an verschiedenen Standorten die Wirkung dieser drei Faktoren beschrieben. Die Amplituden der Seichtwassertiden in Küstennähe und in den Ästuaren sind deutlich höher als in Helgoland.

Ein für weitere Untersuchungen interessantes Ergebnis der Fourieranalyse ist, dass der meteorologische Einfluss so groß ist, dass er nicht vernachlässigt werden kann.

Das Ziel, mithilfe der Fourieranalyse ein einfaches standorttypisches Maß zu finden, um mit wenigen Argumenten die gemessene Tidekurve rekonstruierten zu können, wurde leider nicht erreicht.

In den Ästuaren der Elbe, Weser und Ems wird der Einfluss der Oberwassermenge durch eine direkte Korrelation von Wasserstands- und Abflussdaten und einer Korrelation der Fouriertransformierten dieser Daten untersucht.

Flächenhafte Analysen des Wasserstandes werden mittels des numerischen HN-Modells der Deutschen Bucht durchgeführt, um eine konsistente Darstellung der Tidekennwerte sowohl in den Mündungsbereichen der Ästuare zwischen den Pegelpositionen als auch seewärts darüber hinaus in der Deutschen Bucht zu erhalten. Es wird die Verteilung der Amplituden und Phasen der Partialtiden O<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, M<sub>4</sub> und M<sub>6</sub> innerhalb der Deutschen Bucht beschrieben.

Um die Tidekurve vollständig zu erfassen, müssen Wasserstand und Strömung sowie gegebenenfalls die Dichte gegeben sein. Daher werden charakteristische Parameter wie der zeitliche Verlauf der Stärke und die Richtung der Strömung und die Phasenverschiebung der maximalen Strömungen gegenüber der Phase der Wasserstandsextrema mittels des numerischen HN-Modells ermittelt und erläutert.

Beispielhaft wird eine Korrelation von Strömung und Tidekurve an Hand von Messdaten durchgeführt und die berechnete Phasenverschiebung der maximalen Strömung gegenüber den Wasserstandsextrema vorgestellt, um die Anwendung der Parametrisierung an einem Standort zu demonstrieren und die Beschreibung einer Tidewelle zu ermöglichen. Den Ansatz dieses Verfahrens können spätere Anwender auf eigene Ansprüche übertragen.

Für nachfolgende Untersuchungen werden weitere Vertiefungsmöglichkeiten vorgeschlagen:

- Durch Langzeitstudien können mehr Partialtiden erfasst werden. Auch ist dann eine klarere Trennung in den Frequenzen erreichbar.
- Das Modellgitter sollte in Küstennähe weiter verfeinert werden, damit die Topografie dort besser aufgelöst werden kann. Damit verbunden könnten physikalische Prozesse weitgehender analysiert und damit ihr Einfluss bewertet werden.
- Es sollte eine vertiefte Analyse der Korrelation von Strömung und Tidekurve mit einer größeren Anzahl von Messpunkten durchgeführt werden. Sie dient der Vervollständigung des Verständnisses der Charakterisierung der Tidekurve, denn diese setzt sich aus beiden Parametern, dem Wasserstand <u>und</u> der Strömung, zusammen.

Auf Basis dieser Untersuchungen ergibt sich ein Feld für vertiefende Untersuchungen auf einer erweiterten Datenlage mithilfe der Modellierung. Hierbei könnte der Schritt verifiziert werden, die hier lokalisierten physikalischen Hintergründe z.B. für die Strömung in einen erweiterten Zusammenhang zu bringen.

### 11. Dank

An der erfolgreichen Bearbeitung der Inhalte waren viele kooperative Menschen und Institutionen beteiligt. So trafen wir auf eine sehr gute Zusammenarbeit bei allen Ämtern, die uns die Daten zur Verfügung stellten. Darüber hinaus unterstützte uns Herr Jensen (ALR Husum) stets mit konstruktiven Ideen und Diskussionen. Herr Lassen und Herr Annutsch verhalfen nicht nur in der Startphase, sondern auch im ganzen Projektzeitraum mit fachlichen Anregungen dem Projekt zum erfolgreichen Abschluss. Herrn Marausic, Frau Thumm und Herrn Rienas sei für ihre gute Arbeit auch in arbeitsintensiven Zeiten gedankt.

Der projektbegleitenden Gruppe mit Herrn Petersen, Herrn Blasi, Herrn Dick, Herrn Kunz, Herrn Schaller und Frau Töppe möchten wir für die konstruktive Diskussion danken.

Ein ganz besonderer Dank geht an Herrn Eggert und Herrn Heyer, die stets dem Projekt zur Seite standen.

## 12. Schriftenverzeichnis

ARBEITSGRUPPE WDFÜ: Berichte über den Betrieb der WDFÜ (Wasserstandsdatenfernübertragung), Kap. 6.2.3.3 WSD'n Nord u. Nordwest, 2000.

- GODIN, G.: The analysis of tides. Liverpool, 1972
- GODIN, G.: Tides. Ottawa, 1988.
- GODIN, G.: Reprints in oceanography: 1965–1995. Ottawa, 1996.
- PLÜß, A.: Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, H. 67: 83–127, 2004.
- SEISS, G.: Analyse der Partialtiden. Vortrag Kolloquium. <u>http://www.hamburg.baw.de/talk/</u> <u>t15112001-de.htm</u>, 2001.
- SIEFERT, W.; FAHSE, H.; MIESSNER, F.; RICHTER, H.-H.; TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins – Ergebnisse eines KFKI-Messprogramms. In: Die Küste, H. 35: 147–186, 1980.