

# Über die Bedeutung der Reflexion von Obertiden für die Unterhaltungsaufwendungen in der Tideelbe

Von GÜNTHER EICHWEBER und DIETRICH LANGE

## Zusammenfassung

Auf der Grundlage von Strömungsmessungen wird untersucht, ob Obertiden in der Elbe stehende Wellen anregen. Ergebnisse der Spektralanalyse zeigen, daß die Amplitudenverteilung der Obertiden auf die Existenz stehender Wellen hinweist. Die geraden und die ungeraden Obertiden der  $M_2$  sind zwei unabhängig voneinander bestehenden Schwingungssystemen zuzuordnen, deren Strömungsminima mit den bedeutenden Baggerstellen übereinstimmen. Die Amplituden der Eigenschwingungen zeigen große Variabilität im Spring-Nipp-Tidenzyklus und im Verlauf mehrerer Jahre.

## Summary

*Tidal subharmonics induce resonance phenomena in the Elbe estuary. Two possible systems of standing waves relating to the odd- and the even-numbered subharmonics of the  $M_2$  are discussed. Spectral analysis of current measurements reveals the spectral amplitudes of subharmonics in the range from 373 to 67.5 minutes, shows a strong correlation of the amplitudes of subharmonics with the spring-neap-cycle but does not render sharp images of the nodes. Assuming certain topographic regions as reflectors, an energy distribution can be deduced which shows good correlation with dredging sites.*

## Inhalt

1. Einführung .....	180
2. Anregung der Schwingungen .....	183
3. Auswertung von Strömungsmessungen .....	183
3.1 Verfahren der Spektrenrechnung .....	183
3.2 Fensterfunktion .....	186
3.3 Normierung .....	186
4. Ergebnisse der Spektrenrechnung für die bedeutendsten Perioden .....	186
5. Berechnung der Phasenspektren .....	190
6. Verhalten von kurzperiodischen Strömungsschwankungen während der Gezeitenperioden .....	192
7. Die Amplituden der Obertiden im Spring-Nipp-Tidenzyklus .....	192
8. Langzeitiges Verhalten der Obertiden .....	192
9. Konsequenzen für numerische Modelle .....	196
10. Konsequenzen für den Strombau .....	196
11. Ausblick .....	198
12. Schriftenverzeichnis .....	198

## 1. Einführung

In der Unterelbe werden jährlich mehrere Millionen Kubikmeter Sand und Schlick gebaggert, um die Fahrrinne schiffbar zu halten. Der Bedarf an geeigneten Maßnahmen zur Verringerung der Baggermengen ist entsprechend groß.

Die Erfahrung der Wasser- und Schifffahrtsämter zeigt eine starke Abhängigkeit des Aufkommens und der Lage der Eintreibungen von der Stärke des Oberwasserabflusses und der Lage der Brackwasserzone. Weitere Kenntnisse beziehen sich darauf, welche Rolle der Querschnittsverlauf und quer zur Fahrrinne verlaufende Strömungen bei den Eintreibungen spielen. Im folgenden soll dargestellt werden, welchen Beitrag Prozesse liefern können, die sich aus der Reflexion der Gezeiten einschließlich ihrer kurzperiodischen Anteile ergeben und keinen sichtbaren Bezug zum Kurvenverlauf des Stromes aufweisen. Die Fragestellung, zu deren Beantwortung damit beigetragen wird, lautet nicht, woher und auf welchem Wege das Sediment in die Baggerstelle gelangt, sondern warum es an den speziellen Stellen liegenbleibt, obwohl doch die gesamte Sohle mit jeder Tide großen Sedimentumlagerungen unterworfen ist. Es wird dargestellt, wie Obertiden durch Reflexion stehende Wellen bilden und so zu einer diskontinuierlichen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten beitragen können.

Ausgangspunkt der Arbeit ist die Beobachtung, daß die Gesamtlänge der Unterhaltungsstrecken bei zunehmenden Baggermengen abgenommen hat; d.h., die Eintreibungen konzentrieren sich auf immer weniger und immer kürzere Streckenabschnitte (Abb. 1). Dies weist darauf hin, daß hier ein Ordnungsprinzip wirkt und daß dessen Bedeutung zugenommen hat.

Es wurde auf der Grundlage der veränderten Eintreibungen und der Verteilung der Unterhaltungsstrecken und Übertiefen im Strom die Hypothese aufgestellt, daß die längs des Stroms variiierende Strömungsgeschwindigkeit durch ein System von einander überlagernden Eigenschwingungen gebildet wird, die durch Resonanz der Gezeitenwellen mit dem Wasserkörper der Elbe entstehen. Die Schwingungen würden demnach denen einer einseitig offenen Bucht entsprechen, wie sie in der Ozeanographie vielfach beschrieben sind (DIETRICH et al., 1975).

Die Reflexionen finden zum einen an einem geschlossenen Ende statt (für die Teilreflexion genügt ein Bereich mit sprunghaft abnehmender Wassertiefe bzw. abnehmendem Querschnitt) und zum anderen an einem offenen Ende, das entsprechend zunehmende Wassertiefe bzw. Querschnitte aufweist. Die Reflexion am geschlossenen Ende erfolgt phasengleich, die am offenen Ende mit Phasenumkehr. Die Wasserspiegelauslenkung wird am offenen Ende zu Null bzw. bei Teilreflexionen zu einem Minimum; die Strömungen werden dort bezüglich der Periode der betreffenden, Resonanz zeigenden Welle maximal. Am geschlossenen Ende gilt das umgekehrte. Die Abb. 2 zeigt schematisch den Verlauf von Wasserspiegelauslenkung und Strömungsgeschwindigkeiten für die Grundschiwingung und die ersten zwei Oberschwingungen einer einseitig offenen Bucht.

Zusätzlich sind die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten und deren Summe dargestellt, um zu veranschaulichen, wie die Schwingungen die Gezeitenströmung mit einem räumlich variierenden Beitrag überlagern.

Die Perioden stellen sich wie folgt ein:

$$\text{Grundschiwingung:} \quad \tau_0 = \frac{4L}{\sqrt{g \cdot h}}$$

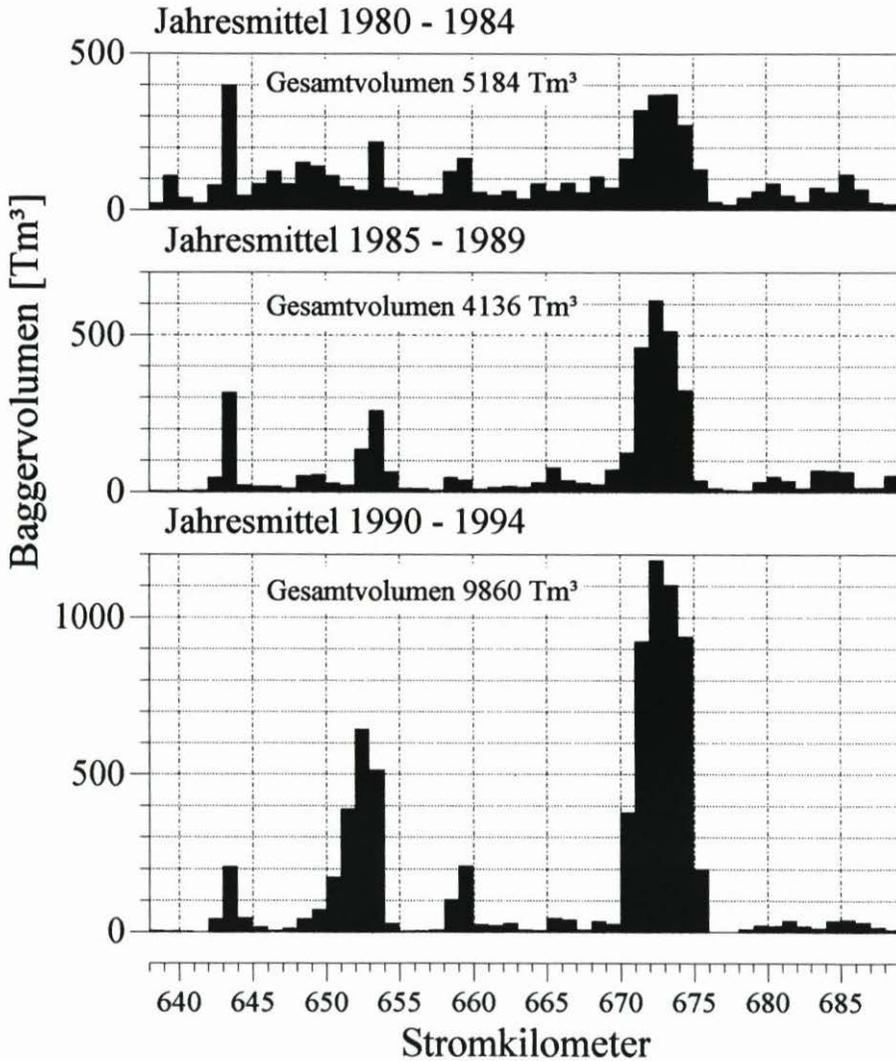


Abb. 1: Entwicklung der Unterhaltungsbaggermengen im Bereich zwischen Hamburg und St. Margarethen

Oberschwingung erster Ordnung:  $\tau_1 = \tau_{o/3}$

Oberschwingung zweiter Ordnung:  $\tau_2 = \tau_{o/5}$

mit  $\tau_n$  = Periode der Schwingung n-ter Ordnung

$L$  = Länge der Bucht

$g$  = Erdbeschleunigung

$h$  = Wassertiefe

Auf dieser Grundlage werden die Baggerstellen als Bereiche mit – durch den Beitrag der Schwingungen – lokal erniedrigten Strömungsgeschwindigkeiten gedeutet; die Klappstellen stellen Übertiefen mit großer Räumkraft dar, die hohe Strömungsgeschwindigkeiten aufweisen.

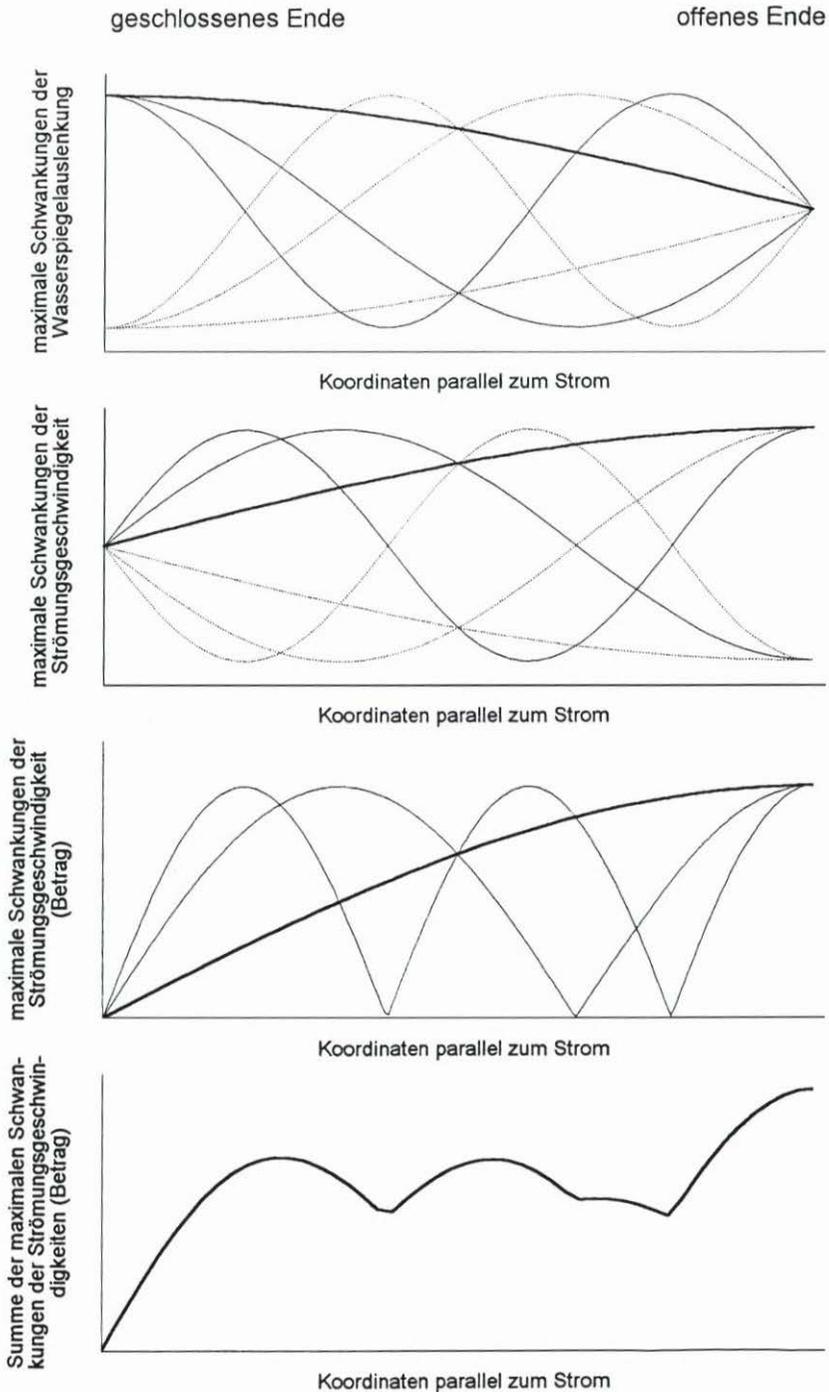


Abb. 2: Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeiten, deren Beträge und die Summe der Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten führen bei Eigenschwingungen einer einseitig offenen Bucht zu einer diskontinuierlichen Verteilung der mittleren Strömungen

## 2. Anregung der Schwingungen

Es ist bekannt, daß sich in Küstengebieten in Wechselwirkung zwischen den Haupttiden und der Reibung sogenannte Seichtwassertiden einstellen, deren Perioden sich als die der Haupttide geteilt durch eine ganze Zahl einstellen (z. B.  $M_2/2$ ,  $M_2/3$ ,  $M_2/4$ ,  $M_2/5$ ,  $M_2/6$ , usw., RAUSCHELBACH, 1924). Die daraus resultierenden Anteile zum lokal wirksamen Gezeitenpotential sind abhängig von der Morphologie und daher zeitlich veränderlich. Werden in Nebengewässern der Nordsee wie z. B. der Elbe Gezeiten angeregt, so stellen sich auch durch die Seichtwassertiden erzwungene Schwingungen ein, die als Wellen in das Nebengewässer einlaufen und teilweise dissipiert, teilweise reflektiert werden. Die Ästuarie an der Nordsee zeigen erhebliche Reflexionen der halbtägigen Gezeitenwelle, was im Fall der Jade durch die natürliche Gestalt des Gewässers hervorgerufen wird, in den Beispielen Weser und Elbe durch künstliche Veränderungen hervorgerufen bzw. verstärkt wurde. Für die Jade wurde die Überlagerung der halbtägigen Tide mit ihrer reflektierten zu einer stehenden Welle von LÜDERS (1934) beschrieben; für die Elbe hat HENSEN (1942) die Grundlagen gelegt. Demnach resultiert der nach Oberstrom zunehmende Tidenhub der Elbe ebenso wie auch die Phasengleichheit zwischen Hoch- bzw. Niedrigwasser einerseits und Stromkenterung andererseits aus der Reflexion der Tide im Bereich Hamburg. Je stärker der Anteil der reflektierten Gezeitenwelle ist, desto mehr zeigt sie die Energieverteilung und das zeitliche Verhalten einer in Resonanz befindlichen stehenden Welle. Die Resonanz kann sowohl durch Ausbaumaßnahmen wie auch durch die Wirkung der stehenden Welle auf die Querschnitte verstärkt werden. Seit dem Ausbau der Elbe zum Schifffahrtsweg, insbesondere seit den 60er Jahren, hat sich die Reflexion der Tidewelle bei Hamburg erheblich verstärkt (Abb. 3).

Über die in gleicher Weise mögliche Resonanz der Obertiden lagen zur Zeit der Untersuchungen von Lüders und Hensen keine Erkenntnisse vor. Grundsätzlich ist von einem analogen Verhalten der kürzeren Wellen auszugehen.

## 3. Auswertung von Strömungsmessungen

Auf der Grundlage der langen Zeitreihen, in denen die Wasserstände dokumentiert sind, ließen sich die kurzperiodischen Schwingungen nicht untersuchen, da die Pegel (beabsichtigt) eine starke mechanische Dämpfung haben, die (unbeabsichtigt) von Pegel zu Pegel verschieden ist. Es bestand daher Bedarf an langen Zeitreihen, die die Strömungen der Tideelbe dokumentieren. Im Jahre 1992 wurde die Meßkampagne ELBEX durchgeführt, um ein numerisches Modell der Bundesanstalt für Wasserbau zu verifizieren. Damit lag umfangreiches Datenmaterial vor, das für die Spektralanalyse genutzt werden konnte. Insgesamt wurden in der ELBEX-Meßkampagne in zwei Zeiträumen von je zwei Wochen an 75 Meßpositionen Strömungen dokumentiert. Die Daten wurden digital als 5-Minuten-Mittelwerte gespeichert; ein Sensor, der auf der Höhe von Brokdorf ausgelegt war, speicherte 1-Minuten-Mittelwerte (Abb. 4).

### 3.1 Verfahren der Spektrenrechnung

Die Spektren der vorliegenden Arbeit wurden nicht mit der FFT berechnet, sondern mit dem Goertzel-Algorithmus (GOERTZEL, 1958), da dieser den Vorteil bietet, für beliebige dis-

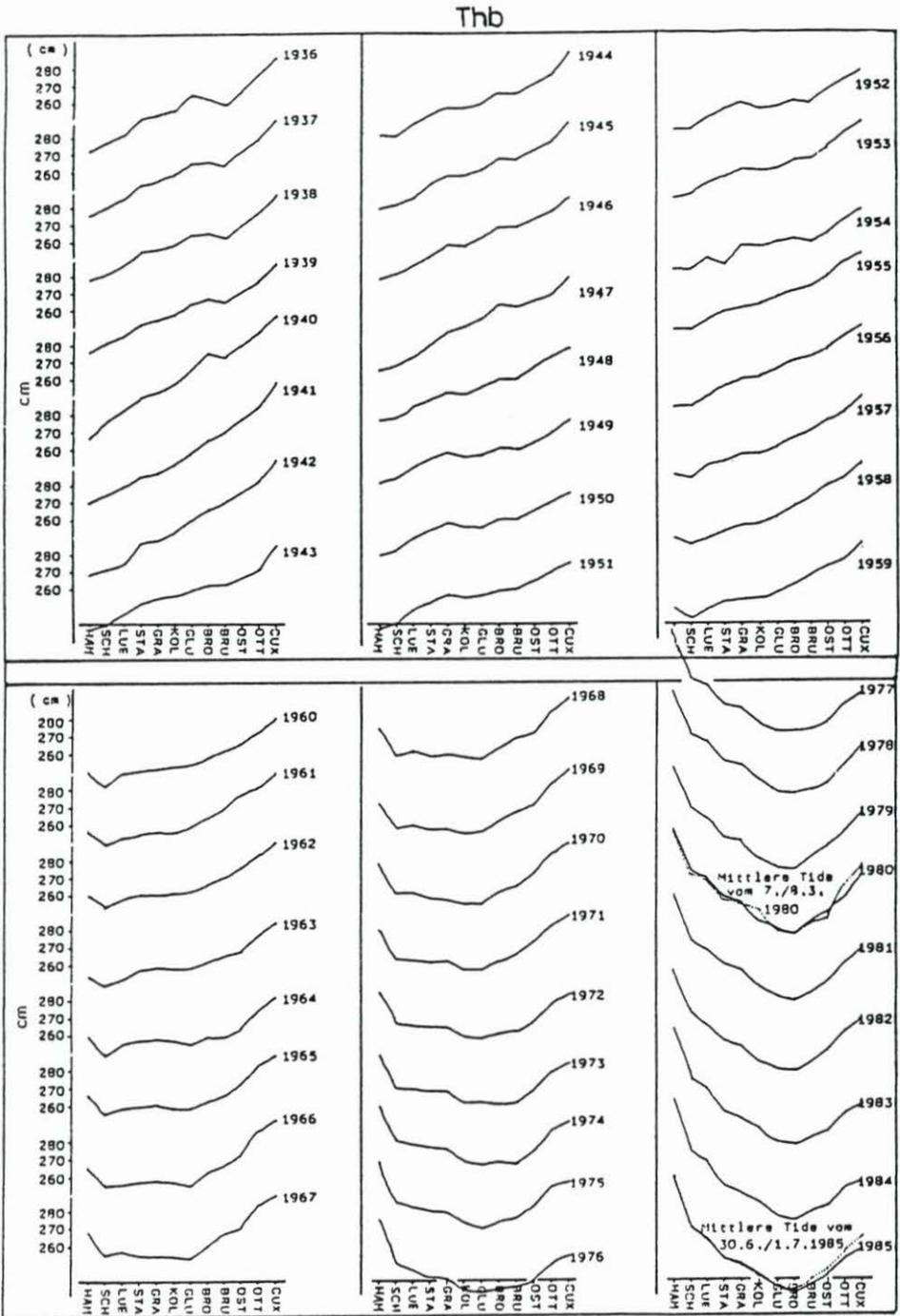


Abb 3: Entwicklung der Tidehubverteilung in der Unterelbe durch Ausbaumaßnahmen (entn. aus HINRICHSSEN, 1991)

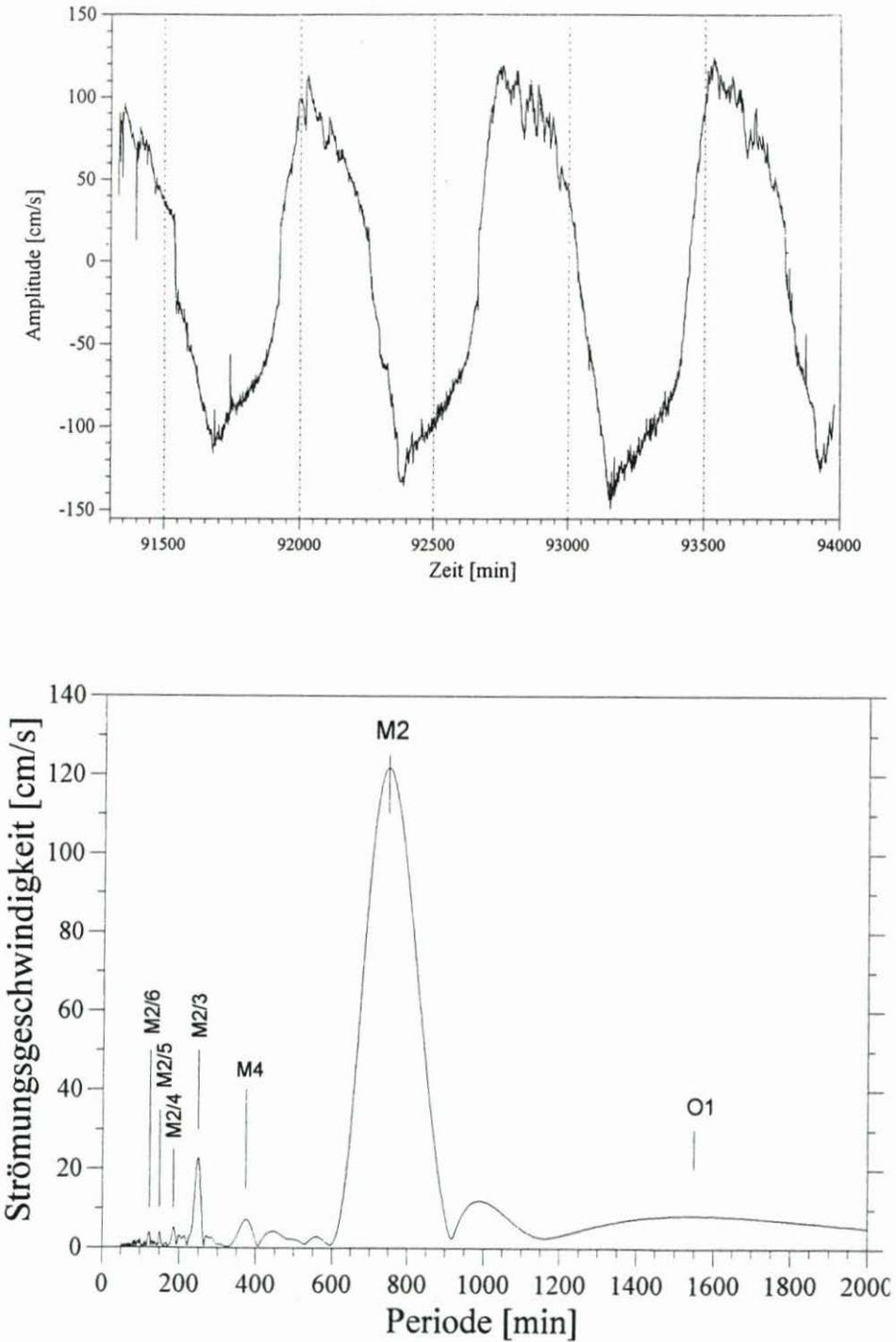


Abb. 4: Zeitreihe (Ausschnitt) und Spektrum der Zeitreihe Brokdorf

krete Frequenzen Amplituden zu bestimmen. In einem Frequenzintervall kann daher genau nach der Periode des Maximums gesucht werden. Eine ausführliche Darstellung der spektralanalytischen Auswertung der ELBEX-Daten gibt LANGE (1995).

### 3.2 Fensterfunktion

Bedingt durch die endliche Länge der Zeitreihen treten bei der Spektrenberechnung zu jedem Hauptmaximum mehrere Nebenmaxima auf, die die Amplituden bei den entsprechenden Frequenzen verfälschen. Durch die Wahl einer geeigneten Fensterfunktion, mit der die Zeitreihe multipliziert wird, kann der Effekt verringert werden. Dies hat allerdings den Nachteil, daß die spektrale Auflösung verringert und die Frequenz des Hauptmaximums verschoben wird. Für die Rechnungen wurde das Hanning-Window verwendet. An synthetischen Zeitreihen wurde die Übereinstimmung zwischen eingegebenen und berechneten Amplituden und Phasen überprüft.

Durch geringe zeitliche Korrelation der Schwingungen kürzerer Perioden können die Amplituden bei der Spektrenberechnung unterdrückt werden. Dies kann ausgeglichen werden, indem die Amplituden mit Fenstern geeigneter, nicht zu großer Länge berechnet und diese Fenster entlang der Zeitreihe verschoben werden. Summiert man die so erhaltenen Amplitudenwerte auf (Stapelung), so erhält man genauere Ergebnisse auch für Schwingungen mit geringer zeitlicher Korrelation. Die Werte der Abb. 5 sind mit gleitenden Fenstern und Stapelung ermittelt worden.

### 3.3 Normierung

Um die Wirkung der Sensorposition auszugleichen, wurde angenommen, daß die Amplituden der Haupttide und der Obertiden durch die Lage im Strom und die Höhe über der Sohle in gleicher Weise beeinflußt werden. Es wurden daher die Werte der  $M_2$ -Amplituden zur Normierung der Amplituden der kürzeren Perioden verwendet. Die Annahme ist nur bedingt realistisch. Es müßte vielmehr bei einer genaueren Betrachtung davon ausgegangen werden, daß Obertiden und Haupttide im Stromquerschnitt unterschiedlich verteilt sind. Darüber hinaus ist ebenfalls unklar, wie sich die Strömungen verschiedener Perioden bei geschichtetem Wasserkörper auf den Querschnitt verteilen. Trotzdem konnten mit der Normierung die Streuungen der Werte in den Darstellungen der Abb. 6 wesentlich verringert werden.

## 4. Ergebnisse der Spektrenrechnung für die bedeutendsten Perioden

Der Abb. 5 ist zu entnehmen, daß die Maxima der Spektren im Verlauf der Tideelbe bei den gleichen Perioden und in teilweise zusammenhängendem Verlauf der Amplituden auftreten.

Die Abb. 6 zeigen die Werte aus den Amplitudenspektren für Perioden, bei denen große Amplitudenwerte vorkommen. Als Amplitude wird hier der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit bezeichnet. Die Amplituden sind mit dem Betrag der  $M_2$ -Amplitude der jeweiligen Zeitreihe normiert, um Einflüsse der Sensorposition zu verringern. Die Verteilung

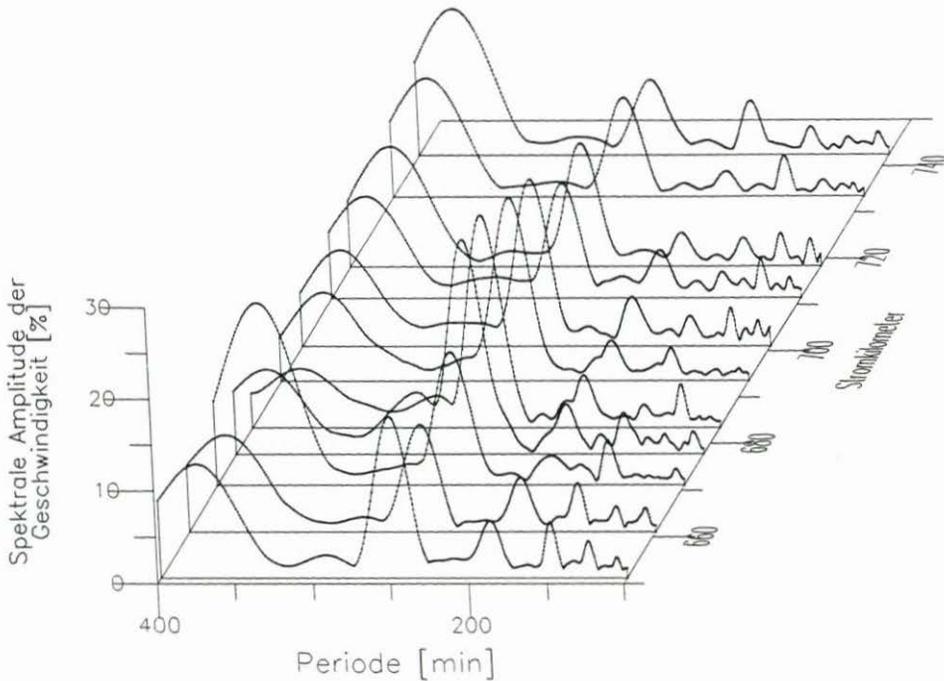


Abb. 5: Darstellung von Spektren der Oberflächenmessungen in räumlicher, den Verlauf entlang der Tideelbe zeigender Anordnung. Die Amplituden sind mit der nicht dargestellten Amplitude der halbtägigen Tide normiert

der Amplitudenwerte entlang der Elbe läßt nur für die langen Perioden eine grobe Übereinstimmung mit dem hypothetischen Verlauf erkennen. Für die Obertide mit der größten Amplitude, der Tide  $M_2/3$  mit der Periode 248 Minuten, scheint die Schwingung gegenüber der angenommenen stromab verschoben. Weitere Darstellungen zeigen überhaupt keine systematischen Verläufe der Schwingungsamplituden. Die Übereinstimmung setzt allerdings voraus, daß die Amplitude der fortschreitenden Welle wesentlich geringer ist als die der stehenden, was nur bei sehr großer Resonanz zu erwarten ist. Für die Perioden unter 100 Minuten stößt das Berechnungsverfahren an prinzipielle Grenzen, da die Perioden im Spektrum eng benachbart sind und dadurch die Auflösung und Genauigkeit der Berechnung gestört werden. Darüber hinaus ist bisher unberücksichtigt, wie Phasenbeziehungen der Obertiden zu systematischen Wechselwirkungen führen (z.B. Veränderung der Wellengeschwindigkeit durch die mit der Haupttide einhergehende Wassertiefenveränderung), die sich nicht im langfristigen Mittel ausgleichen.

Die Amplitudenspektren zeigen nicht nur große Werte für die ungeraden Obertiden, deren Resonanz der Annahme entsprechend zu Eigenschwingungen nach dem Prinzip der einseitig offenen Bucht führt, sondern ebenfalls große Werte für die geraden Obertiden. Die Verteilung der Amplituden im Strom legt die Vermutung nahe, daß ein zweites Schwingungssystem angeregt werden kann, das die Resonanz aus der Reflexion an zwei offenen Enden bezieht. Für die damit denkbaren Schwingungssysteme ist der Verlauf der Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 7 dargestellt.

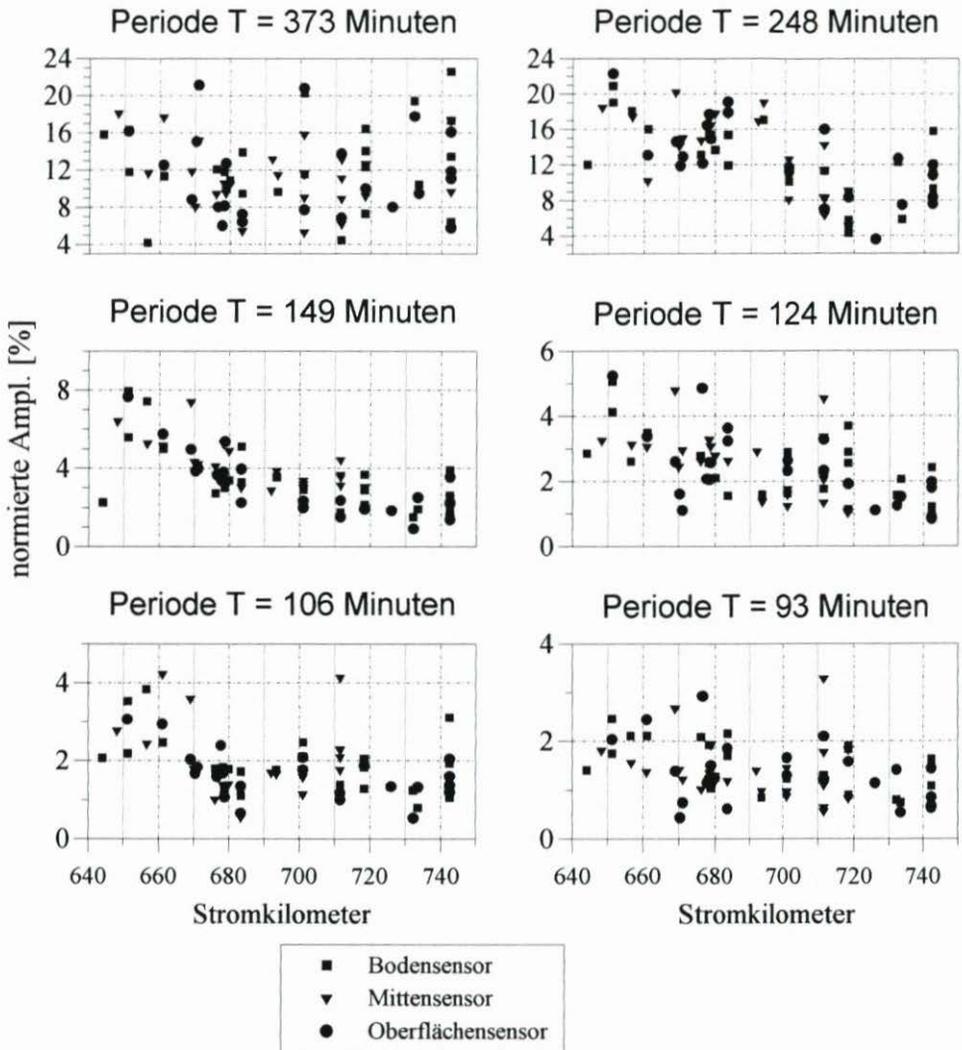


Abb. 6: Verteilung der Amplituden der Strömungsgeschwindigkeiten für die einzelnen Obertiden im Strom

Die Darstellung hat folgende morphologische Entsprechung:

1. Reflexion am alten Elbtunnel (Stromkilometer 622) in der Norderelbe und dem Wendebucken in der Süderelbe (Stromkilometer 618), wo jeweils die Sohle ansteigt, Reflexion am offenen Ende bei Neuwerk (Stromkilometer 747);
2. Reflexion am offenen Ende bei Hamburg im Bereich des Mühlenberger Lochs bzw. der mit größerer Tiefe unterhaltenen Strecke, die mit Stromkilometer 639 beginnt, Reflexion am offenen Ende bei Scharhörn (Stromkilometer 764).

Das ungerade Schwingungssystem weist gegenüber dem geraden eine Besonderheit auf (s. Abb. 7 oben): Bei Stromkilometer 685 zeigen alle Schwingungen das 0,7fache ihrer Maximalamplitude. Dies führt zu überdurchschnittlichen Strömungen an dieser Stelle. Der Ort

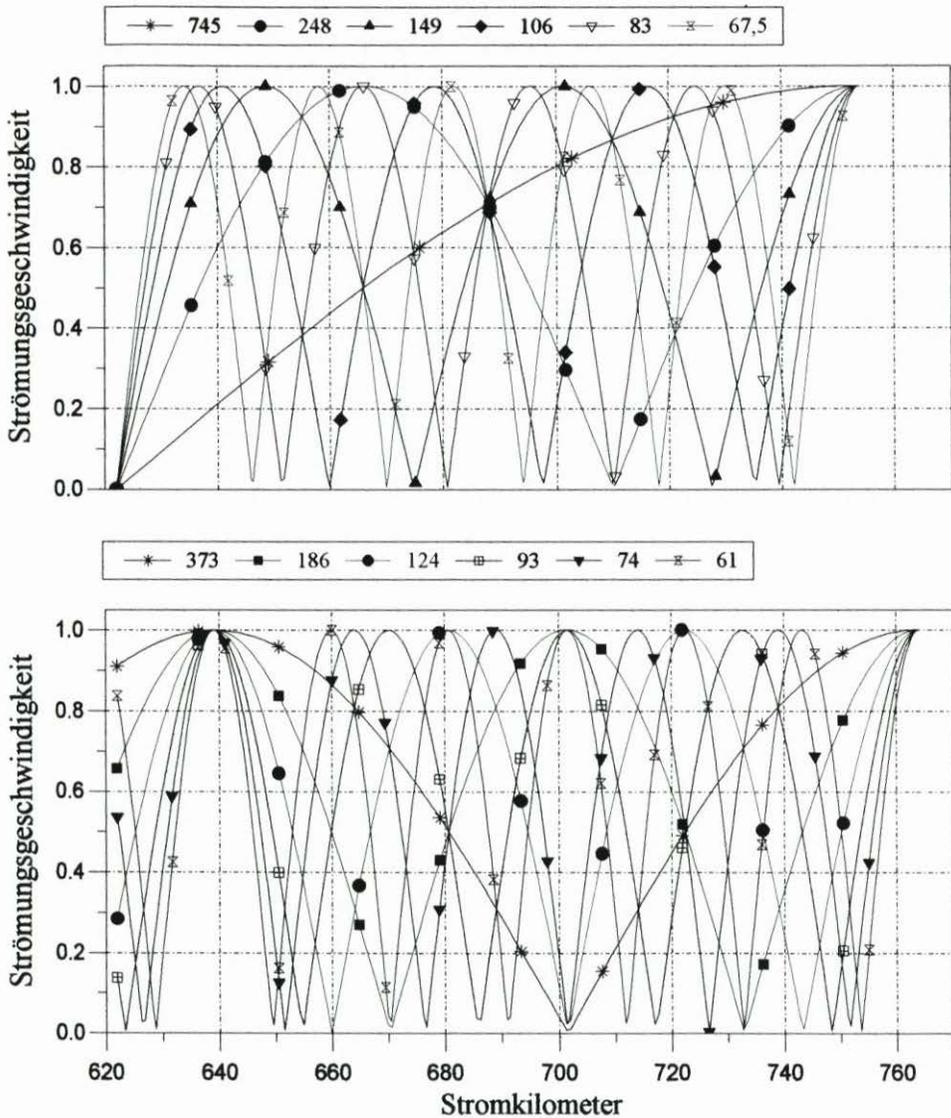


Abb. 7: Qualitativer Verlauf der Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten für die den ungeraden (oben) und den geraden (unten) Obertiden zuzuordnenden Schwingungen

bei St. Margarethen weist heute wie schon auf alten Karten eine Übertiefe von ca. -25 m bis -30 m KN auf.

Auf der Grundlage der Ergebnisse soll im folgenden versucht werden, eine mögliche Energieverteilung der Tideelbe darzustellen, die sich aus der Verbindung der angenommenen Lage der Schwingungen und den berechneten Amplituden ergibt. Hierzu wurden die geraden und die ungeraden Obertiden mit den aus der Spektrenrechnung ermittelten Amplituden aufsummiert, so daß die resultierende Kurve den Verlauf des Beitrages zu den Strömungsgeschwindigkeiten zeigt, der aus den Obertiden insgesamt resultiert. Dieser Verlauf

zeigt eine relativ deutliche Übereinstimmung mit der Lage der Unterhaltungsstrecken (Abb. 8). Die Baggerstellen Strkm 650 bis 655 (Lühesand), 670 bis 675 (Rhinplatte) und 700 bis 705 (Osteriff) korrelieren mit Minima der Verteilung der durch die stehenden Wellen erzeugten Strömungsgeschwindigkeiten. Die Einschränkungen der Gültigkeit der Betrachtung wurden bereits erwähnt: Die Amplituden sind ungenau, die Lage der Schwingungsknoten wird aus der auf Hypothesen basierenden Darstellung der Abb. 7 bezogen, die für die Elbe eine gleichbleibende, für die Wellengeschwindigkeit wirksame Wassertiefe annimmt, die Phasenbeziehungen sind nicht berücksichtigt. Die Rolle von weiteren Teilreflexionen und denkbaren untergeordneten Schwingungssystemen ist unbekannt. Die damit ungelösten Fragen sind nur über numerische Simulation darstellbar.

### 5. Berechnung der Phasenspektren

Zum Nachweis von stehenden Wellen reicht es nicht aus, entsprechend passende Maxima der Amplitudenspektren zu zeigen; vielmehr sollten auch die entsprechenden zu erwartenden Phasenbeziehungen nachzuweisen sein. Für stehende Wellen ist zu erwarten, daß sie überall im Strom die gleiche Phase zeigen, während fortschreitende Wellen kontinuierlich veränderliche Phasenbeziehungen zeigen.

Die Berechnung von Phasenbeziehungen weist nur die Obertide  $M_2/3$  mit der Periode 248 Minuten als stehende Welle aus; für die anderen Perioden zeigen die Phasenbeziehungen eine deutliche Dominanz der einlaufenden Wellen, so daß diese (auf dieser Grundlage) nicht mehr als stehende Wellen dargestellt werden können (Abb. 9). Hierbei ist zu beachten, daß

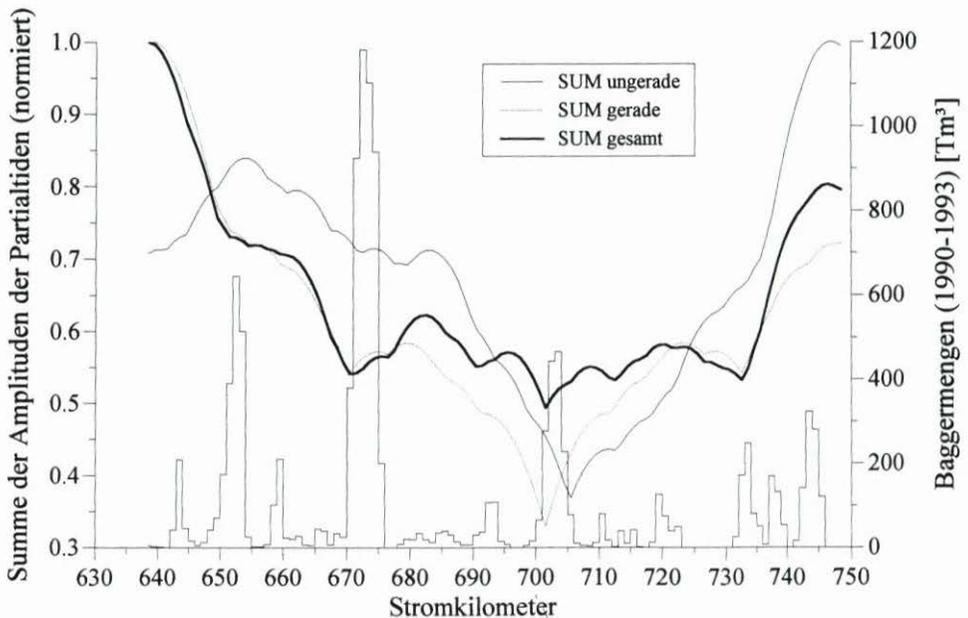


Abb. 8: Die Gegenüberstellung der Beträge, die aus der Resonanz der ungeraden (dünn) und der geraden Obertiden (punktiert) resultieren, mit der Verteilung der Baggermengen. Die Summe der beiden Schwingungssysteme (fett) zeigt die beste Übereinstimmung mit der Lage der Unterhaltungsstrecken

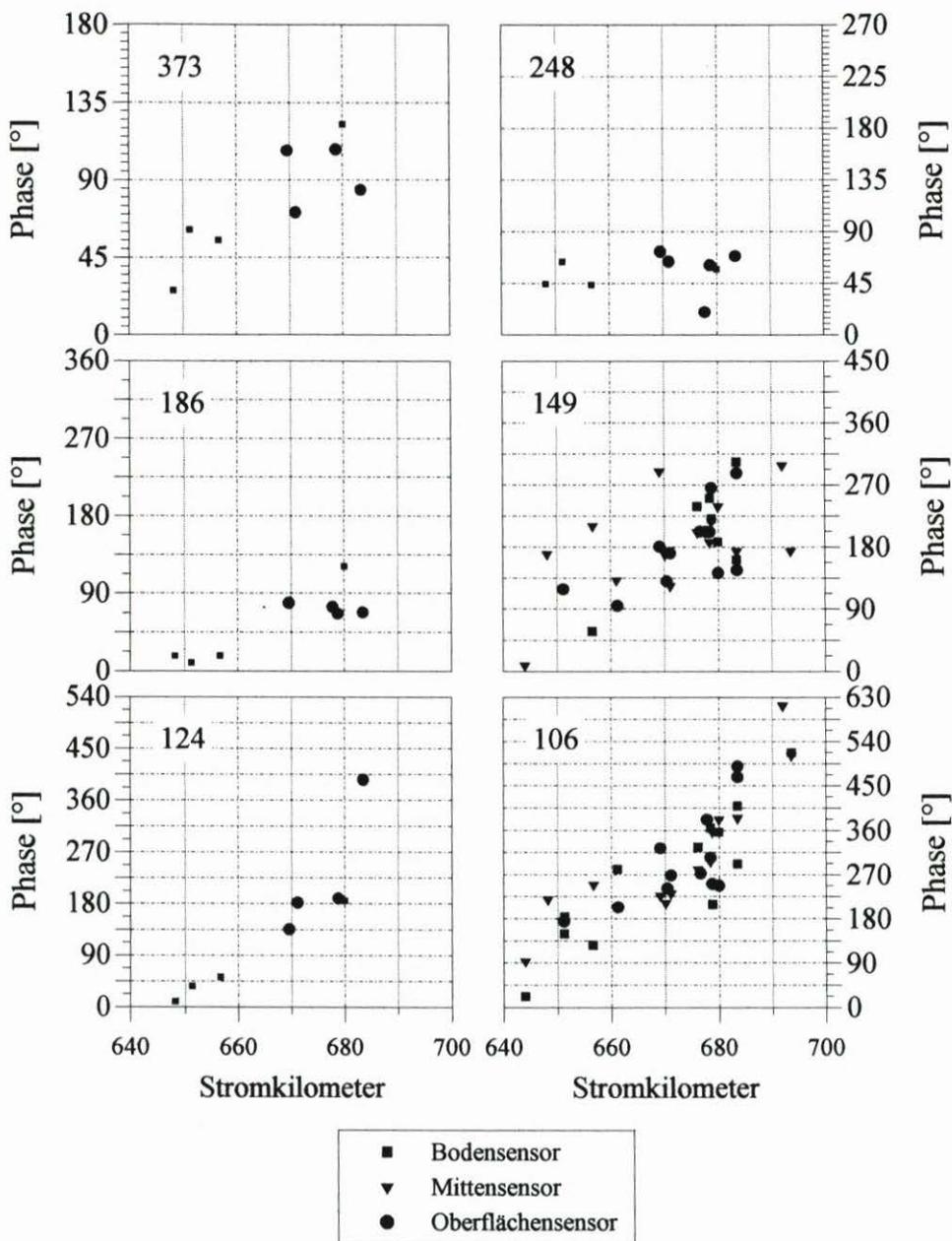


Abb. 9: Die ermittelten Phasenbeziehungen zeigen nur für die Periode 248 Minuten ( $M_z/3$ ) eine stehende Welle; für die anderen Perioden ist der Anteil stehender Wellen nicht darstellbar. Die Skalierungen sind so gewählt, daß für fortschreitende Wellen gleicher Geschwindigkeit die Phasenbeziehungen mit der gleichen Steigung erscheinen

der Übergang von laufenden zu stehenden Wellen bei zunehmender Reflexion fließend ist und sich beide Vorgänge überlagern. Einen Beitrag zur räumlich diskontinuierlich variierenden Energieverteilung liefert nur die Komponente der stehenden Wellen. Im Bereich des Mündungstrichters liefern die Phasenspektren keine sinnvoll zu interpretierenden Ergebnisse; die Ursache muß noch geklärt werden.

#### 6. Verhalten von kurzperiodischen Strömungsschwankungen während der Gezeitenperioden

Im Spektrbereich zwischen 50 und 100 Minuten sind noch wesentliche Amplituden zu beobachten. Diese Schwingungen sind so kurzzeitig in ihrem Auftreten und zeitlich so unkorreliert, daß sie bei der Berechnung von Spektren mit langen Fenstern unterdrückt werden. Sie erfordern daher die Berechnung von Spektren mittels gleitender Fenster. Dies ermöglicht auch die Darstellung der zeitlichen Variationen der Strömungswerte. Es wurde ermittelt, daß die Amplituden der berechneten Spektren mit der Stärke des Flut- und des Ebbstromes ebenfalls im Gezeitenrhythmus zu- und abnehmen (Abb. 10). Daraus folgt zwangsläufig, daß es sich nicht um Schwingungen handeln kann, die den gesamten Wasserkörper der Tideelbe gleichzeitig erfassen. Ob diese kurzperiodischen Erscheinungen sich überhaupt ortsfest einstellen, kann gegenwärtig nicht beantwortet werden. Dammschneider (1985,2) hat auf periodische, langsam wandernde Sohlformen in der Elbe hingewiesen und für diese einen Größenbereich von 5 bis 20 km angegeben, was einem Periodenbereich von 15 bis 60 Minuten entspricht. Diese Großformen stellen möglicherweise eine morphologische Entsprechung zu den beobachteten kurzperiodischen Strömungsschwankungen dar.

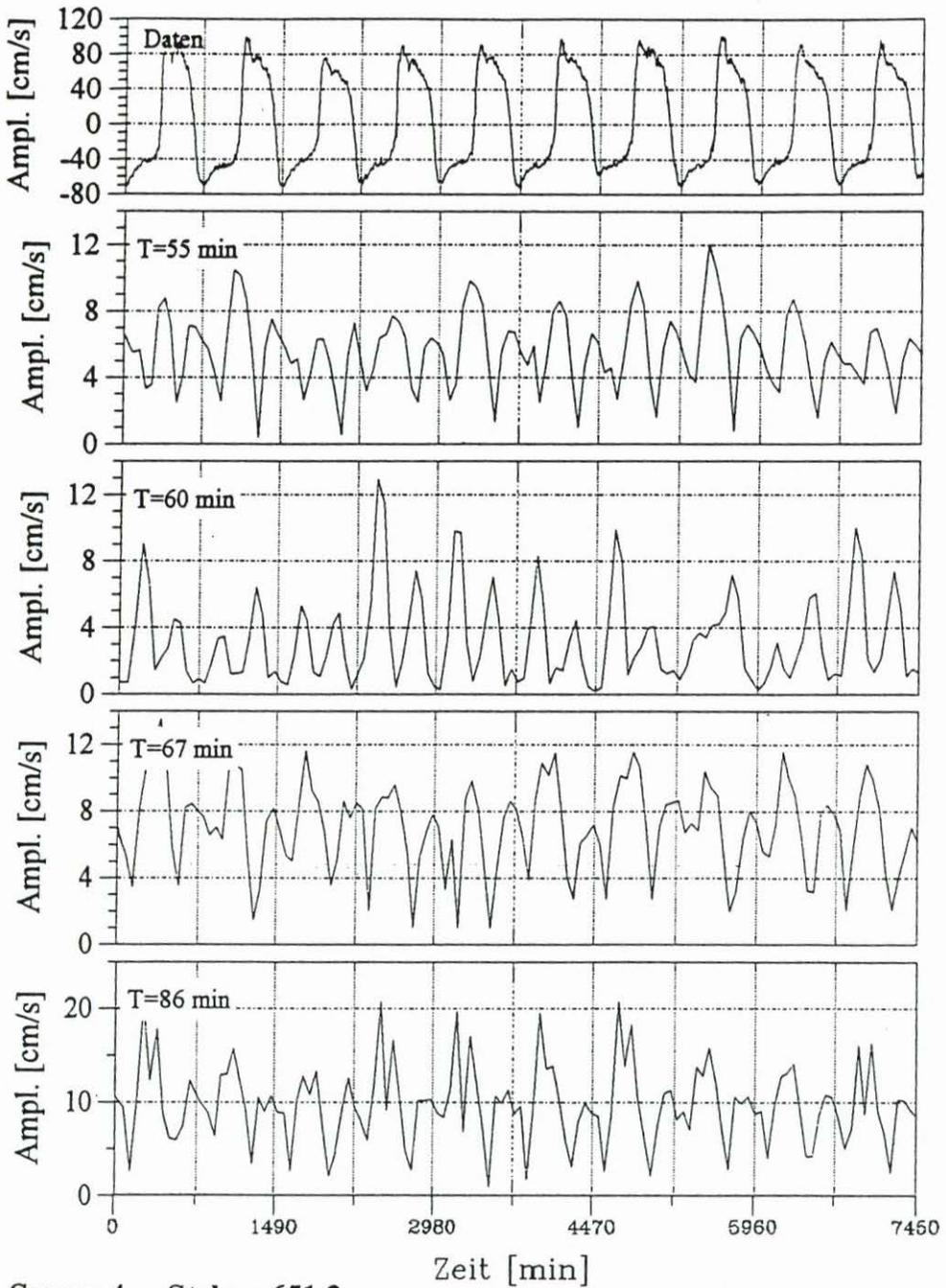
#### 7. Die Amplituden der Obertiden im Spring-Nipp-Tidenzyklus

Die Strömungen der Tiden variieren mit den Mondphasen in ungefährender Entsprechung zur Variation des Tidehubes. Für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Obertiden im Spring-Nipp-Tidenzyklus wurden die spektralen Amplituden mit gleitenden Fenstern berechnet. Die Abb. 11 und 12 zeigen je ein Ergebnis aus den zwei Meßphasen der ELBEX-Kampagne.

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß die Amplituden der Obertiden im zeitlichen Verlauf stärkere Variationen zeigen als die  $M_2$ . Teilweise betragen die Amplituden bei Springtiden das Zweieinhalbfache der Amplituden bei Nipptiden. Eine Aussage darüber, ob es sich um einlaufende Wellen oder in Resonanz befindliche Eigenschwingungen handelt, ist für Schwingungsperioden, die kürzer sind als  $M_2/3$ , auf der vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Ein Vergleich der Amplituden mit dem Gezeitenpotential eines weiter seewärts liegenden Ortes würde noch nicht eindeutig auf Resonanz schließen lassen, da es in der nichtlinearen Natur der Obertiden liegt, daß ihre relative Amplitude bei Zunahme der Dissipation im flacheren Wasser zunimmt (RAUSCHELBACH, 1924; D'HIERES, 1976; LE PROVOST, 1976).

#### 8. Langzeitiges Verhalten der Obertiden

Um die langzeitige Entwicklung der Obertiden darzustellen, wurden Daten aus den Dauerstrommessungen des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven ausgewertet. Der am



**Sensor 4 Strkm: 651,2**

**Fensterlänge 300 min  
Shift 60 min**

Abb. 10: Die Amplituden für den Spektralbereich von 55 bis 86 Minuten variieren mit der halbtägigen Gezeit

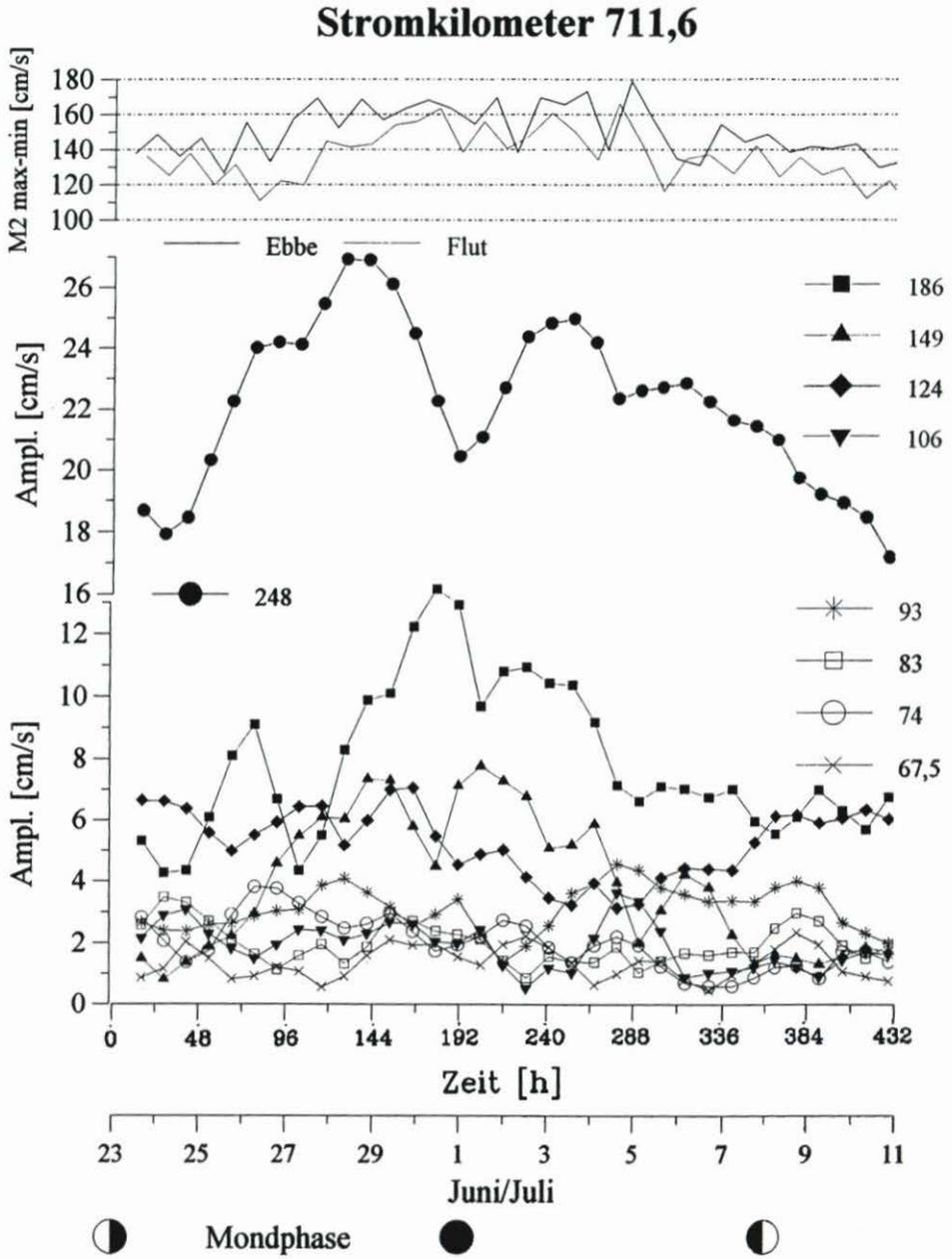


Abb. 11: Verlauf der Amplituden einzelner Oberschwingungen im Spring-Nipp-Tidenzyklus in der ersten Phase der ELBEX-Kampagne

### Stromkilometer 651,2

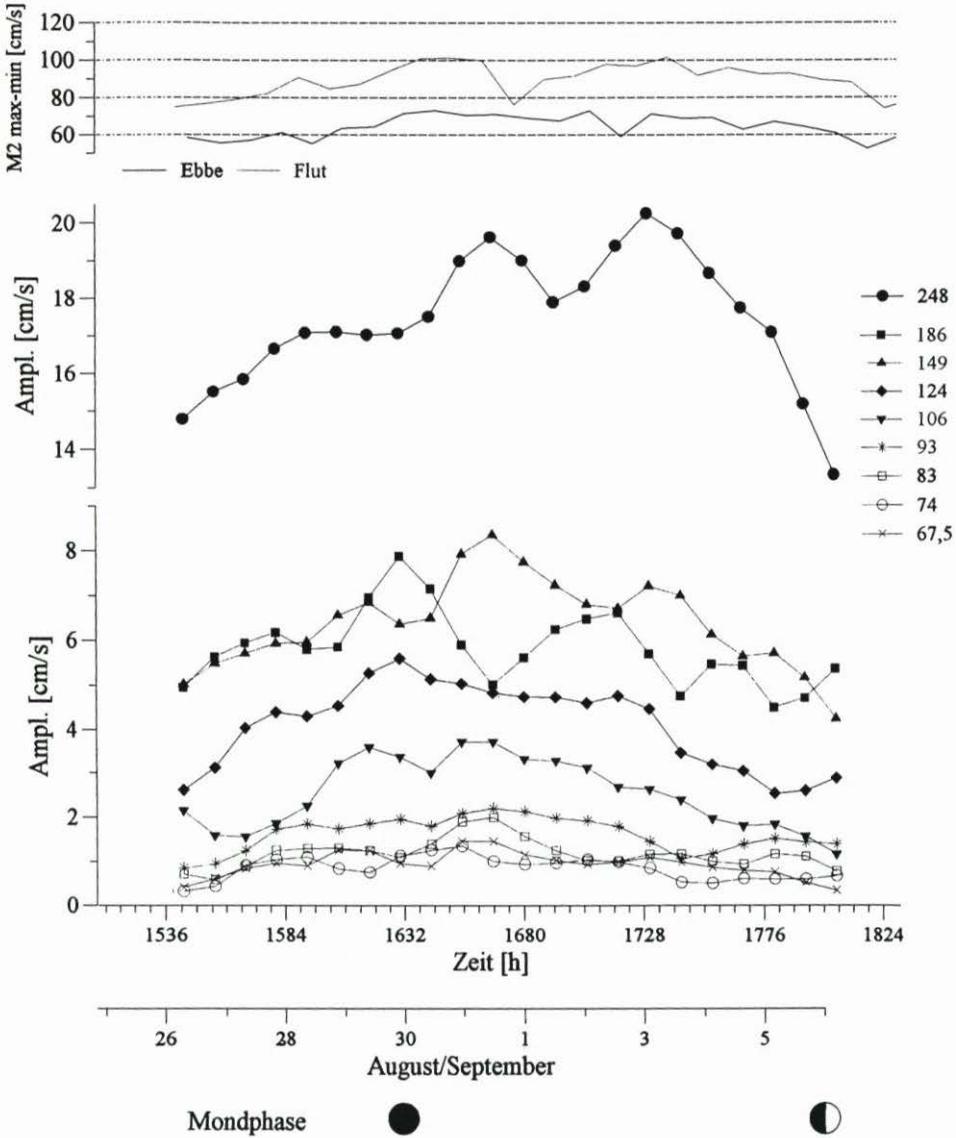


Abb. 12: Verlauf der Amplituden einzelner Oberschwingungen im Spring-Nipp-Tidenzyklus in der zweiten Phase der ELBEX-Kampagne

weitesten stromab liegende Strömungssensor liegt querab von Scharhörn am Rand des Fahrwassers und wurde wegen der Nähe zum angenommenen Reflexionsgebiet genutzt. Es ist hier zu erwarten, daß die spektralen Amplituden aller Obertiden in den Strömungswerten Maxima annehmen.

Die Berechnung der spektralen Amplituden erfolgte ebenfalls mittels gleitender Fenster (Hanning) und dem Goertzel-Algorithmus. Die Abb. 13 zeigt die Ergebnisse, die die Messungen von 1992 bis 1995 umfassen. Es sind Schwankungen zu erkennen, die zusammenhängend über mehrere Monate verlaufen. Die Amplituden variieren in der gemittelten Darstellung um den Faktor zwei bis drei; die nicht gemittelten Kurven zeigen auch den Verlauf in den Spring-Nipp-Zyklen und reichen von fast Null bis zum jeweilig auftretenden Maximum, das für  $M_2/2$  bei ca. 40 cm/s, bei  $M_2/3$  bis zu 15 cm/s beträgt. Es ist keine Korrelation im Langzeitverhalten der einzelnen Obertiden erkennbar. Der vermutete Zusammenhang zwischen den Amplituden einzelner Obertiden und den Eintreibungen an entsprechend zuzuordnenden Baggerstellen wurde noch nicht untersucht.

## 9. Konsequenzen für numerische Modelle

Die Berechnung von Wasserstandsentwicklungen mittels numerischer Modelle dürfte auch dann relativ genau sein, wenn die Obertidenresonanz nicht naturähnlich simuliert wird.

Bei der Anwendung numerischer Modelle für Fragestellungen, die eine genaue Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten und deren räumlicher Verteilung erfordern (Strombau, Baggerstrategien etc.), stellen sich folgende Fragen:

- Filtert die Ansteuerung des Modells durch die Wahl der Grenze und des Ansteuerungsparameters die Resonanz heraus, so daß diese nicht naturähnlich abgebildet wird? Bei Wahl des Reflexionsbereiches am offenen Ende als Modellgrenze und Ansteuerung mit dem Wasserstand ist in der Ansteuerung über die Eigenschwingungen keine Information enthalten, da diese an dieser Stelle nur in der dort maximalen Strömungsgeschwindigkeit steckt.
- Die naturähnliche Abbildung der räumlichen Verteilung der Strömungen setzt voraus, daß diese auch im Zeitbereich naturähnlich abgebildet werden. Zeigen die Modellergebnisse bezüglich Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeiten auch naturähnliche Spektren?

Diese Klärung sollte der Anwendung numerischer Modelle für Strombau- und Unterhaltungsfragestellungen vorangestellt werden. Gegebenenfalls ist die Ansteuerung entsprechend der Fragestellung so umzustellen, daß die zu untersuchenden Prozesse abgebildet werden. Hierbei werden möglicherweise andere Ereignisse im Modell unterdrückt.

## 10. Konsequenzen für den Strombau

Für den Strombau ergeben sich zusätzliche Gesichtspunkte durch die Deutung von Baggerstellen als Minima einer durch Überlagerung von Eigenschwingungen entstehenden Energieverteilung. Zusammengefaßt kann man sagen, daß für den Strombau die Wirkung der Maßnahme auf die Resonanz des Gesamtsystems zu beachten ist. Bei einem Strombaukonzept, das die Unterhaltungsaufwendungen insgesamt behandelt, ist die Resonanz des Systems für alle erheblichen Eigenschwingungen zu verringern. Dies kann mit numerischen Modellen untersucht werden.

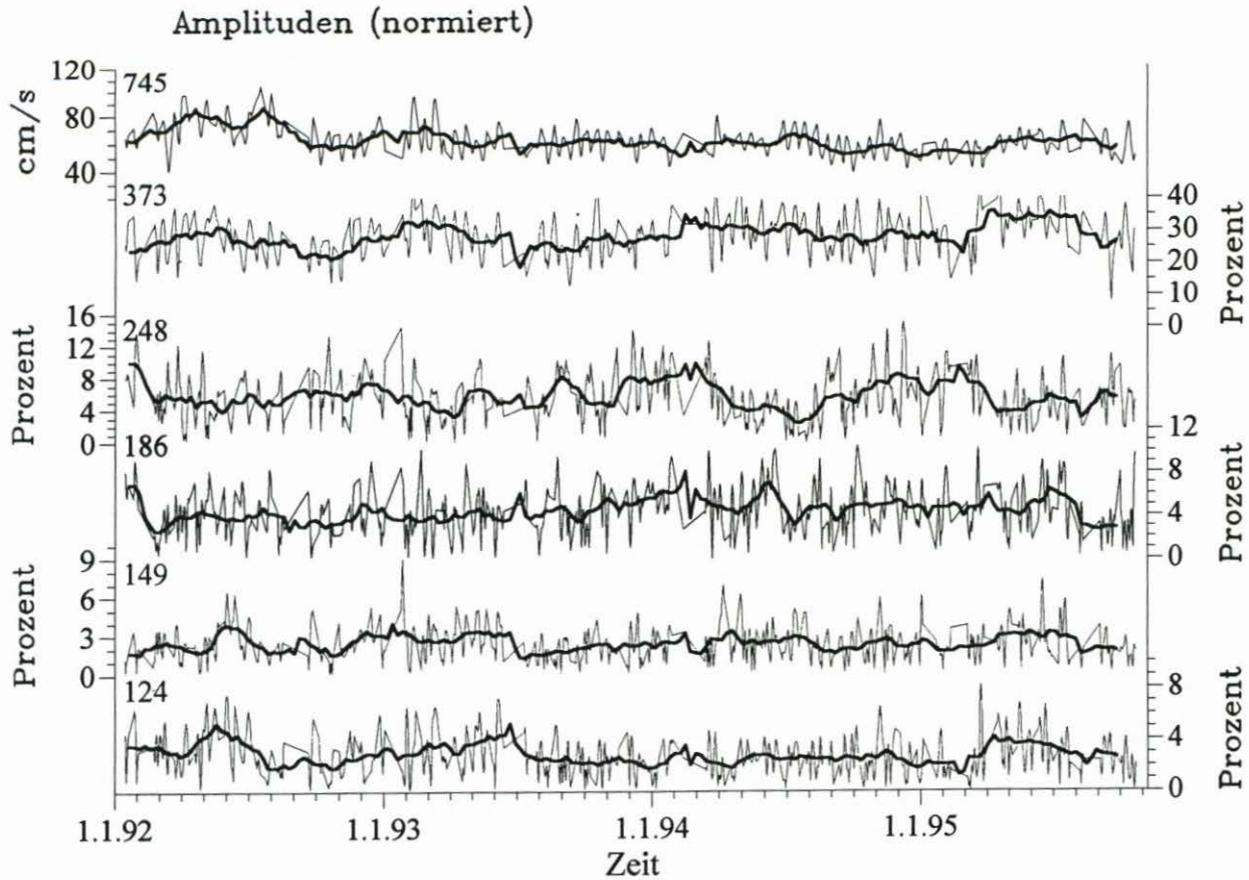


Abb. 13: Die Amplituden der wichtigsten Obertiden in einem Zeitraum von 4 Jahren; die dünnen Kurven geben den Verlauf in den Mondzyklen wieder. Die geglätteten Kurven zeigen zusammenhängende Schwankungen über mehrere Monate

## 11. Ausblick

Zur weiteren Klärung der Rolle von Eigenschwingungen für die Morphologie und Sedimentdynamik in der Elbe sind die Untersuchungen durch entsprechende Berechnungen auf der Basis der Pegelaufzeichnungen zu ergänzen. Auf dieser Grundlage sollte es möglich sein, die historische Entwicklung der Obertiden zu beschreiben, insbesondere die Frage nach einer möglichen Zunahme der Amplituden in den 80er Jahren, wie es die veränderten Baggermengenverteilungen nahelegen. Für die Frage nach einer möglichen zeitlichen Beziehung zwischen der Anregung von Obertiden und den Baggermengen sind sowohl umfangreiche statistische wie auch Modelluntersuchungen erforderlich.

## 12. Schriftenverzeichnis

- DAMMSCHNEIDER, H.-J. u. FELSHART, TH.: Querschwingungen in der Unterelbe – ein Beispiel für aktuelle Mäanderbildung in Tideflüssen? *Die Küste*, H. 42, 1985 (1).
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Quantitative Morphodynamik im Sohlenregime der Unterelbe. *Die Küste*, H. 42, 1985 (2).
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRAUSS, W. u. SIEDLER, G.: *Allgemeine Meereskunde*. Berlin, 1975.
- GOERTZEL, G.: An Algorithm For The Evaluation of Finite Trigonometric Series. – *Amer. Math. Monthly* 65, p. 34–35, 1958.
- HENSEN, W.: Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Tidewelle in einem Flusse. *Kl. St.* 38, WSD-Hamburg, 1942.
- D’HIERES, G. C. u. LE PROVOST, CH.: On the Use of an Hydraulic Model to Study Non Linear Tidal Deformation in Shallow Waters. Application to the English Channel. *Mém. Soc. Royal. Sci. Liège*, 6<sup>e</sup> ser., 1976.
- HINRICHSSEN, A.: *Der Einfluß des Oberwassers auf die Tideparameter der Elbe*. Mittlg. d. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel, 1991.
- LANGE, D.: *Spektralanalyse von Strömungsmessungen in der Unterelbe*. Kiel, Januar 1995, unveröffentlicht.
- LE PROVOST, CH.: Theoretical Analysis of the Structure of the Tidal Waves Spectrum in Shallow Water Areas. *Mém. Soc. Royal. Sci. Liège*, 6<sup>e</sup> ser., 1976.
- LÜDERS, K.: *Umrechnung von Gezeitenströmungsgeschwindigkeiten auf Mittelwerte*. Veröfftl. Marineobs. Wilhelmshaven NF, H. 1, Berlin, 1934.
- RAUSCHELBACH, H.: *Harmonische Analyse der Gezeiten des Meeres*. *Arch. Dt. Seewarte* 24, 1924.